

ANTONIO CREUS SOLÉ

Doctor Ingeniero Industrial

INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

6.^a edición

Alfaomega



marcombo

Esta obra (en su 1.ª edición) fue galardonada con el premio de Electrónica Profesional en la concesión de la 2.ª edición de los «Premios Mundo Electrónico».

© Antonio Creus Solé, 1997

Edición original publicada por
Marcombo, S. A., Barcelona, España
Derechos reservados © 1997

6a. edición

© 1998 ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
Pitágoras 1139, Col. Del Valle 03100, México, D. F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial
Registro No. 2317

ISBN 970-15-0246-9

© 1999 ALFOMEGA S.A.
Calle 23 # 24-20 Santafé de Bogotá
Email: alfaomег@andinet.com

ISBN: 958-682-135-8

Derechos reservados.

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Edición autorizada para venta en México, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Chile, Centroamérica, Estados Unidos y el Caribe.

Impreso en Colombia - Printed in Colombia
Impreso por Quebecor Impreandes

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

XIV Índice

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

PRÓLOGO

Los instrumentos de control están universalmente aceptados. Hoy en día es imaginable la existencia de una industria moderna sin instrumentos. Y, aunque existiera, las necesidades que crea el mercado de obtener productos terminados con las garantías de calidad exigidas y en la cantidad suficiente para que el precio obtenido sea competitivo, forzarían a modificar esta hipotética industria, incluyendo en la transformación subsiguiente la automatización del proceso mediante los instrumentos de medición y control.

En la industria se presenta pues, repetidamente, la necesidad de conocer y entender el funcionamiento de los instrumentos y el papel que juegan dentro del control del proceso. Así le ocurre al jefe o al operador del proceso, al proyectista y a su ingeniería, al estudiante y a cualquier persona que esté relacionada o vaya a relacionarse con el proceso, sin mencionar como es lógico al instrumentista o al técnico en instrumentos para quienes el tema es la esencia de su profesión.

A todas estas personas va dirigido este libro que ha sido escrito exponiendo los aspectos más interesantes para el técnico que, aunque no sea especialista en instrumentos, tenga la necesidad de conocer parte o todo el campo de la instrumentación industrial. Desde este punto de vista he intentado que los temas expuestos sean fácilmente inteligibles para el lector, aunque no tenga una preparación previa en instrumentación, con la excepción, naturalmente, de las partes de la obra dedicadas al análisis dinámico de los instrumentos, en las que se precisa una base matemática, que no obstante se facilita en forma resumida en el Apéndice A.1 para referencia del lector.

La obra consta de once capítulos y de un Apéndice. En el primer capítulo se examinan los términos que definen a los instrumentos y un código para su identificación.

En el segundo capítulo se estudian los transmisores.

En los capítulos 3, 4, 5, 6 y 7 se estudian las variables medidas y controladas en los procesos industriales, en particular, la presión, el caudal, el nivel y la temperatura, que son consideradas más importantes por ser medidas y controladas más a menudo que las otras.

En el capítulo octavo, se estudian los elementos finales de control que constituyen una de las partes más importantes del control, en particular las válvulas. Se describen sus elementos y se deducen las fórmulas de cálculo correspondientes.

La parte más importante de la obra está dedicada al control automático en el capítulo 9. Describe los sistemas de control utilizados explicando los conceptos

del control proporcional, integral y derivativo con sus valores consignados en el instrumento. Este capítulo examina, además, otros tipos de control que constituyen mejoras de los clásicos PID, y entre los que se encuentran, el control en cascada, el de relación, en adelanto, gama partida, selectivo, etc. Finalmente, se incluye una descripción de la evolución que ha ido experimentando la instrumentación en los últimos años de acuerdo con la industria, con la que ha ido avanzando paralelamente, ya que en realidad, los instrumentos de control han ido evolucionando de acuerdo con las necesidades que la industria ha ido creando.

En el capítulo 10 figuran los errores propios de los instrumentos, un sistema general de calibración y una descripción de los instrumentos de comprobación o patrones utilizados.

Finalmente, en el capítulo 11 figuran varias aplicaciones típicas en la industria para presentar al lector ejemplos que le permitan hacerse una idea de las múltiples aplicaciones de los instrumentos y su papel dentro del proceso. Este capítulo se limita, naturalmente, a estudiar sólo unos pocos procesos y todavía de forma simple, ya que un estudio exhaustivo requeriría una obra dedicada exclusivamente a esta parte de las aplicaciones, lo que queda, como es lógico, fuera de los límites de este libro.

Un Apéndice dedicado al análisis dinámico de los instrumentos, completa la obra. Permite al lector familiarizarse con los términos empleados en el análisis armónico, estudia el control desde el punto de vista dinámico, lo que permite deducir un camino en el cual están basados los criterios establecidos para el ajuste adecuado de los controladores y las técnicas del control avanzado.

Espero que la obra cumplirá su objetivo, contribuyendo a la mejor comprensión de la instrumentación, y que ayudará —conjuntamente con la bibliografía existente sobre el tema— a un mayor entendimiento entre el personal de proceso y el de instrumentación, al posibilitar el mejor conocimiento del papel que los instrumentos juegan en la industria, así como de sus limitaciones, que forzosamente las tienen al ser en realidad dispositivos mecánicos, electrónicos o digitales.

A. CREUS

PRÓLOGO A LA SEXTA EDICIÓN

La primera edición de este libro apareció en el año 1979, la segunda en 1981, la tercera en 1985, la cuarta en 1989 y la quinta en 1993. Durante estos años, las novedades incorporadas en la industria fueron el perfeccionamiento del control distribuido, aparecido inicialmente en 1975, la aparición del transmisor inteligente en 1983, y el transmisor inteligente digital en 1986, la aplicación masiva del microprocesador en todos los campos de la industria, con las espectaculares mejoras en los instrumentos de medición y control que de una precisión en la variable medida clásica de $\pm 0,5 \%$ han pasado a $\pm 0,1 \%$ y el perfeccionamiento del control avanzado, del control por redes neuronales y del control por lógica difusa.

En la quinta edición se incorporaron el medidor de paredes deformables y el oscilante en el capítulo 4 de Medida de Caudal, la válvula inteligente en el capítulo 8 de Elementos Finales de Control, barreras galvánicas en el capítulo 9 de Regulación Automática y se reordenó el análisis dinámico de los instrumentos.

En esta edición actual se han revisado todos los capítulos, en particular las definiciones de control en el capítulo 1, el medidor de Coriolis como medidor de caudal (capítulo 4), los pirómetros de infrarrojos y fotoeléctrico (capítulo 6), las galgas extensométricas (capítulo 7), las empaquetaduras y el ruido de las válvulas de control (capítulo 8), seguridad intrínseca (capítulo 9), y aparatos de calibración (capítulo 10). Se han añadido las comunicaciones en el capítulo 2 de Transmisores, el inventariado de tanques y el radar de microondas en el capítulo 5 de Medición de Nivel, el medidor de densidad de Coriolis y el sensor de humedad de polímero en el capítulo 7, materiales termoplásticos y la válvula de K_v o C_v ajustable en el capítulo 8 de Elementos Finales de Control, el control por redes neuronales y por lógica difusa en el capítulo 9 de Regulación Automática y en el Apéndice (Análisis dinámico de los instrumentos) y un resumen de la norma de calidad ISO 9002 en el capítulo 10 de Calibración de los Instrumentos.

Se ha conservado el texto de las ediciones anteriores, simplificándose el estudio de la instrumentación neumática, por entender el autor que, a pesar de la aplicación masiva del microprocesador en el campo del control de los procesos industriales, lo realmente importante, a la vista de los avances tan espectaculares con que evoluciona exponencialmente la técnica, es la comprensión del funcionamiento e interrelación de los instrumentos de medición y control. De aquí la conservación de las explicaciones básicas de los instrumentos neumáticos y electrónicos, y el punto de vista de considerar el instrumento dotado de microprocesador como una «caja negra» que se comporta igual que un instrumento convencional neumático o electrónico pero, lógicamente, proporcionando unas mejores prestaciones.

A. CREUS

GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos: la fabricación de los productos derivados del petróleo, de los productos alimenticios, la industria cerámica, las centrales generadoras de energía, la siderurgia, los tratamientos térmicos, la industria papelera, la industria textil, etc.

En todos estos procesos es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la conductividad, la velocidad, la humedad, el punto de rocío, etcétera. Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas constantes en condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar.

En los inicios de la era industrial, el operario llevaba a cabo un control manual de estas variables utilizando sólo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con que éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control. Estos instrumentos han ido liberando al operario de su función de actuación física directa en la planta y al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas; asimismo, gracias a los instrumentos ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad y de características, condiciones que al operario le serían imposibles o muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual.

Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos categorías: procesos continuos y procesos discontinuos. En ambos tipos, deben mantenerse en general las variables (presión, caudal, nivel, temperatura, etc.), bien en un valor deseado fijo, bien en un valor variable con el tiempo de acuerdo con una relación predeterminada, o bien guardando una relación determinada con otra variable.

El sistema de control que permite este mantenimiento de las variables puede

definirse como aquel que compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto.

El sistema de control exige pues, para que esta comparación y subsiguiente corrección sean posibles, que se incluya una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso. Este conjunto de unidades forman un bucle o lazo que recibe el nombre de bucle de control. El bucle puede ser abierto (fig. 1.1) o bien cerrado (fig. 1.2).

Un ejemplo de bucle abierto es el calentamiento de agua en un tanque mediante una resistencia eléctrica sumergida.

Un bucle cerrado representativo lo constituye la regulación de temperatura en un intercambiador de calor.

En ambos casos se observa que existen elementos definidos como el elemento de medida, el transmisor, el controlador, el indicador, el registrador y el elemento final. Estos elementos y otros adicionales se estudiarán en el resto del capítulo, considerando las características propias del instrumento (§ 1.2) y las clases de instrumentos (§ 1.3) que se emplean en los procesos industriales.

1.2 Definiciones en control

Los instrumentos de control empleados en las industrias de proceso tales como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc., tienen su propia terminología; los términos empleados definen las características propias de medida y de control y las estáticas y dinámicas de los diversos instrumentos utilizados:

— Indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación industrial empleen el mismo lenguaje. Las

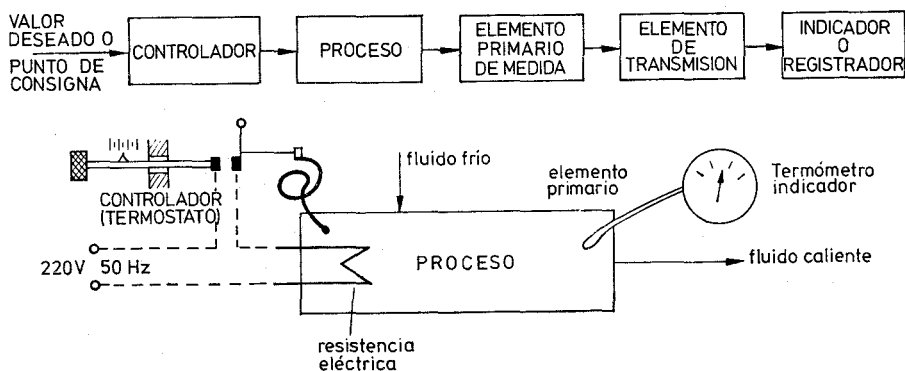


Fig. 1.1 Bucle abierto de regulación.

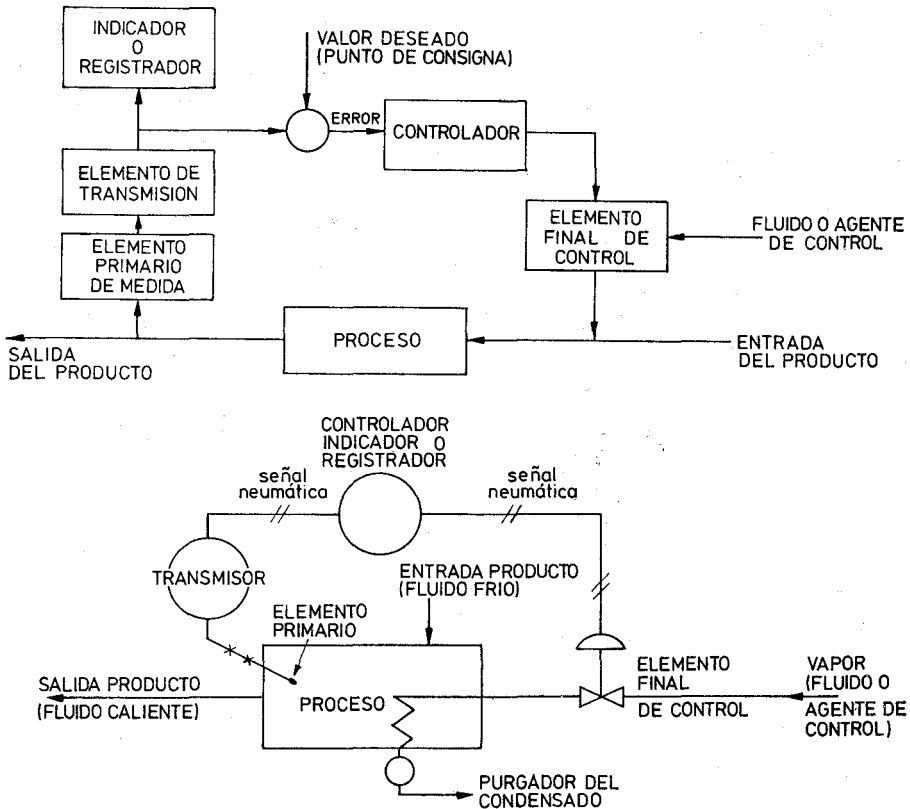


Fig. 1.2 Bucle cerrado de regulación.

definiciones de los términos empleados se relacionan con las sugerencias hechas por la SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association*) en su norma PMC 20-2-1970. Se representan en la figura 1.3 y son las siguientes (figuran entre paréntesis los términos ingleses equivalentes).

1.2.1 Campo de medida (*range*)

Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Por ejemplo: el campo de medida del instrumento de temperatura de la figura 1.3 es de 100-300° C.

Otro término derivado es el de *dinámica de medida o rangeabilidad (rangeability)*, que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. En el ejemplo anterior sería de $300/100 = 3$.

4 Instrumentación industrial

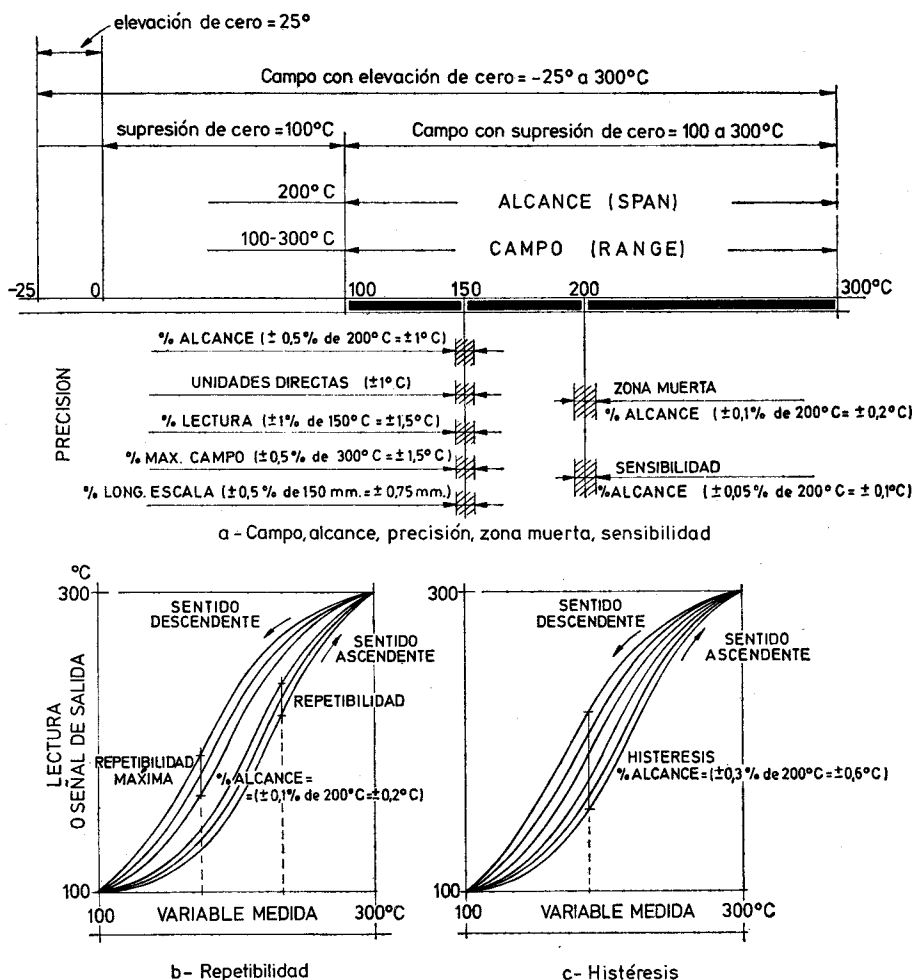


Fig. 1.3 Definiciones de los instrumentos.

1.2.2 Alcance (span)

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En el instrumento de temperatura de la figura 1.3, su valor es de 200°C .

1.2.3 Error

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características co-

munes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado *error dinámico* (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario (termopar, bulbo y capilar), de los medios de protección (vaina), etc. El *error medio* del instrumento es la media aritmética de los errores en cada punto de la medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos.

Si el límite del error relativo de cada instrumento es $\pm a$, $\pm b$, $\pm c$, $\pm d$, etc., el máximo error posible en la medición será la suma de los valores anteriores, es decir

$$\pm (a + b + c + d + \dots)$$

Ahora bien, como es improbable que todos los instrumentos tengan al mismo tiempo su error máximo en todas las circunstancias de la medida, suele tomarse como error total de una medición la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de los instrumentos, es decir, la expresión:

$$\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}$$

Por ejemplo, el error obtenido al medir un caudal con un diafragma, un transmisor electrónico de 4-20 mA c.c., un receptor y un integrador electrónicos es de:

Error del diafragma	2 %
Error del transmisor electrónico de 4-20 mA c.c	0,5 %
Error del receptor electrónico	0,5 %
Error del integrador electrónico	0,5 %

$$\text{Error total de la medición} = \pm \sqrt{2^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + 0,5^2} = 2,18 \%$$

1.2.4 Incertidumbre de la medida (*uncertainty*)

Los errores que existen necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos (deriva, ...), etc.

Cuando se dispone de una sola medida, la incertidumbre es:

$$i = K\sigma$$

6 Instrumentación industrial

donde: K = factor que depende del nivel de confianza ($K = 2$ para 95 %)
 σ = desviación típica del instrumento indicada por el fabricante

Veamos, por ejemplo, el caso de un manómetro tipo Bourdon de 120 kPa (1,2 bar o 1,18 kg/cm²) que se calibra con un patrón (comprobador de manómetros de peso muerto) de incertidumbre 2×10^{-4} , efectuándose la calibración a la temperatura de $20 \pm 2^\circ \text{C}$, y con ciclos de presiones aplicadas de subida y de bajada, que permiten comprobar si el instrumento tiene histéresis.

<i>Patrón</i> (kPa)	<i>Manómetro</i> Valor medio 4 medidas sin histéresis	<i>Corrección</i> (kPa)	<i>% Escala</i> (kPa)
20	20,10	- 0,10	0,08
40	40,20	- 0,20	0,17
60	59,85	+ 0,15	0,13
80	79,95	+ 0,05	0,04
95	95,15	- 0,15	0,13

La incertidumbre debida al patrón en el fondo de escala es:

$$2 \times 10^{-4} \times 120 \text{ kPa} = 0,024 \text{ kPa}$$

y su desviación típica, basada en las distribuciones normal y de Student, con un nivel de confianza del 95 %, es de:

$$\sigma_p = 0,024/2 = 0,012$$

La desviación típica del patrón (variación de presión del patrón con la temperatura = $21,6 \times 10^{-6}$), debida a las condiciones ambientales es:

$$\sigma_{\text{temp}} = (1/3) \times 21,6 \times 10^{-6} \times 2 \times 120 = 0,002 \text{ kPa}$$

La desviación típica de las medidas es la máxima obtenida:

$$\sigma_{\text{max}} = 0,095 \times 1,7 = 0,162$$

siendo 1,7 el factor multiplicador para cuatro medidas (subestimación de la incertidumbre que para diez medidas valdría la unidad)

$$\sigma_{\text{media}} = 0,162/2 = 0,081 \text{ kPa}$$

La variancia experimental es:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{0,012^2 + 0,002^2 + 0,081^2} = 0,082 \text{ kPa}$$

y la incertidumbre

$$\mu = \frac{2 \times 0,082}{120} \times 100 = 0,13 \% \text{ fondo escala}$$

1.2.5 Exactitud

Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

1.2.6 Precisión (*accuracy*)

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento (intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida), y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente 1 año). Hay varias formas para expresar la precisión:

- Tanto por ciento del alcance. Ejemplo: en el instrumento de la figura 1.3, para una lectura de 150° C y una precisión de $\pm 0,5 \%$ el valor real de la temperatura estará comprendido entre $150 \pm 0,5 \times 200/100 = 150 \pm 1$, es decir, entre 149 y 151° C ;
- Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo: Precisión de $\pm 1^{\circ} \text{ C}$;
- Tanto por ciento de la lectura efectuada. Ejemplo: Precisión de $\pm 1 \%$ de 150° C , es decir, $\pm 1,5^{\circ} \text{ C}$;
- Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo: Precisión de $\pm 0,5 \%$ de $300^{\circ} \text{ C} = \pm 1,5^{\circ} \text{ C}$;
- Tanto por ciento de la longitud de la escala. Ejemplo: Si la longitud de la escala del instrumento de la figura 1.3 es de 150 mm , la precisión de $\pm 0,5 \%$ representará $\pm 0,75 \text{ mm}$ en la escala.

La precisión varía en cada punto del campo de medida si bien, el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Por ejemplo: un manómetro puede tener una precisión de $\pm 1 \%$ en toda la escala y de $\pm 0,5 \%$ en la zona central. Cuando se desea obtener la máxima precisión del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida. Por ejemplo: un termómetro de $0\text{-}150^{\circ} \text{ C}$ y de $\pm 1 \%$ de precisión situado en un baño de temperatura constante a 80° C , puede ser calibrado a este valor, de modo que su precisión en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón. Es obvio que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la precisión se apartará de $\pm 1 \%$.

Hay que señalar que los valores de precisión de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por

los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábrica y de inspección. Por ejemplo, un instrumento que en fábrica tiene una precisión de calibración de $\pm 0,8 \%$, en inspección le corresponde $\pm 0,9 \%$ y la dada al usuario es $\pm 1 \%$.

Con ello se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes precisiones de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etc.

Un ejemplo ilustrativo de la diferencia entre exactitud y precisión es el siguiente:

Un manómetro de escala 0-10 bar que repita la medida de 5 bar muchas veces en las mismas condiciones, dará diferentes lecturas alrededor de 5 bar, que estarán distribuidas según una curva de campana (curva de Gauss). El manómetro será tanto más exacto cuanto más próximo esté el valor medio de las medidas al valor verdadero de 5 bar y será más preciso cuanto menor sea la dispersión de las medidas. Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos.

1.2.7 Zona muerta (*dead zone o dead band*)

Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: en el instrumento de la figura 1.3 es de $\pm 0,1 \%$, es decir, de $0,1 \times 200/100 = \pm 0,2^\circ \text{C}$.

1.2.8 Sensibilidad (*sensitivity*)

Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Por ejemplo, si en un transmisor electrónico de 0-10 bar, la presión pasa de 5 a 5,5 bar y la señal de salida de 11,9 a 12,3 mA c.c., la sensibilidad es el cociente:

$$\frac{(12,3 - 11,9)/(20 - 4)}{(5,5 - 5)/10} = \pm 0,5 \text{ mA c.c./bar}$$

Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Si la sensibilidad del instrumento de temperatura de la figura 1.3 es de $\pm 0,05 \%$, su valor será de $0,05 \times 200/100 = \pm 0,1^\circ \text{C/}^\circ \text{C}$.

Hay que señalar que no debe confundirse la sensibilidad con el término de zona muerta; son definiciones básicamente distintas que antes era fácil confundir cuando la definición inicial de la sensibilidad era «valor mínimo en que se ha de modificar la variable para apreciar un cambio medible en el índice o en la pluma de registro del instrumento».

1.2.9 Repetibilidad (*repeatability*)

La repetibilidad es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida, del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Se considera en general su valor máximo (repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del alcance; un valor representativo es el de $\pm 0,1 \%$. Nótese que el término repetibilidad no incluye la histéresis (figura 1.3 b).

Para determinarla, el fabricante comprueba la diferencia entre el valor verdadero de la variable y la indicación o señal de salida del instrumento recorriendo todo el campo, y partiendo, para cada determinación, desde el valor mínimo del campo de medida. De este modo, en el caso de un manómetro puede haber anotado los datos relacionados en la tabla siguiente.

Variable	Indicación	Variable	Indicación
Desde 0 a 0,5	0,502	Desde 0 a 5	5,010
Desde 0 a 1	1,006	Desde 0 a 5,5	5,505
Desde 0 a 1,5	1,509	Desde 0 a 6	6,006
Desde 0 a 2	2,008	Desde 0 a 6,5	6,501
Desde 0 a 2,5	2,506	Desde 0 a 7	7,003
Desde 0 a 3	3,007	Desde 0 a 7,5	7,504
Desde 0 a 3,5	3,503	Desde 0 a 8	8,009
Desde 0 a 4	4,006	Desde 0 a 8,5	8,508
Desde 0 a 4,5	4,507	Desde 0 a 9	9,008
		Desde 0 a 10	10,005

La repetibilidad viene dada por la fórmula $\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$ resultando:

$$\sqrt{\frac{0,00785}{19}} = \pm 0,02 \%$$

1.2.10 Histéresis (*hysteresis*)

La histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.

Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: Si en un termómetro de 0-100 %, para el valor de la variable de 40 °C, la aguja marca

39,9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40,1 al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis es de:

$$\frac{40,1 - 39,9}{100 - 0} \cdot 100 = \pm 0,2 \%$$

En la figura 1.3 c pueden verse las curvas de histéresis que están dibujadas exageradamente para apreciar bien su forma. Hay que señalar que el término zona muerta está incluido dentro de la histéresis.

1.2.11 Otros términos

Empleados en las especificaciones de los instrumentos son los siguientes:

Campo de medida con elevación de cero

Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo. Por ejemplo, -10° a 30° C.

Campo de medida con supresión de cero

Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo.

Elevación de cero

Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.

Supresión de cero

Es la cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.

Deriva

Es una variación en la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Se suelen considerar la deriva de cero (variación en la señal de salida para el valor cero de la medida atribuible a cualquier causa interna) y la deriva térmica de cero (variación en la señal de salida a medida cero, debida a los efectos únicos de la temperatura). La deriva está expresada usualmente en porcentaje de la señal de salida de la escala total a la temperatura ambiente, por unidad, o por intervalo de variación de la temperatura. Por ejemplo, la deriva térmica de cero de un instrumento en condiciones de temperatura ambiente durante 1 mes fue de 0,2 % del alcance.

Fiabilidad

Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

Resolución

Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida (expresados en tanto por ciento de la salida de toda la escala) al ir variando continuamente la medida en todo el campo. Es también el grado con que el instrumento puede discriminar valores equivalentes de una cantidad, o la menor diferencia de valor que el aparato puede distinguir.

Resolución infinita

Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

Trazabilidad (Traceability)

Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones, con todas las incertidumbres determinadas.

Ruido

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

Linealidad

La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

Linealidad basada en puntos

Falta de linealidad expresada en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes al cero y al 100 % de la variable medida.

Estabilidad

Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

Temperatura de servicio

Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

Vida útil de servicio

Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

Reproductibilidad

Capacidad de reproducción de un instrumento de las medidas repetitivas de la lectura o señal de salida para el mismo valor de la variable medida alcanzado en ambos sentidos, en las mismas condiciones de servicio y a lo largo de un período de tiempo determinado. Por ejemplo, un valor representativo sería $\pm 0,2\%$ del alcance de la lectura o señal de salida a lo largo de un período de 30 días.

Respuesta frecuencial

Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida. Se especifica usualmente como «dentro de $\pm \dots\%$ de \dots a \dots Hz».

1.3 Clases de instrumentos

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se considerarán dos clasificaciones básicas: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso.

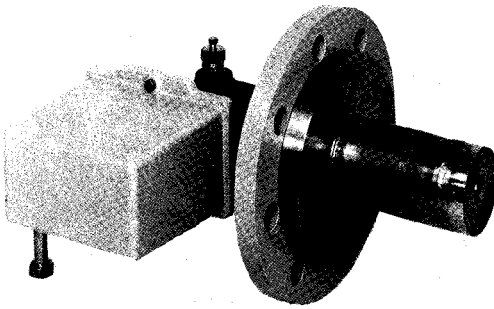
1.3.1 En función del instrumento

De acuerdo con la función del instrumento, obtenemos las formas siguientes:

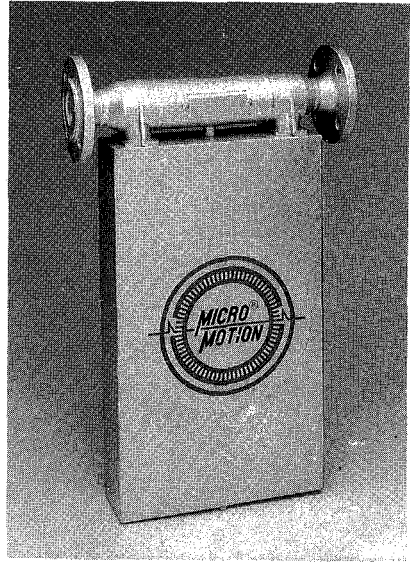
Instrumentos *ciegos* (fig. 1.4), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.

Los instrumentos *indicadores* (fig. 1.5) disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.

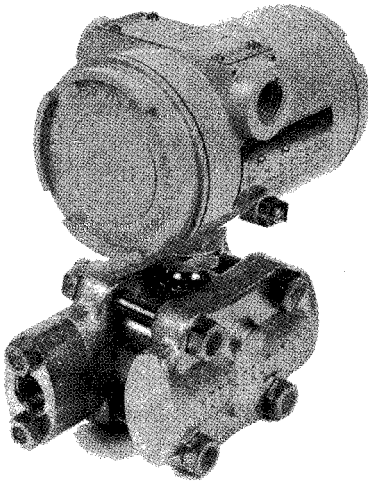
Los instrumentos *registradores* (fig. 1.6) registran con trazo continuo o a pun-



(Cortesía de Siemens)



(Cortesía de Rosemount)



(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)

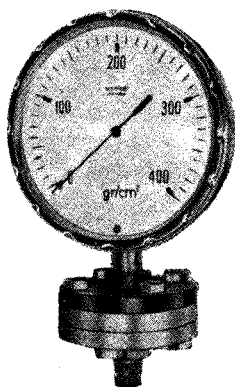
Fig. 1.4 Instrumentos ciegos.

tos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico.

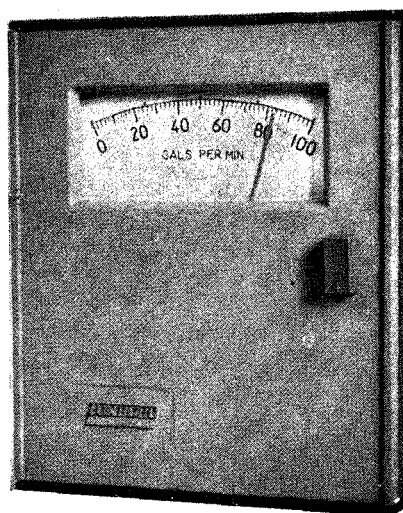
Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora.

Los *elementos primarios* (fig. 1.7) están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

Los *transmisores* (fig. 1.8) captan la variable de proceso a través del ele-



(Cortesía de Bourdon)



(Cortesía de Foxboro)

Fig. 1.5 Instrumentos indicadores.

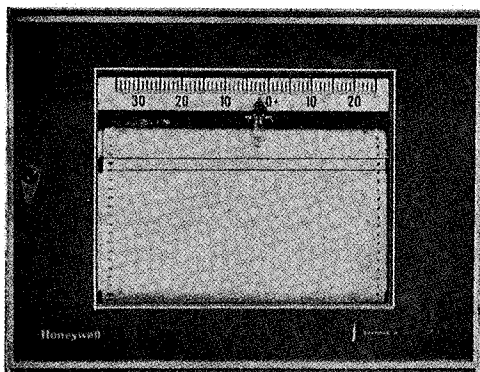
mento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0,206 – 1,033 bar (0,21 – 1,05 kg/cm²) por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar (0,2 a 1 kg/cm²). Asimismo, se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA cc., si bien la señal normalizada es de 4-20 mA c.c. La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador.

El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.

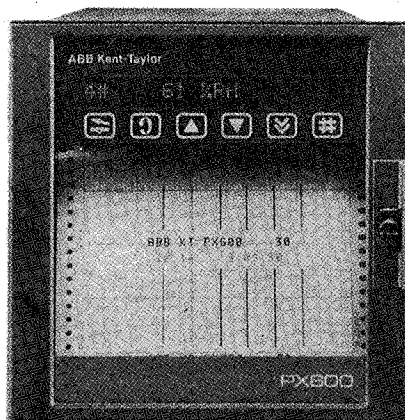
Los *transductores* reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso a señal neumática), etc.

Los *convertidores* (fig. 1.9) son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo: un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica, un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

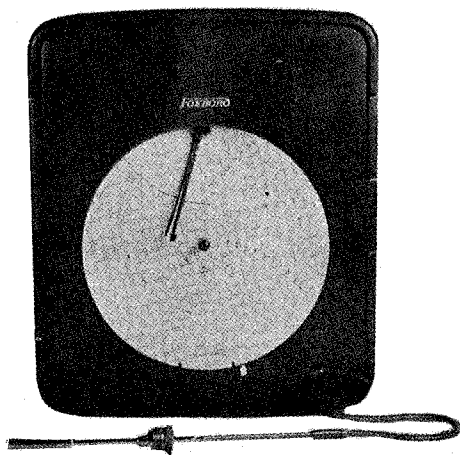
Conviene señalar que a veces se confunde convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.



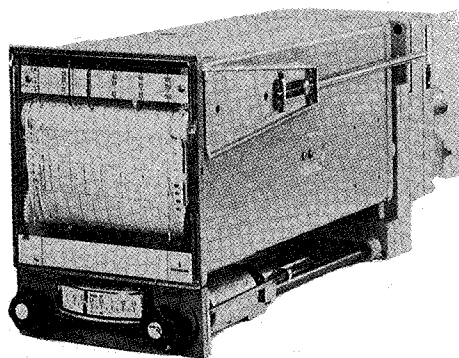
(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)



(Cortesía de Foxboro)



(Cortesía de Siemens)

Fig. 1.6 Instrumentos registradores.

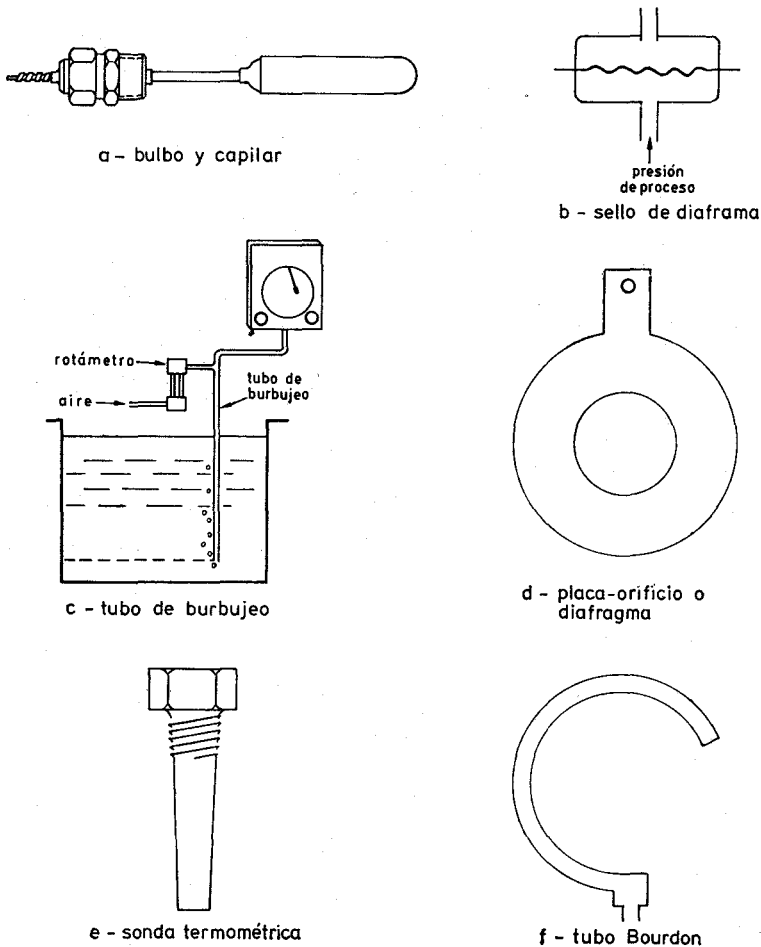


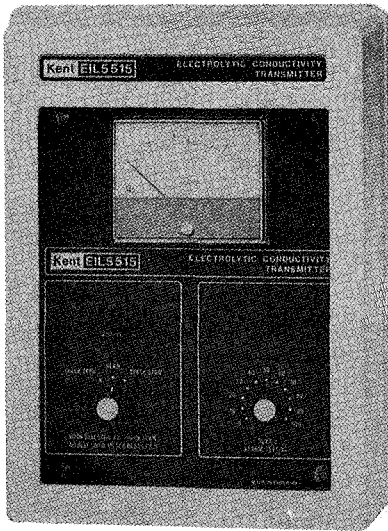
Fig. 1.7 Elementos primarios.

Los *receptores* reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA c.c. en señal electrónica, que actúan sobre el **elemento final de control**.

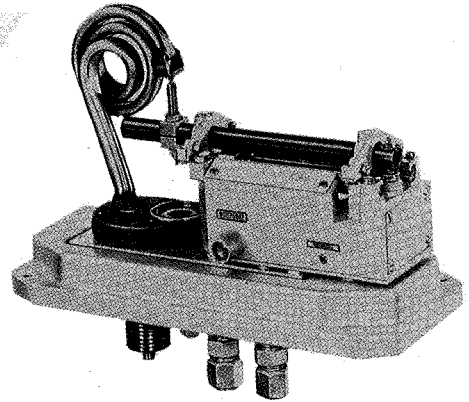
Los *controladores* (fig. 1.10) comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.

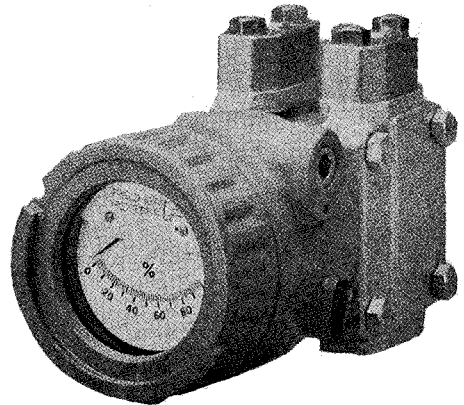
El *elemento final de control* (fig. 1.11) recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático, el ele-



(Cortésia de ABB-Kent-Taylor)

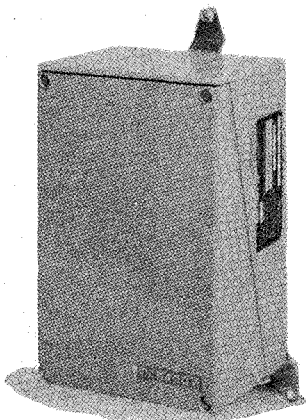


(Cortésia de Siemens)

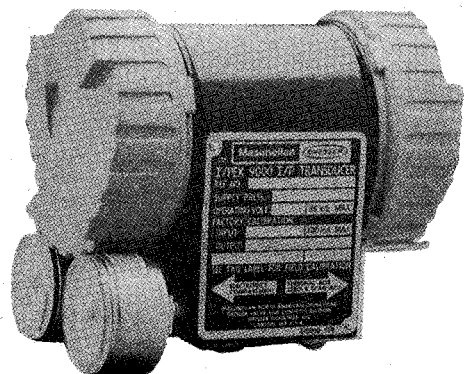


(Cortésia de Fischer Porter)

Fig. 1.8 Transmisores.

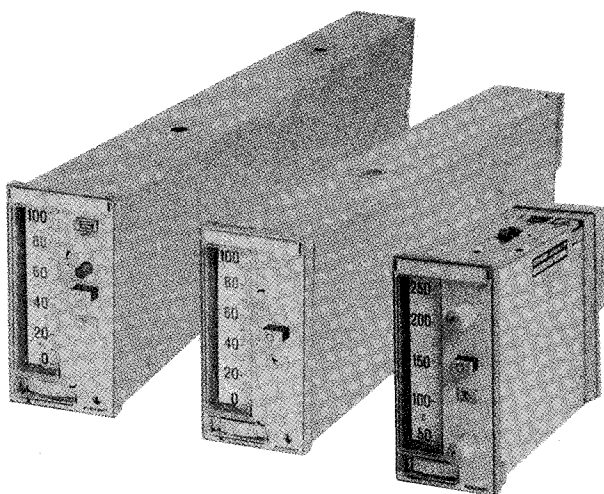


(Cortésia de Eckardt)

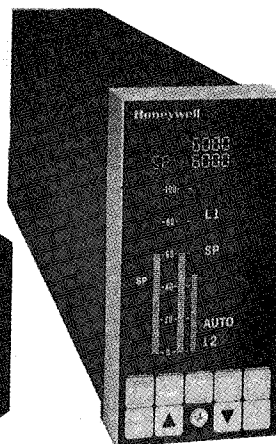
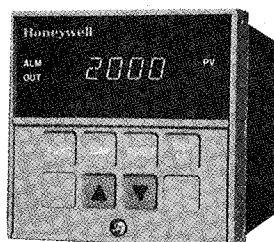


(Cortésia de Masoneilan)

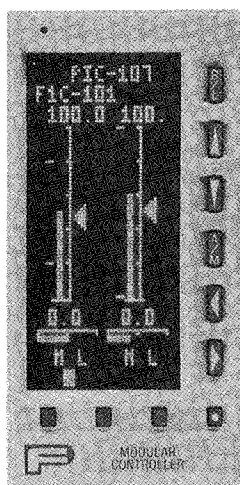
Fig. 1.9 Convertidores.



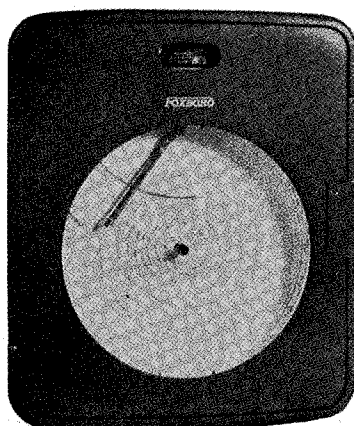
(Cortesía de Eckardt)



(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de Fischer Porter)



(Cortesía de Foxboro)

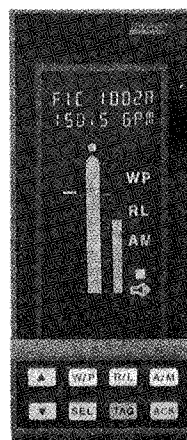
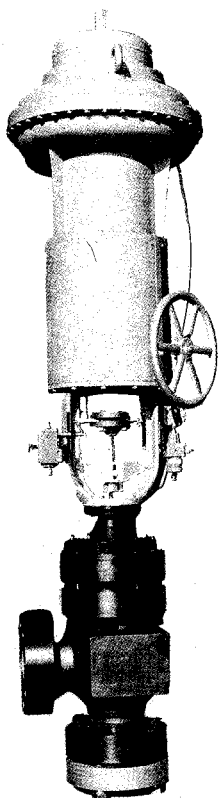
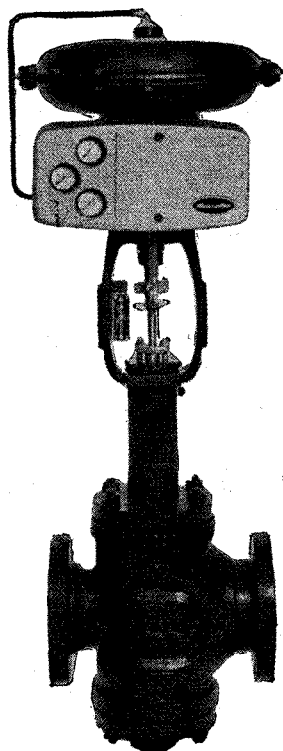


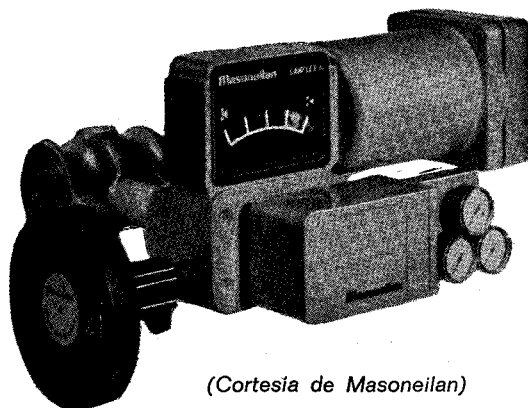
Fig. 1.10 Controladores.



(Cortesía de Gulde)



(Cortesía de Masoneilan)



(Cortesía de Masoneilan)

Fig. 1.11 Elemento final de control.

mento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital a neumática 3-15 psi. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

En el control electrónico y en particular en regulación de temperatura de hornos pueden utilizarse rectificadores de silicio (tiristores). Éstos se comportan esencialmente como bobinas de impedancia variable y varían la corriente de alimentación de las resistencias del horno, en la misma forma en que una válvula de control cambia el caudal de fluido en una tubería.

Las señales neumáticas (3-15 psi o 0,2-1 bar o 0,2-1 kg/cm²) y electrónica (4-20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. No ocurre así en los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) donde las señales son propias de cada suministrador. No obstante, existe el propósito de normalización, en particular en los sistemas de control distribuido, por parte de firmas de instrumentos de control (Bailey, Foxboro, Honeywell, Rosemount y otros) que estudian la aplicación de un lenguaje o protocolo de comunicaciones. Existe un comité internacional de normas IEC-65C que recibe la colaboración de comités ISA SP50, ISA SP72 y EUROBOT de EUREKA, y que trabajan también en el campo de normalización de las comunicaciones digitales entre los instrumentos de campo y los sistemas de control en la llamada tecnología del «fieldbus» o bus de campo. Intentos parciales de normalización se realizan en procesos discontinuos (norma NAMUR) por empresas tales como AK20, BASF, BAYER, CIBA-GEIGY... que definen la misma programación para fábricas distintas con el fin de obtener productos con la misma calidad.

1.3.2 En función de la variable de proceso

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor neumático lo podríamos considerar instrumento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dínamo.

Asimismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final. Así ocurre en el caso de un transmisor electrónico de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4-20 mA c.c., un convertidor intensidad-presión (I/P) que transforma la señal de 4-20 mA c.c. a neumática de 3-15 psi y la válvula neumática de control; todos estos instrumentos se consideran de nivel.

En la designación del instrumento se utiliza en el lenguaje común las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos de presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores controladores registradores de caudal, etc.

En la figura 1.12 pueden verse los diversos instrumentos descritos.

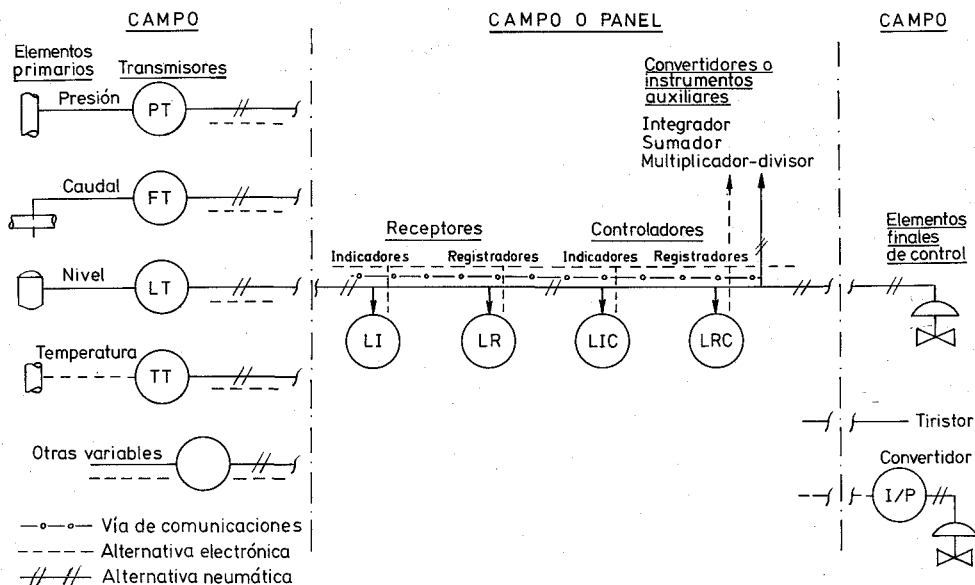


Fig. 1.12 Clases de instrumentos.

Nótese que se consideran instrumentos de campo y de panel; la primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.) mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o pupitres situados en salas aisladas o en zonas del proceso.

1.3.3 Código de identificación de instrumentos

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria en industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, y entre ellas se encuentra como una de las importantes la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos, ISA (*Instrument Society of America*) cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc.

Figura a continuación un resumen de las normas ISA-S5.1-84 de ANSI/ISA del año 1984 con una rectificación el año 1992, sobre instrumentación de medición y control, de ISA-S5.2-76 del año 1976 con una rectificación el año 1992 Binary Logic Diagrams for Process Operations sobre símbolos de operaciones binarias de procesos, y de ISA-S5.3 Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems 1983, sobre símbolos de sistemas de microprocesadores con control compartido. Hay que señalar al lector que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

Resumen Norma ISA-S5.1-84

Generalidades

- A) Cada instrumento debe identificarse con sistema de letras que lo clasifique funcionalmente. Una identificación representativa es la siguiente:

T R C		2 A	
Primera letra	Letras sucesivas	Número del bucle	Sufijo (no se usa normalmente)
Identificación funcional		Identificación del bucle	

- B) El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro. Para ello conviene:
- Disponer las letras en subgrupos. Por ejemplo, un transmisor registrador de relación de caudales con un interruptor de alarma de relación de caudales puede identificarse con dos círculos uno con FFRT-3 y el otro FFS-3.
 - En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra I (indicación).

- c) Los bucles de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de números.

Esta puede empezar con el número 1 o cualquier otro número conveniente, tal como 301 o 1201 que puede incorporar información codificada tal como área de planta.

- d) Si un bucle dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo FV-2A, FV-2B, FV-2C, etc., o TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc. Estos sufijos pueden añadirse obedeciendo a las siguientes reglas:

1. Deben emplearse letras mayúsculas, A, B, C, etc.
2. En un instrumento tal como un registrador de temperatura multipunto que imprime números para identificación de los puntos, los elementos primarios pueden numerarse TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etcétera.
3. Las subdivisiones interiores de un bucle pueden designarse por sufijos formados por letras y números.

- e) Un instrumento que realiza dos o más funciones puede designarse por todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de caudal FR-2 con pluma de presión PR-4 se designa preferentemente FR-2/PR-4 o bien UR-7; un registrador de presión de dos plumas como PR-7/8; y una ventanilla de alarma para temperatura alta y baja como TAH/L-9.

- f) Los accesorios para instrumentos tales como rotámetros de purga, filtros manorreductores y pots de sello que no están representados explícitamente en un diagrama de flujo, pero que necesitan una identificación para otros usos deben tenerla de acuerdo con su función y deben emplear el mismo número del bucle que el del instrumento asociado. Alternativamente, los accesorios pueden emplear el mismo número de identificación que el de sus instrumentos asociados, pero con palabras aclaratorias si ello es necesario.

Por consiguiente, una brida para una placa-orificio FE-7 debe designarse como FX-7 o bien como FE-7 brida. Un rotámetro regulador de purga asociado con un manómetro PI-8 debe identificarse como FIVC-8, pero puede también marcarse PI-8 purga. Una sonda empleada con un termómetro TI-9 será TW-9, o bien, TI-9 sonda.

TABLA 1.1 Letras de identificación

1.ª Letra		Letras sucesivas		
Variable medida (3)	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación
A Análisis (4)	Alarma	.....	.....
B Llama (quemador)	Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
C Conductividad	Control	.....
D Densidad o peso específico	Diferencial (3)	.....	.....	.....
E Tensión (f.e.m.)	Elemento primario	.....	.....
F Caudal	Relación (3)	.....	.....	.....
G Calibre	Vidrio (8)	.....	.....
H Manual	Alto (6) (13) (14)
I Corriente eléctrica	Indicación (9) o indicador	.....	.....
J Potencia	Exploración (6)	.....	Estación de control	.....
K Tiempo
L Nivel	Luz piloto (10)	.....	Bajo (6) (13) (14)
M Humedad	Medio o intermedio (6) (13)
N Libre (1)	Libre	Libre	Libre
O Libre (1)	Orificio	.....	.....
P Presión o vacío	Punto de prueba	.....	.....
Q Cantidad	Integración (3)	.....	.....	.....
R Radiactividad	Registro	.....	.....
S Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)	.....	Interruptor	.....
T Temperatura	Transmisión o transmisor	.....
U Multivariable (5)	Multifunción (11)	Multifunción (11)	Multifunción (11)
V Viscosidad	Válvula	.....
W Peso o Fuerza	Vaina	.....	.....
X Sin clasificar (2)	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y Libre (1)	Relé o computador (12)	.....
Z Posición	Elemento final de control sin clasificar	.....

(1) Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el módulo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.

(2) La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo: XR-3 registrador de vibración.

(3) Cualquier letra primera si se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (integración) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente.

(4) La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la tabla 1.1, que no

están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.

(5) El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primeras letras, es opcional.

(6) El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.

(7) El término seguridad, debe aplicarse sólo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV.

La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio, o válvula de seguridad de alivio.

(8) La letra de función pasiva *vidrio*, se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.

(9) La letra *indicación* se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.

(10) Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva L. Por ejemplo, una luz piloto que indica un período de tiempo terminado se designará KL. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única L. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse EL, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL, suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L.

La actuación de la luz piloto puede ser acompañada por una señal audible.

(11) El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras, es opcional.

(12) Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

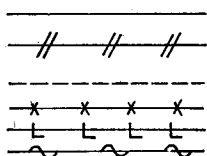
(13) Los términos alto, bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

(14) Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre-apertura, se definen como sigue:

Alto: indica que la válvula está, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

Figuran a continuación los símbolos a emplear en los planos y dibujos de representación de instrumentos en los procesos industriales.



1. Conexión a proceso o enlace mecánico, o alimentación de instrumentos*
2. Señal neumática** o señal sin definir en una línea de proceso
3. Señal eléctrica
4. Tubo capilar
5. Señal hidráulica
6. Señal electromagnética*** o sónica (sin hilo ni tubo)




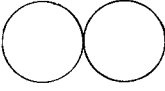

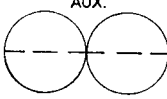
* Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos)

AS Alimentación de aire
 ES Alimentación eléctrica
 GS Alimentación de gas
 HS Alimentación hidráulica
 NS Alimentación de nitrógeno
 SS Alimentación de vapor
 WS Alimentación de agua



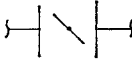

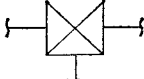
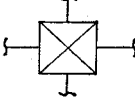
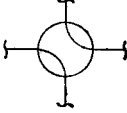
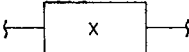
** El símbolo se aplica también a cualquier señal que emplee gas como medio de transmisión. Si se emplea un gas distinto del aire debe identificarse con una nota al lado del símbolo o bien de otro modo.

*** Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio, radiación nuclear y luz.


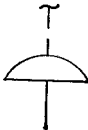
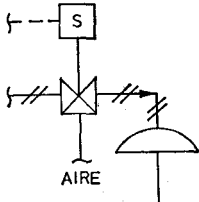
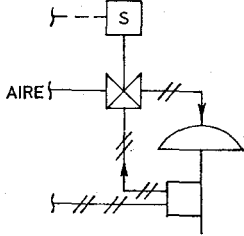
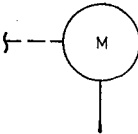
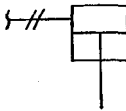
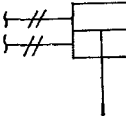
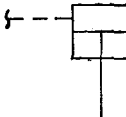

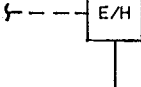
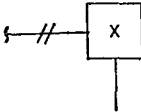
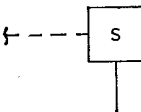

Símbolos generales

 <p>Ø aprox. 7/16" = 11,1mm</p> <p>LOCAL</p>	 <p>1</p> <p>MONTAJE EN PANEL 1</p>	 <p>MONTAJE DETRAS DEL PANEL</p>	
INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA CON CUALQUIER NÚMERO DE FUNCIONES			
 <p>MONTAJE LOCAL</p>	 <p>MONTAJE EN PANEL</p>	 <p>AUX.</p> <p>MONTAJE DETRAS DE PANEL AUXILIAR</p>	
INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS. OPCIONALMENTE INSTRUMENTO CON MAS DE UNA FUNCIÓN. PUEDEN AÑADIRSE CÍRCULOS ADICIONALES SI SE PRECISAN			

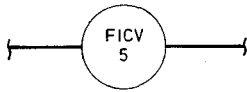
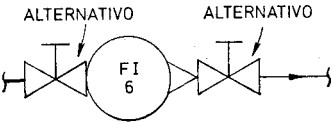
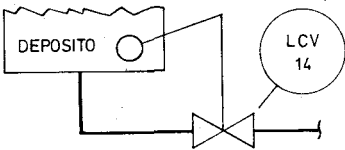
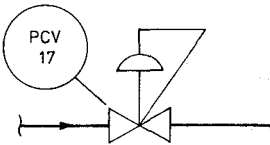
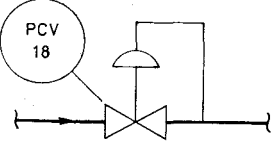
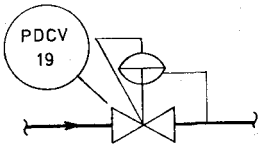
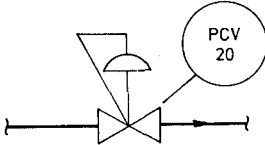
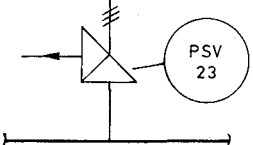
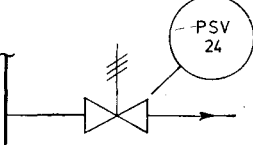
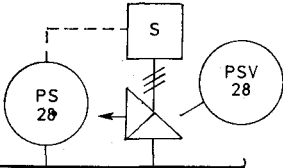
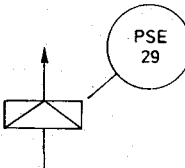
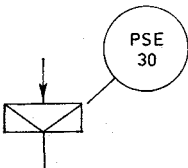
Símbolos para válvulas de control

 <p>GLOBO, COMPUERTA U OTRA</p>	 <p>ANGULO</p>	 <p>MARIPOSA, PERSIANA O COMPUERTA</p>	 <p>OBTURADOR ROTA- TIVO O VÁLVULA DE BOLA</p>
 <p>TRES VIAS</p>	 <p>ALTERNATIVA 1</p>	 <p>ALTERNATIVA 2</p>	
CUATRO VIAS			
 <p>SIN CLASIFICAR</p>			

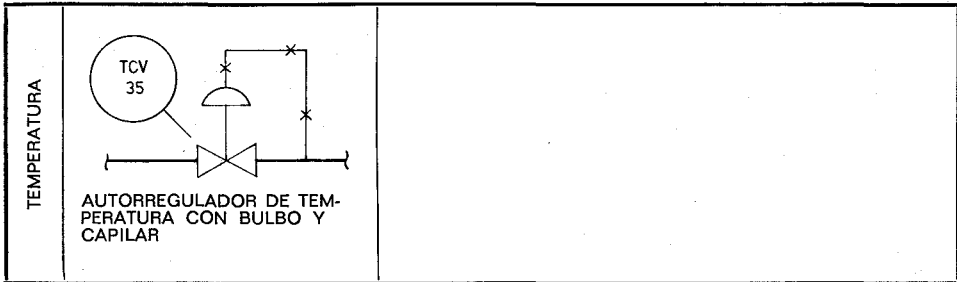
Simbolos para actuadores

 <p>SIN POSICIONADOR</p>	 <p>PREFERIDA PARA DIAFRAGMA CON PILOTO (POSICIONADOR, VALVULA SOLENOIDE, ...)</p>	 <p>PREFERIDO</p>	 <p>OPCIONAL</p>
<p>DIAFRAGMA CON MUELLE</p>		<p>DIAFRAGMA CON MUELLE, POSICIONADOR Y VALVULA PILOTO QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA AL ACTUAR</p>	
 <p>MOTOR ROTATIVO</p>	 <p>SIMPLE ACCIÓN</p>		 <p>DOBLE ACCIÓN</p>
	<p>CILINDRO SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO</p>		
 <p>PREFERIDO PARA CUALQUIER CILINDRO</p>	 <p>ACTUADOR MANUAL</p>		 <p>ELECTROHIDRAULICO</p>
 <p>SIN CLASIFICAR</p>	 <p>SOLENOIDE</p>		 <p>PARA VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD (DENOTA UN MUELLE, PESO, O PILOTO INTEGRAL)</p>

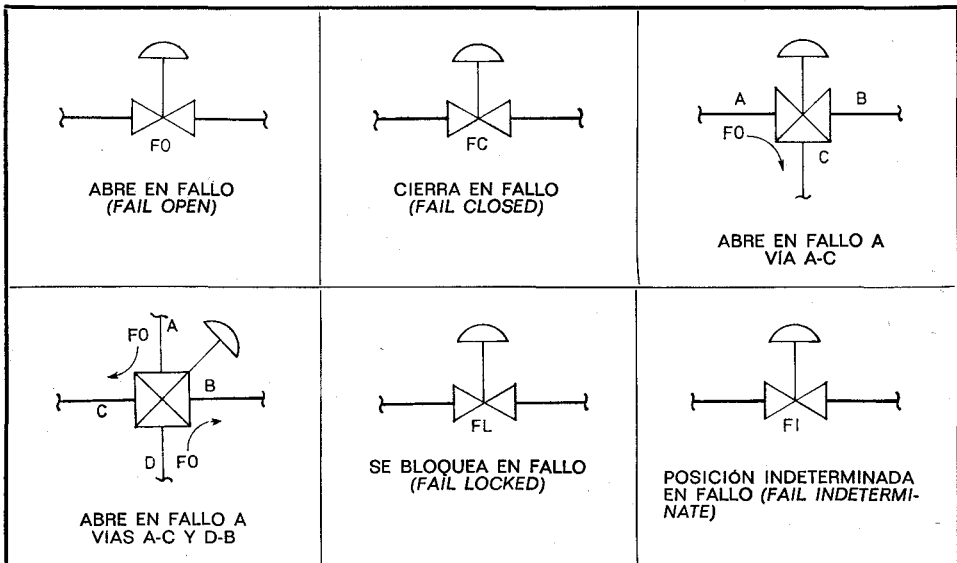
Autorreguladores

CAUDAL	 <p>REGULADOR AUTOMÁTICO CON INDICACIÓN INTEGRAL DEL CAUDAL</p>	 <p>ROTÁMETRO INDICADOR CON VALVULA MANUAL DE REGULACIÓN</p>	
NIVEL	 <p>CONTROLADOR DE NIVEL CON ENLACE MECÁNICO</p>		
PRESIÓN	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA EXTERIOR</p>	 <p>REGULADOR REDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON TOMAS INTERIOR Y EXTERIOR</p>
	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN POSTERIOR CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE PASO RECTO</p>
	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO DISPARADA POR SOLENOIDE</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA PRESIÓN</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA VACÍO</p>

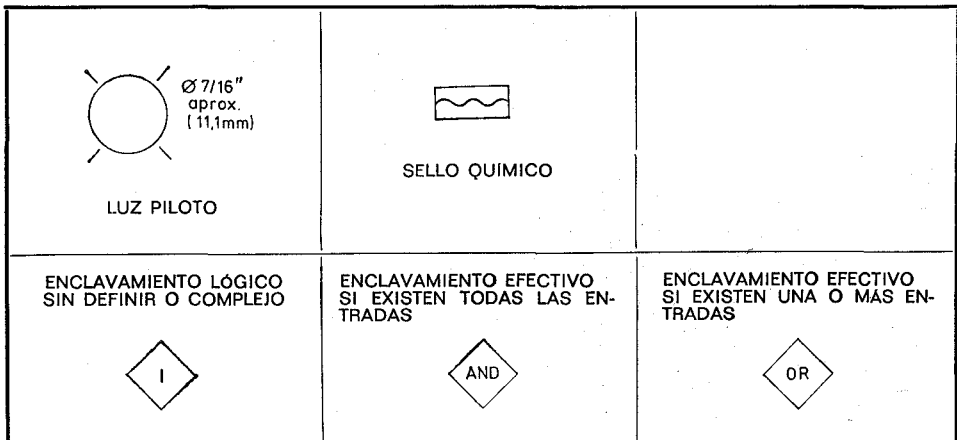
Autorreguladores (Cont.)



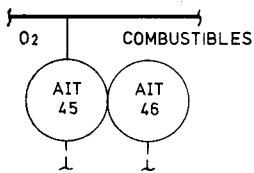
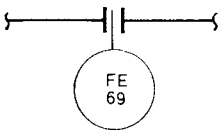
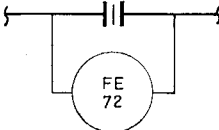
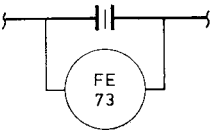
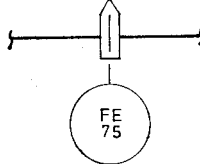
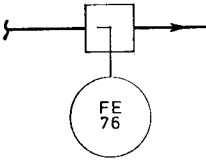
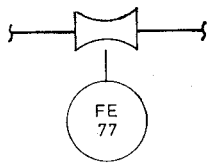
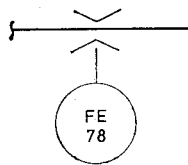
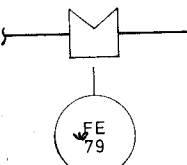
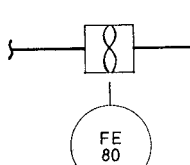
Acción del actuador en caso de fallo de aire (o de potencia)



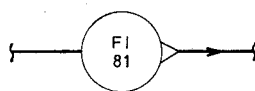
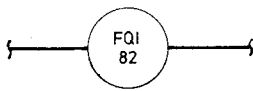
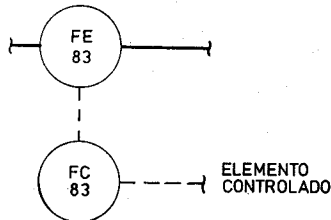
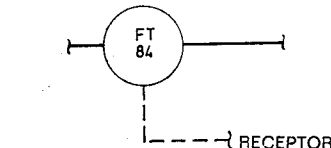
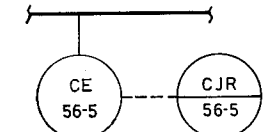
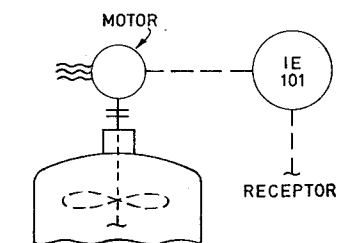
Símbolos varios



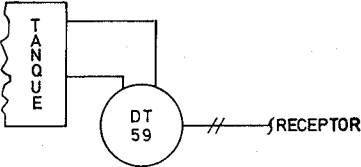
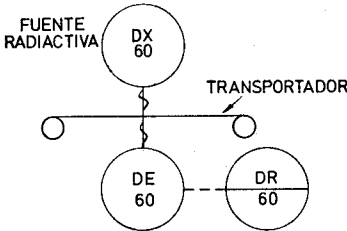
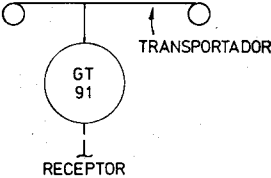
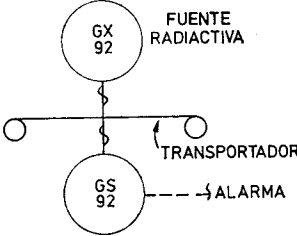
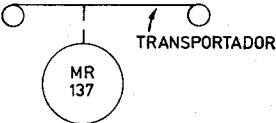
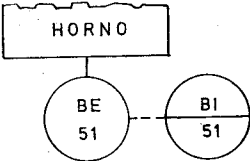
Elementos primarios

ANÁLISIS	 <p>RECEPTOR RECEPTOR</p> <p>ANÁLISIS DOBLE DE OXI-GENO Y COMBUSTIBLE</p>		
	 <p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA O EN LA CAMARA ANULAR</p>	 <p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA VENA CONTRAIDA, RADIALES O EN LA TUBERÍA</p>	 <p>RECEPTOR</p> <p>PLACA-ORIFICIO CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL</p>
	 <p>PLACA-ORIFICIO CON ACCESORIO DE CAMBIO RÁPIDO</p>	 <p>TUBO PITOT O TUBO VENTURI-PITOT</p>	 <p>TUBO VENTURI O TOBERA</p>
CAUDAL	 <p>CANAL MEDIDOR</p>	 <p>VERTEDERO</p>	 <p>ELEMENTO DE TURBINA</p>

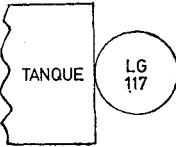
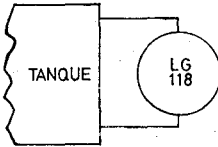
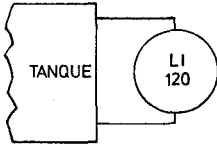
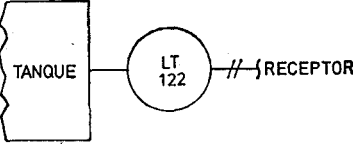
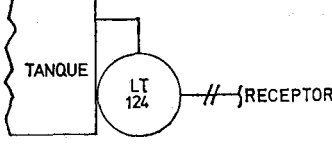
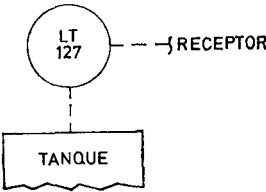
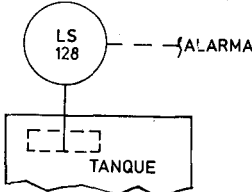
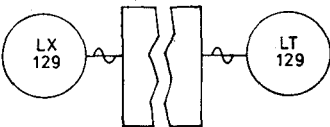
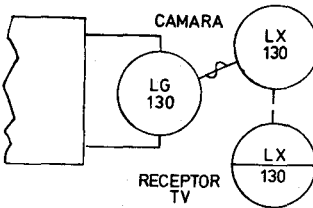
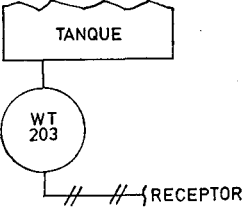
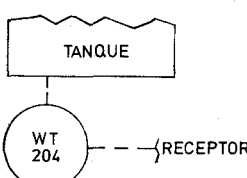
Elementos primarios (Cont.)

F CAUDAL	 <p>ROTAMETRO INDICADOR DE CAUDAL</p>	 <p>TOTALIZADOR INDICADOR DE CAUDAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</p>	 <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR, CONECTADO A UN CONTROLADOR DE CAUDAL</p>
	 <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CON TRANSMISOR</p>		
C CONDUCTIVIDAD	 <p>CÉLULA DE CONDUCTIVIDAD CONECTADA AL PUNTO 5 DE UN REGISTRADOR MULTIPLE</p>		
I CORRIENTE	 <p>TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD MIDiendo CORRIENTE DE UN MOTOR</p>		

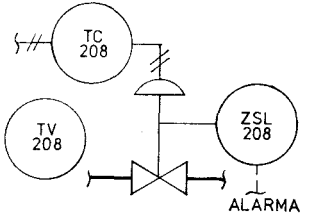
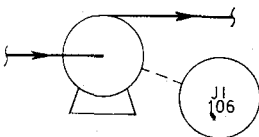
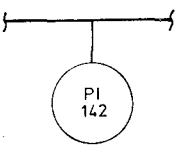
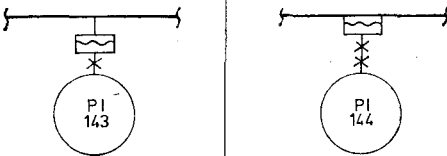
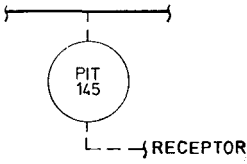
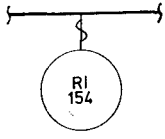
Elementos primarios (Cont.)

D DENSIDAD O PESO ESPECIFICO	 <p>TRANSMISOR DE DENSIDAD DE PRESIÓN DIFERENCIAL</p>	 <p>ELEMENTO RADIATIVO DE DENSIDAD CONECTADO A UN REGISTRADOR EN PANEL</p>
G ESPESOR	 <p>TRANSMISOR DE RODILLO</p>	 <p>INTERRUPTOR DE ESPESOR RADIATIVO</p>
M HUMEDAD	 <p>REGISTRADOR DE HUMEDAD</p>	
B LLAMA	 <p>DETECTOR DE LLAMA CONECTADO A UN INDICADOR DE INTENSIDAD DE LLAMA</p>	

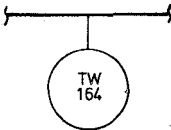
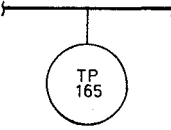
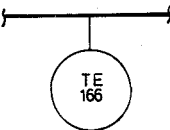
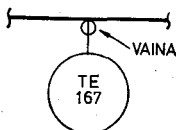
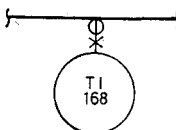
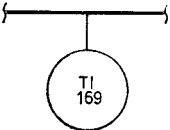
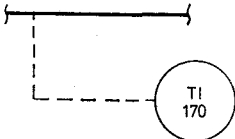
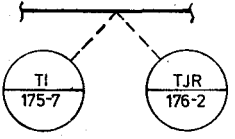
Elementos primarios (Cont.)

	 <p>TANQUE LG 117</p> <p>NIVEL DE VIDRIO INTEGRAL CON EL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LG 118</p> <p>NIVEL DE VIDRIO DE CO- NEXIÓN EXTERNA</p>	 <p>TANQUE LI 120</p> <p>INDICADOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DE DESPLA- ZAMIENTO</p>
L NIVEL	 <p>TANQUE LT 122 -- } RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO MONTADO EN EL EXTE- RIOR DEL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LT 124 -- } RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESIÓN DI- FERENCIAL MONTADO EN EL TANQUE</p>	
	 <p>LT 127 -- } RECEPTOR</p> <p>TANQUE</p> <p>ELEMENTO DE NIVEL DE CAPACIDAD CONECTADO A UN TRANSMISOR DE NIVEL</p>	 <p>LS 128 -- } ALARMA</p> <p>TANQUE</p> <p>INTERRUPTOR DE NIVEL DE SÓLIDOS DE PALETAS</p>	
	 <p>LX 129 RECEPTOR LT 129</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL RADIATIVO O SÓNICO</p>	 <p>CAMARA LG 130 LX 130</p> <p>RECEPTOR TV LX 130</p> <p>VISIÓN REMOTA DE UN NIVEL DE VIDRIO MEDIANTE CAMARA DE TELEVISIÓN</p>	
W PESO O FUERZA	 <p>TANQUE WT 203 -- } RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE PESO DE CONEXIÓN DIRECTA</p>	 <p>TANQUE WT 204 -- } RECEPTOR</p> <p>GALGA EXTENSOMÉTRICA CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PESO</p>	

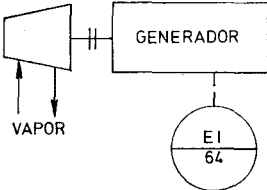

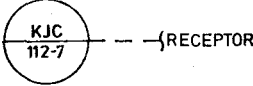
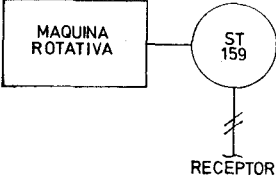
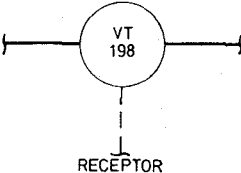
Elementos primarios (Cont.)

Z POSICIÓN	 <p>INTERRUPTOR DE FIN DE CARRERA ACCIONADO CUANDO LA VALVULA CIERRA A UNA POSICIÓN PREDE- TERMINADA</p>	
J POTENCIA	 <p>VATIMETRO CONECTADO AL MOTOR DE UNA BOMBA</p>	
P PRESIÓN O VACÍO	 <p>MANÓMETRO</p>	 <p>CON LÍNEA DE PRESIÓN MONTAJE EN LÍNEA</p> <p>MANÓMETRO CON SELLO</p>
	 <p>ELEMENTO DE PRESIÓN DE GALGA EXTENSOMÉTRICA CONECTADO A UN TRANSMISOR INDICADOR DE PRESIÓN</p>	
R RADIATIVIDAD	 <p>INDICADOR DE RADIATIVIDAD</p>	

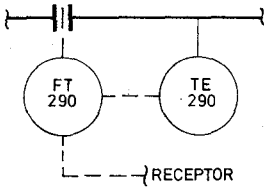
Elementos primarios (Cont.)

TEMPERATURA	T			
		CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA CON VAINA	CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA SIN VAINA	ELEMENTO DE TEMPERATURA SIN VAINA
				
		ELEMENTO DE TEMPERATURA CON VAINA	INDICADOR DE TEMPERATURA DE BULBO Y CAPILAR CON VAINA	TERMÓMETRO BIMETÁLICO O DE VIDRIO U OTRO LOCAL
				
		INDICADOR DE TEMPERATURA DE TERMOPAR O DE Sonda DE RESISTENCIA		
				
		TERMOPAR DOBLE CONECTADO A UN INDICADOR Y UN REGISTRADOR MÚLTIPLE DE TEMPERATURA		

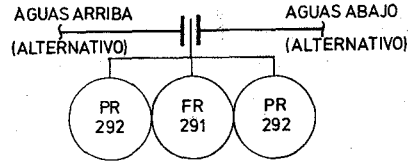
Elementos primarios (Cont.)

<p>E</p> <p>TENSION</p>	 <p>VOLTIMETRO INDICADOR CONECTADO A UN GENERADOR DE TURBINA</p>	
<p>K</p> <p>TIEMPO O PROGRAMADOR</p>	 <p>RELOJ</p>	 <p>PUNTO 7. PROGRAMADOR MULTIPUNTO. TODO-NADA</p>
<p>S</p> <p>VELOCIDAD O FRECUENCIA</p>	 <p>TRANSMISOR DE VELOCIDAD</p>	
<p>V</p> <p>VISCOSIDAD</p>	 <p>TRANSMISOR DE VISCOSIDAD</p>	

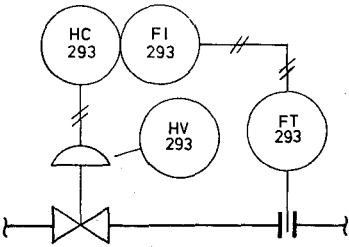
Sistemas varios



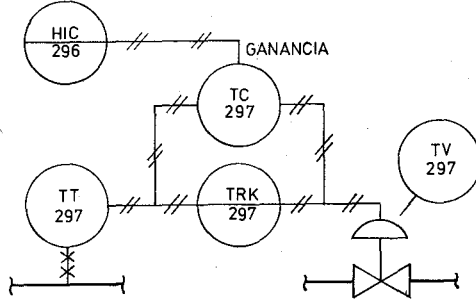
TRANSMISOR DE CAUDAL CON ELEMENTO DE TEMPERATURA DE COMPENSACIÓN



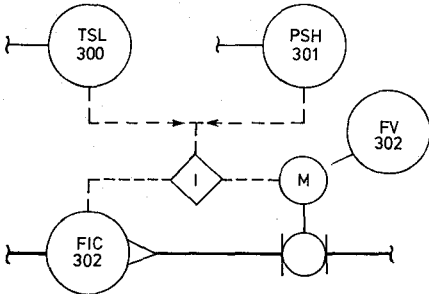
REGISTRADOR DE CAUDAL CON TOMA DE PRESIÓN



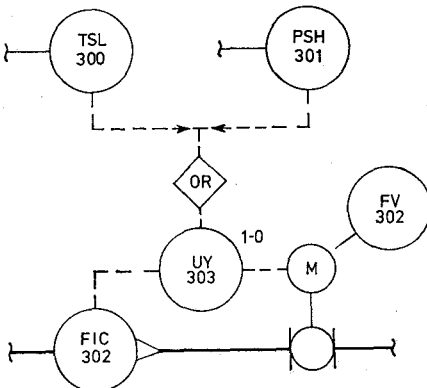
ESTACIÓN DE MANDO MANUAL SIN MANÓMETRO DE SALIDA Y CON INDICADOR RECEPTOR DE CAUDAL



REGISTRADOR CONTROLADOR LOCAL DE TEMPERATURA CON AJUSTE MANUAL REMOTO DE GANANCIA



UTILIZADO SI EL ENCLAVAMIENTO LÓGICO ES INDEFINIDO O COMPLEJO

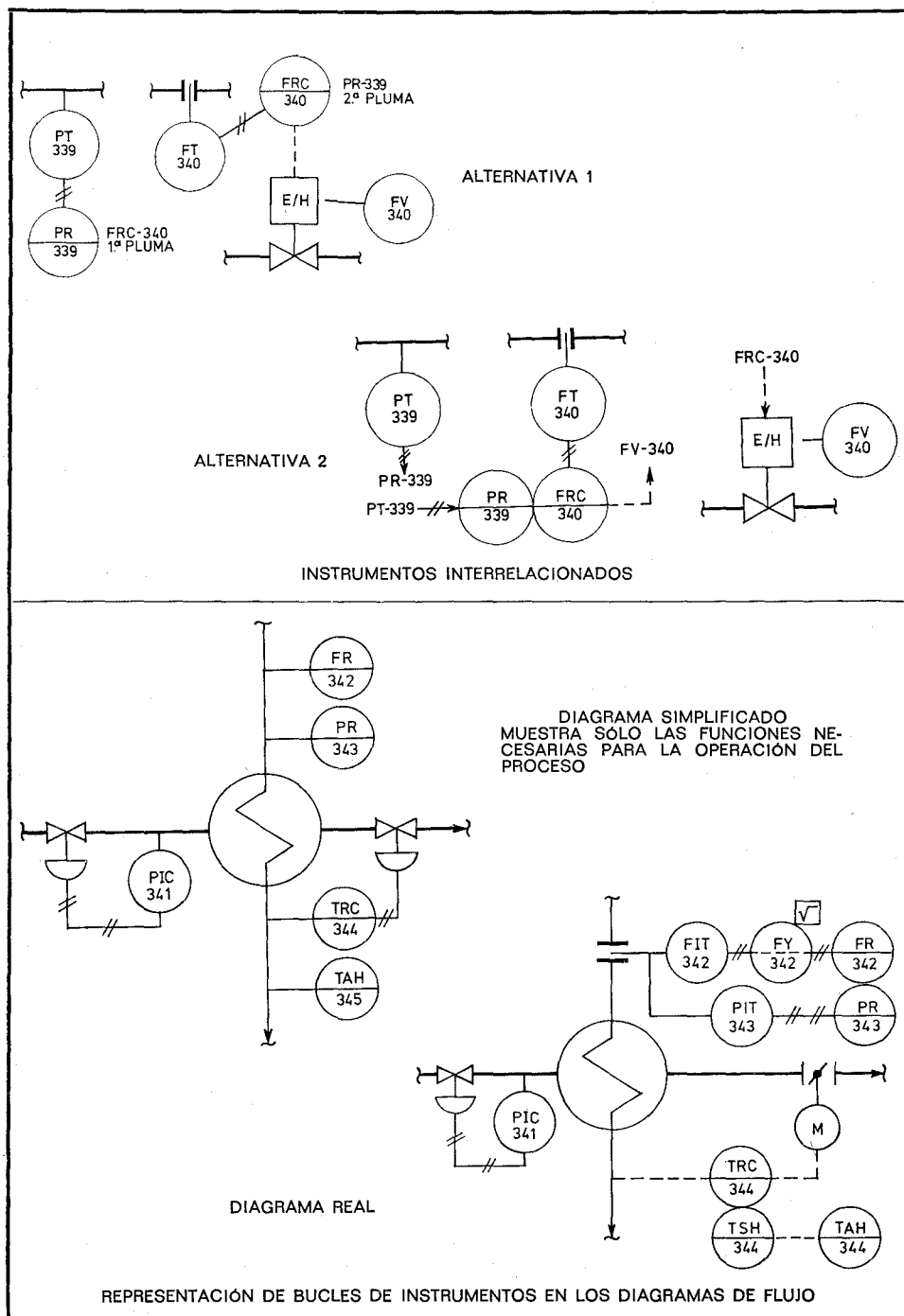


OPCIONAL

UTILIZADO SI DESEA MOSTRARSE EL RELÉ UY-303. •OR• DEBE OMITIRSE SI EL ENCLAVAMIENTO LÓGICO ES INDEFINIDO O COMPLEJO

CONTROL DE CAUDAL ENCLAVADO CON TERMOSTATO DE BAJA TEMPERATURA O PRESOSTATO DE ALTA PRESIÓN

Sistemas varios (Cont.)



Resumen Norma ISA-S5.2-76

Esta norma lista los símbolos lógicos que representan operaciones de proceso binarias realizadas por cualquier clase de hardware, sea eléctrico, neumático, hidráulico u otro.

La existencia de una señal lógica puede corresponder físicamente a la existencia o no de una señal de instrumentos, dependiendo del tipo particular del sistema de hardware y de la filosofía del diseño del circuito. Por ejemplo, el proyectista puede diseñar una alarma de alto caudal para que sea accionada por un interruptor eléctrico en el que los contactos abran, o bien cierren, cuando el caudal es alto. Por lo tanto, la condición de caudal alto puede ser representada físicamente por la ausencia o por la presencia de una señal eléctrica.

El flujo de información está representado por líneas que interconectan estados lógicos. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha o de arriba abajo. Para mayor claridad del diagrama, y siempre que sea necesario, pueden añadirse flechas a las líneas de flujo.

Es posible que una condición lógica específica no sea comprendida cuando trate a un aparato con dos estados alternativos específicos. Por ejemplo, si una válvula no está cerrada, puede ser debido a que la válvula está totalmente abierta, o bien a que la válvula no está cerrada y está en una posición intermedia entre casi cerrada y totalmente abierta. La interpretación literal del diagrama indica que la segunda posibilidad es la correcta.

En las válvulas todo-nada el diagrama debe especificar exactamente lo proyectado. De este modo, si la válvula debe estar abierta, así debe establecerse; no debe indicarse que la válvula está no cerrada.

En contraste, un dispositivo tal como una bomba accionada por un motor, siempre está funcionando o parada salvo algunas situaciones especiales. El señalar que una bomba no está en funcionamiento significa que está parada.

Las siguientes definiciones se aplican a los aparatos que tienen posiciones abiertas, cerradas o intermedias:

Posición abierta: Posición que está 100 % abierta.

Posición no abierta: Posición que es menor de 100 % abierta.

Posición cerrada: Posición que es 0 % abierta.

Posición no cerrada: Una posición que es mayor que 0 % abierta.

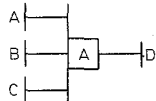
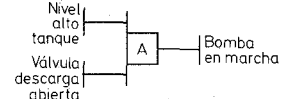
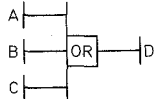
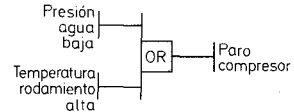
Posición intermedia: Una posición especificada que es mayor de 0 % y menor de 100 % abierta.

Posición no intermedia: Una posición especificada que es superior o inferior a la posición intermedia especificada.

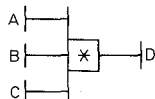
En un sistema lógico que tenga un estado de entrada derivado de modo inferencial o indirecto, puede presentarse una condición que conduzca a una conclusión errónea. Por ejemplo, la suposición de que existe caudal si una bomba está excitada, puede ser falsa porque una válvula puede estar cerrada, o porque el eje de la bomba esté roto o por otra causa.

La pérdida de alimentación —eléctrica, neumática u otra— a memorias o a otros elementos lógicos, puede afectar la operación del proceso, por lo que la

Tabla de símbolos lógicos

Función	Símbolo	Definición y tabla de verdad	Ejemplo																														
ENTRADA (INPUT)	(Entrada) ⊢ Puede ser precedida por el símbolo del instrumento	Entrada secuencia lógica	Arranque manual de la inyección ⊢																														
SALIDA (OUTPUT)	(Salida) ⊢ Puede ser seguida por el símbolo del instrumento	Salida secuencia lógica	Paro extracción ⊢																														
Y (AND)		D sólo existe mientras estén presentes A, B y C <table border="1" data-bbox="912 632 1006 757"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>C</td></tr><tr><td>A</td><td>B</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td></td></tr></table>					C	A	B	0	1	1	0	0	0	0		0	1	0	0		1	0	0	0		1	1	0	0		La bomba está en marcha si el nivel es alto y la válvula de descarga está abierta 
				C																													
A	B	0	1	1																													
0	0	0	0																														
0	1	0	0																														
1	0	0	0																														
1	1	0	0																														
O (OR)		D sólo existe mientras esté presente una o más entradas A, B y C <table border="1" data-bbox="912 886 1006 1009"><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>C</td></tr><tr><td>A</td><td>B</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>D</td><td></td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>D</td><td>D</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>D</td><td>D</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>D</td><td>D</td><td></td></tr></table>					C	A	B	0	1	1	0	0	0	D		0	1	D	D		1	0	D	D		1	1	D	D		Paro del compresor si la presión del agua de refrigeración es baja o si la temperatura de los rodamientos es alta 
				C																													
A	B	0	1	1																													
0	0	0	D																														
0	1	D	D																														
1	0	D	D																														
1	1	D	D																														

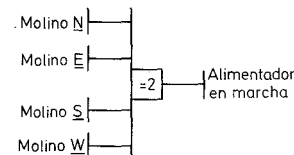
O CUALIFICADA



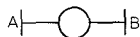
* Insertar número de entradas

D sólo existe mientras estén presentes un número especificado de entradas *A*, *B* y *C*

Alimentador en marcha mientras dos y sólo dos molinos funcionen

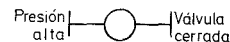


NO (NOT)

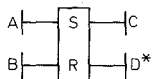


B sólo existe mientras la entrada *A* no existe

Cerrar válvula sólo mientras la presión no es alta



MEMORIA DE FLIP-FLOP



* Si la salida *D* no existe no debe mostrarse

S indica implantar memoria y *R* restaurar memoria

La salida *C* existe tan pronto *A* existe, y continúa existiendo, independientemente del estado de *A*, hasta el reset de la memoria, es decir, termina ante la existencia de *B*, *C* permanece terminado, independientemente del estado de *B*, hasta que *A* implanta la memoria

Si se emplea la salida *D*, ésta existe si *C* no existe, y *D* no existe cuando *C* existe

La *pérdida de alimentación* se representa añadiendo la letra *S*

Si se inicia la operación de la bomba de reserva, ésta debe ponerse en marcha aunque falle la alimentación del circuito lógico, hasta que termina la secuencia del proceso. La bomba debe estar en marcha si existen simultáneamente los mandatos START y STOP

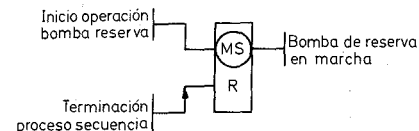
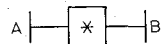


Tabla de símbolos lógicos (Continuación)

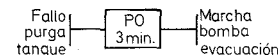
Función	Símbolo	Definición y tabla de verdad	Ejemplo								
		<table><tr><th>Símbolo modificado</th><th>Acción requerida de la memoria ante fallos de la alimentación</th></tr><tr><td>LS</td><td>Pérdida de memoria</td></tr><tr><td>MS</td><td>Memoria mantenida</td></tr><tr><td>NS</td><td>No significativo, sin preferencia</td></tr></table>	Símbolo modificado	Acción requerida de la memoria ante fallos de la alimentación	LS	Pérdida de memoria	MS	Memoria mantenida	NS	No significativo, sin preferencia	
Símbolo modificado	Acción requerida de la memoria ante fallos de la alimentación										
LS	Pérdida de memoria										
MS	Memoria mantenida										
NS	No significativo, sin preferencia										

ELEMENTO
DE TIEMPO

* Insertar símbolo

Método básico

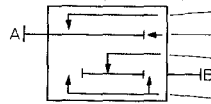
Símbolo	Significado	
DI	Retarda la iniciación de la salida. La existencia continua de <i>A</i> durante un tiempo especificado causa la existencia de <i>B</i> cuando el tiempo expira. <i>B</i> termina cuando <i>A</i> termina	Si falla la purga del tanque, aunque sea momentáneamente, operar la bomba de evacuación durante 3 minutos y a continuación pararla
DT	Retarda la terminación de la salida. La existencia de <i>A</i> causa la existencia inmediata de la salida <i>B</i> . <i>B</i> termina cuando <i>A</i> ha terminado y no ha existido durante un tiempo especificado	



PO

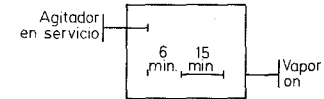
Impulso de salida. La existencia de *A* causa la existencia inmediata de *B*; *B* existe durante un tiempo especificado, independientemente del estado de *A*, y a continuación, termina

Método general

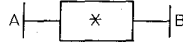


Existencia estado lógico de entrada
No existe estado lógico de entrada
Existencia estado lógico de salida
No existe estado lógico de salida

El vapor se conecta durante 15 minutos empezando 6 minutos después que ha parado el agitador, excepto que el vapor debe ser desconectado si el agitador rearranca



ESPECIAL



* Insertar requerimientos lógicos especiales

La salida *B* existe con una relación lógica a la entrada *A* del modo establecido en requerimientos especiales

fuente de alimentación o su pérdida debe entrarse como entrada lógica al sistema o a los elementos lógicos individuales. En las memorias, la fuente de alimentación puede entrarse como una entrada lógica o en la forma indicada en los diagramas. También puede ser necesario mostrar el efecto de la restauración de la alimentación.

Definiciones

En la tabla que aparece en las páginas anteriores se representan y definen los símbolos lógicos; los símbolos con tres entradas A, B y C son típicos de funciones lógicas con cualquier número de dos o más entradas. En las tablas de verdad, 0 indica la no existencia de la entrada lógica o de la señal de salida o el estado dado en la cabecera de la columna. 1 indica la existencia de la señal o estado de entrada lógica. D indica la existencia de la señal o estado de salida lógica como resultado de las entradas lógicas apropiadas.

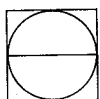
Resumen Norma ISA-S5.3

El objeto de esta norma es documentar los instrumentos formados por ordenadores, controladores programables, miniordenadores y sistemas a microprocesador que disponen de control compartido, visualización compartida y otras características de interfase. Los símbolos representan la interfase con los equipos anteriores de la instrumentación de campo, de la instrumentación de la sala de control y de otros tipos de hardware.

El tamaño de los símbolos debe ser conforme a la norma ISA-S5.1-84, a la que complementa.

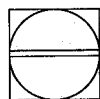
Símbolos de visualización del control distribuido/compartido

1. Accesible normalmente al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma.



- (1) Visualización compartida.
- (2) Visualización y control compartidos.
- (3) Acceso limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador en la red de comunicaciones.

2. Dispositivo de interfase auxiliar del operador.



- (1) Montado en panel; carátula analógica; no está montado normalmente en la consola principal del operador.
- (2) Controlador de reserva o estación manual.
- (3) El acceso puede estar limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador vía la red de comunicaciones.

3. No accesible normalmente al operador.



- (1) Controlador ciego compartido.
- (2) Visualización compartida instalada en campo.
- (3) Cálculo, acondicionamiento de señal en controlador compartido.
- (4) Puede estar en la red de comunicaciones.
- (5) Normalmente operación ciega.
- (6) Puede ser alterado por la configuración.

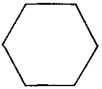
Símbolos del ordenador

A utilizar cuando los sistemas incluyen componentes identificados como ordenadores, diferentes de un procesador integral que excita las varias funciones de un sistema de control distribuido. El componente ordenador puede ser integrado en el sistema, vía la red de datos, o puede ser un ordenador aislado.



4. Normalmente accesible al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma. Utilizado usualmente para indicar la pantalla de video.

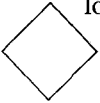
5. Normalmente no accesible al operador.



- (1) Interfase entrada/salida.
- (2) Cálculo /acondicionamiento de señal dentro de un ordenador.
- (3) Puede usarse como controlador ciego o como módulo de cálculo de software.

Símbolos de control lógico y secuencial

6. Símbolo general. Para complejos no definidos interconectando control lógico o secuencial (ver ISA-S5.1-84).



7. Control distribuido interconectando controladores lógicos con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) No accesible normalmente al operador.

8. Control distribuido interconectando un controlador lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) Accesible normalmente al operador.

Símbolos de funciones internas del sistema

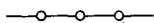
9. Cálculo/ acondicionamiento de señal.



- (1) Para identificación de bloques consulte ISA-S5.1-84 tabla 2 «Designaciones de funciones para relés».
- (2) Para requerimientos de cálculo amplios, use la designación «C». Escriba aclaraciones en documentación suplementaria.
- (3) Utilizado en combinación con válvulas de alivio según ISA-S5.1-84.

Símbolos comunes

10. Red del sistema.



- (1) Usado para indicar una red de software, o conexiones entre funciones suministradas en el sistema del fabricante.
- (2) Alternativamente, la red puede ser mostrada implícitamente por símbolos contiguos.
- (3) Puede utilizarse para indicar una red de comunicaciones a opción del usuario.

Registradores y otros sistemas de retención de datos históricos

Los registradores convencionales, tales como los de gráfico de banda se mostrarán de acuerdo con ISA-S5.1-84.

En los registradores asignables utilice el símbolo 1.

El almacenamiento en masa de largo plazo de una variable de proceso mediante memorias digitales como cinta, disco, etc., debe representarse de acuerdo con los símbolos de visualización de control distribuido/compartido o símbolos de ordenador de esta norma, dependiendo de la localización del aparato.

Identificación

Los códigos de identificación de esta norma deben cumplir con ISA-S5.1-84 con las siguientes adiciones.

Alarmas de software

Las alarmas de software pueden ser identificadas situando letras de designación de la tabla 1.1 de ISA-S5.1-84 en las líneas de señal de entrada o de salida de los controladores, o de otro componente específico integral del sistema. Ver Alarmas que aparecen posteriormente.

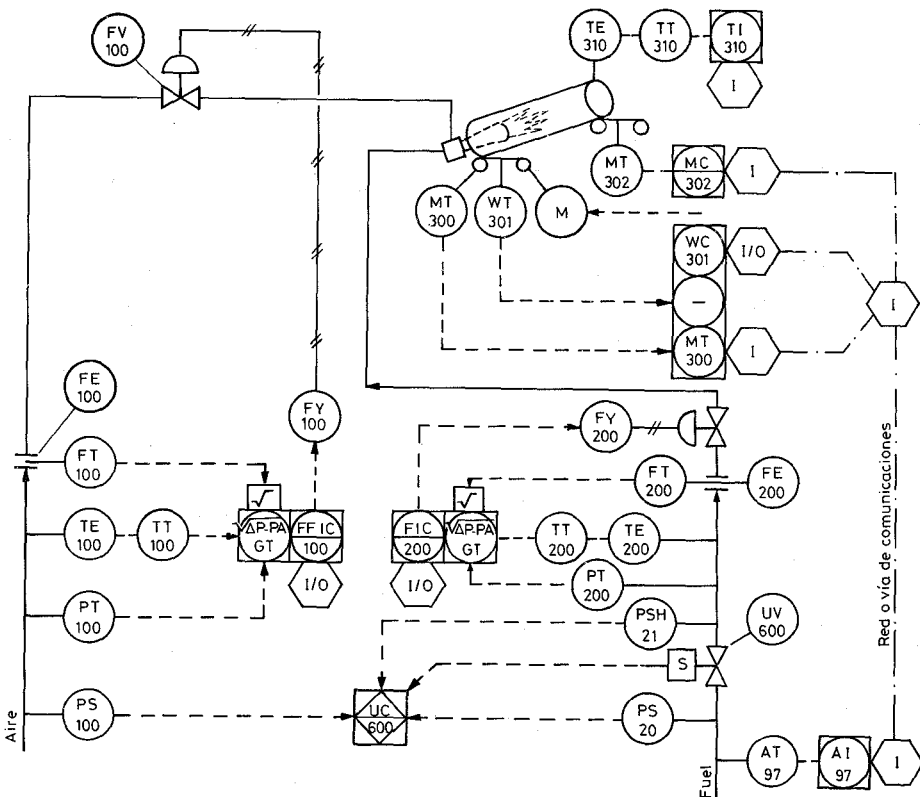
Contigüidad de los símbolos

Pueden unirse dos o más símbolos para expresar los significados siguientes, además de los mostrados en ISA-S5.1-84:

1. Comunicación entre los instrumentos asociados, por ejemplo, hilos de conexión, redes internas del sistema, reserva.
2. Instrumentos integrados con funciones múltiples, por ejemplo, registrador multipunto, válvula de control con controlador incorporado.

La aplicación de símbolos contiguos es una opción del usuario. Si su aplicación no es absolutamente clara, los símbolos contiguos no deben utilizarse.

Ejemplo de control de combustión:



Secuencia operación válvula control

Bomba vacío	Contactos auxiliares interruptor motor	Válvula solenoide (UY)	Válvula control (UV)		Agua refrigeración
			Actuador	Puerta	
Off On	Cierra Abre	Excitada Desexcitada	Presurizado Vent	Cierra Abre	Off On

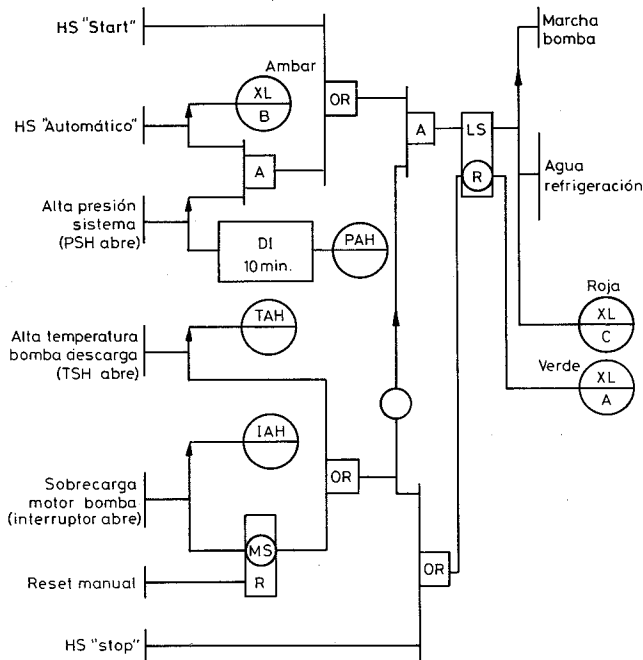
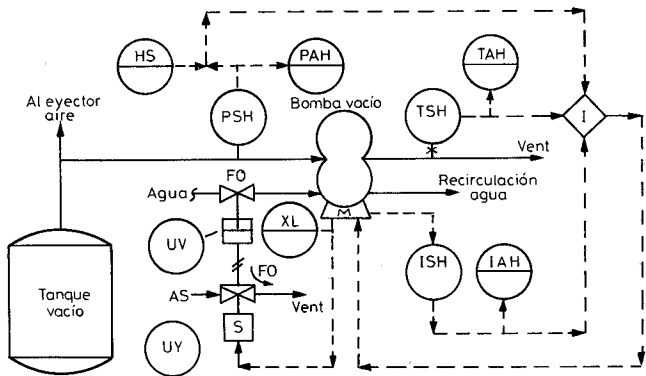


Fig. 1.13 Diagrama de flujo y lógico de una bomba de vacío de reserva.

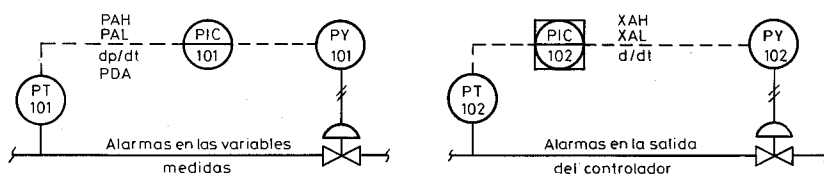
Alarmas

Generalidades

Todos los aparatos y alarmas cableados, distintos de los aparatos y alarmas cubiertos específicamente por esta norma, deben estar de acuerdo con ISA-S5.1-84 tabla 1.1.

Alarmas de sistemas de instrumentos

Las alarmas cubiertas por esta norma deben identificarse de acuerdo con las figuras:



ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetalico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

TRANSMISORES

2.1 Generalidades

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.

Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la industria son las tres primeras, las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática variable linealmente de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) para el campo de medida de 0-100 % de la variable. Esta señal está normalizada por la SAMA-Asociación de fabricantes de instrumentos (*Scientific Apparatus Makers Association*) y ha sido adoptada en general por los fabricantes de transmisores y controladores neumáticos en Estados Unidos.

En los países que utilizan el sistema métrico decimal se emplea además la señal 0,2-1 bar ($1 \text{ bar} = 1,02 \text{ kg/cm}^2$) que equivale aproximadamente a 3-15 psi ($3 \text{ psi} = 0,206 \text{ bar}$ o $0,21 \text{ kg/cm}^2$, $15 \text{ psi} = 1,033 \text{ bar}$ o $1,05 \text{ kg/cm}^2$). También está todavía en uso la señal de 0,2-1 kg/cm^2 , que cada vez es menos utilizada por no estar normalizada (según se verá en el capítulo de «Medidas de Presión» las unidades normalizadas son el pascal y el bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ pascal}$). El alcance de esta señal métrica es un 6 % más corto que la señal de 3-15 psi, por lo cual la adopción en una planta industrial de una u otra norma obliga a calibrar con la misma señal adoptada el conjunto completo transmisor, controlador, válvula de control y todos los instrumentos accesorios que se utilicen (extractores de raíz cuadrada, computadores neumáticos, posicionadores, etc.).

Nótese que en las válvulas de control pueden emplearse señales neumáticas de 0,6-1,4, de 0,4-2 o de 0,8-2,4 bar, gracias a la función de conversión de la señal de entrada 3-15 psi (0,2-1 bar) que puede realizar el posicionador acoplado a la válvula o bien mediante resortes especiales dispuestos en el servomotor de la válvula.

Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de 4-20 mA c.c., a

distancias de 200 m a 1 km, según sea el tipo de instrumento transmisor. Todavía pueden encontrarse transmisores que envían las señales 1-5 mA c.c., 10-50 mA c.c., 0,5 mA c.c., 1-5 mA c.c., 0-20 mA c.c., 1-5 V c.c., utilizadas anteriormente a la normalización a la señal indicada de 4-20 mA c.c.

La señal 1-5 V c.c. es útil cuando existen problemas en el suministro electrónico. De todos modos, basta conectar una línea de 250 Ω para tener la señal electrónica de 4-20 mA c.c.

La señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas y emplea sólo dos hilos que no precisan blindaje.

La relación de 4 a 20 mA c.c. es de 1 a 5, la misma que la razón de 3 a 15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

El «cero vivo» con que empieza la señal (4 mA c.c.) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de un hilo (la señal se anula) y de permitir el diferenciar todavía más el «ruido» de la transmisión cuando la variable está en su nivel más bajo.

Salvo indicación contraria, en lo que sigue se supondrá que la señal neumática es de 0,2-1 bar (3-15 psi), y la electrónica de 4 a 20 mA c.c.

Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 psi (0,2 bar). De este modo se consigue calibrar correctamente el instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos neumáticos.

Y así, se comprueba rápidamente que un transmisor neumático de temperatura de intervalo de medida 0-150 °C con el bulbo a 0 °C y con señal de salida 1 psi está descalibrado; si el nivel estándar mínimo de salida fuera de 0 psi no sería posible esta comprobación rápida y para efectuarla habría que aumentar la temperatura hasta detectar presión en la salida. Asimismo, cuando el conducto neumático que llega hasta el receptor se perfora por accidente, la señal neumática puede llegar a anularse, facilitando la detección de la avería la lectura del instrumento receptor (en el ejemplo anterior, si el receptor fuera un manómetro de margen 3-15 psi con graduación 0-150 °C el índice señalaría un valor inferior al cero del instrumento).

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Por ejemplo, dentro de la señal electrónica de 4-20 mA c.c., los valores binarios de 4, 12 y 20 mA son respectivamente de 00000000, 01111111 y 11111111. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 8 bits, entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente. Como el mayor número binario de 8 cifras es

$$11111111 = 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + \dots + 1 \cdot 2^7 = 255$$

se sigue que la precisión obtenida con el transmisor debida exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{255} \cdot 100 = \pm 0,4 \%$$

Si la señal es de 16 bits, entonces puede manejar 16 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 16 cifras

$$1111111111111111 = 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2^2 + \dots + 1 \cdot 2^{15} = 65535$$

la precisión obtenida con el transmisor debida exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{65535} \cdot 100 = \pm 0,00152$$

Las fibras ópticas en la transmisión se están utilizando en lugares de la planta donde las condiciones son duras (campos magnéticos intensos que influyen sobre la señal,...). Los módulos de transmisión pueden ser excitados por fuentes de luz de LED (Light Emiting Diodes) o diodo láser. Los módulos receptores disponen de fotodetector y preamplificador, con los cables o multicables de fibra óptica y con convertidores electroópticos. La transmisión de datos puede efectuarse con multiplexores transmitiendo simultáneamente a la velocidad máxima definida por la norma RS232 de transmisión de datos para modems y multiplexores. Las ventajas de la transmisión por fibra óptica incluyen la inmunidad frente al ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas), el aislamiento eléctrico total, una anchura de banda mayor que la proporcionada por los correspondientes hilos de cobre, ser de pequeño tamaño y de poco peso, sus bajas pérdidas de energía, y que las comunicaciones sean seguras.

El microprocesador se utiliza en la transmisión por las ventajas que posee de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio cada vez más competitivo y ser apto para realizar cálculos adicionales.

El microprocesador ha permitido, a partir de 1986, la aparición del primer transmisor con señal de salida enteramente digital, lo cual facilita las comunicaciones enteramente digitales entre el transmisor y el controlador o receptor. Esta digitalización de las señales y su envío a los sistemas de control, si bien es diferente en cada fabricante de instrumentos, está experimentando un proceso de normalización a cargo del Comité SP50 de ISA.

2.2 Transmisores neumáticos

2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

El sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante P_s , con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya posición depende del elemento de medida. En la figura 2.1 se presenta el conjunto.

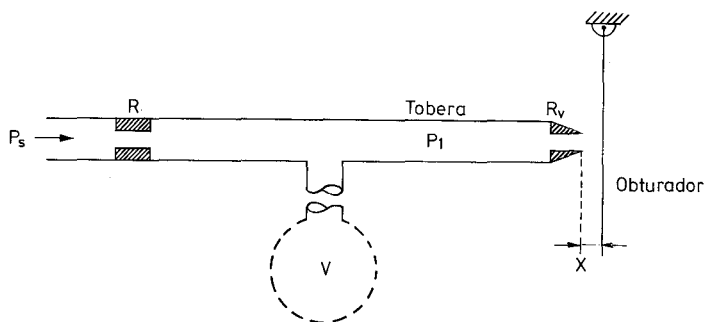


Fig. 2.1 Sistema tobera-obturador.

El aire de alimentación de presión normalizada 1,4 bar (20 psi) pasa por la restricción R y llena el volumen cerrado V escapándose a la atmósfera por la tobera R_v . Ésta tiene un diámetro muy pequeño, de unos 0,25-0,5 mm, mientras que la restricción R tiene un diámetro alrededor de 0,1 mm. Con el obturador abierto la presión posterior remanente es de unos 0,03 bar, lo cual indica que la relación de presiones diferenciales a través de la restricción R es de $1,4/0,03 \approx 50$ veces. El consumo de aire del conjunto tobera-obturador es relativamente pequeño, del orden de 3 NI/min.

El escape de aire a través de la tobera depende de la posición del obturador, es decir, del valor de x . Debido a este escape, el volumen V se encontrará a una presión P_1 intermedia entre P_s y la presión atmosférica. En efecto: para $x = 0$ el obturador tapa casi totalmente a la tobera, con lo cual no hay escape de aire a la atmósfera y P_1 llega a ser casi igual a la presión P_s del aire de alimentación: para x relativamente grande el obturador está bastante separado de la tobera y no limita el escape a la atmósfera siendo la presión P_1 próxima a la atmosférica.

En la figura 2.2 se representa una curva de respuesta típica de un sistema tobera-obturador, pudiendo verse que la misma no es lineal.

El aire que se escapa de la tobera ejerce una fuerza sobre el obturador $F = P_1 \times S$ que tiende a desplazarlo. Esta fuerza debe hacerse despreciable con relación a la fuerza del elemento de medida que posiciona el obturador.

Con este objeto, en el amplificador de dos etapas se utiliza sólo una parte reducida de la curva, y se disminuye además la sección de la tobera a diámetros muy pequeños de 0,1 a 0,2 mm (no se consideran diámetros más pequeños para evitar que la tobera se tape por suciedad del aire). De este modo, la parte reducida de la curva puede aproximarse a una línea recta con lo cual se consigue una relación prácticamente lineal entre el valor de la variable y la señal transmitida.

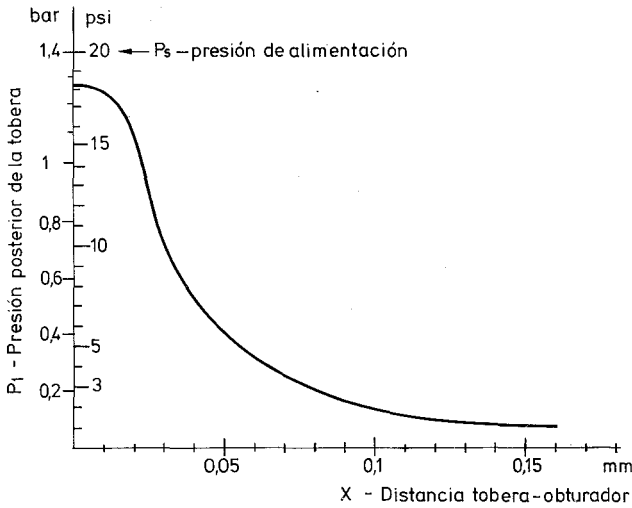


Fig. 2.2 Curva de respuesta de un sistema tobera-obturador.

Como la restricción fija R es 3 a 4 veces menor que la tobera R_v ; sólo pasa por la misma un pequeño caudal de aire, por lo cual, el volumen V debe ser tan reducido como sea posible para obtener un tiempo de respuesta del sistema inferior al segundo.

La válvula piloto (amplificador neumático) empleada en el amplificador de dos etapas (fig. 2.3) cumple las siguientes funciones:

1. Aumento del caudal de aire suministrado, o del caudal de escape para conseguir tiempos de respuesta inferiores al segundo.
2. Amplificación de presión (ganancia) que suele ser de 4 a 5, en general, para obtener así la señal neumática estándar 3-15 psi (0,2-1 bar).

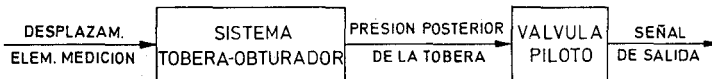


Fig. 2.3 Bloque amplificador de dos etapas

En la válvula piloto con realimentación, sin escape continuo (fig. 2.4), la presión posterior P_1 de la tobera actúa sobre la membrana de superficie S_1 mientras que la presión de salida P_0 lo hace sobre la membrana S_2 . El conjunto móvil de las dos membranas tiende al equilibrio y cuando éste se establece se verifica la siguiente ecuación:

$$P_1 \cdot S_1 = P_0 \cdot S_2$$



Fig. 2.4 Características de la válvula piloto con realimentación (sin escape continuo).

La relación

$$K_a = \frac{P_0}{P_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

es el factor de amplificación o de ganancia de la válvula piloto.

En la posición de equilibrio y ante un aumento de la presión posterior P_1 de la tobera, el aire de alimentación entra en la válvula aumentando el valor de P_0 . Por el contrario, si P_1 disminuye, el aire contenido en el receptor escapa a través del orificio de escape, con lo cual P_0 baja. Entre estas dos reacciones del sistema existe una zona muerta debida a la histéresis mecánica de las partes móviles.

El sistema descrito compuesto por el conjunto tobera-obturador y la válvula piloto presenta todavía las siguientes desventajas:

- Las variaciones en la presión del aire de alimentación influyen en la señal de salida.
- Las vibraciones que pueden existir en el proceso influyen en el juego mecánico entre el obturador y el elemento de medida y dan lugar a pulsaciones en la señal de salida, ya que el factor de amplificación del sistema tobera-obturador es muy grande.

Estos inconvenientes se evitan disminuyendo la ganancia del conjunto por realimentación negativa de la señal posterior de la tobera P_1 sobre el obturador. Se utilizan así tres sistemas de transmisión, el transmisor de equilibrio de movimientos, el de equilibrio de fuerzas y el de equilibrio de momentos.

2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos

El transmisor de equilibrio de movimientos (fig. 2.5) compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera. El conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una co-

respuesta lineal entre la variable y la señal de salida. Hay que señalar que en este tipo de transmisores, las palancas deben ser livianas, pero bastante fuertes para que no se doblen.

Estos instrumentos se utilizan, en particular, en la transmisión de presión y temperatura donde los elementos de medida tales como tubos Bourdon, manómetros de fuelle, elementos de temperatura de bulbo y capilar son capaces de generar un movimiento amplio, sea directamente o bien a través de palancas con la suficiente fuerza para eliminar el error de histéresis que pudiera producirse. Si la fuerza disponible es pequeña, aparte de la histéresis, el tiempo necesario para el movimiento es grande y el transmisor es lento en responder a los cambios de la variable. En este caso, se acude a los transmisores de equilibrio de fuerzas en los que básicamente el elemento primario de medida genera una fuerza que se equilibra con otra igual y opuesta producida por el transmisor.

2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas

En la figura 2.6 puede verse que el elemento de medición ejerce una fuerza en el punto *A* sobre la palanca *AC* que tiene su punto de apoyo en *D*. Cuando au-

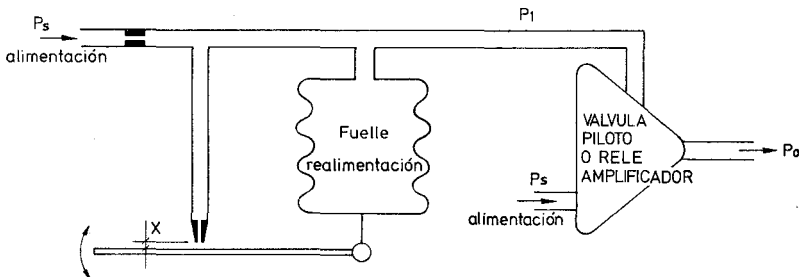


Fig. 2.5 Transmisor de equilibrio de movimientos.

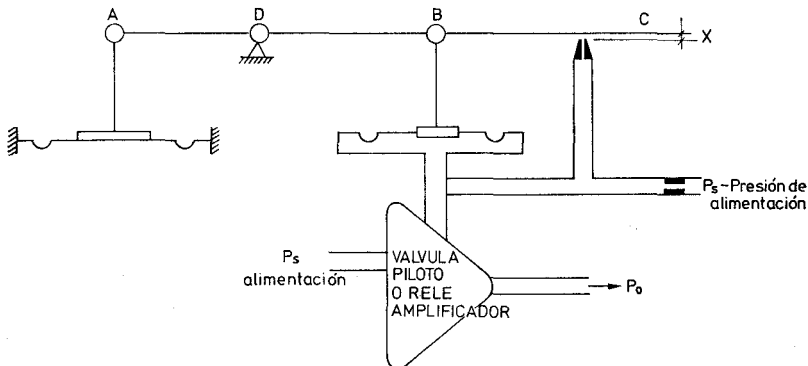


Fig. 2.6. Transmisor de equilibrio de fuerzas.

menta la fuerza ejercida por el elemento de medición, la palanca AC se desequilibra, tapa la tobera, la presión aumenta y el diafragma ejerce una fuerza hacia arriba alcanzándose un nuevo equilibrio. Hay que señalar, como se ha dicho, que en este transmisor los movimientos son inapreciables.

2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos

En el transmisor de equilibrio de momentos que puede verse en la figura 2.7 (transmisor de caudal), el desequilibrio de fuerzas producido por el caudal crea un par al que se opone el generado por el fuelle de realimentación a través de una rueda de apoyo móvil situada en el brazo del transmisor.

2.3 Transmisores electrónicos

2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas

Los transmisores electrónicos son generalmente de equilibrio de fuerzas (fig. 2.8). Consisten en su forma más sencilla en una barra rígida apoyada en un punto sobre la que actúan dos fuerzas en equilibrio:

- La fuerza ejercida por el elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle...).
- La fuerza electromagnética de una unidad magnética.

El desequilibrio entre estas dos fuerzas da lugar a una variación de posición relativa de la barra, excitando un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia o un transformador diferencial. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable del proceso.

Estos instrumentos, debido a su constitución mecánica, presentan un ajuste del cero y del alcance complicado y una alta sensibilidad a vibraciones. Su precisión es del orden del 0,5-1 %.

2.3.1.1 Detector de posición de inductancia

El detector de posición de inductancia está formado por dos piezas de ferrita, una en la barra y la otra fijada rígidamente en el chasis del transmisor y contiene una bobina conectada a un circuito oscilador. Cuando aumenta o disminuye el entrehierro disminuye o aumenta respectivamente la inductancia de la bobina detectora modulando la señal de salida del oscilador. En la figura 2.8 a puede verse un diagrama de este tipo de instrumento.

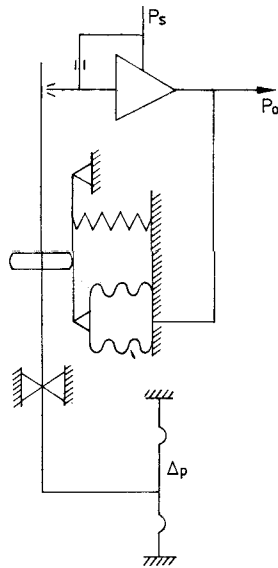
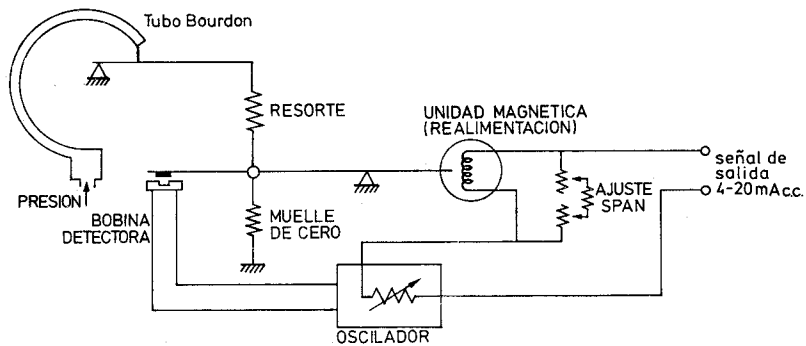
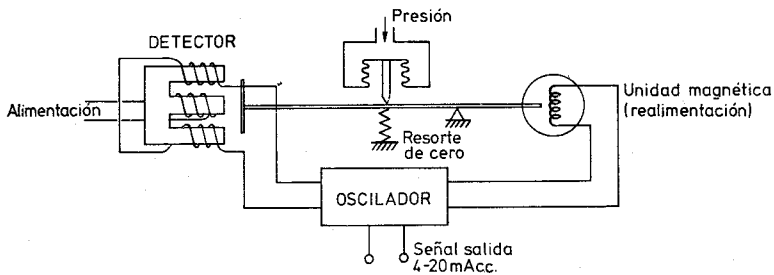


Fig. 2.7 Transmisor de equilibrio de momentos.



a - detector de posición de inductancia



b - transformador diferencial

Fig. 2.8 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas.

2.3.1.2 Transformador diferencial

El transformador diferencial (fig. 2.8 *b*) (LVDT-Linear Variable Differential Transformer) consiste en un núcleo magnético con tres o más polos bobinados. El bobinado central está conectado a una línea de alimentación estabilizada y se denomina arrollamiento primario. Los otros dos están bobinados idénticamente con el mismo número de espiras y en la misma disposición. El transformador se cierra magnéticamente con la barra de equilibrio de fuerzas. Al variar la presión cambia la posición de la barra induciendo tensiones distintas en las dos bobinas, mayor en la bobina arrollada en el polo con menor entrehierro y menor en la opuesta. Las bobinas están conectadas en oposición y la señal de tensión diferencial producida es introducida en un amplificador transistorizado que alimenta la unidad magnética de reposición de la barra.

2.3.2 Transmisores digitales

Hacia 1983 la firma Honeywell presentó en el mercado el primer transmisor digital denominado «inteligente» (smart transmitter). Este término indica que el sensor tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida exclusiva de la variable. Lógicamente dichas funciones son proporcionadas por un microprocesador, pero esto no es esencial para que al instrumento pueda aplicársele la denominación de «inteligente».

Hay dos modelos básicos de transmisores inteligentes:

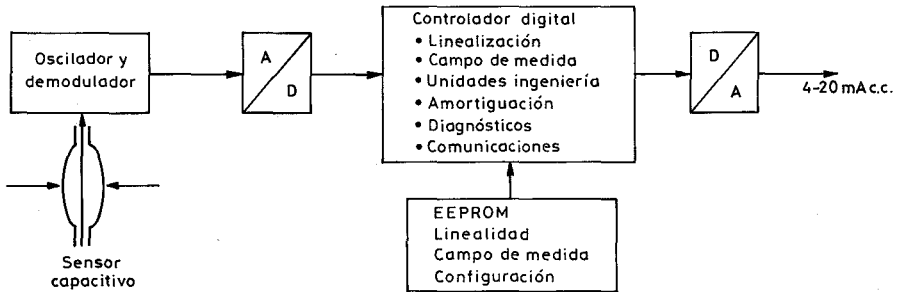
El capacitivo (figura 2.9 *a*) está basado en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos. La transmisión de la presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazamiento del diafragma sensible es de sólo 0,1 mm como máximo. Un circuito formado por un oscilador y demodulador transforma la variación de capacidad en señal analógica. Ésta a su vez es convertida a digital, y pasa después a un microprocesador «inteligente» que la transforma a la señal analógica de transmisión de 4-20 mA c.c.

El de semiconductor (fig. 2.9 *b*) aprovecha las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometido a tensiones. El modelo de semiconductor difundido está fabricado a partir de una delgada película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheatstone aplicable a la medida de presión, presión diferencial y nivel, formado por una pastilla de silicio difundido en el que se hallan embebidas las resistencias R_A , R_B , R_C y R_D de un puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente originado por cambios en la variable, da lugar a una señal de salida de 4-20 mA c.c. Su funcionamiento es el siguiente:

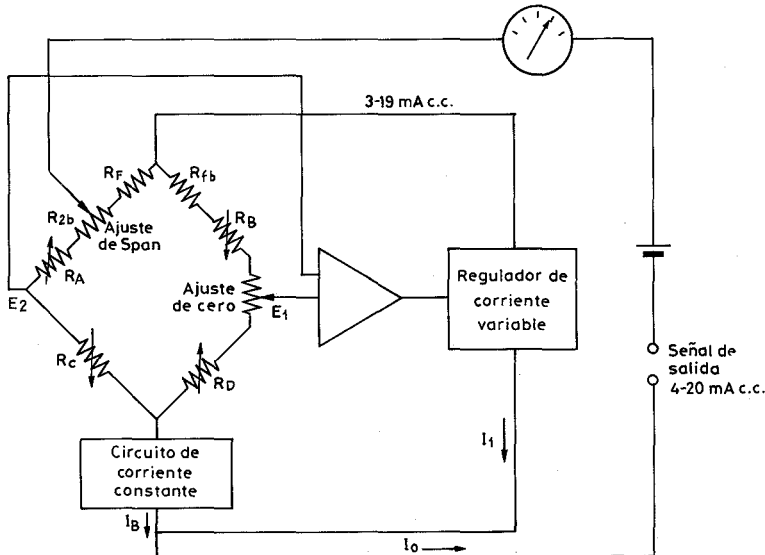
Cuando no hay presión, las tensiones E_1 y E_2 son iguales, y al aplicar la presión del proceso, R_B y R_C disminuyen su resistencia y R_A y R_D la aumentan, dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre E_1 y E_2 . Esta

diferencia se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA c.c. con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación R_{fb} , y eleva E_1 a una tensión equivalente a E_2 y reequilibra el puente. Como la caída de tensión producida a través de R_{fb} es proporcional a R_{2b} , esta resistencia fija el intervalo de medida (span) del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

La pastilla de silicio contiene normalmente dos puentes de Wheatstone, uno de presión, y el otro de presión diferencial y una termorresistencia. El micropro-

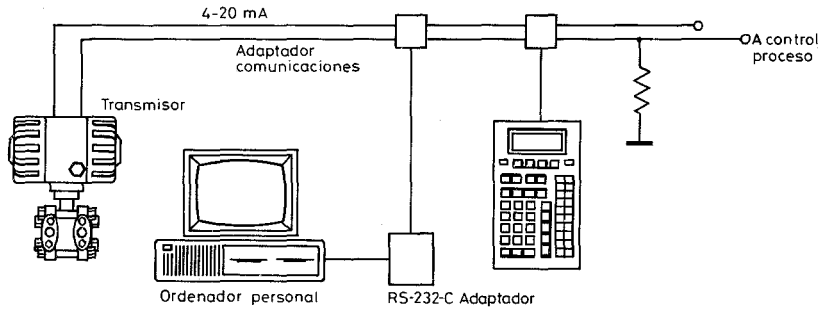
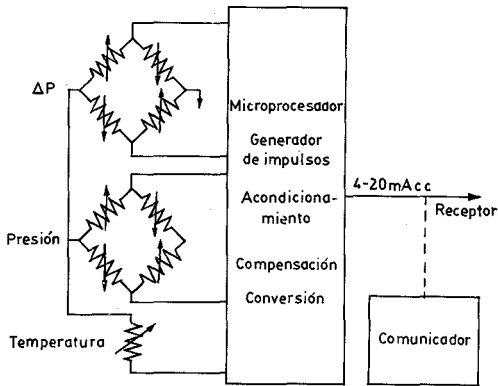


a) Capacitivo

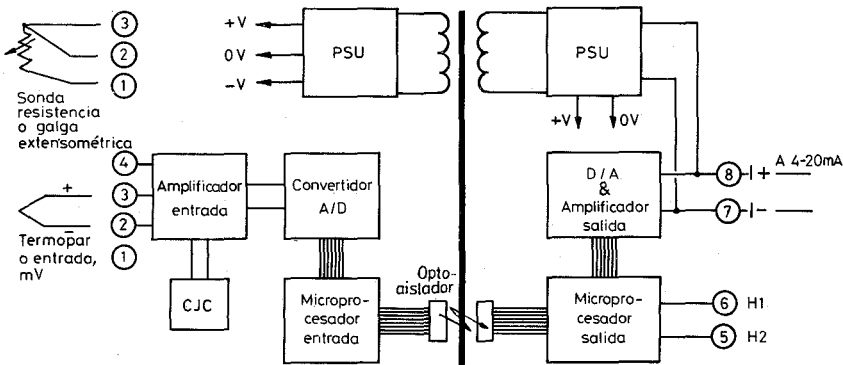


b) Puente de Wheatstone en silicio difundido

Fig. 2.9 Transmisor inteligente.



c) Transmisor con microprocesador y comunicador.



d) Transmisor inteligente de temperatura.

Fig. 2.9 (Cont.)

cesador compensa las no linealidades de los elementos o sensores individuales, convierte las tres señales analógicas a impulsos y calcula, mediante datos prefijados en fábrica y almacenados en su memoria, un valor digital de salida que es transformado a la señal de salida analógica de 4-20 mA c.c. Un comunicador portátil de teclado alfanumérico que puede conectarse en cualquier punto del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor, permite leer los valores del proceso, configurar el transmisor, cambiar su campo de medida y diagnosticar averías.

El instrumento proporciona un aumento en la precisión de la señal transmitida y en la precisión del lazo de control del orden de 0,15 %, y, lo que es más importante, unas posibilidades de calibración y de cambio del margen de medida, no conocidas hasta entonces. Antes de su aparición, la calibración y el cambio del margen de medida debían realizarse normalmente en el taller de instrumentos, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el proceso, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento (a no ser, naturalmente, que se dispusiera de un instrumento doble). Por ejemplo, la calibración de un instrumento de nivel típico requiere el vaciado del tanque, el desmontaje del aparato, y su calibración en el taller de instrumentos. Además, si se precisa que el proceso continúe en funcionamiento, es necesario montar una brida ciega en la brida del transmisor de nivel para poder llenar el tanque y continuar las operaciones de fabricación.

En variables específicas, tal como el caudal, el transmisor inteligente proporciona una mejora en la relación caudal máximo/caudal mínimo que pasa de 3:1 en la placa-orificio (o tobera o tubo Venturi) a 10:1 manteniendo la misma precisión de $\pm 1\%$.

Los transmisores inteligentes pueden disponer también de autocalibración. Un ejemplo de las técnicas de autocalibración lo constituyen los transmisores de nivel por ultrasonidos. Disponen de un reflector de las ondas sónicas que está situado en el tanque sobre la superficie del líquido, y hacia donde el emisor dirige periódicamente los ultrasonidos, ajustando entonces los parámetros de calibración. De este modo compensa las variaciones de velocidad del sonido provocadas por cambios en la temperatura del ambiente del tanque. En otros casos, la autocalibración es más difícil de conseguir. Tal ocurre en los medidores magnéticos de caudal en los que durante los intervalos de calibración sería necesario pasar por el elemento un caudal conocido de un fluido determinado.

Los transmisores inteligentes se prestan también al autodiagnóstico de sus partes electrónicas internas, función que proporciona al Departamento de Mantenimiento: primero el conocimiento de la existencia de un problema en el circuito, segundo el diagnóstico y la naturaleza del problema, señalando qué instrumento ha fallado y tercero, las líneas a seguir para la reparación o sustitución del instrumento averiado.

Con la entrada del transmisor inteligente, la calibración y el cambio de margen de trabajo, se logran simplemente por examen de los datos almacenados en una PROM y por utilización de técnicas digitales. Se consigue de este modo una relación «turndown» (relación entre el nivel mínimo de la variable y el máximo

que es medible, conservándose la precisión de la medida del instrumento) cuyo valor máximo es de 400:1, frente a la relación 1 a 6 de un transmisor de presión o nivel convencional, lo que posibilita la reducción drástica del número de transmisores en stock al poder utilizar prácticamente un solo modelo para cubrir los diferentes campos de medida utilizados hasta entonces en la fábrica. A señalar que si el campo de medida (span) es pequeño, se pierde precisión. La señal de salida continúa siendo de 4-20 mA c.c., pero, en el año 1986, Honeywell presentó ya el transmisor con señal de salida enteramente digital, lo que proporciona un aumento de la precisión del lazo de control que pasa al $\pm 0,15 \%$, al eliminar los convertidores A/D (analógico-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador). En líneas generales la precisión total del lazo de control utilizando transmisores analógicos convencionales es de $\pm 0,84 \%$; empleando transmisores inteligentes con señal 4-20 mA c.c. pasa a $\pm 0,29 \%$, y usando transmisores inteligentes digitales se logra $\pm 0,15 \%$. Y si estos últimos incorporan un algoritmo de caracterización, mejoran todavía más la precisión del lazo llegando a $\pm 0,075 \%$. Otras ventajas adicionales de estos transmisores son: el cambio automático del campo de medida, caso de que el valor de la variable salga del campo, las rutinas de autodiagnóstico, la monitorización de temperaturas y tensiones de referencia de los transmisores, la fijación de la variable en el último valor alcanzado, caso de detectarse alguna irregularidad en el funcionamiento del aparato, el autoajuste desde el panel de control, la función de caracterización que compensa las diferencias entre las condiciones de calibración en fábrica y las condiciones de campo actuales (algoritmo de caracterización único para cada instrumento) y que permite la instalación directa en campo y la fijación del campo de medida sin calibración, etc. Para visualizar la señal de salida, los datos de configuración, el margen de funcionamiento y otros parámetros, y cambiar los ajustes del campo de medida, se utiliza un comunicador portátil, que se conecta en cualquier punto de la línea de transmisión.

El transmisor o varios transmisores pueden conectarse, a través de una conexión RS-232, a un ordenador personal, que con el software adecuado, es capaz de configurar transmisores inteligentes.

La «inteligencia» se aplica también a otras variables, tal como la temperatura, donde el transmisor puede trabajar con distintas sondas de resistencia y termopares y diversos campos de medida, gracias a la linealización de las escalas y a la compensación de la unión fría que aporta el microprocesador (figura 2.9 d).

El transmisor con señal de salida enteramente digital, aumenta la precisión del lazo de control, al eliminar los convertidores A/D (analógico-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador).

En resumen, las ventajas del transmisor inteligente con relación a los instrumentos electrónicos analógicos convencionales (señal de salida 4-20 mA c.c.) son:

- Mejora de la precisión (2:1 como mínimo).
- Mejora de la estabilidad en condiciones de trabajo diversas (3:1 a 15:1).
- Campos de medida más amplios.
- Mayor fiabilidad.

— Bajos costes de mantenimiento.

Y si se emplea el transmisor digital inteligente (comunicación digital directa), las ventajas adicionales son:

— Menor desviación por variaciones de la temperatura ambiente o de la tensión de alimentación.

— Diagnóstico continuo del circuito (estado del instrumento).

— Comunicación bidireccional.

— Configuración remota desde cualquier punto de la línea de transmisión.

En cuanto a las desventajas, existe el problema de la rapidez y la falta de normalización de las comunicaciones.

Si el transmisor inteligente transmite una señal rápida, tal como la presión o el caudal, existe el peligro de que la cantidad de tareas y cálculos que debe realizar el microprocesador, le impida captar todos los valores de la variable. En este caso, debe utilizarse un transmisor electrónico analógico.

Los transmisores inteligentes con señal de salida de 4-20 mA c.c. pueden intercambiarse perfectamente con transmisores de otras marcas. Ello no es posible si son de señal de salida digital, debido a la falta de normalización en el campo de las comunicaciones que subsiste actualmente.

Existen instrumentos que reúnen tres transmisores en un solo aparato, midiendo la presión, la presión diferencial y la temperatura. De este modo permiten medir los caudales volumétrico y másico compensados de líquidos y gases a partir de un elemento primario, tal como una placa-orificio, tobera o tubo Venturi, reduciendo el coste (menores cableado, mano de obra y mantenimiento) y aumentando la precisión.

2.4 Comunicaciones

La mayor parte de las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas (neumáticas 0,2-1 bar utilizadas en pequeñas plantas y en las válvulas de control y electrónicas de 4-20 mA c.c.). Sin embargo, los instrumentos digitales capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas están aumentando día a día sus aplicaciones. Su precisión es unas diez veces mayor que la de la señal clásica de 4-20 mA c.c. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos (4-20 mA c.c.), transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus.

La tecnología «fieldbus» o «bus de campo» es un protocolo de comunicaciones digital de alta velocidad que está en camino de sustituir a la clásica señal analógica de 4-20 mA c.c. en todos los sistemas de control distribuido (DCS), y controladores programables (PLC), instrumentos de medida y transmisión y válvulas de control. La arquitectura «fieldbus» conecta estos aparatos con ordenadores que pueden trabajar para muchos niveles en la dirección de la planta. Los protocolos patentados por los fabricantes no permiten al usuario final la intercambiabilidad o interoperabilidad de sus instrumentos, es decir, no es posible sustituir un instrumento de un fabricante por otro similar de otro fabricante, ni intercambiar instrumentos de funcionalidad equivalente.

La arquitectura interna del «fieldbus» tiene los siguientes niveles o capas:

- *Nivel 1: Físico* que especifica las condiciones del medio de transmisión, las características eléctricas, mecánicas y funcionales y la codificación de los datos.
- *Nivel 2: Enlace* que establece el enlace lógico, el control de flujo y de errores, la sincronización de la transmisión y el control de acceso al medio.
- *Nivel 3 al 6:* Son objeto de protocolo.
- *Nivel 7: Aplicación* que contienen los servicios y regula la transferencia de mensajes entre las aplicaciones del usuario y los diferentes instrumentos.
- *Capa usuario: Dedicada.*

El primer bus de campo, efectivamente abierto, utilizado ampliamente fue el MODBUS de Gould Modicon que sólo dispone del nivel 1 (físico) y del 2 (enlace).

Los protocolos de comunicaciones abiertos importantes son el HART, World FIB, ISP, BITBUS, INTERBUS-S, P-NET, ECHELON y CAN.

El protocolo HART (High way-Addressable-Remote-Transducer) desarrollado inicialmente por Rosemount Inc., agrupa la información digital sobre la señal analógica clásica de 4-20 mA c.c. La señal digital usa dos frecuencias individuales, 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 (figura 2.10) y que forman una onda senoidal que se superpone sobre el lazo de corriente de 4-20 mA c.c. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ninguna componente de c.c. a la señal analógica de 4-20 mA c.c. En la figura 2.10 pueden verse las señales que constituyen el protocolo HART.

El protocolo HART permite soportar hasta 256 variables, los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus y comunicarse con 15 aparatos (PLC, ordenadores).

WorldFIP utiliza sistemas de comunicaciones sincronizadas en tiempo, basados en el protocolo FIP (Factory Instrumentation Protocol) de la industria francesa que

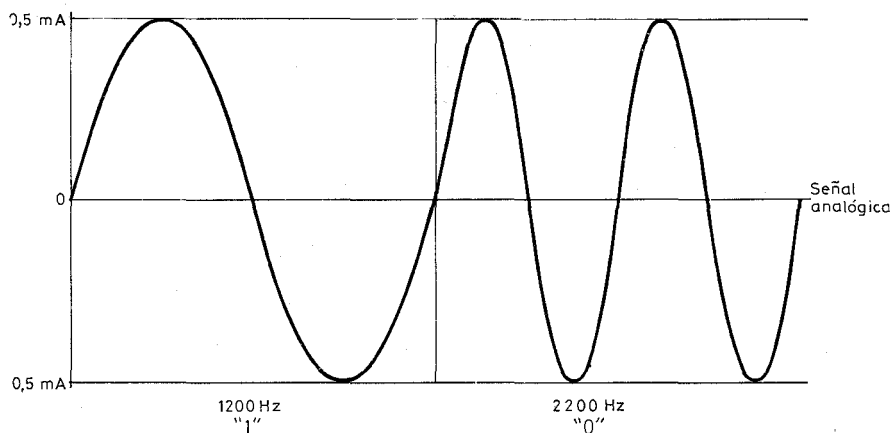


Fig. 2.10 Protocolo HART.

garantiza una comunicación rápida en el control de procesos. Lo integran Schneider, Honeywell, Bailey, Cegelec, Allen Bradley, ...

ISP (Interoperable Systems Project) se basa en varios sistemas, entre ellos PROFIBUS, estándar alemán en que el aparato («host») pasa un testigo («token») de aparato en aparato, dándole así acceso al circuito. Lo integran Siemens, Rosemount, Fisher Controls, Yokogawa, Foxboro, ABB, etc.

La Fundación Fieldbus (Fieldbus Foundation) fue creada en 1994 para definir un único estándar según las normas IEC-ISA y agrupa la organización WorldFIP y la Fundación ISP. Ello fue posible gracias a los progresos efectuados en los protocolos FIP y PROFIBUS.

En Europa existen normas de la CEGELEC (EN-82150) y está en marcha una iniciativa europea que puede reunir características de las normas FIP, PROFIBUS y P-NET.

La norma ISP-SP50, que inicialmente tenía que terminarse en 1989, se ha retrasado debido a la política de competencia de los fabricantes de instrumentos y todavía no es un estándar universal.

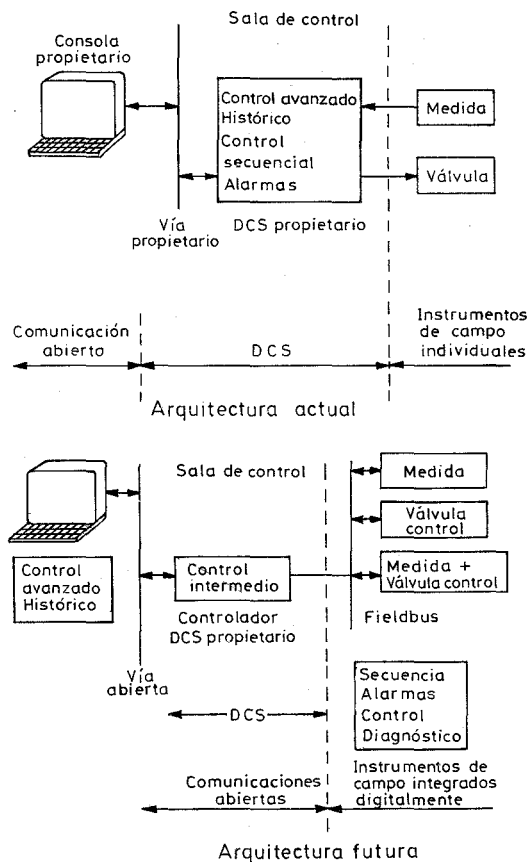


Fig. 2.11 Arquitecturas actual y futura de «fieldbus».

El sistema «totalmente abierto» desde la sala de control hasta los instrumentos de campo se conseguirá con el «fieldbus» estándar. Éste proporciona el control automático y secuencial, alarmas, inteligencia en los instrumentos de campo.

En la figura 2.11 pueden verse las arquitecturas actual y futura de «fieldbus».

Cabe señalar que el sistema totalmente abierto puede combinar con UNIX, Ethernet, con la base de datos relacional Oracle y con Windows, lo que reduce la necesidad de interfaces. Asimismo, el sistema abierto combinado con el software comercial puede conducir a una potencial pérdida de seguridad de datos por lo que los suministradores propietarios del sistema lo desarrollan con sumo cuidado.

Actualmente, los fabricantes están investigando continuamente en la evolución de sus equipos, por lo que no están excesivamente interesados en que exista un solo estándar. Por otro lado, al realizar en un tiempo mínimo las máximas aplicaciones posibles de su «fieldbus» propietario, el fabricante puede conseguir una cierta irreversibilidad del mercado, de tal modo que los propios usuarios pueden forzar la normalización del protocolo de comunicaciones que emplean.

Existen también asociaciones, fusiones y alianzas de colaboración entre empre-

TABLA 2.1 Características de transmisores

<i>Transmisor</i>	<i>Señal</i>	<i>Precisión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Neumático	3-15 psi 0,2-1 bar	$\pm 0,5 \%$	Rapidez Sencillo	Aire limpio No guardan información Distancias limitadas Mantenimiento caro Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	4-20 mA c.c.	$\pm 0,5 \%$	Rapidez	Sensible a vibraciones deriva térmica
Electrónico Inteligente	4-20 mA c.c.	$\pm 0,2 \%$	Mayor precisión Intercambiable Estable, Fiable Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas)
Electrónico Inteligente Señal digital	Digital	$\pm 0,1 \%$	Mayor precisión Más estabilidad Fiable Autodiagnóstico Comunicación bidireccional Configuración remota Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas) Falta normalización de las comunicaciones No intercambiable con otras marcas

sas orientadas a conseguir un segmento importante del mercado. Todo ello contribuye a la desorientación del usuario que antes de tomar una decisión debe ponderar las ventajas de los sistemas de comunicación actuales y las soluciones futuras (comunicaciones con otros tipos de fieldbus, etc.).

De todos modos, es deseable que los usuarios puedan disponer de un protocolo estándar y que éste pueda incorporarse lo más pronto posible a los grandes sistemas de control distribuido. Por otro lado, estos sistemas deben usar, de modo transparente, la infraestructura de comunicaciones de datos existente.

2.5 Comparación de transmisores

En la tabla 2.1 se efectúa una comparación de características de los transmisores neumáticos, electrónicos convencionales, e inteligentes; estos últimos en las versiones de señal de salida de 4-20 mA c.c. y de señal de salida digital.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

9.8.10	Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
9.9.1	Introducción.....	554
9.9.2	Nivel de energía de seguridad.....	555
9.9.3	Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
9.9.4	Clasificaciones de áreas peligrosas	558
9.9.5	Normas	560
9.9.6	Barreras Zener.....	560
9.9.7	Barreras galvánicas.....	562
9.9.8	Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
9.10.1	Generalidades.....	563
9.10.2	Control DDC	565
9.10.3	Control supervisor	568
9.10.4	Control distribuido	570
9.10.5	Sistemas de control avanzado.....	574
9.10.6	Sistemas expertos.....	580
9.10.7	Control por redes neuronales.....	583
9.10.8	Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
10.1	Introducción	601
10.2	Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
10.3	Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
10.4	Calibración de instrumentos de temperatura	614
10.5	Comprobación de válvulas de control	619
10.6	Aparatos electrónicos de comprobación	620
10.7	Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
11.1	Generalidades.....	625
11.2	Calderas de vapor	625
11.2.1	Control de combustión	626
11.2.2	Control de nivel.....	629
11.2.3	Seguridad de llama.....	632
11.3	Secaderos y evaporadores.....	632
11.4	Horno túnel.....	635
11.5	Columnas de destilación	637
11.6	Intercambiadores de calor	638
11.7	Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
A.1	Generalidades.....	645
A.2	Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

MEDIDAS DE PRESION

3.1 Unidades y clases de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias Generales de Pesas y Medidas 13 y 14* que tuvieron lugar en París en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Legal**. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m^2), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo

TABLA 3.1 Unidades de presión

	Psi	Pulgada c. de agua	Pulgada c. de Hg	Atmósfera	kg/cm ²	cm c. de a.	mm c. de Hg	Bar	Pa
Psi	1	27,68	2,036	0,0680	0,0703	70,31	51,72	0,0689	6894,76
Pulgada c. de a.	0,0361	1	0,0735	0,0024	0,0025	2,540	1,868	0,0024	249
Pulgada c. de Hg	0,4912	13,6	1	0,0334	0,0345	34,53	25,4	0,0338	3386,39
Atmósfera	14,7	406,79	29,92	1	1,033	1033	760	1,0132	$1,0133 \times 10^5$
kg/cm ²	14,22	393,7	28,96	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98066
cm c. de a.	0,0142	0,3937	0,0289	0,00096	0,0010	1	0,7355	0,0009	98,06
mm c. de Hg	0,0193	0,5353	0,0393	0,0013	0,0013	1,359	1	0,00133	133,322
Bar	14,5	401	29,53	0,987	1,02	1020	750	1	10^5
Pa	0,00014	0,0040	0,00029	$0,987 \times 10^{-5}$	$0,102 \times 10^{-4}$	0,01	0,0075	10^{-5}	1

* En España, según Decreto 1.257/1974 de 25 abril, publicado en BOE, núm. 110, de 8 de mayo de 1974.

** En España, según Decreto 18.464, publicado en BOE, núm. 223, de 17 de septiembre de 1974.

de masa 1 kg, le comunica una aceleración de 1 m/s^2 . Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal ($1 \text{ kPa} = 10^{-2} \text{ bar}$), el megapascal ($1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$) y el gigapascal ($1 \text{ GPa} = 10\,000 \text{ bar}$). En la industria se utiliza también el bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1,02 \text{ kg/cm}^2$) y el kg/cm^2 , si bien esta última unidad, a pesar de su uso todavía muy extendido, se emplea cada vez con menos frecuencia.

En la tabla 3.1 figuran las equivalencias entre estas unidades.

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura 3.1 se indican las clases de presión que los instrumentos miden comúnmente en la industria.

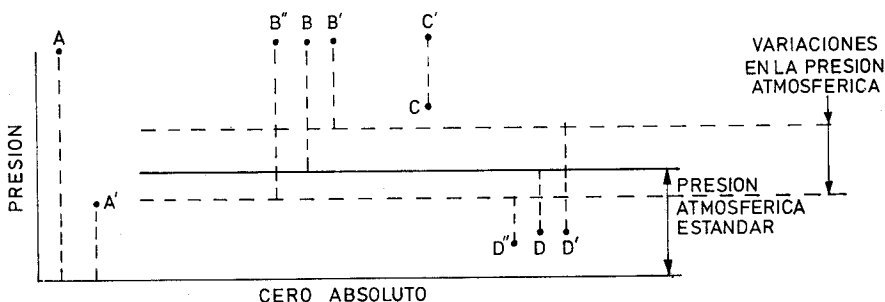


Fig. 3.1 Clases de presión.

La *presión absoluta* se mide con relación al cero absoluto de presión (puntos A y A' de la figura).

La *presión atmosférica* es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29,9 pulgadas) de mercurio absolutos o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas) y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.

La *presión relativa* es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (punto B de la figura). Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída (puntos B' y B''), si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.

La *presión diferencial* es la diferencia entre dos presiones, puntos C y C'.

El *vacío* es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (puntos D, D' y D''). Viene expresado en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas de columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas del vacío.

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. En la figura 3.2 pueden verse los tipos de instrumentos y su campo de aplicación.

Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos.

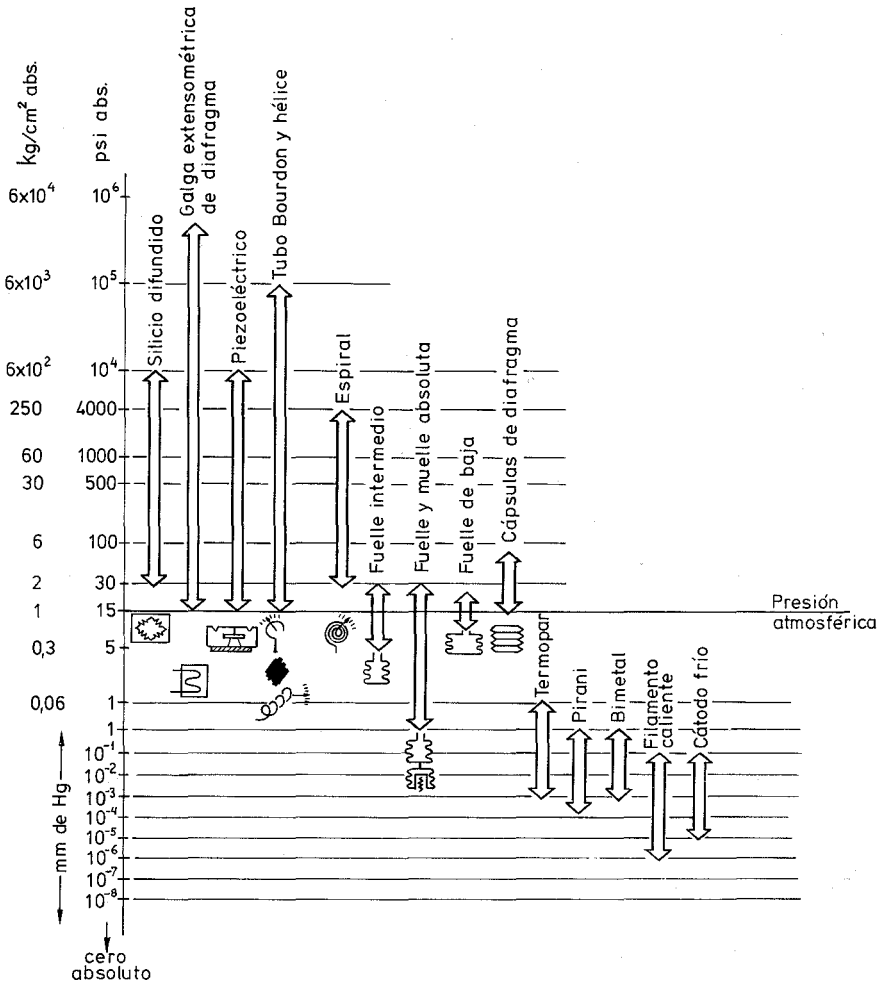


Fig. 3.2 Instrumentos de presión y campo de aplicación.

3.2 Elementos mecánicos

Se dividen en: 1.º elementos primarios de medida directa que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas (barómetro cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular, manómetro de campana), y 2.º elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen.

Los elementos primarios elásticos más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

El *tubo Bourdon* es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora,

por un sector dentado y un piñón. La ley de deformación del tubo Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en varios tubos.

El material empleado normalmente en el tubo Bourdon es de acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

El *elemento en espiral* se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el *helicoidal* arrollando más de una espira en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y por ello, son ideales para los registradores.

El *diafragma* consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento.

El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o inconel x. Se utiliza para pequeñas presiones.

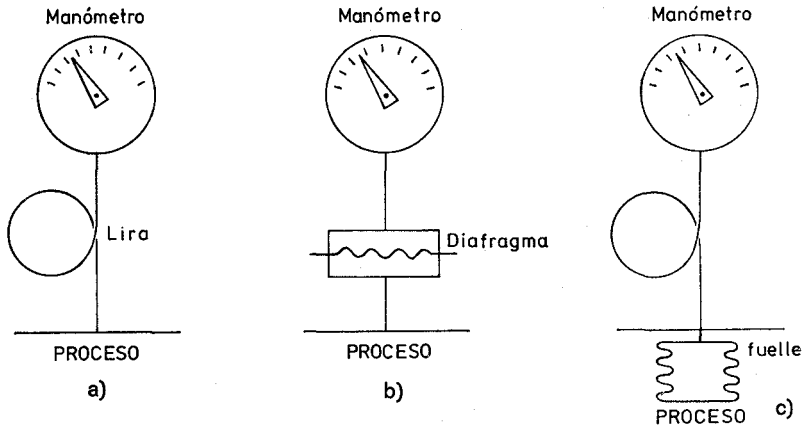
El *fuelle* es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable.

Hay que señalar que los elementos de fuelle se caracterizan por su larga duración, demostrada en ensayos en los que han soportado sin deformación alguna millones de ciclos de flexión. El material empleado para el fuelle es usualmente bronce fosforoso y el muelle es tratado térmicamente para mantener fija su constante de fuerza por unidad de compresión. Se emplean para pequeñas presiones.

Los *medidores de presión absoluta* consisten en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacío absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles equivale a la presión absoluta del fluido. El material empleado para los fuelles es latón o acero inoxidable. Se utilizan para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puedan afectar las variaciones en la presión atmosférica. Por ejemplo, en el caso de emplear un vacuómetro para el mantenimiento de una presión absoluta de 50 mm de mercurio en una columna de destilación, el punto de consigna sería de 710 mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775 mm el vacuómetro indicaría: $710 + 15 = 725$ mm con lo cual la presión absoluta en la columna sería controlada a $50 + 15 = 65$ mm, es decir, a un 30 % más de la deseada.

En la medida de presiones de fluidos corrosivos pueden emplearse elementos primarios elásticos con materiales especiales en contacto directo con el fluido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es más económico utilizar un fluido de sello cuando el fluido es altamente viscoso y obtura el elemento (tubo Bourdon, por ejemplo), o bien, cuando la temperatura del proceso es demasiado alta. Tal ocurre en la medición de presión del vapor de agua en que el agua condensada aísla el tubo Bourdon de la alta temperatura del vapor (fig. 3.3 a).

Se emplean asimismo sellos volumétricos de diafragma y de fuelle (fig. 3.3 b y c) que contienen un líquido incompresible para la transmisión de la presión.



En la tabla 3.2 pueden verse las características de los elementos mecánicos descritos.

TABLA 3.2 Elementos mecánicos

	<i>Campo de medida</i>	<i>Precisión en % de toda la escala</i>	<i>Temperatura máxima de servicio</i>	<i>Presión estática máxima</i>
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %		10 bar
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda			↓
Toro pendular	0,5-10 m cda			100-600 bar
Manómetro campana	0,005-1 m cda		↓	Atmosférica
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar		90° C	6000 bar
Espiral	0,5-2500 bar			2500 bar
Helicoidal	0,5-5000 bar			5000 bar
Diafragma	50 mm cda-2 bar			2 bar
Fuelle	100 mm cda-2 bar	↓	↓	↓
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs	1 %	Ambiente	Atmosférica
Sello volumétrico	3-600 bar	0,5-1 %	400° C	600 bar

3.3 Elementos neumáticos

Como elementos neumáticos consideramos los instrumentos transmisores neumáticos estudiados en el capítulo anterior cuyo elemento de medida es de presión adecuado al campo de medida correspondiente. El tipo de transmisor queda es-

tablecido por el campo de medida del elemento según la figura 3.2. Es obvio que, por ejemplo, un transmisor de 0-20 kg/cm² utilizará un transmisor de equilibrio de fuerzas de tubo Bourdon mientras que uno de 3-15 psi será de equilibrio de movimientos con elemento de fuelle. En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9 pueden verse estos tipos de transmisores neumáticos.

3.4 Elementos electromecánicos

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas.

Resistivos.

Magnéticos

Capacitivos.

Extensométricos.

Piezoelectrónicos.

3.4.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas

En la figura 3.4 está representado un transmisor de este tipo que ya ha sido descrito en el apartado 2.3 de transmisores electrónicos. En este instrumento el elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle...) ejerce una fuerza sobre una barra rígida del transmisor.

Para cada valor de la presión, la barra adopta una posición determinada excitándose un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia, un transformador diferencial o bien un detector fotoeléctrico. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones del proceso.

El detector de posición de inductancia y el transformador diferencial han sido ya estudiados anteriormente.

En el transmisor de equilibrio de fuerzas con detector fotoeléctrico (fig. 3.4 c), la barra rígida tiene en su extremo una ventanilla ranurada que interrumpe total o parcialmente un rayo de luz que incide en una célula fotoeléctrica de dos elementos. Esta célula forma parte de un circuito de puente de Wheatstone autoequilibrado y, por lo tanto, cualquier variación de presión que cambie la barra de posición, moverá la ventana ranurada y desequilibrará el puente. La señal diferencial que se produce en los dos elementos de la célula es amplificada y excita un servomotor. Éste, al girar, atornilla una varilla roscada la cual comprime un

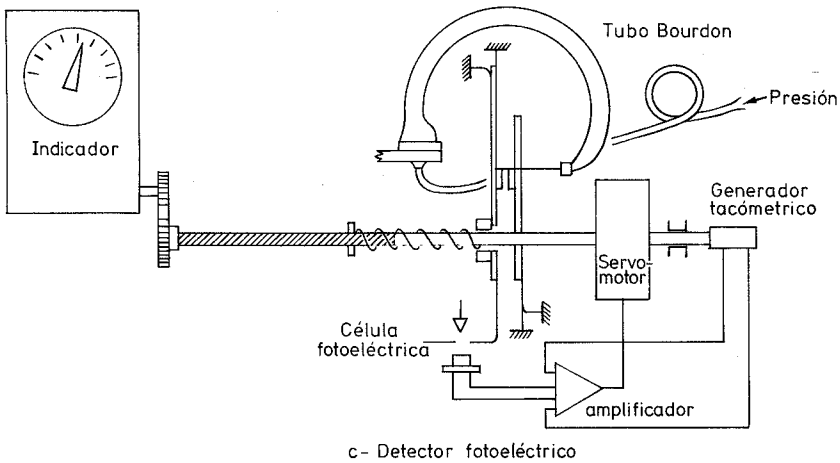
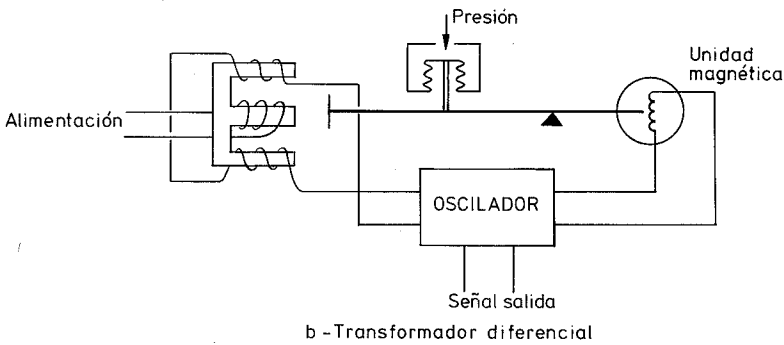
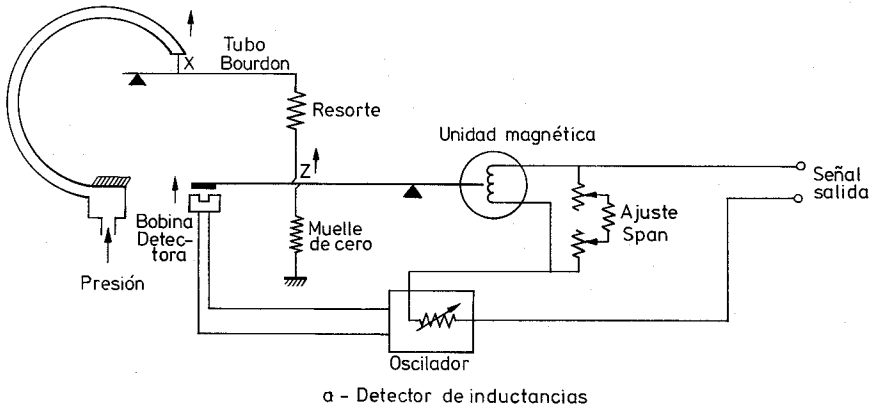


Fig. 3.4 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas.

resorte de realimentación que a su vez aprieta la barra de equilibrio de fuerzas con una fuerza tal que compensa la fuerza desarrollada por el elemento de presión. De este modo, el sistema se estabiliza en una nueva posición de equilibrio.

Este transmisor dispone de un contador óptico-mecánico acoplado al servomotor que señala los valores de presión en una pantalla exterior.

Los transductores electrónicos de equilibrio de fuerzas se caracterizan por tener un movimiento muy pequeño de la barra de equilibrio, poseen realimentación, una elasticidad muy buena y un nivel alto en la señal de salida. Por su constitución mecánica presentan un ajuste del cero y del alcance (*span*) complicado y una alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad en el tiempo es de media a pobre.

Su intervalo de medida corresponde al del elemento mecánico que utilizan (tubo Bourdon, espiral, fuelle, diafragma...) y su precisión es del orden de 0,5-1 %.

3.4.2 Transductores resistivos

Constituyen, sin duda, uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico (tubo Bourdon o cápsula) que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetros según sea el elemento de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la figura 3.5 puede verse un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además debe ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de otros factores ambientes externos.

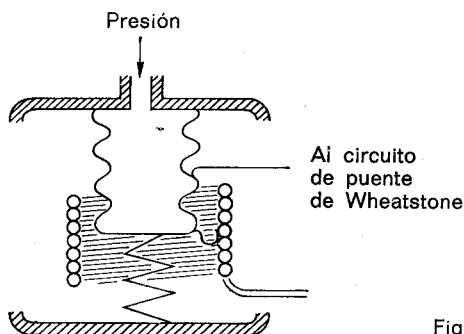


Fig. 3.5 Transductor resistivo.

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Éste está conectado a un circuito de puente de Wheatstone.

Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

El intervalo de medida de estos transmisores corresponde al elemento de

presión que utilizan (tubo Bourdon, fuelle...) y varía en general de 0-0,1 a 0-300 kg/cm². La precisión es del orden de 1-2 %.

3.4.3 Transductores magnéticos

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento.

a) *Transductores de inductancia variable* (fig. 3.6) en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.

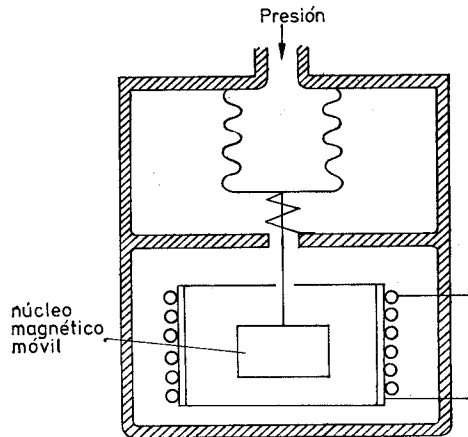


Fig. 3.6 Transductor de inductancia variable.

El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la f.e.m. de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la f.e.m. de autoinducción.

El transformador diferencial estudiado en los transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas es también un transductor de inductancia variable, si bien, en lugar de considerar una sola bobina con un núcleo móvil, se trata de tres bobinas en las que la bobina central o primaria es alimentada con una corriente alterna y el flujo magnético generado induce tensiones en las otras dos bobinas, con la particularidad de que si el núcleo está en el centro, las dos tensiones son iguales y opuestas y si se desplaza a la derecha o a la izquierda, las tensiones son distintas. Es decir, que el transformador diferencial es más bien un aparato de relación de inductancias.

Los transductores de inductancia variable tienen las siguientes ventajas: no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños y de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión es del orden de ± 1 %.

b) *Los transductores de reluctancia variable* (fig. 3.7) consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

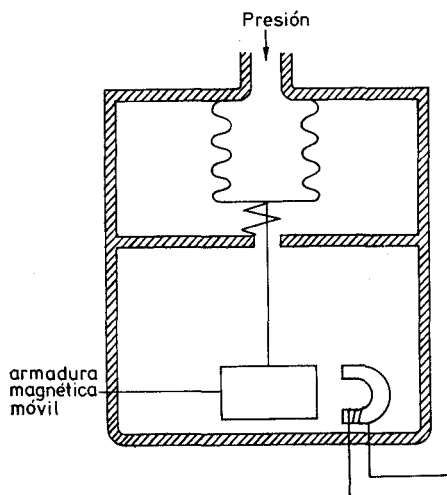


Fig. 3.7 Transductor de reluctancia variable.

El movimiento de la armadura es pequeño (del orden de un grado como máximo en armaduras giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Su precisión es del orden de $\pm 0,5 \%$.

Ambos tipos de transductores posicionan el núcleo o la armadura móviles con un elemento de presión (tubo Bourdon, espiral...) y utilizan circuitos eléctricos bobinados de puente de inductancias de corriente alterna.

3.4.4 Transductores capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión (fig. 3.8). La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son

sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de c.a. a los que están acoplados.

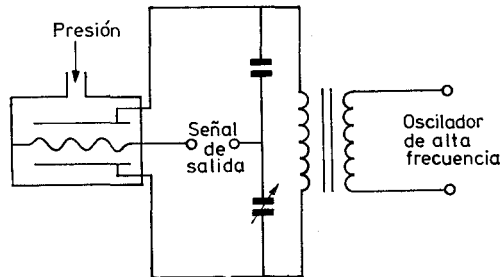


Fig. 3.8 Transductor capacitivo.

Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0,05-5 a 0,5-600 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,2$ a $\pm 0,5$ %.

3.4.5 Galgas extensométricas (*strain gage*)

Se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensométricas: galgas cementadas (fig. 3.9) formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico, y galgas sin cementar en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

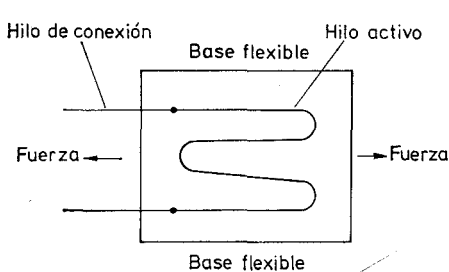


Fig. 3.9 Galga cementada.

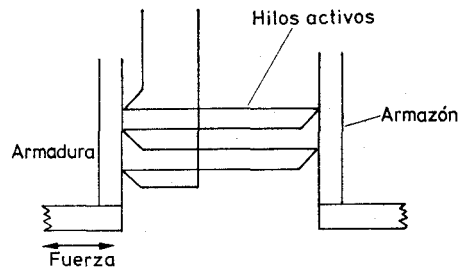


Fig. 3.10 Galga sin cementar.

En ambos tipos de galgas, la aplicación de presión estira o comprime los hilos según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando pues la resistencia de los mismos.

La galga forma parte de un puente de Wheatstone (fig. 3.11) y cuando está sin tensión tiene una resistencia eléctrica determinada. Se aplica al circuito una tensión nominal tal que la pequeña corriente que circula por la resistencia crea una caída de tensión en la misma y el puente se equilibra para estas condiciones.

Cualquier variación de presión que mueva el diafragma del transductor cambia la resistencia de la galga y desequilibra el puente.

El intervalo de medida de estos transductores varía de 0-0,6 a 0-10 000 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,5\%$.

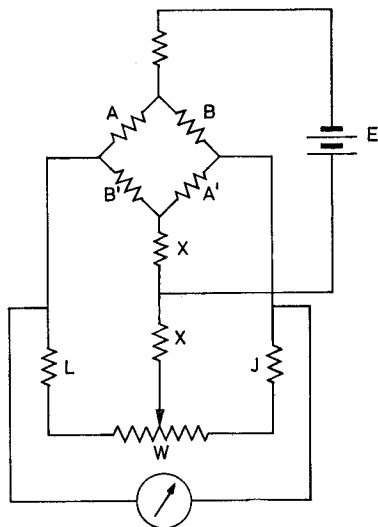


Fig. 3.11 Puente de Wheatstone para galga extensométrica.

Una innovación de la galga extensométrica la constituyen los transductores de presión de silicio difundido. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así una galga extensométrica autocontenida. El espesor del sensor determina el intervalo de medida del instrumento.

El sensor con su puente Wheatstone incorporado forma parte del circuito de la figura 3.12.

Cuando no hay presión, las tensiones E_1 y E_2 son iguales y, al aplicar la presión del proceso R_b y R_c disminuyen su resistencia y R_a y R_d la aumentan dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre E_1 y E_2 .

Esta diferencia se aplica a un amplificador diferencial de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación R_{fb} y produce una caída de tensión que equilibra el puente. Como esta caída es proporcional a R_{fb} esta resistencia fija el intervalo de medida (span) del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

La adición de un microprocesador permite añadir «inteligencia» al instrumento al hacer posible funciones adicionales, tales como la compensación de

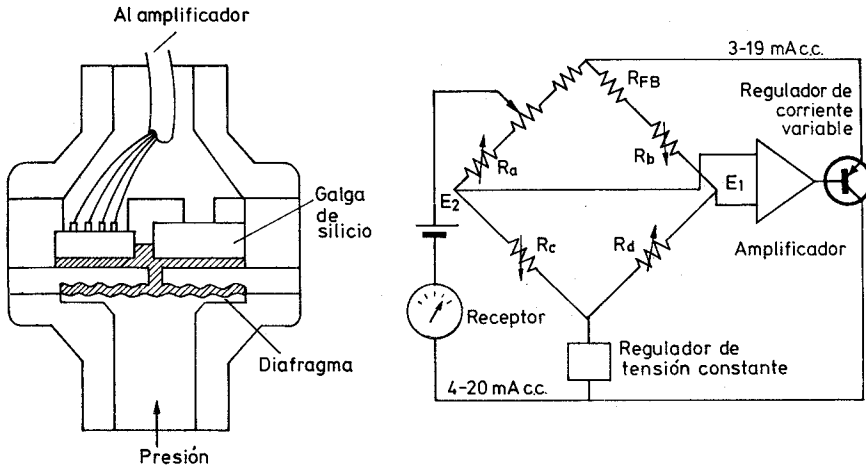


Fig. 3.12 Transductor de presión de silicio difundido.

temperatura ambiente, proporcionando un aumento de la precisión de la medida, en particular si la señal de salida del instrumento es enteramente digital en lugar de la analógica de 4-20 mA c.c.

El intervalo de medida de los transductores de silicio difundido varía de 0-2 a 0-600 bar, con una precisión del orden de $\pm 0,2\%$.

Las galgas extensométricas pueden alimentarse con c.c. o c.a. Tienen una respuesta frecuencial excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas. Presentan una compensación de temperatura relativamente fácil y generalmente no son influidas por campos magnéticos. Con excepción de las galgas de silicio difundido poseen las siguientes desventajas: señal de salida débil, pequeño movimiento de la galga, alta sensibilidad a vibraciones y estabilidad dudosa a lo largo del tiempo de funcionamiento. La galga de silicio difundido tiene la ventaja adicional de estar en contacto directo con el proceso sin mecanismos intermedios de medición de la presión pudiendo así trabajar correctamente aunque el fluido se deposite parcialmente sobre el diafragma del elemento ya que mide directamente la presión del fluido y no la fuerza que éste hace sobre el diafragma.

3.4.6 Transductores piezoeléctricos

Los elementos piezoeléctricos (fig. 3.13) son materiales cristalinos que, al defor-

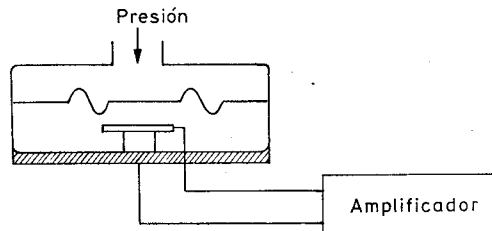


Fig. 3.13 Transductor piezoeléctrico.

marse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente.

Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo, su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición.

En la tabla 3.3 pueden verse las características de los elementos electromecánicos descritos.

3.5 Elementos electrónicos de vacío

Los transductores electrónicos de vacío se emplean para la medida de alto vacío, son muy sensibles y se clasifican en los siguientes tipos:

Mecánicos	— Fuelle y diafragma	Ionización	— Filamento caliente
Medidor McLeod	—		— Cátodo frío
Térmicos	— Termopar		— Radiación
	— Pirani		
	— Bimetal		

3.5.1 Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma

Trabajan en forma diferencial entre la presión atmosférica y la del proceso. Pueden estar compensados con relación a la presión atmosférica y calibrados en unidades absolutas. Al ser dispositivos mecánicos, las fuerzas disponibles a presiones del gas muy bajas son tan pequeñas que estos instrumentos no son adecuados para la medida de alto vacío estando limitados a valores de 1 mm Hg abs. Pueden llevar acoplados transductores eléctricos del tipo de galga extensométrica o capacitivos.

3.5.2 Medidor McLeod

Se utiliza como aparato de precisión en la calibración de los restantes instrumentos. Se basa en comprimir una muestra del gas de gran volumen conocido a un volumen más pequeño y a mayor presión mediante una columna de mercurio en un tubo capilar.

La presión del gas se deduce aplicando la ley de Boyle-Mariotte. Su intervalo de medida es de $5 \cdot 10^{-5}$ mm Hg.

TABLA 3.3 Transductores electromecánicos

	Margen en bar	Preci- sión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobre- carga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolu- ción	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos	Inductancia variable	0,5	Media	150 %	↓	0-5 V	2 k Ω	0,9-2,3 %	Continua	↓
	Reluctancia variable	1	Media	150 %	↓	0-5 V	2 k Ω	0,6-2,4 %	↓	↓
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 k Ω	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extenso- métricas	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	↓	Alta
	Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	350 Ω	↓	↓	↓
	Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓	Despreciable
Piezoelectrónicos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 M Ω	1-4,8 %	1/5000	Baja

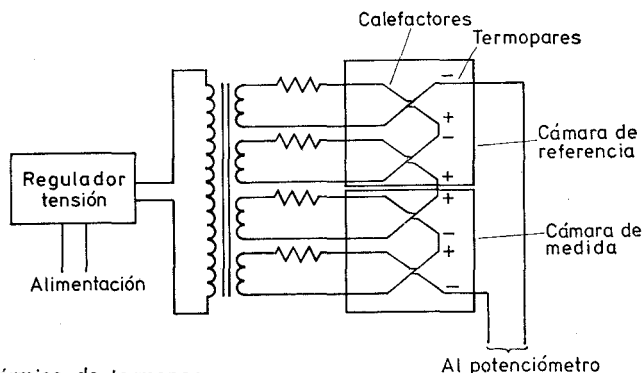


Fig. 3.14 Transductor térmico de termopar.

3.5.3 Transductores térmicos

Se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas está a bajas presiones absolutas.

El *transductor térmico de termopar* contiene un filamento en V que lleva incorporado un pequeño termopar (fig. 3.14). Al pasar una corriente constante a través del filamento, su temperatura es inversamente proporcional a la presión absoluta del gas. La f.e.m. generada por el termopar indica la temperatura del filamento y por lo tanto señala el vacío del ambiente. Para compensar la temperatura ambiente se emplea una segunda unidad contenida dentro de un tubo sellado al vacío. La señal de salida diferencial de los dos termopares es proporcional a la presión.

Las ventajas principales de este tipo de transductor residen en su bajo coste, larga duración y confiabilidad. Tiene el inconveniente de ser sensible a la composición del gas, poseer características no lineales y presentar el riesgo de combustión si se expone a presión atmosférica cuando el filamento está caliente. Su intervalo de medida es de $0,5 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

El *transductor Pirani* (fig. 3.15) utiliza un circuito de puente de Wheatstone

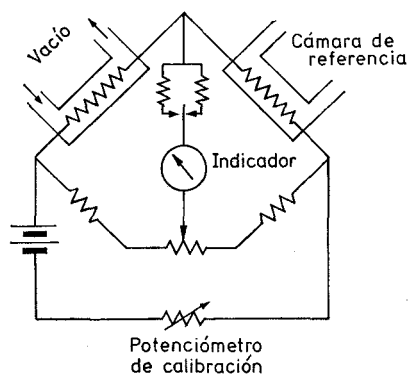


Fig. 3.15 Transductor Pirani.

que compara las resistencias de dos filamentos de tungsteno, uno sellado en alto vacío en un tubo y el otro en contacto con el gas medido y que por lo tanto pierde calor por conducción. En este transductor es la resistencia del filamento la que refleja la presión en lugar de ser su temperatura.

El transductor Pirani tiene la ventaja de ser compacto y sencillo de funcionamiento, pudiendo estar a presión atmosférica sin peligro de combustión. Tiene el inconveniente de que su calibración depende de la composición del gas medido y de ser altamente no lineal. Su intervalo de medida es de $2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

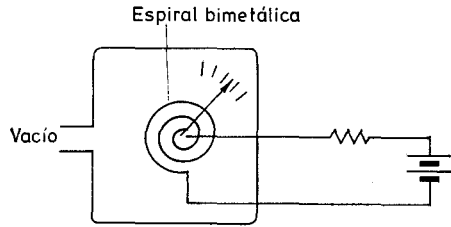


Fig. 3.16 Transductor bimetalico.

El *transductor bimetalico* (fig. 3.16) utiliza una espiral bimetalica calentada por una fuente de tensión estabilizada. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión de la espiral, que a su vez está acoplada a un índice que señala en la escala el vacío. Su intervalo de medida es de $1 \cdot 10^{-3}$ mm Hg.

3.5.4 Transductores de ionización

Se basan en la formación de los iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La velocidad de formación de estos iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión.

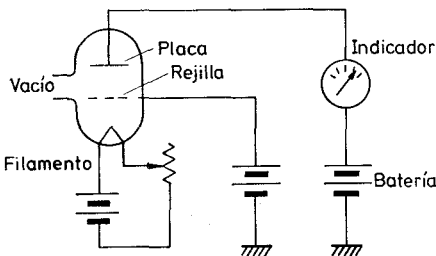


Fig. 3.17 Transductor de filamento caliente.

El *transductor de filamento caliente* (fig. 3.17) consiste en un tubo electrónico con un filamento de tungsteno rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta por una placa colectora. Los electrones emitidos por el filamento caliente se aceleran hacia la rejilla positiva, pasan a su través y, en su camino hacia la placa colectora de carga negativa, algunos colisionan con moléculas del gas. La corriente positiva formada es una función del número de iones

y, por lo tanto, constituye una medida de la presión del gas. Estos instrumentos son muy delicados y deben manejarse con cuidado. El filamento puede quemarse si se somete accidentalmente a presiones superiores a 1×10^{-3} mm Hg absolutos.

Estos transductores son muy sensibles y capaces de medir vacíos extremadamente altos. Su señal eléctrica de salida es lineal con la presión. Tienen el inconveniente de ser sensibles a la composición del gas, de tal modo que en ocasiones el filamento caliente provoca cambios significativos en su composición entre el volumen medido y el volumen contenido dentro del tubo electrónico. El intervalo de medida de estos transductores es de 10^{-3} a 10^{-11} mm Hg.

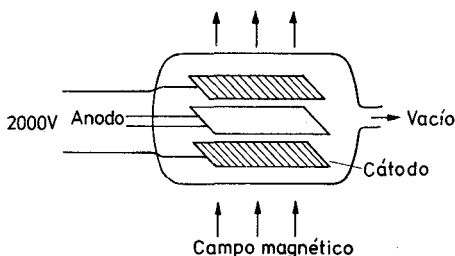


Fig. 3.18 Transductor de cátodo frío.

El transductor de *cátodo frío* (fig. 3.18) se basa en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. Los electrones desprendidos del cátodo toman un movimiento en espiral al irse moviendo a través de un campo magnético en su camino hacia el ánodo. El movimiento en espiral da lugar a que el camino libre medio entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos. Por consiguiente, aumenta la posibilidad de colisiones con las moléculas del gas presente lo que da lugar a una mayor corriente iónica y de este modo la descarga catódica se mantiene a una presión más baja, o sea a un vacío más alto. Este instrumento no puede vaciarse de gases tan rápidamente.

TABLA 3.4 Transductores electrónicos de vacío

	Margen (torrs)	Escala	Precisión
Mecánicos	760 - 5	Lineal	1 %
McLeod	$5 \cdot 10^{-5}$	↓	1 - 10 % lectura
Térmicos	0,5 - 10^{-3}	Logarítmica	Alta
	2 - 10^{-3}	↓	—
	1 - 10^{-3}	↓	—
Ionización	10 ⁻³ - 10 ⁻¹³	↓	—
	10 ⁻² - 10 ⁻⁷		

te como el de filamento caliente, pero es más robusto y no presenta el problema de la combustión del filamento. Es susceptible de contaminación por el mercurio y puede provocar la descomposición química de vapores orgánicos a altas tensiones. Su campo de aplicación abarca de 10^{-2} a 10^{-7} mm de Hg con una escala logarítmica.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

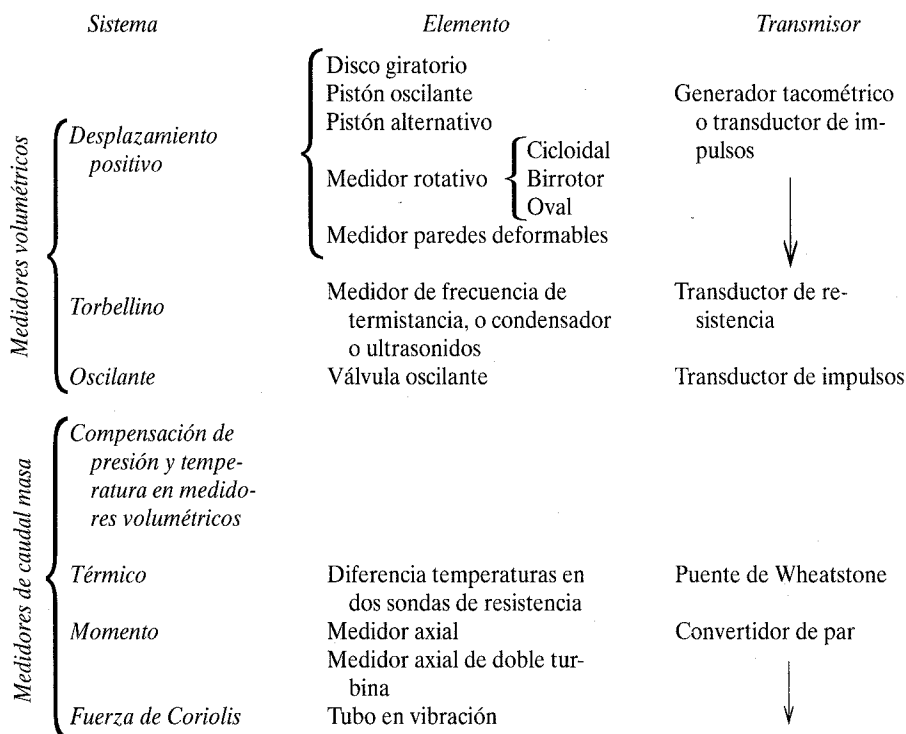
MEDIDAS DE CAUDAL

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de los caudales de líquidos o de gases.

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado. Entre los transductores más importantes figuran los siguientes:

	<i>Sistema</i>	<i>Elemento</i>	<i>Transmisor</i>
<i>Medidores volumétricos</i>	<i>Presión diferencial</i>	{ <div> Placa-orificio Tobera Tubo Venturi Tubo Pitot Tubo Annubar </div>	{ <div> conectados a tubo U o a elemento de fuelle o de diafragma </div> Equilibrio de fuerzas Silicio difundido
	<i>Área variable</i>	Rotámetro	{ <div> Equilibrio de movimientos Potenciométrico Puente de impedancias </div>
	<i>Velocidad</i>	{ <div> Vertedero con flotador en canales abiertos Turbina Sondas ultrasónicas </div>	{ <div> Potenciométrico Piezoeléctrico </div>
	<i>Fuerza</i>	Placa de impacto	{ <div> Equilibrio de fuerzas Galgas extensométricas </div>
	<i>Tensión inducida</i>	Medidor magnético	Convertidor potenciométrico

(sigue)



4.1 Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente (desplazamiento), bien indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

Hay que señalar que la medida del caudal volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa-orificio o diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

4.1.1 Instrumentos de presión diferencial

4.1.1.1 Fórmula general

La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte.) a una tubería horizontal (fig. 4.1). En la figura 4.2 pueden verse los valores de las presiones a lo largo de la tubería en una placa-orificio o diafragma.

Si P_a , P_c y V_a , V_c son las presiones absolutas y velocidades en la zona ante-

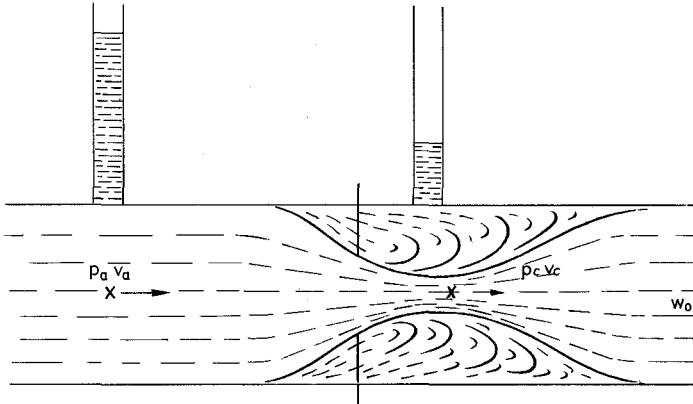


Fig. 4.1 Teorema de Bernouilli.

rior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída respectivamente, y S_a , S_c son las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0} \quad \text{y} \quad S_a V_a = S_c V_c$$

siendo ρ_0 la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que ρ_0 no varía en toda la longitud estudiada de la vena.

De aquí se obtiene:

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2 \left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

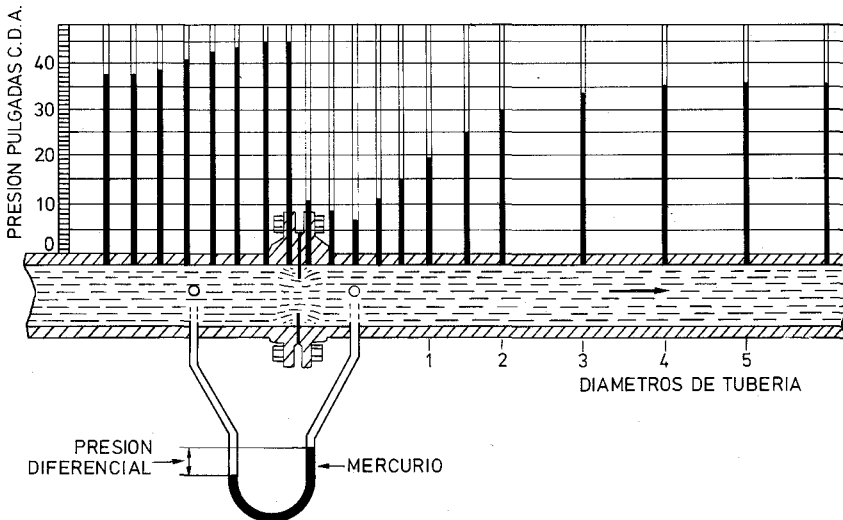


Fig. 4.2 Presión diferencial creada por la placa-orificio.

y llamando d = diámetro del orificio en m

D = diámetro interior de la tubería aguas arriba, en m

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

y llamando β a la relación de diámetros $\beta = d/D$, resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

y llamando $E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ coeficiente de velocidad de acercamiento resulta:

$$V_c = E \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

y el caudal en volumen será:

$$Q_v = S_c \cdot V_c = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s} = K \sqrt{\frac{h}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s}$$

y el caudal en peso:

$$Q_m = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \cdot \rho_0} \text{ kg/s}$$

expresando d en m; h , P_a y P_c en pascal y ρ_0 en kg/m^3 ; y siendo K una constante, d el diámetro del orificio y h la presión diferencial producida por el elemento.

Otra expresión es:

$$Q_v = K \sqrt{H}$$

en la que H es la diferencia de alturas de presión del fluido. Estas expresiones están limitadas a fluidos ideales incompresibles.

Las fórmulas anteriores son aproximadas. En la práctica se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

La fórmula anterior se afecta de un coeficiente adicional C llamado «coeficiente de descarga» con lo cual

$$Q_v = C \cdot E \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

Por otro lado, se encuentra que la relación

$$\alpha = \frac{Q_v}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_a - P_c)}{\rho_0}}}$$

llamada «coeficiente de caudal» depende sólo del número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{o} \quad Re_d = \frac{V \cdot D}{\nu} \cdot \frac{1}{\beta}$$

con

V = Velocidad axial media del fluido aguas arriba

ν = Viscosidad cinemática del fluido

De aquí

$$C \cdot E = \alpha \quad \text{y} \quad C = \frac{\alpha}{E}$$

El caudal masa sería:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_0 = CE \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \cdot \rho_0}$$

En el caso de un fluido compresible, su densidad varía en toda la sección de la vena ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico.

La expresión final que se obtiene es parecida a la de los fluidos incompresibles introduciendo un coeficiente experimental de expansión ϵ para tener en cuenta la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo. No depende del número de Reynolds y es función de la relación de presiones, de la relación de calores específicos para los fluidos compresibles y de la relación de secciones del elemento y la tubería.

La expresión final es:

$$Q_v = CE\epsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.1)$$

expresada en las mismas unidades que la ecuación correspondiente a los fluidos incompresibles.

O bien en caudal masa:

$$Q_m = CE\epsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \rho_0} \text{ kg/s} \quad (4.2)$$

Si las presiones P_a y P_c se expresaran en bar ($1 P_a = 10^5$ bar), y los diámetros D y d en mm, las expresiones anteriores cambian a:

$$Q_v = CE\varepsilon \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{106} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0} 10^5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_m = CE\varepsilon \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{106} \sqrt{2 \cdot (P_a - P_c) \cdot 10^5 \cdot \rho_0} \text{ kg/s}$$

En el caso de que la densidad se calcule a partir de la densidad en condiciones normales, la fórmula anterior para fluidos compresibles es aplicable a los gases que sigan la ley de los gases perfectos. En la práctica, la ley no es exactamente verdadera cuando las presiones de servicio superan los 10 bar, debiendo notar que lo es tanto menos cuanto más se acerque el gas a las condiciones críticas.

De aquí que la densidad del gas se aparte de la teórica dependiendo de la temperatura y de la presión críticas. Las desviaciones están representadas por el coeficiente de compresibilidad Z que es la relación entre la densidad considerando el gas perfecto y la densidad real.

En la figura 4.3 *a* puede determinarse el valor de Z directamente.

Otra forma de determinar el factor de compresibilidad es emplear la ecuación de estado reducida de los gases. En esta ecuación se usan las magnitudes reducidas de la presión y la temperatura (P_r y T_r), es decir, los cocientes entre la magnitud en cuestión y la correspondiente magnitud crítica.

De este modo:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

y la ecuación reducida es:

$$P_r V_r = Z n R T_r$$

con $V_r = \text{volumen reducido} = \frac{V}{V_c}$

$n = \text{número de moles de gas}$

$R = \text{constante general de los gases}$

y Z es el coeficiente de compresibilidad que corrige directamente la densidad del gas.

La determinación de Z se logra empleando las curvas de la figura 4.3 *b* conjuntamente con la tabla 4.1, que da las constantes críticas de algunos gases.

Cuando el gas transporta vapor de agua sin contener partículas de agua, deja de ser puro y se considera húmedo. La densidad del gas húmedo se desvía del correspondiente al gas seco de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$\omega_h = \frac{P_h - f P_v}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_h} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \omega_s + f \omega_v$$

en la que:

$\omega_h = \text{densidad del gas húmedo en condiciones de servicio en kg/m}^3$

$\omega_s = \text{densidad del gas seco en condiciones estándar en kg/m}^3$

TABLA 4.1 Constantes críticas

Elemento	Presión crítica — P_0		Temperatura crítica — T_0		Coeficiente isentrópico κ (C_p/C_v)
	psia	bars (abs)	° F	° C	
Ácido acético	841	58,0	612	322	
Acetona	691	47,6	455	235	
Acetileno	911	62,9	97	36	1,24
Aire	547	37,8	— 222	— 141	1,41
Amoníaco	1638	113,0	270	132	1,31
Argón	705	48,6	— 188	— 122	1,67
Benceno	701	48,4	552	289	
Butano	529	36,5	307	153	1,10
Dióxido de carbono	1072	74,0	88	31	1,30
Monóxido de carbono	514	35,5	— 218	— 139	1,40
Tetracloruro de carbono	661	45,6	541	283	
Cloro	1118	77,0	291	144	
Etano	717	49,5	90	32	1,19
Alcohol etílico	927	64,0	469	243	
Etileno	742	51,2	50	10	1,24
Éter etílico	522	36,0	383	195	1,13
Flúor	367	25,3	— 247	— 155	
Helio	33,2	2,29	— 450	— 268	1,66
Heptano	394	27,2	513	267	
Hidrógeno	188	13,0	— 400	— 240	1,41
Ácido clorhídrico	1199	82,6	124	51	
Isobutano	544	37,5	273	134	
Alcohol isopropílico	779	53,7	455	235	
Metano	673	46,4	— 117	— 83	1,31
Alcohol metílico	1156	79,6	464	240	1,203
Nitrógeno	492	34,0	— 233	— 147	1,40
Óxido nitroso	1054	72,7	99	37	
Octano	362	25,0	565	296	
Oxígeno	730	50,4	— 182	— 119	1,40
Pentano	485	33,5	387	197	
Fenol	889	61,3	786	419	
Fosgeno	823	56,7	360	182	
Propano	617	42,6	207	97	1,33
Propileno	661	45,6	198	92	
Refrigerante 12	582	40,1	234	112	
Refrigerante 22	713	49,2	207	97	
Dióxido de azufre	1142	78,8	315	157	
Agua	3206	221,0	705	374	1,30

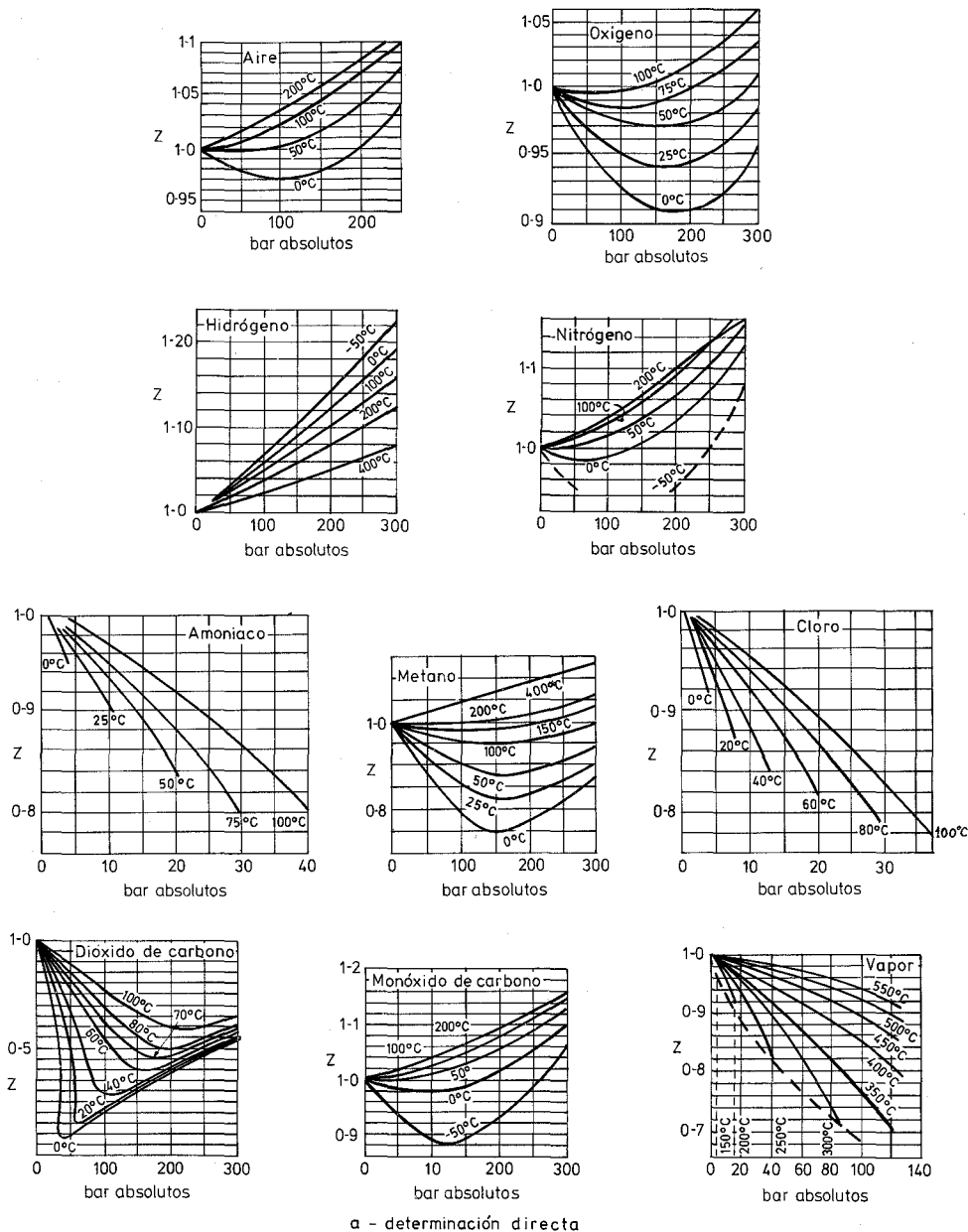
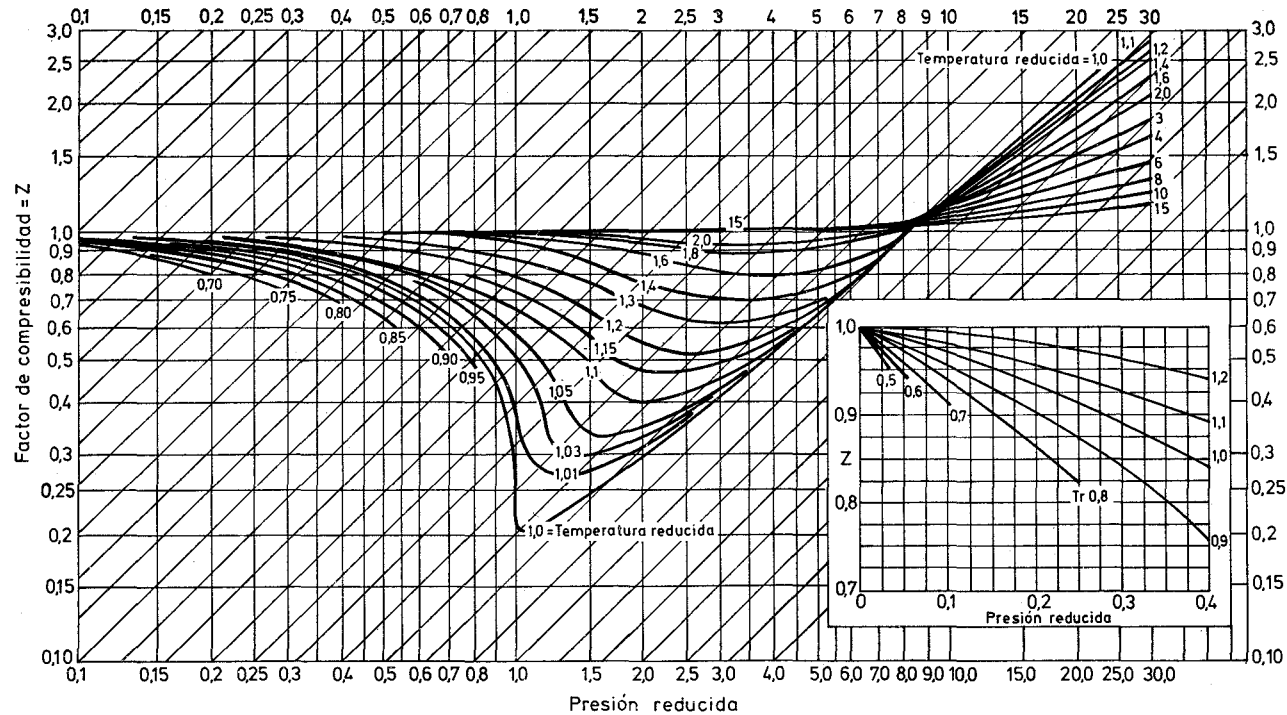


Fig. 4.3 Coeficientes de compresibilidad.



b - en función de la presión y temperaturas reducidas

Fig. 4.3 Coeficientes de compresibilidad (continuación).

ω_v = peso específico del vapor saturado en las condiciones de servicio en kg/m^3

P_h = presión absoluta del gas húmedo en bar

P_n = presión absoluta del gas seco en condiciones estándar (1 atm) = 1,013 bar

P_v = presión absoluta del vapor saturado en las condiciones de medida en bar

T_h = temperatura absoluta del gas húmedo ($273^\circ + t$ K)

T_n = temperatura absoluta del gas seco en condiciones estándar = 288 K

Z = coeficiente de compresibilidad

f = humedad relativa

La adición de vapor de agua a una cantidad determinada de gas seco, influye en el caudal correspondiente a una presión diferencial dada de dos modos distintos: por un lado la densidad del gas húmedo cambia con relación a la del gas seco y por otro el gas medido es sólo una parte de la mezcla que pasa a través del elemento.

De aquí que el factor de corrección N para gas húmedo debe ser directamente proporcional al porcentaje del peso del gas seco con relación al peso de la mezcla y directamente proporcional a la raíz cuadrada del porcentaje de densidades entre el gas húmedo y el seco (este último a la misma presión P_h). Es decir, si ω = tensión del vapor de agua = $f P_v$, y su densidad relativa es 0,624, resulta:

$$\frac{\text{dens. gas húmedo}}{\text{dens. gas seco}} =$$

$$= \frac{\frac{P_h - \omega}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \rho_g \cdot 1,293 + \frac{\omega}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot 0,624 \cdot 1,293}{\frac{P_h}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \rho_g \cdot 1,293}$$

$$= \frac{(P_h - \omega) \rho_g + 0,624 \omega}{P_h \cdot \rho_g}$$

$$\frac{\text{peso del gas seco en la mezcla}}{\text{peso total de la mezcla}} =$$

$$= \frac{\frac{P_h - \omega}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \rho_g \cdot 1,293}{\frac{P_h - \omega}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \rho_g \cdot 1,293 + \frac{\omega}{1,013} \cdot \frac{288}{273 + t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot 0,624 \cdot 1,293}$$

$$= \frac{(P_h - \omega) \rho_g}{(P_h - \omega) \rho_g + 0,624 \omega}$$

Luego:

$$N = \frac{(P_h - \omega) \rho_g}{(P_h - \omega) \rho_g + 0,624 \omega} \sqrt{\frac{(P_h - \omega) \rho_g + 0,624 \omega}{P_h \rho_g}} =$$

$$= \sqrt{\frac{[(P_h - \omega)]^2 \rho_g}{P_h \cdot [(P_h - \omega) \rho_g + 0,624 \omega]}} = \sqrt{\frac{P_h - \omega}{P_h + \frac{0,624 P_h \cdot \omega}{(P_h - \omega) \rho_g}}}$$

y llamando $\frac{P_h}{\omega} = B$ resulta:

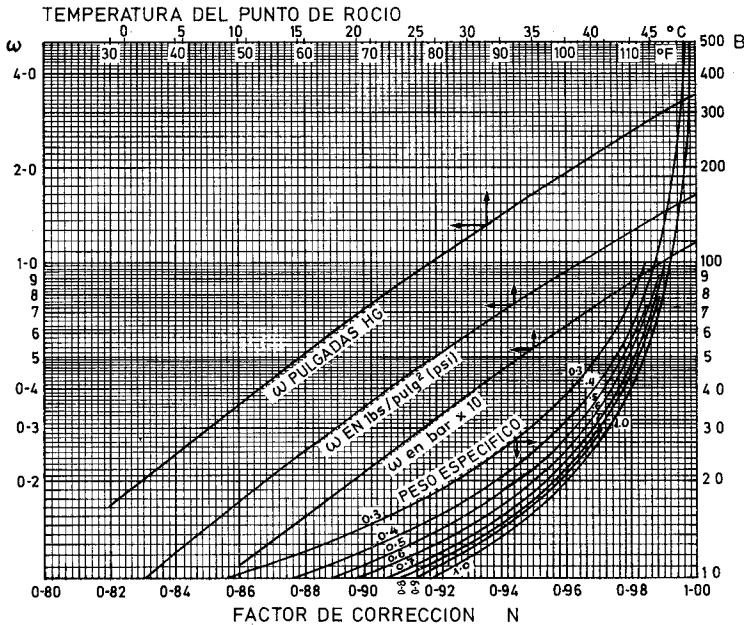
$$N = \sqrt{\frac{B - 1}{B + \frac{0,624 B}{(B - 1) \rho_g}}}$$

fórmula que da directamente el factor de corrección para gas húmedo en función de:

$$B = \frac{P_h}{\omega} = \frac{\text{Presión absoluta del gas húmedo}}{\text{Presión del vapor de agua}}$$

ρ_g = densidad relativa del gas seco.

Esta fórmula está representada en la figura 4.4 en función de la temperatura de saturación del gas (punto de rocío) y de su peso específico.



Pasos a seguir:

1. Del punto de rocío en la escala superior se determina la presión de vapor ω mediante la línea de presiones correspondiente.
2. Se obtiene B como cociente de la presión absoluta del gas P_h y de ω .
3. Con B en la escala vertical derecha y mediante las curvas de peso específico se lee en la escala inferior el factor N.

Fig. 4.4 Factor de corrección de humedad del gas.

En ocasiones, el caudal del fluido es pulsante debido a la acción de bombas de pistón, compresores, ventiladores..., etc. Como es lógico, es necesario amortiguarlo y ello se realiza en los instrumentos de medida mediante los dispositivos amortiguadores de que disponen (ver más adelante transmisores de caudal). La señal resultante obtenida es el promedio de la presión diferencial efectiva, de modo que el caudal leído en el instrumento es:

$$Q_m = C \sqrt{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_n}{n}}$$

Sin embargo, el caudal real promedio que el instrumento leería realmente, si fuera capaz de trabajar sin amortiguación sería

$$Q_{m'} = C \left[\frac{\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \sqrt{\Delta P_3} + \dots + \sqrt{\Delta P_n}}{n} \right]$$

El error $Q_m - Q_{m'}$ es siempre positivo dependiendo del tipo de pulsaciones y del sistema de amortiguamiento. Para disminuir este error es necesario aumentar la pérdida de carga o bien el volumen que se encuentra entre la máquina, causa de las pulsaciones, y el punto de medida del caudal.

En la selección de la presión diferencial que el elemento de medida (diafragma, tobera, tubo Venturi) producirá para el caudal máximo del fluido fijado en el cálculo se presentan dos factores importantes a considerar, la presión de la línea y la pérdida de carga máxima del elemento. Ambos factores influyen en el costo de funcionamiento de la instalación, es decir, en el costo necesario para que el fluido pase a través del elemento. Asimismo, la conveniencia de lograr una exactitud casi constante en todo el campo de medida de la presión diferencial es otro compromiso a satisfacer. Depende de la relación de diámetros y de la situación del elemento en la tubería conjuntamente con los tramos rectos y accesorios que se encuentren aguas arriba y aguas abajo del elemento.

Los compromisos anteriores entre los varios factores expuestos se reflejan en la tabla 4.2 — que relaciona la presión diferencial máxima que el elemento puede admitir con la presión estática en la línea — y en los gráficos de longitudes rectas de tubería y pérdidas de carga de las figuras 4.5 y 4.6.

Hay que señalar que en la medida de caudales de líquidos se emplea normalmente una presión diferencial de 2500 mm c. de a. (100" c. de a.).

La instalación de los elementos de presión diferencial requiere que se respeten unas distancias de tramos rectos de la tubería, antes y después del elemento. En la figura 4.5 pueden verse estas normas generales en las cuales se señalan en abscisas la relación de diámetros d/D (\varnothing interior del elemento a \varnothing tubería) y en ordenadas las distancias expresadas en diámetros de tubería.

Por otro lado, los elementos de presión diferencial absorben una pérdida de carga que depende de la relación de diámetros d/D y que es una fracción de la presión diferencial que el elemento crea.

En la figura 4.6 puede verse el porcentaje de presión diferencial absorbida pudiendo apreciarse que el orden de pérdida de carga de mayor a menor es placa-orificio/tobera/tubo Venturi.

TABLA 4.2 Presión diferencial máxima

Pres. dif. máx.		** Presión estática mínima recomendada	
mm c. de a.	Pulgadas c. de a.	mm y bar	pulgadas y psig
64	2.536*	0 mm c. de a.	0" H ₂ O ga
102	4.019*	127 mm c. de a.	5" H ₂ O ga
127	5.000	178 mm c. de a.	7" H ₂ O ga
162	6.370	254 mm c. de a.	10" H ₂ O ga
254	10.000	508 mm c. de a.	20" H ₂ O ga
256	10.099*	508 mm c. de a.	20" H ₂ O ga
406	16.000	889 mm c. de a.	35" H ₂ O ga
508	20.000	0,14 bar	2 psig
552	21.722	0,14 bar	2 psig
635	25.000	0,7 bar	10 psig
644	25.360	0,7 bar	10 psig
874	34.429	0,7 bar	10 psig
1270	50.000	1,4 bar	20 psig
1386	54.562	1,7 bar	25 psig
1453	57.210	2,5 bar	35 psig
2196	86.479	3,2 bar	45 psig
2540	100.00	4,2 bar	60 psig
3270	128.73	4,2 bar	60 psig
3481	137.05	4,9 bar	70 psig
5080	200.00	7 bar	100 psig
5518	217.23	7 bar	100 psig
5813	228.86	7 bar	100 psig
7620	300.00	9,8 bar	140 psig
8744	344.26	10,5 bar	150 psig
10160	400.00	12,6 bar	180 psig
12700	500.00	15,5 bar	220 psig
15240	600.00	18,3 bar	260 psig
17780	700.00	21,1 bar	300 psig
20320	800.00	23,9 bar	340 psig
22860	900.00	26,7 bar	380 psig
25400	1000.00	29,5 bar	420 psig

* Diferenciales utilizados sólo para gases.

** En caudales de gases o de vapores, el diferencial en pulgadas de c. de a. no debe exceder la presión estática total en psia.

Primer accesorio aguas arriba	Distancia entre el medidor y el primer accesorio (L1)													Distancia entre accesorios (aguas arriba) (L2)
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	β 0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	β 0,2 a 0,8
Curva de 90° o T	10	10	10 0,5	12 0,5	14 0,5	14 1,0	14 1,5	16 2,5	18 3,0	22 4,0	28 4,0	36 4,5	46	14 14
Dos o más curvas de 90° (radio D) en el mismo plano	14	14	16 1,5	16 1,5	18 1,5	18 1,5	20 2,5	22 2,5	26 3,0	32 4,5	36 4,5	42 4,5	50	18 18
Dos o más curvas de 90° (radio D) en diferentes planos	34	34	34 0,5	36 0,5	36 0,5	38 0,5	40 8,5	44 12,5	48 17,5	54 23,5	62 27,5	70 29,5	80	31 31
Reductor 2D a D en una longitud de 3D Venturi 3D a D en 3,5D	5	5	5	5 1,5	5 2,5	5 4,5	6 5,5	8 6,5	9 8,5	11 9,5	14 10,5	22 11,5	30	7 7
Expansión 0,5D a D en una longitud de 1,5D Venturi 0,75D a D en D	16	16	16 1,5	16 1,5	16 1,5	17 2,5	18 2,5	20 3,5	22 3,5	25 4,5	30 5,5	38 6,5	54	15 15
Válvula de globo (totalmente abierta)	18	18	18	18	20	20	22	24	26	28	32	36	44	16
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	12	12	12 1,5	12 2,5	12 2,5	12 3,5	12 3,5	14 4,5	14 4,5	16 4,5	20 5,5	24 5,5	30	10 10
Reducción simétrica abrupta de 2D a D	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	15 15
Tanque	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30-L _{U1} 30-L _{U1}

La primera fila corresponde a placa-orificio y tobera. La segunda fila corresponde a tubo Venturi. Las longitudes están expresadas en múltiplos del diámetro D.

Fig. 4.5 Tramos rectos de tubería para la instalación del elemento.

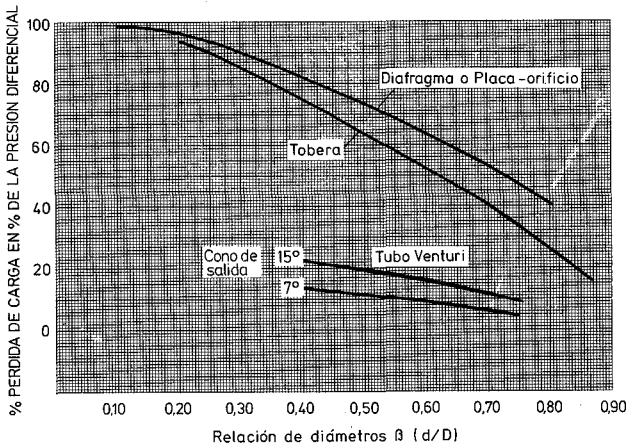


Fig. 4.6 Pérdida de carga de los elementos de presión diferencial.

4.1.1.2 Elementos de presión diferencial

Los elementos de presión diferencial son los siguientes:

La *placa-orificio o diafragma* consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal. La disposición de las tomas puede verse en la figura 4.7.

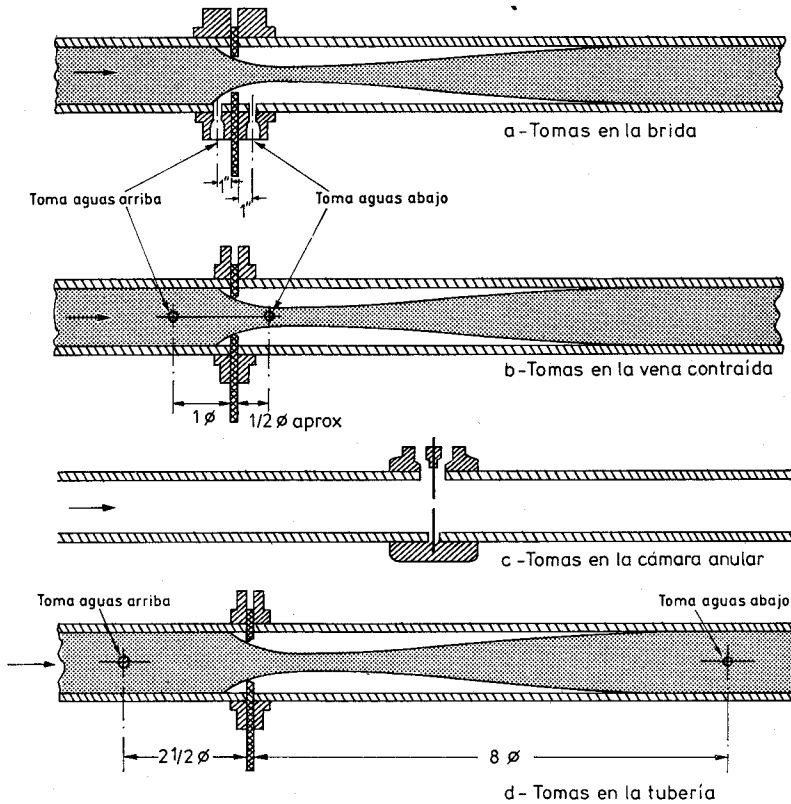


Fig. 4.7 Disposición de las tomas de presión diferencial.

Tomas en la brida (*flange taps*) (fig. 4.7 a). Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída (*vena contracta taps*) (fig. 4.7 b). La toma posterior está situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a $\frac{1}{2} \varnothing$ de la tubería. La toma anterior se sitúa a $1 \varnothing$ de la tubería.

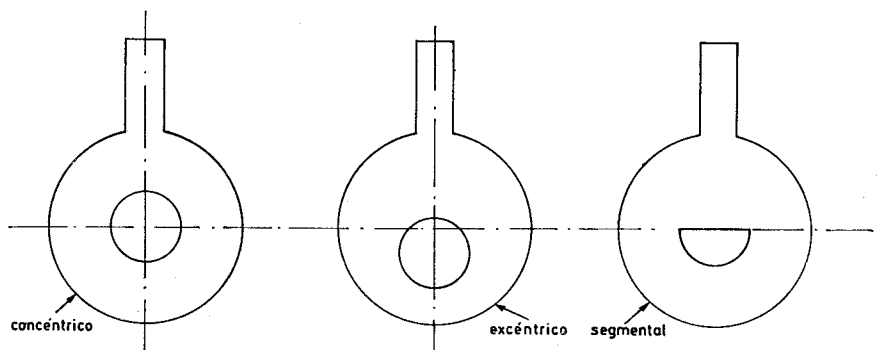
Tomas radiales (*radius taps*). Son parecidas a las tomas de vena contraída, pero fijando siempre las tomas anterior y posterior a 1 y $\frac{1}{2} \varnothing$ de la tubería, respectivamente.

Tomas en la cámara anular (*corner taps*) (fig. 4.7 c). Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Se emplean mucho en Europa.

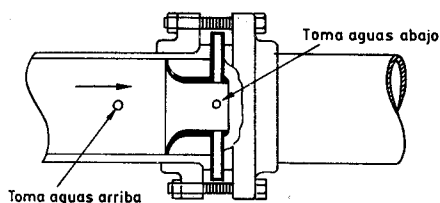
Tomas en la tubería (*pipe taps*) (fig. 4.7 d). Las tomas anterior y posterior están situadas a $2\frac{1}{2}$ y $8 \varnothing$, respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio de la placa puede ser *concéntrico*, *excéntrico* o *segmental*, con un pequeño orificio de purga para los pequeños arrastres sólidos o gaseosos que pueda llevar el fluido (fig. 4.8 a). Los dos últimos diafragmas permiten medir caudales de fluidos que contengan una cantidad pequeña de sólidos y de gases. La precisión obtenida con la placa es del orden de ± 1 a $\pm 2 \%$.

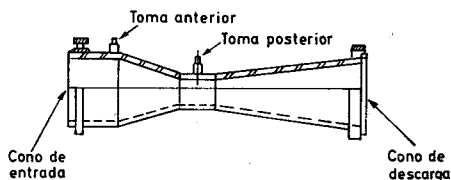
La *tobera* está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña (figura 4.8 b). La tobera permite caudales 60 % superiores a los de la placa-orificio en las mismas condiciones de servicio. Su



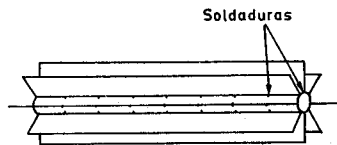
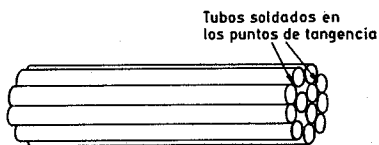
a - Placa orificio o diafragma



b - Tobera



c - Tubo Venturi



d - Enderezadores de venas

Fig. 4.8 Tipos de elementos.

pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad, si bien, si estos sólidos son abrasivos, pueden afectar la precisión del elemento. El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,95$ a $\pm 1,5$ %.

El tubo Venturi (fig. 4.8 c) permite la medición de caudales 60 % superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20 % de la presión diferencial. Posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida. El coste del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de $\pm 0,75$ %.

Para el cálculo de los diafragmas, toberas y tubos Venturi se utilizan normas variadas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- ISO 5167-1980 Medida del flujo de fluidos por medio de placas-orificio, toberas o tubos Venturi, insertados en conductos de sección circular. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.
- Norma ASME 19.5 — Flowmeter Computation Handbook. American Society for Mechanical Engineers, New York, 1971
- Norma A.P.I. 2530 — Septiembre 1985 para gas natural.
- Principle and Practice of Flow Meter Engineering L. K. Spink (1978)
- Normas AGA-3 y AGA-7 — Gas Measurement Committee Report — American Gas Association, Cleveland, Ohio

En estas normas se indican las pérdidas de carga de los elementos y las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancias mínimas a codos, curvas, válvulas, etc. Cuando estas condiciones de distancia son críticas, se utilizan dispositivos llamados enderezadores de venas que dan un régimen laminar del fluido y permiten reducir el espacio recto necesario (fig. 4.8 d).

El lector interesado en conocer más detalles puede consultar las normas citadas si bien, como ejemplo, figuran a continuación las bases de cálculo y un resumen de la norma ISO. Esta norma es bastante empleada en Europa y su utilización es cómoda.

Como ejemplo ilustrativo para el lector se exponen más adelante varios ejemplos de cálculo para agua, vapor y gases.

4.1.1.3 Resumen de las normas ISO 5167-1980

FLUIDOS INCOMPRESIBLES

La fórmula del caudal que pasa a través de la placa-orificio, tobera o tubo Venturi (fig. 4.9 a, b y c) deducida de las expresiones anteriores 4.1 y 4.2 es:

$$Q_v = 3,512 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon \cdot D^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho_0}}$$

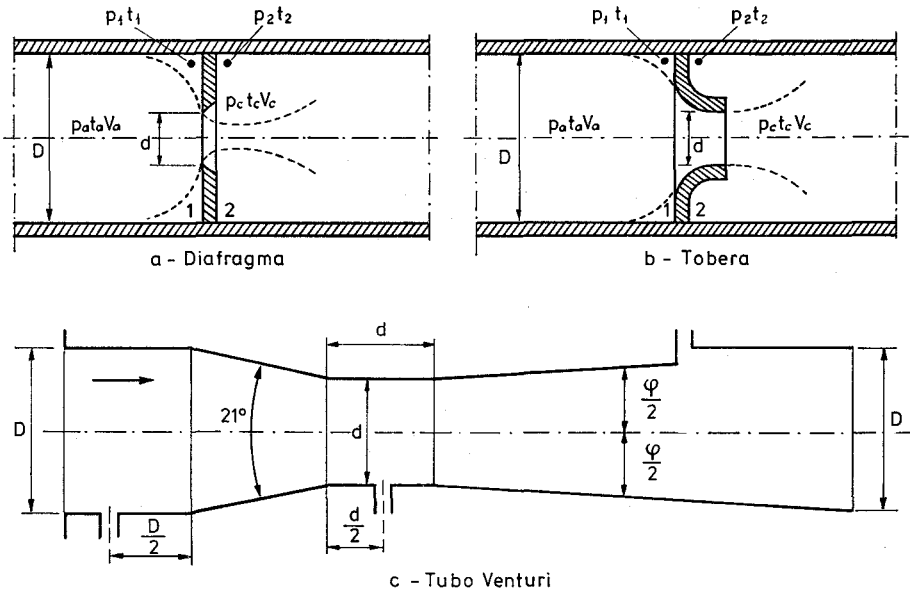


Fig. 4.9 Diafragma, tobera y tubo Venturi.

$$Q_m = 3,512 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot \varepsilon \cdot D^2 \sqrt{(P_1 - P_2) \cdot \rho_0}$$

en la que:

Q_v = caudal volumétrico en m^3/s

Q_m = caudal masa en kg/s

C = coeficiente de descarga

α = coeficiente de caudal

E = coeficiente de velocidad de acercamiento = $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$

con β = relación de diámetros = $\frac{d}{D}$

d = \varnothing mínimo del orificio del elemento en mm.

D = \varnothing interior de la tubería en mm.

P_1 = presión estática absoluta en el ángulo muerto antes del elemento en bar

P_2 = presión estática absoluta en el ángulo muerto después del elemento, bar

ρ_0 = densidad del fluido en las condiciones P_0, T_0 en kg/m^3

Para el cálculo de las dimensiones del elemento se despeja el término $\alpha\beta^2$ de las fórmulas anteriores, resultando:

Diafragma, tobera o tubo Venturi

$$\alpha \beta^2 = \frac{4 Q_v}{\varepsilon \pi D^2 \sqrt{2 \frac{P_1 - P_2}{\rho_0}}}$$

o en función del caudal masa

$$C J \alpha \beta^2 = \frac{4 Q_m}{\varepsilon \pi D^2 \sqrt{2 (P_1 - P_2) \rho_0}}$$

expresiones en las cuales el segundo término es conocido.

A continuación, y por aproximaciones sucesivas, se determina la relación final de diámetros β del elemento primario seleccionado, de acuerdo con la aproximación deseada en el cálculo, que suele ser de 0,01 %.

Si se desea un cálculo rápido del elemento deprimógeno, basta considerar:

Coefficiente de descarga de la placa-orificio = 0,6

Coefficiente de descarga de la tobera y del tubo Venturi = 1

Velocidad de acercamiento = 1

Y las fórmulas de cálculo son las siguientes:

Placa-orificio y tobera:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \cdot 10^4}{2,1 \cdot \sqrt{PD \cdot \rho}}}$$

Tubo Venturi:

$$d = \sqrt{\frac{Q_m \cdot 10^4}{3,5 \cdot \sqrt{PD \cdot \rho}}}$$

en las que:

d = diámetro del orificio en mm

Q_m = caudal masa en kg/s

PD = presión diferencial en bar

ρ = densidad del fluido en kg/m³ en condiciones de servicio

La marcha a seguir en el cálculo normal del elemento es la siguiente (se ha seguido un procedimiento de cálculo parecido al expuesto en la obra *Shell Flow Meter Engineering Handbook* que sigue las normas ISO 5167-1980, citado en las referencias):

Diafragma con tomas en la brida

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \cdot [1 + H \cdot 10^{-5} (t - t_0)]$$

siendo

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería (tabla 4.3) en mm/m

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente en °C

2. Número de Reynolds, $Re_D = \frac{1,2732 \cdot 10^6 \cdot Q_m}{\eta \cdot D}$

con Q_m = caudal de diseño en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en mPa · s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{4,6 \cdot 10^{-10} \cdot D^4 \cdot PD \cdot \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta la figura 4.10 para comprobar los límites del número de Reynolds con relación a β .

La tabla que sigue proporciona los valores máximos que puede tener la rugosidad relativa k/D de la tubería, para una distancia de 10 diámetros de tubería aguas arriba de la placa orificio, para satisfacer la norma ISO.

β	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,75
$k/D \cdot 10^4$	25	18,1	12,9	10	10	10	10	10	10	10	10

Si $k/D \cdot 10^4$ es < 10 no hay límite para el valor de β .

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ϵ (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ , o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante, respectivamente, puede consultarse en la tabla 4.1.

TABLA 4.3 Dilatación media en mm/m y para 100° C
(Multiplicar por 0,01 para obtener mm/m °C)

Material tubería	0 y 100° C	0 y 200° C	0 y 300° C	0 y 400° C	0 y 500° C	0 y 600° C
Acero	1,17	1,22	1,28	1,33	1,38	1,43
Fundición	1,04	1,09	1,15	1,20	1,26	1,32
Bronce	1,75	1,79	1,83	1,88	1,92	—
Acero inox. 18/8	1,60	1,65	1,71	1,76	1,8	1,84
Acero con 13 % Cr	1,05	1,10	1,13	1,17	1,2	1,22

TABLA 4.4 Viscosidad y densidad de líquidos

(X e Y son las coordenadas para determinación de la viscosidad según la gráfica de la página 118 — primera gráfica)

Líquido	X	Y
Aceite de linaza	7,5	27,2
Acetaldehído	15,2	4,8
Acetato de amilo	11,8	12,5
Acetato de butilo	12,3	11,0
Acetato de etilo	13,7	9,1
Acetato de metilo	14,2	8,2
Acetato de vinilo	14,0	8,8
Acetona, 100 %	14,5	7,2
Acetona, 35 %	7,9	15,0
Ácido acético, 100 %	12,1	14,2
Ácido acético, 70 %	9,5	17,0
Ácido butírico	12,1	15,3
Ácido clorhídrico, 31,5 %	13,0	16,6
Ácido clorosulfónico	11,2	18,1
Ácido fórmico	10,7	15,8
Ácido isobutírico	12,2	14,4
Ácido nítrico, 95 %	12,8	13,8
Ácido nítrico, 60 %	10,8	17,0
Ácido propiónico	12,8	13,8
Ácido sulfúrico, 110 %	7,2	27,4
Ácido sulfúrico, 98 %	7,0	24,8
Ácido sulfúrico, 60 %	10,2	21,3
Agua	10,2	13,0
Alcohol alílico	10,2	14,3
Alcohol amílico	7,5	18,4
Amoníaco, 100 %	12,6	2,0
Amoníaco, 26 %	10,1	13,9
Anhídrido acético	12,7	12,8
Anilina	8,1	18,7
Anisol	12,3	13,5
Benceno	12,5	10,9
Bromo	14,2	13,2
Bromotolueno	20,0	15,9
Bromuro de etilo	14,5	8,1
Bromuro de propilo	14,5	9,6
Butanol	8,6	17,2
Ciclohexanol	2,9	24,3
Clorobenceno	12,3	12,4
Cloroformo	14,4	10,2
Clorotolueno, orto	13,0	13,3
Clorotolueno, meta	13,3	12,5
Clorotolueno, para	13,3	12,5
Cloruro de calcio, sol. 25 %	6,6	15,9
Cloruro estánnico	13,5	12,8
Cloruro de etilo	14,8	6,0
Cloruro de metilo	15,0	3,8
Cloruro de propilo	14,4	7,5
Cloruro de sodio, sol. 25 %	10,2	16,6
Cloruro de sulfurilo	15,2	12,4
Cresol, meta	2,5	20,8
Dibromoetano	12,7	15,8
Dicloroetano	13,2	12,2
Diclorometano	14,6	8,9
Difenilo	12,0	18,3

TABLA 4.4 (Continuación)

<i>Líquido</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
Dióxido de azufre	15,2	7,1
Dióxido de carbono	11,6	0,3
Etanol, 100 %	10,5	13,8
Etanol, 95 %	9,8	14,3
Etanol, 40 %	6,5	16,6
Éter etílico	14,5	5,3
Etilbenceno	13,2	11,5
Fenol	6,9	20,8
Formiato de etilo	14,2	8,4
Freón-11	14,4	9,0
Freón-12	16,8	5,6
Freón-21	15,7	7,5
Freón-22	17,2	4,7
Freón-113	12,5	11,4
Glicerina, 100 %	2,0	30,0
Glicerina, 50 %	6,9	19,6
Glicol	6,0	23,6
Heptano	14,1	8,4
Hexano	14,7	7,0
Hidróxido sódico, 50 %	3,2	25,8
Ioduro de etilo	14,7	10,3
Ioduro de propilo	14,1	11,6
Isobutanol	7,1	18,0
Isopropanol	8,2	16,0
Keroseno	10,2	16,9
Mercurio	18,4	16,4
Metanol, 100 %	12,4	10,5
Metanol, 90 %	12,3	11,8
Metanol, 40 %	7,8	15,5
Metiletilcetona	13,9	8,6
Naftaleno	7,9	18,1
Nitrobenceno	10,6	16,2
Nitrotolueno	11,0	17,0
Octano	13,7	10,0
Octanol	6,6	21,1
Oxalato de dietilo	11,0	16,4
Oxalato de dimetilo	12,3	15,8
Oxalato de dipropilo	10,3	17,7
Pentacloroetano	10,9	17,3
Pentano	14,9	5,2
Propanol	9,1	16,5
Sodio	16,4	13,9
Sulfuro de carbono	16,1	7,5
Tetracloroetano	11,9	15,7
Tetracloroetileno	14,2	12,7
Tetracloruro de carbono	12,7	13,1
Tetracloruro de titanio	14,4	12,3
Tolueno	13,7	10,4
Trementina	11,5	14,9
Tribromuro de fósforo	13,8	16,7
Tricloroetileno	14,8	10,5
Tricloruro de arsénico	13,9	14,5
Tricloruro de fósforo	16,2	10,9
Xileno, orto	13,5	12,1
Xileno, meta	13,9	10,6
Xileno, para	13,9	10,9

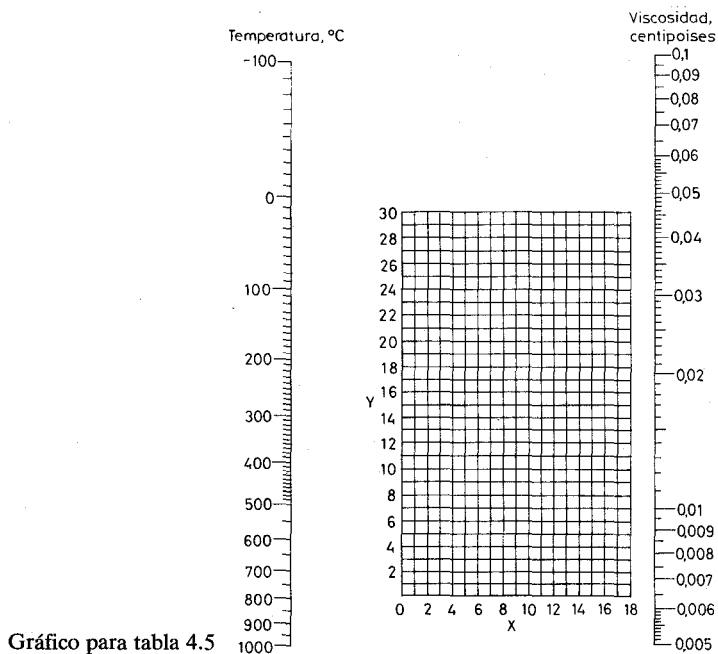
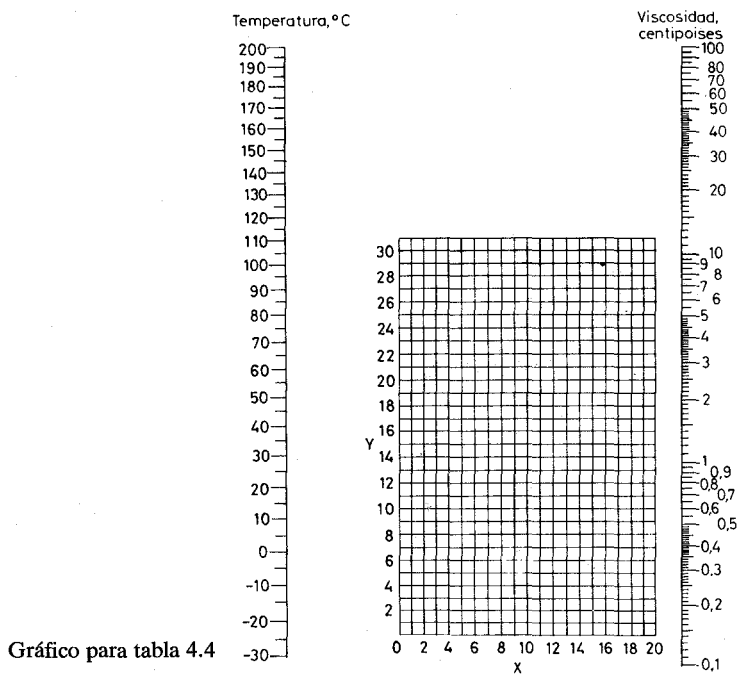


TABLA 4.5 Viscosidad de gases y vapores a 1 atm

(Coordenadas X e Y para determinar la viscosidad según la gráfica de la página 118 — segunda gráfica)

<i>Gas o vapor</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Gas o vapor</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
Acetato de etilo	8,5	13,2	Freón-11	10,6	15,1
Acetileno	9,8	14,9	Freón-12	11,1	16,0
Acetona	8,9	13,0	Freón-21	10,8	15,3
Ácido acético	7,7	14,3	Freón-22	10,1	17,0
Agua	8,0	16,0	Freón-113	11,3	14,0
Aire	11,0	20,0	Helio	10,9	20,5
Amoníaco	8,4	16,0	Hexeno	8,6	11,8
Argón	10,5	24,0	Hidrógeno	11,2	12,4
Benceno	8,5	13,2	H ₂ + N ₂ (3 : 1)	11,2	17,2
Bromo	8,9	19,2	Iodo	9,0	18,4
Bromuro de hidrógeno	8,8	20,9	Ioduro de hidrógeno	9,0	21,3
Buteno-1	9,2	13,7	Mercurio	5,3	22,9
Buteno-2	8,9	13,0	Metano	9,9	15,5
Cianógeno	9,2	15,2	Metanol	8,5	15,6
Cianuro de hidrógeno	9,8	14,9	Monóxido de carbono	11,0	20,0
Ciclohexano	9,2	12,0	Nitrógeno	10,6	20,0
Cloro	9,0	18,4	Óxido nítrico	10,9	20,5
Cloroformo	8,9	15,7	Óxido nitroso	8,8	19,0
Cloruro de etilo	8,5	15,6	Oxígeno	11,0	21,3
Cloruro de hidrógeno	8,8	18,7	Pentano	7,0	12,8
Cloruro de nitrógeno	8,0	17,6	Propano	9,7	12,9
Dióxido de azufre	9,6	17,0	Propanol	8,4	13,4
Dióxido de carbono	9,5	18,7	Propeno	9,0	13,8
Etano	9,1	14,5	Sulfuro de carbono	8,0	16,0
Etanol	9,2	14,2	Sulfuro de hidrógeno	8,6	18,0
Éter etílico	8,9	13,0	Tolueno	8,6	12,4
Etileno	9,5	15,1	Trimetilbutano (2,3,3)	9,5	10,5
Flúor	7,3	23,8	Xenón	9,3	23,0

$$\epsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{PD}{P_1 \cdot \kappa}$$

P_1 es la presión del fluido aguas arriba de la placa.

5. Se calcula el coeficiente de descarga C según la fórmula:

$$C = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^8 + \\ + 0,0029 \cdot \beta^{2,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,75} + \left(\frac{2,286}{D} \right) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \cdot \left(\frac{0,85598}{D} \right) \cdot \beta^3$$

Si el diámetro D a la temperatura de paso del fluido es menor o igual a 58,615 mm, entonces el coeficiente 2,286 que afecta al término $\frac{\beta^4}{1 - \beta^4}$ cambia a 0,039.

6. A continuación se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es vapor de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1\%$:

$$F_s = 1 + 0,0074 \cdot W1 \text{ (limitado para } W1\% \leq 5\%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \cdot Q_m}{D^2 \cdot \varepsilon \cdot C \cdot F_s} \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{PD \cdot \rho}}$$

Con el valor calculado de β , se repiten los cálculos de los puntos 4 a 6, hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es: $d = \beta \cdot D$
 8. El diámetro del orificio a mecanizar, siendo H el coeficiente de dilatación de la placa, es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \cdot (t - t_0)}$$

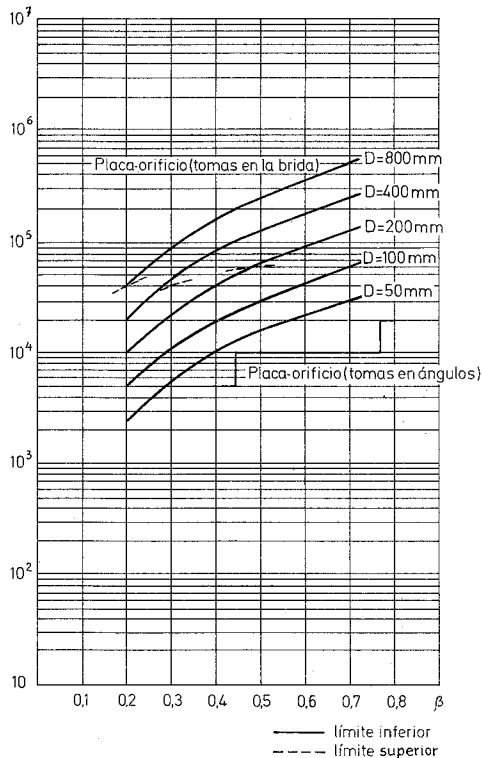


Fig. 4.10 Límites superior e inferior del número de Reynolds.

Tobera ISA 1932

La marcha del cálculo en esta tobera, que es utilizada ampliamente en Europa, es idéntica a la de la placa-orificio con la diferencia de los valores de ϵ en el paso 4 y de C en el paso 5.

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \cdot [1 + H \cdot 10^{-5} (t - t_0)]$$

siendo

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería (tabla 4.3) en mm/m

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente

2. Número de Reynolds, $Re_D = \frac{1,2732 \cdot 10^6 \cdot Q_m}{\eta \cdot D}$

con Q_m = caudal de diseño en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en m Pa · s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{4,6 \cdot 10^{-10} \cdot D^4 \cdot PD \cdot \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta la figura 4.10 para comprobar los límites del número de Reynolds con relación a β .

La tabla que sigue proporciona los valores máximos que puede tener la rugosidad relativa k/D de la tubería, para una distancia de 10 diámetros de tubería aguas arriba de la placa orificio, para cumplir la norma ISO.

β	0,35	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,60	0,70	0,77	0,80
$k/D \cdot 10^4$	25	18,6	13,5	10,6	8,7	7,5	6,7	6,1	5,6	4,5	4,0	3,9	3,9

Si la rugosidad relativa $k/D \cdot 10^4$ es $< 3,8$ no existen limitaciones en el valor de β .

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ϵ (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante respectivamente puede consultarse en la tabla 4.1.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\kappa \cdot K^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot K^{2/\kappa}} \cdot \frac{1 - K^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}{1 - K}} \quad \text{con} \quad K = \frac{P1 - PD}{P1}$$

5. Se calcula el coeficiente de descarga C según la fórmula:

$$C = 0,99 - 0,2262 \cdot \beta^{4,1} + (0,000215 - 0,001125 \cdot \beta + 0,00249 \cdot \beta^{4,7}) \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{1,15}$$

6. A continuación se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es vapor de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1$ %:

$$F_s = 1 + 0,0074 \cdot W1 \quad (\text{limitado para } W1 \% \leq 5 \%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \cdot Q_m}{D^2 \cdot \varepsilon \cdot C \cdot F_s} \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{PD \cdot \rho}}$$

Con el valor calculado de β , se repiten los cálculos de los puntos 4 y 6, hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es: $d = \beta \cdot D$
 8. El diámetro del orificio a mecanizar siendo H el coeficiente de dilatación de la placa es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \cdot (t - t_0)}$$

Tobera ASME de radio largo

La marcha del cálculo en esta tobera, utilizada en Estados Unidos, es idéntica a la de la placa-orificio con la diferencia del valor de C en el paso 5.

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \cdot [1 + H \cdot 10^{-5} \cdot (t - t_0)]$$

siendo

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería (tabla 4.3) en mm/m

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente

2. Número de Reynolds, $Re_D = \frac{1,2732 \cdot 10^6 \cdot Q_m}{\eta \cdot D}$

con Q_m = caudal de diseño en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en mPa · s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{4,6 \cdot 10^{-10} \cdot D^4 \cdot PD \cdot \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta la figura 4.10 para comprobar los límites del número de Reynolds con relación a β .

La tabla que sigue proporciona los valores máximos de la rugosidad relativa k/D de la tubería, para una distancia de 10 diámetros de tubería aguas arriba de la placa orificio, para satisfacer la norma ISO.

β	0,35	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,60	0,70	0,77	0,80
$k/D \cdot 10^4$	25	18,6	13,5	10,6	8,7	7,5	6,7	6,1	5,6	4,5	4,0	3,9	3,9

Si la rugosidad relativa $k/D \cdot 10^4$ es < 10 no existen limitaciones en el valor de β .

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ε (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante respectivamente puede consultarse en la tabla 4.1.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa \cdot K^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot K^{2/\kappa}} \cdot \frac{1 - K^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - K}} \quad \text{con} \quad K = \frac{P1 - PD}{P1}$$

5. Se calcula el coeficiente de descarga C según la fórmula:

$$C = 0,9965 - 0,00653 \cdot \sqrt{\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}}$$

6. A continuación se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es vapor de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1$ % :

$$F_s = 1 + 0,0074 \cdot W1 \quad (\text{limitado para } W1 \% \leq 5 \%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \cdot Q_m}{D^2 \cdot \varepsilon \cdot C \cdot F_s} \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{PD \cdot \rho}}$$

Con el valor calculado de β , se repiten los cálculos de los puntos 4 y 6, hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es: $d = \beta \cdot D$
 8. El diámetro del orificio a mecanizar siendo H el coeficiente de dilatación de la placa es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \cdot (t - t_0)}$$

Tubo Venturi

La marcha del cálculo es idéntica a la de la placa-orificio con la diferencia de los valores de ϵ en el paso 4 y de C en el paso 5.

1. El diámetro D de la tubería a la temperatura del fluido es:

$$D = D_0 \cdot [1 + H \cdot 10^{-5} \cdot (t - t_0)]$$

siendo

D = diámetro a la temperatura de paso del fluido en mm

D_0 = diámetro medido a temperatura ambiente en mm

H = coeficiente de dilatación de la tubería (tabla 4.3) en mm/m

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas entre la del fluido y la ambiente

2. Número de Reynolds, $Re_D = \frac{1,2732 \cdot 10^6 \cdot Q_m}{\eta \cdot D}$

con Q_m = caudal de diseño en kg/s

η = viscosidad absoluta o dinámica en mPa · s (centipoise) en condiciones de servicio (ver tablas 4.4 y 4.5)

3. Se calcula un valor aproximado de β de acuerdo con la fórmula:

$$\beta = \left[\frac{Q_m^2}{12,3 \cdot 10^{-10} \cdot D^4 \cdot PD \cdot \rho + Q_m^2} \right]^{0,25}$$

Se consulta la figura 4.10 para comprobar los límites del número de Reynolds con relación a β .

La rugosidad relativa de la tubería debe ser $k/D \leq 10^{-3}$ para los puntos de la tubería situados como mínimo en dos diámetros aguas arriba del tubo Venturi.

4. A partir del valor anterior de β se calcula el factor de expansión ϵ (en los líquidos es 1). El coeficiente isentrópico κ o relación de calores específicos a presión constante y a volumen constante respectivamente puede consultarse en la tabla 4.1.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\kappa \cdot K^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot K^{1/\kappa}} \cdot \frac{1 - K^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}{1 - K}} \quad \text{con} \quad K = \frac{P_1 - PD}{P_1}$$

5. El coeficiente de descarga C adopta los valores:

$C = 0,984$ en tubo forjado

$C = 0,995$ tubo mecanizado

$C = 0,985$ en chapa soldada

6. A continuación se calcula un nuevo valor de β mediante la fórmula siguiente, en la que F_s es un factor de corrección que se utiliza cuando el fluido es va-

por de agua (líquido y gas $F_s = 1$) con un contenido de humedad de $W1$ %:

$$F_s = 1 + 0,0074 \cdot W1 \text{ (limitado para } W1 \% \leq 5 \%)$$

$$\beta = \frac{2847,05 \cdot Q_m}{D^2 \cdot \varepsilon \cdot C \cdot F_s} \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta^4}{PD \cdot \rho}}$$

Con el valor calculado de β , se repiten los cálculos de los puntos 4 y 6, hasta que el valor obtenido de β se aproxima a la centésima.

7. El diámetro del orificio a la temperatura de servicio del fluido es: $d = \beta \cdot D$.
8. El diámetro del orificio a mecanizar siendo H el coeficiente de dilatación de la placa es:

$$d_m = \frac{d}{1 + H \cdot (t - t_0)}$$

El error global de la medida en un elemento deprimógeno vendrá dado por:

$$\begin{aligned} \text{Error global} = \frac{\Delta Q_m}{Q_m} = & \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + 4 \cdot \frac{\beta^4 \sqrt{1 - \beta^4}}{C} \cdot \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 +} \\ & + 4 \cdot \left[1 + \frac{\beta^4 \sqrt{1 - \beta^4}}{C}\right] \cdot \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta(PD)}{PD}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2} \end{aligned}$$

El error en el coeficiente de descarga C es de $\pm 0,6$ % en la placa-orificio, $\pm 0,8$ % en la tobera ISO 1932, y entre $\pm 0,7$ y $1,5$ % en el tubo Venturi.

El error en el factor de expansión ε es de $\pm 4 \frac{\Delta P}{P}$ % en la placa-orificio, $\pm 2 \frac{\Delta P}{P}$ % en la tobera ISO 1932, y del $\pm (4 + 100 \cdot \beta^8) \frac{\Delta P}{P}$ % en el tubo Venturi, todos ellos dentro de las limitaciones de β que van de $0,3$ a $0,8$ %.

El error en los diámetros D (tubería) y d (orificio) es el valor medio cuadrático de las medidas micrométricas realizadas.

El error en la presión diferencial $p1-p2$ viene dado por la precisión del aparato de medida que es típicamente de $\pm 0,2$ a $\pm 0,5$ %.

El error en la medida de la densidad viene dado por el instrumento de densidad o los aparatos de compensación de presión y temperatura, en cuyo caso se añade la media cuadrática de las precisiones correspondientes.

Figura a continuación un programa de ordenador para el cálculo de la placa-orificio, la tobera ISA 1932, la tobera ASME de radio largo y el tubo Venturi, con ejemplos de cálculo.

```
10 REM- CALCULO DE ELEMENTOS DEPRIMOGENOS según la Norma ISO-5167-1980
20 REM- Placa-orificio con tomas en la brida, Tobera ISA 1932 (Europa), Tobera A
SME de Radio largo, y Tubo Venturi.
30 INPUT "¿Tipo de elemento deprimógeno? :PLACA-ORIFICIO (P); TOBERA ISO 1932 (T)
```

```

); TOBERA ASME DE RADIO LARGO (U); TUBO VENTURI (V);DEPRI$
40 IF DEPRI$="V" OR DEPRI$="v" THEN INPUT "¿TIPO DEL TUBO VENTURI? - FORJADO (A)
; MECANIZADO (B); CHAPA SOLDADA (C)";VENT$
50 INPUT "¿Tipo de FLUIDO? : LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V);";FLUID$
60 INPUT "¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C";T1
70 INPUT "¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C";T0
80 INPUT "¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m3";DENSI
90 INPUT "¿DIAMETRO MEDIO DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm";D0
100 INPUT "¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA en mm/°C";H
110 IF DEPRI$="P" OR DEPRI$="p" THEN INPUT "¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA PLA
CA en mm/°C";HP
120 IF DEPRI$="T" OR DEPRI$="t" OR DEPRI$="U" OR DEPRI$="u" THEN INPUT "¿COEFICI
ENTE DE DILATACION DE LA TOBERA en mm/°C";HP
130 IF DEPRI$="V" OR DEPRI$="v" THEN INPUT "¿COEFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO
VENTURI en mm/°C";HP
140 INPUT "¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.";QM
150 IF FLUID$="G" OR FLUID$="g" OR FLUID$="V" OR FLUID$="v" THEN INPUT "¿COEFICI
ENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Especificos);CAPA
160 IF FLUID$="V" OR FLUID$="v" THEN INPUT "HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua (sobr
ealcentado y saturado es 0%)";W1
170 INPUT "¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises";VIS
180 INPUT "¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO";PD
190 INPUT "¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA DEL FLUIDO EN LA TOMA DE ALTA PRESION en b
ar";P1
200 D=D0*(1+H*(T1-T0))
210 RED=(1273200*(QM)/(VIS*D)):REM- NUMERO DE REYNOLDS
220 FS=1:IF FLUID$="V" OR FLUID$="v" THEN FS=1+.0074*W1:REM- FACTOR DE CORRECCIO
N DEL VAPOR
230 BETA=(QM^2/((4.6*10^-10*D^4*PD*DENSI)+QM^2))^-.25
240 IF DEPRI$="P" OR DEPRI$="p" THEN 250 ELSE 350
250 REM- PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA
260 IF FLUID$="L" OR FLUID$="l" THEN EPSILON=1 ELSE EPSILON=1-(.41+.35*BETA^4)*(
PD/P1)*CAPA^-1
270 IF D>58.615 THEN C=.5959+.0312*BETA^2.1-.184*BETA^8+.0029*BETA^2.5*(10^6/RED
)^.75+(2.286/D)*BETA^4*(1-BETA^4)^-1-(.85598/D)*BETA^3
275 IF D<58.615 THEN C=.5959+.0312*BETA^2.1-.184*BETA^8+.0029*BETA^2.5*(10^6/RE
D)^.75+(.039/D)*BETA^4*(1-BETA^4)^-1-(.85598/D)*BETA^3
280 BETA1=(2847.05*QM*(SQRT(1-BETA^4)))/(D^2*EPSILON*C*FS*(SQRT(DENSI*PD))))^-.5
290 IF ABS((BETA-BETA1)/BETA1)>.0001 THEN BETA=BETA1:GOTO 250
300 D1=D*BETA1
310 D1M=D1/(1+HP*(T1-T0))
320 PRINT:PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO":PRINT "-----"
330 PRINT "N";CHR$(167);" de REYNOLDS = ";RED:PRINT "BETA (d/D) = ";BETA:PRINT "
DIAMETRO DEL ORIFICIO d = ";D1:PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO ";D1
M
340 END
350 IF DEPRI$="T" OR DEPRI$="t" THEN 360 ELSE 460
360 REM- TOBERA ISA 1932 (EUROPA)
370 IF FLUID$="L" OR FLUID$="l" THEN EPSILON=1 ELSE K=(P1-PD)/P1:EPSILON=((CAPA*
K^(2/CAPA))/(CAPA-1))*((1-BETA^4)/(1-BETA^4*K^(2/CAPA)))*((1-K^((CAPA-1)/CAPA)))/(
1-K))^-.5
380 C=.99-.2262*BETA^4.1+(.000215-.001125*BETA+.00249*BETA^4.7)*(10^6/RED)^1.15
390 BETA1=(2847.05*QM*SQRT(1-BETA^4))/(D^2*EPSILON*C*FS*SQRT(DENSI*PD))))^-.5
400 IF ABS((BETA1-BETA)/BETA1)>.0001 THEN BETA=BETA1:GOTO 360
410 D1=D*BETA1
420 D1M=D1/(1+HP*(T1-T0))
430 PRINT:PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO":PRINT "-----"
440 PRINT "N";CHR$(167);" de REYNOLDS = ";RED:PRINT "BETA (d/D) = ";BETA:PRINT "
DIAMETRO DEL ORIFICIO d = ";D1:PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO ";D1
M
450 END

```

```

460 IF DEPRI$="U" OR DEPRI$="u" THEN 470 ELSE 570
470 REM- TOBERA ASME RADIO LARGO (AMERICA)
480 IF FLUID$="L" OR FLUID$="l" THEN EPSILON=1 ELSE K=(PI-PD)/PI:EPSILON=((CAPA*
K^(2/CAPA))/(CAPA-1))*((1-BETA^4)/(1-BETA^4*K^(2/CAPA)))*((1-K^((CAPA-1)/CAPA))/(
1-K)))^5
490 C=.9965-.00653*BETA^5+(10^6/RED)^.5
500 BETA1=(2847.05*DM*SQRT(1-BETA^4)/(D^2*EPSILON*C*FS*SQRT(DENSI*PD)))^5
510 IF ABS((BETA1-BETA)/BETA1)>.0001 THEN BETA=BETA1:GOTO 470
520 D1=D*BETA1
530 DIM=D1/(1+HP*(T1-T0))
540 PRINT:PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO":PRINT "-----"
550 PRINT "N";CHR$(167);" de REYNOLDS = ";RED:PRINT "BETA (d/D) = ";BETA:PRINT "
DIAMETRO DEL ORIFICIO d = ";D1:PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO ";D1
M
560 END
570 IF DEPRI$="V" OR DEPRI$="v" THEN 580 ELSE BEEP:GOTO 30
580 REM- TUBO VENTURI
590 IF FLUID$="L" OR FLUID$="l" THEN EPSILON=1 ELSE K=(PI-PD)/PI:EPSILON=((CAPA*
K^(2/CAPA))/(CAPA-1))*((1-BETA^4)/(1-BETA^4*K^(2/CAPA)))*((1-K^((CAPA-1)/CAPA))/(
1-K)))^5
600 IF VENT$="A" OR VENT$="a" THEN C=.984
610 IF VENT$="B" OR VENT$="b" THEN C=.995
620 IF VENT$="C" OR VENT$="c" THEN C=.985
630 BETA1=(2847.05*DM*SQRT(1-BETA^4)/(D^2*EPSILON*C*FS*SQRT(DENSI*PD)))^5
640 IF ABS((BETA1-BETA)/BETA1)>.0001 THEN BETA=BETA1:GOTO 250
650 D1=D*BETA1
660 DIM=D1/(1+HP*(T1-T0))
670 PRINT:PRINT "RESULTADOS DEL CALCULO":PRINT "-----"
680 PRINT "N";CHR$(167);" de REYNOLDS = ";RED:PRINT "BETA (d/D) = ";BETA:PRINT "
DIAMETRO DEL ORIFICIO d = ";D1:PRINT "DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO ";D1
M
690 END

```

OK

RUN

¿Tipo de elemento deprimógeno? :PLACA-ORIFICIO (P); TOBERA ISO 1932 (T); TOBERA
ASME DE RADIO LARGO (U); TUBO VENTURI (V)? P

¿Tipo de FLUIDO? : LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V)? L

¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C? 15

¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C? 15

¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³? 1000

¿DIAMETRO MEDIO DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm? 600

¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA en mm/°C? .0000117

¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA PLACA en mm/°C? .000016

¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.? 448

¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises? .00114

¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO? .2

¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA DEL FLUIDO EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar? 1.02

RESULTADOS DEL CALCULO

Nº de REYNOLDS = 8.339088E+08

BETA (d/D) = .6191493

DIAMETRO DEL ORIFICIO d = 371.4749

DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO 371.4749

OK

1LIST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

¿Tipo de elemento deprimógeno? :PLACA-ORIFICIO (P); TOBERA ISO 1932 (T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO (U); TUBO VENTURI (V)? T
 ¿Tipo de FLUIDO? : LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V)? V
 ¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C? 250
 ¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C? 15
 ¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³? 4.6
 ¿DIAMETRO MEDIO DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm? 150
 ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA en mm/°C? .0000117
 ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TOBERA en mm/°C? .000016
 ¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.? 2.83
 ¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos)? 1.3
 HUMEDAD DEL VAPOR en % de agua (sobrecalentado y saturado es 0%)? 0
 ¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises? .018
 ¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO? .2
 ¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA DEL FLUIDO EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar? 11

RESULTADOS DEL CALCULO

 Nº de REYNOLDS = 1330843
 BETA (d/D) = .6035727
 DIAMETRO DEL ORIFICIO d = 90.78607
 DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO 90.446
 Ok

ILIST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CDNT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

¿Tipo de elemento deprimógeno? :PLACA-ORIFICIO (P); TOBERA ISO 1932 (T); TOBERA ASME DE RADIO LARGO (U); TUBO VENTURI (V)? V
 ¿TIPO DEL TUBO VENTURI? - FORJADO (A); MECANIZADO (B); CHAPA SOLDADA (C)? C
 ¿Tipo de FLUIDO? : LIQUIDO (L); GAS (G); VAPOR (V)? G
 ¿TEMPERATURA DE SERVICIO en °C? 15
 ¿TEMPERATURA AMBIENTE en °C? 15
 ¿DENSIDAD DEL FLUIDO en Kg/m³? .5
 ¿DIAMETRO MEDIO DE LA TUBERIA A TEMPERATURA AMBIENTE en mm? 300
 ¿COEFICIENTE DE DILATACION DE LA TUBERIA en mm/°C? .0000117
 ¿COEFICIENTE DE DILATACION DEL TUBO VENTURI en mm/°C? .000016
 ¿CAUDAL MASA EN Kg/seg.? .3425
 ¿COEFICIENTE ISENTROPICO (Relación de Calores Específicos)? 1.31
 ¿VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA DEL FLUIDO en centipoises? .012
 ¿PRESION DIFERENCIAL en bar para el CAUDAL MAXIMO? .004
 ¿PRESION ESTATICA ABSOLUTA DEL FLUIDO EN LA TOMA DE ALTA PRESION en bar? 1.007

RESULTADOS DEL CALCULO

 Nº de REYNOLDS = 121130.8
 BETA (d/D) = .6087618
 DIAMETRO DEL ORIFICIO d = 182.6207
 DIAMETRO DE MECANIZACION DEL ORIFICIO 182.6207
 Ok

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 pueden verse dimensiones constructivas del diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

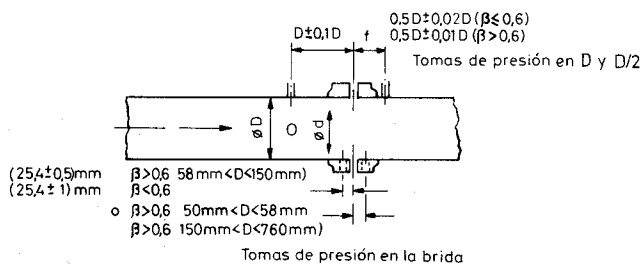
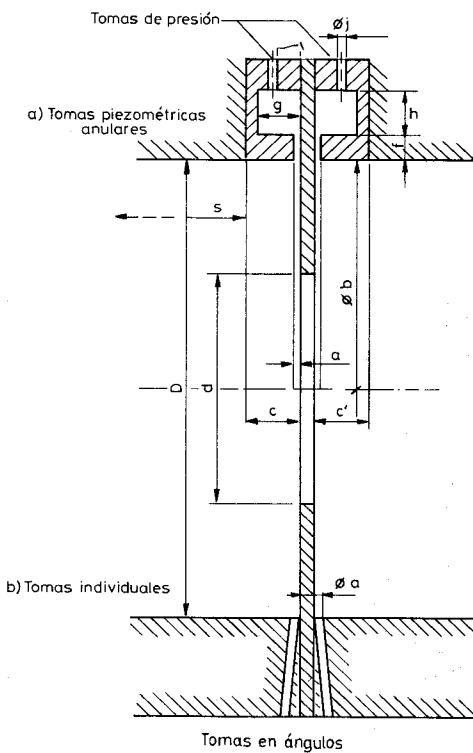
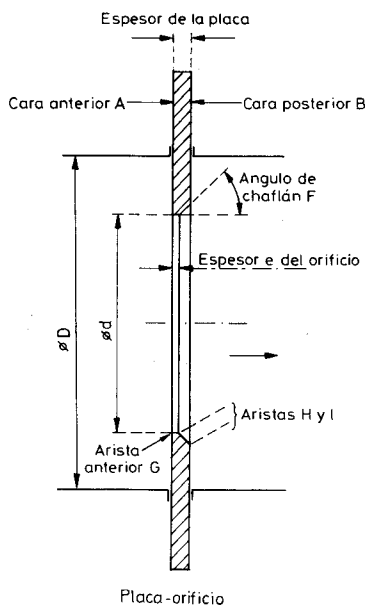


Fig. 4.11 Diafragma.

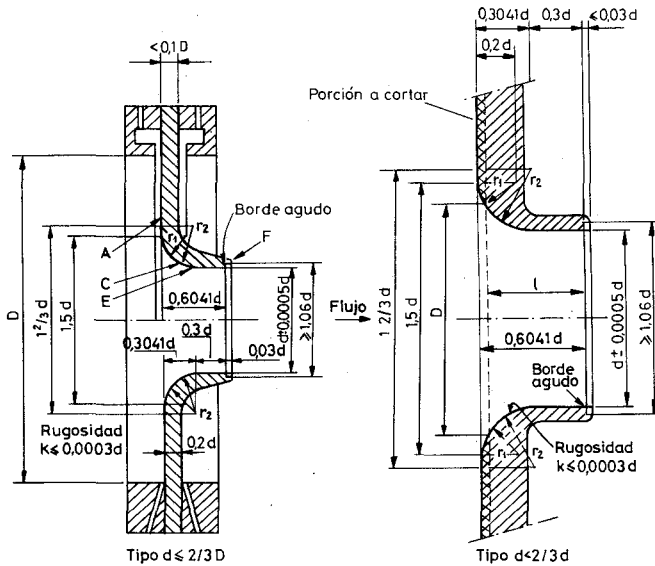


Fig. 4.12 a Tobera ISA 1932.

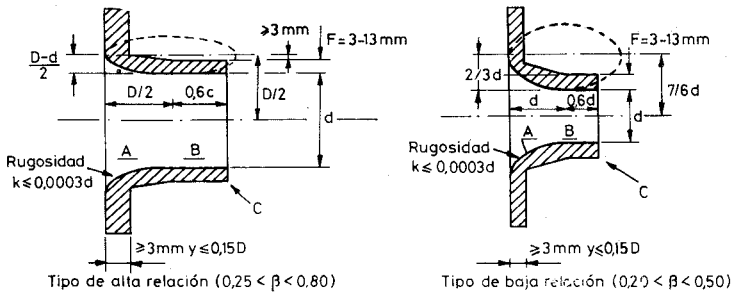


Fig. 4.12 b Tobera ASME de radio largo.

En la fórmula general simplificada del caudal $Q_v = K \sqrt{\frac{h}{\rho}}$ se observa que la medida depende de la densidad del fluido, por lo cual, si ésta cambia variará la lectura del instrumento. Por otro lado, cuando se realiza el cálculo se parte de unos datos previos que se toman lo más próximos posible a los reales de funcionamiento.

Si la *densidad real* se aparta de la tomada para el cálculo, habrá que corregirlo con el factor siguiente:

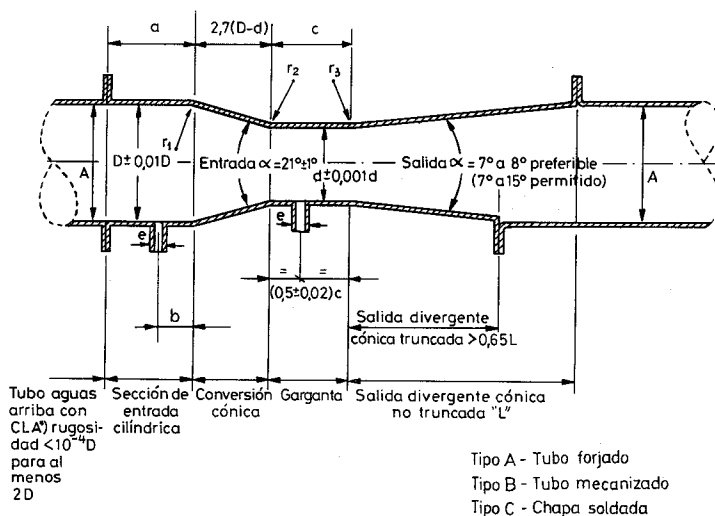


Fig. 4.13 Tubo Venturi.

caudal real: $Q_r = K \sqrt{\frac{h}{\rho_r}}$ siendo ω_r la densidad real.

El caudal leído en el instrumento es:

$$Q_c = K \sqrt{\frac{h}{\rho_c}}$$

siendo ρ_c la densidad que se tomó para calcular el diafragma.

Luego:

$$Q_r = Q_c \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$$

que da la expresión del caudal real en función del caudal leído con el factor de

corrección $\sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_r}}$.

En el caso de un líquido, la corrección se realiza fácilmente ya que es fácil medir ρ_r .

En el caso de un vapor saturado basta conocer su presión o su temperatura para obtener mediante tablas, su densidad. Si el vapor es recalentado, será preciso conocer su presión y su temperatura.

Cuando el fluido a medir es un gas, su densidad se determina a partir de su composición realizada por análisis químicos según la fórmula:

$$\rho_{ro} = \sum \rho_{ng} V_g$$

en la que:

ρ_{ro} = densidad de la mezcla del gas real a 0° C y 760 mm Hg;

ρ_{ng} = densidad del gas g a 0° C y 760 mm Hg;

V_g = % en volumen del gas g .

Si el gas es ideal, su densidad ρ_r a la temperatura y presión a su paso por el diafragma es:

$$\rho_r = \rho_{ro} \frac{P_r}{1,013} \cdot \frac{273}{273 + t_r}$$

en la que:

P_r = presión absoluta real en bar

t_r = temperatura real en °C

mientras que la densidad del gas calculada era:

$$\rho_c = \rho_{co} \cdot \frac{P_c}{1,013} \cdot \frac{273}{273 + t_c}$$

donde se deduce que el valor del caudal Q_r , en m³/h, en función del caudal leído Q_c es:

$$Q_r = Q_c \sqrt{\frac{\rho_{co}}{\rho_{ro}} \cdot \frac{P_c}{P_r} \cdot \frac{273 + t_r}{273 + t_c}}$$

Si la humedad del gas que se ha tomado en el cálculo era h_c con la indicación del instrumento expresada en Nm³/h de gas seco, y una vez puesta en marcha la instalación, la humedad real resulta ser de h_r , el factor de corrección correspondiente será

$$F = \frac{100 - h_r}{100 - h_c}$$

es decir, el cociente entre el porcentaje de gas seco que realmente contiene el gas y el porcentaje de gas seco tomado en el cálculo.

Si la temperatura del fluido varía mucho con relación a la considerada en el cálculo, el diámetro del orificio calculado se desviará del diámetro real en las condiciones de servicio. El factor de corrección del caudal será:

$$F = \left(\frac{d_r}{d_c} \right)^2$$

siendo

d_r = diámetro real

d_c = diámetro calculado

debido a que en la fórmula del caudal el diámetro figura elevado a la potencia 2.

Si el gas lleva partículas en suspensión que se depositan en las paredes de la tubería, en particular en su parte baja, el diámetro interior de la tubería se reduce gradualmente afectando a la lectura del caudal. Si la limpieza periódica de la tubería es difícil, la mejor solución es determinar un coeficiente de corrección aproximada del caudal partiendo de la base de que las partículas del fluido se van depositando proporcionalmente al tiempo de funcionamiento.

De este modo, determinado el diámetro D_T de la tubería al cabo del tiempo T mediante el desmontaje del elemento, la expresión general que da el diámetro de la tubería en el tiempo t es:

$$D_t = D_o - \frac{t}{T} (D_o - D_T)$$

con lo que

D_o = diámetro inicial de la tubería;

D_t = diámetro de la tubería al cabo del tiempo t ,

siendo la fórmula general

$$Q_v = C E \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{10^6} \cdot \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_o}} 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$$

el factor de corrección correspondiente será

$$F = \frac{(C E \varepsilon \beta^2 D^2) \text{ al cabo del tiempo } t}{(C E \varepsilon \beta^2 D^2) \text{ valores iniciales}}$$

4.1.1.4 Tubo Pitot

El *tubo Pitot* mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (fig. 4.14).

La ecuación correspondiente es:

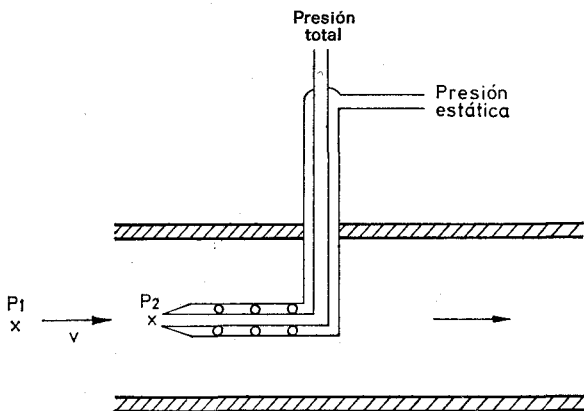


Fig. 4.14 Tubo Pitot.

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

en la que

P_2 = presión de impacto o total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad;

P_1 = presión estática absoluta en el fluido;

ρ = densidad;

V_1 = velocidad del fluido en el eje del impacto.

De aquí se deduce:

$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_2 - P_1) 2}{\rho}}$$

o bien introduciendo un coeficiente de velocidad C para tener en cuenta la irregular distribución de velocidades, la rugosidad de la tubería, etc., resulta:

$$V_1 = C \sqrt{\frac{(P_2 - P_1) 2}{\rho}}$$

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar disponiéndolo en un tramo recto de tubería. La máxima exactitud en la medida se consigue efectuando varias medidas en puntos determinados y promediando las raíces cuadradas de las velocidades medidas.

Su precisión es baja, del orden de 1,5-4 %, y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

4.1.1.5 Tubo Annubar

El tubo Annubar (fig. 4.15) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tu-

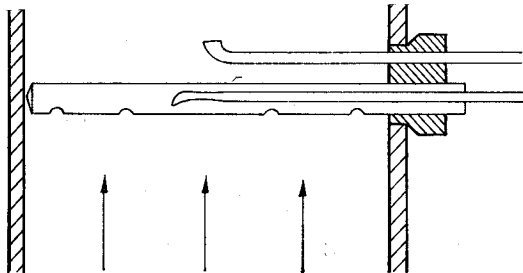


Fig. 4.15 Tubo Annubar.

bos, el de presión total y el de presión estática. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica determinada por computador, que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Estos anillos tienen áreas iguales. En tuberías de tamaño mayor que 1" se dispone en el interior del tubo otro que promedia las presiones obtenidas en los orificios.

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total con su orificio en el centro de la tubería y aguas abajo de la misma.

El tubo Annubar es de mayor precisión que el tubo Pitot, del orden del 1 %, tiene una baja pérdida de carga y se emplea para la medida de pequeños o grandes caudales de líquidos y de gases.

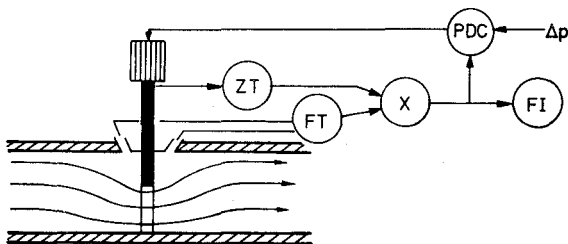


Fig. 4.16 Placa-orificio variable.

La placa-orificio variable es una innovación de la placa-orificio. Permite obtener una gama de variaciones de caudal mucho más amplia que puede llegar hasta la relación 50 a 1, mientras que en la placa-orificio viene limitada por la relación 3 a 1.

En la figura 4.16 puede verse un esquema de funcionamiento observándose que el sistema consiste en un servomotor con realimentación que posiciona una placa en base a obtener una presión diferencial especificada.

4.1.1.6 Transmisores de fuelle y de diafragma

La presión diferencial creada por la placa, la tobera o el tubo Venturi, puede medirse con un tubo en U de mercurio o bien, transmitirse con los instrumentos llamados convertidores diferenciales.

Los *transmisores de fuelle* (fig. 4.17 a) contienen dos cámaras para la alta y la baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente, arrastrando la palanca de unión, el cable y un eje exterior, cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o eléctrico. Un muelle de margen permite disponer de varias gamas de presión diferencial. La protección contra sobrecargas está asegurada por dos anillos de sello que cierran herméticamente el paso del líquido de llenado de un fuelle al otro, e impiden su destrucción ante una maniobra incorrecta. Otro accesorio es una válvula contra pulsaciones de caudal que restringe el paso del líquido de llenado entre los fuelles.

Los *transmisores de diafragma* (fig. 4.17 b) se diferencian de los anteriores en que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas, en lugar

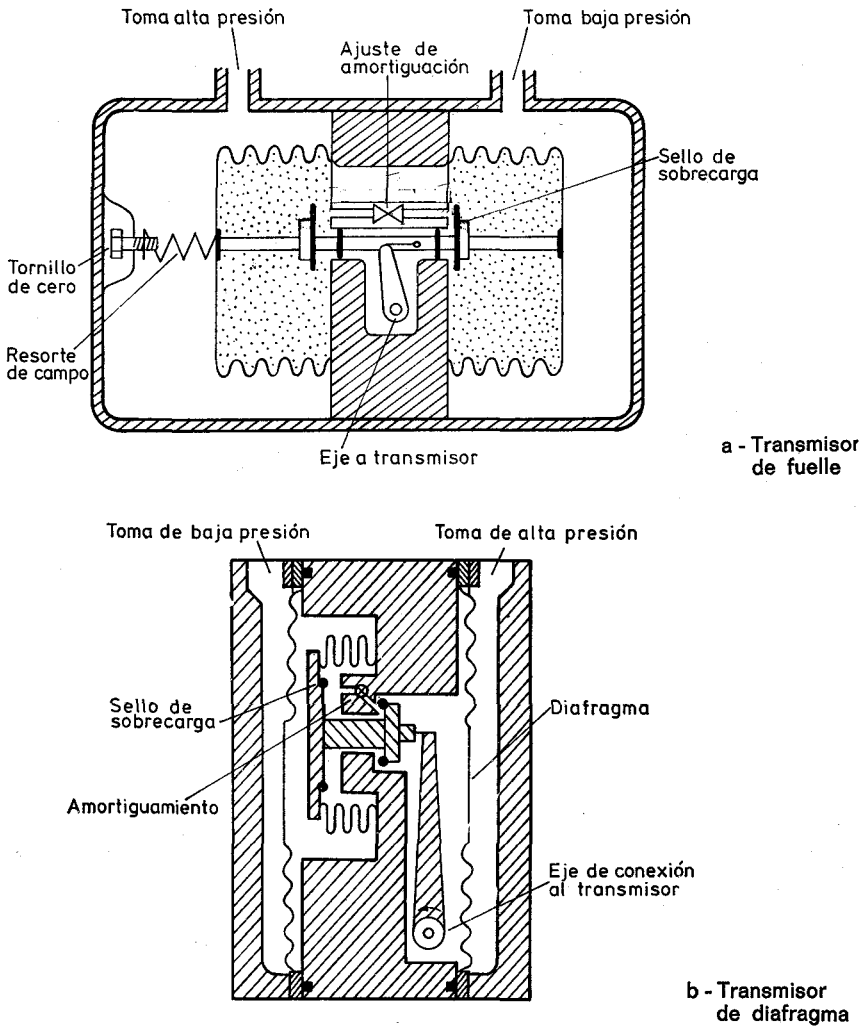


Fig. 4.17 Transmisores de presión diferencial.

de fuelles, con lo cual el desplazamiento volumétrico es casi nulo. El cuerpo de estos transmisores suele ser de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio, el fuelle o diafragma de acero inoxidable 316 (disponible también en Monel, Hastelloy C, Teflón en inoxidable o Kel-F en monel) y el líquido de llenado sílica.

Las conexiones entre las tomas del diafragma y el convertidor de presión diferencial deben ser adecuadas al fluido a medir (fig. 4.18). Con el objeto de aislar el instrumento se prevén 3 válvulas que constituyen lo que se denomina un manifold; éste tiene una doble misión, aislar el instrumento del proceso para su mantenimiento e igualar las presiones en las dos cámaras del instrumento en la puesta en marcha de la instalación.

Si la tubería está sometida a una vibración fuerte, es aconsejable unir el ins-

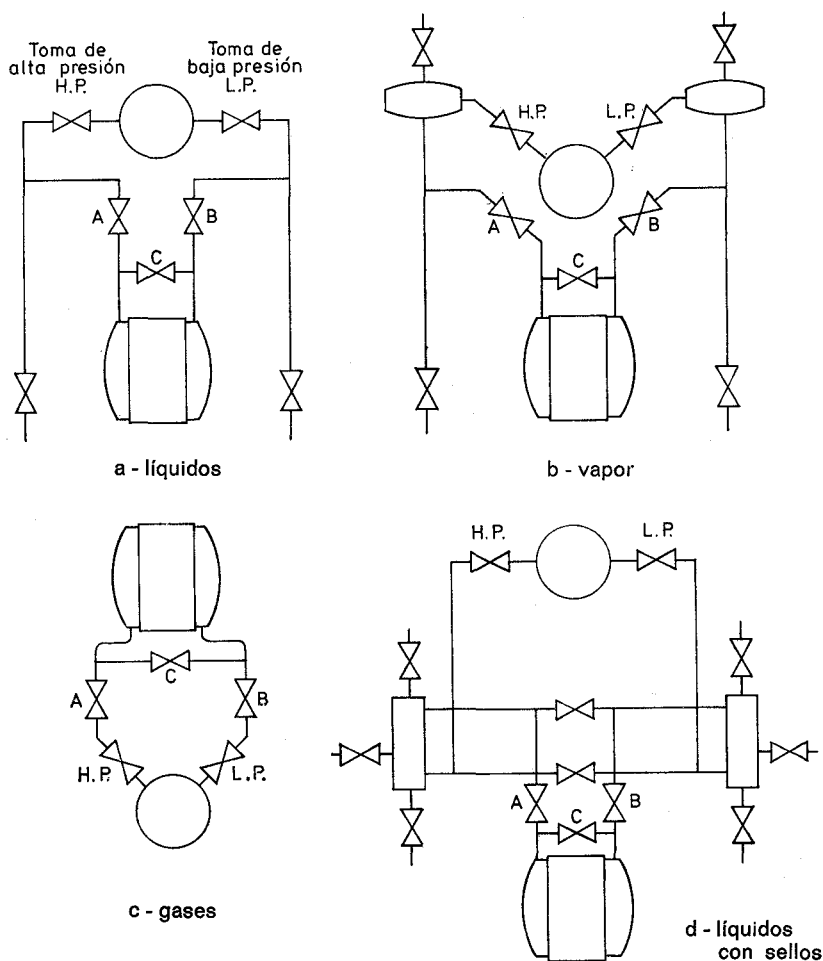


Fig. 4.18 Conexiones entre el elemento y el transmisor de caudal.

trumento al sistema mediante conexiones flexibles adecuadas a las condiciones de trabajo de la instalación.

Si el fluido es corrosivo o viscoso, o bien condensa o se evapora, o bien se congela o solidifica, es necesario utilizar sistemas de sello que aíslen el instrumento del proceso. Un caso típico es la medida de caudal de vapor en la que el fluido de sello es el propio condensado del vapor. En otros casos suele emplearse una mezcla de 50 % de glicerina y 50 % de agua.

Hay que señalar que, en la medida de caudal de vapor con transmisores de fuelle, es preciso utilizar cámaras de condensación para compensar los cambios de volumen de las cámaras del fuelle al variar el caudal. Esto no es necesario en los transmisores de diafragma por ser el desplazamiento volumétrico despreciable.

Cuando los problemas de condensación o de evaporación del fluido o de obturación del elemento no pueden resolverse de otra forma, es necesario utilizar un

sistema de purga que introduzca un fluido de purga en la zona de medida del elemento diferencial. Es un sistema que sólo debe utilizarse cuando sea estrictamente necesario debido a la necesidad de un mantenimiento frecuente o a la posible generación de falsas presiones diferenciales. El fluido de purga debe ser limpio, no debe reaccionar con el fluido medido, debe circular a un caudal bajo y constante ($0,6 \text{ cm}^3/\text{s}$ para líquidos y $60 \text{ cm}^3/\text{s}$ para gas) y debe disponerse un sistema que impida la entrada del fluido del proceso en caso de un fallo en la purga.

Si el fluido de proceso es susceptible de condensación, solidificación o congelación a las temperaturas ambiente más bajas que puedan encontrarse en las tuberías, es necesario disponer un sistema de calentamiento, en general con vapor a baja presión que impida este fenómeno. El suministro de vapor debe ser seguro e independiente para que en caso necesario siga calentando durante los períodos de paro de la planta. La calefacción eléctrica, si bien no está muy extendida es cómoda y admite un buen control de temperatura.

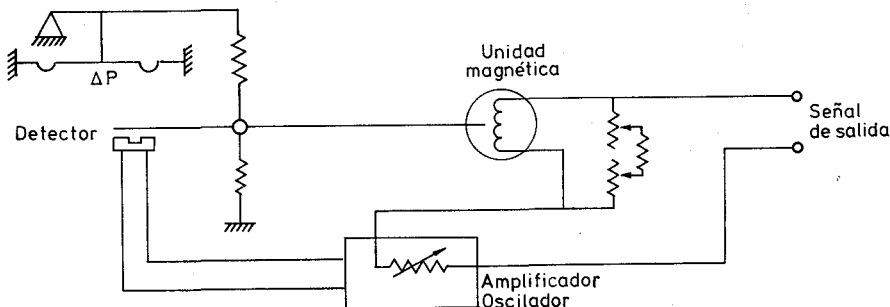
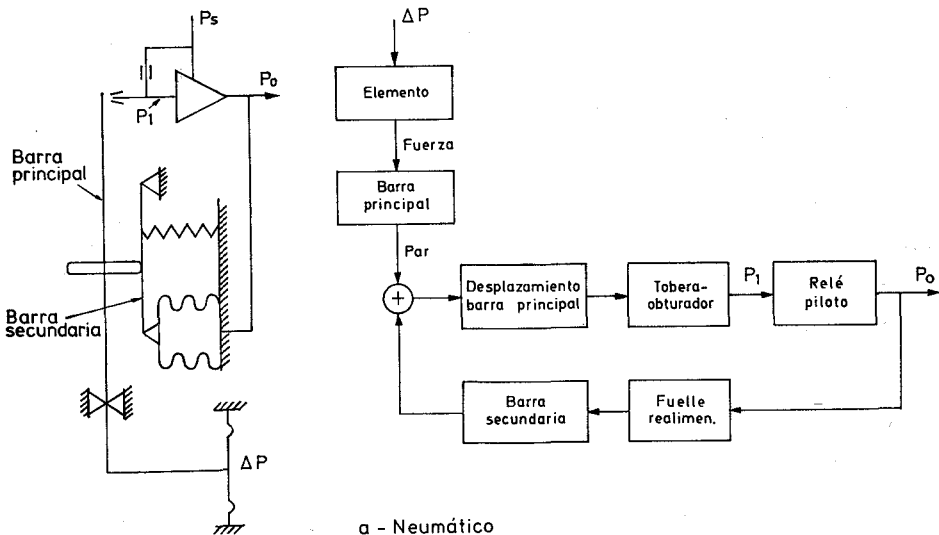


Fig. 4.19 Transmisores de caudal de presión diferencial.

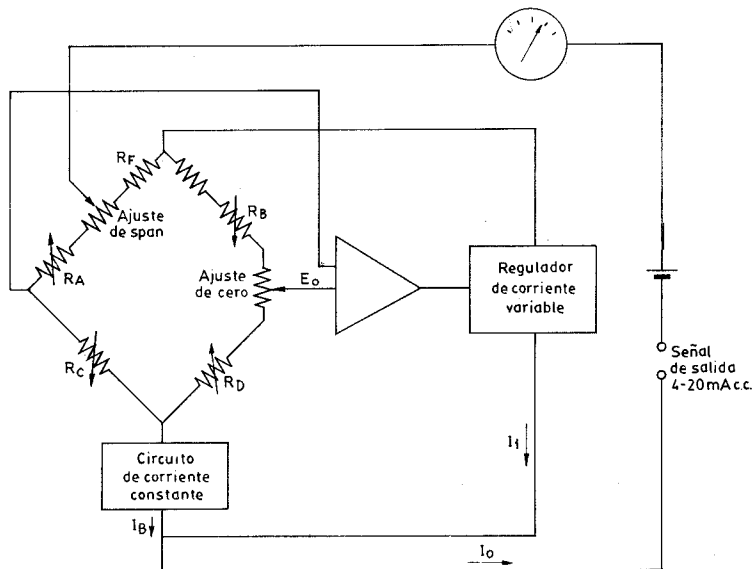
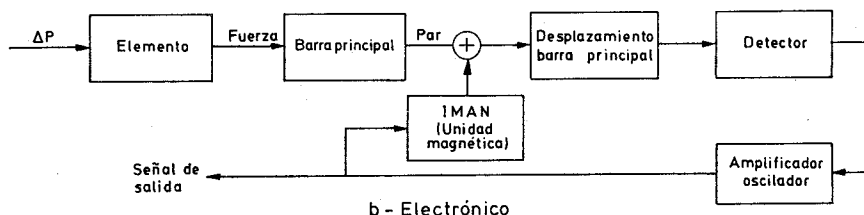


Fig. 4.19 (Continuación)

Los transmisores citados utilizan, bien un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas, bien un transductor eléctrico de equilibrio de fuerzas o bien un transductor de silicio difundido idénticos a los que se estudiaron en el capítulo de instrumentos de presión. En la figura 4.19 pueden verse estos transductores de caudal.

4.1.1.7 Integradores

Los instrumentos transmisores o registradores de caudal miden realmente una presión diferencial y como el caudal varía según la raíz cuadrada de la presión diferencial, el gráfico deberá ser de raíz cuadrada a no ser que se utilice un extractor de raíz cuadrada intermedio, y estará graduado normalmente de 0-10 con un factor de conversión para poder leer directamente en unidades de caudal.

En ocasiones, desde el punto de vista de contabilización de caudales para propósitos de facturación o de balance energético de la planta, interesa integrar el caudal de un gráfico. Esto se consigue con integradores mecánicos, neumáticos o electrónicos (fig. 4.20).

Los integradores mecánicos más utilizados son del tipo intermitente y cuentan automáticamente el producto (caudal instantáneo \times tiempo) mediante una leva que gira a velocidad constante sobre la que se apoya una palanca cuya posición depende del caudal instantáneo. El tiempo de contacto entre la palanca y la leva, hace actuar un contador mecánico o eléctrico.

Su precisión es del orden de $\pm 2\%$.

Los integradores neumáticos pueden verse esquemáticamente en la figura 4.20 a. Consisten en una turbina alimentada por un chorro de aire que depende del valor de la señal neumática del transmisor de presión diferencial. El giro de la turbina hace avanzar un contador que integra el caudal.

Los integradores electrónicos intermitentes disponen de una leva posicionada por la pluma del instrumento en lugar de una palanca como en los integradores mecánicos. La leva está situada entre las bobinas de un oscilador y excita un relé electrónico detector cuando entra dentro del campo del oscilador. El relé electrónico excita a su vez el contador del instrumento. La precisión del integrador electrónico es del orden de $\pm 1\%$.

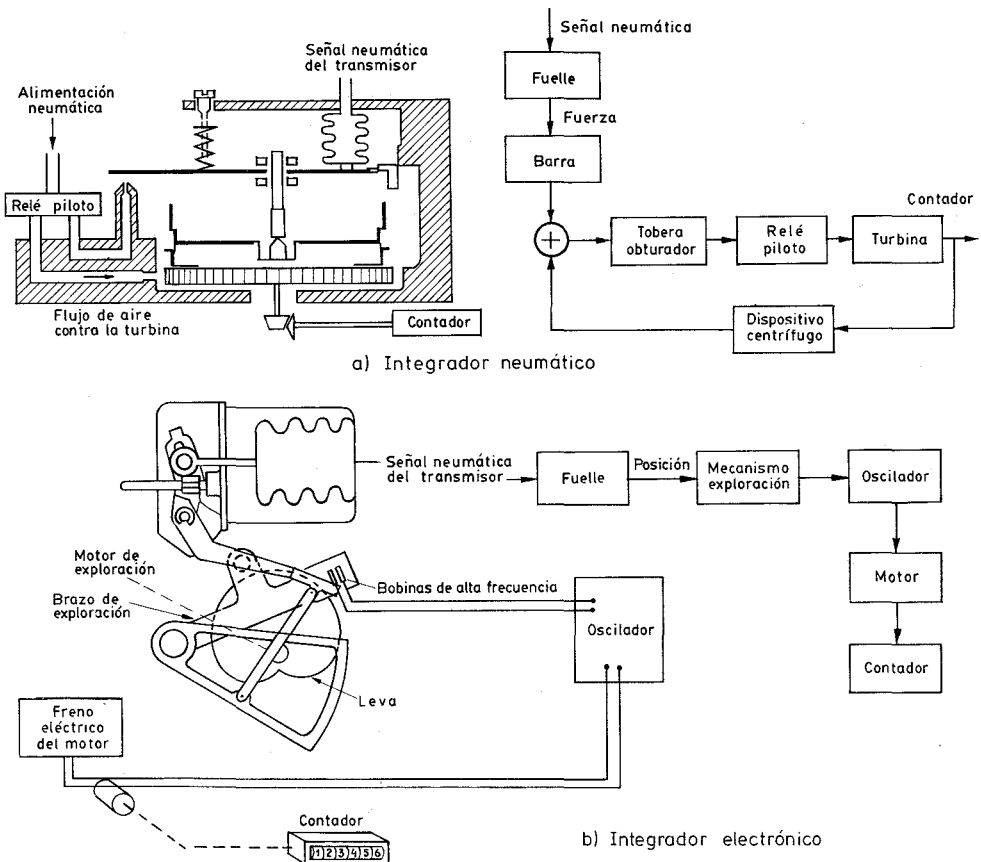


Fig. 4.20 Integradores neumáticos y electrónicos.

En el control por ordenador o el control distribuido, existe un algoritmo de integración que efectúa el cálculo:

$$\text{VARINTEG} = \text{VARINTEG} (i - 1) + C * (\text{Escala tiempo}) * \text{VARIABLE}$$

siendo: VARINTEG = señal totalizadora acumulada

C = constante

VARIABLE = señal de medida, típicamente caudal

En los estudios anteriores hemos visto que las variaciones de la densidad dependen, en un líquido, de los cambios en la temperatura y en los gases y vapores de las variaciones en la presión, en la temperatura y en la compresibilidad.

El caudal real puede determinarse registrando dichas variables (con preferencia en el mismo gráfico) y calculando las correcciones, o bien, realizando automáticamente las operaciones de corrección.

La compensación automática se logra con un instrumento multiplicador-divisor de las tres variables, presión diferencial, presión y temperatura. Más adelante, en el apartado correspondiente a la determinación del caudal masa estudiaremos este punto.

4.1.2 Área variable (rotámetros)

Los *rotámetros* son medidores de caudal de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido.

Las fuerzas que actúan sobre el flotador se representan en la figura 4.21.

En las condiciones de equilibrio se cumplen las ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = v_f q_f g \\ F = v_f q_l g \\ E = C_d q_l \cdot A_f \cdot \frac{v^2}{g} \\ F + E = G \end{array} \right.$$

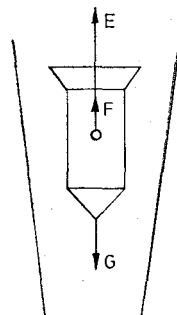


Fig. 4.21 Rotámetro.

en las que:

G = peso del flotador;

v_f = volumen del flotador;

q_f = densidad del flotador;

q_l = densidad del fluido;

E = fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador;

F = fuerza de empuje del fluido sobre el flotador;

C_d = coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador;

v = velocidad del fluido;

A_f = área de la sección del flotador;

A_w = sección interior del tubo;

resolviendo las ecuaciones anteriores, resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2g v_f (Q_f - Q_l)}{C_d Q_l A_f}}$$

El valor de C_d depende de la viscosidad del fluido.

El rotámetro al ser un diafragma de orificio variable tendrá como éste, un coeficiente de descarga que englobará el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, etc.

Por conveniencia, se incorpora el término $\sqrt{\frac{1}{C_d}}$ a este coeficiente de descarga, pasando la expresión anterior a

$$v = C \sqrt{\frac{2g v_f (Q_f - Q_l)}{Q_l A_f}}$$

Como el caudal es igual a:

$$Q_v = v \cdot A_w$$

siendo A_w = sección interior del tubo,
resulta:

$$Q_v = C A_w \sqrt{\frac{2g v_f (Q_f - Q_l)}{Q_l A_f}}$$

o bien en unidades de masa

$$Q_m = C A_w \sqrt{\frac{2g v_f (Q_f - Q_l)}{A_f}} Q_l$$

Esta fórmula permite determinar el caudal del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido. Este caudal depende evidentemente del peso específico del líquido y de los valores de la sección interior del tubo A_w , ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador. Por estos motivos la selección del tamaño de un rotámetro es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

Con el fin de normalizar los cálculos se acostumbra a referir los caudales del líquido o del vapor y gas a sus equivalentes en agua y aire respectivamente.

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Caudal de líquido: } Q_l = C A_w \sqrt{\frac{2g v_f (Q_f - Q_l)}{Q_l A_f}}$$

$$\text{Caudal equivalente en agua: } Q_{\text{agua}} = C A_w \sqrt{\frac{2g v_f (8,04 - 1)}{1 \cdot A_f}}$$

habiendo considerado un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8,04; dividiendo ambas ecuaciones y despejando el caudal equivalente en agua resulta:

$$Q_{\text{agua}} = Q_t \sqrt{\frac{q_t \cdot 7,04}{q_f - q_t}}$$

Análogamente, para un gas a $t^\circ \text{C}$ y P mm Hg, y despreciando q_g en el término $q_f - q_g$ resulta:

$$Q_{\text{aire}} (\text{Nm}^3/\text{minuto}) = Q_g (\text{Nm}^3/\text{minuto}) \sqrt{\frac{T}{q_g} \cdot \frac{760}{P} \cdot \frac{8,04}{q_f}}$$

en la que:

q_g = densidad del gas referida al aire a 15°C y 760 mm Hg;

T = temperatura absoluta del gas ($273 + t$);

P = presión absoluta del gas en mm Hg ($p + 760$);

y en el caso de vapor:

$$Q_{\text{aire}} (\text{Nm}^3/\text{minuto}) = Q_{\text{vapor}} (\text{kg}/\text{minuto}) 2,56 \sqrt{\frac{v_g}{q_f}}$$

en la que v_g es el volumen específico del vapor de agua en las condiciones de servicio, y el caudal de vapor está expresado en masa.

Las fórmulas anteriores o bien reglas de cálculo especiales permiten determinar rápidamente los caudales equivalentes en agua o en aire del fluido, y de aquí, el tamaño del rotámetro consultando las tablas del fabricante. Éstas dan el tamaño, el número del tubo y el del flotador con su forma y peso.

Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio y metálicos. Los fabricantes los mecanizan de tal modo que queda asegurada la intercambiabilidad de los diversos tubos y flotadores a fin de obtener caudales correspondientes sin necesidad de calibrar individualmente cada rotámetro.

Los tubos de vidrio pueden ser con nervios interiores que sirven para guiar el flotador o bien lisos. Los tubos metálicos son siempre cónico lisos y precisan de extensión por no tener una lectura directa.

Los tubos tienen una conicidad que viene expresada como la relación entre el diámetro interno del tubo en la escala máxima y el diámetro de la cabeza del flotador. Esta relación varía entre 1,20 a 1,35.

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción. En la figura 4.22 pueden verse los más utilizados:

- Esférico (pos. 1) para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde plano (pos. 2) para caudales medios y elevados con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico, con borde saliente, de cara inclinada contra el flujo (pos. 3) con menor influencia de la viscosidad que, por sus características de caudal, puede compararse a una tobera.
- Cilíndrico, con bordes salientes contra el flujo (pos. 4) y con la mínima influencia de la viscosidad del fluido, que por su funcionamiento, puede compararse a una placa-orificio o diafragma.

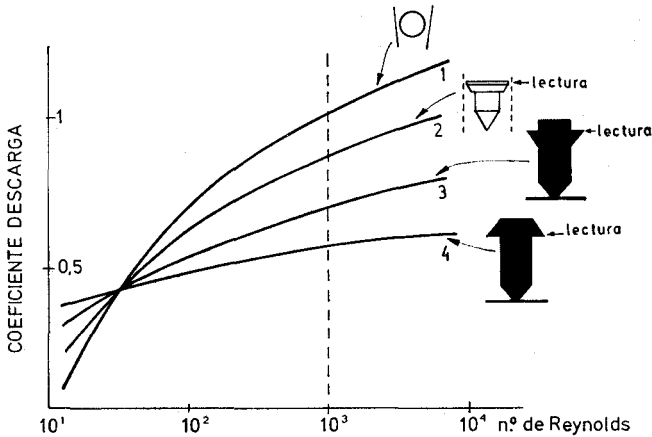


Fig. 4.22 Curvas de viscosidad.

La figura 4.22 indica la influencia que la viscosidad del fluido puede tener en el coeficiente de descarga del rotámetro, señalando las características relativas de independencia de cada tipo de flotador.

El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316 si bien, para satisfacer la gran variedad de requerimientos de resistencia a la corrosión que se presenta en la industria se utilizan también otros metales. Se utilizan también flotadores de plástico, si bien se prefieren los metálicos por su mayor facilidad de mecanización del borde superior.

En las tablas 4.6 y 4.7 se indican las densidades de los materiales comunes empleados en los flotadores normales y esféricos respectivamente.

Las escalas de los rotámetros están grabadas en una escala de latón o de aluminio montada a lo largo del tubo y situada en coincidencia con la línea de cero del tubo o bien directamente en el tubo de vidrio. La escala puede estar gra-

TABLA 4.6 Materiales comunes de flotadores normales

Aluminio	2,72	Inox. 316	8,04
Bronce	8,78	Hastelloy B	9,24
Durimet	8,02	Hastelloy C	8,94
Monel	8,84	Plomo	11,38
Níquel	8,91	Tantalio	16,60
Goma	1,20	Teflón	2,20
Inox. 303	7,92	Titanio	4,50

TABLA 4.7 Materiales comunes de flotadores esféricos

Vidrio de borosilicato	2,20	Inox. 316	8,04
Aluminio	2,72	Monel	8,84
Zafiro	4,03	Carboloy	14,95
Inox. 304	7,92	Tantalio	16,60

duada en unidades directas del caudal (referido siempre a unas condiciones de servicio dadas) o bien en porcentaje de 10 a 100 % de la escala total. En este último caso, se añade un factor de multiplicación a todas las lecturas para convertir a unidades de caudal en volumen o peso del fluido. Otra forma de graduar la escala es en mm acompañando una curva de calibración caudal-lectura en mm para determinar el caudal del fluido. La curva de calibración se emplea en rotámetros de pequeña capacidad en los cuales el caudal no es lineal dentro del intervalo del campo de medida 10 a 1.

Hay que señalar que la amplitud de medida de los rotámetros es de 10 a 1.

La pérdida de carga del rotámetro es constante en todo el recorrido del flotador y puede hacerse muy baja mediante una forma adecuada de éste. La pérdida de carga del flotador puede determinarse a partir de la expresión siguiente que relaciona el peso efectivo del flotador con su sección transversal máxima.

expresión en la que:

$$\Delta p = \frac{G_f - v_f \cdot \rho_1 \cdot g}{A_f}$$

G_f = peso del flotador;

v_f = volumen del flotador;

ρ_1 = densidad del fluido;

A_f = sección transversal máxima del flotador.

A esta pérdida de carga hay que sumar la debida a las conexiones y al tubo para obtener la pérdida de carga total. El valor aproximado de ésta es el doble de la del flotador.

Del examen de la expresión del caudal de un rotámetro se desprende que su capacidad depende de las densidades del flotador y del fluido. Si cambian las condiciones de empleo de un rotámetro ya calibrado, es necesario aplicar unos factores para corregir el caudal leído. Estos factores se deducen en forma parecida al cálculo realizado en la determinación del tamaño del rotámetro de los caudales equivalentes en agua y en aire del fluido, y son los siguientes:

Variación en las densidades del flotador y del fluido:

Factor en un líquido:
$$K_v = \frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{(\rho_{f2} - \rho_{l2}) \rho_{l1}}{(\rho_{f1} - \rho_{l1}) \rho_{l2}}}$$

En el caso de un gas, su densidad puede despreciarse frente al peso específico del flotador, de modo que el factor correspondiente es:

Factor en un gas:
$$K_v = \sqrt{\frac{Q_{r2} \cdot Q_{g1}}{Q_{r1} \cdot Q_{g2}}}$$

en las que Q_1 son las condiciones de calibración y Q_2 las nuevas condiciones de servicio y se supone el mismo coeficiente de descarga en ambos casos.

Variación en la temperatura:

En los líquidos, los cambios en la temperatura hacen variar la densidad del líquido, luego:

Factor en un líquido:
$$K_t = \sqrt{\frac{(Q_r - Q_{r2}) Q_{r1}}{(Q_r - Q_{r1}) Q_{r2}}}$$

En un gas la densidad varía inversamente a la temperatura absoluta, luego:

Factor en un gas:
$$K_t = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$
 expresado en unidades de volumen.

Variación en la presión:

En un líquido no influye por ser el líquido incompresible, en cambio en los gases la densidad varía directamente con la presión absoluta, luego:

Factor en un gas:
$$K_p = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}$$

Las variaciones simultáneas en la densidad, la temperatura y la presión se tienen en cuenta con el factor:

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{Q_{r1} \cdot T_1 \cdot P_2}{Q_{r2} \cdot T_2 \cdot P_1}} \text{ en unidades volumétricas}$$

$$K_{DTP} = \sqrt{\frac{Q_{r2} \cdot T_2 \cdot P_1}{Q_{r1} \cdot T_1 \cdot P_2}} \text{ en unidades de masa}$$

Al deducir la ecuación del caudal del rotámetro, no se tuvo en cuenta la fuerza debida a la viscosidad. Tal como se vio anteriormente, su magnitud depende de la forma del flotador y de la viscosidad del fluido, en particular, del número de Reynolds en el espacio anular comprendido entre la superficie del flotador y la interior del tubo. Cuanto más alto es el número de Reynolds, tanto menor será la influencia debida a las variaciones de la viscosidad; de este modo, se desprecia la influencia que puedan tener dichas variaciones en los gases, ya que éstos dan un alto número de Reynolds. En los líquidos, un adecuado diseño del flotador permite obtener una inmunidad frente a dichas variaciones. En la figura 4.22 se representan las curvas de viscosidad para un mismo tubo con diferentes formas de los flotadores del mismo peso y densidad.

Puede observarse que la curva del flotador 4 es casi plana, de tal modo que se utiliza siempre que sean apreciables los efectos de la viscosidad.

Cuando la viscosidad del fluido es muy elevada, no es posible encontrar el caudal equivalente en agua, siendo necesario calibrar el rotámetro por simulación

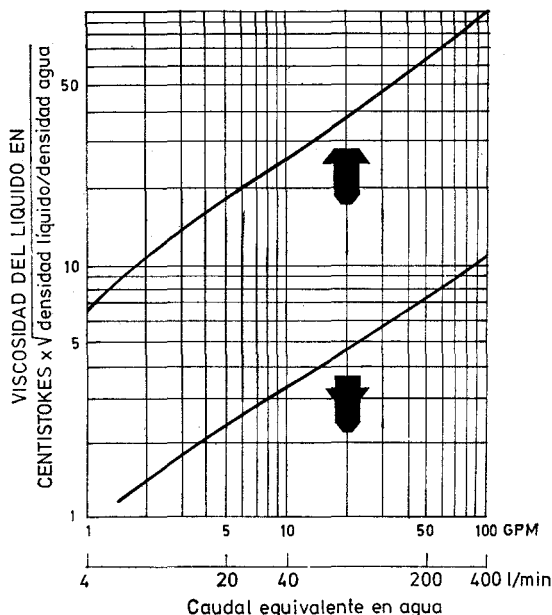


Fig. 4.23 Límites de aplicación de los flotadores según la viscosidad.

hidráulica, o bien, con el mismo líquido del proceso. Los límites de aplicación de los flotadores tipos 3 y 4 pueden verse en la figura 4.23.

La simulación hidráulica para obtener las curvas de corrección de viscosidad se basa en utilizar un aceite de características conocidas (viscosidad, temperatura y densidad) y suponer una densidad (correspondiente a una temperatura dada) para el fluido cuyas curvas de viscosidad desean determinarse. Se verifica la ecuación

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \sqrt{\frac{Q_{r2} - Q_{n1}}{Q_{r2} - Q_{r2}}} \times \frac{Q_{r2}}{Q_{n1}}$$

en la que las condiciones 1 se refieren al aceite conocido y las 2 al simulado. Esta expresión permite calcular la viscosidad del fluido simulado 2. El mayor problema que se representa en las calibraciones de viscosidad es en la obtención de curvas correctas temperatura-viscosidad, de modo que los datos conocidos de la viscosidad se corresponden exactamente con las temperaturas de trabajo en la planta.

La calibración de los rotámetros se consigue básicamente manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado medido con precisión. En los líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetros y calibradores, graduados con

sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0,01 segundos como mínimo.

Según la aplicación, los rotámetros pueden dividirse en rotámetros de purga, de indicación directa para usos generales y armados con indicación magnética y transmisión neumática y electrónica (fig. 4.24).

Los rotámetros de purga se utilizan para caudales muy pequeños. Algunas de sus aplicaciones típicas son la purga hidráulica de los sellos mecánicos de las bombas generales de la planta, la medición del nivel por burbujeo (véase el capítulo de nivel), la purga de elementos de presión diferencial para la medida de caudal evitando la obturación de las tuberías y la purga de instrumentos que trabajan en atmósferas corrosivas o polvorientas.

Los rotámetros de vidrio de indicación directa pueden adoptar varias disposiciones: llevar placas laterales, estar cerrados con cuatro placas con ventana de cristal para ver el tubo; disponer de armadura de seguridad o blindada de cierre estanco para evitar que en caso de rotura del tubo el gas o el líquido interiores puedan dañar al operador; disponer de armadura anti-hielo con gel de sílice para evitar la presencia de humedad en el espacio entre la armadura y el tubo que podría impedir la visibilidad del flotador.

Los rotámetros armados incorporan un tubo metálico que no permite la lectura directa del caudal, por lo cual precisan pues de indicación o de transmisión.

Los rotámetros se emplean asimismo conectados a las tomas de una placa-orificio o diafragma, es decir, como rotámetros by-pass (fig. 4.24 f). En esta aplicación, en lugar de medirse la presión diferencial miden el caudal del fluido que circula de la toma de alta presión, a la baja, debido a la presión diferencial creada por la placa. El rotámetro determina un caudal proporcional linealmente al caudal principal de paso por la tubería gracias a un segundo orificio calibrado situado en la tubería de by-pass. Este orificio está calibrado de tal forma que el flotador marca el 100 % de la escala cuando el caudal que pasa a través de la placa-orificio en la tubería principal llega al 100 % con la presión diferencial máxima de cálculo.

Como el rotámetro en by-pass mide caudal y no presión diferencial (utilizándose sólo la presión diferencial creada por la placa-orificio en la tubería principal como una bomba hidráulica que crea un caudal derivado del principal) la escala de medida es lineal y no de raíz cuadrada como sería de suponer siendo el elemento de medida un diafragma.

Los transmisores neumáticos acoplados al rotámetro consisten en una leva que sigue magnéticamente el movimiento del flotador y que se encuentra situada entre dos toberas neumáticas. Estas toberas forman parte de un transmisor de equilibrio de movimientos (fig. 4.24 d).

Los transductores eléctricos acoplados a rotámetros pueden ser de varios tipos:

- Potenciométrico.
- Puente de impedancias.

El transductor potenciométrico puede verse en la figura 4.25. Es parecido al transductor resistivo de presión estudiado en el capítulo anterior y consiste en

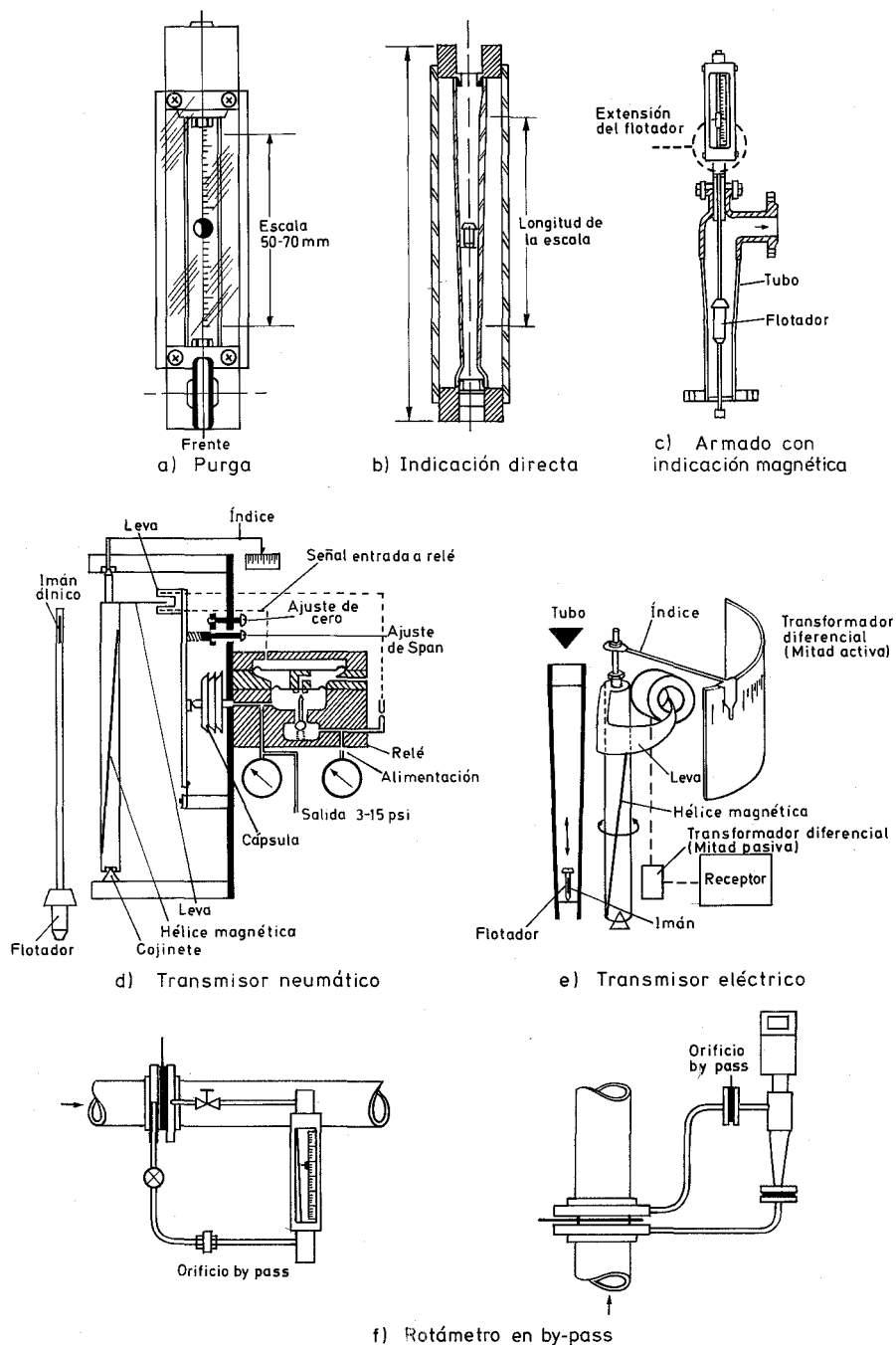


Fig. 4.24 Tipos de rotámetros.

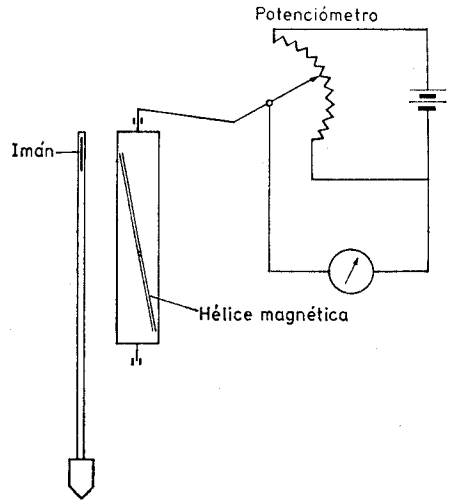


Fig. 4.25 Transductor potenciométrico.

una varilla que sigue magnéticamente el movimiento del flotador dentro del tubo y que mueve el brazo de un potenciómetro. Por las características del circuito potenciométrico da una tensión alta de salida proporcional a la posición del flotador. El sistema presenta la desventaja del envejecimiento y desgaste característicos del potenciómetro.

El transductor de puente de impedancias (fig. 4.26) consiste en un mecanismo

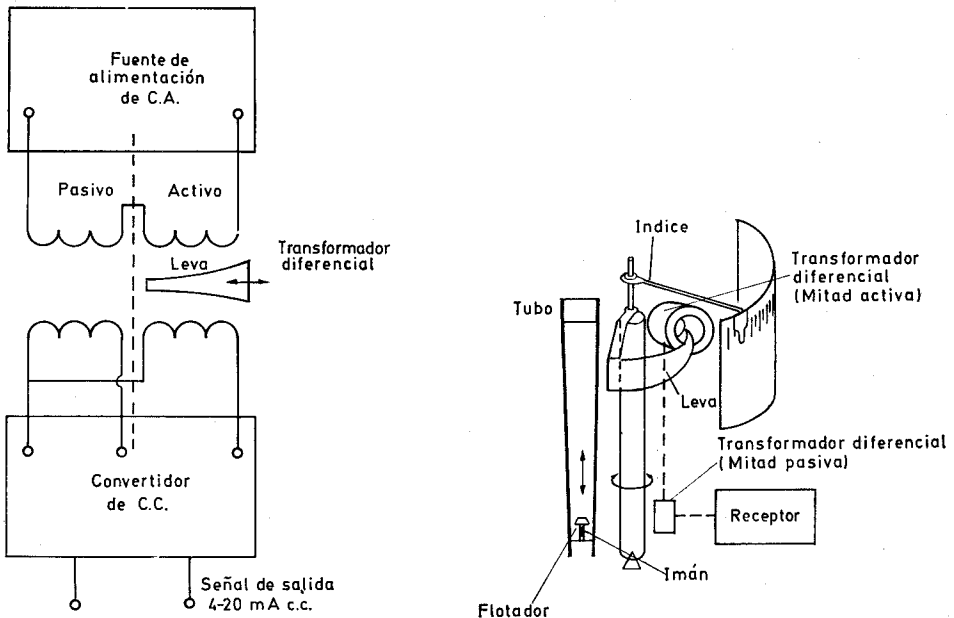


Fig. 4.26 Transductor de puente de impedancias.

de indicación actuado magnéticamente, un transformador diferencial de núcleo móvil y un convertidor. Al variar el caudal, un imán montado en el flotador o en la varilla de extensión del mismo hace girar un mecanismo magnético de posición formado por una hélice de hierro dispuesta en un cilindro de aluminio. Una leva de forma característica gira con el conjunto y se introduce dentro del arrolamiento activo de un transformador diferencial. El primario de este transformador está alimentado por una tensión alterna constante procedente de un oscilador preamplificador.

La señal de salida del secundario del transformador, que es proporcional al caudal, pasa a un convertidor donde es transformada en una señal de corriente continua constante. En el convertidor se encuentran los ajustes de cero y de multiplicación del instrumento.

El intervalo de medida de los rotámetros es usualmente de 1 a 10 (relación entre el caudal mínimo y el máximo) con una escala lineal. Su precisión es del orden de 2 % de toda la escala cuando están sin calibrar y de 1 % con calibración. Los rotámetros son adecuados para la medida de pequeños caudales llegando a límites mínimos de 0,1 cm³/minuto en agua y de 1 cm³/minuto en aire. El valor máximo que pueden alcanzar es de 3,5 m³/minuto en agua y de 30 m³/minuto en aire. Pueden utilizarse en la medida de mayores caudales montándose como rotámetros by-pass en la tubería.

4.1.3 Velocidad

4.1.3.1 Vertederos y Venturi

En la *medición del caudal en canales abiertos*, se utilizan vertederos de formas variadas que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura. La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua y es conveniente incluso utilizar un pozo de protección (tubería de \varnothing ligeramente mayor que el flotador) para el flotador del instrumento de medida, caso de utilizar este sistema.

El caudal es proporcional a la diferencia de alturas según la fórmula general empírica:

$$Q = K l H^n$$

Q = caudal en m³/s;

K = constante que depende del tipo de vertedero;

l = anchura de la garganta del vertedero en m;

H = diferencia máxima de alturas en m;

n = exponente que depende del tipo de vertedero o canal.

Los vertederos más empleados son de los siguientes tipos (fig. 4.27):

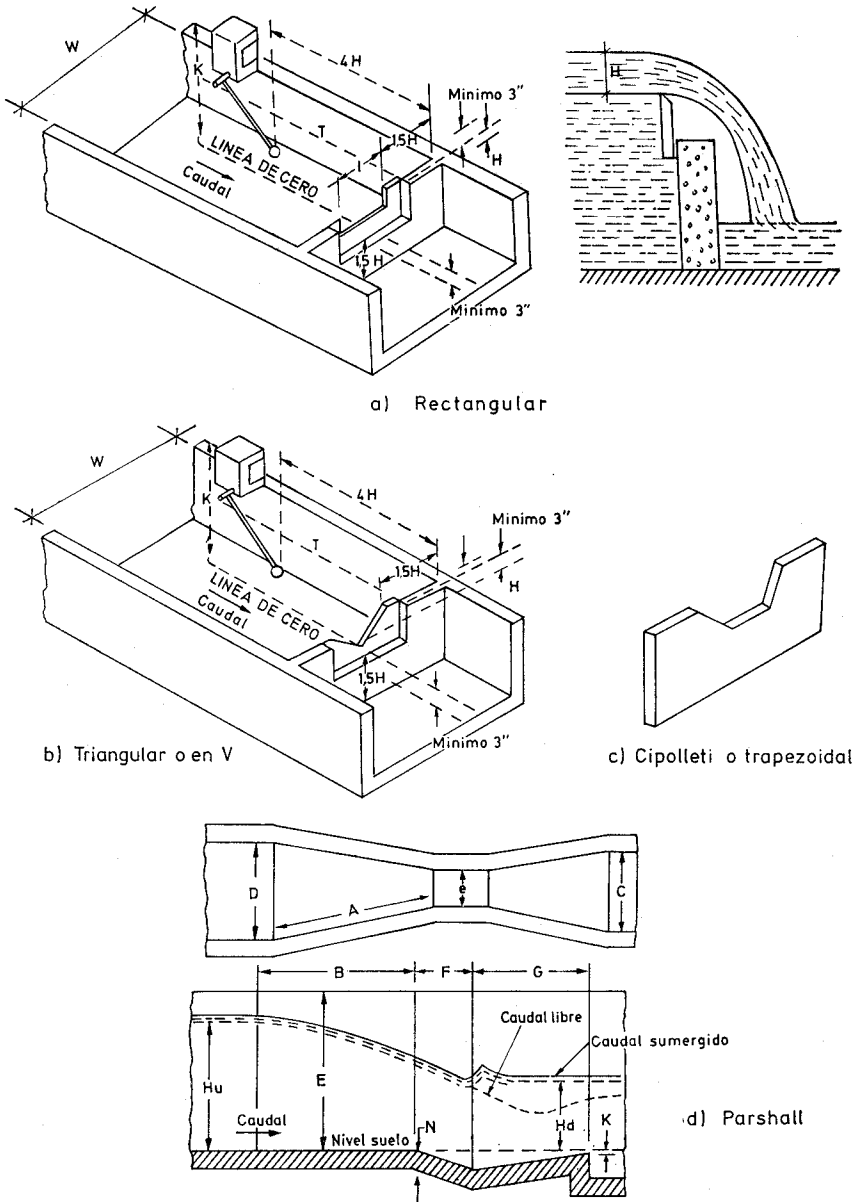


Fig. 4.27 Tipos de vertederos.

— Rectangular (fig. 4.27 a) con contracción lateral, simple y fácil de construir y el más económico. Es apto para la medida de caudales de 0-60 m³/h a 0-2000 m³/h. La fórmula de medida de caudales que suele usarse es la de Francis:

$$Q = 1,84 (l - 0,2 H) H^{\frac{3}{2}} \text{ m}^3/\text{s}$$

siendo l la anchura del rectángulo en m.

El valor de $0,2 H$ viene sustituido por $0,1 H$ si no hay contracción del manto vertido, es decir, si $l =$ anchura del canal.

- Triangular o en V (fig. 4.27 b), que consiste en una placa con un corte en V de vértice dirigido hacia abajo y con cada lado igualmente inclinado respecto a la vertical. A igualdad de tamaño, su campo de medida es más amplio que el de los otros vertederos. Es capaz de medir caudales dentro del intervalo 0-30 m³/h a 0-2300 m³/h. La fórmula empírica aplicable es:

$$Q = 1,33 H^{2,475} \text{ m}^3/\text{s} \text{ para un vertedero en V de } 90^\circ$$

- Cipolletti o trapezoidal (fig. 4.27 c) con la ranura en forma de trapecio invertido. La pendiente de los lados del trapecio corrige las contracciones laterales del manto de agua y el caudal es por lo tanto proporcional a la altura de la cresta. Su campo de medida equivale al del vertedero rectangular. La fórmula empírica es:

$$Q = 1,86 l H^{\frac{3}{2}} \text{ m}^3/\text{s}$$

- El vertedero Parshall o Venturi (fig. 4.27 d) se emplea normalmente en aquellas aplicaciones en las que un vertedero normal no es siempre adecuado tal como ocurre cuando el líquido transporta sólidos o sedimentos en cantidad excesiva, o bien cuando no existe altura de presión suficiente, o bien cuando no es posible construir un tramo recto de longitud suficiente (un mínimo de 10 veces la anchura del canal). Puede utilizarse para caudales superiores a 0-30 m³/h. El vertedero Parshall es de forma parecida al tubo Venturi. Consiste en paredes verticales y con el suelo inclinado en la estrangulación tal como puede verse en la figura 4.27 d. La descarga del fluido puede presentarse de dos formas: caudal libre cuando la elevación del agua después de la estrangulación es lo suficientemente baja como para impedir que el agua que se descarga retorne hacia atrás y no siga suavemente el perfil del elemento Parshall; caudal sumergido cuando el agua está a demasiada altura después de la estrangulación y vuelve hacia atrás. La condición de caudal libre se tiene cuando la relación de las alturas de cresta en la parte plana y en la parte final del elemento referidas al nivel plano H_u/H_d es menor de 0,6 para un elemento de garganta hasta 230 mm y menor de 0,7 para anchuras de garganta mayores de 300 mm. Relaciones mayores dan lugar a caudales del tipo sumergido en el cual el caudal es una función de H_u y H_d , mientras que en la condición de caudal libre el flujo es únicamente función de H_u . Se suele mantener generalmente esta condición.

La ecuación general empírica del vertedero Parshall es

$$Q = K l H^n$$

con los coeficientes de la tabla 4.8.

TABLA 4.8 Constantes del vertedero Parshall

K	l		n
	(m)	(pies)	
2,32	0,076	$\frac{1}{4}$	1,547
2,5	0,152	$\frac{1}{2}$	1,580
2,34	0,228	$\frac{3}{4}$	1,530
2,26	0,305	1	1,522
2,31	0,457	$1 \frac{1}{2}$	1,540
2,34	0,609	2	1,550
2,39	0,914	3	1,566
2,42	1,219	4	1,578

Un instrumento de flotador, o bien de burbujeo, mide la diferencia de alturas dada y puede indicar, regular y registrar directamente el caudal o bien transmitirlo a distancia con un transmisor del tipo potenciométrico o neumático de equilibrio de movimientos, o digital.

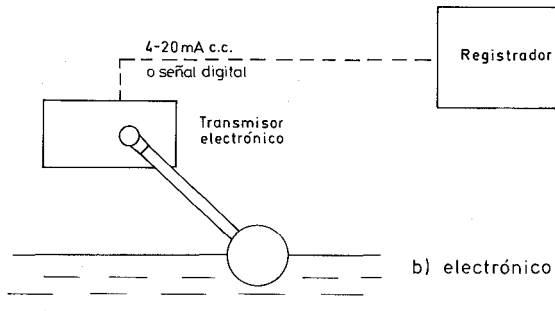
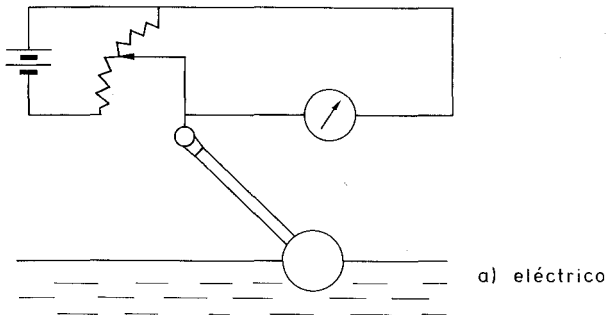


Fig. 4.28 Transmisor de flotador.

4.1.3.2 Turbinas

Los *medidores de turbina* consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. La velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debida al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De este modo el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento que necesariamente se produciría (fig. 4.29).

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto es proporcional al giro de la turbina.

En el tipo inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

En la figura 4.29 *b* puede verse el diagrama de bloques de la turbina en ambos tipos de transductores.

En ambos casos, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional

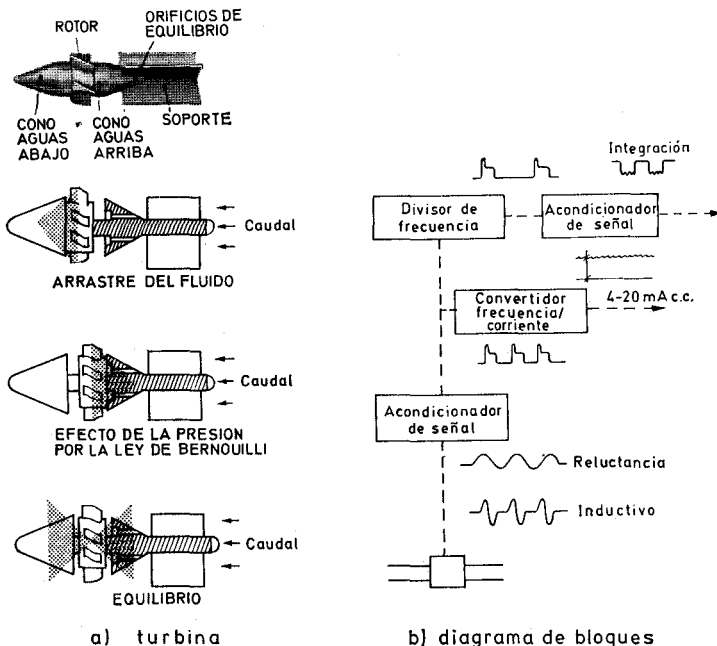


Fig. 4.29 Medidor de turbina.

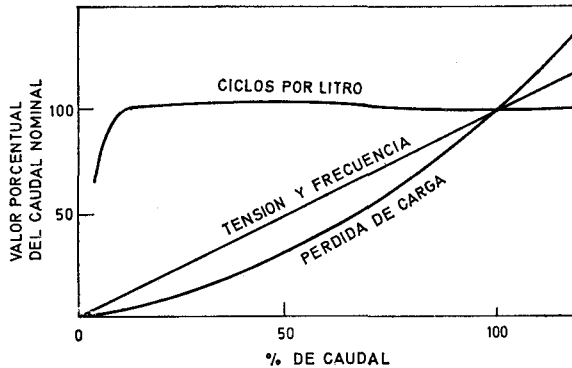


Fig. 4.30 Curvas del medidor de turbina.

al caudal siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo (fig. 4.30). Por ejemplo, si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulsos por unidad de caudal es constante. La turbina está limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad del perfil del líquido a través de la tubería cuando aumenta la viscosidad. En las paredes, el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que, las puntas de las palas no pueden girar a mayor velocidad. En general, para viscosidades superiores a 3-5 centistokes se reduce considerablemente el intervalo de medida del instrumento.

La precisión es muy elevada, del orden de $\pm 0,3\%$. La máxima precisión se consigue con un régimen laminar instalando el instrumento en una tubería recta de longitudes mínimas 15 diámetros aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo. El campo de medida llega hasta la relación 15 a 1 entre el caudal máximo y el mínimo y la escala es lineal. El instrumento es adecuado para la medida de caudales de líquidos limpios o filtrados. Debe instalarse de tal modo que no se vacíe cuando cesa el caudal ya que el choque del agua a alta velocidad contra el medidor vacío lo dañaría seriamente. La sobrevelocidad por exceso de caudal puede ser también perjudicial para el instrumento. La frecuencia generada por el medidor de turbina se transmite a un convertidor indicador o totalizador (fig. 4.29 b).

4.1.3.3 Transductores ultrasónicos

Los transductores de ultrasonidos miden el caudal por diferencia de velocidades del sonido al propagarse éste en el sentido del flujo del fluido y en el sentido contrario. Los sensores están situados en una tubería de la que se conocen el área y el perfil de velocidades. Los principios de funcionamiento de estos instrumentos son variados. En uno de los modelos más sencillos (fig. 4.31 a) la velocidad del fluido está determinada por la siguiente fórmula:

$$V = \frac{C^2 \operatorname{tg} \alpha \cdot \Delta t}{2 D}$$

en la que:

V = velocidad del fluido;

C = velocidad del sonido en el fluido;

α = ángulo de haz del sonido con relación al eje longitudinal de la tubería;

D = diámetro interior de la tubería;

Δt = diferencia entre los tiempos de tránsito del sonido aguas arriba y aguas abajo del fluido.

En otras técnicas de medición se mide la diferencia de fases o la diferencia de frecuencias entre las ondas del sonido que recorren el fluido en ambos sentidos.

Existen otros métodos que se basan en los siguientes principios:

- Desviación de haz de sonido emitido por un transmisor perpendicularmente a la tubería (fig. 4.31 b), que es utilizado en fluidos limpios.
- Método Doppler (fig. 4.31 c). Se proyectan ondas sónicas a lo largo del flujo del fluido y se mide el corrimiento de frecuencia que experimenta la señal de retorno al reflejarse el sonido en partículas contenidas en el fluido. El método viene limitado por la necesidad de la presencia de partículas, pero permite medir algunos caudales de fluidos difíciles tales como mezclas gas-líquido, fangos, etcétera.

En todos estos sistemas, se utilizan transductores piezoeléctricos tanto para la emisión como para la recepción de las ondas ultrasónicas. En la figura 4.32 puede verse el diagrama de bloques de un transductor ultrasónico.

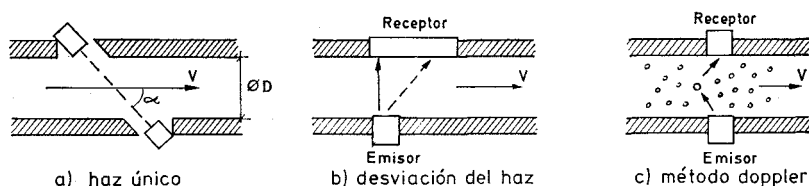


Fig. 4.31 Medición de caudal por ultrasonidos.

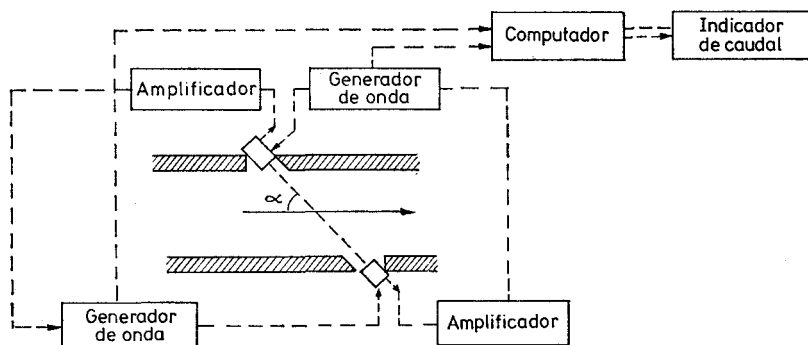


Fig. 4.32 Diagrama de bloques de un transductor ultrasónico.

Los transductores sónicos tienen una precisión de $\pm 2\%$ y un intervalo de medida de caudales de 20 a 1 con una escala lineal. Son adecuados en la medida de la mayor parte de líquidos, en particular de los líquidos con sólidos en suspensión con la salvedad de que las partículas o las burbujas de aire que pueda contener el líquido no deben compararse en tamaño con la longitud de la onda acústica. Son sensibles a los cambios de densidad del líquido que varían la velocidad del sonido (por ejemplo, la velocidad en el seno del agua varía $0,2\%$ por cada grado centígrado).

4.1.4 Fuerza (medidor de placa)

El *medidor de placa* (fig. 4.33) consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido.

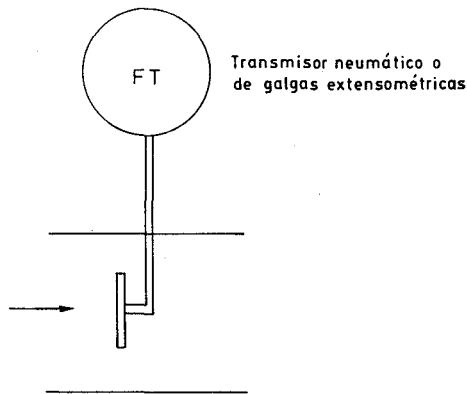


Fig. 4.33 Medidor de placa.

La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido y depende del área anular entre las paredes de la tubería y la placa. Corresponde a la siguiente ecuación:

$$F = C_d \frac{\rho v^2}{2} \cdot A$$

en la que:

F = fuerza total en la placa;
 ρ = densidad del fluido;
 v = velocidad del fluido;
 A = área de la placa;
 C_d = constante experimental.

El caudal volumétrico es:

$$Q = S \cdot v$$

en la que S es el área de la sección interior de la tubería. La placa está conectada a un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o bien a un transductor eléctrico de galgas extensométricas. Las galgas forman parte de un puente de Wheatstone de tal modo que la variación de resistencia es una función del caudal. El caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la fuerza de impacto del fluido sobre la placa y por lo tanto, a la raíz cuadrada de la señal transmitida.

La precisión en la medida es de $\pm 1\%$. El instrumento permite el paso de fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión y puede medir caudales que van de un mínimo de 0,3 l/min hasta 40 000 l/min.

4.1.5 Tensión inducida (medidor magnético)

4.1.5.1 Medidor magnético de caudal

La ley de Faraday establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor, al moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. La regla de la mano derecha nos indica que colocando la mano derecha abierta, con la palma perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético, y los dedos en el sentido de la corriente del fluido, el pulgar señala el sentido de la corriente inducida.

Faraday intentó aplicar esta teoría en la medición de la velocidad del río Támesis en 1832. Suponía que el agua del río circulaba perpendicularmente al campo magnético de la Tierra y que el agua es un conductor relativamente bueno. Sumergió una probeta en el agua y esperaba obtener una señal que variara directamente con la velocidad.

No tuvo éxito debido a que no disponía de indicadores sensibles y a que el campo magnético de la Tierra es bajo. No obstante, su teoría fue aceptada. Los holandeses fueron los primeros en el mundo que adaptaron este principio. En 1950 practicaron el bombeo de grandes cantidades de agua de una zona a otra en las tierras bajas de Holanda. Era importante tener una indicación del caudal para supervisar los caudales manejados. En 1950, cuando se desarrollaron ampliamente las técnicas más avanzadas de corriente alterna, se diseñaron amplificadores más fiables y económicos y sólo entonces el medidor magnético de caudal pasó a utilizarse en una gran variedad de aplicaciones industriales.

La fórmula del caudal que da la ley de Faraday es la siguiente:

$$E_s = K B l v$$

E_s = tensión generada en el conductor;

K = constante;

B = densidad del campo magnético;

l = longitud del conductor;

v = velocidad del movimiento.

En el medidor magnético de caudal (fig. 4.34) el conductor es el líquido y E_s es la señal generada, esta señal es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos. Realmente la única zona del líquido en movimiento que contribuye a la f.e.m. es la que une en línea recta

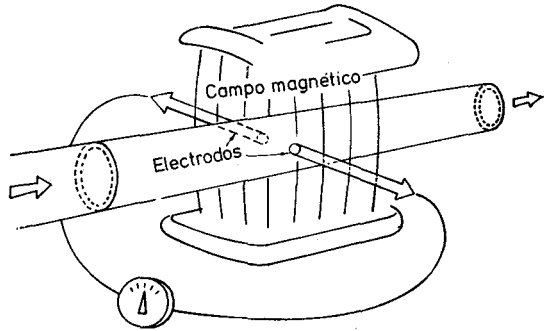


Fig. 4.34 Medidor magnético de caudal.

a los dos electrodos, B es la densidad del campo magnético creado por medio de la bobina de campo, l es el diámetro de la tubería y v es la velocidad del fluido a través del medidor. Como

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{resulta} \quad Q = K \frac{E_s}{B} \cdot D$$

Las fórmulas anteriores indican que la señal E_s depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido. Es obvio que, para obtener una señal que dependa únicamente de la velocidad, debe eliminarse la influencia de estos tres factores y, por otro lado es muy difícil mantenerlos en valores constantes (la temperatura y la conductividad del fluido vienen dadas por las condiciones particulares de servicio). De aquí que la señal de voltaje del medidor se compara en el receptor con otra tensión denominada «tensión de referencia E_r ». Como las dos señales derivan a la vez del campo magnético B , la tensión de la línea y las variaciones de temperatura y de conductividad no influyen en la precisión de la medida.

La señal de referencia E_r se toma de un arrollamiento colocado en los bobinados del campo que genera el flujo magnético. En la figura 4.35a puede verse un esquema de conexiones del elemento de medida.

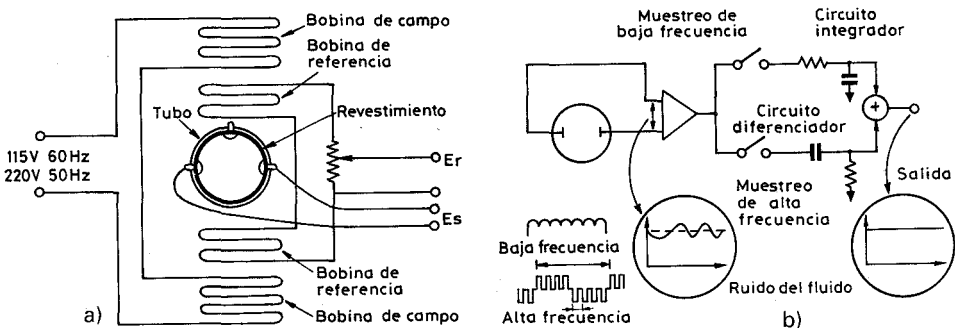


Fig. 4.35 Elemento magnético de medida.

El valor de E_r se escoge de tal forma que la relación E_s/E_r se hace constante en todos los medidores de caudal. De este modo se logra su intercambiabilidad con cualquier receptor.

El valor de E_r , transmitido al receptor, puede establecerse con completa exactitud, gracias a un potenciómetro colocado normalmente en el medidor y fijado en fábrica para el valor máximo del caudal.

Las medidas de caudales en ambos sentidos, de paso del fluido, pueden efectuarse de dos formas:

- a) Con un interruptor que invierta las conexiones de la señal del receptor, la posición del interruptor indica el sentido del caudal, y la calibración del sistema permanece invariable en cualquier sentido.
- b) Elevando el cero del instrumento al 50 % de la escala, en cuyo caso, el índice indica automáticamente el sentido del caudal del líquido, al estar en la zona superior o inferior de la escala. La calibración del sistema permanece invariable y la indicación es de $-50-0-+50$ % de la escala en lugar de 0-100 por 100.

La conductividad del fluido es la única característica propia del líquido que puede limitar el empleo del medidor magnético de caudal. El sistema electrónico utilizado en el elemento y en el receptor permite medir caudales de líquidos que tengan una conductividad superior a 3 micromhos/cm. No obstante, en casos especiales puede trabajarse con valores menores, añadiendo al circuito de medida un preamplificador adicional (acondicionador de señal), alcanzándose una conductividad mínima de 0,3 micromhos/cm. Con electrodos planos, sin contacto con el líquido, aislados dentro de las capas del material del revestimiento y acoplados capacitivamente con el proceso, es posible medir caudales de líquidos con conductividades tan bajas como 0,05 micromhos/cm.

Como guía para el lector facilitamos la tabla 4.9 con la conductividad de varias soluciones acuosas.

Algunos fabricantes excitan la bobina del campo magnético a baja frecuencia en lugar de utilizar la frecuencia de línea (50 Hz). Se obtiene así un aumento en la precisión y en la estabilidad del cero del medidor.

También hay fabricantes que utilizan una fuente de tensión continua con períodos de corta duración, en lugar de alimentar las bobinas de campo con c.a. El sistema consume menos, su coste es más bajo y su instalación más sencilla, son menos sensibles a los problemas de recubrimiento de los electrodos, pero presentan la desventaja de que su respuesta es más lenta, siendo inaceptables en algunos tipos de control.

Otros fabricantes alimentan la bobina del campo magnético con dos ondas superpuestas, una de baja frecuencia que proporciona una excelente estabilidad del cero, y otra de alta frecuencia que es inmune al ruido de baja frecuencia generado por reacciones electroquímicas y líquidos de alta viscosidad y/o baja conductividad. En la figura 4.35 b puede verse el esquema de este tipo de medidor.

Tal como se ha indicado, la medida no es afectada por las variaciones de conductividad, sin embargo, la necesidad de obtener la precisión adecuada en la medida, limita la longitud del cable entre el elemento y el receptor.

La conductividad eléctrica en los gases es generalmente mucho más baja.

Por este motivo, el medidor magnético no puede emplearse para la medida de caudales de gases.

En planta existen muchas fuentes de señales de ruido que pueden perturbar el funcionamiento de los medidores magnéticos de caudal. Por ejemplo, un motor eléctrico de gran potencia colocado en las inmediaciones del elemento genera un campo magnético que puede superponerse al flujo propio del medidor. Este tipo de ruido queda eliminado gracias al sistema de tensión de referencia E_r que ya se ha descrito anteriormente.

Asimismo, los restantes motores y las líneas eléctricas de potencia pueden generar corrientes y tensiones eléctricas en las tuberías de la planta, siendo estas señales captadas por el medidor en forma de señales de tensión. Al objeto de reducir la influencia de estas señales de ruido se conectan eléctricamente en by-pass las bridas de conexión del medidor y se ponen a masa. Sin embargo, la práctica ha demostrado que esta medida es insuficiente y muchos fabricantes han dispuesto sistemas en el receptor para eliminar dichas señales de ruido.

Es obvio que, siendo el ruido dependiente en gran parte de la situación del medidor, y de la utilización continua o intermitente del equipo parásito, el sistema de compensación debe ser corregido una vez variadas las condiciones. Sin embargo, existe un sistema que evita dichas correcciones: consiste en introducir en el medidor un tercer electrodo y conectarlo a masa. De este modo, la unidad de medida está puesta a tierra con relación a dichas señales de ruido y es completamente insensible a las mismas sin que sea necesario hacer ajustes de posición en la instalación (fig. 4.36).

En la sección de medida se generan corrientes parásitas en el líquido, debido al campo magnético de corriente alterna. Estas corrientes, a su vez, generan un campo magnético y una tensión. Este campo magnético se opone al principal generado en los bobinados de campo y por lo tanto hace variar la densidad del flujo. La compensación de esta variación de flujo la llevan a cabo automáticamente los bobinados de referencia descritos en la figura 4.35a. Por otro lado, la tensión generada aparece como una señal en los electrodos y es por lo tanto captada por el receptor. Su magnitud depende de la densidad del flujo magnético y de la conductividad del fluido, y está desfasada con relación a la señal de velocidad del líquido. Como este desfase perturba el trabajo del sistema, es esencial anular esta señal.

Algunos fabricantes compensan este fenómeno de desfase empleando en los electrodos cables de conexión rígidos y con curvatura especial o bien compensándolo en el receptor. El primer método es difícil y la posición de los cables es extremadamente crítica. Por otro lado, la compensación en el receptor cambia completamente la intercambiabilidad entre los elementos primarios y el receptor, ya que la magnitud de esta señal desfasada es distinta para cada medidor, por consiguiente si se sustituye el medidor de caudal es necesario el reajuste del receptor.

Otros fabricantes emplean un arrollamiento cerrado con un potenciómetro de equilibrio en cada electrodo. Los bucles formados están situados en el campo magnético del instrumento, y, en la misma forma que un transformador, generan una tensión que está desfasada 90° con relación a la señal de velocidad del fluido. En el potenciómetro se toma una parte de esta tensión para compensar la señal

TABLA 4.9 Conductividad eléctrica de soluciones acuosas

Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm	Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm
AgNO ₃	Nitrato de plata	5	18	2,56 × 10 ⁴	C ₂ H ₅ CO ₂ H	Ácido propiónico	1,00	18	4,79 × 10 ²
		10		4,76 × 10 ⁴			5,01		9,25 × 10 ²
		20		8,72 × 10 ⁴			10,08		11,13 × 10 ²
		40		15,65 × 10 ⁴			20,02		10,42 × 10 ²
		60		21,01 × 10 ⁴			30,03		8,18 × 10 ²
BaCl ₂	Cloruro de bario	5	18	3,89 × 10 ⁴			50,09		3,77 × 10 ²
		10		7,33 × 10 ⁴			69,99		85
		15		10,51 × 10 ⁴			100,00		0,07
		24		15,34 × 10 ⁴					
Ba(NO ₃) ₂	Nitrato de bario	4,2	18	2,09 × 10 ⁴	C ₃ H ₇ CO ₂ H	Ácido butírico	1,00	18	4,55 × 10 ²
		8,4		3,52 × 10 ⁴			5,02		8,63 × 10 ²
Ba(OH) ₂	Hidróxido bórico	1,25	18	2,50 × 10 ⁴			10,07		9,86 × 10 ²
		2,5		4,79 × 10 ⁴			15,03		9,55 × 10 ²
CH ₃ CO ₂ H	Ácido acético	0,3	18	3,18 × 10 ²			20,01		8,88 × 10 ²
		1		5,84 × 10 ²			50,04		2,96 × 10 ²
		5		12,25 × 10 ²			70,01		56,00
		10		15,26 × 10 ²			100		0,06
		20		16,05 × 10 ²					
		30		14,01 × 10 ²					
		40		10,81 × 10 ²					
		50		7,40 × 10 ²					
		60		4,56 × 10 ²					
		70		2,35 × 10 ²					
		99,7		0,04					
		(CO ₂ H) ₂		Ácido oxálico	3,5	18	5,08 × 10 ⁴		
					7,0		7,83 × 10 ⁴		
		CaCl ₂		Cloruro de calcio	5,0	18	6,43 × 10 ⁴		
					10,0		11,41 × 10 ⁴		
					20		17,28 × 10 ⁴		
					25		17,81 × 10 ⁴		
30	16,58 × 10 ⁴								
35	13,66 × 10 ⁴								

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de calcio	6,25 12,5 25,0 37,5 50	18	$4,91 \times 10^4$ $8,04 \times 10^4$ $10,48 \times 10^4$ $8,76 \times 10^4$ $4,69 \times 10^4$
CdBr_2	Bromuro de cadmio	0,0324 0,0748 0,154 0,506 1 5 10 20 30	18	$2,31 \times 10^2$ $4,70 \times 10^2$ $8,44 \times 10^2$ $21,30 \times 10^2$ $35,70 \times 10^2$ $10,90 \times 10^3$ $16,40 \times 10^3$ $23,60 \times 10^3$ $27,30 \times 10^3$
CdCl_2	Cloruro de cadmio	0,0503 0,200 0,599 1 5 10 15 20 30 40 50	18	$4,95 \times 10^2$ $15,60 \times 10^2$ $36,40 \times 10^2$ $55,10 \times 10^2$ $16,70 \times 10^3$ $24,10 \times 10^3$ $28,20 \times 10^3$ $29,90 \times 10^3$ $28,20 \times 10^3$ $22,10 \times 10^3$ $13,70 \times 10^3$
CdI_2	Yoduro de cadmio	1 5 10 15 20 30 40 45	18	$21,20 \times 10^2$ $60,90 \times 10^2$ $10,39 \times 10^3$ $14,60 \times 10^3$ $18,60 \times 10^3$ $25,40 \times 10^3$ $30,30 \times 10^3$ $31,40 \times 10^3$

$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de cadmio	1 5 10 20 30 40 48	18	$69,40 \times 10^2$ $28,90 \times 10^3$ $51,30 \times 10^3$ $82,70 \times 10^3$ $95,60 \times 10^3$ $90,30 \times 10^3$ $75,50 \times 10^3$
CdSO_4	Sulfato de cadmio	0,0289 0,0999 0,495 1 5 10 25 36	18	$2,47 \times 10^2$ $6,92 \times 10^2$ $23,93 \times 10^2$ $41,60 \times 10^2$ $14,60 \times 10^3$ $24,70 \times 10^3$ $43,00 \times 10^3$ $42,10 \times 10^3$
CuCl_2	Cloruro cúprico	1,35 9 18,2 28,75 35,2	18	$18,70 \times 10^3$ $71,60 \times 10^3$ $92,40 \times 10^3$ $89,70 \times 10^3$ $69,90 \times 10^3$
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	Nitrato de cobre	5 10 15 20 25 35	15	$36,50 \times 10^3$ $63,50 \times 10^3$ $85,80 \times 10^3$ $10,18 \times 10^4$ $10,89 \times 10^4$ $10,62 \times 10^4$
CuSO_4	Sulfato de cobre	2,5 5 10 15 17,5	18	$10,90 \times 10^3$ $18,90 \times 10^3$ $32,00 \times 10^3$ $42,10 \times 10^3$ $45,80 \times 10^3$

Tabla 4.9 (Continuación)

<i>Fórmula</i>	<i>Nombre</i>	<i>% en peso</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Conductividad micromhos/cm</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Nombre</i>	<i>% en peso</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Conductividad micromhos/cm</i>
HBr	Ácido bromhídrico	5	15	$19,08 \times 10^4$			15,85		$18,53 \times 10^4$
		10		$35,49 \times 10^4$			24,5		$28,32 \times 10^4$
		15		$49,40 \times 10^4$			29,8		$34,11 \times 10^4$
HCO ₂ H	Ácido fórmico	4,94	18	$55,00 \times 10^2$	HI	Ácido yodhídrico	5	15	$13,32 \times 10^4$
		9,55		$75,60 \times 10^2$					
		20,34		$98,40 \times 10^2$	HNO ₃	Ácido nítrico	6,2	18	$31,23 \times 10^4$
		29,83		$10,38 \times 10^3$					
		39,95		$98,40 \times 10^2$					
		50,02		$86,40 \times 10^2$					
		70,06		$52,30 \times 10^2$					
		89,02		$18,70 \times 10^2$					
		100		$2,80 \times 10^2$					
HCl	Ácido clorhídrico	5	15	$39,48 \times 10^4$	H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico	10	15	$56,60 \times 10^3$
		10		$63,02 \times 10^4$			20		$11,29 \times 10^4$
		20		$76,15 \times 10^4$			30		$16,54 \times 10^4$
		30		$66,20 \times 10^4$			35		$18,58 \times 10^4$
HF	Ácido fluorhídrico	40	18	$51,52 \times 10^4$			50		$20,73 \times 10^4$
		0,004		$2,50 \times 10^2$			70		$14,73 \times 10^4$
		0,007		$3,80 \times 10^2$			80		$97,90 \times 10^3$
		0,015		$5,00 \times 10^2$			85		$78,00 \times 10^3$
		0,030		$8,00 \times 10^2$			87		$70,90 \times 10^3$
		0,060		$12,30 \times 10^2$	H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico	5	18	$20,85 \times 10^4$
		0,121		$21,00 \times 10^2$			10		$39,15 \times 10^4$
		0,242		$36,30 \times 10^2$			15		$54,32 \times 10^4$
		0,484		$67,30 \times 10^2$			20		$65,27 \times 10^4$
		1,50		$19,80 \times 10^3$			25		$71,71 \times 10^4$
		2,48		$31,50 \times 10^3$			30		$73,88 \times 10^4$
		4,80		$59,30 \times 10^3$			35		$72,43 \times 10^4$
		7,75		$96,30 \times 10^3$					

		40		$68,00 \times 10^4$
		50		$54,05 \times 10^4$
		60		$37,26 \times 10^4$
		65		$29,05 \times 10^4$
		70		$21,57 \times 10^4$
		75		$15,22 \times 10^4$
		80		$11,05 \times 10^4$
		85		$98,50 \times 10^3$
		86		$99,20 \times 10^3$
		87		$10,10 \times 10^4$
		88		$10,33 \times 10^4$
		89		$10,55 \times 10^4$
		90		$10,75 \times 10^4$
		91		$10,93 \times 10^4$
		92		$11,02 \times 10^4$
		93		$10,96 \times 10^4$
		94		$10,71 \times 10^4$
		95		$10,25 \times 10^4$
		96		$94,40 \times 10^3$
		97		$80,00 \times 10^3$
		99,4		$85,00 \times 10^2$
HgBr ₂	Bromuro de mercurio	0,223 0,422	18	16 26
HgCl ₂	Cloruro de mercurio	0,229 1,013 5,08	18	44 114 421
KBr	Bromuro de potasio	5 10 20 30 36	15	$4,65 \times 10^4$ $9,28 \times 10^4$ $19,07 \times 10^4$ $29,23 \times 10^4$ $35,07 \times 10^4$

K·CH ₃ CO ₂	Acetato de potasio	4,67 9,33 28 46,67 65,33	15	$34,70 \times 10^3$ $62,50 \times 10^3$ $12,56 \times 10^4$ $11,22 \times 10^4$ $47,90 \times 10^3$
KCN	Cianuro potásico	3,25 6,5	15	$52,70 \times 10^3$ $10,26 \times 10^4$
K ₂ CO ₃	Carbonato potásico	5 10 20 30 40 50	15	$56,10 \times 10^3$ $10,38 \times 10^4$ $18,06 \times 10^4$ $22,22 \times 10^4$ $21,68 \times 10^4$ $14,69 \times 10^4$
K ₂ C ₂ O ₄	Oxalato de potasio	5 10	18	$48,80 \times 10^3$ $91,50 \times 10^3$
KCl	Cloruro potásico	5 10 15 20 21	18	$69,00 \times 10^3$ $13,59 \times 10^4$ $20,20 \times 10^4$ $26,77 \times 10^4$ $28,10 \times 10^4$
KF	Fluoruro potásico	5 10 20 30 40	18	$65,20 \times 10^3$ $12,09 \times 10^4$ $20,80 \times 10^4$ $25,61 \times 10^4$ $25,22 \times 10^4$
KI	Yoduro potásico	5 10	18	$33,80 \times 10^3$ $68,00 \times 10^3$

Tabla 4.9 (Continuación)

<i>Fórmula</i>	<i>Nombre</i>	<i>% en peso</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Conductividad micromhos/cm</i>
		20 30 40 55		$14,55 \times 10^4$ $23,03 \times 10^4$ $31,68 \times 10^4$ $42,26 \times 10^4$
KNO ₃	Nitrato potásico	5 10 15 20 22	18	$45,40 \times 10^3$ $83,90 \times 10^3$ $11,86 \times 10^4$ $15,05 \times 10^4$ $16,25 \times 10^4$
KOH	Hidróxido potásico	4,2 8,4 16,8 25,2 33,6 42,0	15	$14,64 \times 10^4$ $27,23 \times 10^4$ $45,58 \times 10^4$ $54,03 \times 10^4$ $52,21 \times 10^4$ $42,12 \times 10^4$
K ₂ S	Sulfuro potásico	3,18 4,98 9,93 19,96 29,97 38,08 47,26	18	$84,50 \times 10^3$ $12,84 \times 10^4$ $23,43 \times 10^4$ $40,20 \times 10^4$ $45,63 \times 10^4$ $41,06 \times 10^4$ $25,79 \times 10^4$
K ₂ SO ₄	Sulfato potásico	5 10	18	$45,80 \times 10^3$ $86,00 \times 10^3$
Li ₂ CO ₃	Carbonato de litio	0,20 0,63	18	$34,30 \times 10^2$ $88,50 \times 10^2$

<i>Fórmula</i>	<i>Nombre</i>	<i>% en peso</i>	<i>Temp. °C</i>	<i>Conductividad micromhos/cm</i>
LiCl	Cloruro de litio	2,5 5 10 20 30 40	18	$41,00 \times 10^3$ $73,30 \times 10^3$ $12,18 \times 10^4$ $16,76 \times 10^4$ $13,99 \times 10^4$ $84,40 \times 10^4$
LiI	Yoduro de litio	5 10 20 25	18	$29,60 \times 10^3$ $57,30 \times 10^3$ $10,94 \times 10^4$ $13,46 \times 10^4$
LiOH	Hidróxido de litio	1,25 2,5 5,0 7,5	18	$78,10 \times 10^3$ $14,16 \times 10^4$ $23,96 \times 10^4$ $29,99 \times 10^4$
Li ₂ SO ₄	Sulfato de litio	5 10	15	$40,00 \times 10^3$ $61,00 \times 10^3$
MgCl ₂	Cloruro de magnesio	5 10 20 30 34	18	$68,30 \times 10^3$ $11,28 \times 10^4$ $14,02 \times 10^4$ $10,61 \times 10^4$ $76,80 \times 10^3$
Mg(NO ₃) ₂	Nitrato de magnesio	5 10 17	18	$43,80 \times 10^3$ $77,00 \times 10^3$ $11,02 \times 10^3$

MgSO_4	Sulfato magnésico	5	15	$26,30 \times 10^3$
		10		$41,40 \times 10^3$
		15		$48,00 \times 10^3$
		25		$41,50 \times 10^3$
MnCl_2	Cloruro de manganeso	5	15	$52,60 \times 10^3$
		10		$84,40 \times 10^3$
		15		$10,55 \times 10^4$
		20		$11,34 \times 10^4$
		25		$10,90 \times 10^4$
		28		$10,16 \times 10^4$
$\text{Na} \cdot \text{CH}_3\text{CO}_2$	Acetato de sodio	5	18	$29,50 \times 10^3$
		20		$65,10 \times 10^3$
		32		$56,90 \times 10^3$
Na_2CO_3	Carbonato de sodio	5	18	$45,10 \times 10^3$
		10		$70,50 \times 10^3$
		15		$83,60 \times 10^3$
NaCl	Cloruro sódico	5	18	$67,20 \times 10^3$
		10		$12,11 \times 10^4$
		15		$16,42 \times 10^4$
		20		$19,57 \times 10^4$
		25		$21,35 \times 10^4$
		26		$21,51 \times 10^4$
NaI	Yoduro sódico	5	18	$29,80 \times 10^3$
		10		$58,10 \times 10^3$
		20		$11,44 \times 10^4$
		40		$21,11 \times 10^4$

NaNO_3	Nitrato sódico	5	18	$43,60 \times 10^3$
		10		$78,20 \times 10^3$
		20		$13,03 \times 10^4$
		30		$16,06 \times 10^4$
NaOH	Hidróxido sódico	1	18	$46,50 \times 10^3$
		2		$88,70 \times 10^3$
		4		$16,28 \times 10^4$
		6		$22,42 \times 10^4$
		8		$27,29 \times 10^4$
		10		$30,93 \times 10^4$
		15		$34,90 \times 10^4$
		20		$32,84 \times 10^4$
		25		$27,17 \times 10^4$
		27,5		$23,86 \times 10^4$
		30		$20,74 \times 10^4$
		32,5		$17,98 \times 10^4$
		35		$15,60 \times 10^4$
		37,5		$13,61 \times 10^4$
		40		$12,06 \times 10^4$
		45		$97,70 \times 10^3$
		50		$82,00 \times 10^3$
Na_2S	Sulfuro sódico	2,02	18	$61,20 \times 10^3$
		5,03		$13,21 \times 10^4$
		9,64		$20,17 \times 10^4$
		14,02		$23,59 \times 10^4$
		16,12		$22,43 \times 10^4$
		18,15		$21,84 \times 10^4$
Na_2SO_4	Sulfato sódico	5	18	$40,90 \times 10^3$
		10		$68,70 \times 10^3$
		15		$88,60 \times 10^3$

Tabla 4.9 (Continuación)

Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm	Fórmula	Nombre	% en peso	Temp. °C	Conductividad micromhos/cm
NH ₃	Amoníaco	0,10	15	2,51 × 10 ²	Pb(NO ₃) ₂	Nitrato de plomo	5	15	19,10 × 10 ³
		0,40		4,92 × 10 ²			10		32,20 × 10 ³
		0,80		6,57 × 10 ²			15		42,90 × 10 ³
		1,60		8,67 × 10 ²			20		52,10 × 10 ³
		4,01		10,95 × 10 ²			25		60,00 × 10 ³
		8,03		10,38 × 10 ²			30		66,80 × 10 ³
		16,15		6,32 × 10 ²					
30,5	1,93 × 10 ²								
NH ₄ Cl	Cloruro amónico	5	18	91,80 × 10 ³	SrCl ₂	Cloruro de estroncio	5	18	48,30 × 10 ³
		10		17,76 × 10 ⁴			10		88,60 × 10 ³
		15		25,86 × 10 ⁴			15		12,31 × 10 ⁴
		20		33,65 × 10 ⁴			22		15,83 × 10 ⁴
		25		40,25 × 10 ⁴					
NH ₄ I	Yoduro amónico	10	18	77,20 × 10 ³	Sr(NO ₃) ₂	Nitrato de estroncio	5	15	30,90 × 10 ³
		20		15,99 × 10 ⁴			10		52,70 × 10 ³
		50		42,00 × 10 ⁴			15		69,00 × 10 ³
NH ₄ NO ₃	Nitrato amónico	5	15	59,00 × 10 ³	ZnCl ₂	Cloruro de cinc	2,5	15	27,60 × 10 ³
		10		11,17 × 10 ⁴			5		48,30 × 10 ³
		30		28,41 × 10 ⁴			10		72,70 × 10 ³
		50		36,33 × 10 ⁴			20		91,20 × 10 ³
(NH ₄) ₂ SO ₄	Sulfato amónico	5	15	55,20 × 10 ³			30		92,60 × 10 ³
		10		10,10 × 10 ⁴			40		84,50 × 10 ³
		20		17,79 × 10 ⁴			60		36,90 × 10 ³
		30		22,92 × 10 ⁴					
		31		23,21 × 10 ⁴					
ZnSO ₄	Sulfato de cinc	5	18			5	18	19,10 × 10 ³	
		10			10	32,10 × 10 ³			
		15			15	41,50 × 10 ³			
		25			25	48,00 × 10 ³			
		30			30	44,40 × 10 ³			

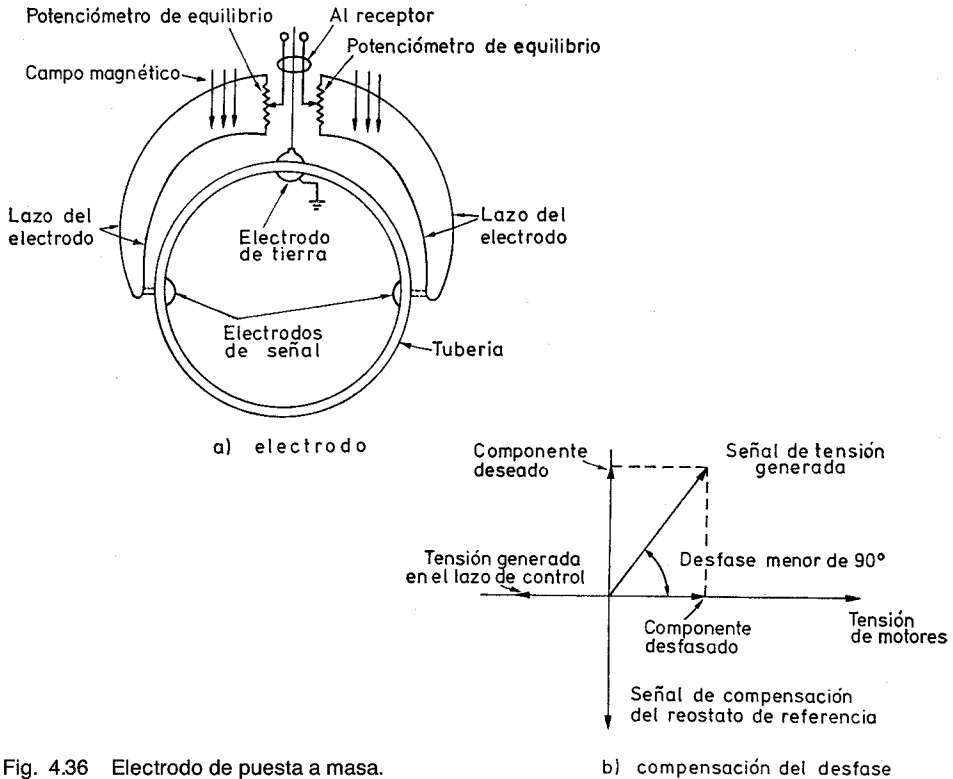


Fig. 4.36 Electrodo de puesta a masa.

de ruido desfasada. Las conexiones eléctricas en el elemento primario están dispuestas de tal modo, que la tensión inducida en el bucle del electrodo se suma a la señal de desfase. En la figura 4.36 b puede verse el gráfico polar correspondiente.

Los tamaños de los tubos de medida varían desde 0,1" hasta 72". En la tabla 4.10 pueden verse datos sobre capacidades de los medidores magnéticos de caudal.

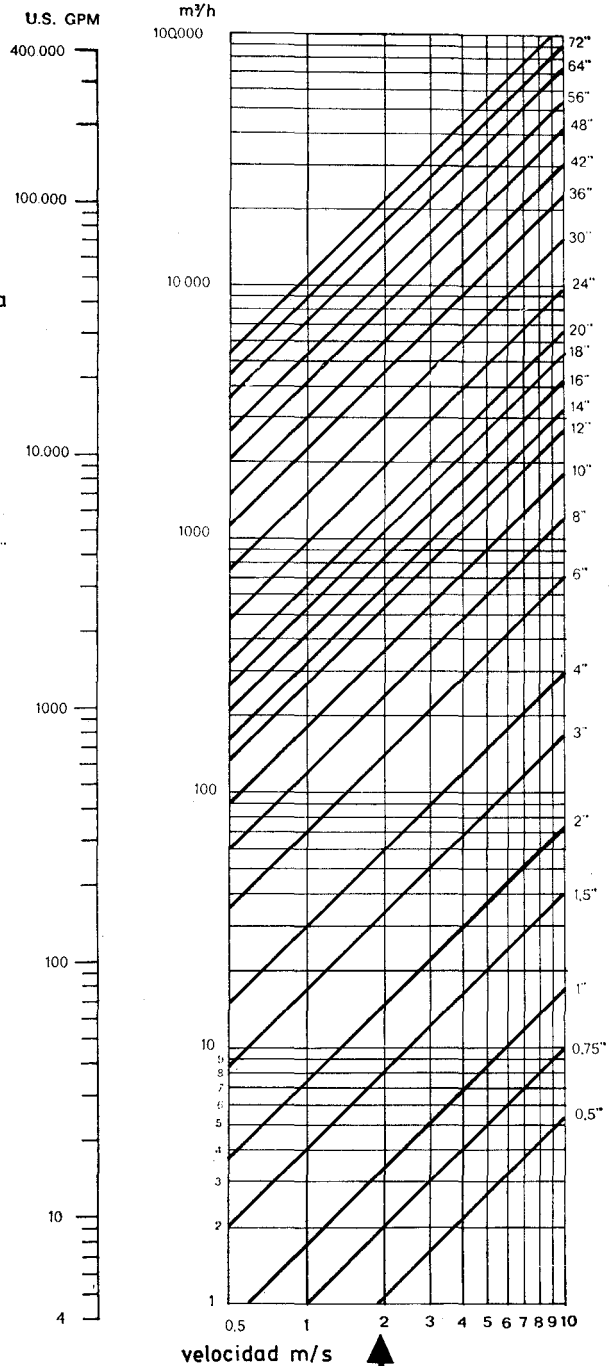
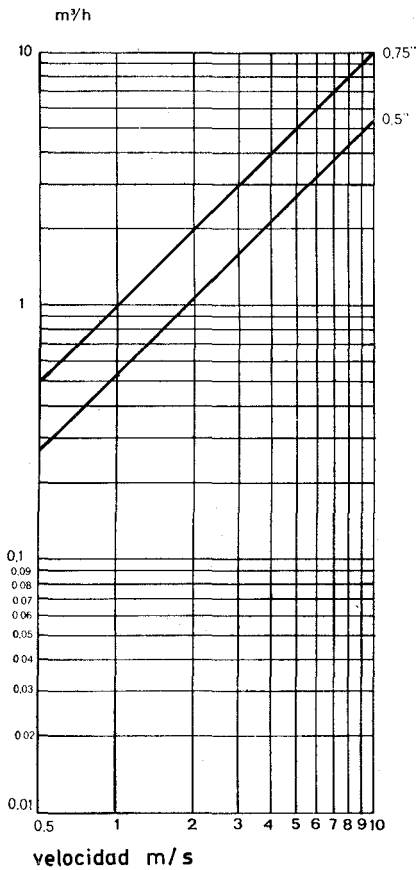
El convertidor de la señal del elemento primario, puede ser de impedancias (fig. 4.37) o estar basado en un microprocesador.

Al medidor magnético de caudal se le pueden acoplar instrumentos para conseguir las siguientes funciones auxiliares, que también puede aportar directamente el convertidor a microprocesador:

- Indicación con una escala lineal de 0-100 % de la escala.
- Transmisión neumática.
- Transmisión electrónica.
- Transmisión telemétrica con un transmisor de impulsos.
- Autocomprobación automática con diagnóstico de fallo.
- Módulo de comunicaciones.
- Integración.
- Registro.

TABLA 4.10 Capacidades de los medidores magnéticos de caudal

Valores seleccionados entre 1 y 10 m/s.
representan el valor max. de la escala.
El medidor es ajustable en campo para
el máximo caudal entre 1 y 10 m/ s



Servicios
abrasivos

↑

Problemas de
recubrimiento

(Cortesía de Brooks Instruments)

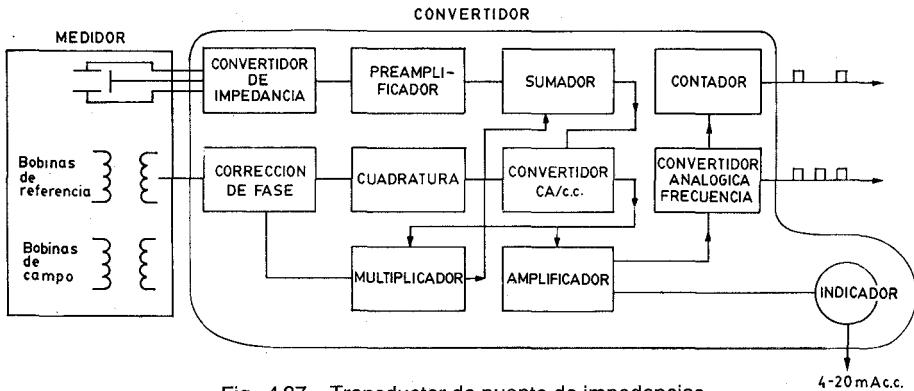


Fig. 4.37 Transductor de puente de impedancias.

Los electrodos del tubo de medida deben seleccionarse de acuerdo con su resistencia a la corrosión o a la abrasión en el caso de aplicaciones químicas. En la tabla 4.11 se indican los materiales empleados y su resistencia debiendo señalar que el material más utilizado es el acero inoxidable 316.

Como materiales opcionales se emplean el Hastelloy para soluciones corrosivas a temperaturas y concentraciones bajas, la aleación Haynes con fangos abrasivos, el platino frente a soluciones ácidas, el tantalio para la mayor parte de los ácidos con independencia de su concentración y finalmente el titanio frente a ácidos fuertemente concentrados a altas temperaturas, y a bases.

En la tabla 4.12 figuran las características de resistencia a la abrasión y corrosión de varios tipos de revestimientos.

TABLA 4.11 Materiales de los electrodos

<i>Material</i>	<i>Resistencia a la corrosión</i>	<i>Resistencia a la abrasión</i>
Inox. 316	Buena	Media
Opcional:		
Hastelloy B & C	Buena	Media
Haynes Alloy 25	Media	Excelente
Platino	Excelente	Pobre
Tantalio	Buena	Media
Titanio	Buena	Buena
Especial:		
Monel	Buena	Media
Carpenter 20	Buena	Excelente

TABLA 4.12 Resistencia a la corrosión y abrasión de varios revestimientos

Revesti- miento	Resistencia a la abrasión		Resistencia a la corrosión	bar	Temperatura máxima admisible °C	Aplicaciones
	Media	Severa				
Teflón	Buena	Pobre	Excelente	100-210	300	Ácidos, bases, jara- bes, licores, cerve- za, etc. No recomendado en CIH y FH
Poliu- retano	Excelente	Excelente	Media (vulnerable)	100-210	150	Fangos, aguas negras
Goma	Excelente	Buena	Media (vulnerable)	100-210	180	Fangos medios, agua
Neopreno	Excelente	Buena	Media (vulnerable)	100-210	170	Agua natural y tra- tada, agua caliente y fría
Vidrio	Pobre	Pobre	Excelente			Ácidos, bases, pro- ductos alimentici- cios
Fibra de vidrio (tubo de medida)	Media	Pobre	En general excelente	50-150	250	Pasta de papel, aguas negras, CIH

El teflón es el material que proporciona la mejor resistencia a la corrosión, con resistencia media a la abrasión y capacidad de resistencia a altas temperaturas.

El poliuretano, la goma y el neopreno tienen la ventaja principal de su resistencia a la abrasión.

El vidrio posee una resistencia excelente a la corrosión frente a todos los ácidos con la excepción del ácido fosfórico concentrado caliente y del ácido fluorhídrico. Su resistencia a la abrasión es pobre y es algo sensible a las vibraciones mecánicas y a los choques térmicos. Su aplicación principal es en la industria alimenticia.

La fibra de vidrio se emplea íntegramente en el tubo de medida, es barata, ligera y posee una buena resistencia a la corrosión. No es buena en aplicaciones abrasivas y es susceptible de rotura si las bridas se instalan mal en la tubería.

Si la velocidad del fluido supera los 2-3 m/s es conveniente colocar un diafragma de protección en la entrada del elemento para prevenir su erosión. El diámetro interno del orificio del diafragma debe ser el mismo que el del revestimiento

y la velocidad del fluido no debe exceder los 5 m/s para prevenir un desgaste excesivo del revestimiento. Para disminuir la velocidad, puede instalarse un medidor mayor que el diámetro de la tubería, teniendo presente que la velocidad no debe bajar a menos de 1 m/s para el valor máximo de la escala.

El fluido puede llevar sustancias que por su naturaleza química pueden recubrir el tubo, los electrodos o ambos. El recubrimiento de los electrodos se presenta en particular en los procesos en que se añaden numerosos aditivos. En algunos casos dicho recubrimiento no da lugar a errores importantes siempre que las sustancias se depositen concéntricamente y no aislen eléctricamente el electrodo del fluido.

Si el tubo se va recubriendo concéntricamente hasta que el área interna sea la mitad, la velocidad se duplicará para mantener el mismo caudal, por otro lado el diámetro disminuirá en un factor de 0,707. Por consiguiente el instrumento indicará teóricamente una tensión distinta deducida de la fórmula:

$$E_s = KBDV$$

Es decir,

$$E'_s = KBD \times 0,707 \times 2 V = 1,414 KBDV$$

Sin embargo, la práctica ha demostrado que al tener el recubrimiento la misma conductividad que el líquido, la resistencia en shunt formada compensa el aumento de tensión y el instrumento señala aproximadamente el caudal correcto.

La mayor parte de las sustancias depositadas tienen la misma conductividad que el fluido ya que permanecen en forma de pasta húmeda. Sin embargo, cuando dichas sustancias son aislantes bastará una película delgada para que el instrumento marque cero.

Entre estas dos situaciones pueden obtenerse resultados cualesquiera. Algunos de estos problemas se solucionan utilizando varios tipos de dispositivos limpiadores y calefactores de tubos.

El dispositivo ultrasónico consiste en un generador ultrasónico que hace vibrar los electrodos con vibraciones de alta frecuencia y baja amplitud que contrarrestan la tendencia de los electrodos a recubrirse.

El dispositivo limpiador mecánico consiste en raspadores mecánicos accionados por un motor y que rozan continuamente con las superficies de los electrodos. Si los sólidos que pueden acumularse son de regular tamaño, los raspadores mecánicos pueden dañarse.

La calefacción exterior de los tubos puede efectuarse mediante cintas de resistencias alimentadas eléctricamente y controladas por medio de un termostato. La calefacción que se consigue en el tubo impide el depósito de grasa o de sólidos en las paredes del tubo tanto en marcha como en la parada de la instalación gracias a la temperatura controlada conseguida con el termostato.

En otro sistema de calefacción se utiliza un tubo de medida de aluminio que se calienta por las corrientes parásitas generadas por los bobinados de campo del tubo. Como no hay control de temperatura, en las paradas de la instalación es necesario cortar la corriente de alimentación. No es un método recomendable.

En otros sistemas, los electrodos disponen de un sello de presión y están contenidos en una unidad fácil de desmontar, lo que permite limpiar o sustituir los electrodos sin necesidad de desmontar el tubo de medida de la tubería.

El medidor puede montarse inclinado u horizontal siempre que se mantenga la tubería llena de líquido durante la medida. Si la instalación es inclinada es conveniente colocar una válvula aguas abajo para asegurar que la tubería esté llena para todos los caudales de líquido que puedan pasar a través. No obstante, si el sistema de bombeo se para, el nivel del líquido en el elemento deja de bañar los electrodos, abriéndose el circuito y dando una señal de salida errónea. Algunos fabricantes modifican ligeramente el circuito para que el índice del instrumento receptor señale cero cuando el circuito está abierto. Los instrumentos digitales detectan automáticamente el estado sin líquido de la tubería.

Generalmente no se requiere una longitud recta de tubería antes del medidor de caudal, sin embargo, la existencia de accesorios que pueden provocar la formación de filetes de caudal asimétricos, obliga a situar el elemento unos 5 \varnothing de tubería o más a partir de la conexión aguas arriba. Asimismo cuando el elemento está colocado en la impulsión de una bomba se recomienda una separación de unos 8 diámetros de tubería.

Cuando el medidor de caudal es de menor diámetro que las tuberías de conexión deben colocarse reducciones por los siguientes motivos:

- a) Para aumentar la velocidad del fluido y obtener así una velocidad mínima de 1 m/s;
- b) Para aumentar la velocidad de los sólidos en suspensión en servicio e impedir su sedimentación en la parte inferior del tubo.

Los fluidos que contienen partículas magnéticas en suspensión pueden medirse con un medidor magnético de caudal, siempre que las partículas estén en suspensión homogénea al pasar a través del elemento. Se consigue generalmente, instalando el medidor en una tubería vertical en la que las partículas magnéticas adoptarán una distribución uniforme en la sección transversal de la tubería.

Para limpiar periódicamente y eliminar los sólidos depositados es ventajoso desde el punto de vista de mantenimiento disponer de T en la tubería situadas en los extremos del medidor para permitir una fácil limpieza sin necesidad alguna de desmontar la tubería. La técnica digital aplicada a la transmisión permite, mediante una excitación de alta frecuencia y un filtrado digital de la señal, la eliminación práctica de las interferencias de sólidos en suspensión y de los procesos electroquímicos.

Los medidores de caudal no requieren, normalmente, ajustes antes de la puesta en marcha. Los ajustes y la calibración necesarios se han llevado a cabo ya en la fábrica. Una vez que el instrumento está instalado y completadas todas las conexiones eléctricas, el medidor de caudal está listo para servicio. Basta llenar completamente la tubería con líquido y conectar el instrumento a la corriente permitiendo un tiempo para que el sistema se caliente y se estabilice.

Los elementos magnéticos de caudal se calibran en fábrica utilizando un sistema dinámico de pesada y consiguiéndose así una precisión elevada de $\pm 0,1 \%$.

Con el sistema completo, incluyendo el receptor, se obtiene una precisión de $\pm 1 \%$ de toda la escala pudiéndose llegar a una mayor precisión, del orden de $\pm 0,5 \%$,

con una calibración especial y siempre que la conductividad sea elevada. El campo de medida entre el caudal máximo y el mínimo puede llegar a 100:1 con una escala de lectura lineal. La fidelidad del conjunto es de $\pm 0,25 \%$.

La sensibilidad es $\pm 0,1 \%$ y la linealidad $\pm 0,5 \%$.

La adición de un microprocesador mejora sustancialmente las funciones de inteligencia del medidor magnético de caudal. Su precisión pasa a $\pm 0,5 \%$, gracias al circuito de alta frecuencia y al filtrado digital de la señal que elimina las interferencias de los depósitos de sólidos en la tubería. La relación entre el campo de medida máximo al mínimo es de 100 : 1, se dispone de autodiagnóstico del aparato, de detección automática del estado sin líquido de la tubería, y de capacidad para medir, manual o automáticamente, el caudal en los dos sentidos de circulación del fluido. Pueden seleccionarse las unidades de ingeniería de lectura que se deseen y disponer de doble campo de medida seleccionable manual o automáticamente.

Los medidores magnéticos de caudal son adecuados para la medida de caudales de líquidos conductores, en particular los líquidos fangosos y fluidos corrosivos. Su pérdida de carga es baja y corresponde a la de una tubería del mismo diámetro y de la misma longitud. Pueden medir caudales en ambos sentidos de paso del fluido en la tubería.

4.1.6 Desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal en volumen contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. La precisión depende de los huelgos entre las partes móviles y las fijas y aumenta con la calidad de la mecanización y con el tamaño del instrumento.

Existen cuatro tipos básicos de medidores:

- disco oscilante;
- pistón oscilante;
- pistón alternativo;
- rotativos;
- diafragma.

4.1.6.1 Medidor de disco oscilante

El instrumento dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado de una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. La cara baja del disco está siempre en contacto con la parte inferior de la cámara en el lado opuesto. De este modo la cámara está dividida en compartimientos separados de volumen conocido.

Cuando pasa el fluido, el disco toma un movimiento parecido al de un trompo caído de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternativamente estableciendo contacto con las paredes de la cámara desde su parte infe-

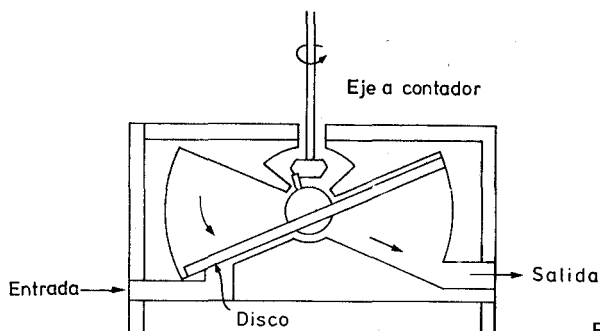


Fig. 4.38 Medidor de disco oscilante.

rior a la superior. Este movimiento de balanceo se transmite mediante el eje del disco a un tren de engranajes (fig. 4.38). El par disponible es pequeño, lo que pone un límite en la utilización de accesorios mecánicos. Empleado originalmente en aplicaciones domésticas para agua, se utiliza industrialmente en la medición de caudales de agua fría, agua caliente, aceite y líquidos alimenticios. La precisión es de $\pm 1-2\%$. El caudal máximo es de 600 l/min y se fabrica para pequeños tamaños de tubería.

4.1.6.2 Medidor de pistón oscilante

El instrumento (fig. 4.39) se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisora que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente en un movimiento circular entre las dos caras planas de la cámara, y que está provisto de una ranura que desliza en la placa divisora fija que hace de guía del movimiento oscilante. El eje del pistón al girar, transmite su movimiento a un tren de engranajes y a un

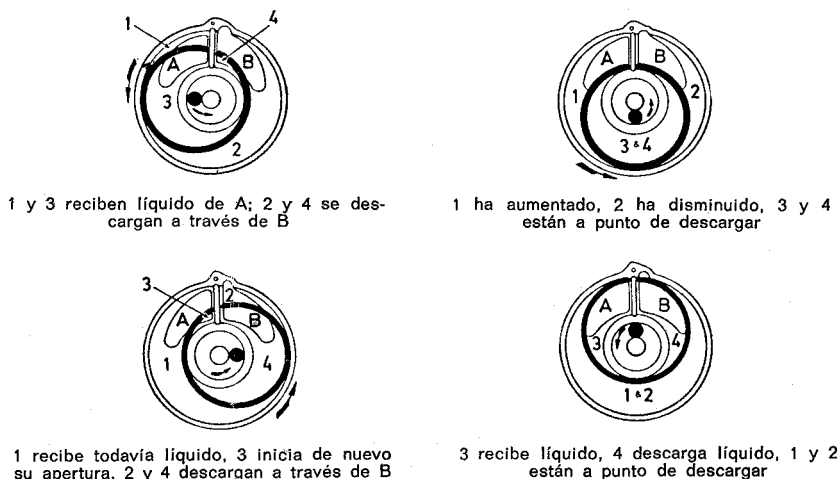


Fig. 4.39 Medidor de pistón oscilante.

contador. El par disponible es elevado de modo que el instrumento puede accionar los accesorios mecánicos que sean necesarios.

Los diagramas adjuntos (fig. 4.39) indican el movimiento del pistón desde que entra el líquido en la cámara hasta que ha sido medido y descargado.

La precisión normal es de $\pm 1\%$ pudiéndose llegar a $\pm 0,2\%$ con pistón metálico y $\pm 0,5\%$ con pistón sintético, dentro de un margen de caudal de 5 : 1. Se fabrican para tamaños de tubería hasta 2" con caudales máximos de 600 l/min. Se aplican en la medición de caudales de agua y de líquidos viscosos o corrosivos.

4.1.6.3 Medidor de pistón alternativo

El medidor de pistón convencional (fig. 4.40) es el más antiguo de los medidores de desplazamiento positivo. El instrumento se fabrica en muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, válvulas rotativas, válvulas deslizantes horizontales. Estos instrumentos se han empleado mucho en la industria petroquímica y pueden alcanzar una precisión del orden de $\pm 0,2\%$.

Su capacidad es pequeña comparada con los tamaños de otros medidores. Su costo inicial es alto, dan una pérdida de carga alta y son difíciles de reparar.

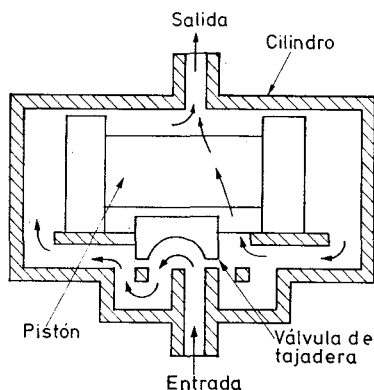


Fig. 4.40 Medidor de pistón convencional.

4.1.6.4 Medidor rotativo

Este tipo de instrumento tiene válvulas rotativas que giran excéntricamente rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido en forma incremental de la entrada a la salida. Se emplean mucho en la industria petroquímica para la medida de crudos y de gasolina con intervalos de medida que van de unos pocos l/min de líquidos limpios de baja viscosidad hasta 64 000 l/min de crudos viscosos.

Hay varios tipos de medidores rotativos, siendo los más empleados, los cicloidales, los de dos rotores (birrotor) y los ovales.

Los cicloidales (fig. 4.41) contienen dos lóbulos del tipo Root engranados entre sí que giran en direcciones opuestas manteniendo una posición relativa fija y desplazando un volumen fijo de fluido líquido o gas en cada revolución.

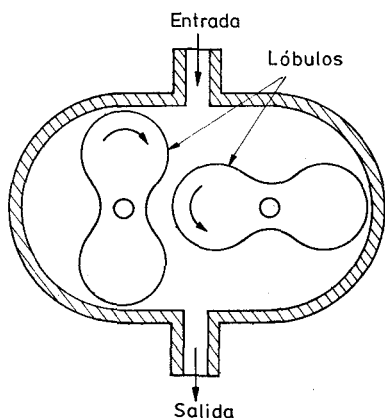


Fig. 4.41 Medidor cicloidal.

Se fabrican en tamaños que van de 2 a 24" y con caudales de líquidos de 30 a 66 500 l/min y en gas hasta 3 Nm³/h. Su precisión es de $\pm 1\%$ para caudales de 10 al 100 % del intervalo de medida, bajando mucho la precisión en caudales bajos debido a los huelgos que existen entre los lóbulos.

El sistema *birrotor* (fig. 4.42) consiste en dos rotores sin contacto mecánico entre sí que giran como únicos elementos móviles en la cámara de medida. La relación de giro mutuo se mantiene gracias a un conjunto de engranajes helicoidales totalmente cerrado y sin contacto con el líquido. Los rotores están equilibrados estática y dinámicamente y se apoyan en rodamientos de bolas de acero inoxidable. Al no existir contacto mecánico entre los rotores, la vida útil es larga y el mantenimiento es fácil. El instrumento puede trabajar con bajas presiones diferenciales del orden de 1" c. de a.

Son reversibles, admiten sobrevelocidades esporádicas sin recibir daño alguno, no requieren filtros, admiten el paso de partículas extrañas y permiten desmontar fácilmente la unidad de medida sin necesidad de desmontar el conjunto completo.

Su ajuste es sencillo y son de fácil calibración mientras el instrumento está bajo presión y sin pérdida de líquido.

Se aplican en la medición de caudales de crudos y productos petrolíferos.

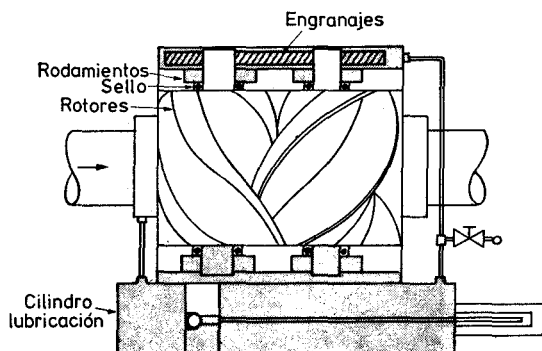


Fig. 4.42 Medidor birrotor.

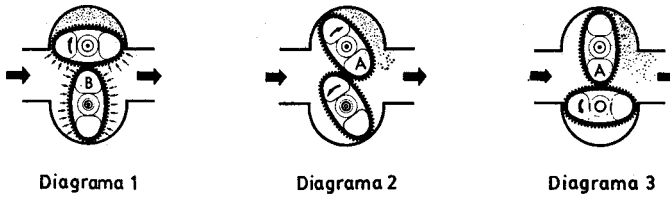


Fig. 4.43 Medidor oval.

Su tamaño varía de 3 a 12". La precisión es de $\pm 0,2 \%$, con una pérdida de carga de 5 psi y con un margen de caudal de 5 a 1.

Los medidores ovales (fig. 4.43) disponen de dos ruedas ovales que engranan entre sí y tienen un movimiento de giro debido a la presión diferencial creada por el líquido. La acción del líquido va actuando alternativamente sobre cada una de las ruedas dando lugar a un giro suave de un par casi constante. La cámara de medida y las ruedas están mecanizadas con gran precisión para conseguir un deslizamiento mínimo entre las mismas, sin formación de bolsas o espacios muertos en la cámara de medida y barriendo completamente la misma en cada rotación.

De este modo, la medida es prácticamente independiente de variaciones en la densidad y en la viscosidad del líquido.

La precisión es de $\pm 0,5 \%$ del caudal total. Los tamaños varían de $\frac{1}{2}$ a 3".

4.1.6.5 Medidor de paredes deformables

El contador de paredes deformables o de membrana o de fuelle, está formado por una envoltura a presión con orificios de entrada y salida que contiene el grupo medidor formado por cuatro cámaras de medición. En la figura 4.44 puede verse este tipo de medidor.

Su funcionamiento es el siguiente:

En la posición 1, el gas que entra a través del orificio E, pasa por A empujando la membrana hacia la derecha y extrayendo el gas que pasa por B hacia S. A continuación, la membrana derecha se desplaza hacia la izquierda, entrando gas por D y saliendo por C (posición 2).

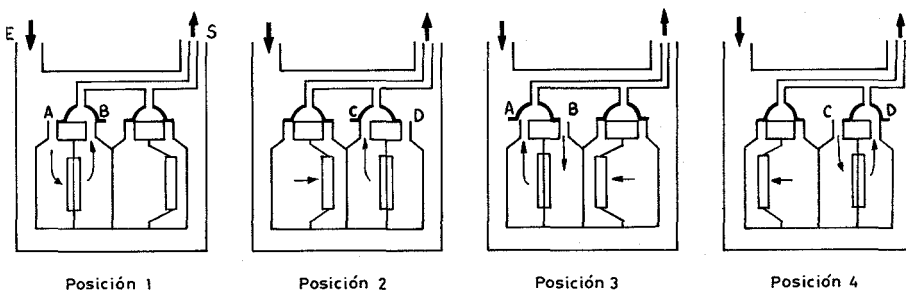


Fig. 4.44 Medidor de paredes deformables

En la posición 3, el gas entra por el compartimento de la izquierda por B desplazando la membrana a la izquierda y sale por A.

En la posición 4, el gas entra en el compartimento de la derecha por C y sale por D.

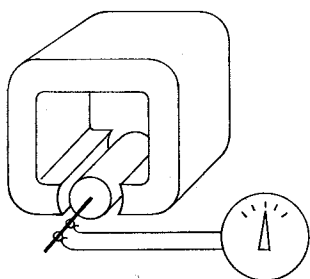
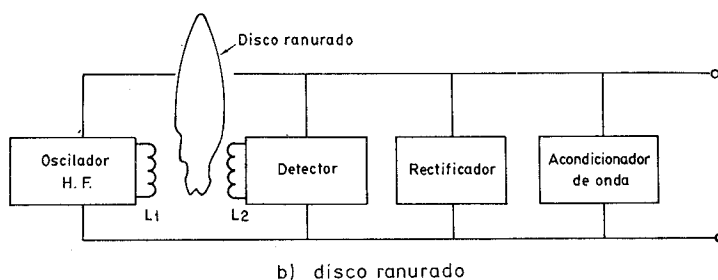
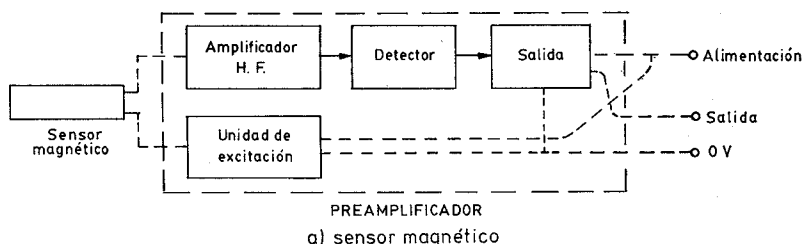
Su precisión es del orden del $\pm 0,3 \%$.

4.1.6.6 Accesorios

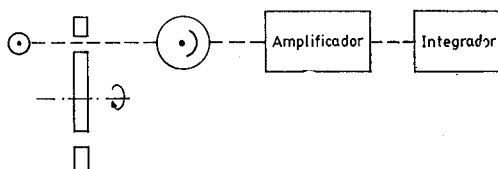
Los medidores de desplazamiento positivo que se han descrito pueden tener acoplados varios tipos de transductores:

Transductor de impulsos por microrruptor eléctrico o neumático en que el eje del medidor acciona un interruptor por medio de una leva. El interruptor está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

Transductor de impulsos por sensor magnético (fig. 4.45 a) que utiliza un rotor con unos pequeños imanes embebidos en él y un captador magnético situado



c) generador tacómetro



d) fotoeléctrico

Fig. 4.45 Transductores para medidores de desplazamiento positivo.

en el exterior de la caja del rotor. Al girar el rotor los pequeños imanes que contiene cortan el flujo del captador generando un tren de ondas senoidales de impulsos que es amplificado y acondicionado obteniéndose así impulsos de ondas cuadradas aptos para circuitos convertidores o integradores.

Transductor de impulsos por disco ranurado (fig. 4.45 *b*) cuyo principio de funcionamiento es el siguiente: el bobinado primario L_1 genera continuamente una onda de alta frecuencia de 1 MHz. Al girar el disco ranurado por la acción del medidor de caudal interrumpe el flujo magnético de la bobina L_1 y como resultado se forma otra onda en el arrollamiento secundario L_2 . Esta onda es rectificada en el detector y enviada al acondicionador donde se obtiene una onda de salida cuadrada proporcional al régimen de caudal.

Generador tacométrico (fig. 4.45 *c*) que genera una señal en c.c. de 0-100 mV proporcional al caudal. En su forma más sencilla consiste en un generador de c.c. con estator de imán permanente y rotor bobinado. La precisión es bastante elevada, del orden de 0,01 % para velocidades medias.

Transductor de impulsos fotoeléctrico (fig. 4.45 *d*) que genera una onda cuadrada que varía de 0 a 10 V. Consiste en una lámpara de filamento, un disco con sectores alternativamente opacos y translúcidos y una fotocélula. La variación en la intensidad de la luz que se produce en la fotocélula cambia la resistencia en la tensión de salida produciendo impulsos a cada paso de zonas de opaca a translúcidas del disco. Estos impulsos son amplificados e integrados.

Combinados con estos transductores se encuentran otros tipos de accesorios:

- Convertidor de frecuencia-tensión;
- Convertidor de frecuencia-corriente;
- Totalizador electromecánico con reset manual;
- Totalizador electromecánico con predeterminador para procesos discontinuos;
- Totalizador neumático con programador para procesos discontinuos;
- Módulo de comunicaciones.

4.1.7 Torbellino y Vórtex

El medidor de caudal por torbellino (fig. 4.46) se basa en la determinación de la frecuencia del torbellino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería a cuyo través pasa el fluido (líquido o gas). La frecuencia del torbellino es proporcional a la velocidad del fluido de acuerdo con la expresión conocida como número de Strouhal:

$$St = \frac{f \times d}{v}$$

donde

- St = número de Strouhal
- f = frecuencia del torbellino
- d = anchura del torbellino
- v = velocidad del fluido

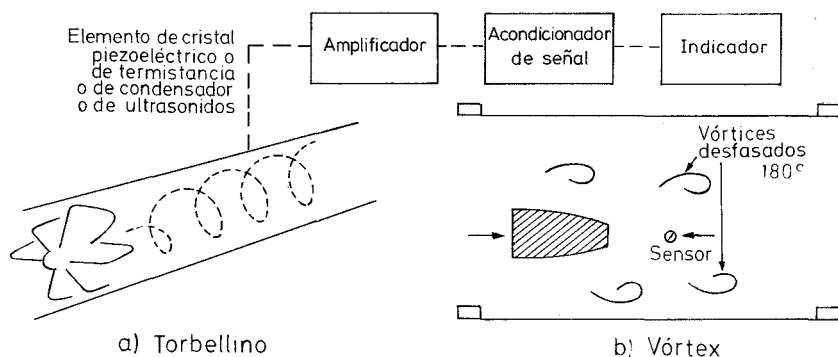


Fig. 4.46 Medidor de caudal por torbellino y vórtex.

El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 10 000 y 1 000 000 y d es mantenido constante por el fabricante del medidor, con lo cual, y siendo:

$$Q = s \cdot v$$

con Q = caudal volumétrico del fluido
 s = sección de la tubería

resulta:

$$Q = \frac{f \times d \times s}{St} = f \times K$$

siendo $K = (d \cdot s) / St$ una constante.

Por lo tanto, el caudal volumétrico del fluido es proporcional a la frecuencia del torbellino.

La detección de la frecuencia se logra con sensores de presión de cristales piezoeléctricos que detectan los picos de presión en el lado contrario del torbellino, o con una termistancia de muy baja inercia térmica que sigue los efectos de refrigeración del torbellino generado en el gas, o bien mediante un condensador de capacidad variable, función de la deformación de un diafragma (placa) ante las ondas de presión del torbellino o bien mediante la aplicación de un haz de ultrasonidos perpendicularmente al torbellino, midiendo el tiempo de tránsito del haz desde el transmisor al receptor.

Los transductores de torbellino son adecuados en la medida de caudales de gases y de líquidos y su intervalo de medida entre el valor máximo y el mínimo es de 50 a 1. Deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 10 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo. El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de torbellinos.

La precisión del instrumento es de $\pm 0,2$ % del caudal instantáneo, por lo cual el error en tanto por ciento de la escala se hace mayor cuanto más bajo es el caudal.

Los instrumentos de vórtex son parecidos al de torbellino, excepto que están basados en el efecto Von Karman donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad) desfasados en 180° , cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y, por lo tanto, al caudal. La precisión es del $\pm 1\%$.

4.1.8 Oscilante

Consiste en un pequeño orificio (fig. 4.47) situado en el cuerpo del medidor, que genera una presión diferencial y provoca el paso del fluido por el área de medida. Ésta contiene una válvula oscilante que perturba la circulación del fluido. A medida que este flujo turbulento pasa a través de la abertura se crea una zona de baja presión detrás de la válvula, con lo que ésta oscila a una frecuencia directamente proporcional al caudal. Un transductor de impulsos capta las oscilaciones de la válvula e indica el caudal.

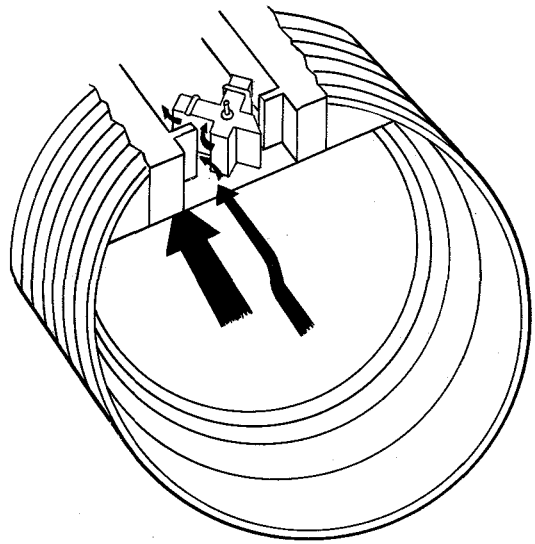


Fig. 4.47 Medidor oscilante

El medidor oscilante es adecuado en la medida de caudales de fluidos con partículas en suspensión, y en las mezclas de líquidos y gases provocadas por vaporizaciones imprevistas del líquido al bajar la presión.

Su precisión es del orden del $\pm 0,5\%$.

4.2 Medidores de caudal masa

La determinación del caudal masa puede efectuarse a partir de una medida volumétrica compensándola para las variaciones de densidad del fluido, o bien de-

terminar directamente el caudal masa aprovechando características medibles de la masa del fluido.

En el primer caso se compensa directamente la densidad o bien las variables de presión o temperatura.

4.2.1 Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos

En los líquidos, como son incompresibles, la densidad varía por los cambios en la temperatura del fluido. Si se instala un transmisor de densidad que mide ésta en condiciones de servicio, bastará aplicar su salida directamente a la salida del transmisor de caudal para tener así el caudal corregido.

Recordemos que la fórmula simplificada del caudal de un fluido incompresible es (ver el principio de este capítulo):

$$Q_p = \sqrt{K (p_a - p_c) \rho_0} \text{ kg/h}$$

siendo

K = constante;

$p_a - p_c$ = presión diferencial creada por el elemento;

ρ_0 = densidad del líquido en condiciones de servicio;

o bien,

$$Q_p^2 = K (p_a - p_c) \cdot \rho_0$$

Así, pues, la señal de presión diferencial $p_a - p_c$ captada por el transmisor correspondiente debe multiplicarse por la señal del transmisor de densidad. En el caso de señales neumáticas pueden emplearse instrumentos compensadores analógicos tal como el representado en la figura 4.48 en la que puede verse además el diagrama de bloques del sistema con la señal de salida del caudal corregido. Este diagrama de bloques correspondería también a los instrumentos electrónicos que pudieran emplearse en la compensación.

El campo de medida del transmisor de densidad se fija de tal modo que el factor de corrección sea 1 cuando la densidad transmitida corresponde a la de cálculo.

Si el transmisor de densidad mide ésta en condiciones estándar (por ejemplo, a 15° C) la señal de salida correspondiente debe corregirse manual o automáticamente para las variaciones de temperatura de la línea antes de introducirla en el compensador.

En los gases la fórmula simplificada toma la misma forma que la fórmula anterior para líquidos, ya que el factor de expansión ϵ puede incluirse en la constante K , luego:

$$Q_p^2 = K (p_a - p_c) \rho_0 \text{ kg/h}$$

con ρ_0 = peso específico del gas en las condiciones de servicio.

Varios métodos pueden emplearse para compensar las variaciones de densidad según sean las condiciones de servicio y la precisión que se desee en la medida:

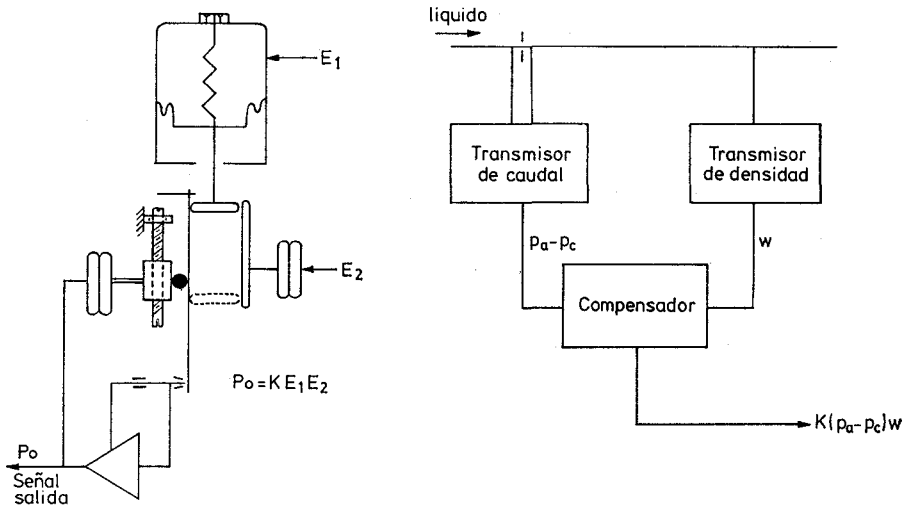


Fig. 4.48 Compensación de variaciones de densidad del líquido.

1. Registrar la temperatura o presión, o ambas, y calcular las correcciones.
2. Compensar automáticamente el caudal sólo para la variable que cambia (por ejemplo, sólo la temperatura).
3. Compensar automáticamente el caudal para los cambios en la densidad sólo si se esperan variaciones considerables en todas las condiciones de servicio.

En este caso puede trabajarse de dos formas:

- a) Medir la densidad en condiciones de servicio y compensar así de modo directo y automáticamente el caudal.
- b) Medir la densidad en condiciones de referencia (por ejemplo, a 15° C en un líquido y a 0° C y 1,013 bar en un gas) y corregirla manual o automáticamente para las variaciones de temperatura (líquido) o temperatura y presión (gas, considerando la compresibilidad constante) teniendo en cuenta que si las presiones son altas, superiores a 10 bar, la mayor parte de los gases reales se apartan de la ley de los gases perfectos y es necesario aplicar el factor de corrección de compresibilidad.

Teniendo en cuenta que la expresión de la densidad del gas en condiciones de servicio en función del correspondiente a 0° C y 1 atmósfera absoluta de presión es:

$$\rho_r = \frac{P}{1} \cdot \frac{273}{T} \rho_s$$

siendo

- P = presión absoluta de servicio;
 T = temperatura absoluta de servicio;
 ρ_s = densidad del gas a 0° C y 1 atmósfera,

resulta como expresión del caudal

$$Q_p^2 = K (p_a - p_c) \cdot \frac{P}{1} \cdot \frac{273}{T} \rho_s = K' (p_a - p_c) \cdot \frac{P}{T}$$

habiendo considerado ρ_s constante y conocido englobado en K' . Hay que señalar que, de acuerdo con esta fórmula, se considerarán básicamente elementos primarios que dan señales cuadráticas del caudal (placa orificio, tobera, tubo Venturi) si bien la explicación es válida para los demás (señal lineal con el caudal-medidor magnético, turbina, rotámetro). Las señales cuadráticas pueden hacerse lineales con el caudal utilizando un instrumento extractor de raíz cuadrada.

Los instrumentos neumáticos que compensan la temperatura o la presión o ambas pueden verse en la figura 4.49 junto con el diagrama de bloques correspondiente.

Hay que hacer notar que en la compensación de presión, la medida debe ser en presión absoluta. A presiones superiores a 5 bar pueden utilizarse medidores de presión relativa ajustados para dar señales representativas de la presión absoluta.

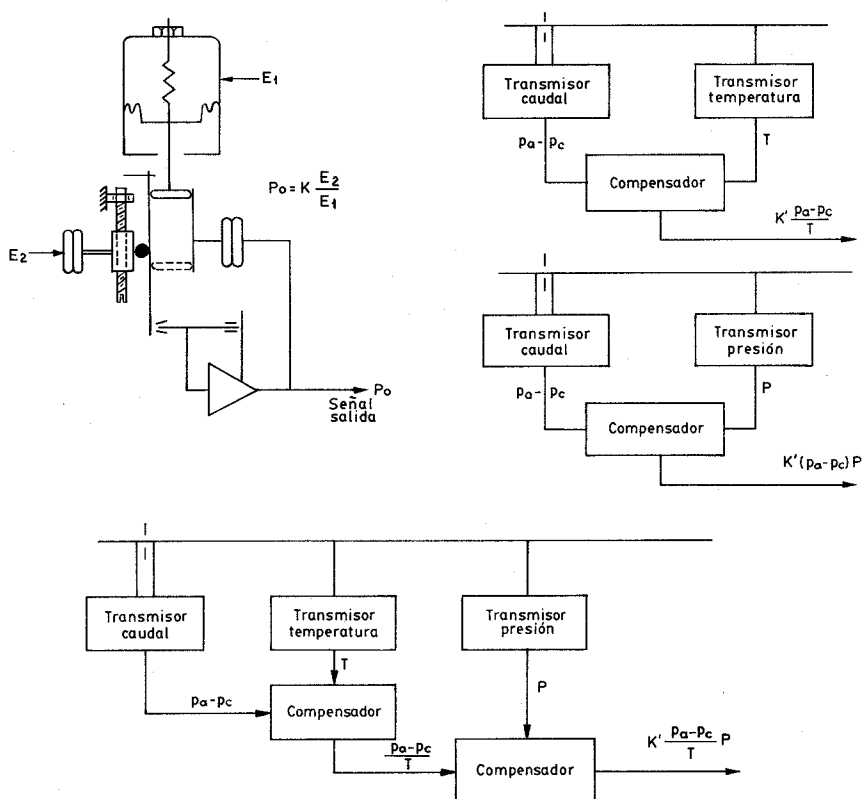


Fig. 4.49 Compensadores neumáticos de temperatura y/o presión.

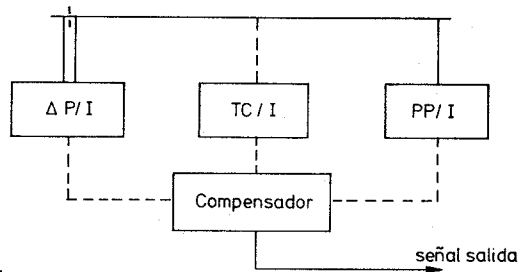


Fig. 4.50 Unidad compensadora.

En el caso de instrumentos electrónicos pueden utilizarse varios sistemas:

- Una unidad compensadora (multiplicador-divisor) que trabaja con un transmisor de presión diferencial, un transmisor de presión absoluta PP/I de 4-20 miliamperios c.c. y un transmisor de temperatura TC/I de 4-20 mA c.c. En la figura 4.50 pueden verse las conexiones del sistema.
- Una unidad calculadora que compensa el caudal de gas para las variaciones de temperatura y presión con correcciones manuales de peso específico y compresibilidad (fig. 4.51 a). Como características de la unidad figuran su alta precisión de $\pm 0,2\%$ de la escala para el intervalo 4-100 % del caudal y señal de salida 0-10 V c.c., su estabilidad (el instrumento alcanza la precisión señalada después de 15 minutos de conectado y se mantiene durante 60 días sin recalibración) y su facilidad de calibración (señales simuladas de entrada de presión diferencial, de presión estática y de temperatura).

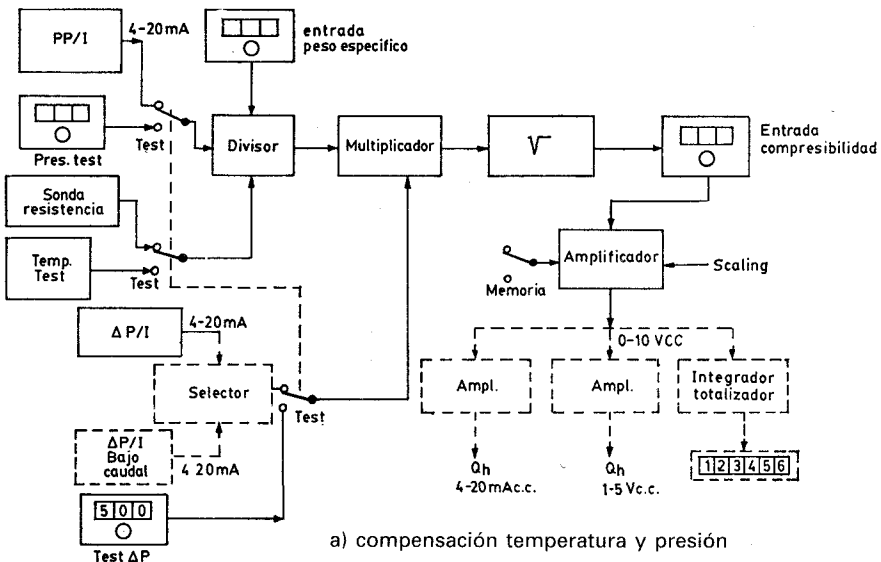


Fig. 4.51 Unidad calculadora de caudal masa.

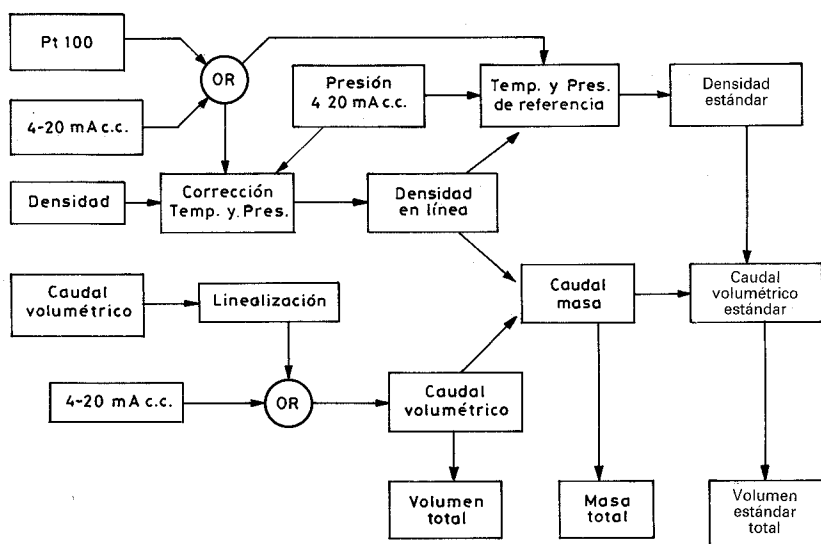
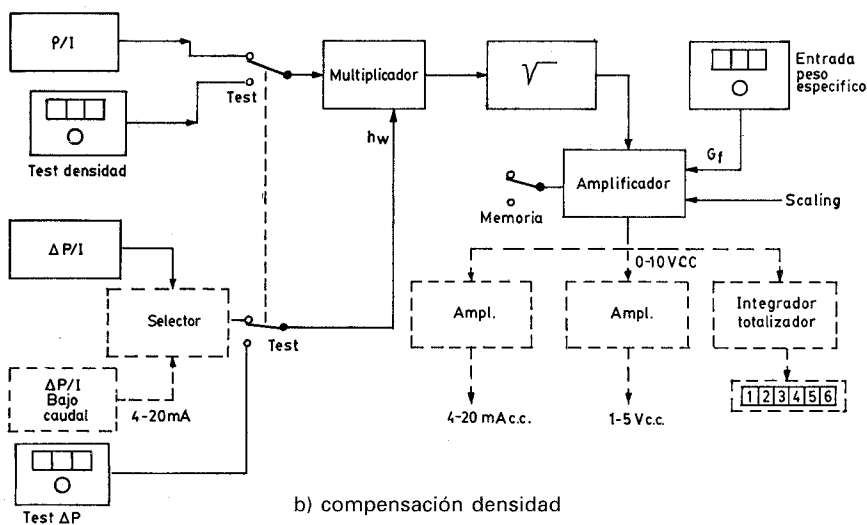


Fig. 4.51 (Continuación)

- c) Una unidad calculadora que compensa el caudal de gas para las variaciones de densidad del gas con correcciones manuales del peso específico (fig. 4.51 b). Sus características son semejantes a la unidad anterior exceptuando una mayor precisión de $\pm 0,15\%$ de la escala.

En cada uno de los sistemas descritos, la precisión final de la medida depen-

TABLA 4.13 Sistema de medida de caudal compensado

Instrumento	Precisión	Neumático Pres. + temp.	Electrónico (digital)		
			Caso a	Caso b	Caso c
DP/I o DP/P	0,5	0,5	0,5 (0,25)	0,5 (0,25)	0,5 (0,25)
PP/I o PP/P	0,5	0,5	0,35 (0,2)	0,35 (0,2)	
T/P	0,5	0,5			
Densidad	0,25				0,25 (0,2)
Compensador		{ 0,5 0,5	0,5 (0,2)	0,2 (0,1)	0,15 (0,1)
MV/I	0,2		0,2		
Extractor $\sqrt{\quad}$	0,5	0,5	0,5		
Total		3 %	2,05 % (0,65)	1,05 % (0,55)	0,9 % (0,55)
Valor medio cuadrático		1,5 %	0,95 % (0,38)	0,65 % (0,33)	0,6 % (0,33)

Nota: En el sistema digital las funciones MV/I y de extracción de raíz cuadrada son realizadas en el compensador.

de de la influencia de los varios componentes empleados. Debe señalarse que con la placa-orificio colocada en tubería especial prefabricada puede obtenerse una precisión en el caudal de 0,5 %.

En los compensadores digitales con microprocesador (fig. 4.51 c), el cálculo de los factores de los módulos es realizado automáticamente. Basta entrar los campos de medida de los transmisores de caudal, presión y temperatura; si estos instrumentos son inteligentes, puede cambiarse, si se desea, su campo de medida y, además, se consigue una precisión final de lectura más elevada, al disponer asimismo de linealización, compensación de viscosidad y de otras funciones entre las que se encuentran: pulsadores de prueba del circuito, simulación caudal volumétrico, presión y temperatura, alarmas con indicación de los códigos de los errores, calibración del circuito y su programación.

Algunos compensadores digitales con microprocesador reúnen tres transmisores en un solo aparato, midiendo la presión, la presión diferencial y la temperatura. Se reduce así el coste de la medición (menos cableado, menos mano de obra y menor mantenimiento) y se aumenta la precisión.

En la tabla 4.13 se señalan las precisiones alcanzables con los conjuntos anteriores, debiendo señalar que no están incluidos los elementos primarios, ni los instrumentos finales (receptores, integradores, controladores, etc.).

4.2.2 Medición directa del caudal-masa

Si bien en la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de caudal, con el caudal determinado en las condiciones de servicio, o bien compensado se-

gún la presión, la temperatura o la densidad tal como se ha estudiado anteriormente, en ocasiones interesa aprovechar características medibles de la masa. En este caso existen tres sistemas básicos, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis. En menor escala se utilizan los de presión diferencial.

4.2.2.1 Medidores térmicos de caudal

Los medidores térmicos de caudal se basan comúnmente en dos principios físicos:

- a) la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente y
- b) la pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido.

De los dos principios, el más utilizado industrialmente es el primero debiendo señalar que el primer instrumento de esta clase fue proyectado por Thomas en 1911 para medir el caudal masa de gas en una tobera. Por este motivo estos aparatos reciben también el nombre de medidores de caudal Thomas.

El medidor Thomas consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el cual circula el caudal. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura (fig. 4.52).

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas. Cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia el segundo elemento T2, y se presenta una diferencia de temperaturas que va aumentando progresivamente entre las dos sondas a medida que aumenta el caudal. Esta diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo, de acuerdo con la ecuación

$$Q = m c_e (t_2 - t_1)$$

en la que:

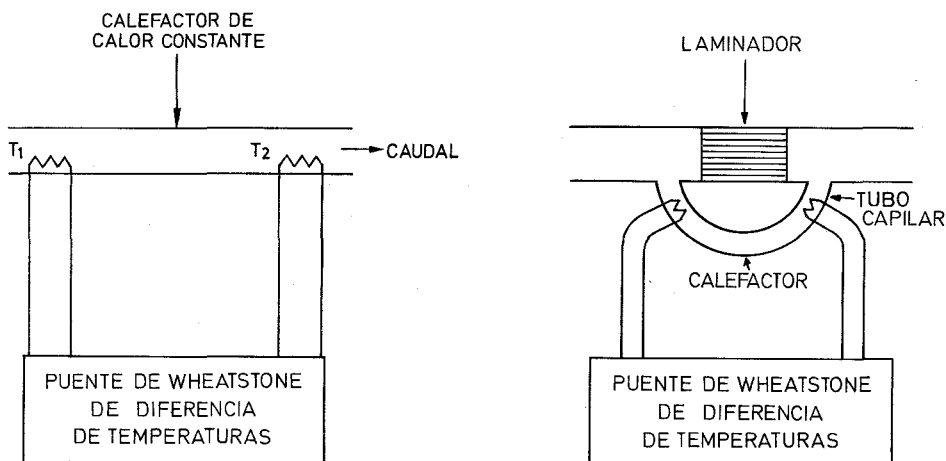


Fig. 4.52 Medidor térmico.

Q = calor transferido
 m = masa del fluido
 c_e = calor específico
 t_1 = temperatura anterior
 t_2 = temperatura posterior

El sistema está conectado a un puente de Wheatstone que determina la diferencia de temperaturas y la amplifica con una señal de salida de 0-5 V c.c. en 1000 ohmios de impedancia. Esta señal puede ser utilizada en registradores, indicadores digitales y controladores que pueden estar situados hasta 300 m del instrumento.

La precisión del elemento primario es de $\pm 1\%$ de toda la escala, la repetibilidad de $\pm 0,2\%$ de la escala y la constante de tiempo de 0,5 a 3 s. Es recomendable la calibración del instrumento en condiciones lo más cercanas posible a su utilización final.

La medida es apta para bajos caudales de gas que van según los modelos de 0-10 cm³/minuto.

Para aumentar el caudal medible se deriva con un capilar el fluido y se intercala un laminador que garantiza el mismo flujo laminar que en el capilar. Como se conoce la relación de secciones entre el laminador y el capilar, midiendo el caudal en el sensor se obtiene la medida del caudal total. De este modo, los caudales medibles llegan a 15 l/min en gases y a 20 kg/h en líquidos.

No hay obstrucciones al paso de caudal por ser el tubo de medida recto y paredes internas lisas. El instrumento es adecuado para gases tales como aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, helio, amoníaco, argón, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, ácido clorhídrico, etano, etileno, metano, fosfórico y otros. También puede emplearse en líquidos pero con caudales muy bajos.

4.2.2.2 Medidores de momento angular

Los medidores de caudal masa de momento angular se basan en el principio de conservación del momento angular de los fluidos.

Partiendo de la segunda ley de Newton $Z = I\alpha$, en la que

Z = par
 I = momento de inercia
 α = aceleración angular

y de las fórmulas $I = mr^2$, $H = Iw$ se llega a

$$\frac{m}{t} = \frac{Z}{r^2 w}$$

en las que: H = momento angular
 m = masa
 t = tiempo
 r = radio de giro
 w = velocidad angular

Luego, si al fluido se le comunica un momento angular, y se mantiene constante la velocidad angular, la medición del par producido permitirá determinar el caudal masa ya que r^2 es constante en el sistema.

El medidor axial de una turbina (fig. 4.53 a) consiste en un rotor radial con canales de paso del fluido, que gira a una velocidad constante por acoplamiento magnético con un motor síncrono, comunicando al fluido un momento angular. Una turbina adyacente al rotor impulsor elimina el momento angular del fluido y recibe un par proporcional al mismo. La turbina está frenada por un resorte y su posición angular es proporcional al par dando la medida del caudal masa.

Este sistema de medida es sencillo comparado con otros métodos para obtener el caudal masa verdadero, pero es inexacto para caudales bajos, sólo puede medir caudales en un solo sentido y es incapaz de medir variaciones rápidas en el caudal.

El medidor axial de doble turbina (fig. 4.53 b) basado en el mismo principio de momento angular, contiene dos turbinas montadas en el mismo eje y enlazadas con un dispositivo de torsión calibrado. Las palas de las turbinas son de ángulos distintos y tienden a girar a velocidades angulares distintas. Pero al estar unidas a través del dispositivo de torsión, se presenta un desfase entre las mismas que es una función del par del sistema. Cada turbina tiene un captador que da un impulso por cada vuelta. El impulso de la turbina anterior abre un circuito puerta y el de la posterior lo cierra. Durante el tiempo de apertura se excita un oscilador y el número de oscilaciones indica el desfase angular entre las dos turbinas. El ángulo da el valor del par, el cual a su vez es proporcional a la medida del caudal masa.

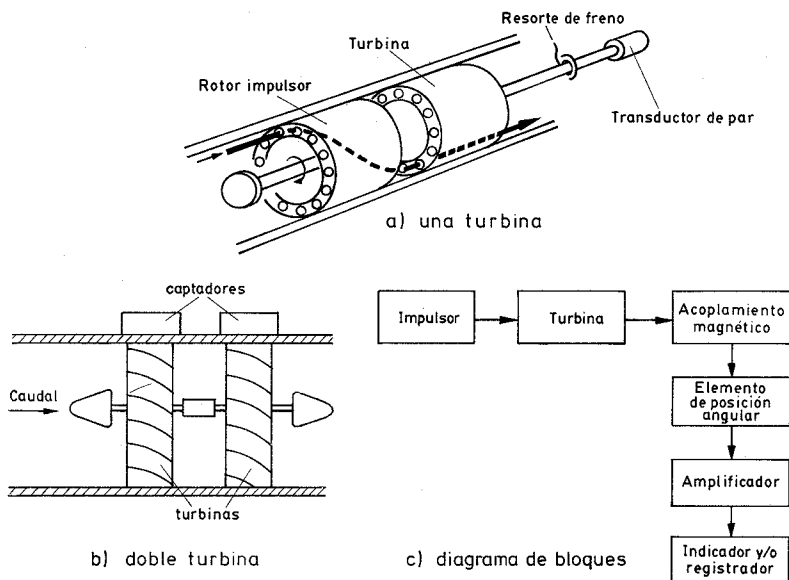


Fig. 4.53 Medidor axial.

Los medidores de momento angular pueden utilizarse en la medida de caudales de líquidos y tienen una precisión de $\pm 1\%$ del valor leído con un intervalo de medida de caudales entre el valor máximo y el mínimo de 5 a 1.

4.2.2.3 Medidor de Coriolis

El *medidor de Coriolis* se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795-1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie giratoria que gira con velocidad angular constante ω , experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular \times radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración y, por lo tanto, una fuerza sobre la masa del objeto. Como el radio de giro va aumentando gradualmente, la velocidad tangencial también varía, con lo que se concluye que una variación de velocidad comporta una aceleración, la que a su vez es debida a una fuerza que actúa sobre la bola. Estas son, respectivamente, la aceleración y la fuerza de Coriolis. Por ejemplo, situando una bola de acero en un disco giratorio lleno de grasa en su parte superior, y haciéndolo girar, la bola describe una línea curva hasta salir del disco. Durante su recorrido, tiene una velocidad tangencial igual a la velocidad angular del disco multiplicada por la distancia al centro de giro. Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio Norte y a izquierdas en el hemisferio Sur. Asimismo todos los vientos de la circulación general que soplan desde el Norte al Sur en el hemisferio Norte son desviados, debido a la rotación de la Tierra de Oeste a Este, gracias a la fuerza de Coriolis sobre las masas de aire de los cinturones de presión, constituyendo en el cinturón 30°N - 60°N , los vientos predominantes del Oeste y en el cinturón 0°N - 30°N , los vientos alisios. Por otro lado, el célebre péndulo de Foucault demuestra también el fenómeno.

La generación de la fuerza de Coriolis puede producirse básicamente de dos formas:

a) Por inversión de las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de omega (Ω) en estado de vibración controlada (a la frecuencia de resonancia para reducir la energía requerida). En la figura 4.54 *a* puede verse el medidor. La vibración del tubo, perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una fuerza de deceleración en la de salida, con lo que se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con el ángulo de torsión del tubo, que es directamente proporcional a la masa instantánea de fluido circulante. La fuerza de Coriolis es el producto de los vectores ω y V , y su valor es:

$$\vec{F} = 2 m \vec{\omega} \times \vec{V}$$

siendo:

F = Fuerza de Coriolis

m = masa del fluido contenida en el tubo recto de longitud L

w = velocidad angular alrededor del eje del tubo en Ω

V = velocidad lineal del fluido

El par creado respecto al eje R-R del tubo es:

$$M = 2 F r = 4 m V w r = 4 w r Q$$

Si K_s es la constante de elasticidad del tubo y θ el ángulo de torsión del tubo, la fuerza de torsión del tubo que equivale al par creado respecto al eje R-R del tubo es:

$$T = K_s \theta$$

Luego como $M = T$ resulta finalmente el caudal másico:

$$Q = \frac{K_s \cdot \theta}{4 w r}$$

Los sensores magnéticos de posición están situados en el centro del tubo y combinan dos intervalos de tiempo, uno del movimiento hacia abajo del tubo y el otro del movimiento hacia arriba. De este modo, la diferencia de las ondas se traduce en impulsos que alimentan un integrador lineal. Cuando hay caudal, el integrador carga un condensador y la carga es conectada a una señal analógica proporcional al ángulo de torsión del tubo.

La diferencia en tiempo (Δt) de las señales de los sensores de posición está relacionada con θ y con la velocidad (V_i) del tubo en su punto medio, según

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_i}{2 r} \Delta t$$

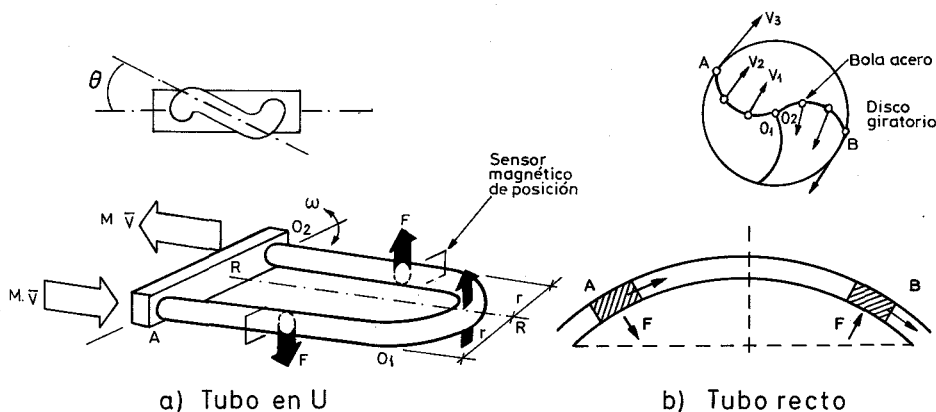


Fig. 4.54 Medidor de Coriolis

Tabla 4.14 Tabla de características de los medidores de caudal

	Caudal máx./ mín.	Precisión en % de toda la escala	Escala	Presión máx. bar	Temp. máx. ° C	Pérdida de carga máx. $m = m$ $c. de a$ $b = bar$	Servicio	Materiales de construcción	Coste relativo	Ventajas	Desventajas
Placa	3 : 1	1-2 %	√	400	500	20 m	Líqu./vapor gas	Metales y plásticos	Bajo	Simple, económica	ΔP, fluidos limpios
Tobera	»	0,9-1,5 %	»	»	»	16 m	»	»	Medio	Simple, precisión	ΔP, cara, »
Tubo Venturi	»	0,75 %	»	»	»	4 m	»	»	Muy alto	Precisión, poca ΔP	Muy caro, »
Tubo Pitot	»	1,5-4 %	»	»	»	—	»	»	Bajo	Simple, económico	Poca precisión, »
Tubo Annubar	»	1 %	»	»	»	—	»	»	»	»	»
Rotámetro	10 : 1	1-2 %	lineal	»	250	5 m	»	y vidrio/ cerám.	»	», » más preciso	Golpe ariete causa daños
Vertedero	3 : 1	»	especial	Atmosf.	60	—	Líquidos	Metales	Alto	», coste medio	Caro
Turbina	15 : 1	0,3 %	lineal	200	250	0,7 b	Líqu./gas	»	»	Precisión, margen amplio	Caro, calibr., fluidos limpios
Sónico	20 : 1	2 %	»	100	250	nula	Líquidos	Metal. plast.	»	Cualquier líquido, baja ΔP	Caro, calibración sensible a densidad
Placa de impacto	10 : 1	1 %	√	100	400	0,5 b	»	Metales	Medio	Fluidos viscosos	Poca capacidad
Magnético	100 : 1	0,5-1 %	lineal	20-200	150	nula	»	Teflón, fibra vidrio (tubo)	Alto	Baja ΔP	Caro, líquidos conductores
Disco oscilante	5 : 1	1-2 %	»	10-150	120	0,3 m	»	Metales	Bajo	Barato	Par pequeño
Pistón oscilante	»	0,2-0,5 %	»	25	150	10 b	»	»	Medio	Líqu. viscosos, corrosivos	ΔP
Pistón alternativo	»	0,2 %	»	25	100	0,2 m	»	»	Alto	Precisión	Caro, voluminoso, ΔP
Cicloidal	10 : 1	1 %	»	100	150	0,3 b	Líqu./gas	»	Medio	Poca ΔP	Poca precisión en caudales bajos
Birrotor	5 : 1	0,2 %	»	100	60-200	0,4 b	Líquido	»	»	Precisión, reversible	Margen pequeño
Oval	10 : 1	0,5 %	»	100	180	1 b	»	»	»	Indep. dens. y visc.	ΔP
Paredes deformables	10 : 1	± 0,3 %	Lineal	—	—	—	Gas	Metal, plásticos	Medio	Precisión	Voluminoso, ΔP
Torbellino	100 : 1	0,2 % caudal instantáneo	»	50	100	0,4 b	Líqu./gas	»	»	Margen, ΔP	Caro
Vórtex	10 : 1	1 %	»	50	400	»	Líqu./gas	»	»	Vibraciones	Insensible a bajo caudal
Oscilante	»	0,5 %	»	»	»	»	Líqu./gas	»	»	Propano, butano	Caro, gases, bajos caudales
Térmico	10 : 1	1 %	»	100	65	5 m	Líqu./gas	»	Alto	ΔP	Caro, margen, poco preciso, caudales bajos
Axial	5 : 1	1 %	»	100	120	0,2 b	Líqu./gas	»	»	ΔP	Caudales medios
Coriolis	10 : 1	± 0,5 %	»	400	200	0,1 a 3 b	Líqu./gas	»	»	Independiente, presión, temp., dens.	

y como θ es pequeño, resulta:

$$\theta = \frac{L w}{2 r} \Delta t$$

Y combinando las expresiones de Q y θ , resulta:

$$Q = \frac{K_s \cdot L}{8 r^2} \Delta t$$

lo que indica que el caudal sólo es proporcional al intervalo de tiempo y a las constantes del tubo. Es independiente de w (frecuencia de vibración del tubo).

b) Por inversión de las velocidades angulares del fluido mediante un tubo recto (fig. 4.54 b). Se observa que la velocidad lineal del fluido en los puntos A y B es la misma, pero que la vibración a que se somete el tubo es tal que la velocidad angular en A es contraria a las agujas del reloj mientras que en B es en el mismo sentido. Esta diferencia de fase es la que miden los sensores y es proporcional al caudal másico. La ventaja principal del tubo recto con relación al tubo en Ω es que su pérdida de carga es muy baja.

La medida es independiente de la temperatura, presión y densidad del fluido. Al estar el tubo libre de obstrucciones, admite la circulación de fluidos con sólidos en suspensión. La selección del material del tubo es importante puesto que debe soportar la fatiga mecánica debida a la vibración a su frecuencia natural, y la corrosión y erosión del fluido. La precisión es el orden del $\pm 0,3 \%$.

Otros tipos de tubos empleados tienen la forma de S, Z y de hélice.

Todos estos instrumentos de caudal pueden disponer de unidades de transmisión inteligente que les permiten su fácil calibración, el cambio rápido del campo de medida y la lectura de la variable en cualquier punto de la instalación donde se hayan previsto tomas, por ejemplo, en el transmisor y en el receptor.

4.3 Comparación de características de los medidores de caudal

En la tabla 4.14 se muestran las características resumidas de los instrumentos medidores de caudal, debiendo señalar que sólo están incluidos los elementos primarios, sin considerar los transmisores ni los receptores correspondientes.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetalico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado.....	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada.....	534
9.8.3	Programadores.....	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos.....	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

MEDICION DE NIVEL

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador en la medida de otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir «inteligencia» en la medida del nivel, y obtener precisiones de lectura altas, del orden de $\pm 0,2\%$, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso. El transmisor de nivel «inteligente» hace posible la interpretación del nivel real (puede eliminar o compensar la influencia de la espuma en flotación del tanque, en la lectura), la eliminación de las falsas alarmas (tanques con olas en la superficie debido al agitador de paletas en movimiento), y la fácil calibración del aparato en cualquier punto de la línea de transmisión.

El transmisor o varios transmisores pueden conectarse, a través de una conexión RS-232, a un ordenador personal, que con el software adecuado, es capaz de configurar transmisores inteligentes.

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos que son dos mediciones claramente diferenciadas y que se estudiarán separadamente por sus distintas peculiaridades y las aplicaciones particulares de las que son objeto.

5.1 Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador.

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

Medidor manométrico

Medidor de membrana

Medidor de tipo burbujeo

Medidor de presión diferencial de diafragma

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento a barra de torsión.

Los instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido se clasifican en:

Medidor resistivo

Medidor conductivo

Medidor capacitivo

Medidor ultrasónico

Medidor de radiación

Medidor de láser

5.1.1 Instrumentos de medida directa

El medidor de sonda (fig. 5.1 a) consiste en una varilla o regla graduada, de la longitud conveniente para introducirla dentro del depósito. La determinación del nivel se efectúa por lectura directa de la longitud mojada por el líquido. En el momento de la lectura el tanque debe estar abierto a presión atmosférica. Se utiliza generalmente en tanques de fuel-oil o gasolina. Otro medidor consiste en una varilla graduada, con un gancho que se sumerge en el seno del líquido y se levanta después hasta que el gancho rompe la superficie del líquido. La distancia desde esta superficie hasta la parte superior del tanque representa indirectamente el nivel. Se emplea en tanques de agua a presión atmosférica. Otro sistema parecido es el medidor de cinta graduada y plomada representado en la figura 5.1 c, que se emplea cuando es difícil que la regla graduada tenga acceso al fondo del tanque.

El *nivel de cristal* consiste en un tubo de vidrio con sus extremos conectados a bloques metálicos y cerrados por prensaestopas que están unidos al tanque ge-

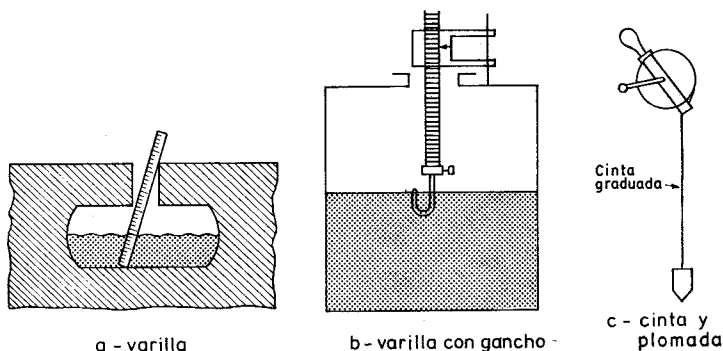


Fig. 5.1 Medidor de sonda.

neralmente mediante tres válvulas, dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal y una de purga (fig. 5.2).

El nivel de cristal normal (fig. 5.2 a) se emplea para presiones hasta 7 bar. A presiones más elevadas el cristal es grueso, de sección rectangular y está protegido por una armadura metálica (fig. 5.2 b). La lectura del nivel se efectúa con un cristal a reflexión o bien por transparencia. En el primer caso que puede verse en la figura 5.2 c, el vidrio en contacto con el líquido está provisto de ranuras longitudinales que actúan como prismas de reflexión indicando la zona de líquido con un color oscuro casi negro y la zona superior en contacto con el vapor de color claro.

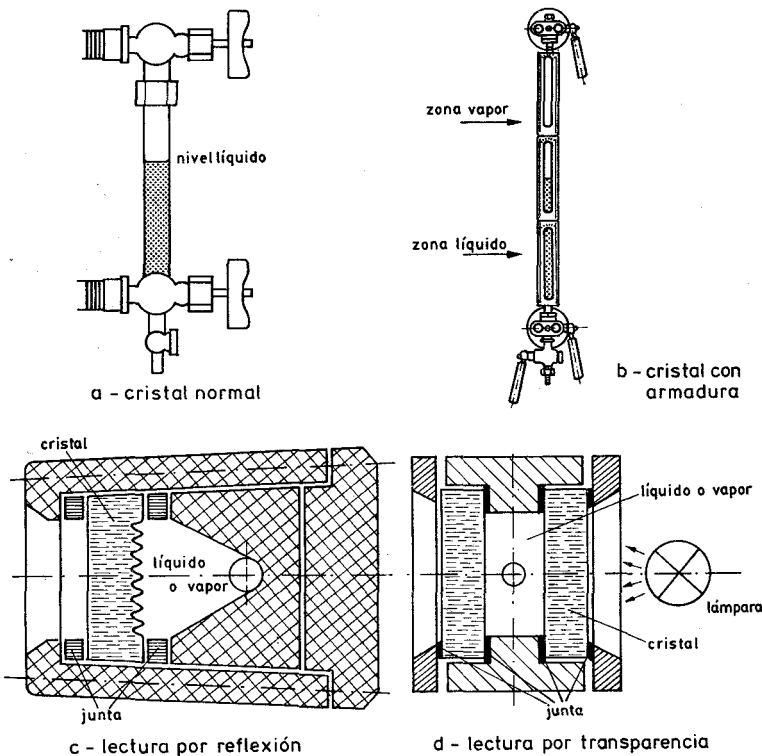


Fig. 5.2 Nivel de cristal.

En la lectura por transparencia empleada para apreciar el color, características o interfase del líquido, éste está contenido entre dos placas de vidrio planas y paralelas que permiten ver directamente el nivel, mejorándose la apreciación visual al acoplar una lámpara de iluminación al sistema.

Para mayor seguridad, las válvulas de cierre incorporan una pequeña bola que actúa como válvula de retención en caso de rotura del vidrio.

Los niveles de vidrio son susceptibles de ensuciarse por las características del líquido que miden, impidiendo que el nivel pueda apreciarse claramente. Entre los líquidos que presentan este inconveniente figuran el caramelo y los líquidos pegajosos.

El nivel de vidrio permite sólo una indicación local, si bien pueden emplearse espejos para lectura a distancias limitadas o bien utilizar cámaras de televisión para mayores distancias de transmisión.

Su ventaja principal es la gran seguridad que ofrece en la lectura del nivel del líquido pudiendo controlar con ellos la lectura de los otros tipos de aparatos de nivel.

Los instrumentos de flotador consisten en un flotador situado en el seno del líquido y conectado al exterior del tanque indicando directamente el nivel. La conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

El flotador conectado directamente (fig. 5.3 a) está unido por un cable que desliza en un juego de poleas a un índice exterior que señala sobre una escala graduada. Es el modelo más antiguo y el más utilizado en tanques de gran capacidad tales como los de fuel-oil y gas-oil. Tiene el inconveniente de que las partes

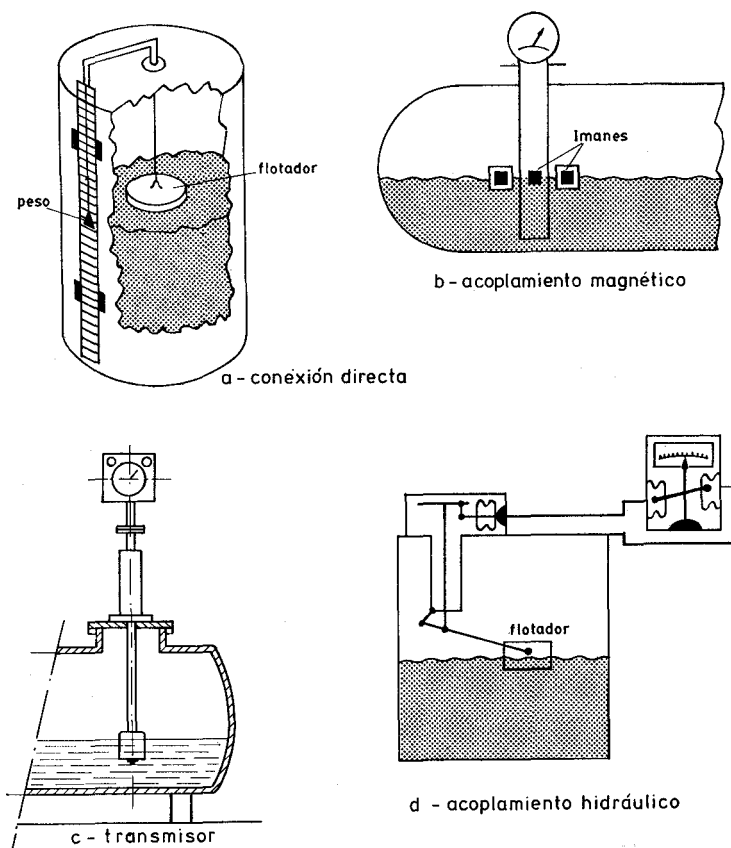


Fig. 5.3 Instrumento de flotador.

móviles están expuestas al fluido y pueden romperse y de que el tanque no puede estar sometido a presión. Además, el flotador debe mantenerse limpio.

El flotador acoplado magnéticamente (fig. 5.3 b) desliza exteriormente a lo largo de un tubo guía sellado, situado verticalmente en el interior del tanque. Dentro del tubo, una pieza magnética sigue al flotador en su movimiento y mediante un cable y un juego de poleas arrastra el índice de un instrumento situado en la parte superior del tanque. El instrumento puede además ser transmisor neumático o eléctrico. Una variante de la conexión magnética consta de un tubo conteniendo un flotador, dotado de un imán que orienta una serie de cintas magnéticas dispuestas en el exterior y a lo largo del tubo. A medida que el nivel sube o baja, las cintas giran, y como tienen colores distintos en su anverso y reverso, visualizan directamente el nivel del tanque. El instrumento puede tener interruptores de alarma y transmisor incorporados.

En tanques pequeños, el flotador puede adaptarse para actuar magnéticamente sobre un transmisor neumático o eléctrico dispuesto en el exterior del tanque permitiendo así un control del nivel; una aplicación típica la constituye el control de nivel de una caldera de pequeña capacidad de producción de vapor (fig. 5.3 c).

El flotador acoplado hidráulicamente (fig. 5.3 d) actúa en su movimiento sobre un fuelle de tal modo, que varía la presión de un circuito hidráulico y señala a distancia en el receptor el nivel correspondiente. Permite distancias de transmisión de hasta 75 m y puede emplearse en tanques cerrados. Sin embargo, requiere una instalación y calibración complicadas y posee partes móviles en el interior del tanque.

Hay que señalar que en estos instrumentos, el flotador puede tener formas muy variadas y estar formado por materiales muy diversos según sea el tipo de fluido.

Los instrumentos de flotador tienen una precisión de $\pm 0,5 \%$. Son adecuados en la medida de niveles en tanques abiertos y cerrados a presión o al vacío, y son independientes del peso específico del líquido. Por otro lado, el flotador puede agarrotarse en el tubo guía por un eventual depósito de los sólidos o cristales que el líquido pueda contener y además los tubos guía muy largos pueden dañarse ante olas bruscas en la superficie del líquido o ante la caída violenta del líquido en el tanque.

5.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática.

Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial

El *medidor manométrico* consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque. En la figura 5.4 puede verse un instrumento de este tipo en el que se observarán varios accesorios como son una válvula de cierre para mantenimiento, y un pote de decantación con una válvula de purga. El manómetro mide la presión debida a la altura de líquido h que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento. Así pues, el campo de medida del instrumento corresponderá a:

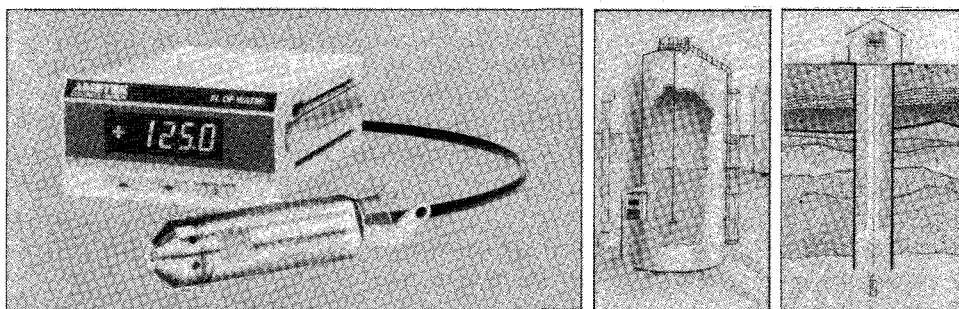
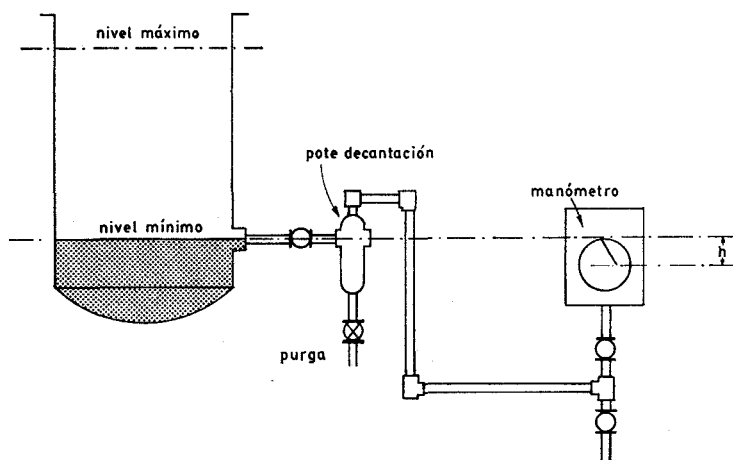


Fig. 5.4 Medidor manométrico.

$$0 - h \cdot \gamma \cdot g \text{ pascal}$$

con h = altura de líquido en m
 γ = densidad del líquido en kg/m^3
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

o bien, expresando γ en g/cm^3 se obtendría $0 - 0,098 h \gamma \text{ bar}$ (o bien $0 - 0,1 h \gamma \text{ kg/cm}^2$)

Como las alturas son limitadas, el campo de medida es bastante pequeño, de modo que el manómetro utilizado tiene un elemento de medida del tipo fuelle.

El instrumento sólo sirve para fluidos limpios ya que si el líquido es corrosivo, coagula o bien tiene sólidos en suspensión, el fuelle puede destruirse o bien bloquearse perdiendo su elasticidad; por otra parte, como el campo de medida es pequeño no es posible utilizar sellos de diafragma. La medida está limitada a tanques abiertos y el nivel viene influido por las variaciones de densidad del lí-

quido. Una variante emplea un transductor de presión suspendido de la parte superior del tanque e inmerso en el líquido, transmitiendo la señal de 4-20 mA c.c. a través de un cable que acompaña al de suspensión. La transmisión o indicación del nivel a través de una comunicación RS-232 permite conectar con la interfaz de un ordenador.

El *medidor de membrana* utiliza una membrana conectada con un tubo estanco al instrumento receptor.

La fuerza ejercida por la columna de líquido sobre el área de la membrana comprime el aire interno a una presión igual a la ejercida por la columna de líquido. El volumen del aire interno es relativamente grande, por lo cual el sistema está limitado a distancias no mayores de unos 15 m debido a la compresibilidad del aire. Como antes, la presión máxima que el líquido ejercerá es 0,098 $h\gamma$ bar. El instrumento es delicado ya que cualquier pequeña fuga del aire contenido en el diafragma destruiría la calibración del instrumento.

El *medidor de tipo burbujeo* emplea un tubo sumergido en el líquido a cuyo través se hace burbujear aire mediante un rotámetro con un regulador de caudal incorporado (fig. 5.5). La presión del aire en la tubería equivale a la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido, es decir, al nivel. El regulador de caudal permite mantener un caudal de aire constante a través del líquido independientemente del nivel (es normal un caudal de 150 NI/h); si no existiera, habría una gran diferencia en los caudales de aire necesarios desde el nivel mínimo al máximo, con el inconveniente de un gasto de aire indebido. La tubería empleada suele ser de $\frac{1}{2}$ " con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire. Una tubería de menor diámetro tipo capilar reduciría el tiempo de respuesta pero produciría un error en la medida provocado por la pérdida de carga del tubo.

La presión de aire en la tubería, es decir, el nivel, se mide mediante un manómetro de fuelles cuyo campo de medida corresponde a la presión máxima ejercida por el líquido (0,098 $h\gamma$ bar, con h en m y γ en g/cm^3).

El manómetro receptor puede colocarse hasta distancias de 200 m.

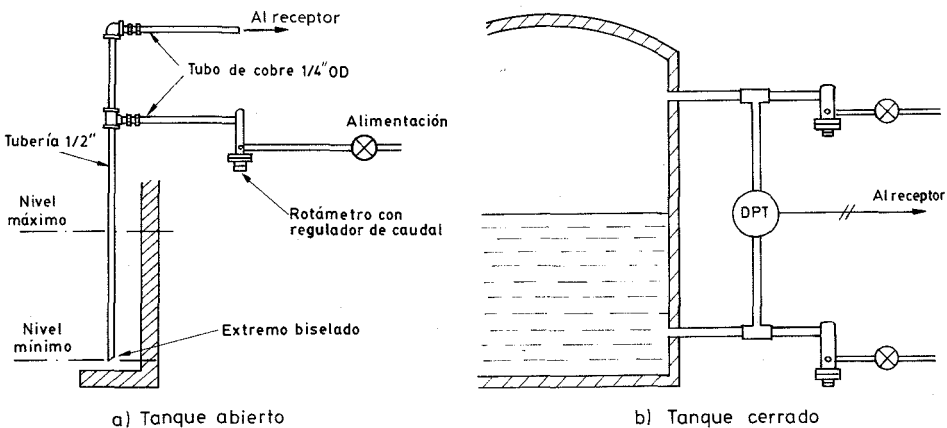


Fig. 5.5 Medidor de tipo burbujeo.

El sistema puede emplearse también en tanques cerrados (fig. 5.5 b) con dos juegos rotámetro-regulador y con las señales de aire conectadas a un transmisor de presión diferencial análogo al estudiado en el capítulo 4 de *Instrumentos de caudal*. Como es lógico, la presión del aire de purga debe ser superior a la presión interna del tanque.

Señalemos que no sólo puede utilizarse aire sino también otros tipos de gases e incluso líquido como fluido de purga y que el tubo debe tener una longitud adecuada para evitar que las variaciones bruscas del nivel introduzcan en su interior una cierta columna de líquido que retarde el paso del aire y falsee momentáneamente la lectura.

El método de burbujeo es simple y da buen resultado, en particular, en el caso de líquidos muy corrosivos o con sólidos en suspensión y en emulsiones. No se recomienda su empleo cuando el fluido de purga perjudica al líquido y para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o del gas de purga presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo. Desde el punto de vista de mantenimiento, es muy útil situar una T con un tapón en la parte superior del tubo para su limpieza periódica.

El *medidor de presión diferencial* consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico (fig. 5.6). Es decir: $P = H\gamma g$ en la que:

P = presión

H = altura de líquido sobre el instrumento

γ = densidad del líquido

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial semejante a los transmisores de caudal de diafragma que ya estudiamos.

En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasantemente al tanque para permitir sin dificultades la medida de nivel de fluidos, tales como pasta de papel y líquidos con sólidos en suspensión, pudiendo incluso ser de montaje

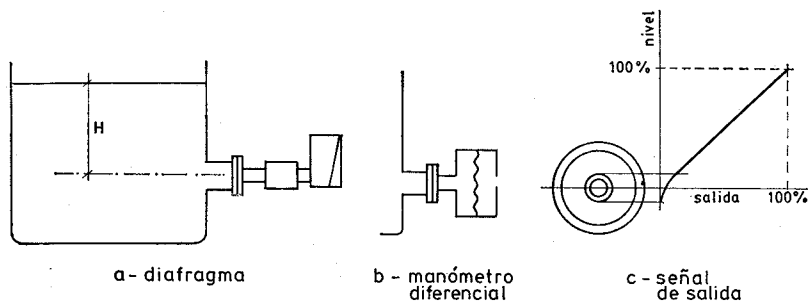


Fig. 5.6 Medidor de diafragma.

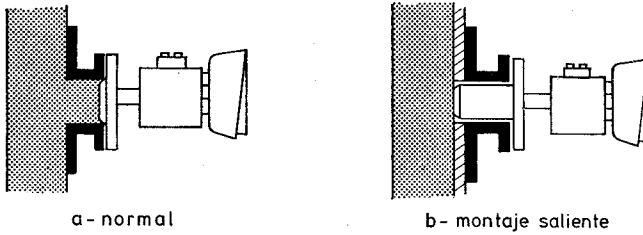


Fig. 5.7 Tipos de diafragmas.

saliente para que el diafragma enrase completamente con las paredes interiores del tanque (fig. 5.7 b) tal como ocurre en el caso de líquidos extremadamente viscosos en que no puede admitirse ningún recodo.

Hay que señalar que el nivel cero del líquido se selecciona en un eje a la altura del diafragma. Si el instrumento se calibra en el tanque, el 0 % del aparato debe comprobarse con el nivel más bajo en el borde inferior del diafragma (entre el borde inferior y el superior del diafragma la señal de salida no está en proporción directa al nivel) (fig. 5.6 c).

Otro tipo es el manómetro diferencial de la figura 5.6 b, que ya se estudió en el capítulo 4 y que en su funcionamiento equivale al transmisor de diafragma.

En el caso de que el tanque esté cerrado y bajo presión, hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido debiendo señalar que la lectura será muy poco precisa, si la presión es grande. Se suele conectar un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y la superior, utilizando transmisores de presión diferencial de diafragma tal como los representados en la figura 5.8.

Cuando los gases o vapores encima del líquido son condensables, la línea desde la toma superior se llena gradualmente con el condensado hasta llenar todo el tubo, en cuyo caso la tubería dibujada a la derecha del transmisor de las figuras 5.8 a y b tendrá mayor presión que la tubería izquierda y, por lo tanto, habrá que cambiar las conexiones del instrumento ya que éste indicará bajo cuando el nivel sea alto y viceversa:

En efecto, puede verse en la figura que:

$$P = (H - h)\gamma \quad \text{para } h = 0 \quad p = H$$

De este modo, el instrumento tendrá que estar graduado a la inversa, es decir, indicar 0 % a 3 psi y 100 % a 15 psi en un transmisor neumático, o bien señalar 0 % a 4 mA y 100 % a 20 mA en un transductor de señal de salida 4-20 miliamperios en corriente continua.

Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle llamado de supresión que está aplicado a la barra de equilibrio de fuerzas del transmisor y que produce una fuerza igual a la diferencia entre el nivel máximo y el mínimo. Como es natural, puede ajustarse la tensión del muelle para cada caso particular (figuras 5.9 a y b).

Algunos fluidos presentan el riesgo de depósito de cristales o de sólidos en

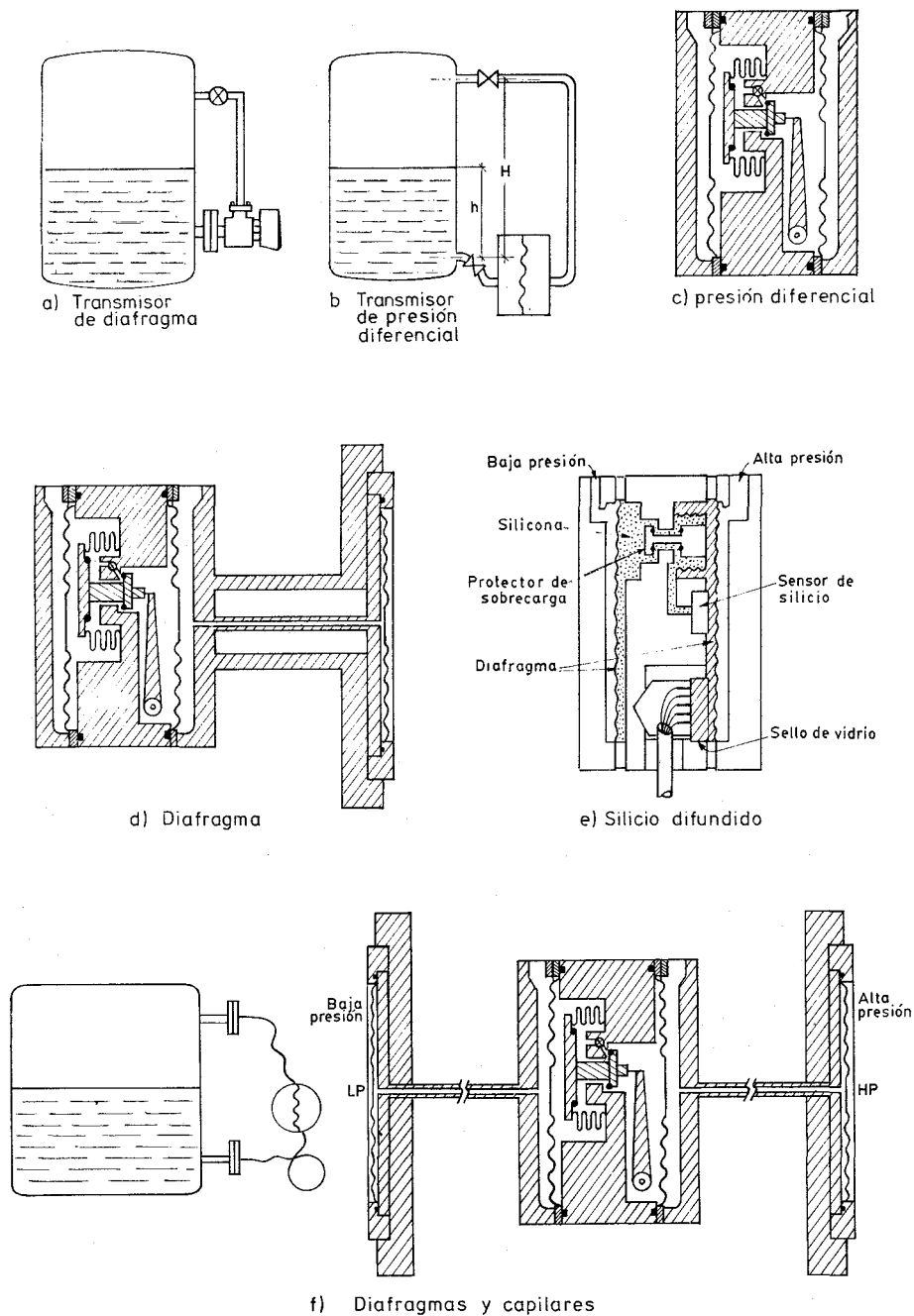


Fig. 5.8 Medidores de presión diferencial en tanque cerrado.

la superficie del diafragma. En tal caso cabe la solución de emplear un diafragma recubierto de teflón para reducir el depósito gradual del producto. No obstante, como el movimiento del diafragma es muy pequeño y se considera el sólido algo flexible, continúa aplicándose la presión del líquido a todo el diafragma; sin embargo, si parte del diafragma queda rígido, el instrumento marcará de forma errática o permanente menos nivel del real. Este inconveniente se resuelve empleando un transmisor de nivel de presión diferencial con membranas de sello que responde a la presión transmitida en lugar de la fuerza creada por el líquido sobre la membrana.

En tanques cerrados y a presión con líquido de vapor condensable existe el riesgo de obturación de la línea de compensación, en particular si el fluido no es limpio. Para evitarlo puede purgarse la línea con líquido o gas, método que no se recomienda por los problemas de mantenimiento y la posible pérdida de precisión que presenta, o bien emplear un transmisor de presión diferencial unido con dos capilares a dos diafragmas conectados en las partes inferior y superior del tanque. En la figura 5.8 *f* puede verse un esquema de la instalación. Es importante que los dos diafragmas estén a la misma temperatura para evitar los errores en la medida que se presentarían por causa de las distintas dilataciones del fluido contenido en el tubo capilar.

Si el tanque es elevado y el medidor se sitúa a un nivel muy inferior, la columna de líquido que va desde el nivel mínimo al medidor es mucho mayor que la propia variación de nivel, por lo cual, la apreciación del mismo se hace sobre una parte muy pequeña de la escala. Para corregir este inconveniente se utiliza un muelle llamado de elevación que, en forma similar al de supresión, está aplicado a la barra de equilibrio de fuerzas del transmisor y produce una fuerza que se ajusta igual a la de la columna de líquido citada. En la figura 5.9 puede verse la disposición de los muelles de supresión y de elevación.

El medidor de presión diferencial puede emplearse también en la medida de interfases. La amplitud de la medida vendrá dada por la diferencia de presiones sobre el diafragma del elemento, primero con el tanque lleno del líquido más denso y después con el líquido menos denso. Por ejemplo, si la interfase es agua-keroseno ($\gamma = 0,8$) y el tanque tiene 3 m de altura, la presión diferencial disponible será de:

$$0,098 \times 3 \times 1 - 0,098 \times 3 \times 0,8 = 0,0588 \text{ bar} = 600 \text{ mm c. de a.}$$

que puede medirse fácilmente con un transmisor de presión diferencial sensible dotado de resorte de elevación para compensar la presión inicial del líquido menos denso.

La precisión de los instrumentos de presión diferencial es de $\pm 0,5 \%$ en los neumáticos, $\pm 0,2 \%$ a $\pm 0,3 \%$ en los electrónicos, y de $\pm 0,15 \%$ en los «inteligentes» con señal de salida de 4-20 mA c.c. y de $\pm 0,1 \%$ en los que se emplean en los tanques abiertos y cerrados a presión y a vacío, no tienen partes móviles dentro del tanque, son de fácil limpieza, son precisos y confiables, admiten temperaturas del fluido hasta 120°C y no son influidos por las fluctuaciones de presión. Sin embargo, en tanques cerrados presentan el inconveniente de la posible condensación de los vapores del tanque en el tubo de conexión al instru-

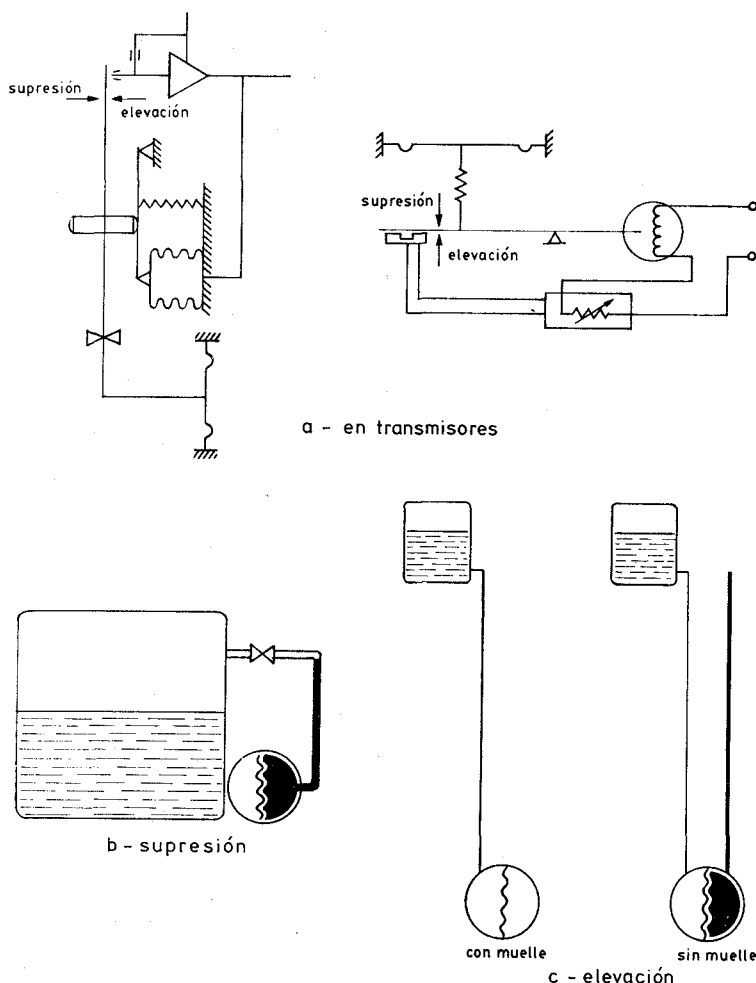


Fig. 5.9 Muelles de supresión y de elevación.

mento; este inconveniente se elimina fácilmente con el resorte de supresión descrito. Hay que señalar que el material del diafragma debe ser el adecuado para resistir la corrosión del fluido (existen materiales de acero inoxidable 316, monel, tantalio, hastelloy B, inoxidable recubierto de teflón).

Los instrumentos basados en la presión hidrostática permiten inventariar el tanque. En la figura 5.10 puede verse el montaje de los instrumentos, tres transmisores de presión situados en las partes inferior, media y superior del tanque, y una sonda de temperatura. Las medidas calculadas son:

$$\text{Densidad} = \frac{P_{\text{inf}} - P_{\text{media}}}{h_{mi}}$$

$$\text{Nivel} = \frac{P_i - P_s}{\text{Densidad}} + h_i$$

$$\text{Masa} = (P_i - P_s) \times \text{Área media del tanque}$$

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Masa}}{\text{Densidad}}$$

La temperatura media tomada entre la parte inferior y la media del tanque permite corregir la densidad y el volumen calculados.

Otros factores que influyen son la configuración del tanque, los asentamientos del tanque en el terreno, las expansiones térmicas y las variaciones de densidad en las capas del líquido. La precisión en la medida de la masa llega al $\pm 0,01\%$.

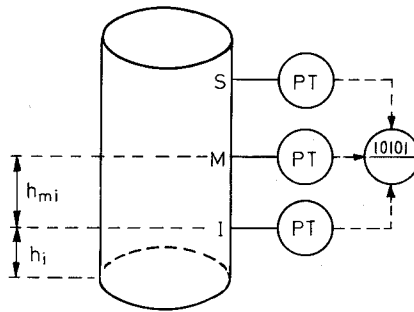


Fig. 5.10 Inventariado de un tanque.

5.1.3 Instrumento basado en el desplazamiento

El medidor de nivel de tipo desplazamiento (fig. 5.11) consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al tanque.

El tubo de torsión se caracteriza fundamentalmente porque el ángulo de rotación de su extremo libre es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, al momento ejercido por el flotador. El movimiento angular del extremo libre del tubo de torsión es muy pequeño, del orden de los 9° . El tubo proporciona además un cierre estanco entre el flotador y el exterior del tanque (donde se dispone el instrumento receptor del par transmitido).

Según el principio de Arquímedes, el flotador sufre un empuje hacia arriba que viene dado por la fórmula

$$F = S H \gamma g$$

en la que:

F = empuje del líquido

S = sección del flotador

H = altura sumergida del flotador

γ = densidad del líquido

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

y el momento sobre la barra de torsión es

$$M = (SH\gamma g - P)l$$

siendo l el brazo del tubo de torsión y P el peso del flotador.

Tal como puede verse en la expresión anterior, al aumentar el nivel, el líquido ejerce un empuje sobre el flotador igual al volumen de la parte sumergida multiplicada por la densidad del líquido, tendiendo a neutralizar su peso propio, así que el esfuerzo medido por el tubo de torsión será muy pequeño. Por

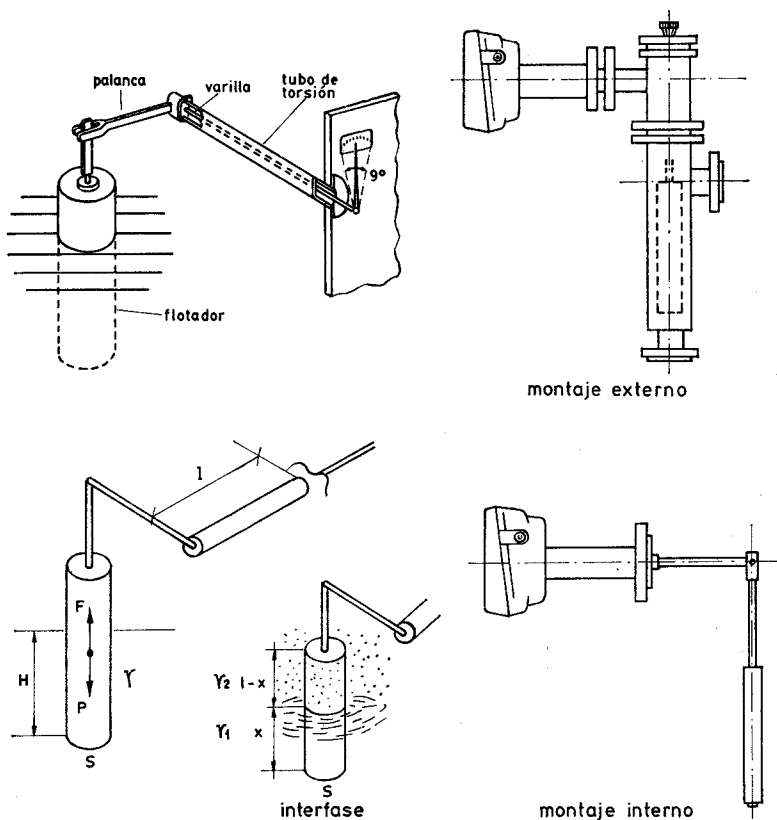


Fig. 5.11 Medidor de nivel de desplazamiento.

el contrario, al bajar el nivel, menor parte del flotador queda sumergida, y la fuerza de empuje hacia arriba disminuye, resultando una mayor torsión.

El instrumento puede utilizarse también en la medida de interfase entre dos líquidos inmiscibles de distinta densidad (por ejemplo, agua y aceite). En este caso el flotador es de pequeño diámetro y de gran longitud y está totalmente sumergido. El peso del volumen desplazado por el flotador, es decir, el empuje, se compone entonces de dos partes, del líquido más denso en la parte inferior y del menos denso en la superior, con una línea de separación (interfase) de la que depende el par de torsión proporcionado al transmisor exterior. En efecto, si x es la zona del flotador inmersa en el líquido de mayor densidad, l es la longitud total del flotador y γ_1 , γ_2 son las densidades de los líquidos, resulta:

$$\text{Empuje hacia arriba} = F = Sx \cdot \gamma_1 \cdot g + S(l - x) \cdot \gamma_2 \cdot g$$

Se ve claramente que este empuje depende del nivel relativo de separación de los dos líquidos y que la amplitud de medida está determinada por la diferencia entre las densidades de los líquidos, es decir

$$F_{\max} - F_{\min} = Sl\gamma_1 \cdot g - Sl\gamma_2 \cdot g = Sl(\gamma_1 - \gamma_2) \cdot g$$

Las dimensiones relativas del flotador (longitud y diámetro) dependerán pues de la amplitud de medida seleccionada.

El instrumento sirve también para medir la densidad del líquido. En este caso, el flotador está totalmente sumergido. El campo de medida de densidades es bastante amplio, de 0,4 a 1,6.

El cuerpo del medidor puede estar montado directamente en el tanque (montaje interno) o en un tubo vertical al lado del tanque (montaje exterior).

El movimiento del brazo de torsión puede transmitirse por medio de un eslabón a un transmisor neumático o electrónico de equilibrio de fuerzas, o digital (sensor de efecto Hall en el que al estar una placa o cinta de conductor o semiconductor recorrida por una corriente, dentro de un campo magnético perpendicular, se genera una f.e.m. perpendicular a la vez a la intensidad de la corriente y al flujo del campo magnético), permitiendo en la conexión una compensación mecánica o digital para el peso específico del líquido. En la figura 5.11 se representa un esquema del funcionamiento.

La precisión es del orden de $\pm 0,5\%$ a $\pm 1\%$ y el intervalo de medida puede variar de 0-300 a 0-2000 mm c. de a.

El instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y cerrados a presión o a vacío, tiene una buena sensibilidad pero presenta el inconveniente del riesgo de depósito de sólidos o de crecimiento de cristales en el flotador que afectan a la precisión de la medida y es apto sólo para la medida de pequeñas diferencias de nivel (2000 mm máximo estándar). La medida del nivel de interfases requiere flotadores de gran volumen.

5.1.4 Instrumentos basados en características eléctricas del líquido

El medidor de nivel conductivo o resistivo (fig. 5.12) consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido

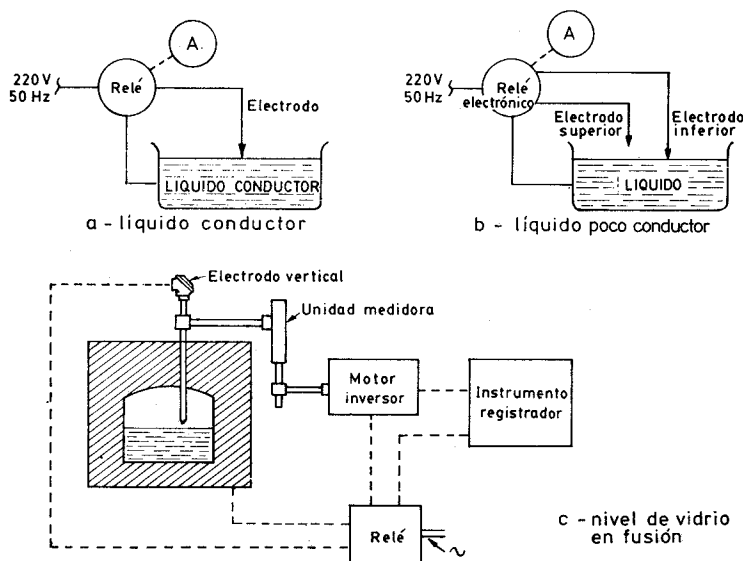


Fig. 5.12 Medidor de nivel conductivo.

moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico, y de este modo el aparato puede discriminar la separación entre el líquido y su vapor, tal como ocurre, por ejemplo, en el nivel de agua de una caldera de vapor. La impedancia mínima es del orden de los $20 \text{ M}\Omega/\text{cm}$, y la tensión de alimentación es alterna para evitar fenómenos de oxidación en las sondas por causa del fenómeno de la electrólisis. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito electrónico y circula una corriente segura del orden de los 2 mA ; el relé electrónico dispone de un temporizador de retardo que impide su enclavamiento ante una ola del nivel del líquido o ante cualquier perturbación momentánea o bien en su lugar se disponen dos electrodos poco separados enclavados eléctricamente en el circuito.

El instrumento se emplea como alarma o control de nivel alto y bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad. Montado en grupos verticales de 24 o más electrodos, puede complementar los típicos niveles de vidrio de las calderas, y se presta a la transmisión del nivel a la sala de control y a la adición de las alarmas correspondientes.

Una variante del aparato se utiliza en el control del nivel de vidrio en fusión (fig. 5.12 c): Un sistema electromecánico baja el electrodo hasta que éste entra en contacto con la superficie del vidrio fundido que a las temperaturas de fusión es conductor. El circuito está proyectado de tal forma que en el momento del contacto, el electrodo queda parado y su posición marcada en un registrador; instantes después invierte su movimiento hasta romper el contacto eléctrico y se repite nuevamente el ciclo.

El instrumento es versátil, sin partes móviles, su campo de medida es grande con la limitación física de la longitud de los electrodos. El líquido contenido en el tanque debe tener un mínimo de conductividad y si su naturaleza lo exige, la corriente debe ser baja para evitar la deterioración del producto. Por otro lado, conviene que la sensibilidad del aparato sea ajustable para detectar la presencia de espuma en caso necesario.

El medidor de capacidad (fig. 5.13) mide la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal (fig. 5.13 a) y la capacidad total del sistema se compone de la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones superiores.

En fluidos conductores (fig. 5.13 b) con una conductividad mínima de 100 microhmios/c.c. el electrodo está aislado usualmente con teflón interviniendo las capacidades adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

El circuito electrónico (puente de capacidades, fig. 5.13 c) alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, lo cual disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y permite aliviar en parte el inconveniente del posible recubrimiento del electrodo por el producto.

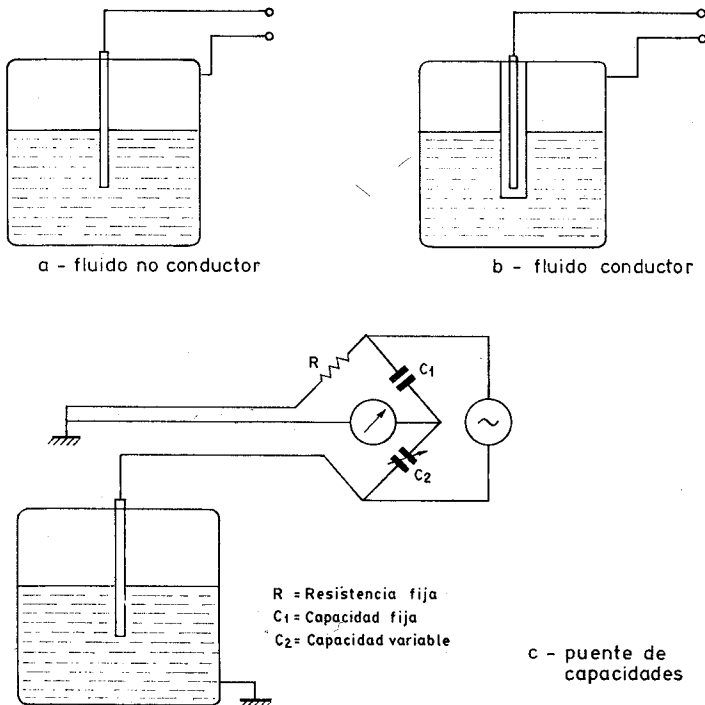


Fig. 5.13 Medidor de capacidad.

El sistema es sencillo y apto para muchas clases de líquidos. Sin embargo, hay que señalar que en los fluidos conductores, los sólidos o líquidos conductores que se encuentran en suspensión o emulsión, y las burbujas de aire o de vapor existentes, aumentan y disminuyen respectivamente la constante dieléctrica del fluido dando lugar a un error máximo de 3 % por cada tanto por ciento de desplazamiento volumétrico. Por otro lado, al bajar el nivel, la porción aislante del electrodo puede quedar recubierta de líquido y la capacidad adicional que ello representa da lugar a un error considerable.

La precisión de los transductores de capacidad es de $\pm 1 \%$.

Se caracterizan por no tener partes móviles, son ligeros, presentan una buena resistencia a la corrosión y son de fácil limpieza. Su campo de medida es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de nivel de interfaces. Tienen el inconveniente de que la temperatura puede afectar las constantes dieléctricas (0,1 % de aumento de la constante dieléctrica/ $^{\circ}\text{C}$) y de que los posibles contaminantes contenidos en el líquido pueden adherirse al electrodo variando su capacidad y falseando la lectura, en particular en el caso de líquidos conductores. El funcionamiento del sistema a una frecuencia elevada, o bien la incorporación de un circuito detector de fase, compensan en parte este inconveniente.

El sistema ultrasónico de medición de nivel (fig. 5.14) se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

Los sensores trabajan a una frecuencia de unos 20 kHz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido.

En la figura 5.14 pueden verse varias disposiciones de montaje de los detectores que se utilizan en los casos de alarmas o de indicación continua del nivel.

En las aplicaciones de alarma de nivel los sensores vibran a una frecuencia de resonancia determinada, que se amortigua cuando el líquido los moja.

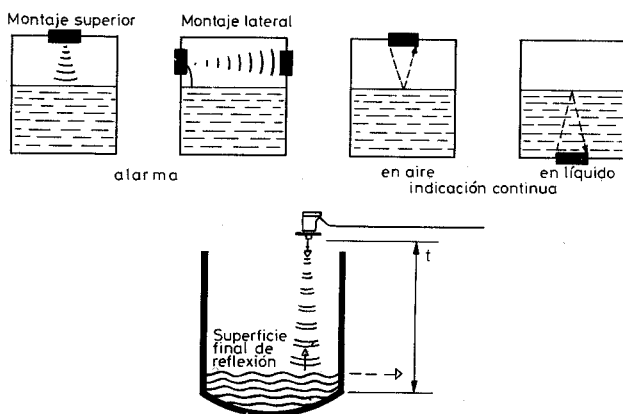


Fig. 5.14 Transductor ultrasónico de nivel.

En el segundo caso de indicación continua del nivel, la fuente ultrasónica genera impulsos que son detectados por el receptor una vez ha transcurrido el tiempo correspondiente de ida y vuelta de la onda a la superficie del sólido o del líquido.

En la figura 5.15 puede verse el diagrama de bloques de un sistema de medida de ultrasonidos. El sensor emisor dispone de un oscilador excitador para enviar un impulso ultrasónico a la superficie del fluido y el sensor receptor recibe esta señal reflejada enviando una señal función del tiempo transcurrido, y por lo tanto del nivel, a un oscilógrafo o a un indicador.

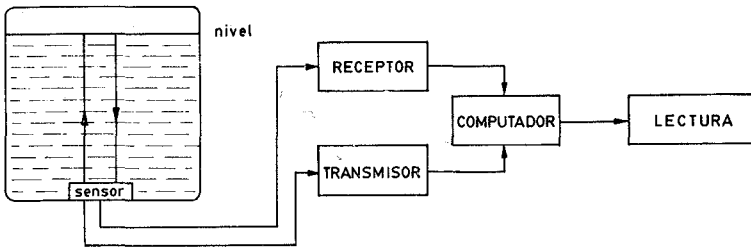


Fig. 5.15 Diagrama de bloques de un transductor.

La precisión de estos instrumentos es de ± 1 a 3% . Son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos pudiendo construirse a prueba de explosión. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida como es el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos.

La utilización del ordenador permite, a través de un programa, almacenar el perfil ultrasónico del nivel, y así tener en cuenta las características particulares de la superficie del líquido, tal como la espuma, con lo cual se mejora la precisión de la medida. Por otro lado, el ordenador facilita la conversión del nivel a volumen del tanque para usos de inventario, y además proporciona características de autocomprobación («self-checking») del instrumento.

El sistema de radar de microondas emplea la propagación de una onda electromagnética que no es influida por la temperatura ni por las variaciones de densidad que puedan existir sobre el líquido. De este modo, la espuma, que es transparente a la señal de radar, deja de ser un problema como ocurría en el medidor de ultrasonidos. Un oscilador de estado sólido genera una frecuencia de barrido de 10 a 11 GHz y enfoca la señal sobre el líquido por medio de una antena. La diferencia de frecuencias entre las señales de transmisión y de retorno es proporcional al tiempo empleado por las mismas. Y así:

$$d = \frac{v}{2 \, dt}$$

con

$$v = \frac{c}{\sqrt{e}}$$

siendo:

 d = distancia del emisor al líquido v = señal de velocidad dt = tiempo de recorrido c = velocidad de la luz e = constante dieléctrica

Como la constante dieléctrica de los vapores sobre el líquido es casi la unidad, la variación de la velocidad es despreciable, de modo que la señal de velocidad de radar es más constante que la de ultrasonidos.

El sistema de medición por rayos gamma (fig. 5.16) consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del tanque y con un contador Geiger que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua. Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe parte de la energía emitida.

Los rayos emitidos por la fuente son similares a los rayos X, pero de longitud de onda más corta. La fuente radiactiva pierde igualmente su radiactividad en función exponencial del tiempo. La vida media (es decir, el tiempo necesario para que el emisor pierda la mitad de su actividad) varía según la fuente empleada. En el cobalto 60 es de 5,5 años y en el cesio 137 es de 33 años y en el americio 241 es de 458 años.

Las paredes del tanque absorben parte de la radiación y al detector llega sólo un pequeño porcentaje. Los detectores son, en general, tubos Geiger o detectores de cámara iónica y utilizan amplificadores de c.c. o de c.a. El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida, y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, extremo este último a tener en cuenta para conservar la misma precisión de la puesta en marcha. Como desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación, que en nuestro país están reglamentadas por la Junta de Energía Nuclear.

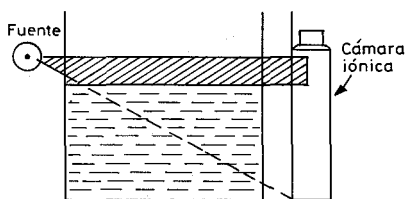


Fig. 5.16 Medidor de nivel radiactivo.

La precisión en la medida es de $\pm 0,5$ a $\pm 2\%$, y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido.

El sistema se emplea en caso de medida de nivel en tanques de acceso difícil o peligroso. Es ventajoso cuando existen presiones elevadas en el interior del tanque que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Hay que señalar que el sistema es caro y que la instalación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radiactiva siendo necesario señalar debidamente las áreas donde están instalados los instrumentos y realizar inspecciones periódicas de seguridad.

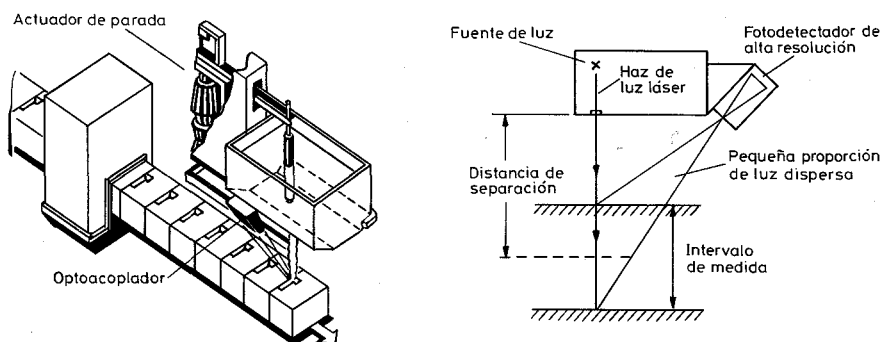


Fig. 5.17 Medidor de nivel láser.

En aplicaciones donde las condiciones son muy duras, y donde los instrumentos de nivel convencionales fallan, encuentra su aplicación el *medidor de láser* (y también el de radiación). Tal es el caso de la medición de metal fundido, donde la medida del nivel debe realizarse sin contacto con el líquido y a la mayor distancia posible por existir unas condiciones de calor extremas. El sistema consiste en un rayo láser enviado a través de un tubo de acero y dirigido por reflexión en un espejo sobre la superficie del metal fundido. El aparato mide el tiempo que transcurre entre el impulso emitido y el impulso de retorno que es registrado en un fotodetector de alta resolución, y este tiempo es directamente proporcional a la distancia del aparato emisor a la superficie del metal fundido. Un microprocesador convierte este tiempo al valor de la distancia a la superficie del metal en fusión, es decir, da la lectura del nivel.

En la tabla 5.1 figura una comparación entre los tipos estudiados de medición de nivel.

5.2 Medidores de nivel de sólidos

En los procesos continuos, la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el nivel de sólidos en puntos fijos o de forma continua,

TABLA 5.1 Medidores de nivel de líquidos

Instrumento	Campo de medida	Precisión % escala	Pres. máx bar	Temp. máx. fluido °C	Desventajas	Ventajas
Sonda	Limit.	0,5 mm	Atm.	60	Manual, sin olas. Tanques abiertos	Barato, preciso
Cristal	»	»	150	200	Sin transmisión	Seguro, preciso
Flotador	0-10 m	$\pm 1-2\%$	400	250	Posible agarrotamiento	Simple, indep. naturaleza líq.
Manométrico	Alt. tanque	$\pm 1\%$	Atm.	60	Tanques abiertos, fluidos limpios	Barato
Membrana	0-25 m	$\pm 1\%$	»	60	Tanques abiertos	Barato
Burbujeo	Alt. tanque	$\pm 1\%$	400	200	Mantenimiento, contaminación líquido	Barato, versátil
Presión diferencial	0,3 m	$\pm 0,15\%$ a $\pm 0,5\%$	150	200	Posible agarrotamiento	Interfase líquido
Desplazamiento	0-25 m	$\pm 0,5\%$	100	170	Expuesto a corrosión	Fácil limpieza, robusto, interfaces
Conductivo	Ilimitado	—	80	200	Líquido conductor	Versátil
Capacitivo	0,6 m	$\pm 1\%$	80-250	200-400	Recubrimiento electrodo	Resistencia, corrosión
Ultrasónico	0,30 m	$\pm 1\%$	400	200	Sensible a densidad	Todo tipo tanques y líquidos
Radar	0-30 m	$\pm 2,5\text{ mm}$	—	—	Sensible a la constante dieléctrica	» y líquidos con espuma
Radiación	0-2,5 m	$\pm 0,5-2\%$	—	150	Fuente radiactiva	» y sin contacto líquido
Láser	0-2 m	$\pm 0,5-2\%$	—	1500	Láser	» y sin contacto líquido

en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales.

Los detectores de nivel de punto fijo proporcionan una medida en uno o varios puntos fijos determinados. Los sistemas más empleados son el diafragma, el cono suspendido, la varilla flexible, el medidor conductivo, las paletas rotativas y los ultrasonidos.

Los medidores de nivel continuo proporcionan una medida continua del nivel desde el punto más bajo al más alto. Entre los instrumentos empleados se encuentran el de peso móvil, el de báscula, el capacitivo, el de presión diferencial, el de ultrasonidos y el de radiación.

5.2.1 Detectores de nivel de punto fijo

El *detector de diafragma* (fig. 5.18) consiste en una membrana flexible que puede entrar en contacto con el producto dentro del tanque y que contiene en su interior un conjunto de palancas con contrapeso que se apoyan sobre un microrruptor. Cuando el nivel del sólido alcanza el diafragma lo fuerza venciendo el contrapeso y actuando sobre el microrruptor; éste que puede ser mecánico o de

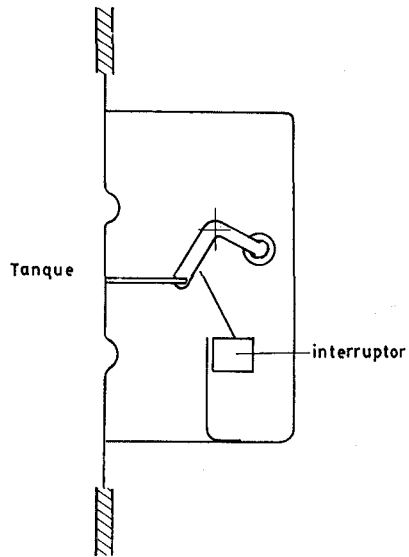


Fig. 5.18 Medidor de diafragma.

mercurio, puede accionar una alarma o actuar automáticamente sobre un transportador o maquinaria asociadas al depósito.

El material del diafragma puede ser de tela, goma, neopreno o fibra de vidrio. El medidor de diafragma tiene la ventaja de su bajo coste, puede emplearse en tanques cerrados sometidos a baja presión o vacío gracias a una línea neumática que iguala presiones a ambos lados de la membrana y trabaja bien con materiales de muy diversa densidad.

Tiene la desventaja de no admitir materiales granulares de tamaños superiores a unos 80 mm de diámetro.

Su precisión es de unos ± 50 mm.

El *cono suspendido* (fig. 5.19) consiste en un microrruptor montado dentro de una caja estanca al polvo, con una cazoleta de goma de la que está suspendida una varilla que termina en un cono. Cuando el nivel de sólidos alcanza el cono, el interruptor es excitado. La cazoleta de goma permite una flexibilidad en la posición del cono gracias a la cual el aparato puede actuar como alarma de alto o de bajo nivel; conviene tener la precaución de proteger mecánicamente el instrumento cuando se manejan materiales pesados que, en su caída desde la boca de descarga del tanque podrían dañarlo.

El aparato es barato, necesita estar protegido como nivel de baja o en niveles intermedios y se utiliza sólo en tanques abiertos. Su precisión es de unos 50 mm. Sus aplicaciones típicas son la alarma y el control de nivel en carbón, granos y caliza.

La *varilla flexible* (fig. 5.20) consiste en una varilla de acero conectada a un diafragma de latón donde está contenido un interruptor. Cuando los sólidos presionan, aunque sólo sea ligeramente en la varilla, el interruptor se cierra y actúa sobre una alarma.

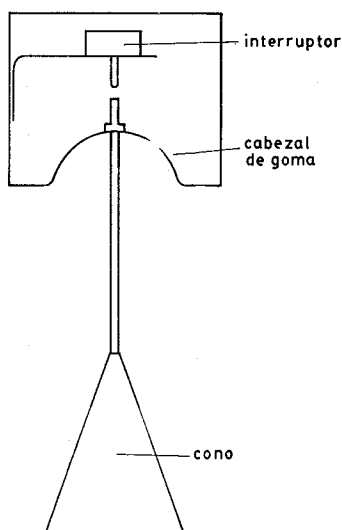


Fig. 5.19 Medidor de cono suspendido.

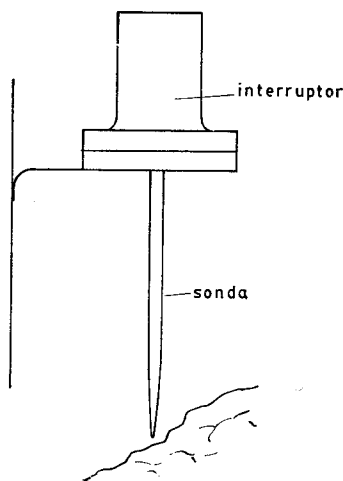


Fig. 5.20 Varilla flexible.

El conjunto de la unidad está sellado herméticamente pudiendo construirse a prueba de explosión. El aparato se emplea como alarma de alto nivel estando dispuesto en la parte superior del tanque. Para impedir que la simple caída del producto pueda causar una alarma infundada, incorpora un relé de retardo.

El instrumento se emplea en tanques abiertos como alarma de nivel alto, tiene una precisión de ± 25 mm, se utiliza para materiales tales como carbón y puede trabajar hasta temperaturas máximas de 300°C .

El *medidor conductivo* (fig. 5.21) consiste en un electrodo dispuesto en el interior de unas placas puestas a masa y con el circuito eléctrico abierto. Cuando los sólidos alcanzan el aparato se cierra el circuito y la pequeña corriente originada es amplificada actuando sobre un relé de alarma. Los sólidos deben poseer una conductividad eléctrica apreciable para poder excitar el circuito.

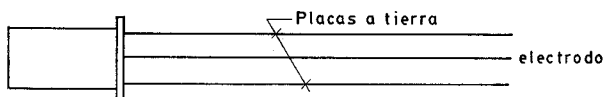


Fig. 5.21 Unidad de contacto eléctrico.

El instrumento puede utilizarse en tanques abiertos y a presión, trabaja hasta temperaturas máximas de 300°C , está limitado a materiales que tengan una conductividad de 1 a $1,4 \times 10^{-7}$ mho y sólo puede emplearse como alarma de nivel alto o de niveles intermedios. Entre los materiales en los que se pueden emplear figuran el carbón y el carbón activo. El *medidor capacitivo* es un detector de proximidad capacitivo, dotado de un circuito oscilante RC , que está ajus-

tado en un punto crítico, y que entra en oscilación cuando se encuentra próximo al lecho del sólido. El aparato se monta en el tanque en posición vertical o inclinada y su sensibilidad se coloca al mínimo para evitar el riesgo de excitación del aparato en el caso de que una mínima cantidad del sólido pueda depositarse en el detector.

Las *paletas rotativas* (fig. 5.22) consisten en un eje vertical, dotado de paletas, que gira continuamente a baja velocidad accionado por un motor síncrono. Cuando el producto sólido llega hasta las paletas, las inmoviliza, con lo que el soporte del motor y la caja de engranajes empiezan a girar en sentido contrario.

En su giro, el soporte del motor actúa consecutivamente sobre dos interruptores, el primero excita el equipo de protección (por ejemplo, una alarma) y el segundo desconecta la alimentación eléctrica del motor con lo cual éste queda bloqueado. Cuando el producto baja de nivel y deja las palas al descubierto, un resorte vuelve el motor a su posición inicial liberando los dos microinterruptores. De este modo, el motor se excita con lo que las palas vuelven a girar, y la alarma queda desconectada.

El eje de las palas puede ser flexible o rígido para adaptarse así a las diversas condiciones de trabajo dentro del silo (caída de producto, deslizamientos del producto, etc.). Estos aparatos son adecuados en tanques abiertos o a baja presión (máximo 10 kg/cm^2), tienen una precisión de unos 25 mm y se emplean preferentemente como detectores de nivel de materiales granulares y carbón. Pueden trabajar con materiales de muy diversa densidad y existen modelos a prueba de explosión.

En la figura 5.23 puede verse una aplicación típica de un control de nivel de sólidos en un tanque, que mantiene el nivel entre los dos puntos donde están situados los detectores.

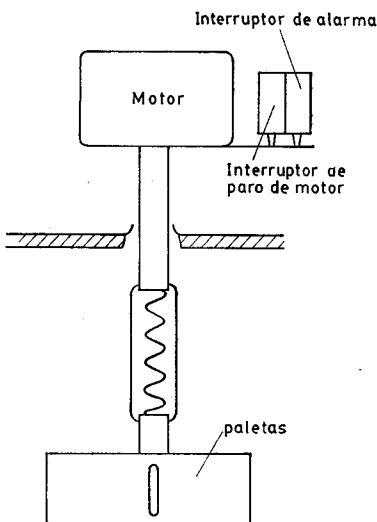


Fig. 5.22 Medidor de paletas rotativas.

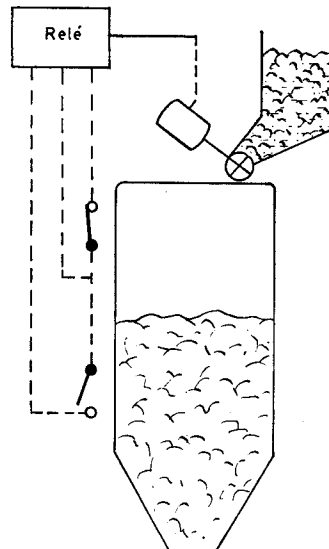


Fig. 5.23 Control de nivel de sólidos.

Cuando el material desciende más abajo del detector inferior, éste pone en marcha automáticamente la maquinaria de alimentación del producto en el silo y esta maquinaria se para tan pronto como el producto alcanza el detector de nivel superior. El ciclo vuelve a repetirse cuando, al ir vaciándose el silo, los sólidos descienden a un nivel por debajo del detector inferior.

El *medidor de radar de microondas* consta de una fuente de microondas, situada a un lado del recipiente, y un detector en el lado opuesto, en la misma horizontal. Cuando el producto alcanza dicha horizontal, la señal deja de recibirse y se excita una alarma. Se aplica en la detección de bajo nivel de sólidos abrasivos.

5.2.2 Detectores de nivel continuos

El *medidor de nivel de sondeo electromecánico* representado en la figura 5.24 consiste en un pequeño peso móvil sostenido por un cable desde la parte superior del silo mediante poleas. Un motor y un programador situados en el exterior establecen un ciclo de trabajo del peso. Éste baja suavemente en el interior de la tolva hasta que choca contra el lecho de sólidos. En este instante, el cable se afloja, y un detector adecuado invierte el sentido del movimiento del peso con lo que éste asciende hasta la parte superior de la tolva, donde se para, repitiéndose el ciclo nuevamente. Un indicador exterior señala el punto donde el peso ha invertido su movimiento indicando así el nivel en aquel momento. El instrumento se caracteriza por su sencillez, puede emplearse en el control de nivel, pero debe ser muy robusto mecánicamente para evitar una posible rotura del conjunto dentro de la tolva lo que podría dar lugar a la posible rotura de los mecanismos de vaciado.

El *medidor de nivel de báscula* (fig. 5.25) mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del conjunto tolva más producto; como el peso de la tolva es conocido, es fácil determinar el peso del producto y por lo tanto el ni-

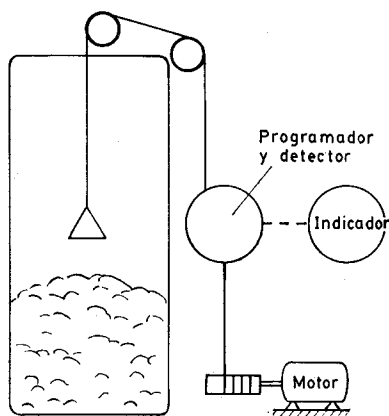


Fig. 5.24 Medidor de nivel de sondeo electromecánico.

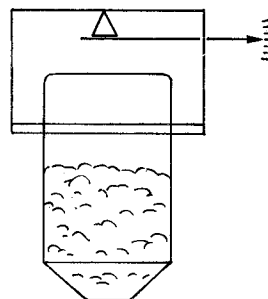


Fig. 5.25 Medidor de nivel de báscula.

vel. La tolva se apoya en una plataforma de carga actuando sobre la palanca de una báscula o bien carga sobre otros elementos de medida neumáticos, hidráulicos o eléctricos (galga extensométrica y microprocesador).

De estos elementos, uno de los más empleados es el de galga extensométrica. El lector interesado puede acudir al capítulo 7 donde se estudian estos elementos de medida.

El sistema es relativamente caro, en particular en el caso de grandes tolvas, pudiendo trabajar a altas presiones y temperaturas. Su precisión depende del sensor utilizado pudiendo variar de $\pm 0,5$ a $\pm 1\%$.

El *medidor de nivel capacitivo* (fig. 5.26) es parecido al estudiado en la medición de nivel de los líquidos con la diferencia de que tiene más posibilidades de error por la mayor adherencia que puede presentar el sólido en la varilla capacitiva. La lectura viene influida además por las variaciones de densidad del sólido. La varilla del medidor está aislada y situada verticalmente en el tanque y bien asegurada mecánicamente para resistir la caída del producto y las fuerzas generadas en los deslizamientos internos.

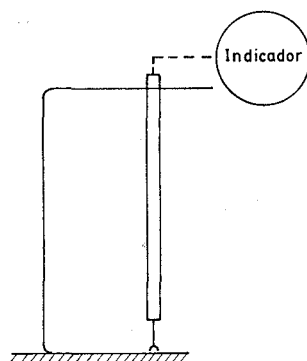


Fig. 5.26 Medidor de nivel capacitivo.

La medida está limitada a materiales en forma granular o en polvo que sean buenos aislantes, la presión y temperatura máximas de servicio pueden ser de 50 bar y 150°C y el aparato debe calibrarse para cada tipo de material. Su precisión es de unos ± 15 mm aproximadamente.

El *medidor de presión diferencial* se emplea en la medida y el control continuo del nivel de lechos fluidizados. Según puede verse en la figura 5.27 consiste en dos orificios de purga de aire situados en el depósito por debajo y por encima del lecho. Un instrumento transmisor neumático o electrónico mide la presión diferencial posterior de los dos orificios mencionados que depende del nivel del lecho fluidizado. El instrumento puede trabajar a temperaturas superiores a 300°C y posee una respuesta rápida.

El *medidor de nivel de ultrasonidos* (fig. 5.28) consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del tanque. Si el nivel de sólidos está más bajo que el haz, el sistema entra en oscilación enclavando un relé. Cuando los sólidos interceptan el haz, el sistema deja

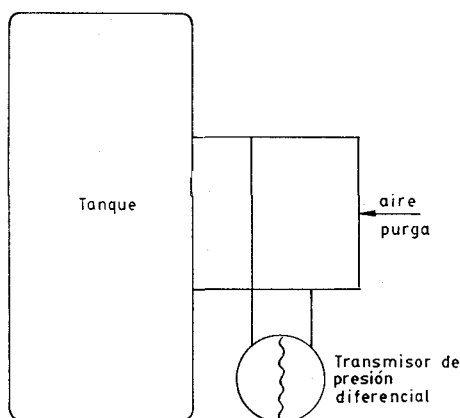


Fig. 5.27 Medidor de presión diferencial.

de oscilar y el relé se desexcita actuando sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga del depósito.

Disponiendo el haz de ultrasonidos en dirección vertical, el instrumento puede actuar como indicación continua del nivel midiendo el tiempo de tránsito de un impulso ultrasónico, entre la fuente emisora, la superficie del producto donde se refleja y el receptor situado en la propia fuente.

Como la superficie de la mayor parte de los productos sólidos reflejan en mayor o menor grado los ultrasonidos, el sistema es adecuado para la mayor parte de los sólidos con mucho polvo, alta humedad, humos o vibraciones, y puede emplearse tanto en materiales opacos como transparentes. Sin embargo, si la superficie del material no es nítida, el sistema es susceptible de dar señales erróneas. El uso del ordenador permite resolver este inconveniente, al almacenar el perfil ultrasónico del lecho del sólido e interpretarlo para obtener el nivel co-

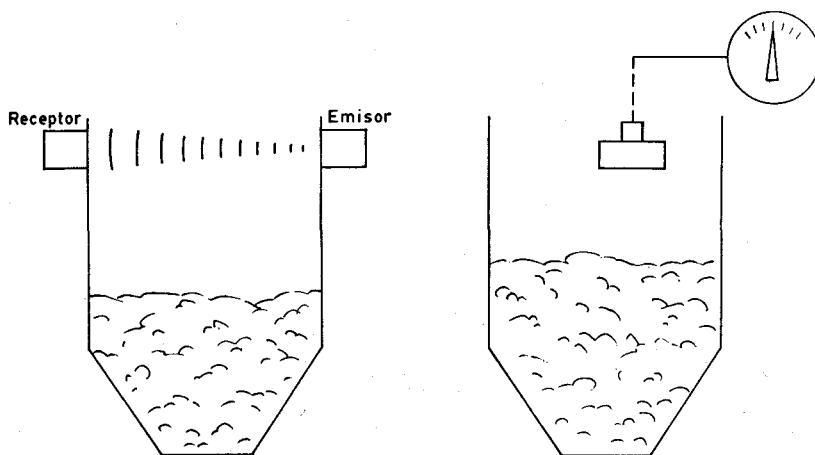


Fig. 5.28 Medidor de nivel de ultrasonidos.

recto del sólido. Asimismo, el ordenador proporciona características de autocomprobación («self-checking») del instrumento de medida.

Su precisión es de $\pm 0,15$ a $\pm 1\%$, puede construirse a prueba de explosión, pudiendo trabajar a temperaturas de hasta 150°C .

El *medidor de radar de microondas* consta de una fuente de microondas situada en la parte superior del tanque que emite un haz de microondas que se refleja sobre el sólido y es captado por un detector. El sistema es ideal en productos muy viscosos como el asfalto. Su precisión es de $\pm 2\text{ mm}$ y su campo de medida puede llegar a 40 metros.

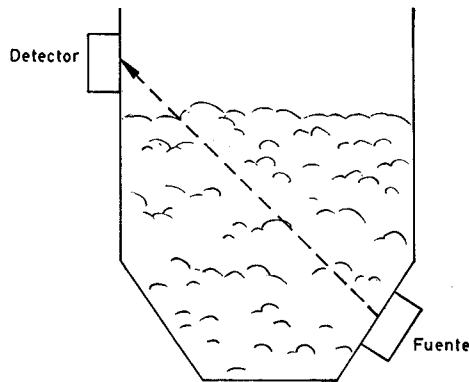


Fig. 5.29 Medidor de nivel de radiación.

El *medidor de nivel de radiación* (fig. 5.29) es parecido al instrumento estudiado en la determinación del nivel de líquidos. Consiste en una fuente radiactiva de rayos gamma, dispuesta al exterior y en la parte inferior del tanque, que emite su radiación a través del lecho de sólidos siendo captada por un detector exterior. El grado de radiación recibida depende del espesor de sólidos que se encuentra entre la fuente y el receptor. La fuente radiactiva y el receptor pueden disponerse también en un plano horizontal, en cuyo caso el aparato trabaja como detector discontinuo todo-nada.

El instrumento puede trabajar a altas temperaturas hasta unos 1300°C , presiones máximas de 130 bar, en materiales peligrosos o corrosivos, no requiere ninguna abertura o conexión a través del tanque y admite control neumático o electrónico. Sin embargo, es un sistema de coste elevado que necesita una supervisión periódica desde el punto de vista de seguridad, debe calibrarse para cada tanque y no puede aplicarse a materiales a los que afecte la radiactividad.

Su precisión es de $\pm 1\%$ y su campo de medida de 0,5 m por cada fuente, pudiendo emplearse varias para aumentar el intervalo de medida del nivel.

En la tabla 5.2 figuran las características principales de los medidores de nivel de sólidos.

Tabla 5.2 Características de los medidores de nivel de sólidos

Tipo	Punto fijo		Continuo	Precisión en % de toda la escala	Temperaturas máxima de servicio °C	Tanques		Desventajas	Ventajas
	Alto	Bajo				Abiertos	Cerrados		
Diafragma	Sí	Sí	No	50 mm	60	Sí	Sí	No admite materiales granulares > 80 mm. Tanques a baja presión	Bajo coste, sensible a materiales de variada densidad
Cono suspendido	Sí	Sí	»	50 mm	60	»	No	Debe estar protegido	Bajo coste
Varilla flexible	Sí	No	»	25 mm	300	»	No	Relé retardo, sólo nivel alto	Muy sensible
Conductivo	Sí	Sí	»	25 mm	300	»	Sí	Conductividad materiales	Tanques a presión
Paletas rotativas	Sí	Sí	»	25 mm	60	»	No	Tanques abiertos o a baja presión	Materiales diversos, a prueba de explosión
Sondeo electromecánico	—	—	Sí	± 1 %	60	»	No	Resistencia mecánica media	Sencillo
Báscula	—	—	»	± 0,5-1 %	900	»	Sí	Coste elevado	Preciso y seguro, altas presión y temperatura
Capacitivo	—	—	»	15 mm	150	»	Sí	Materiales aislantes, calibración individual, adherencias producto	Bajo coste
Presión diferencial	—	—	Sí	—	300	»	Sí	Coste medio, posible obturación orificio purga	Respuesta rápida
Ultrasonidos	Sí	Sí	»	± 0,5-1 %	150	»	Sí	Coste medio	Materiales opacos y transparentes, a prueba de explosión
Radar	Sí	Sí	»	± 2 mm	150	»	Sí	Coste medio	Productos muy viscosos
Radiación	»	»	»	± 0,5-1 %	1.300	»	Sí	Coste elevado, supervis. seguridad, calibr. individual varias fuentes	Tanque sin aberturas, productos corrosivos y peligrosos, altas presiones y temperaturas

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

9.8.10	Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
9.9.1	Introducción.....	554
9.9.2	Nivel de energía de seguridad.....	555
9.9.3	Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
9.9.4	Clasificaciones de áreas peligrosas.....	558
9.9.5	Normas.....	560
9.9.6	Barreras Zener.....	560
9.9.7	Barreras galvánicas.....	562
9.9.8	Factores de seguridad.....	562
9.10	Control por computador.....	563
9.10.1	Generalidades.....	563
9.10.2	Control DDC.....	565
9.10.3	Control supervisor.....	568
9.10.4	Control distribuido.....	570
9.10.5	Sistemas de control avanzado.....	574
9.10.6	Sistemas expertos.....	580
9.10.7	Control por redes neuronales.....	583
9.10.8	Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>).....	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos.....	601
10.1	Introducción.....	601
10.2	Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración.....	602
10.3	Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
10.4	Calibración de instrumentos de temperatura.....	614
10.5	Comprobación de válvulas de control.....	619
10.6	Aparatos electrónicos de comprobación.....	620
10.7	Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
11.1	Generalidades.....	625
11.2	Calderas de vapor.....	625
11.2.1	Control de combustión.....	626
11.2.2	Control de nivel.....	629
11.2.3	Seguridad de llama.....	632
11.3	Secaderos y evaporadores.....	632
11.4	Horno túnel.....	635
11.5	Columnas de destilación.....	637
11.6	Intercambiadores de calor.....	638
11.7	Control del reactor en una central nuclear.....	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos.....		645
A.1	Generalidades.....	645
A.2	Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

MEDIDA DE TEMPERATURA

6.1 Introducción

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, regis-

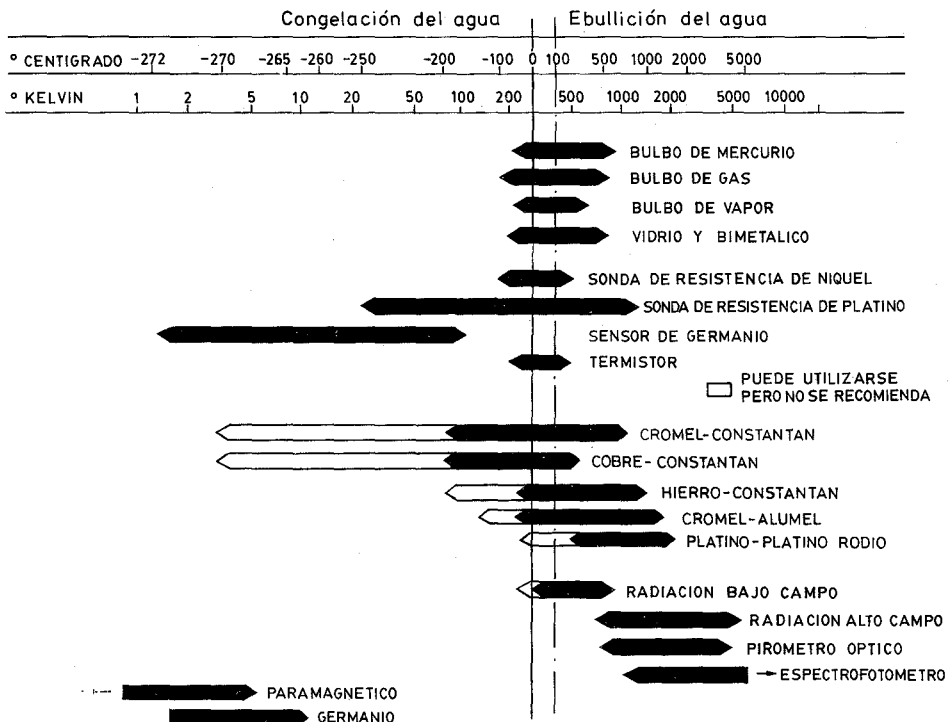


Fig. 6.1 Campo de medida de los instrumentos de temperatura.

trador o controlador necesarios; es importante señalar que es esencial una comprensión clara de los distintos métodos de medida con sus ventajas y desventajas propias para lograr una selección óptima del sistema más adecuado.

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura y entre los cuales figuran:

- a) variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases);
- b) variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia);
- c) variación de resistencia de un semiconductor (termistores);
- d) f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares);
- e) intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación);
- f) otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas, frecuencia de resonancia de un cristal...).

De este modo se emplean los instrumentos siguientes:

Termómetros de vidrio, termómetros bimetalógicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termopares, pirómetros de radiación, termómetros de resistencia, termómetros ultrasónicos, termómetros de cristal de cuarzo.

En la figura 6.1 pueden verse los instrumentos de temperatura con sus intervalos de medida.



Fig. 6.2 Termómetro de vidrio.

6.2 Termómetro de vidrio

El termómetro de vidrio (fig. 6.2) consta de un depósito de vidrio que contiene, por ejemplo, mercurio y que al calentarse se expande y sube en el tubo capilar. Los márgenes de trabajo de los fluidos empleados son:

Mercurio	— 35 hasta + 280° C
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	— 35 hasta + 450° C
Pentano	— 200 hasta + 20° C
Alcohol	— 110 hasta + 50° C
Tolueno	— 70 hasta + 100° C

6.3 Termómetro bimetalíco

Los termómetros bimetalícos se fundan en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de ferro-níquel o Invar (35,5 % de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetálicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices (fig. 6.3).

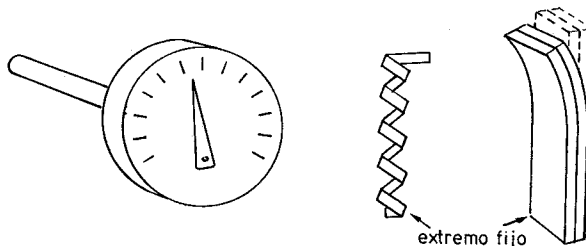


Fig. 6.3 Termómetro bimetalíco.

Un termómetro bimetalíco típico contiene pocas partes móviles, sólo la aguja indicadora sujeta al extremo libre de la espiral o de la hélice y el propio elemento bimetalíco.

El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos. No hay engranajes que exijan un mantenimiento. La precisión del instrumento es de $\pm 1\%$ y su campo de medida de -200 a $+500^{\circ}\text{C}$.

6.4 Termómetro de bulbo y capilar

Los termómetros tipo bulbo consisten esencialmente en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o el líquido en el bulbo se expanden y la espiral tiende a desenrollarse moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo.

Hay tres clases de este tipo de termómetros:

- Clase I : Termómetros actuados por líquido
- Clase II : Termómetros actuados por vapor
- Clase III: Termómetros actuados por gas
- Clase IV: Termómetros actuados por mercurio

Los termómetros actuados por líquido tienen el sistema de medición lleno de líquido y como su dilatación es proporcional a la temperatura, la escala de medición resulta uniforme. El volumen del líquido depende principalmente de la temperatura del bulbo, de la del capilar y de la del elemento de medición (tempera-

tura ambiente). Por lo tanto, para capilares cortos hasta 5 m, sólo hay que compensar el elemento de medición para evitar errores debidos a variaciones de la temperatura ambiente (clase IB) (fig. 6.4 a). Para capilares más largos hay que compensar también el volumen del tubo capilar (clase IA) (fig. 6.4 b). Los líquidos que se utilizan son: alcohol y éter.

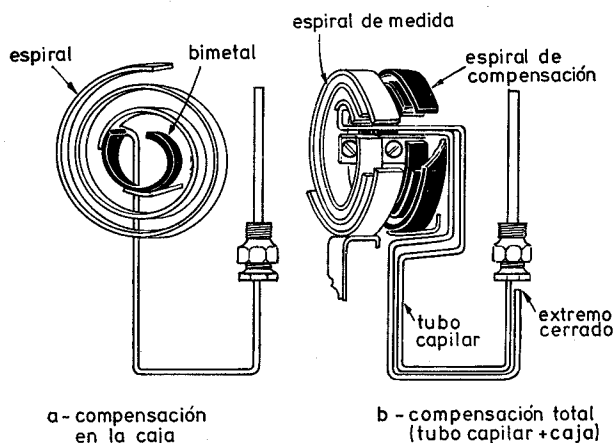


Fig. 6.4 Termómetro tipo bulbo.

El campo de medición de estos instrumentos varía entre 150 hasta 500° C, dependiendo del tipo de líquido que se emplee.

Los termómetros actuados por vapor contienen un líquido volátil y se basan en el principio de presión de vapor. Al subir la temperatura aumenta la presión

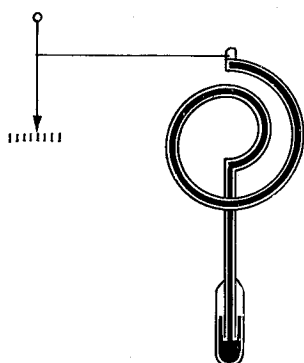


Fig. 6.5 Sistema térmico clase IIA.

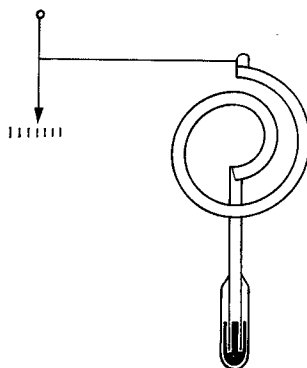


Fig. 6.6 Sistema térmico clase IIB.

de vapor del líquido. La escala de medición no es uniforme, sino que las distancias entre divisiones van aumentando hacia la parte más alta de la escala. La presión en el sistema depende solamente de la temperatura en el bulbo. Por con-

siguiente, no hay necesidad de compensar la temperatura ambiente. Si la temperatura del bulbo es mayor que la temperatura ambiente, el capilar y el elemento de medición están llenos de líquido (clase IIA) (fig. 6.5), siendo necesario corregir la indicación en la diferencia de alturas entre el bulbo y el elemento de medición.

Si la temperatura del bulbo es más baja que la ambiente, el sistema se llena de vapor (clase IIB) (fig. 6.6).

La clase IIC, opera con la temperatura del bulbo superior e inferior a la temperatura ambiente (fig. 6.7), y la clase IID trabaja con la temperatura del bulbo superior, igual e inferior a la ambiente, empleando otro líquido no volátil para transmitir la presión de vapor (fig. 6.8).

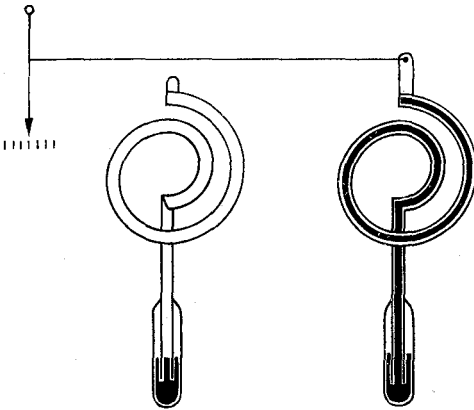


Fig. 6.7 Sistema térmico clase IIC.

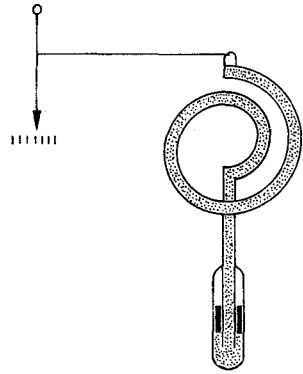


Fig. 6.8 Sistema térmico clase IID.

Los termómetros actuados por gas están completamente llenos de gas. Al subir la temperatura, la presión de gas aumenta proporcionalmente y por lo tanto estos termómetros tienen escalas lineales.

La presión en el sistema depende principalmente de la temperatura del bulbo, pero también de la temperatura del tubo capilar y del elemento de medición, siendo necesario compensar la temperatura del ambiente en el sistema de medición.

Los termómetros actuados por mercurio (clase IV) son similares a los termómetros actuados por líquidos (clase I). Pueden tener compensación en la caja y compensación total (fig. 6.4).

6.5 Termómetros de resistencia

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura que son propias del elemento de detección.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del

conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado «coeficiente de temperatura de resistencia» que expresa a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

La relación entre estos factores puede verse en la expresión lineal siguiente:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

en la que:

R_0 = resistencia en ohmios a 0° C

R_t = resistencia en ohmios a t° C

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0° y 100° C es de $0,003850 \Omega \cdot \Omega^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

Si la relación resistencia-temperatura no es lineal la ecuación general pasa a:

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + Bt^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3] \text{ válida de } -200 \text{ a } 0^\circ \text{ C}$$

o bien

$$R_t = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2) \text{ válida de } 0 \text{ a } 850^\circ \text{ C}$$

y en la que A , B , C ..., son coeficientes de temperatura de la resistencia de valores:

$$A = 3,90802 \times 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \times 10^{-7}$$

$$C = -4,27350 \times 10^{-12}$$

En la figura 6.9 pueden verse las curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura.

Los materiales que forman el conductor de la resistencia deben poseer las siguientes características:

1. Alto coeficiente de temperatura de la resistencia, ya que de este modo el instrumento de medida será muy sensible.
2. Alta resistividad, ya que cuanto mayor sea la resistencia a una temperatura dada tanto mayor será la variación por grado (mayor sensibilidad).
3. Relación lineal resistencia-temperatura.
4. Rigidez y ductilidad, lo que permite realizar los procesos de fabricación de estirado y arrollamiento del conductor en las bobinas de la sonda, a fin de obtener tamaños pequeños (rapidez de respuesta).
5. Estabilidad de las características durante la vida útil del material.

Los materiales que se usan normalmente en las sondas de resistencia son el platino y el níquel.

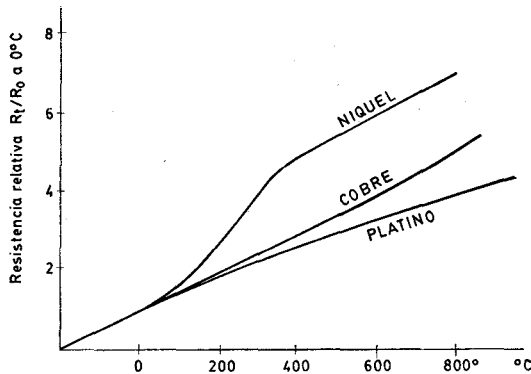


Fig. 6.9 Curvas de resistencia relativa de varios metales en función de la temperatura.

TABLA 6.1 Características de sondas de resistencia

Metal	Resistividad $\mu\Omega/\text{cm}$	Coefficiente temp. $\Omega/\Omega, ^\circ\text{C}$	Intervalo útil de temp. $^\circ\text{C}$	\varnothing mín. de hilo mm	Coste relativo	Resis. sonda a 0°C , ohmios	Preci- sión $^\circ\text{C}$
Platino	9,83	0,00385	— 200 a 950	0,05	Alto	25, 100, 130	0,01
Níquel	6,38	0,0063 a 0,0066	— 150 a 300	»	Medio	100	0,50
Cobre	1,56	0,00425	— 200 a 120	»	Bajo	10	0,10

El platino es el material más adecuado desde el punto de vista de precisión y de estabilidad pero presenta el inconveniente de su coste. En general la sonda de resistencia de platino utilizada en la industria tiene una resistencia de 100 ohmios a 0°C .

El níquel es más barato que el platino y posee una resistencia más elevada con una mayor variación por grado, sin embargo, tiene como desventaja la falta de linealidad en su relación resistencia-temperatura y las variaciones que experimenta su coeficiente de resistencia según los lotes fabricados.

El cobre tiene una variación de resistencia uniforme, es estable y barato, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad.

En la tabla 6.1 se indican las características de las sondas de resistencia de platino, de níquel y de cobre, y en la tabla 6.2 los valores de resistencia de las sondas de Pt 100. A señalar que la misma tabla es válida para termorresistencias Pt 500 (500 ohmios a 0°C) y Pt 1000 (1.000 ohmios a 0°C) multiplicando los valores correspondientes por 5 y por 10 respectivamente. El error en la lectura de los valores de las sondas (tolerancia) es:

TABLA 6.2 Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt 100 con coeficiente de variación de resistencia 0,00385 según DIN 43.760 (IPTS-68)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<i>Resistencia en ohmios</i>									
— 220	10,408									
— 210	14,360	13,951	13,546	13,145	12,746	12,350	11,955	11,565	11,177	10,793
— 200	18,530	18,109	17,689	17,268	16,849	16,429	16,012	15,595	15,182	14,769
— 190	22,782	22,354	21,928	21,501	21,073	20,646	20,221	19,796	19,373	18,950
— 180	27,049	26,623	26,197	25,771	25,345	24,918	24,492	24,064	23,637	23,209
— 170	31,280	30,859	30,437	30,015	29,592	29,169	28,746	28,322	27,989	27,473
— 160	35,478	35,060	34,641	34,222	33,803	33,383	32,963	32,543	32,122	31,701
— 150	39,651	39,234	38,818	38,401	37,984	37,567	37,150	36,732	36,315	35,897
— 140	43,802	43,387	42,973	42,559	42,144	41,729	41,314	40,898	40,483	40,067
— 130	47,932	47,520	47,107	46,695	46,282	45,869	45,456	45,043	44,629	44,215
— 120	52,041	51,631	51,221	50,811	50,400	49,989	49,578	49,167	48,755	48,344
— 110	56,131	55,722	55,314	54,906	54,497	54,088	53,679	53,270	52,861	52,451
— 100	60,201	59,794	59,388	58,982	58,575	58,168	57,761	57,354	56,946	56,538
— 90	64,252	63,847	63,443	63,083	62,634	62,229	61,823	61,418	61,012	60,607
— 80	68,282	67,880	67,478	67,075	66,673	66,270	65,866	65,463	65,059	64,656
— 70	72,291	71,892	71,419	71,091	70,690	70,290	69,889	69,487	69,086	68,684
— 60	76,279	75,882	75,483	75,085	74,687	74,288	73,889	73,490	73,091	72,691
— 50	80,250	79,854	79,457	79,061	78,664	78,267	77,870	77,472	77,075	76,677
— 40	84,212	83,816	83,420	83,024	82,628	82,232	81,836	81,439	81,043	80,647
— 30	88,170	87,774	87,378	86,983	86,587	86,191	85,745	85,399	85,003	84,607
— 20	92,127	91,731	91,336	90,940	90,545	90,149	89,753	89,357	88,962	88,566
— 10	96,072	95,679	95,285	94,891	94,496	94,102	93,707	93,312	92,917	92,522
0	100,000	99,608	99,216	98,823	98,431	98,038	97,645	97,253	96,859	96,466
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,952	102,343	102,733	103,123	103,512
10	103,902	104,292	104,681	105,070	105,460	105,894	106,238	106,627	107,015	107,404
20	107,793	108,181	108,569	108,957	109,345	109,733	110,121	110,509	110,897	111,284
30	111,671	112,059	112,446	112,833	113,220	113,607	113,993	114,380	114,766	115,153
40	115,539	115,925	116,311	116,697	117,083	117,468	117,854	118,239	118,624	119,010
50	119,395	119,780	120,164	120,549	120,934	121,318	121,702	122,087	122,471	122,855
60	123,239	123,623	124,006	124,390	124,773	125,157	125,540	125,923	126,306	126,689
70	127,071	127,454	127,837	128,219	128,601	128,983	129,365	129,747	130,129	130,511
80	130,893	131,275	131,656	132,037	132,418	132,809	133,180	133,560	133,941	134,321
90	134,702	135,082	135,463	135,843	136,223	136,602	136,982	136,362	137,741	138,121
100	138,500	138,879	139,258	139,637	140,016	140,395	140,773	141,152	141,530	141,908
110	142,286	142,664	143,042	143,420	143,798	144,175	144,553	144,930	145,307	145,684
120	146,061	146,438	146,815	147,191	147,568	147,944	148,320	148,697	149,073	149,449
130	149,824	150,200	150,576	150,951	151,326	151,702	152,077	152,452	152,827	153,201
140	153,576	153,951	154,323	154,699	155,075	155,448	155,822	156,195	156,569	156,943
150	157,316	157,690	158,063	158,436	158,809	159,182	159,555	159,927	160,300	160,672
160	161,045	161,417	161,785	162,161	162,533	162,905	163,276	163,648	164,019	164,391
170	164,762	165,133	165,504	165,875	166,245	166,616	166,986	167,357	167,727	168,097
180	168,467	168,837	169,209	169,576	169,946	170,315	170,685	171,054	171,423	171,792
190	172,161	172,530	172,898	173,267	173,625	174,003	174,372	174,740	175,108	175,475
200	175,843	176,211	176,578	176,946	177,313	177,689	178,047	178,414	178,781	179,147
210	179,514	179,880	180,247	180,613	180,979	181,345	181,711	182,076	182,442	182,808
220	183,173	183,538	183,903	184,268	184,633	184,998	185,363	185,727	186,092	186,456
230	186,821	187,185	187,549	187,913	188,276	188,640	189,004	189,367	189,730	190,093
240	190,457	190,819	191,182	191,545	191,908	192,270	192,633	192,995	193,357	193,719
250	194,081	194,443	194,804	195,166	195,527	195,889	196,250	196,611	196,972	197,333
260	197,694	198,055	198,415	198,775	199,136	199,496	199,856	200,016	200,376	200,735
270	201,295	201,655	202,014	202,373	202,732	203,091	203,450	203,809	204,168	204,526
280	204,885	205,243	205,601	205,959	206,317	206,675	207,033	207,391	207,748	208,106
290	208,463	208,820	209,177	209,534	209,891	210,248	210,604	210,961	211,317	211,673
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

TABLA 6.2 (Continuación)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	<i>Resistencia en ohmios</i>									
300	212,030	212,386	212,741	213,097	213,453	213,808	214,164	214,519	214,874	215,230
310	215,585	215,939	216,294	216,649	217,003	217,358	217,712	218,066	218,429	218,774
320	219,128	219,482	219,835	220,189	220,542	220,895	220,248	221,602	221,954	222,307
330	222,660	223,012	223,365	223,717	224,069	224,421	224,773	225,125	225,477	225,829
340	226,180	226,532	226,883	227,234	227,585	227,936	228,287	228,638	228,988	229,339
350	229,689	230,039	230,389	230,739	231,089	231,439	231,789	232,138	232,488	232,837
360	233,689	233,535	233,884	234,233	234,582	234,930	235,279	235,627	235,975	236,324
370	236,672	237,020	237,367	237,715	238,063	238,410	238,757	239,105	239,452	239,799
380	240,146	240,492	240,839	241,186	241,532	241,878	242,225	242,571	242,917	243,262
390	243,608	243,954	244,299	244,645	244,990	245,335	245,680	246,025	246,370	246,715
400	247,059	247,404	247,748	248,092	248,436	248,780	249,124	249,468	249,811	250,155
410	250,498	250,842	251,185	251,528	251,871	252,214	252,556	252,899	253,242	253,584
420	253,926	254,268	254,610	254,952	255,294	255,636	255,977	256,319	256,660	257,001
430	257,342	257,683	258,024	258,365	258,706	259,046	259,387	259,727	260,067	260,407
440	260,747	261,087	261,427	261,766	262,106	262,445	262,784	263,123	263,462	263,801
450	264,140	264,479	264,817	265,156	265,494	265,832	266,170	266,508	266,846	267,184
460	267,522	267,859	268,196	268,534	268,871	269,208	269,545	269,882	270,218	270,555
470	270,891	271,228	271,564	271,900	272,236	272,572	272,908	273,244	273,579	273,914
480	274,250	274,585	274,920	275,255	275,590	275,925	276,259	276,594	276,928	277,262
490	277,597	277,931	278,265	278,598	278,932	279,266	279,599	279,932	280,266	280,599
500	280,932	281,265	281,597	281,930	282,263	282,595	282,927	283,260	283,592	283,924
510	284,255	284,587	284,919	285,250	285,582	285,913	286,244	286,575	286,906	287,237
520	287,568	287,898	288,229	288,559	288,889	289,219	289,549	289,879	290,209	290,539
530	290,868	291,198	291,527	291,856	292,185	292,514	292,843	293,172	293,500	293,829
540	294,157	294,485	294,813	295,141	295,469	295,797	296,125	296,452	296,780	297,107
550	297,434	297,761	297,089	298,415	298,742	299,069	299,395	299,722	300,048	300,374
560	300,700	301,026	301,352	301,678	302,003	302,329	302,654	302,979	303,304	303,630
570	303,954	304,279	304,604	304,928	305,253	305,577	305,901	306,226	306,550	306,873
580	307,197	307,512	307,844	308,168	308,491	308,814	309,137	309,460	309,783	310,106
590	310,428	310,751	311,073	311,395	311,717	312,039	312,361	312,683	313,005	313,326
600	313,648	313,969	314,290	314,611	314,932	315,253	315,574	315,895	316,215	316,535
610	316,856	317,176	317,496	317,816	318,136	318,455	318,775	319,094	319,414	319,733
620	320,052	320,371	320,690	321,009	321,327	321,646	321,964	322,283	322,601	322,919
630	323,237	323,555	323,873	324,190	324,508	324,825	325,142	325,459	325,776	326,093
640	326,410	326,727	327,043	327,360	327,676	327,992	328,309	328,625	328,940	329,256
650	329,572	329,887	330,203	330,518	330,833	331,148	331,463	331,778	332,093	332,408
660	332,722	333,036	333,351	333,665	333,979	334,293	334,607	334,920	335,234	335,547
670	335,861	336,174	336,487	336,800	337,113	337,426	337,738	338,051	338,363	338,675
680	338,988	339,300	339,612	339,923	340,235	340,547	340,858	341,170	341,481	341,792
690	342,103	342,414	342,725	343,035	343,346	343,656	343,967	344,277	344,587	344,897
700	345,207	345,517	345,826	346,136	346,445	346,754	347,064	347,373	347,682	347,990
710	348,299	348,608	348,916	349,225	349,533	349,841	350,149	350,457	350,765	351,072
720	351,380	351,687	351,995	352,302	352,609	352,916	353,223	353,529	353,836	354,143
730	354,449	354,755	355,061	355,367	355,673	355,979	356,285	356,591	356,896	357,201
740	357,507	357,812	358,117	358,422	358,726	359,031	359,336	359,640	359,944	360,249
750	360,553	360,857	361,160	361,464	361,768	362,071	362,375	362,678	362,981	363,284
760	363,587	363,890	364,193	364,495	364,798	365,100	365,402	365,704	366,006	366,308
770	366,610	366,912	367,213	367,515	367,816	368,117	368,418	368,719	369,020	369,321
780	369,621	369,922	370,222	370,522	370,823	371,123	371,422	371,722	372,022	372,322
790	372,621	372,920	373,220	373,519	373,818	374,116	374,415	374,714	375,013	375,311
800	375,609	375,907	376,205	376,503	376,801	377,099	377,296	377,694	377,991	378,289
810	378,586	378,883	379,180	379,477	379,773	380,070	380,366	380,662	380,959	381,255
820	381,551	381,847	382,143	382,438	382,734	383,029	383,324	383,620	383,914	384,209
830	384,504	384,799	385,094	385,388	385,682	385,977	386,271	386,565	386,859	387,153
840	387,446	387,740	388,033	388,327	388,620	388,913	389,206	389,499	389,791	390,084
850	390,377									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Clase	Precisión, °C
A	$0,15 + 0,002 \times |t|$
B	$0,3 + 0,005 \times |t|$

$|t|$ = módulo de la temperatura en °C sin signo.

Las bobinas que llevan arrollado el hilo de resistencia están encapsuladas y situadas dentro de un tubo de protección o vaina de material adecuado al fluido del proceso (acero, acero inox. 304, acero inox. 316, hastelloy, monel, etc.). En la figura 6.10 pueden verse varios tipos de sondas.

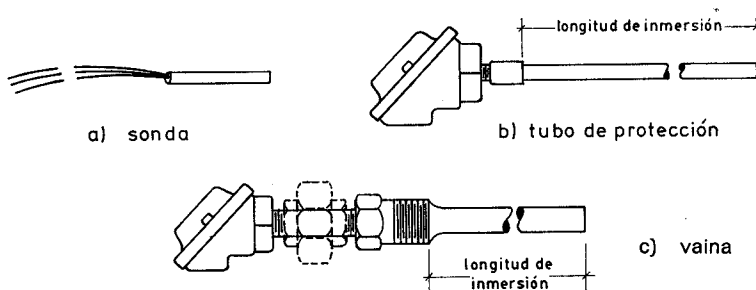


Fig. 6.10 Tipos de sondas de resistencia.

La variación de resistencia de las sondas es medida con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes denominados de dos hilos, de tres hilos o de cuatro hilos, según sean los hilos de conexión de la sonda de resistencia al puente. En la figura 6.11 pueden verse estos distintos tipos de montaje.

En el montaje de dos hilos (fig. 6.11 a) la sonda de resistencia se conecta a uno de los brazos del puente y se varía R_3 hasta que se anula la desviación del galvanómetro. En este instante, se cumple la ecuación

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x}$$

de aquí $x = R_3 \times \frac{R_2}{R_1}$ como valor de la sonda de resistencia.

Es el montaje más sencillo, pero presenta el inconveniente de que la resistencia de los hilos a y b de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura, y esta variación falsea por lo tanto la indicación; aunque estos hilos sean de baja resistencia (gran diámetro) y ésta sea conocida, las longitudes que puede haber en campo entre la sonda y el panel donde esté el instrumento receptor, añaden una cierta resistencia al brazo de la sonda.

En efecto, la ecuación anterior pasa a:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{x + K(a + b)}$$

con x = valor resistencia desconocida

K = coeficiente de resistencia por unidad de longitud

a y b = longitudes de los hilos de conexión de la sonda al puente.

El montaje de dos hilos se emplea, pues, con resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando la lectura no necesita ser demasiado exacta.

El montaje de tres hilos (fig. 6.11 b) es el más utilizado en la práctica. En este circuito la sonda está conectada mediante tres hilos al puente. De este modo, la medida no es afectada por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que ésta influye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

En efecto, en la figura puede verse que la ecuación correspondiente es:

$$\frac{R_1}{R_3 + Ka} = \frac{R_2}{x + Kb}$$

y como $Ka = Kb$, haciendo $R_2/R_1 = 1$, R_3 puede ajustarse a un valor igual a x para que el galvanómetro no indique tensión.

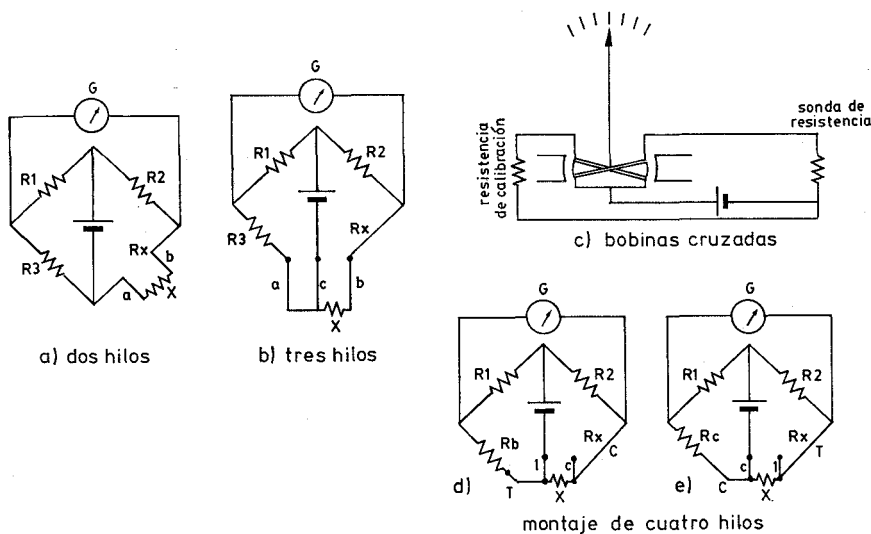


Fig. 6.11 Tipos de circuitos de puente de Wheatstone a sondas de resistencia.

Hace un tiempo se utilizaba un instrumento de bobinas cruzadas representado en la figura 6.11 c en lugar de un galvanómetro y en montaje de tres hilos para eliminar las variaciones de resistencia de las líneas de conexión.

El instrumento dispone de una resistencia de calibración que inicialmente equivale a la resistencia de medida.

De este modo, por ambas bobinas pasa la misma corriente, compensándose sus efectos y permaneciendo estacionario el índice. Al elevarse la temperatura de la sonda crece su resistencia, desequilibrando el instrumento y señalando el índice un nuevo valor proporcional al aumento de temperatura de la sonda.

El montaje de cuatro hilos (figs. 6.11 *d* y *e*) se utiliza para obtener la mayor precisión posible en la medida, como es el caso de calibración de patrones de resistencia en laboratorio. Se basa en efectuar dos mediciones de la resistencia de la sonda combinando las conexiones de modo tal que la sonda pase de un brazo del puente al adyacente. De este modo se compensan las resistencias desiguales de los hilos de conexión y el valor de la resistencia equivale al promedio de los valores determinados en las dos mediciones.

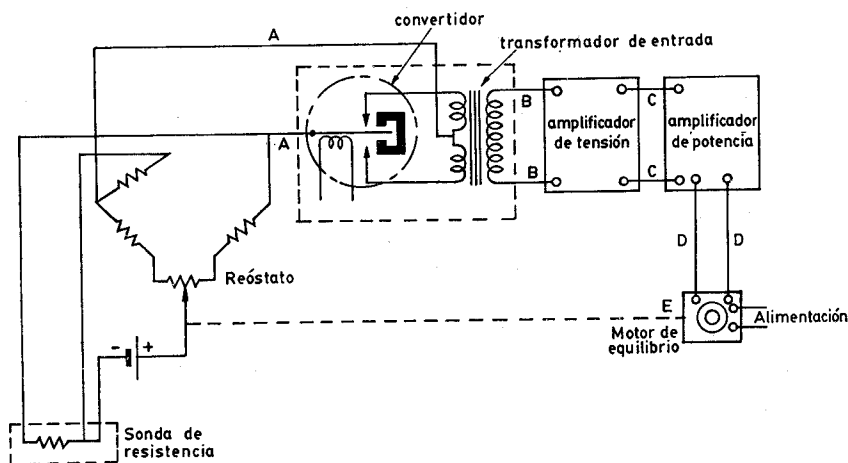


Fig. 6.12 Puente de Wheatstone para sonda de resistencia.

La medición automática de la resistencia y por lo tanto de la temperatura se lleva a cabo mediante instrumentos autoequilibrados que utilizan un circuito de puente de Wheatstone. En la figura 6.12 puede verse uno de estos instrumentos. La sonda de resistencia está conectada al puente mediante un circuito de tres hilos. Si el puente está desequilibrado la señal de error en forma de tensión continua que aparece en *AA* (fig. 6.12) es convertida a una tensión alterna (*BB*) y amplificada en tensión (*CC*) y potencia (*DD*), para excitar el motor de equilibrio *E*. Éste se mueve en la dirección adecuada para equilibrar el puente a través del brazo móvil del reóstato que al mismo tiempo acciona los mecanismos asociados de indicación, registro y control.

Otros instrumentos utilizan un puente de capacidades con un condensador variable cuya posición está calibrada en función de la temperatura, alimentándo-

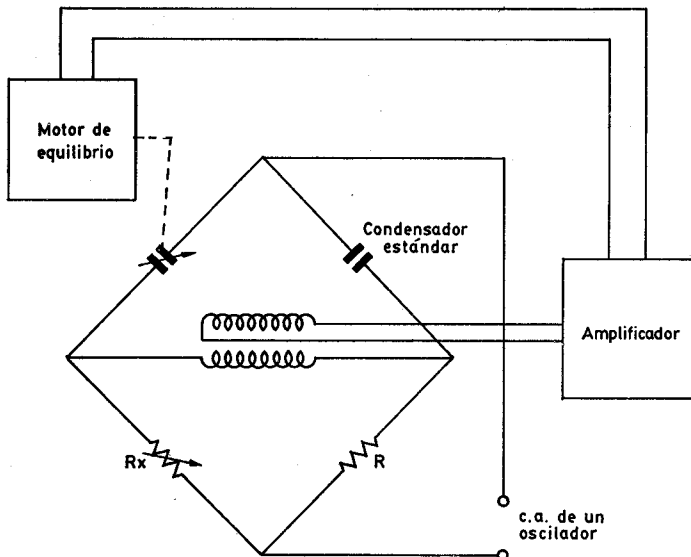


Fig. 6.13 Puente de capacidades para sonda de resistencia.

se el circuito con la tensión alterna estabilizada de un oscilador. En la figura 6.13 puede verse uno de estos instrumentos en el que puede observarse en forma análoga al circuito de puente de Wheatstone que, ante una señal de error el amplificador alimenta el motor de equilibrio que acciona el condensador variable.

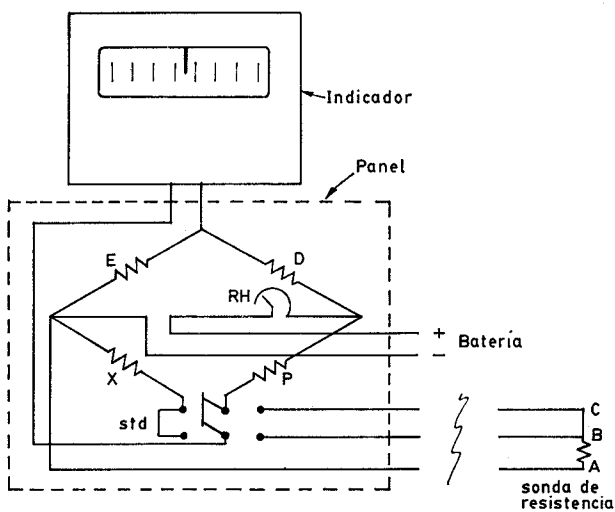


Fig. 6.14 Indicador galvanométrico de puente de resistencias.

Otro instrumento es el indicador galvanométrico de puente de resistencias (fig. 6.14). Su ajuste se realiza colocando el interruptor en la posición STD (estandarización) para incluir la resistencia X en el circuito puente, y ajustando el reóstato RH hasta que el indicador señala la lectura más baja de la escala. Seguidamente se pasa el interruptor a la posición de conexión de la sonda pudiendo ya leerse directamente la temperatura.

La adición de un microprocesador a la sonda de resistencia permite obtener un transmisor «inteligente» con la posibilidad del cambio automático del sensor o del campo de medida, la obtención por hardware o software de puentes de Wheatstone o de capacidades de distintas características, etc.

6.6 Termistores

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado, por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados.

La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dada por la expresión

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

en la que:

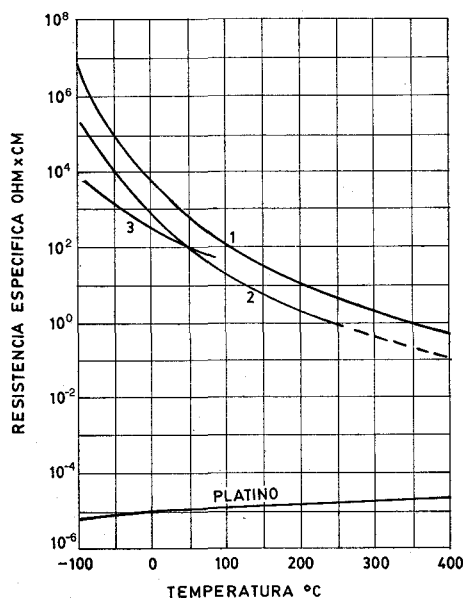


Fig. 6.15 Curvas características de termistores

R_t = resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T_t

R_o = resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_o

β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas

En la figura 6.15 pueden verse las curvas características de dos tipos de materiales de termistores en comparación con la del platino.

Hay que señalar que para obtener una buena estabilidad en los termistores es necesario envejecerlos adecuadamente, tal como se indica en la figura 6.16. Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura poseen una mayor sensibilidad que las sondas de resistencia estudiadas y permiten incluso intervalos de medida de 1°C (*span*). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de 0,5 a 10 segundos.

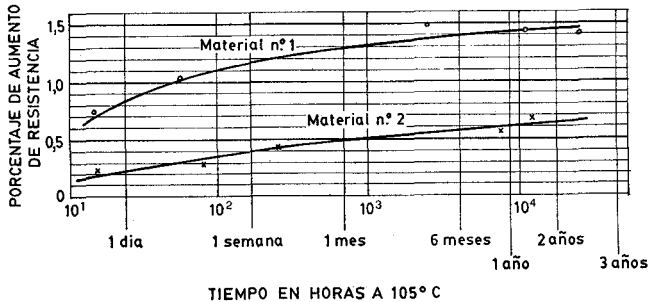


Fig. 6.16 Curvas de estabilidad de termistores según el grado de envejecimiento.

La distancia entre el termistor y el instrumento de medida puede ser considerable siempre que el elemento posea una alta resistencia comparada con la de los cables de unión. La corriente que circula por el termistor a través del circuito de medida debe ser baja para garantizar que la variación de resistencia del elemento sea debida exclusivamente a los cambios de temperatura del proceso.

Los termistores encuentran su principal aplicación en la medición, la compensación y el control de temperatura, y como medidores de temperatura diferencial.

6.7 Termopares

6.7.1 Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección

El *termopar* se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas

uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura (fig. 6.17). Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

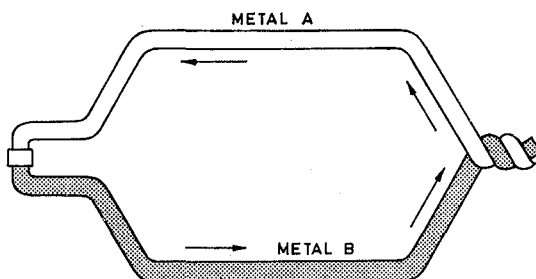
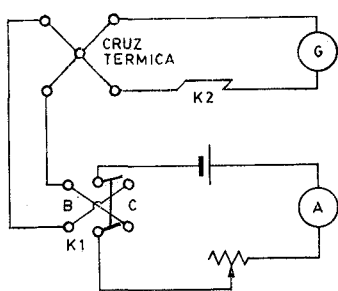


Fig. 6.17 Termopar.

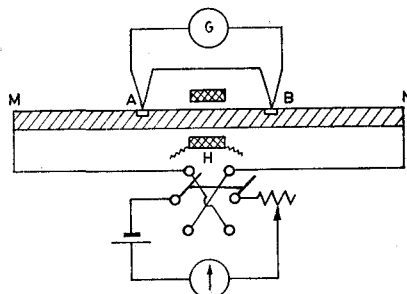
El efecto Peltier puede ponerse de manifiesto en el montaje de la figura 6.18 a. En una cruz térmica formada por la unión en su centro de dos metales distintos se hace pasar una corriente en uno u otro sentido con el interruptor K_2 abierto. Después de cada paso de corriente se abre K_1 (desconectándose la pila) y se cierra K_2 leyendo en el galvanómetro la f.e.m. creada, que es proporcional a la temperatura alcanzada por la cruz térmica en cada caso.

Se observará que restando el calentamiento óhmico, que es proporcional al cuadrado de la corriente, queda un remanente de temperatura que en un sentido de circulación de la corriente es positivo y negativo en el sentido contrario. El efecto depende de los metales que forman la unión.

El efecto Thomson puede detectarse en el circuito de la figura 6.18 b formado por una barra metálica MN , con un termopar diferencial AB aislado y una



a) Efecto Peltier



b) Efecto Thomson

Fig. 6.18 Efectos Peltier y Thomson.

bobina H para calentamiento eléctrico centrada con relación a AB . En régimen, calentando con la bobina H uno de los puntos, el B por ejemplo, se presentará una diferencia de temperaturas con el A , lo que se acusará en el galvanómetro; si ahora se hace pasar una corriente por la barra MN , se notará un aumento o disminución de la temperatura diferencial con el efecto contrario si se invierte la corriente.

La combinación de los dos efectos, de Peltier y de Thomson, es la causa de la circulación de corriente al cerrar el circuito en el termopar. Esta corriente puede calentar el termopar y afectar la precisión en la medida de la temperatura, por lo que durante la medición debe hacerse mínimo su valor.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

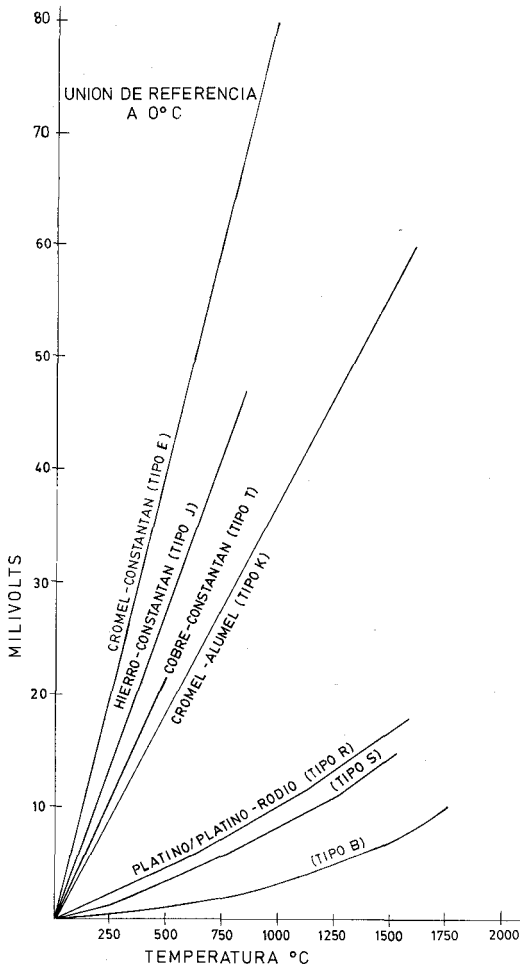


Fig. 6.19 Curvas características f.e.m./temperatura de los termopares.

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A a otro punto B , la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B .
3. Ley de las temperaturas sucesivas. La f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T_1 y T_3 es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a T_1 y T_2 y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T_2 y T_3 .

Por estas leyes se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. Los valores de esta f.e.m. están tabulados en tablas de conversión con la unión de referencia a 0°C . En la figura 6.19 se presentan las curvas características de los termopares.

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo coste y de baja resistencia eléctrica y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta sea (aproximadamente) paralelo al aumento de la temperatura.

Las tablas 6.3 y 6.4 muestran los termopares más comunes, la f.e.m. que pueden desarrollar, la temperatura más alta a que pueden trabajar satisfactoriamente y su composición química.

Figuran a continuación (tabla 6.5) tablas de valores de f.e.m. en función de la temperatura para los termopares citados.

La figura 6.20 puede utilizarse como guía en la selección de termopares.

En la medición de las temperaturas elevadas que se encuentran en la fabricación de acero en fusión se emplean cartuchos con termopares R o S que se enchufan en una lanza. El operario sumerge ésta en acero y aunque el cartucho se funde en unos segundos, da tiempo a que un circuito especial fije la máxima temperatura alcanzada.

Señalemos que el termopar tipo E, de cromel-constantán puede usarse en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora. Este termopar posee la f.e.m. más alta por variación de temperatura, y puede usarse para las temperaturas entre -200 a $+900^\circ \text{C}$.

El termopar tipo T, de cobre-constantán, tiene una elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación y puede utilizarse en atmósferas oxidantes o reductoras. Se prefiere generalmente para las medidas de temperatura entre -200 a $+260^\circ \text{C}$.

El termopar tipo J, de hierro-constantán, es adecuado en atmósferas con escaso oxígeno libre. La oxidación del hilo de hierro aumenta rápidamente por encima de 550°C , siendo necesario un mayor diámetro del hilo hasta una temperatura límite de 750°C .

Tabla 6.3. Características de termopares (Norma IEC-584-1982)

Tipo	Intervalo de medida	Límites de error del termopar			Cable de extensión Límites de		
		Clase 1	Clase 2	Clase 3	Temperatura	Error	
						Premium	Normal
Cromel-constantán tipo E	- 40 a 800° C - 40 a 900° C - 200 a 40° C	$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 1,5 \%$	- 60 a 200° C	—	$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 2 \%$
Cobre constantán tipo T	- 40 a 350° C - 40 a 350° C - 200 a 40° C	$\pm 0,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,4 \%$	$\pm 1^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$	$\pm 1^{\circ} \text{C o } \pm 1,5 \%$	- 60 a + 95° C	$\pm 0,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,5 \%$	$\pm 1^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$
Hierro constantán tipo J	- 40 a 750° C - 40 a 750° C —	$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$		0-200° C	$\pm 1^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 1,25 \%$
Cromel-Alumel tipo K	- 40° C a 1000° C - 40° C a 1200° C - 200 a 40° C	$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,4 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 1,5 \%$	0-200° C	$\pm 1^{\circ} \text{C o } \pm 0,75 \%$	$\pm 2,5^{\circ} \text{C o } \pm 2,5 \%$
Pt-Pt/Th 13 % (tipo R)	0° C a 1600° C	$\pm 1^{\circ} \text{C}$	$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,25 \%$		25 a 200° C	—	$\pm 5^{\circ} \text{C o } \pm 6 \%$
Pt-Pt/Rh 10 % (tipo S)	0° C a 1600° C						
Pt-Rh 6 %/Pt-Rh 30 % Tipo B	— 600° C a 1700° C 600° C a 1700° C		$\pm 1,5^{\circ} \text{C o } \pm 0,25 \%$	$\pm 4^{\circ} \text{C o } \pm 0,5 \%$	25 a 200° C	—	$\pm 5^{\circ} \text{C o } \pm 6 \%$

Nota: Los límites de error se expresan en °C o en % de la temperatura leída. Se aplica el valor mayor.

TABLA 6.4 Designación de los termoelementos y su composición química

Termoelemento	Composición química (en %)								
	Cr	Fe	Mn	Si	Ni	Cu	Al	Pt	Rh
JP Hierro (1)	10	99,5	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	—	—
JN o TN Constantán		—	—	—	45	55	—	—	—
TP Cobre		—	—	—	—	100	—	—	—
KP Cromel (2)		—	—	—	90	—	—	—	—
KN Alumel (2)		—	2	1	95	—	2	—	—
RP Platino con 13 % de rodio		—	—	—	—	—	—	87	13
SP Platino con 10 % de rodio		—	—	—	—	—	—	90	10
RN o SN Platino		—	—	—	—	—	—	100	—
BP Platino con 6 % de rodio								94	6
Platino con 30 % de rodio								60	3

NOTAS:

P = positivo N = negativo

- (1) El hierro, además de los elementos indicados, contiene en pequeña proporción azufre y fósforo.
 (2) Marca Hoskins Manufacturing Co.

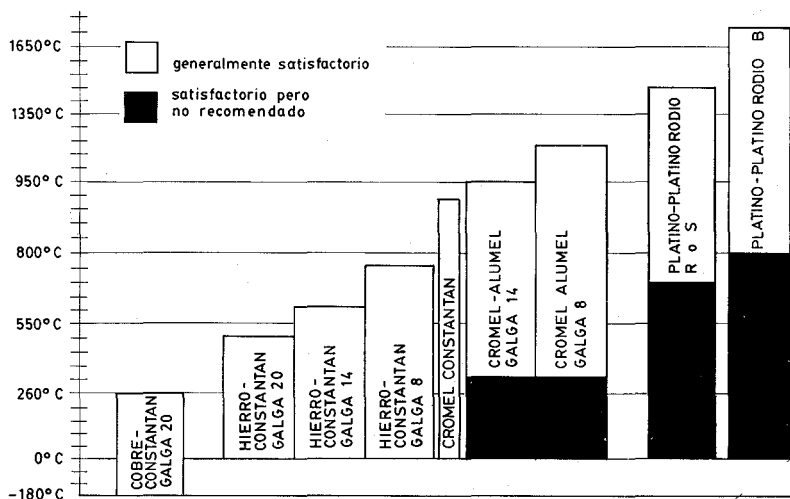


Fig. 6.20 Selección de termopares.

TABLA 6.5 F.e.m. de los termopares en función de la temperatura en °C con la unión de referencia a 0° C

(IPTS 1968)													
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C	
Tipo E													
<i>Milivoltios</i>													
-270	-9,835											-270	
-260	-9,797	-9,802	-9,808	-9,813	-9,817	-9,821	-9,825	-9,828	-9,831	-9,833		-260	
-250	-9,719	-9,728	-9,737	-9,746	-9,754	-9,762	-9,770	-9,777	-9,784	-9,791		-250	
-240	-9,604	-9,617	-9,630	-9,642	-9,654	-9,666	-9,677	-9,688	-9,699	-9,709		-240	
-230	-9,455	-9,475	-9,488	-9,503	-9,519	-9,534	-9,549	-9,563	-9,577	-9,591		-230	
-220	-9,274	-9,293	-9,313	-9,332	-9,350	-9,368	-9,386	-9,404	-9,421	-9,438		-220	
-210	-9,063	-9,085	-9,107	-9,129	-9,151	-9,172	-9,193	-9,214	-9,234	-9,254		-210	
-200	-8,824	-8,850	-8,874	-8,899	-8,923	-8,947	-8,971	-8,994	-8,017	-8,040		-200	
-190	-8,561	-8,588	-8,615	-8,642	-8,669	-8,696	-8,722	-8,748	-8,774	-8,799		-190	
-180	-8,273	-8,303	-8,333	-8,362	-8,391	-8,420	-8,449	-8,477	-8,505	-8,533		-180	
-170	-7,936	-7,995	-7,027	-7,058	-7,090	-7,121	-7,152	-7,183	-7,213	-7,243		-170	
-160	-7,631	-7,665	-7,699	-7,733	-7,767	-7,800	-7,833	-7,866	-7,898	-7,931		-160	
-150	-7,279	-7,315	-7,351	-7,387	-7,422	-7,458	-7,493	-7,528	-7,562	-7,597		-150	
-140	-6,907	-6,945	-6,983	-7,020	-7,058	-7,095	-7,132	-7,169	-7,206	-7,243		-140	
-130	-6,516	-6,556	-6,596	-6,635	-6,675	-6,714	-6,753	-6,792	-6,830	-6,869		-130	
-120	-6,107	-6,149	-6,190	-6,231	-6,273	-6,314	-6,354	-6,395	-6,436	-6,476		-120	
-110	-5,680	-5,724	-5,767	-5,810	-5,853	-5,896	-5,938	-5,981	-5,023	-5,065		-110	
-100	-5,237	-5,282	-5,327	-5,371	-5,416	-5,460	-5,505	-5,549	-5,593	-5,637		-100	
-90	-4,777	-4,824	-4,870	-4,916	-4,963	-5,009	-5,055	-5,100	-5,146	-5,191		-90	
-80	-4,301	-4,350	-4,398	-4,446	-4,493	-4,541	-4,588	-4,636	-4,683	-4,730		-80	
-70	-3,811	-3,860	-3,910	-3,959	-4,009	-4,058	-4,107	-4,156	-4,204	-4,253		-70	
-60	-3,306	-3,357	-3,408	-3,459	-3,509	-3,560	-3,610	-3,661	-3,711	-3,761		-60	
-50	-2,787	-2,839	-2,892	-2,944	-2,996	-3,048	-3,100	-3,152	-3,203	-3,254		-50	
-40	-2,254	-2,308	-2,362	-2,416	-2,469	-2,522	-2,575	-2,628	-2,681	-2,734		-40	
-30	-1,709	-1,764	-1,819	-1,874	-1,929	-1,983	-2,038	-2,092	-2,146	-2,200		-30	
-20	-1,151	-1,208	-1,264	-1,320	-1,376	-1,432	-1,487	-1,543	-1,599	-1,654		-20	
-10	-0,581	-0,639	-0,696	-0,754	-0,811	-0,868	-0,925	-0,982	-1,038	-1,095		-10	
-0	0,000	-0,059	-0,117	-0,176	-0,234	-0,292	-0,350	-0,408	-0,466	-0,524		-0	
0	0,000	0,059	0,118	0,176	0,235	0,295	0,354	0,413	0,472	0,532		0	
10	0,591	0,651	0,711	0,770	0,830	0,890	0,950	1,011	1,071	1,131		10	
20	1,192	1,252	1,313	1,373	1,434	1,495	1,556	1,617	1,678	1,739		20	
30	1,801	1,862	1,924	1,985	2,047	2,109	2,171	2,233	2,295	2,257		30	
40	2,419	2,482	2,544	2,607	2,669	2,732	2,795	2,858	2,421	2,984		40	
50	3,047	3,110	3,173	3,237	3,300	3,364	3,428	3,491	3,555	3,619		50	
60	3,683	3,748	3,812	3,876	3,941	4,005	4,070	4,134	4,199	4,264		60	
70	4,329	4,394	4,459	4,524	4,590	4,655	4,720	4,786	4,852		70		
80	4,983	5,049	5,115	5,181	5,247	5,314	5,380	5,446	5,513	5,579		80	
90	5,646	5,713	5,780	5,846	5,913	5,981	6,048	6,115	6,182	6,250		90	
100	6,317	6,385	6,452	6,520	6,588	6,656	6,724	6,792	6,860	6,928		100	
110	6,996	6,064	7,133	7,201	7,270	7,339	7,407	7,476	7,545	7,614		110	
120	7,683	7,752	7,821	7,890	7,960	8,029	8,099	8,168	8,238	8,307		120	
130	8,377	8,447	8,517	8,587	8,657	8,727	8,797	8,867	8,938	9,008		130	
140	9,078	9,149	9,220	9,290	9,361	9,432	9,503	9,573	9,644	9,715		140	
150	9,787	9,858	9,929	10,000	10,072	10,143	10,215	10,286	10,358	10,429		150	
160	10,501	10,573	10,645	10,717	10,789	10,861	10,933	11,005	11,077	11,150		160	
170	11,222	11,294	11,367	11,439	11,512	11,585	11,657	11,730	11,803	11,876		170	
180	11,949	12,022	12,095	12,168	12,241	12,314	12,387	12,461	12,534	12,608		180	
190	12,681	12,755	12,828	12,902	12,975	13,049	13,123	13,197	13,271	13,345		190	
200	13,419	13,493	13,567	13,640	13,715	13,789	13,864	13,938	13,012	13,087		200	
210	14,161	14,236	14,310	14,385	14,460	14,534	14,609	14,684	14,759	14,834		210	
220	14,090	14,984	15,059	15,134	15,209	15,284	15,359	15,435	15,510	15,585		220	
230	15,661	15,736	15,812	15,887	15,963	16,038	16,114	16,190	16,266	16,341		230	
240	16,417	16,493	16,569	16,645	16,721	16,797	16,873	16,949	17,025	17,101		240	

TABLA 6.5 (Continuación)

(<i>IPTS 1968</i>)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
250	17,178	17,254	17,330	17,406	17,483	17,559	17,636	17,712	17,789	17,865		250
260	17,942	18,018	18,095	18,172	18,248	18,325	18,402	18,479	17,556	18,633		260
270	18,710	18,787	18,864	18,941	19,018	19,095	19,172	19,249	19,326	19,404		270
280	19,481	19,558	19,636	19,713	19,790	19,868	19,945	20,023	20,100	20,178		280
290	20,256	20,333	20,411	20,488	20,566	20,644	20,722	20,800	20,877	20,955		290
300	21,033	21,111	21,189	21,267	21,345	22,423	21,501	21,579	21,657	21,735		300
310	21,814	21,892	21,970	22,048	22,127	22,205	22,283	22,362	22,440	22,518		310
320	22,597	22,675	22,754	22,832	22,911	22,989	23,068	23,147	23,225	23,304		320
330	23,383	23,461	23,540	23,619	23,698	23,777	23,855	23,934	24,013	24,092		330
340	24,171	24,250	24,329	24,408	24,487	24,566	24,645	24,724	24,803	24,882		340
350	24,961	25,041	25,120	25,199	25,278	25,357	25,437	25,516	25,595	25,675		350
360	25,754	25,833	25,913	25,992	26,072	26,151	26,230	26,310	26,389	26,469		360
370	26,549	26,628	26,708	26,787	26,867	26,947	26,026	27,106	27,186	27,265		370
380	27,345	27,425	27,504	27,584	27,664	27,744	27,824	27,903	27,983	28,063		380
390	28,143	28,223	28,303	28,383	28,463	28,543	28,623	28,703	28,783	28,863		390
400	28,943	29,023	29,103	29,830	29,263	29,343	29,423	29,503	29,584	29,664		400
410	29,744	29,824	29,904	29,984	30,065	30,145	30,225	30,305	30,386	30,466		410
420	30,546	30,627	30,707	30,787	30,868	30,948	31,028	31,109	31,189	31,270		420
430	31,350	31,430	31,511	31,591	31,672	31,752	31,833	31,913	31,994	31,074		430
440	32,155	32,235	32,316	32,396	32,477	32,558	32,638	32,719	32,799	32,880		440
450	32,960	33,041	33,122	33,202	33,283	33,364	33,444	33,525	33,605	33,686		450
460	33,767	33,848	33,928	34,009	34,090	34,170	34,251	34,332	34,413	34,493		460
470	34,574	34,655	34,736	34,816	34,897	34,978	35,059	35,140	35,220	35,301		470
480	35,382	35,463	35,544	35,624	35,705	35,786	35,867	35,948	36,029	36,109		480
490	36,190	36,271	36,352	36,433	36,514	36,595	36,675	36,756	36,837	36,918		490
500	36,999	37,080	37,161	37,242	37,323	37,403	37,484	37,565	37,646	37,727		500
510	37,808	37,889	37,970	38,051	38,132	38,213	38,293	38,374	38,455	38,536		510
520	38,617	38,698	38,779	38,860	38,941	39,022	39,103	39,184	39,264	39,345		520
530	39,426	39,507	39,588	39,669	39,750	39,831	39,912	39,993	40,074	40,155		530
540	40,236	40,316	40,397	40,478	40,559	40,640	40,721	40,802	40,883	40,964		540
550	41,045	41,125	41,206	41,287	41,368	41,449	41,530	41,611	41,692	41,773		550
560	41,853	41,934	42,015	42,096	42,177	42,258	42,339	42,419	42,500	42,581		560
570	42,662	42,743	42,824	42,904	42,985	43,066	43,147	43,228	43,309	43,389		570
580	43,470	43,551	43,632	43,712	43,793	43,874	43,955	44,035	44,116	44,197		580
590	44,278	44,358	44,439	44,520	44,601	44,681	44,762	44,843	44,923	45,004		590
600	45,085	45,165	45,246	45,327	45,407	45,488	45,569	45,649	45,730	45,811		600
610	45,891	45,972	46,052	46,133	46,213	46,294	46,375	46,455	46,536	46,616		610
620	46,697	46,777	46,858	46,938	47,019	47,099	47,180	47,260	47,341	47,421		620
630	47,502	47,582	47,663	47,743	47,824	47,904	47,984	48,065	48,145	48,226		630
640	48,306	48,386	48,467	48,547	48,627	48,708	48,788	48,868	48,949	49,029		640
650	49,109	49,189	49,270	49,350	49,430	49,510	49,591	49,671	49,751	49,831		650
660	49,911	49,992	50,072	50,152	50,232	50,312	50,392	50,472	50,553	50,633		660
670	50,713	50,793	50,873	50,953	51,033	51,113	51,193	51,273	51,353	51,433		670
680	51,513	51,593	51,673	51,753	51,833	51,913	51,993	51,073	51,152	51,232		680
690	52,312	52,392	52,472	52,552	52,632	52,711	52,791	52,871	52,951	53,031		690
700	53,110	53,190	53,270	53,350	53,429	53,509	53,589	53,668	53,749	53,828		700
710	53,907	53,987	54,066	54,146	54,226	54,305	54,385	54,466	54,544	54,623		710
720	54,703	54,782	54,862	54,941	55,021	55,100	55,180	55,259	55,339	55,418		720
730	55,498	55,577	55,656	55,736	55,815	55,894	55,974	56,053	56,132	56,212		730
740	56,291	56,370	56,449	56,529	56,608	56,687	56,766	56,845	56,924	57,004		740
750	57,083	57,162	57,241	57,320	57,399	57,478	57,557	57,636	57,715	57,794		750
760	57,873	57,952	58,031	58,110	58,189	58,268	58,347	58,426	58,505	58,584		760
770	58,663	58,742	58,820	58,899	58,978	59,057	59,136	59,214	59,293	59,372		770
780	59,451	59,529	59,608	59,687	59,765	59,844	59,923	60,001	60,080	60,159		780
790	60,237	60,316	60,394	60,473	60,551	60,630	60,708	60,787	60,865	60,944		790

TABLA 6.5 (Continuación)

(ITS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Milivoltios												
800	61,022	61,101	61,179	61,258	61,336	61,414	61,493	61,571	61,649	61,728		800
810	61,806	61,884	61,962	62,041	62,119	62,197	62,275	62,353	62,432	62,510		810
820	62,588	62,666	62,744	62,822	62,900	62,978	63,056	63,134	63,212	63,290		820
830	63,368	63,446	63,524	63,602	63,680	63,758	63,836	63,914	63,992	64,069		830
840	64,147	64,225	64,303	64,380	64,458	64,536	64,614	64,691	64,769	64,847		840
850	64,924	65,002	65,080	65,156	65,235	65,312	65,390	65,467	65,545	65,622		850
860	65,700	65,777	65,855	65,932	66,009	66,087	66,164	66,241	66,319	66,396		860
870	66,473	66,551	66,628	66,705	66,782	66,859	66,937	67,014	67,091	67,168		870
880	67,245	67,322	67,399	67,476	67,553	67,630	67,707	67,784	67,861	67,938		880
890	68,015	68,092	68,169	68,246	68,323	68,399	68,476	68,553	68,630	68,706		890
900	68,783	68,860	68,936	69,013	69,090	69,166	69,243	69,320	69,396	69,473		900
910	69,549	69,626	69,702	69,779	69,855	69,931	70,008	70,084	70,161	70,237		910
920	70,313	70,390	70,466	70,542	70,618	70,694	70,771	70,847	70,923	70,999		920
930	71,075	71,151	71,227	71,304	71,380	71,456	71,532	71,608	71,683	71,759		930
940	71,835	71,911	71,987	72,063	72,139	72,215	72,290	72,366	72,442	72,518		940
950	72,593	72,669	72,745	72,820	72,896	72,972	73,047	73,123	73,199	73,274		950
960	73,350	73,425	73,501	73,576	73,652	73,727	73,802	73,878	73,953	74,029		960
970	74,104	74,179	74,255	74,330	74,405	74,480	74,556	74,631	74,706	74,781		970
980	74,857	74,932	75,007	75,082	75,157	75,232	75,307	75,382	75,458	75,533		980
990	75,608	75,683	75,758	75,833	75,908	75,983	76,058	76,133	76,208	76,283		990
1.000	76,358											1.000

TIPO T

Milivoltios

-270	-6,258											-270
-260	-6,232	-6,236	-6,239	-6,242	-6,245	-6,248	-6,251	-6,253	-6,255	-6,256	-6,258	-260
-250	-6,181	-6,187	-6,193	-6,198	-6,204	-6,209	-6,214	-6,219	-6,224	-6,228	-6,232	-250
-240	-6,105	-6,114	-6,122	-6,130	-6,138	-6,146	-6,153	-6,160	-6,167	-6,174	-6,181	-240
-230	-6,007	-6,018	-6,028	-6,039	-6,049	-6,059	-6,068	-6,078	-6,087	-6,096	-6,105	-230
-220	-5,889	-5,901	-5,914	-5,926	-5,938	-5,950	-5,962	-5,973	-5,985	-5,996	-6,007	-220
-210	-5,753	-5,767	-5,782	-5,795	-5,809	-5,823	-5,836	-5,850	-5,863	-5,876	-5,889	-210
-200	-5,603	-5,619	-5,634	-5,650	-5,665	-5,680	-5,695	-5,710	-5,724	-5,739	-5,753	-200
-190	-5,439	-5,456	-5,473	-5,489	-5,506	-5,522	-5,539	-5,555	-5,571	-5,587	-5,603	-190
-180	-5,261	-5,279	-5,297	-5,315	-5,333	-5,351	-5,369	-5,387	-5,404	-5,421	-5,439	-180
-170	-5,069	-5,089	-5,109	-5,128	-5,147	-5,167	-5,186	-5,205	-5,223	-5,242	-5,261	-170
-160	-4,865	-4,886	-4,907	-4,928	-4,948	-4,969	-4,989	-5,010	-5,030	-5,050	-5,069	-160
-150	-4,648	-4,670	-4,693	-4,715	-4,737	-4,758	-4,780	-4,801	-4,823	-4,844	-4,865	-150
-140	-4,419	-4,442	-4,466	-4,489	-4,512	-4,535	-4,558	-4,581	-4,603	-4,626	-4,648	-140
-130	-4,177	-4,202	-4,226	-4,251	-4,275	-4,299	-4,323	-4,347	-4,371	-4,395	-4,419	-130
-120	-3,923	-3,949	-3,974	-4,000	-4,026	-4,051	-4,077	-4,102	-4,127	-4,152	-4,177	-120
-110	-3,656	-3,684	-3,711	-3,737	-3,764	-3,791	-3,818	-3,844	-3,870	-3,897	-3,923	-110
-100	-3,378	-3,407	-3,435	-3,463	-3,491	-3,519	-3,547	-3,574	-3,602	-3,629	-3,656	-100
-90	-3,089	-3,118	-3,147	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,293	-3,321	-3,350	-3,378	-90
-80	-2,788	-2,818	-2,849	-2,879	-2,909	-2,939	-2,970	-2,999	-3,029	-3,059	-3,089	-80
-70	-2,475	-2,507	-2,539	-2,570	-2,602	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757	-2,788	-70
-60	-2,152	-2,185	-2,218	-2,250	-2,283	-2,315	-2,348	-2,380	-2,412	-2,444	-2,475	-60
-50	-1,819	-1,853	-1,886	-1,920	-1,953	-1,987	-2,020	-2,053	-2,087	-2,120	-2,152	-50
-40	-1,475	-1,510	-1,544	-1,579	-1,614	-1,648	-1,682	-1,717	-1,751	-1,785	-1,819	-40
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,263	-1,299	-1,334	-1,370	-1,405	-1,440	-1,475	-30
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,903	-0,940	-0,976	-1,013	-1,049	-1,085	-1,121	-20
-10	-0,383	-0,421	-0,458	-0,496	-0,534	-0,571	-0,608	-0,646	-0,683	-0,720	-0,757	-10
0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345	-0,383	0
10	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351	0,391	10
20	0,391	0,430	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749	0,789	20
30	0,789	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,032	1,073	1,114	1,155	1,196	30
40	1,196	1,237	1,279	1,320	1,361	1,403	1,444	1,486	1,528	1,569	1,611	40
50	1,611	1,653	1,695	1,738	1,780	1,822	1,865	1,907	1,950	1,992	2,035	50

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Milivoltios												
50	2,035	2,078	2,121	2,164	2,207	2,250	2,294	2,337	2,380	2,424	2,467	50
60	2,467	2,511	2,555	2,599	2,643	2,687	2,731	2,775	2,819	2,864	2,908	60
70	2,908	2,953	2,997	3,042	3,087	3,131	3,176	3,221	3,266	3,312	3,357	70
80	3,357	3,402	3,447	3,493	3,538	3,584	3,630	3,676	3,721	3,767	3,813	80
90	3,813	3,859	3,906	3,952	3,998	4,044	4,091	4,137	4,184	4,231	4,277	90
100	4,277	4,324	4,371	4,418	4,465	4,512	4,559	4,607	4,654	4,701	4,749	100
110	4,749	4,796	4,844	4,891	4,939	4,987	5,035	5,083	5,131	5,179	5,227	110
120	5,227	5,275	5,324	5,372	5,420	5,469	5,517	5,566	5,615	5,663	5,712	120
130	5,712	5,761	5,810	5,859	5,908	5,957	6,007	6,056	6,105	6,155	6,204	130
140	6,204	6,254	6,303	6,353	6,403	6,452	6,502	6,552	6,602	6,652	6,702	140
150	6,702	6,753	6,803	6,853	6,903	6,954	7,004	7,055	7,106	7,156	7,207	150
160	7,207	7,258	7,309	7,360	7,411	7,462	7,513	7,564	7,615	7,666	7,718	160
170	7,718	7,769	7,821	7,872	7,924	7,975	8,027	8,079	8,131	8,183	8,235	170
180	8,235	8,287	8,339	8,391	8,443	8,495	8,548	8,600	8,652	8,705	8,757	180
190	8,757	8,810	8,863	8,915	8,968	9,021	9,074	9,127	9,180	9,233	9,286	190
200	9,286	9,339	9,392	9,446	9,499	9,553	9,606	9,659	9,713	9,767	9,820	200
210	9,820	9,874	9,928	9,982	10,036	10,090	10,144	10,198	10,252	10,306	10,360	210
220	10,360	10,414	10,469	10,523	10,578	10,632	10,687	10,741	10,796	10,851	10,905	220
230	10,905	10,960	11,015	11,070	11,125	11,180	11,235	11,290	11,345	11,401	11,456	230
240	11,456	11,511	11,566	11,622	11,677	11,733	11,788	11,844	11,900	11,956	12,011	240
250	12,011	12,067	12,123	12,179	12,235	12,291	12,347	12,403	12,459	12,515	12,572	250
260	12,572	12,628	12,684	12,741	12,797	12,854	12,910	12,967	13,024	13,080	13,137	260
270	13,137	13,194	13,251	13,307	13,364	13,421	13,478	13,535	13,592	13,650	13,707	270
280	13,707	13,764	13,821	13,879	13,936	13,993	14,051	14,108	14,166	14,223	14,281	280
290	14,281	14,339	14,396	14,454	14,512	14,570	14,628	14,686	14,744	14,802	14,860	290
300	14,860	14,918	14,976	15,034	15,092	15,151	15,209	15,267	15,326	15,384	15,443	300
310	15,443	15,501	15,560	15,619	15,677	15,736	15,795	15,853	15,912	15,971	16,030	310
320	16,030	16,089	16,148	16,207	16,266	16,325	16,384	16,444	16,503	16,562	16,621	320
330	16,621	16,681	16,740	16,800	16,859	16,919	16,978	17,038	17,097	17,157	17,217	330
340	17,217	17,277	17,336	17,396	17,456	17,516	17,576	17,636	17,696	17,756	17,816	340
350	17,816	17,877	17,937	17,997	18,057	18,118	18,178	18,238	18,299	18,359	18,420	350
360	18,420	18,480	18,541	18,602	18,662	18,723	18,784	18,845	18,906	18,966	19,027	360
370	19,027	19,088	19,149	19,210	19,271	19,332	19,393	19,455	19,516	19,577	19,638	370
380	19,638	19,699	19,761	19,822	19,883	19,945	20,006	20,068	20,129	20,191	20,252	380
390	20,252	20,314	20,376	20,437	20,499	20,560	20,622	20,684	20,746	20,807	20,869	390
400	20,869											400

TIPO J

— 210	— 8,096											— 210
— 200	— 7,890	— 7,912	— 7,934	— 7,955	— 7,976	— 7,996	— 8,017	— 8,037	— 8,057	— 8,076	— 8,096	— 200
— 190	— 7,659	— 7,683	— 7,707	— 7,731	— 7,755	— 7,778	— 7,801	— 7,824	— 7,846	— 7,868	— 7,890	— 190
— 180	— 7,402	— 7,429	— 7,455	— 7,482	— 7,508	— 7,533	— 7,559	— 7,584	— 7,609	— 7,634	— 7,659	— 180
— 170	— 7,122	— 7,151	— 7,180	— 7,209	— 7,237	— 7,265	— 7,293	— 7,321	— 7,348	— 7,375	— 7,402	— 170
— 160	— 6,821	— 6,852	— 6,883	— 6,914	— 6,944	— 6,974	— 7,004	— 7,034	— 7,064	— 7,093	— 7,122	— 160
— 150	— 6,499	— 6,532	— 6,565	— 6,598	— 6,630	— 6,663	— 6,695	— 6,727	— 6,758	— 6,790	— 6,821	— 150
— 140	— 6,159	— 6,194	— 6,228	— 6,263	— 6,297	— 6,331	— 6,365	— 6,399	— 6,433	— 6,466	— 6,499	— 140
— 130	— 5,801	— 5,837	— 5,874	— 5,910	— 5,946	— 5,982	— 6,018	— 6,053	— 6,089	— 6,124	— 6,159	— 130
— 120	— 5,426	— 5,464	— 5,502	— 5,540	— 5,578	— 5,615	— 5,653	— 5,690	— 5,727	— 5,764	— 5,801	— 120
— 110	— 5,036	— 5,076	— 5,115	— 5,155	— 5,194	— 5,233	— 5,272	— 5,311	— 5,349	— 5,388	— 5,426	— 110
— 100	— 4,632	— 4,673	— 4,714	— 4,755	— 4,796	— 4,836	— 4,876	— 4,916	— 4,956	— 4,996	— 5,036	— 100
— 90	— 4,215	— 4,257	— 4,299	— 4,341	— 4,383	— 4,425	— 4,467	— 4,508	— 4,550	— 4,591	— 4,632	— 90
— 80	— 3,785	— 3,829	— 3,872	— 3,915	— 3,958	— 4,001	— 4,044	— 4,087	— 4,130	— 4,172	— 4,215	— 80
— 70	— 3,344	— 3,389	— 3,433	— 3,478	— 3,522	— 3,566	— 3,610	— 3,654	— 3,698	— 3,742	— 3,785	— 70
— 60	— 2,892	— 2,938	— 2,984	— 3,029	— 3,074	— 3,120	— 3,165	— 3,210	— 3,255	— 3,299	— 3,344	— 60
— 50	— 2,431	— 2,478	— 2,524	— 2,570	— 2,617	— 2,663	— 2,709	— 2,755	— 2,801	— 2,847	— 2,892	— 50
— 40	— 1,960	— 2,008	— 2,055	— 2,102	— 2,150	— 2,197	— 2,244	— 2,291	— 2,338	— 2,384	— 2,431	— 40
— 30	— 1,481	— 1,530	— 1,578	— 1,626	— 1,674	— 1,722	— 1,770	— 1,818	— 1,865	— 1,913	— 1,960	— 30
— 20	— 0,995	— 1,044	— 1,093	— 1,141	— 1,190	— 1,239	— 1,288	— 1,336	— 1,385	— 1,433	— 1,481	— 20
— 10	— 0,501	— 0,550	— 0,600	— 0,650	— 0,699	— 0,748	— 0,798	— 0,847	— 0,896	— 0,945	— 0,995	— 10
0	— 0,000	— 0,050	— 0,101	— 0,151	— 0,201	— 0,251	— 0,301	— 0,351	— 0,401	— 0,451	— 0,501	0
0	0,000	0,050	0,101	0,151	0,202	0,253	0,303	0,354	0,405	0,456	0,507	0
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,813	0,865	0,916	0,967	1,019	10
20	1,019	1,070	1,122	1,174	1,225	1,277	1,329	1,381	1,432	1,484	1,536	20
30	1,536	1,588	1,640	1,693	1,745	1,797	1,849	1,901	1,954	2,006	2,058	30
40	2,058	2,111	2,163	2,216	2,268	2,321	2,374	2,426	2,479	2,532	2,585	40

TABLA 6.5 (Continuación)

(ITS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Millivolts												
50	2,585	2,638	2,691	2,743	2,796	2,849	2,902	2,956	3,009	3,062	3,115	50
60	3,115	3,168	3,221	3,275	3,328	3,381	3,435	3,488	3,542	3,595	3,649	60
70	3,649	3,702	3,756	3,809	3,863	3,917	3,971	4,024	4,078	4,132	4,186	70
80	4,186	4,239	4,293	4,347	4,401	4,455	4,509	4,563	4,617	4,671	4,725	80
90	4,725	4,780	4,834	4,888	4,942	4,996	5,050	5,105	5,159	5,213	5,268	90
100	5,268	5,322	5,376	5,431	5,485	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758	5,812	100
110	5,812	5,867	5,921	5,976	6,031	6,085	6,140	6,195	6,249	6,304	6,359	110
120	6,359	6,414	6,468	6,523	6,578	6,633	6,688	6,742	6,797	6,852	6,907	120
130	6,907	6,962	7,017	7,072	7,127	7,182	7,237	7,292	7,347	7,402	7,457	130
140	7,457	7,512	7,567	7,622	7,677	7,732	7,787	7,843	7,898	7,953	8,008	140
150	8,008	8,063	8,118	8,174	8,229	8,284	8,339	8,394	8,450	8,505	8,560	150
160	8,560	8,616	8,671	8,726	8,781	8,837	8,892	8,947	9,003	9,058	9,113	160
170	9,113	9,169	9,224	9,279	9,335	9,390	9,446	9,501	9,556	9,612	9,667	170
180	9,667	9,723	9,778	9,834	9,889	9,944	10,000	10,055	10,111	15,166	10,222	180
190	10,222	10,277	10,333	10,388	10,444	10,499	10,555	10,610	10,666	10,721	10,777	190
200	10,777	10,832	10,888	10,943	10,999	11,054	11,110	11,165	11,221	11,276	11,332	200
210	11,332	11,387	11,443	11,498	11,554	11,609	11,665	11,720	11,776	11,831	11,887	210
220	11,887	11,943	11,998	12,054	12,109	12,165	12,220	12,276	12,331	12,387	12,442	220
230	12,442	12,498	12,553	12,609	12,664	12,720	12,776	12,831	12,887	12,942	12,998	230
240	12,998	13,053	13,109	13,164	13,220	13,275	13,331	13,386	13,442	13,497	13,553	240
250	13,553	13,608	13,664	13,719	13,775	13,830	13,886	13,941	13,997	14,052	14,108	250
260	14,108	14,163	14,219	14,274	14,330	14,385	14,441	14,496	14,552	14,607	14,663	260
270	14,663	14,718	14,774	14,829	14,885	14,940	14,995	15,051	15,106	15,162	15,217	270
280	15,217	15,273	15,328	15,383	15,439	15,494	15,550	15,605	15,661	15,716	15,771	280
290	15,771	15,827	15,882	15,938	15,993	16,048	16,104	16,159	16,214	16,270	16,325	290
300	16,325	16,380	16,436	16,491	16,547	16,602	16,657	16,713	16,768	16,823	16,879	300
310	16,879	16,934	16,989	17,044	17,100	17,155	17,210	17,266	17,321	17,376	17,432	310
320	17,432	17,487	17,542	17,597	17,653	17,708	17,763	17,818	17,874	17,929	17,984	320
330	17,984	18,039	18,095	18,150	18,205	18,260	18,316	18,371	18,426	18,481	18,537	330
340	18,537	18,592	18,647	18,702	18,757	18,813	18,868	18,923	18,978	19,033	19,089	340
350	19,089	19,144	19,199	19,254	19,309	19,364	19,420	19,475	19,530	19,585	19,640	350
360	19,640	19,695	19,751	19,806	19,861	19,916	19,971	20,026	20,081	20,137	20,192	360
370	20,192	20,247	20,302	20,357	20,412	20,467	20,523	20,578	20,633	20,688	20,743	370
380	20,743	20,798	20,853	20,909	20,964	21,019	21,074	21,129	21,184	21,239	21,295	380
390	21,295	21,350	21,405	21,460	21,515	21,570	21,625	21,680	21,736	21,791	21,846	390
400	21,846	21,901	21,956	22,011	22,066	22,122	22,177	22,232	22,287	22,342	22,397	400
410	22,397	22,453	22,508	22,563	22,618	22,673	22,728	22,784	22,839	22,894	22,949	410
420	22,949	23,004	23,060	23,115	23,170	23,225	23,280	23,336	23,391	23,446	23,501	420
430	23,501	23,556	23,612	23,667	23,722	23,777	23,833	23,888	23,943	23,999	24,054	430
440	24,054	24,109	24,164	24,220	24,275	24,330	24,386	24,441	24,496	24,552	24,607	440
450	24,607	24,662	24,718	24,773	24,829	24,884	24,939	24,995	25,050	25,106	15,161	450
460	25,161	25,217	25,272	25,327	25,383	25,438	25,494	25,549	25,605	25,661	25,716	460
470	25,716	25,772	25,827	25,883	25,938	25,994	26,050	26,105	26,161	26,216	26,272	470
480	26,272	26,328	26,383	26,439	26,495	26,551	26,606	26,662	26,718	26,774	26,829	480
490	26,829	26,885	26,941	26,997	27,053	27,109	27,165	27,220	27,276	27,332	27,388	490
500	27,388	27,444	27,500	27,556	27,612	27,668	27,724	27,780	27,836	27,893	27,949	500
510	27,949	28,005	28,061	28,117	28,173	28,230	28,286	28,342	28,398	28,455	28,511	510
520	28,511	28,567	28,624	28,680	28,736	28,793	28,849	28,906	28,962	29,019	29,075	520
530	29,075	29,132	29,188	29,245	29,301	29,358	29,415	29,471	29,528	29,585	29,642	530
540	29,642	29,698	29,755	29,812	29,869	29,926	29,983	30,039	30,096	30,153	30,210	540
550	30,210	30,267	30,324	30,381	30,439	30,496	30,553	30,610	30,667	30,724	30,782	550
560	30,782	30,839	30,896	30,954	31,011	31,068	31,126	31,183	31,241	31,298	31,356	560
570	31,356	31,413	31,471	31,528	31,586	31,644	31,702	31,759	31,817	31,875	31,933	570
580	31,933	31,991	32,048	32,106	32,164	32,222	32,280	32,338	32,396	32,455	32,513	580
590	32,513	32,571	32,629	32,687	32,746	32,804	32,862	32,921	32,979	33,038	33,096	590
600	33,096	33,155	33,213	33,272	33,330	33,389	33,448	33,506	33,565	33,624	33,683	600
610	33,683	33,742	33,800	33,859	33,918	33,977	34,036	34,095	34,155	34,214	34,273	610
620	34,273	34,332	34,391	34,451	34,510	34,569	34,629	34,688	34,748	34,807	34,867	620
630	34,867	34,926	34,986	35,045	35,105	35,165	35,225	35,285	35,344	35,404	35,464	630
640	35,464	35,524	35,584	35,644	35,704	35,764	35,825	35,885	35,945	36,005	35,066	640
650	36,066	36,126	36,186	36,247	36,307	36,368	36,428	36,489	36,549	36,610	36,671	650
660	36,671	36,732	36,792	36,853	36,914	36,975	37,036	37,097	37,158	37,219	37,280	660
670	37,280	37,341	37,402	37,463	37,524	37,586	37,647	37,709	37,770	37,831	37,893	670
680	37,893	37,954	38,016	38,078	38,139	38,201	38,262	38,324	38,386	38,448	38,510	680
690	38,510	38,572	38,633	38,695	38,757	38,819	38,882	38,944	39,006	39,068	39,130	690

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	° C
<i>Milivoltios</i>												
700	39,130	39,192	39,255	39,317	39,379	39,442	39,504	39,567	39,629	39,692	39,754	700
710	39,754	39,817	39,880	39,942	40,005	40,068	40,131	40,193	40,256	40,319	40,382	710
720	40,382	40,445	40,508	40,571	40,634	40,697	40,760	40,823	40,886	40,950	41,013	720
730	41,013	41,076	41,139	41,203	41,266	41,329	41,393	41,456	41,520	41,583	41,647	730
740	41,647	41,710	41,774	41,837	41,901	41,965	42,028	42,092	42,156	42,219	42,283	740
750	42,283	42,347	42,411	42,475	42,538	42,602	42,666	42,730	42,794	42,858	42,922	750
† 760	42,922	42,986	43,050	43,114	43,178	43,242	43,306	43,370	43,433	43,497	43,561	† 760
770	43,563	43,627	43,692	43,756	43,820	43,885	43,949	44,014	44,078	44,142	44,207	770
780	44,207	44,271	44,336	44,400	44,465	44,529	44,594	44,658	44,723	44,788	44,852	780
790	44,852	44,917	44,981	45,046	45,111	45,175	45,240	45,304	45,369	45,434	45,498	790
800	45,498	45,563	45,627	45,692	45,757	45,821	45,886	45,950	46,015	46,080	46,144	800
810	46,144	46,209	46,273	46,338	46,403	46,467	46,532	46,596	46,661	46,725	46,790	810
820	46,790	46,854	46,919	46,983	47,047	47,112	47,176	47,241	47,305	47,369	47,434	820
830	47,434	47,498	47,562	47,627	47,691	47,755	47,819	47,884	47,948	48,012	48,076	830
840	48,076	48,140	48,204	48,269	48,333	48,397	48,461	48,525	48,589	48,653	48,716	840
850	48,716	48,780	48,844	48,908	48,972	49,036	49,099	49,163	49,227	49,291	49,354	850
860	49,354	49,418	49,481	49,545	49,608	49,672	49,735	49,799	49,862	49,926	49,989	860
870	49,989	50,052	50,116	50,179	50,242	50,305	50,369	50,432	50,495	50,558	50,621	870
880	50,621	50,684	50,747	50,810	50,873	50,936	50,999	51,061	51,124	51,187	51,249	880
890	51,249	51,312	51,375	51,437	51,500	51,562	51,625	51,687	51,750	51,812	51,875	890
900	51,875	51,937	51,999	52,061	52,124	52,186	52,248	52,310	52,372	52,434	52,496	900
910	52,496	52,558	52,620	52,682	52,744	52,806	52,868	52,929	52,991	53,053	53,115	910
920	53,115	53,176	53,238	53,299	53,361	53,422	53,484	53,545	53,607	53,668	53,729	920
930	53,729	53,791	53,852	53,913	53,974	54,035	54,096	54,157	54,219	54,280	54,341	930
940	54,341	54,401	54,462	54,523	54,584	54,645	54,706	54,766	54,827	54,888	54,948	940
950	54,948	55,009	55,070	55,130	55,191	55,251	55,312	55,372	55,432	55,493	55,553	950
960	55,553	55,613	55,674	55,734	55,794	55,854	55,914	55,974	56,035	56,095	56,155	960
970	56,155	56,215	56,275	56,334	56,394	56,454	56,514	56,574	56,634	56,693	56,753	970
980	56,753	56,813	56,873	56,932	56,992	57,051	57,111	57,170	57,230	57,289	57,349	980
990	57,349	57,408	57,468	57,527	57,586	57,646	57,705	57,764	57,824	57,883	57,942	990
1.000	57,942	58,001	58,060	58,120	58,179	58,238	58,297	58,356	58,415	58,474	58,533	1.000
1.010	58,533	58,592	58,651	58,710	58,769	58,827	58,886	58,945	59,004	59,063	59,121	1.010
1.020	59,121	59,180	59,239	59,298	59,356	59,415	59,474	59,532	59,591	59,650	59,708	1.020
1.030	59,708	59,767	59,825	59,884	59,942	60,001	60,059	60,118	60,176	60,235	60,293	1.030
1.040	60,293	60,351	60,410	60,468	60,527	60,585	60,643	60,702	60,760	60,818	60,876	1.040
1.050	60,876	60,935	60,993	61,051	61,109	61,168	61,226	61,284	61,342	61,400	61,458	1.050
1.060	61,458	61,517	61,575	61,633	61,691	61,749	61,807	61,865	61,923	61,981	62,039	1.060
1.070	62,039	62,097	62,156	62,214	62,272	62,330	62,388	62,446	62,504	62,562	62,621	1.070
1.080	62,619	62,677	62,735	62,793	62,851	62,909	62,967	63,025	63,083	63,141	63,199	1.080
1.090	63,199	63,257	63,314	63,372	63,430	63,488	63,546	63,604	63,662	63,719	63,777	1.090
1.100	63,777	63,835	63,893	63,951	64,009	64,066	64,124	64,182	64,240	64,298	64,355	1.100
1.110	64,355	64,413	64,471	64,529	64,586	64,644	64,702	64,760	64,817	64,875	64,933	1.110
1.120	64,933	64,991	65,048	65,106	65,164	65,222	65,279	65,337	65,395	65,453	65,510	1.120
1.130	65,510	65,568	65,626	65,683	65,741	65,799	65,856	65,914	65,972	66,029	66,087	1.130
1.140	66,087	66,145	66,202	66,260	66,318	66,375	66,433	66,491	66,548	66,606	66,664	1.140
1.150	66,664	66,721	66,779	66,836	66,894	66,952	67,009	67,067	67,124	67,182	67,240	1.150
1.160	67,240	67,297	67,355	67,412	67,470	67,527	67,585	67,643	67,700	67,758	67,815	1.160
1.170	67,815	67,873	67,930	67,988	68,045	68,103	68,160	68,217	68,275	68,332	68,390	1.170
1.180	68,390	68,447	68,505	68,562	68,619	68,677	68,734	68,792	68,849	68,906	68,964	1.180
1.190	68,964	69,021	69,078	69,135	69,193	69,250	69,307	69,364	69,422	69,479	69,536	1.190
1.200	69,536											1.200

TIPO K

— 270	— 6,458											— 270
— 280	— 6,441	— 6,444	— 6,446	— 6,448	— 6,450	— 6,452	— 6,453	— 6,455	— 6,456	— 6,457	— 6,458	— 280
— 290	— 6,404	— 6,408	— 6,413	— 6,417	— 6,421	— 6,425	— 6,429	— 6,432	— 6,435	— 6,438	— 6,441	— 290
— 240	— 6,344	— 6,351	— 6,358	— 6,364	— 6,371	— 6,377	— 6,382	— 6,388	— 6,394	— 6,399	— 6,404	— 240
— 230	— 6,262	— 6,271	— 6,280	— 6,289	— 6,297	— 6,306	— 6,314	— 6,322	— 6,329	— 6,337	— 6,344	— 230
— 220	— 6,158	— 6,170	— 6,181	— 6,192	— 6,202	— 6,213	— 6,223	— 6,233	— 6,243	— 6,253	— 6,262	— 220
— 210	— 6,035	— 6,048	— 6,061	— 6,074	— 6,087	— 6,099	— 6,111	— 6,123	— 6,135	— 6,147	— 6,158	— 210
— 200	— 5,891	— 5,907	— 5,922	— 5,936	— 5,951	— 5,965	— 5,980	— 5,994	— 6,007	— 6,021	— 6,035	— 200

† Nota: La temperatura de trabajo máxima recomendada para el termopar tipo J es de 760° C (1.400° F). La f.e.m. indicada a temperaturas superiores es una extrapolación matemática.

TABLA 6.5 (Continuación)

(ITS 1968)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Milivoltios												
-190	-5,730	-5,747	-5,763	-5,780	-5,796	-5,813	-5,829	-5,845	-5,860	-5,876	-5,891	-190
-180	-5,550	-5,569	-5,587	-5,606	-5,624	-5,642	-5,660	-5,678	-5,695	-5,712	-5,730	-180
-170	-5,354	-5,374	-5,394	-5,414	-5,434	-5,454	-5,474	-5,493	-5,512	-5,531	-5,550	-170
-160	-5,141	-5,163	-5,185	-5,207	-5,228	-5,249	-5,271	-5,292	-5,313	-5,333	-5,354	-160
-150	-4,912	-4,936	-4,959	-4,983	-5,006	-5,029	-5,051	-5,074	-5,097	-5,119	-5,141	-150
-140	-4,669	-4,694	-4,719	-4,743	-4,768	-4,792	-4,817	-4,841	-4,865	-4,889	-4,912	-140
-130	-4,410	-4,437	-4,463	-4,489	-4,515	-4,541	-4,567	-4,593	-4,618	-4,644	-4,669	-130
-120	-4,138	-4,166	-4,193	-4,221	-4,248	-4,276	-4,303	-4,330	-4,357	-4,384	-4,410	-120
-110	-3,852	-3,881	-3,910	-3,939	-3,968	-3,997	-4,025	-4,053	-4,082	-4,110	-4,138	-110
-100	-3,553	-3,584	-3,614	-3,664	-3,674	-3,704	-3,734	-3,764	-3,793	-3,823	-3,852	-100
-90	-3,242	-3,274	-3,305	-3,337	-3,368	-3,399	-3,430	-3,461	-3,492	-3,523	-3,553	-90
-80	-2,920	-2,953	-2,985	-3,018	-3,050	-3,082	-3,115	-3,147	-3,179	-3,211	-3,242	-80
-70	-2,586	-2,620	-2,654	-2,687	-2,721	-2,754	-2,788	-2,821	-2,854	-2,887	-2,920	-70
-60	-2,243	-2,277	-2,312	-2,347	-2,381	-2,416	-2,450	-2,484	-2,518	-2,552	-2,586	-60
-50	-1,889	-1,925	-1,961	-1,996	-2,032	-2,067	-2,102	-2,137	-2,173	-2,208	-2,243	-50
-40	-1,527	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853	-1,889	-40
-30	-1,156	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,416	-1,453	-1,490	-1,527	-30
-20	-0,777	-0,816	-0,854	-0,892	-0,930	-0,968	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118	-1,156	-20
-10	-0,392	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739	-0,777	-10
0	0,000	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353	-0,392	0
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397	0
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798	10
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162	1,203	20
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570	1,611	30
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981	2,022	40
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394	2,436	50
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809	2,850	60
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224	3,266	70
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639	3,681	80
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054	4,095	90
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,332	4,384	4,426	4,467	4,508	100
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878	4,919	110
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287	5,327	120
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693	5,733	130
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097	6,137	140
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499	6,539	150
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899	6,939	160
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299	7,338	170
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697	7,737	180
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097	8,137	190
200	8,137	8,177	8,216	8,256	8,296	8,336	8,376	8,416	8,456	8,497	8,537	200
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898	8,938	210
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300	9,341	220
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705	9,745	230
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111	10,151	240
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519	10,560	250
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928	10,969	260
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339	11,381	270
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752	11,793	280
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166	12,207	290
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581	12,623	300
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997	13,039	310
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414	13,456	320
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832	13,874	330
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250	14,292	340
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670	14,712	350
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090	15,132	360
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510	15,552	370
380	15,552	15,594	15,636	15,678	15,720	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931	15,974	380
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353	16,395	390
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776	16,818	400
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199	17,241	410
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622	17,664	420
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046	18,088	430
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470	18,513	440

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)													°C
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Milivoltios													
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895	18,938		450
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320	19,363		460
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746	19,788		470
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,044	20,086	20,129	20,172	20,214		480
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598	20,640		490
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024	21,066		500
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450	21,493		510
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876	21,919		520
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303	22,346		530
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729	22,772		540
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156	23,198		550
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582	23,624		560
570	23,624	23,667	23,710	23,752	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008	24,050		570
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434	24,476		580
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859	24,902		590
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284	25,327		600
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709	25,751		610
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133	26,176		620
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557	26,599		630
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980	27,022		640
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403	27,445		650
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825	27,867		660
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246	28,288		670
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667	28,709		680
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086	29,128		690
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505	29,547		700
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924	29,965		710
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341	30,383		720
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757	30,799		730
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173	31,214		740
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587	31,629		750
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001	32,042		760
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414	32,455		770
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825	32,866		780
790	32,866	32,907	32,948	32,989	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236	33,277		790
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645	33,686		800
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054	34,095		810
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461	34,502		820
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868	34,909		830
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273	35,314		840
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678	35,718		850
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081	36,121		860
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483	36,524		870
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885	36,925		880
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285	37,325		890
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684	37,724		900
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,883	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082	38,122		910
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479	38,519		920
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875	38,915		930
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270	39,310		940
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664	39,703		950
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057	40,096		960
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449	40,488		970
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,801	40,840	40,879		980
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230	41,269		990
1.000	41,269	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619	41,657		1.000
1.010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006	42,045		1.010
1.020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393	42,432		1.020
1.030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779	42,817		1.030
1.040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164	43,202		1.040
1.050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547	43,585		1.050
1.060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,929	43,968		1.060
1.070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311	44,349		1.070
1.080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691	44,729		1.080
1.090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070	45,108		1.090
1.100	45,108	45,146	45,184	45,222	45,260	45,297	45,335	45,373	45,411	45,448	45,486		1.100
1.110	45,486	45,524	45,561	45,599	45,637	45,675	45,712	45,750	45,787	45,825	45,863		1.110
1.120	45,863	45,900	45,938	45,975	46,013	46,051	46,088	46,126	46,163	46,201	46,238		1.120
1.130	46,238	46,275	46,313	46,350	46,388	46,425	46,463	46,500	46,537	46,575	46,612		1.130
1.140	46,612	46,649	46,687	46,724	46,761	46,799	46,836	46,873	46,910	46,948	46,985		1.140

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
1.150	46,985	47,022	47,059	47,096	47,134	47,171	47,208	47,245	47,282	47,319	47,356	1.150
1.160	47,356	47,393	47,430	47,468	47,505	47,542	47,579	47,616	47,653	47,689	47,726	1.160
1.170	47,726	47,763	47,800	47,837	47,874	47,911	47,948	47,985	48,021	48,058	48,095	1.170
1.180	48,095	48,132	48,169	48,205	48,242	48,279	48,316	48,352	48,389	48,426	48,462	1.180
1.190	48,462	48,499	48,536	48,572	48,609	48,645	48,682	48,718	48,755	48,792	48,828	1.190
1.200	48,828	48,865	48,901	48,937	48,974	49,010	49,047	49,083	49,120	49,156	49,192	1.200
1.210	49,192	49,229	49,265	49,301	49,338	49,374	49,410	49,446	49,483	49,519	49,555	1.210
1.220	49,555	49,591	49,627	49,663	49,700	49,736	49,772	49,808	49,844	49,880	49,916	1.220
1.230	49,916	49,952	49,988	50,024	50,060	50,096	50,132	50,168	50,204	50,240	50,276	1.230
1.240	50,276	50,311	50,347	50,383	50,419	50,455	50,491	50,526	50,562	50,598	50,633	1.240
1.250	50,633	50,669	50,705	50,741	50,776	50,812	50,847	50,883	50,919	50,954	50,990	1.250
1.260	50,990	51,025	51,061	51,096	51,132	51,167	51,203	51,238	51,274	51,309	51,344	1.260
1.270	51,344	51,380	51,415	51,450	51,486	51,521	51,556	51,592	51,627	51,662	51,697	1.270
1.280	51,697	51,733	51,768	51,803	51,838	51,873	51,908	51,943	51,979	52,014	52,049	1.280
1.290	52,049	52,084	52,119	52,154	52,189	52,224	52,259	52,294	52,329	52,364	52,398	1.290
1.300	52,398	52,433	52,468	52,503	52,538	52,573	52,608	52,642	52,677	52,712	52,747	1.300
1.310	52,747	52,781	52,816	52,851	52,886	52,920	52,955	52,989	53,024	53,059	53,093	1.310
1.320	53,093	53,128	53,162	53,197	53,232	53,266	53,301	53,335	53,370	53,404	53,439	1.320
1.330	53,439	53,473	53,507	53,541	53,576	53,611	53,645	53,679	53,714	53,748	53,782	1.330
1.340	53,782	53,817	53,851	53,885	53,920	53,954	53,988	54,022	54,057	54,091	54,125	1.340
1.350	54,125	54,159	54,193	54,228	54,262	54,296	54,330	54,364	54,398	54,432	54,466	1.350
1.360	54,466	54,501	54,535	54,569	54,603	54,637	54,671	54,705	54,739	54,773	54,807	1.360
1.370	54,807	54,841	54,875									1.370

TIPO R

-50	-0,226											-50
-40	-0,188	-0,192	-0,196	-0,200	-0,204	-0,207	-0,211	-0,215	-0,219	-0,223	-0,226	-40
-30	-0,145	-0,150	-0,154	-0,158	-0,163	-0,167	-0,171	-0,175	-0,180	-0,184	-0,188	-30
-20	-0,100	-0,105	-0,109	-0,114	-0,119	-0,123	-0,128	-0,132	-0,137	-0,141	-0,145	-20
-10	-0,051	-0,056	-0,061	-0,066	-0,071	-0,076	-0,081	-0,086	-0,091	-0,095	-0,100	-10
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,026	-0,031	-0,036	-0,041	-0,046	-0,051	0
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049	0,054	0
10	0,054	0,060	0,065	0,071	0,077	0,082	0,088	0,094	0,100	0,105	0,111	10
20	0,111	0,117	0,123	0,129	0,135	0,141	0,147	0,152	0,158	0,165	0,171	20
30	0,171	0,177	0,183	0,189	0,195	0,201	0,207	0,214	0,220	0,226	0,232	30
40	0,232	0,239	0,245	0,251	0,258	0,264	0,271	0,277	0,283	0,290	0,296	40
50	0,296	0,303	0,310	0,316	0,323	0,329	0,336	0,343	0,349	0,356	0,363	50
60	0,363	0,369	0,376	0,383	0,390	0,397	0,403	0,410	0,417	0,424	0,431	60
70	0,431	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,494	0,501	70
80	0,501	0,508	0,515	0,523	0,530	0,537	0,544	0,552	0,559	0,566	0,573	80
90	0,573	0,581	0,588	0,595	0,603	0,610	0,617	0,625	0,632	0,640	0,647	90
100	0,647	0,655	0,662	0,670	0,677	0,685	0,692	0,700	0,708	0,715	0,723	100
110	0,723	0,730	0,738	0,746	0,754	0,761	0,769	0,777	0,784	0,792	0,800	110
120	0,800	0,808	0,816	0,824	0,831	0,839	0,847	0,855	0,863	0,871	0,879	120
130	0,879	0,887	0,895	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,943	0,951	0,959	130
140	0,959	0,967	0,975	0,983	0,992	1,000	1,008	1,016	1,024	1,032	1,041	140
150	1,041	1,049	1,057	1,065	1,074	1,082	1,090	1,099	1,107	1,115	1,124	150
160	1,124	1,132	1,140	1,149	1,157	1,166	1,174	1,183	1,191	1,200	1,208	160
170	1,208	1,217	1,225	1,234	1,242	1,251	1,259	1,268	1,276	1,285	1,294	170
180	1,294	1,302	1,311	1,319	1,328	1,337	1,345	1,354	1,363	1,372	1,380	180
190	1,380	1,389	1,398	1,407	1,415	1,424	1,433	1,442	1,450	1,459	1,468	190
200	1,468	1,477	1,486	1,495	1,504	1,512	1,521	1,530	1,539	1,548	1,557	200
210	1,557	1,566	1,575	1,584	1,593	1,602	1,611	1,620	1,629	1,638	1,647	210
220	1,647	1,656	1,665	1,674	1,683	1,692	1,702	1,711	1,720	1,729	1,738	220
230	1,738	1,747	1,756	1,766	1,775	1,784	1,793	1,802	1,812	1,821	1,830	230
240	1,830	1,839	1,849	1,858	1,867	1,876	1,886	1,895	1,904	1,914	1,923	240
250	1,923	1,932	1,942	1,951	1,960	1,970	1,979	1,988	1,998	2,007	2,017	250
260	2,017	2,026	2,036	2,045	2,054	2,064	2,073	2,083	2,092	2,102	2,111	260
270	2,111	2,121	2,130	2,140	2,149	2,159	2,169	2,178	2,188	2,197	2,207	270
280	2,207	2,216	2,226	2,236	2,245	2,255	2,264	2,274	2,284	2,293	2,303	280
290	2,303	2,313	2,322	2,332	2,342	2,351	2,361	2,371	2,381	2,390	2,400	290

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Milivoltios												
300	2,400	2,410	2,420	2,429	2,439	2,449	2,459	2,468	2,478	2,488	2,498	300
310	2,498	2,508	2,517	2,527	2,537	2,547	2,557	2,567	2,577	2,586	2,596	310
320	2,596	2,606	2,616	2,626	2,636	2,646	2,656	2,666	2,676	2,685	2,695	320
330	2,695	2,705	2,715	2,725	2,735	2,745	2,755	2,765	2,775	2,785	2,795	330
340	2,795	2,805	2,815	2,825	2,835	2,845	2,855	2,866	2,876	2,886	2,896	340
350	2,896	2,906	2,916	2,926	2,936	2,946	2,956	2,966	2,977	2,987	2,997	350
360	2,997	3,007	3,017	3,027	3,037	3,048	3,058	3,068	3,078	3,088	3,099	360
370	3,099	3,109	3,119	3,129	3,139	3,150	3,160	3,170	3,180	3,191	3,201	370
380	3,201	3,211	3,221	3,232	3,242	3,252	3,263	3,273	3,283	3,293	3,304	380
390	3,304	3,314	3,324	3,335	3,345	3,355	3,366	3,376	3,386	3,397	3,407	390
400	3,407	3,418	3,428	3,438	3,449	3,459	3,470	3,480	3,490	3,501	3,511	400
410	3,511	3,522	3,532	3,543	3,553	3,563	3,574	3,584	3,595	3,605	3,616	410
420	3,616	3,626	3,637	3,647	3,658	3,668	3,679	3,689	3,700	3,710	3,721	420
430	3,721	3,731	3,742	3,752	3,763	3,774	3,784	3,795	3,805	3,816	3,826	430
440	3,826	3,837	3,848	3,858	3,869	3,879	3,890	3,901	3,911	3,922	3,933	440
450	3,933	3,943	3,954	3,964	3,975	3,986	3,996	4,007	4,018	4,028	4,039	450
460	4,039	4,050	4,061	4,071	4,082	4,093	4,103	4,114	4,125	4,136	4,146	460
470	4,146	4,157	4,168	4,178	4,189	4,200	4,211	4,222	4,232	4,243	4,254	470
480	4,254	4,265	4,275	4,286	4,297	4,308	4,319	4,329	4,340	4,351	4,362	480
490	4,362	4,373	4,384	4,394	4,405	4,416	4,427	4,438	4,449	4,460	4,471	490
500	4,471	4,481	4,492	4,503	4,514	4,525	4,536	4,547	4,558	4,569	4,580	500
510	4,580	4,591	4,601	4,612	4,623	4,634	4,645	4,656	4,667	4,678	4,689	510
520	4,689	4,700	4,711	4,722	4,733	4,744	4,755	4,766	4,777	4,788	4,799	520
530	4,799	4,810	4,821	4,832	4,843	4,854	4,865	4,876	4,888	4,899	4,910	530
540	4,910	4,921	4,932	4,943	4,954	4,965	4,976	4,987	4,998	5,009	5,021	540
550	5,021	5,032	5,043	5,054	5,065	5,076	5,087	5,099	5,110	5,121	5,132	550
560	5,132	5,143	5,154	5,166	5,177	5,188	5,199	5,210	5,221	5,233	5,244	560
570	5,244	5,255	5,266	5,278	5,289	5,300	5,311	5,322	5,334	5,345	5,356	570
580	5,356	5,368	5,379	5,390	5,401	5,413	5,424	5,435	5,446	5,458	5,469	580
590	5,469	5,480	5,492	5,503	5,514	5,526	5,537	5,548	5,560	5,571	5,582	590
600	5,582	5,594	5,605	5,616	5,628	5,639	5,650	5,662	5,673	5,685	5,696	600
610	5,696	5,707	5,719	5,730	5,742	5,753	5,764	5,776	5,787	5,799	5,810	610
620	5,810	5,821	5,833	5,844	5,856	5,867	5,879	5,890	5,902	5,913	5,925	620
630	5,925	5,936	5,948	5,959	5,971	5,982	5,994	6,005	6,017	6,028	6,040	630
640	6,040	6,051	6,063	6,074	6,086	6,098	6,109	6,121	6,132	6,144	6,155	640
650	6,155	6,167	6,179	6,190	6,202	6,213	6,225	6,237	6,248	6,260	6,272	650
660	6,272	6,283	6,295	6,307	6,318	6,330	6,342	6,353	6,365	6,377	6,388	660
670	6,388	6,400	6,412	6,423	6,435	6,447	6,458	6,470	6,482	6,494	6,505	670
680	6,505	6,517	6,529	6,541	6,552	6,564	6,576	6,588	6,599	6,611	6,623	680
690	6,623	6,635	6,647	6,658	6,670	6,682	6,694	6,706	6,718	6,729	6,741	690
700	6,741	6,753	6,765	6,777	6,789	6,800	6,812	6,824	6,836	6,848	6,860	700
710	6,860	6,872	6,884	6,895	6,907	6,919	6,931	6,943	6,955	6,967	6,979	710
720	6,979	6,991	7,003	7,015	7,027	7,039	7,051	7,063	7,074	7,086	7,098	720
730	7,098	7,110	7,122	7,134	7,146	7,158	7,170	7,182	7,194	7,206	7,218	730
740	7,218	7,231	7,243	7,255	7,267	7,279	7,291	7,303	7,315	7,327	7,339	740
750	7,339	7,351	7,363	7,375	7,387	7,399	7,412	7,424	7,436	7,448	7,460	750
760	7,460	7,472	7,484	7,496	7,509	7,521	7,533	7,545	7,557	7,569	7,582	760
770	7,582	7,594	7,606	7,618	7,630	7,642	7,655	7,667	7,679	7,691	7,703	770
780	7,703	7,716	7,728	7,740	7,752	7,765	7,777	7,789	7,801	7,814	7,826	780
790	7,826	7,838	7,850	7,863	7,875	7,887	7,900	7,912	7,924	7,937	7,949	790
800	7,949	7,961	7,973	7,986	7,998	8,010	8,023	8,035	8,047	8,060	8,072	800
810	8,072	8,085	8,097	8,109	8,122	8,134	8,146	8,159	8,171	8,184	8,196	810
820	8,196	8,208	8,221	8,233	8,246	8,258	8,271	8,283	8,295	8,308	8,320	820
830	8,320	8,333	8,345	8,358	8,370	8,383	8,395	8,408	8,420	8,433	8,445	830
840	8,445	8,458	8,470	8,483	8,495	8,508	8,520	8,533	8,545	8,558	8,570	840
850	8,570	8,583	8,595	8,608	8,621	8,633	8,646	8,658	8,671	8,683	8,696	850
860	8,696	8,709	8,721	8,734	8,746	8,759	8,772	8,784	8,797	8,810	8,822	860
870	8,822	8,835	8,847	8,860	8,873	8,885	8,898	8,911	8,923	8,936	8,949	870
880	8,949	8,961	8,974	8,987	9,000	9,012	9,025	9,038	9,050	9,063	9,076	880
890	9,076	9,089	9,101	9,114	9,127	9,140	9,152	9,165	9,178	9,191	9,203	890
900	9,203	9,216	9,229	9,242	9,254	9,267	9,280	9,293	9,306	9,319	9,331	900
910	9,331	9,344	9,357	9,370	9,383	9,395	9,408	9,421	9,434	9,447	9,460	910
920	9,460	9,473	9,485	9,498	9,511	9,524	9,537	9,550	9,563	9,576	9,589	920
930	9,589	9,602	9,614	9,627	9,640	9,653	9,666	9,679	9,692	9,705	9,718	930
940	9,718	9,731	9,744	9,757	9,770	9,783	9,796	9,809	9,822	9,835	9,848	940

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
Milivoltios												
950	9,848	9,861	9,874	9,887	9,900	9,913	9,926	9,939	9,952	9,965	9,978	950
960	9,978	9,991	10,004	10,017	10,030	10,043	10,056	10,069	10,082	10,095	10,109	960
970	10,109	10,122	10,135	10,148	10,161	10,174	10,187	10,200	10,213	10,227	10,240	970
980	10,240	10,253	10,266	10,279	10,292	10,305	10,319	10,332	10,345	10,358	10,371	980
990	10,371	10,384	10,398	10,411	10,424	10,437	10,450	10,464	10,477	10,490	10,503	990
1.000	10,503	10,516	10,530	10,543	10,556	10,569	10,583	10,596	10,609	10,622	10,636	1.000
1.010	10,636	10,649	10,662	10,675	10,689	10,702	10,715	10,729	10,742	10,755	10,768	1.010
1.020	10,768	10,782	10,795	10,808	10,822	10,835	10,848	10,862	10,875	10,888	10,902	1.020
1.030	10,902	10,915	10,928	10,942	10,955	10,968	10,982	10,995	11,009	11,022	11,035	1.030
1.040	11,035	11,049	11,062	11,076	11,089	11,102	11,116	11,129	11,143	11,156	11,170	1.040
1.050	11,170	11,183	11,196	11,210	11,223	11,237	11,250	11,264	11,277	11,291	11,304	1.050
1.060	11,304	11,318	11,331	11,345	11,358	11,372	11,385	11,399	11,412	11,426	11,439	1.060
1.070	11,439	11,453	11,466	11,480	11,493	11,507	11,520	11,534	11,547	11,561	11,574	1.070
1.080	11,574	11,588	11,602	11,615	11,629	11,642	11,656	11,669	11,683	11,697	11,710	1.080
1.090	11,710	11,724	11,737	11,751	11,765	11,778	11,792	11,805	11,819	11,833	11,846	1.090
1.100	11,846	11,860	11,874	11,887	11,901	11,914	11,928	11,942	11,955	11,969	11,983	1.100
1.110	11,983	11,996	12,010	12,024	12,037	12,051	12,065	12,078	12,092	12,106	12,119	1.110
1.120	12,119	12,133	12,147	12,161	12,174	12,188	12,202	12,215	12,229	12,243	12,257	1.120
1.130	12,257	12,270	12,284	12,298	12,311	12,325	12,339	12,353	12,366	12,380	12,394	1.130
1.140	12,394	12,408	12,421	12,435	12,449	12,463	12,476	12,490	12,504	12,518	12,532	1.140
1.150	12,532	12,545	12,559	12,573	12,587	12,600	12,614	12,628	12,642	12,656	12,669	1.150
1.160	12,669	12,683	12,697	12,711	12,725	12,739	12,752	12,766	12,780	12,794	12,808	1.160
1.170	12,808	12,822	12,835	12,849	12,863	12,877	12,891	12,905	12,918	12,932	12,946	1.170
1.180	12,946	12,960	12,974	12,988	13,002	13,016	13,029	13,043	13,057	13,071	13,085	1.180
1.190	13,085	13,099	13,113	13,127	13,140	13,154	13,168	13,182	13,196	13,210	13,224	1.190
1.200	13,224	13,238	13,252	13,266	13,280	13,293	13,307	13,321	13,335	13,349	13,363	1.200
1.210	13,363	13,377	13,391	13,405	13,419	13,433	13,447	13,461	13,475	13,489	13,502	1.210
1.220	13,502	13,516	13,530	13,544	13,558	13,572	13,586	13,600	13,614	13,628	13,642	1.220
1.230	13,642	13,656	13,670	13,684	13,698	13,712	13,726	13,740	13,754	13,768	13,782	1.230
1.240	13,782	13,796	13,810	13,824	13,838	13,852	13,866	13,880	13,894	13,908	13,922	1.240
1.250	13,922	13,936	13,950	13,964	13,978	13,992	14,006	14,020	14,034	14,048	14,062	1.250
1.260	14,062	14,076	14,090	14,104	14,118	14,132	14,146	14,160	14,174	14,188	14,202	1.260
1.270	14,202	14,216	14,230	14,244	14,258	14,272	14,286	14,301	14,315	14,329	14,343	1.270
1.280	14,343	14,357	14,371	14,385	14,399	14,413	14,427	14,441	14,455	14,469	14,483	1.280
1.290	14,483	14,497	14,511	14,525	14,539	14,554	14,568	14,582	14,596	14,610	14,624	1.290
1.300	14,624	14,638	14,652	14,666	14,680	14,694	14,708	14,722	14,737	14,751	14,765	1.300
1.310	14,765	14,779	14,793	14,807	14,821	14,835	14,849	14,863	14,877	14,891	14,906	1.310
1.320	14,906	14,920	14,934	14,948	14,962	14,976	14,990	15,004	15,018	15,032	15,047	1.320
1.330	15,047	15,061	15,075	15,089	15,103	15,117	15,131	15,145	15,159	15,173	15,188	1.330
1.340	15,188	15,202	15,216	15,230	15,244	15,258	15,272	15,286	15,300	15,315	15,329	1.340
1.350	15,329	15,343	15,357	15,371	15,385	15,399	15,413	15,427	15,442	15,456	15,470	1.350
1.360	15,470	15,484	15,498	15,512	15,526	15,540	15,555	15,569	15,583	15,597	15,611	1.360
1.370	15,611	15,625	15,639	15,653	15,667	15,682	15,696	15,710	15,724	15,738	15,752	1.370
1.380	15,752	15,766	15,780	15,795	15,809	15,823	15,837	15,851	15,865	15,879	15,893	1.380
1.390	15,893	15,908	15,922	15,936	15,950	15,964	15,978	15,992	16,006	16,021	16,035	1.390
1.400	16,035	16,049	16,063	16,077	16,091	16,105	16,119	16,134	16,148	16,162	16,176	1.400
1.410	16,176	16,190	16,204	16,218	16,232	16,247	16,261	16,275	16,289	16,303	16,317	1.410
1.420	16,317	16,331	16,345	16,360	16,374	16,388	16,402	16,416	16,430	16,444	16,458	1.420
1.430	16,458	16,472	16,487	16,501	16,515	16,529	16,543	16,557	16,571	16,585	16,599	1.430
1.440	16,599	16,614	16,628	16,642	16,656	16,670	16,684	16,698	16,712	16,726	16,741	1.440
1.450	16,741	16,755	16,769	16,783	16,797	16,811	16,825	16,839	16,853	16,867	16,882	1.450
1.460	16,882	16,896	16,910	16,924	16,938	16,952	16,966	16,980	16,994	17,008	17,022	1.460
1.470	17,022	17,037	17,051	17,065	17,079	17,093	17,107	17,121	17,135	17,149	17,163	1.470
1.480	17,163	17,177	17,192	17,206	17,220	17,234	17,248	17,262	17,276	17,290	17,304	1.480
1.490	17,304	17,318	17,332	17,346	17,360	17,374	17,388	17,403	17,417	17,431	17,445	1.490
1.500	17,445	17,459	17,473	17,487	17,501	17,515	17,529	17,543	17,557	17,571	17,585	1.500
1.510	17,585	17,599	17,613	17,627	17,641	17,655	17,669	17,684	17,698	17,712	17,726	1.510
1.520	17,726	17,740	17,754	17,768	17,782	17,796	17,810	17,824	17,838	17,852	17,866	1.520
1.530	17,866	17,880	17,894	17,908	17,922	17,936	17,950	17,964	17,978	17,992	18,006	1.530
1.540	18,006	18,020	18,034	18,048	18,062	18,076	18,090	18,104	18,118	18,132	18,146	1.540
1.550	18,146	18,160	18,174	18,188	18,202	18,216	18,230	18,244	18,258	18,272	18,286	1.550
1.560	18,286	18,299	18,313	18,327	18,341	18,355	18,369	18,383	18,397	18,411	18,425	1.560
1.570	18,425	18,439	18,453	18,467	18,481	18,495	18,509	18,523	18,537	18,550	18,564	1.570
1.580	18,564	18,578	18,592	18,606	18,620	18,634	18,648	18,662	18,676	18,690	18,703	1.580
1.590	18,703	18,717	18,731	18,745	18,759	18,773	18,787	18,801	18,815	18,828	18,842	1.590

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
1.600	18,842	18,856	18,870	18,884	18,898	18,912	18,926	18,939	18,953	18,967	18,981	1.600
1.610	18,981	18,995	19,009	19,023	19,036	19,050	19,064	19,078	19,092	19,106	19,119	1.610
1.620	19,119	19,133	19,147	19,161	19,175	19,188	19,202	19,216	19,230	19,244	19,257	1.620
1.630	19,257	19,271	19,285	19,299	19,313	19,326	19,340	19,354	19,368	19,382	19,395	1.630
1.640	19,395	19,409	19,423	19,437	19,450	19,464	19,478	19,492	19,505	19,519	19,533	1.640
1.650	19,533	19,547	19,560	19,574	19,588	19,602	19,615	19,629	19,643	19,656	19,670	1.650
1.660	19,670	19,684	19,698	19,711	19,725	19,739	19,752	19,766	19,780	19,793	19,807	1.660
1.670	19,807	19,821	19,834	19,848	19,862	19,875	19,889	19,903	19,916	19,930	19,944	1.670
1.680	19,944	19,957	19,971	19,985	19,998	20,012	20,025	20,039	20,053	20,066	20,080	1.680
1.690	20,080	20,093	20,107	20,120	20,134	20,148	10,161	20,175	20,188	20,202	20,215	1.690
1.700	20,215	20,229	20,242	20,256	20,269	20,283	20,296	20,309	20,323	20,336	20,350	1.700
1.710	20,350	20,363	20,377	20,390	20,403	20,417	20,430	20,443	20,457	20,470	20,483	1.710
1.720	20,483	20,497	20,510	20,523	20,537	20,550	20,563	20,576	20,590	20,603	20,616	1.720
1.730	20,616	20,629	20,642	20,656	20,669	20,682	20,695	20,708	20,721	20,734	20,748	1.730
1.740	20,748	20,761	20,774	20,787	20,800	20,813	20,826	20,839	20,852	20,865	20,878	1.740
1.750	20,878	20,891	20,904	20,916	20,929	20,942	20,955	20,968	20,981	20,994	21,006	1.750
1.760	21,006	21,019	21,032	21,045	21,057	21,070	21,083	21,096	21,108			1.760

TIPO S

-50	-0,236											-50
-40	-0,194	-0,199	-0,203	-0,207	-0,211	-0,215	-0,220	-0,224	-0,228	-0,232	-0,236	-40
-30	-0,150	-0,155	-0,159	-0,164	-0,168	-0,173	-0,177	-0,181	-0,186	-0,190	-0,194	-30
-20	-0,103	-0,108	-0,112	-0,117	-0,122	-0,127	-0,132	-0,136	-0,141	-0,145	-0,150	-20
-10	-0,053	-0,058	-0,063	-0,068	-0,073	-0,078	-0,083	-0,088	-0,093	-0,098	-0,103	-10
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,037	0,042	0,048	0,053	0
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107	0,113	10
20	0,113	0,119	0,125	0,131	0,137	0,142	0,148	0,154	0,161	0,167	0,173	20
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,210	0,216	0,222	0,228	0,235	30
40	0,235	0,241	0,247	0,254	0,260	0,266	0,273	0,279	0,286	0,292	0,299	40
50	0,299	0,305	0,312	0,318	0,325	0,331	0,338	0,345	0,351	0,358	0,365	50
60	0,365	0,371	0,378	0,385	0,391	0,398	0,405	0,412	0,419	0,425	0,432	60
70	0,432	0,439	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495	0,502	70
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,551	0,558	0,566	0,573	80
90	0,573	0,580	0,587	0,594	0,602	0,609	0,616	0,623	0,631	0,638	0,645	90
100	0,645	0,653	0,660	0,667	0,675	0,682	0,690	0,697	0,704	0,712	0,719	100
110	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,757	0,764	0,772	0,780	0,787	0,795	110
120	0,795	0,802	0,810	0,818	0,825	0,833	0,841	0,848	0,856	0,864	0,872	120
130	0,872	0,879	0,887	0,895	0,903	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942	0,950	130
140	0,950	0,957	0,965	0,973	0,981	0,989	0,997	1,005	1,013	1,021	1,029	140
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,093	1,101	1,109	150
160	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,158	1,166	1,174	1,182	1,190	160
170	1,190	1,198	1,207	1,215	1,223	1,231	1,240	1,248	1,256	1,264	1,273	170
180	1,273	1,281	1,289	1,297	1,306	1,314	1,322	1,331	1,339	1,347	1,356	180
190	1,356	1,364	1,373	1,381	1,389	1,398	1,406	1,415	1,423	1,432	1,440	190
200	1,440	1,448	1,457	1,465	1,474	1,482	1,491	1,499	1,508	1,516	1,525	200
210	1,525	1,534	1,542	1,551	1,559	1,568	1,576	1,585	1,594	1,602	1,611	210
220	1,611	1,620	1,628	1,637	1,645	1,654	1,663	1,671	1,680	1,689	1,698	220
230	1,698	1,706	1,715	1,724	1,732	1,741	1,750	1,759	1,767	1,776	1,785	230
240	1,785	1,794	1,802	1,811	1,820	1,829	1,838	1,846	1,855	1,864	1,873	240
250	1,873	1,882	1,891	1,899	1,908	1,917	1,926	1,935	1,944	1,953	1,962	250
260	1,962	1,971	1,979	1,988	1,997	2,006	2,015	2,024	2,033	2,042	2,051	260
270	2,051	2,060	2,069	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132	2,141	270
280	2,141	2,150	2,159	2,168	2,177	2,186	2,195	2,204	2,213	2,222	2,232	280
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,304	2,314	2,323	290
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,359	2,368	2,378	2,387	2,396	2,405	2,414	300
310	2,414	2,424	2,433	2,442	2,451	2,460	2,470	2,479	2,488	2,497	2,506	310
320	2,506	2,516	2,525	2,534	2,543	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590	2,599	320
330	2,599	2,608	2,618	2,627	2,636	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683	2,692	330
340	2,692	2,702	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,776	2,786	340
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,823	2,833	2,842	2,852	2,861	2,870	2,880	350
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,917	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965	2,974	360
370	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050	3,059	3,069	370
380	3,069	3,078	3,088	3,097	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145	3,155	3,164	380
390	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,221	3,231	3,241	3,250	3,260	390

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
400	3,260	3,269	3,279	3,288	3,298	3,308	3,317	3,327	3,336	3,346	3,356	400
410	3,356	3,365	3,375	3,384	3,394	3,404	3,413	3,423	3,433	3,442	3,452	410
420	3,452	3,462	3,471	3,481	3,491	3,500	3,510	3,520	3,529	3,539	3,549	420
430	3,549	3,558	3,568	3,578	3,587	3,597	3,607	3,616	3,626	3,636	3,645	430
440	3,645	3,655	3,665	3,675	3,684	3,694	3,704	3,714	3,723	3,733	3,743	440
450	3,743	3,752	3,762	3,772	3,782	3,791	3,801	3,811	3,821	3,831	3,840	450
460	3,840	3,850	3,860	3,870	3,879	3,889	3,899	3,909	3,919	3,928	3,938	460
470	3,938	3,948	3,958	3,968	3,977	3,987	3,997	4,007	4,017	4,027	4,036	470
480	4,036	4,046	4,056	4,066	4,076	4,086	4,095	4,105	4,115	4,125	4,135	480
490	4,135	4,145	4,155	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,214	4,224	4,234	490
500	4,234	4,243	4,253	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323	4,333	500
510	4,333	4,343	4,352	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422	4,432	510
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522	4,532	520
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622	4,632	530
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722	4,732	540
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,792	4,802	4,812	4,822	4,832	550
560	4,832	4,842	4,852	4,862	4,873	4,883	4,893	4,903	4,913	4,923	4,933	560
570	4,933	4,943	4,953	4,963	4,973	4,984	4,994	5,004	5,014	5,024	5,034	570
580	5,034	5,044	5,054	5,065	5,075	5,085	5,095	5,105	5,115	5,125	5,136	580
590	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,197	5,207	5,217	5,227	5,237	590
600	5,237	5,247	5,258	5,268	5,278	5,288	5,298	5,309	5,319	5,329	5,339	600
610	5,339	5,350	5,360	5,370	5,380	5,391	5,401	5,411	5,421	5,431	5,442	610
620	5,442	5,452	5,462	5,473	5,483	5,493	5,503	5,514	5,524	5,534	5,544	620
630	5,544	5,555	5,565	5,575	5,586	5,596	5,606	5,617	5,627	5,637	5,648	630
640	5,648	5,658	5,668	5,679	5,689	5,700	5,710	5,720	5,731	5,741	5,751	640
650	5,751	5,762	5,772	5,782	5,793	5,803	5,814	5,824	5,834	5,845	5,855	650
660	5,855	5,866	5,876	5,887	5,897	5,907	5,918	5,928	5,939	5,949	5,960	660
670	5,960	5,970	5,980	5,991	6,001	6,012	6,022	6,033	6,043	6,054	6,064	670
680	6,064	6,075	6,085	6,096	6,106	6,117	6,127	6,138	6,148	6,159	6,169	680
690	6,169	6,180	6,190	6,201	6,211	6,222	6,232	6,243	6,253	6,264	6,274	690
700	6,274	6,285	6,295	6,306	6,316	6,327	6,338	6,348	6,359	6,369	6,380	700
710	6,380	6,390	6,401	6,412	6,422	6,433	6,443	6,454	6,465	6,475	6,486	710
720	6,486	6,496	6,507	6,518	6,528	6,539	6,549	6,560	6,571	6,581	6,592	720
730	6,592	6,603	6,613	6,624	6,635	6,645	6,656	6,667	6,677	6,688	6,699	730
740	6,699	6,709	6,720	6,731	6,741	6,752	6,763	6,773	6,784	6,795	6,805	740
750	6,805	6,816	6,827	6,838	6,848	6,859	6,870	6,880	6,891	6,902	6,913	750
760	6,913	6,923	6,934	6,945	6,956	6,966	6,977	6,988	6,999	7,009	7,020	760
770	7,020	7,031	7,042	7,053	7,063	7,074	7,085	7,096	7,107	7,117	7,128	770
780	7,128	7,139	7,150	7,161	7,171	7,182	7,193	7,204	7,215	7,225	7,236	780
790	7,236	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,301	7,312	7,323	7,334	7,345	790
800	7,345	7,356	7,367	7,377	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443	7,454	800
810	7,454	7,465	7,476	7,486	7,497	7,508	7,519	7,530	7,541	7,552	7,563	810
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,651	7,661	7,672	820
830	7,672	7,683	7,694	7,705	7,716	7,727	7,738	7,749	7,760	7,771	7,782	830
840	7,782	7,793	7,804	7,815	7,826	7,837	7,848	7,859	7,870	7,881	7,892	840
850	7,892	7,904	7,915	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992	8,003	850
860	8,003	8,014	8,025	8,036	8,047	8,058	8,069	8,081	8,092	8,103	8,114	860
870	8,114	8,125	8,136	8,147	8,158	8,169	8,180	8,192	8,203	8,214	8,225	870
880	8,225	8,236	8,247	8,258	8,270	8,281	8,292	8,303	8,314	8,325	8,336	880
890	8,336	8,348	8,359	8,370	8,381	8,392	8,404	8,415	8,426	8,437	8,448	890
900	8,448	8,460	8,471	8,482	8,493	8,504	8,516	8,527	8,538	8,549	8,560	900
910	8,560	8,572	8,583	8,594	8,605	8,617	8,628	8,639	8,650	8,662	8,673	910
920	8,673	8,684	8,695	8,707	8,718	8,729	8,741	8,752	8,763	8,774	8,786	920
930	8,786	8,797	8,808	8,820	8,831	8,842	8,854	8,865	8,876	8,888	8,899	930
940	8,899	8,910	8,922	8,933	8,944	8,956	8,967	8,978	8,990	9,001	9,012	940
950	9,012	9,024	9,035	9,047	9,058	9,069	9,081	9,092	9,103	9,115	9,126	950
960	9,126	9,138	9,149	9,160	9,172	9,183	9,195	9,206	9,217	9,229	9,240	960
970	9,240	9,252	9,263	9,275	9,286	9,298	9,309	9,320	9,332	9,343	9,355	970
980	9,355	9,368	9,378	9,389	9,401	9,412	9,424	9,435	9,447	9,458	9,470	980
990	9,470	9,481	9,493	9,504	9,516	9,527	9,539	9,550	9,562	9,573	9,585	990
1.000	9,585	9,596	9,608	9,619	9,631	9,642	9,654	9,665	9,677	9,689	9,700	1.000
1.010	9,700	9,712	9,723	9,735	9,746	9,758	9,770	9,781	9,793	9,804	9,816	1.010
1.020	9,816	9,828	9,839	9,851	9,862	9,874	9,886	9,897	9,909	9,920	9,932	1.020
1.030	9,932	9,944	9,955	9,967	9,979	9,990	10,002	10,013	10,025	10,037	10,048	1.030
1.040	10,048	10,060	10,072	10,083	10,095	10,107	10,118	10,130	10,142	10,154	10,165	1.040

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	° C
<i>Milivoltios</i>												
1.050	10,165	10,177	10,189	10,200	10,212	10,224	10,235	10,247	10,259	10,271	10,282	1.050
1.060	10,282	10,294	10,306	10,318	10,329	10,341	10,353	10,364	10,376	10,388	10,400	1.060
1.070	10,400	10,411	10,423	10,435	10,447	10,459	10,470	10,482	10,494	10,506	10,517	1.070
1.080	10,517	10,529	10,541	10,553	10,565	10,576	10,588	10,600	10,612	10,624	10,635	1.080
1.090	10,635	10,647	10,659	10,671	10,683	10,694	10,706	10,718	10,730	10,742	10,754	1.090
1.100	10,754	10,765	10,777	10,789	10,801	10,813	10,825	10,836	10,848	10,860	10,872	1.100
1.110	10,872	10,884	10,896	10,908	10,919	10,931	10,943	10,955	10,967	10,979	10,991	1.110
1.120	10,991	11,003	11,014	11,026	11,038	11,050	11,062	11,074	11,086	11,098	11,110	1.120
1.130	11,110	11,121	11,133	11,145	11,157	11,169	11,181	11,193	11,205	11,217	11,229	1.130
1.140	11,229	11,241	11,252	11,264	11,276	11,288	11,300	11,312	11,324	11,336	11,348	1.140
1.150	11,348	11,360	11,372	11,384	11,396	11,408	11,420	11,432	11,443	11,455	11,467	1.150
1.160	11,467	11,479	11,491	11,503	11,515	11,527	11,539	11,551	11,563	11,575	11,587	1.160
1.170	11,587	11,599	11,611	11,623	11,635	11,647	11,659	11,671	11,683	11,695	11,707	1.170
1.180	11,707	11,719	11,731	11,743	11,755	11,767	11,779	11,791	11,803	11,815	11,827	1.180
1.190	11,827	11,839	11,851	11,863	11,875	11,887	11,899	11,911	11,923	11,935	11,947	1.190
1.200	11,947	11,959	11,971	11,983	11,995	12,007	12,019	12,031	12,043	12,055	12,067	1.200
1.210	12,067	12,079	12,091	12,103	12,116	12,128	12,140	12,152	12,164	12,176	12,188	1.210
1.220	12,188	12,200	12,212	12,224	12,236	12,248	12,260	12,272	12,284	12,296	12,308	1.220
1.230	12,308	12,320	12,332	12,345	12,357	12,369	12,381	12,393	12,405	12,417	12,429	1.230
1.240	12,429	12,441	12,453	12,465	12,477	12,489	12,501	12,514	12,526	12,538	12,550	1.240
1.250	12,550	12,562	12,574	12,586	12,598	12,610	12,622	12,634	12,647	12,659	12,671	1.250
1.260	12,671	12,683	12,695	12,707	12,719	12,731	12,743	12,755	12,767	12,780	12,792	1.260
1.270	12,792	12,804	12,816	12,828	12,840	12,852	12,864	12,876	12,888	12,901	12,913	1.270
1.280	12,913	12,925	12,937	12,949	12,961	12,973	12,985	12,997	13,010	13,022	13,034	1.280
1.290	13,034	13,046	13,058	13,070	13,082	13,094	13,107	13,119	13,131	13,143	13,155	1.290
1.300	13,155	13,167	13,179	13,191	13,203	13,216	13,228	13,240	13,252	13,264	13,276	1.300
1.310	13,276	13,288	13,300	13,313	13,325	13,337	13,349	13,361	13,373	13,385	13,397	1.310
1.320	13,397	13,410	13,422	13,434	13,446	13,458	13,470	13,482	13,495	13,507	13,519	1.320
1.330	13,519	13,531	13,543	13,555	13,567	13,579	13,592	13,604	13,616	13,628	13,640	1.330
1.340	13,640	13,652	13,664	13,677	13,689	13,701	13,713	13,725	13,737	13,749	13,761	1.340
1.350	13,761	13,774	13,786	13,798	13,810	13,822	13,834	13,846	13,859	13,871	13,883	1.350
1.360	13,883	13,895	13,907	13,919	13,931	13,943	13,956	13,968	13,980	13,992	14,004	1.360
1.370	14,004	14,016	14,028	14,040	14,053	14,065	14,077	14,089	14,101	14,113	14,125	1.370
1.380	14,125	14,138	14,150	14,162	14,174	14,186	14,198	14,210	14,222	14,235	14,247	1.380
1.390	14,247	14,259	14,271	14,283	14,295	14,307	14,319	14,332	14,344	14,356	14,368	1.390
1.400	14,368	14,380	14,392	14,404	14,416	14,429	14,441	14,453	14,465	14,477	14,489	1.400
1.410	14,489	14,501	14,513	14,526	14,538	14,550	14,562	14,574	14,586	14,598	14,610	1.410
1.420	14,610	14,622	14,635	14,647	14,659	14,671	14,683	14,695	14,707	14,719	14,731	1.420
1.430	14,731	14,744	14,756	14,768	14,780	14,792	14,804	14,816	14,828	14,840	14,852	1.430
1.440	14,852	14,865	14,877	14,889	14,901	14,913	14,925	14,937	14,949	14,961	14,973	1.440
1.450	14,973	14,985	14,998	15,010	15,022	15,034	15,046	15,058	15,070	15,082	15,094	1.450
1.460	15,094	15,106	15,118	15,130	15,143	15,155	15,167	15,179	15,191	15,203	15,215	1.460
1.470	15,215	15,227	15,239	15,251	15,263	15,275	15,287	15,299	15,311	15,324	15,336	1.470
1.480	15,336	15,348	15,360	15,372	15,384	15,396	15,408	15,420	15,432	15,444	15,456	1.480
1.490	15,456	15,468	15,480	15,492	15,504	15,516	15,528	15,540	15,552	15,564	15,576	1.490
1.500	15,576	15,589	15,601	15,613	15,625	15,637	15,649	15,661	15,673	15,685	15,697	1.500
1.510	15,697	15,709	15,721	15,733	15,745	15,757	15,769	15,781	15,793	15,805	15,817	1.510
1.520	15,817	15,829	15,841	15,853	15,865	15,877	15,889	15,901	15,913	15,925	15,937	1.520
1.530	15,937	15,949	15,961	15,973	15,985	15,997	16,009	16,021	16,033	16,045	16,057	1.530
1.540	16,057	16,069	16,080	16,092	16,104	16,116	16,128	16,140	16,152	16,164	16,176	1.540
1.550	16,176	16,188	16,200	16,212	16,224	16,236	16,248	16,260	16,272	16,284	16,296	1.550
1.560	16,296	16,308	16,319	16,331	16,343	16,355	16,367	16,379	16,391	16,403	16,415	1.560
1.570	16,415	16,427	16,439	16,451	16,462	16,474	16,486	16,498	16,510	16,522	16,534	1.570
1.580	16,534	16,546	16,558	16,569	16,581	16,593	16,605	16,617	16,629	16,641	16,653	1.580
1.590	16,653	16,664	16,676	16,688	16,700	16,712	16,724	16,736	16,747	16,759	16,771	1.590
1.600	16,771	16,783	16,795	16,807	16,819	16,830	16,842	16,854	16,866	16,878	16,890	1.600
1.610	16,890	16,901	16,913	16,925	16,937	16,949	16,960	16,972	16,984	16,996	17,008	1.610
1.620	17,008	17,019	17,031	17,043	17,055	17,067	17,078	17,090	17,102	17,114	17,125	1.620
1.630	17,125	17,137	17,149	17,161	17,173	17,184	17,196	17,208	17,220	17,231	17,243	1.630
1.640	17,243	17,255	17,267	17,278	17,290	17,302	17,313	17,325	17,337	17,349	17,360	1.640
1.650	17,360	17,372	17,384	17,396	17,407	17,419	17,431	17,442	17,454	17,466	17,477	1.650
1.660	17,477	17,489	17,501	17,512	17,524	17,536	17,548	17,559	17,571	17,583	17,594	1.660
1.670	17,594	17,606	17,617	17,629	17,641	17,652	17,664	17,676	17,687	17,699	17,711	1.670
1.680	17,711	17,722	17,734	17,745	17,757	17,769	17,780	17,792	17,803	17,815	17,826	1.680
1.690	17,826	17,838	17,850	17,861	17,873	17,884	17,896	17,907	17,919	17,930	17,942	1.690

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
1.700	17,942	17,953	17,965	17,976	17,988	17,999	18,010	18,022	18,033	18,045	18,056	1.700
1.710	18,056	18,068	18,079	18,090	18,102	18,113	18,124	18,136	18,147	18,158	18,170	1.710
1.720	18,170	18,181	18,192	18,204	18,215	18,226	18,237	18,249	18,260	18,271	18,282	1.720
1.730	18,282	18,293	18,305	18,316	18,327	18,338	18,349	18,360	18,372	18,383	18,394	1.730
1.740	18,394	18,405	18,416	18,427	18,438	18,449	18,460	18,471	18,482	18,493	18,504	1.740
1.750	18,504	18,515	18,526	18,536	18,547	18,558	18,569	18,580	18,591	18,602	18,612	1.750
1.760	18,612	18,623	18,634	18,645	18,655	18,666	18,677	18,687	18,698			1.760

Tipo B

0	0,000	—0,000	—0,000	—0,001	—0,001	—0,001	—0,001	—0,001	—0,002	—0,002		0
10	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,003	—0,003		10
20	—0,003	—0,003	—0,003	—0,003	—0,003	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002		20
30	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,002	—0,001	—0,001	—0,001	—0,001	—0,001		30
40	—0,000	—0,000	—0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002		40
50	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006		50
60	0,006	0,007	0,007	0,008	0,008	0,009	0,009	0,010	0,010	0,011		60
70	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017		70
80	0,017	0,018	0,019	0,020	0,020	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024		80
90	0,025	0,026	0,026	0,027	0,028	0,029	0,030	0,031	0,031	0,032		90
100	0,033	0,034	0,035	0,036	0,037	0,038	0,039	0,040	0,041	0,042		100
110	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048	0,049	0,050	0,051	0,052		110
120	0,053	0,055	0,056	0,057	0,058	0,059	0,060	0,062	0,063	0,064		120
130	0,065	0,066	0,068	0,069	0,070	0,071	0,073	0,074	0,075	0,077		130
140	0,078	0,079	0,081	0,082	0,083	0,085	0,086	0,088	0,089	0,091		140
150	0,092	0,093	0,095	0,096	0,098	0,099	0,101	0,102	0,104	0,106		150
160	0,107	0,109	0,110	0,112	0,113	0,115	0,117	0,118	0,120	0,122		160
170	0,123	0,125	0,127	0,128	0,130	0,132	0,133	0,135	0,137	0,139		170
180	0,140	0,142	0,144	0,146	0,148	0,149	0,151	0,153	0,155	0,157		180
190	0,159	0,161	0,163	0,164	0,166	0,168	0,170	0,172	0,174	0,176		190
200	0,178	0,180	0,182	0,184	0,186	0,188	0,190	0,192	0,194	0,197		200
210	0,199	0,201	0,203	0,205	0,207	0,209	0,211	0,214	0,216	0,218		210
220	0,220	0,222	0,225	0,227	0,229	0,231	0,234	0,236	0,238	0,240		220
230	0,243	0,245	0,247	0,250	0,252	0,254	0,257	0,259	0,262	0,264		230
240	0,266	0,269	0,271	0,274	0,276	0,279	0,281	0,284	0,286	0,289		240
250	0,291	0,294	0,296	0,299	0,301	0,304	0,307	0,309	0,312	0,314		250
260	0,317	0,320	0,322	0,325	0,328	0,330	0,333	0,336	0,338	0,341		260
270	0,344	0,347	0,349	0,352	0,355	0,358	0,360	0,363	0,366	0,369		270
280	0,372	0,375	0,377	0,380	0,383	0,386	0,389	0,392	0,395	0,398		280
290	0,401	0,404	0,406	0,409	0,412	0,415	0,418	0,421	0,424	0,427		290
300	0,431	0,434	0,437	0,440	0,443	0,446	0,449	0,452	0,455	0,458		300
310	0,462	0,465	0,468	0,471	0,474	0,477	0,481	0,484	0,487	0,490		310
320	0,494	0,497	0,500	0,503	0,507	0,510	0,513	0,517	0,520	0,523		320
330	0,527	0,530	0,533	0,537	0,540	0,544	0,547	0,550	0,554	0,557		330
340	0,561	0,564	0,568	0,571	0,575	0,578	0,582	0,585	0,589	0,592		340
350	0,596	0,599	0,603	0,606	0,610	0,614	0,617	0,621	0,625	0,628		350
360	0,632	0,636	0,639	0,643	0,647	0,650	0,654	0,658	0,661	0,665		360
370	0,669	0,673	0,677	0,680	0,684	0,688	0,692	0,696	0,699	0,703		370
380	0,707	0,711	0,715	0,719	0,723	0,727	0,730	0,734	0,738	0,742		380
390	0,746	0,750	0,754	0,758	0,762	0,766	0,770	0,774	0,778	0,782		390

TABLA 6.5 (Continuación)

(IPTS 1968)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
400	0,786	0,790	0,794	0,799	0,803	0,807	0,811	0,815	0,819	0,823		400
410	0,827	0,832	0,836	0,840	0,844	0,848	0,853	0,857	0,861	0,865		410
420	0,870	0,874	0,878	0,882	0,887	0,891	0,895	0,900	0,904	0,908		420
430	0,913	0,917	0,921	0,926	0,930	0,935	0,939	0,943	0,948	0,952		430
440	0,957	0,961	0,966	0,970	0,975	0,979	0,984	0,988	0,993	0,997		440
450	1,002	1,006	1,011	1,015	1,020	1,025	1,029	1,034	1,039	1,043		450
460	1,048	1,052	1,057	1,062	1,066	1,071	1,076	1,081	1,085	1,090		460
470	1,095	1,100	1,104	1,109	1,114	1,119	1,123	1,128	1,133	1,138		470
480	1,143	1,148	1,152	1,157	1,162	1,167	1,172	1,177	1,182	1,187		480
490	1,192	1,197	1,202	1,206	1,211	1,216	1,221	1,226	1,231	1,236		490
500	1,241	1,246	1,252	1,257	1,262	1,267	1,272	1,277	1,282	1,287		500
510	1,292	1,297	1,303	1,308	1,313	1,318	1,323	1,328	1,334	1,339		510
520	1,344	1,349	1,354	1,360	1,365	1,370	1,375	1,381	1,386	1,391		520
530	1,397	1,402	1,407	1,413	1,418	1,423	1,429	1,434	1,439	1,445		530
540	1,450	1,456	1,461	1,467	1,472	1,477	1,483	1,488	1,494	1,499		540
550	1,505	1,510	1,516	1,521	1,527	1,532	1,538	1,544	1,549	1,555		550
560	1,560	1,566	1,571	1,577	1,583	1,588	1,594	1,600	1,605	1,611		560
570	1,617	1,622	1,628	1,634	1,639	1,645	1,651	1,657	1,662	1,668		570
580	1,674	1,680	1,685	1,691	1,697	1,703	1,709	1,715	1,720	1,726		580
590	1,732	1,738	1,744	1,750	1,756	1,762	1,767	1,773	1,779	1,785		590
600	1,791	1,797	1,803	1,809	1,815	1,821	1,827	1,833	1,839	1,845		600
610	1,851	1,857	1,863	1,869	1,875	1,882	1,888	1,894	1,900	1,906		610
620	1,912	1,918	1,924	1,931	1,937	1,943	1,949	1,955	1,961	1,968		620
630	1,974	1,980	1,986	1,993	1,999	2,005	2,011	2,018	2,024	2,030		630
640	2,036	2,043	2,049	2,055	2,062	2,068	2,074	2,081	2,087	2,094		640
650	2,100	2,106	2,113	2,119	2,126	2,132	2,139	2,145	2,151	2,158		650
660	2,164	2,171	2,177	2,184	2,190	2,197	2,203	2,210	2,216	2,223		660
670	2,230	2,236	2,243	2,249	2,256	2,263	2,269	2,276	2,282	2,289		670
680	2,296	2,302	2,309	2,316	2,322	2,329	2,336	2,343	2,349	2,356		680
690	2,363	2,369	2,376	2,383	2,390	2,396	2,403	2,410	2,417	2,424		690
700	2,430	2,437	2,444	2,451	2,458	2,465	2,472	2,478	2,485	2,492		700
710	2,499	2,506	2,513	2,520	2,527	2,534	2,541	2,548	2,555	2,562		710
720	2,569	2,576	2,583	2,590	2,597	2,604	2,611	2,618	2,625	2,632		720
730	2,639	2,646	2,653	2,660	2,667	2,674	2,682	2,689	2,696	2,703		730
740	2,710	2,717	2,724	2,732	2,739	2,746	2,753	2,760	2,768	2,775		740
750	2,782	2,789	2,797	2,804	2,811	2,818	2,826	2,833	2,840	2,848		750
760	2,855	2,862	2,869	2,877	2,884	2,892	2,899	2,906	2,914	2,921		760
770	2,928	2,936	2,943	2,951	2,958	2,966	2,973	2,980	2,988	2,995		770
780	3,003	3,010	3,018	3,025	3,033	3,040	3,048	3,055	3,063	3,070		780
790	3,078	3,086	3,093	3,101	3,108	3,116	3,124	3,131	3,139	3,146		790
800	3,154	3,162	3,169	3,177	3,185	3,192	3,200	3,208	3,215	3,223		800
810	3,231	3,239	3,246	3,254	3,262	3,269	3,277	3,285	3,293	3,301		810
820	3,308	3,316	3,324	3,332	3,340	3,347	3,355	3,363	3,371	3,379		820
830	3,387	3,395	3,402	3,410	3,418	3,426	3,434	3,442	3,450	3,458		830
840	3,466	3,474	3,482	3,490	3,498	3,506	3,514	3,522	3,530	3,538		840
850	3,546	3,554	3,562	3,570	3,578	3,586	3,594	3,602	3,610	3,618		850
860	3,626	3,634	3,643	3,651	3,659	3,667	3,675	3,683	3,691	3,700		860
870	3,708	3,716	3,724	3,732	3,741	3,749	3,757	3,765	3,773	3,782		870
880	3,790	3,798	3,806	3,815	3,823	3,831	3,840	3,848	3,856	3,865		880
890	3,873	3,881	3,890	3,898	3,906	3,915	3,923	3,931	3,940	3,948		890
900	3,957	3,965	3,973	3,982	3,990	3,999	4,007	4,016	4,024	4,032		900
910	4,041	4,049	4,058	4,066	4,075	4,083	4,092	4,100	4,109	4,117		910
920	4,126	4,135	4,143	4,152	4,160	4,169	4,177	4,186	4,195	4,203		920
930	4,212	4,220	4,229	4,238	4,246	4,255	4,264	4,272	4,281	4,290		930
940	4,298	4,307	4,316	4,325	4,333	4,342	4,351	4,359	4,368	4,377		940

TABLA 6.5 (Continuación)

(<i>IPTS 1968</i>)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
950	4,386	4,394	4,403	4,412	4,421	4,430	4,438	4,447	4,456	4,465		950
960	4,474	4,483	4,491	4,500	4,509	4,518	4,527	4,536	4,545	4,553		960
970	4,562	4,571	4,580	4,589	4,598	4,607	4,616	4,625	4,634	4,643		970
980	4,652	4,661	4,670	4,679	4,688	4,697	4,706	4,715	4,724	4,733		980
990	4,742	4,751	4,760	4,769	4,778	4,787	4,796	4,805	4,814	4,824		990
1.000	4,833	4,842	4,851	4,860	4,869	4,878	4,887	4,897	4,906	4,915		1.000
1.010	4,924	4,933	4,942	4,952	4,961	4,970	4,979	4,989	4,998	5,007		1.010
1.020	5,016	5,025	5,035	5,044	5,053	5,063	5,072	5,081	5,090	5,100		1.020
1.030	5,109	5,118	5,128	5,137	5,146	5,156	5,165	5,174	5,184	5,193		1.030
1.040	5,202	5,212	5,221	5,231	5,240	5,249	5,259	5,268	5,278	5,287		1.040
1.050	5,297	5,306	5,316	5,325	5,334	5,344	5,353	5,363	5,372	5,382		1.050
1.060	5,391	5,401	5,410	5,420	5,429	5,439	5,449	5,458	5,468	5,477		1.060
1.070	5,487	5,496	5,506	5,516	5,525	5,535	5,544	5,554	5,564	5,579		1.070
1.080	5,583	5,593	5,602	5,612	5,621	5,631	5,641	5,651	5,660	5,670		1.080
1.090	5,680	5,689	5,699	5,709	5,718	5,728	5,738	5,748	5,757	5,767		1.090
1.100	5,777	5,787	5,796	5,806	5,816	5,826	5,836	5,845	5,855	5,865		1.100
1.110	5,875	5,885	5,895	5,904	5,914	5,924	5,934	5,944	5,954	5,964		1.110
1.120	5,973	5,983	5,993	6,003	6,013	6,023	6,033	6,043	6,053	6,063		1.120
1.130	6,073	6,083	6,093	6,102	6,112	6,122	6,132	6,142	6,152	6,162		1.130
1.140	6,172	6,182	6,192	6,202	6,212	6,223	6,233	6,243	6,253	6,263		1.140
1.150	6,273	6,283	6,293	6,303	6,313	6,323	6,333	6,343	6,353	6,364		1.150
1.160	6,374	6,384	6,394	6,404	6,414	6,424	6,435	6,445	6,455	6,465		1.160
1.170	6,475	6,485	6,496	6,506	6,516	6,526	6,536	6,547	6,557	6,567		1.170
1.180	6,577	6,588	6,598	6,608	6,618	6,629	6,639	6,649	6,659	6,670		1.180
1.190	6,680	6,690	6,701	6,711	6,721	6,732	6,742	6,752	6,763	6,773		1.190
1.200	6,783	6,794	6,804	6,814	6,825	6,835	6,846	6,856	6,866	6,877		1.200
1.210	6,887	6,898	6,908	6,918	6,929	6,939	6,950	6,960	6,971	6,981		1.210
1.220	6,991	7,002	7,012	7,023	7,033	7,044	7,054	7,065	7,075	7,086		1.220
1.230	7,096	7,107	7,117	7,128	7,138	7,149	7,159	7,170	7,181	7,191		1.230
1.240	7,202	7,212	7,223	7,233	7,244	7,255	7,265	7,276	7,286	7,297		1.240
1.250	7,308	7,318	7,329	7,339	7,350	7,361	7,371	7,382	7,393	7,403		1.250
1.260	7,414	7,425	7,435	7,446	7,457	7,467	7,478	7,489	7,500	7,510		1.260
1.270	7,521	7,532	7,542	7,553	7,564	7,575	7,585	7,596	7,607	7,618		1.270
1.280	7,628	7,639	7,650	7,661	7,671	7,682	7,693	7,704	7,715	7,725		1.280
1.290	7,736	7,747	7,758	7,769	7,780	7,790	7,801	7,812	7,823	7,834		1.290
1.300	7,845	7,855	7,866	7,877	7,888	7,899	7,910	7,921	7,932	7,943		1.300
1.310	7,953	7,964	7,975	7,986	7,997	8,008	8,019	8,030	8,041	8,052		1.310
1.320	8,063	8,074	8,085	8,096	8,107	8,118	8,128	8,139	8,150	8,161		1.320
1.330	8,172	8,183	8,194	8,205	8,216	8,227	8,238	8,249	8,261	8,272		1.330
1.340	8,283	8,294	8,305	8,316	8,327	8,338	8,349	8,360	8,371	8,382		1.340
1.350	8,393	8,404	8,415	8,426	8,437	8,449	8,460	8,471	8,482	8,493		1.350
1.360	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549	8,560	8,571	8,582	8,593	8,604		1.360
1.370	8,616	8,627	8,638	8,649	8,660	8,671	8,683	8,694	8,705	8,716		1.370
1.380	8,727	8,738	8,750	8,761	8,772	8,783	8,795	8,806	8,817	8,828		1.380
1.390	8,839	8,851	8,862	8,873	8,884	8,896	8,907	8,918	8,929	8,941		1.390
1.400	8,952	8,963	8,974	8,986	8,997	9,008	9,020	9,031	9,042	9,053		1.400
1.410	9,065	9,076	9,087	9,099	9,110	9,121	9,133	9,144	9,155	9,167		1.410
1.420	9,178	9,189	9,201	9,212	9,223	9,235	9,246	9,257	9,269	9,280		1.420
1.430	9,291	9,303	9,314	9,326	9,337	9,348	9,360	9,371	9,382	9,394		1.430
1.440	9,405	9,417	9,428	9,439	9,451	9,462	9,474	9,485	9,497	9,508		1.440
1.450	9,519	9,531	9,542	9,554	9,565	9,577	9,588	9,599	9,611	9,622		1.450
1.460	9,636	9,645	9,657	9,668	9,680	9,691	9,703	9,714	9,726	9,737		1.460
1.470	9,748	9,760	9,771	9,783	9,794	9,806	9,817	9,829	9,840	9,852		1.470
1.480	9,863	9,875	9,886	9,898	9,909	9,921	9,933	9,944	9,956	9,967		1.480
1.490	9,979	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036	10,048	10,059	10,071	10,082		1.490

TABLA 6.5 (Continuación)

(<i>IPTS 1968</i>)												
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
<i>Milivoltios</i>												
1.500	10,094	10,106	10,117	10,129	10,140	10,152	10,163	10,175	10,187	10,198		1.500
1.510	10,210	10,221	10,233	10,244	10,256	10,268	10,279	10,291	10,302	10,314		1.510
1.520	10,325	10,337	10,349	10,360	10,372	10,383	10,395	10,407	10,418	10,430		1.520
1.530	10,441	10,453	10,465	10,476	10,488	10,500	10,511	10,523	10,534	10,546		1.530
1.540	10,558	10,569	10,581	10,593	10,604	10,616	10,627	10,639	10,651	10,662		1.540
1.550	10,674	10,686	10,697	10,709	10,721	10,732	10,744	10,756	10,767	10,779		1.550
1.560	10,790	10,802	10,814	10,825	10,837	10,849	10,860	10,872	10,884	10,895		1.560
1.570	10,907	10,919	10,930	10,942	10,954	10,965	10,977	10,989	11,000	11,012		1.570
1.580	11,024	11,035	11,047	11,059	11,070	11,082	11,094	11,105	11,117	11,129		1.580
1.590	11,141	11,152	11,164	11,176	11,187	11,199	11,211	11,222	11,234	11,246		1.590
1.600	11,257	11,269	11,281	11,292	11,304	11,316	11,328	11,339	11,351	11,363		1.600
1.610	11,374	11,386	11,398	11,409	11,421	11,433	11,444	11,456	11,468	11,480		1.610
1.620	11,491	11,503	11,515	11,526	11,538	11,550	11,561	11,573	11,585	11,197		1.620
1.630	11,608	11,620	11,632	11,643	11,655	11,667	11,678	11,690	11,702	11,714		1.630
1.640	11,725	11,737	11,749	11,760	11,772	11,784	11,795	11,807	11,819	11,830		1.640
1.650	11,842	11,854	11,866	11,877	11,889	11,901	11,912	11,924	11,936	11,947		1.650
1.660	11,959	11,971	11,983	11,994	12,006	12,018	12,029	12,041	12,053	12,064		1.660
1.670	12,076	12,088	12,099	12,111	12,123	12,134	12,146	12,158	12,170	12,181		1.670
1.680	12,193	12,205	12,216	12,228	12,240	12,251	12,263	12,275	12,286	12,198		1.680
1.690	12,310	12,321	12,333	12,345	12,356	12,368	12,380	12,391	12,403	12,415		1.690
1.700	12,426	12,438	12,450	12,461	12,473	12,485	12,496	12,508	12,520	12,531		1.700
1.710	12,543	12,555	12,566	12,578	12,590	12,601	12,613	12,624	12,636	12,648		1.710
1.720	12,659	12,671	12,683	12,694	12,706	12,718	12,729	12,741	12,752	12,764		1.720
1.730	12,776	12,787	12,799	12,811	12,822	12,834	12,845	12,857	12,869	12,880		1.730
1.740	12,897	12,903	12,915	12,927	12,938	12,950	12,961	12,973	12,985	12,996		1.740
1.750	13,008	13,019	13,031	13,043	13,054	13,066	13,077	13,089	13,100	13,112		1.750
1.760	13,124	13,135	13,147	13,158	13,170	13,181	13,193	13,204	13,216	13,228		1.760
1.770	13,239	13,251	13,262	13,274	13,285	13,297	13,308	13,320	13,331	13,343		1.770
1.780	13,354	13,366	13,378	13,389	13,401	13,412	13,424	13,435	13,447	13,458		1.780
1.790	13,470	13,481	13,493	13,504	13,516	13,527	13,539	13,550	13,562	13,573		1.790
1.800	13,585	13,596	13,607	13,619	13,630	13,642	13,653	13,665	13,676	13,688		1.800
1.810	13,699	13,711	13,722	13,733	13,745	13,758	13,768	13,779	13,791	13,802		1.810
1.820	13,814											1.820

ANEXO TABLA 6.5

Funciones polinómicas f.e.m. — temperatura (Norma IEC tablas IPTS-68)

Nota: Al utilizar estos programas debe trabajarse con microprocesadores con la precisión adecuada.

Campo de medida *Tipo R*
Polinomio

$$-50\text{ °C a }630,74\text{ °C} \quad E = \sum_{i=0}^7 a_i t_{68}^i \mu\text{V}$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= 5,289\,139 \\ a_2 &= 1,391\,111 \times 10^{-2} \\ a_3 &= -2,400\,524 \times 10^{-5} \\ a_4 &= 3,620\,141 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad \begin{aligned} a_5 &= -4,464\,502 \times 10^{-11} \\ a_6 &= 3,849\,769 \times 10^{-14} \\ a_7 &= -1,537\,264 \times 10^{-17} \end{aligned}$$

ANEXO TABLA 6.5 (Continuación)

Campo de medida	Tipo R Polinomio
630,74 °C a 1064,43 °C	$E = \sum_{i=0}^3 b_i t_{68}^i \mu\text{V}$ <p>donde</p> $b_0 = -2,641\,801 \times 10^{+2} \quad b_2 = 2,989\,229 \times 10^{-3}$ $b_1 = 8,046\,868 \quad b_3 = -2,687\,606 \times 10^{-7}$
1064,43 °C a 1665 °C	$E = \sum_{i=0}^3 c_i (t^*)^i \mu\text{V}$ <p>donde</p> $t^* = (t_{68} - 1365)/300$ $c_0 = 1,5540\,414 \times 10^{+4} \quad c_2 = 1,4693\,087 \times 10^{+2}$ $c_1 = 4,2357\,773 \times 10^{+3} \quad c_3 = -5,2213\,890 \times 10^{+1}$
1665 °C a 1767,6 °C	$E = \sum_{i=0}^3 d_i (t^*)^i \mu\text{V}$ <p>donde</p> $t^* = (t_{68} - 1715)/50$ $d_0 = 2,041\,6695 \times 10^{+4} \quad d_2 = -1,230\,1472 \times 10^{+1}$ $d_1 = 6,685\,0914 \times 10^{+2} \quad d_3 = -2,786\,1521$
Campo de medida	Tipo S (Pt 10 % Rd-Pt) Polinomio
- 50 °C a 630,74 °C	$E = \sum_{i=0}^6 a_i t_{68}^i \mu\text{V}$ <p>donde</p> $a_0 = 0 \quad a_4 = 2,845\,216 \times 10^{-8}$ $a_1 = 5,399\,578 \quad a_5 = -2,244\,058 \times 10^{-11}$ $a_2 = 1,251\,977 \times 10^{-2} \quad a_6 = 8,505\,417 \times 10^{-15}$ $a_3 = -2,244\,822 \times 10^{-5}$
630,74 °C a 1064,43 °C	$E = \sum_{i=0}^2 b_i t_{68}^i \mu\text{V}$ <p>donde</p> $b_0 = -2,982\,448 \times 10^{+2}$ $b_1 = 8,237\,553$ $b_2 = 1,645\,391 \times 10^{-3}$

ANEXO TABLA 6.5 (Continuación)

Campo de medida	<i>Tipo S (Pt 10 % Rd-Pt)</i> Polinomio	
1064,43 °C a 1665 °C	$E = \sum_{i=0}^3 c_i (t^*)^i \mu V$	
	donde	
	$t^* = (t_{68} - 1365)/300$	
	y	
	$c_0 = 1,394\ 3439 \times 10^{+4}$	$c_2 = -5,028\ 1206$
	$c_1 = 3,639\ 8687 \times 10^{+3}$	$c_3 = -4,245\ 0546 \times 10^{+1}$
1665 °C a 1767,6 °C	$E = \sum_{i=0}^3 d_i (t^*)^i \mu V$	
	donde	
	$t^* = (t_{68} - 1715)/50$	
	y	
	$d_0 = 1,811\ 3083 \times 10^{+4}$	$d_2 = -1,211\ 2492 \times 10^{+1}$
	$d_1 = 5,679\ 5375 \times 10^{+2}$	$d_3 = -2,811\ 7589$
Campo de medida	<i>Tipo B-Pt-30 % Rd/Pt-6 % Rd</i> Polinomio	
0 °C a 1820 °C	$E = \sum_{i=0}^8 a_i t_{68}^i \mu V$	
	donde	
	$a_0 = 0$	
	$a_1 = 2,467\ 460\ 1620 \times 10^{-1}$	$a_5 = -3,175\ 780\ 0720 \times 10^{-12}$
	$a_2 = 5,910\ 211\ 1169 \times 10^{-3}$	$a_6 = 2,401\ 036\ 7459 \times 10^{-15}$
	$a_3 = -1,430\ 712\ 3430 \times 10^{-6}$	$a_7 = -9,092\ 814\ 8159 \times 10^{-19}$
	$a_4 = 2,150\ 914\ 9750 \times 10^{-9}$	$a_8 = 1,329\ 950\ 5137 \times 10^{-22}$
Campo de medida	<i>Tipo J</i> Polinomio	
- 210 °C a 760 °C	$E = \sum_{i=0}^7 a_i t_{68}^i \mu V$	
	donde	
	$a_0 = 0$	$a_4 = 1,334\ 882\ 5735 \times 10^{-7}$
	$a_1 = 5,037\ 275\ 3027 \times 10^{+1}$	$a_5 = -1,702\ 240\ 5966 \times 10^{-10}$
	$a_2 = 3,042\ 549\ 1284 \times 10^{-2}$	$a_6 = 1,941\ 609\ 1001 \times 10^{-13}$
	$a_3 = -8,566\ 975\ 0464 \times 10^{-5}$	$a_7 = -9,639\ 184\ 4859 \times 10^{-17}$

ANEXO TABLA 6.5 (Continuación)

Campo de medida

Tipo J
Polinomio

760 °C a 1200 °C

$$E = \sum_{i=0}^5 b_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} b_0 &= 2,972\,175\,1778 \times 10^{-5} \\ b_1 &= -1,505\,963\,2873 \times 10^{-3} \\ b_2 &= 3,205\,106\,4215 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3 &= -3,221\,017\,4230 \times 10^{-3} \\ b_4 &= 1,594\,996\,8788 \times 10^{-6} \\ b_5 &= -3,123\,980\,1752 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

Campo de medida

Tipo T-Cu/Cu Ni
Polinomio

- 270 °C a 0 °C

$$E = \sum_{i=0}^{14} a_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= 3,874\,077\,3840 \times 10^{+1} \\ a_2 &= 4,412\,393\,2482 \times 10^{-2} \\ a_3 &= 1,140\,523\,8498 \times 10^{-4} \\ a_4 &= 1,997\,440\,6568 \times 10^{-5} \\ a_5 &= 9,044\,540\,1187 \times 10^{-7} \\ a_6 &= 2,276\,601\,8504 \times 10^{-8} \\ a_7 &= 3,624\,740\,9380 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_8 &= 3,864\,892\,4201 \times 10^{-12} \\ a_9 &= 2,829\,867\,8519 \times 10^{-14} \\ a_{10} &= 1,428\,138\,3349 \times 10^{-16} \\ a_{11} &= 4,883\,325\,4364 \times 10^{-19} \\ a_{12} &= 1,080\,347\,4683 \times 10^{-21} \\ a_{13} &= 1,394\,929\,1026 \times 10^{-24} \\ a_{14} &= 7,979\,589\,3150 \times 10^{-28} \end{aligned}$$

0 °C a 400 °C

$$E = \sum_{i=0}^8 b_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} b_0 &= 0 \\ b_1 &= 3,874\,077\,3840 \times 10^{+1} \\ b_2 &= 3,319\,019\,8092 \times 10^{-2} \\ b_3 &= 2,071\,418\,3645 \times 10^{-4} \\ b_4 &= -2,194\,583\,4823 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_5 &= 1,103\,190\,0550 \times 10^{-8} \\ b_6 &= -3,092\,758\,1898 \times 10^{-11} \\ b_7 &= 4,565\,333\,7165 \times 10^{-14} \\ b_8 &= -2,761\,687\,8040 \times 10^{-17} \end{aligned}$$

Campo de medida

Tipo E-Ni Cr/Cu-Ni
Polinomio

- 270 °C a 0 °C

$$E = \sum_{i=0}^{13} a_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 \\ a_1 &= 5,869\,585\,7799 \times 10^{+1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 5,166\,751\,7705 \times 10^{-2} \\ a_3 &= -4,465\,268\,3347 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ANEXO TABLA 6.5 (Continuación)

Campo de medida
Tipo E-Ni Cr/Cu-Ni
Polinomio

$$\begin{aligned} a_4 &= -1,734\,627\,0905 \times 10^{-5} & a_9 &= -5,257\,515\,8521 \times 10^{-15} \\ a_5 &= -4,871\,936\,8427 \times 10^{-7} & a_{10} &= -2,016\,960\,1996 \times 10^{-17} \\ a_6 &= -8,889\,655\,0447 \times 10^{-9} & a_{11} &= -4,950\,213\,8782 \times 10^{-20} \\ a_7 &= -1,093\,076\,7375 \times 10^{-10} & a_{12} &= -7,017\,798\,0633 \times 10^{-23} \\ a_8 &= -9,178\,453\,5039 \times 10^{-13} & a_{13} &= -4,367\,180\,8488 \times 10^{-26} \end{aligned}$$

0 °C a 100 °C

$$E = \sum_{i=0}^9 b_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} b_0 &= 0 & b_5 &= 1,542\,592\,2111 \times 10^{-9} \\ b_1 &= 5,869\,585\,7799 \times 10^{+1} & b_6 &= -2,485\,008\,9136 \times 10^{-12} \\ b_2 &= 4,311\,094\,5462 \times 10^{-2} & b_7 &= 2,338\,972\,1459 \times 10^{-15} \\ b_3 &= 5,722\,035\,8202 \times 10^{-5} & b_8 &= -1,194\,629\,6815 \times 10^{-18} \\ b_4 &= -5,402\,066\,8085 \times 10^{-7} & b_9 &= 2,556\,112\,7497 \times 10^{-22} \end{aligned}$$

Campo de medida
Tipo K-NiCr/Ni Al
Polinomio

-270 °C a 0 °C

$$E = \sum_{i=0}^{10} a_i t_{68}^i \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 0 & a_6 &= -2,475\,791\,7816 \times 10^{-10} \\ a_1 &= 3,947\,543\,3139 \times 10^{+1} & a_7 &= -1,558\,527\,6173 \times 10^{-12} \\ a_2 &= 2,746\,525\,1138 \times 10^{-2} & a_8 &= -5,972\,992\,1255 \times 10^{-15} \\ a_3 &= -1,656\,540\,6716 \times 10^{-4} & a_9 &= -1,268\,880\,1216 \times 10^{-17} \\ a_4 &= -1,519\,091\,2392 \times 10^{-6} & a_{10} &= -1,138\,279\,7374 \times 10^{-20} \\ a_5 &= -2,458\,167\,0924 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

0 °C a 1372 °C

$$E = \sum_{i=0}^8 b_i t_{68}^i + 125 \exp \left[-1/2 \left(\frac{t_{68}^i - 127}{65} \right)^2 \right] \mu V$$

donde

$$\begin{aligned} b_0 &= -1,853\,306\,3273 \times 10^{+1} & b_5 &= -3,570\,023\,1258 \times 10^{-10} \\ b_1 &= 3,891\,834\,4612 \times 10^{+1} & b_6 &= 2,993\,290\,9136 \times 10^{-13} \\ b_2 &= 1,664\,515\,4356 \times 10^{-2} & b_7 &= -1,284\,984\,8798 \times 10^{-16} \\ b_3 &= -7,870\,237\,4448 \times 10^{-5} & b_8 &= 2,223\,997\,4336 \times 10^{-20} \\ b_4 &= 2,283\,578\,5557 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

El termopar tipo K, de cromel-alumel, se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 y 1250°C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas a menos que esté protegido con un tubo de protección.

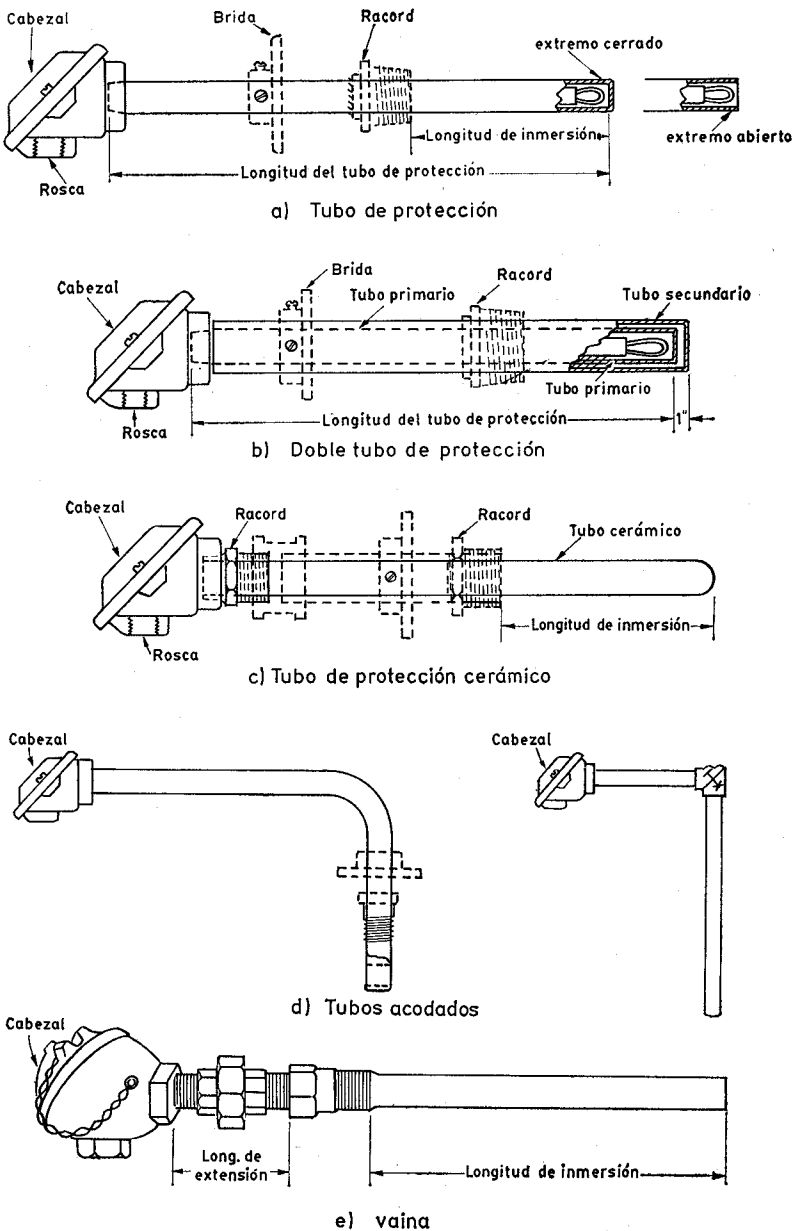


Fig. 6.21. Tubos de protección y vainas para termopares.

Los termopares tipo R, S y E de Pt-Pt/Rh se emplean en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo hasta 1500° C. Si la atmósfera es reductora, el termopar debe protegerse con un tubo cerámico estanco.

En la figura 6.21 pueden verse varios tipos de termopares con tubo de protección. El material del tubo de protección o vaina debe ser el adecuado para el proceso donde se aplica y suele ser de hierro, acero sin soldadura, acero inoxidable, inonel, cerámico, carburo de silicio, etc.

En la tabla 6.6 se indica una guía de selección de tubos según la aplicación.

Cuando el termopar está instalado a una distancia larga del instrumento, no se conecta directamente al mismo, sino por medio de un cable de extensión (figura 6.22). Los cables de extensión son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar hasta ciertos límites de temperatura (0-200° C) y son más económicos. Se suelen utilizar los siguientes:

Conductores tipo J para termopares tipo J

Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K

Conductores tipo T para termopares tipo T

Conductores tipo E para termopares tipo E

Conductores cobre-cobre níquel para termopares tipos R, S o B

Las conexiones entre el cable de compensación, el termopar y el instrumento deben ser perfectas, sin empalmes en el cable de compensación, utilizando el hilo correcto y el conjunto de la instalación debe evitar el paso próximo por fuentes de calor (aparece el efecto Thomson). Si estas recomendaciones no se cumplen aparecen tensiones térmicas de corriente continua que dan lugar a un desplazamiento en la calibración del instrumento.

El termopar es susceptible al ruido eléctrico industrial debido a que durante su funcionamiento puede generar tensiones de 2 a 50 mV y se encuentra en un entorno donde las grandes máquinas eléctricas (motores, ...) pueden crear cientos de milivoltios en el cable de conexión. Por otro lado, el termopar, trabajando como una antena, puede recoger radiación electromagnética de radio, TV y microondas. De aquí que se requiera que los cables de conexión estén torcidos y dentro de una funda metálica que se pone a tierra, que la unión de medida esté puesta a tierra, y que el amplificador tenga una buena relación señal/ruido.

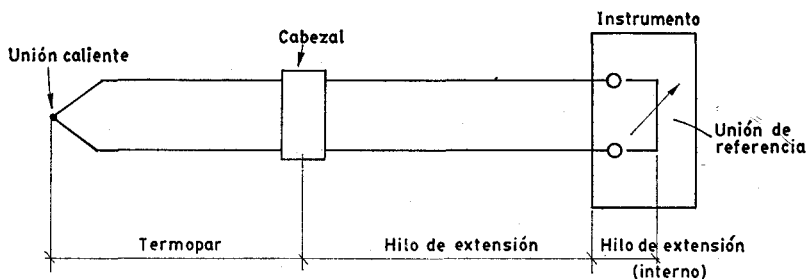


Fig. 6.22 Diagrama de un sistema pirométrico.

TABLA 6.6 Guía para la selección de tubos o vainas de protección

<i>Industria</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Tubo o vaina</i>
Tratamientos térmicos	Recocido Carburación Templado: < 700° C 700 a 1100° C > 1100° C Nitruración Baños de sales	Inconel o hierro Inconel Hierro forjado Inconel o hierro Cerámico o pirómetro radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro radiación
Hierro y acero	Hornos de soplado Hogar Techo Calderas de recuperación Fosos de recalentamiento < 1100° C > 1100° C Palanquilla, calentamiento de planchas y soldadura a tope < 1100° C > 1100° C Soldadura fuerte Recocido brillante Forjado Galvanización Baños de decapado Estañado	Inconel o hierro o carburo de silicio Inconel o pirómetro de radiación Pirómetro de radiación Inconel o hierro Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Pirómetro de radiación Termopar tipo J sin tubo de protección o pirómetro de radiación Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación Acero o carburo de silicio Plomo Acero dulce o hierro
Metales no férricos	Fundición aluminio Tratamiento térmico del aluminio Fundición latón o bronce Recocido Palanquilla Moldeo Plomo Magnesio Estaño Cinc Fundición y calcinación de mineral	Carburo de silicio o hierro Hierro o sin tubo de protección Metal fundido especial Hierro o sin tubo de protección Inconel o hierro Hierro o carburo de silicio Hierro Acero sin soldadura Acero dulce Carburo de silicio o hierro Inconel, hierro, cerámico o carburo de silicio
Cemento	Conductos de salida Horno	Inconel o hierro Pirómetro de radiación

TABLA 6.6 (Continuación)

<i>Industria</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Tubo o vaina</i>
Cerámica	Hornos Secadores Esmaltado vítreo	Cerámico o pirómetro de radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro de radiación
Química		Acero inoxidable en general. Debido a la gran variedad de aplicaciones químicas es difícil establecer recomendaciones
Alimentación		Acero inoxidable
Gas	Productor de gas Gas de agua sobrecalentado	Inconel o hierro Inconel o hierro
Vidrio	Alimentador Lehr (túnel de recocido) Tanques Conductos de tanques	Platino o pirómetro de radiación Hierro Cerámico o pirómetro de radiación Inconel o hierro
Petroquímica	Desparafinador Columna de fraccionamiento Cámara de reacción Unidades catalíticas Líneas de transferencia Torres Torre llamas	Acero inoxidable » » » » » » » » » » Inconel o hierro
Centrales térmicas	Conducto de gases Precalentadores Líneas de vapor Líneas de agua	Hierro Hierro Acero inoxidable Acero dulce
Varios	Incineradores hasta 1100° C superior a 1000° C	Inconel o hierro Cerámico y carburo de silicio

Para medir la f.e.m. del termopar pueden emplearse el circuito galvanométrico y el circuito potenciométrico.

6.7.2 Circuito galvanométrico

El circuito galvanométrico se basa en la desviación de una bobina móvil situada

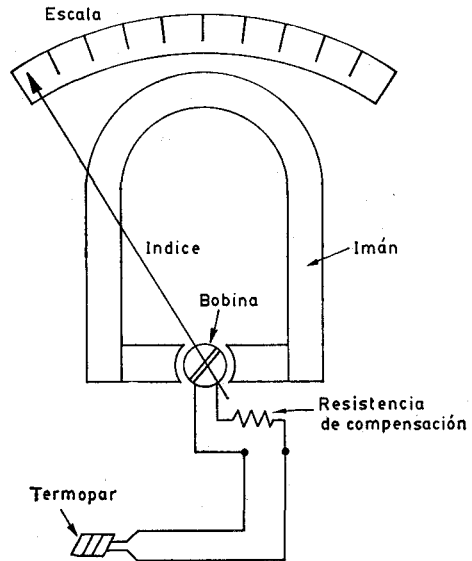


Fig. 6.23 Circuito galvanométrico.

entre dos polos de un imán permanente al pasar a su través la corriente del elemento primario (fig. 6.23). El paso de esta corriente produce un campo magnético que se opone al del imán permanente, y la bobina móvil gira hasta que el par magnético correspondiente es equilibrado por el par de tensión del muelle.

Una aguja indicadora, que está unida rígidamente a la bobina móvil, se desplaza a lo largo de una escala graduada, calibrada en las unidades de medida.

En la construcción del galvanómetro tienen importancia los siguientes puntos:

1. El buen estado de los rodamientos de zafiro, para que el par de fricción sea el menor posible; las vibraciones pueden contribuir a un desgaste prematuro, dando lugar a errores de histéresis y a falta de precisión del instrumento.
2. Los resortes de suspensión del galvanómetro deben poseer una histéresis elástica mínima para que el error de histéresis del instrumento se mantenga bajo.
3. Las variaciones de temperatura pueden influir en la resistencia eléctrica del circuito de medida, es decir, de la bobina móvil y del resorte, y para anularlas se utiliza una resistencia de coeficiente de temperatura negativo (NTC). Asimismo los cables de conexión al termopar pueden variar de resistencia con la temperatura y afectar a la exactitud de la medida.
4. Cuando el elemento de actuación es un termopar, es necesario compensar las variaciones de temperatura en la unión fría, y para ello se emplea una espiral bimetalica, para cambiar automáticamente el cero del instrumento al variar la temperatura de la caja.
5. En el caso de los pirómetros de radiación, el instrumento dispone también de un reóstato de calibración, para ajustarlo al coeficiente de emisión del cuerpo enfocado.

Hay que señalar que los circuitos galvanométricos no son demasiado afectados por las corrientes parásitas de corriente alterna ya que el amortiguamiento normal que poseen filtra muy bien las señales parásitas de alta frecuencia. En cambio, las señales parásitas de c.c. dan lugar a un corrimiento de cero del instrumento.

Es, pues, recomendable que los cables de extensión se instalen bien separados de los cables de potencia de la planta, en particular en los casos de corriente continua de alta intensidad que circule por los cables de alimentación de maquinaria eléctrica de alta potencia.

6.7.3 Circuito potenciométrico

El circuito potenciométrico está representado en la figura 6.24 *a*, *b* y *c*, y consta de una fuente de tensión constante V que alimenta los dos brazos del circuito con corrientes I_1 e I_2 . En la figura 6.24 *a*, el termopar T está conectado al brazo inferior E y, a través de un miliamperímetro, al reóstato R . La posición R del cursor del reóstato R indica la temperatura del proceso cuando no pasa corriente por el miliamperímetro, es decir, cuando el punto C del cursor de reóstato R y el punto E están a la misma tensión.

Por consiguiente, graduando el reóstato dispondríamos de un instrumento de temperatura. Sin embargo, este método es poco práctico, y se incorpora al circuito un dispositivo de autoequilibrio que sustituye al miliamperímetro por un amplificador. Mientras exista una diferencia de potencial entre la f.e.m. desarrollada por el termopar y la tensión dada por el cursor del reóstato R , el circuito amplificador excitará el motor de equilibrio hasta que la posición del cursor sea la correcta para la temperatura del proceso captada por el termopar. Así, pues, la posición del cursor representa mecánicamente la f.e.m. generada por el termopar, y, por lo tanto, su temperatura. El circuito está representado en la figura 6.24 *c* y consta de los elementos siguientes:

1. Transductor formado por un convertidor y un transformador de entrada, que convierte la señal de error de corriente continua a corriente pulsatoria, apta para ser amplificada. El convertidor puede ser mecánico o transistorizado. El primero consiste en una lámina metálica que oscila, a la frecuencia de la corriente industrial, haciendo contacto alternativamente con los bornes extremos del primario del transformador. Si existe una tensión continua de desequilibrio la corriente circula alternativamente cada mitad del bobinado primario y en sentidos contrarios. El flujo alterno generado en el núcleo induce una tensión alterna en el secundario del transformador.
2. Amplificador de tensión.
3. Amplificador de potencia, que proporciona una señal con potencia suficiente para actuar sobre el motor de equilibrio.
4. El motor de equilibrio, que es un motor de inducción reversible y mueve el cursor del reóstato, y actúa mientras exista una señal de desequilibrio entre la f.e.m. del termopar y la posición del cursor del reóstato.

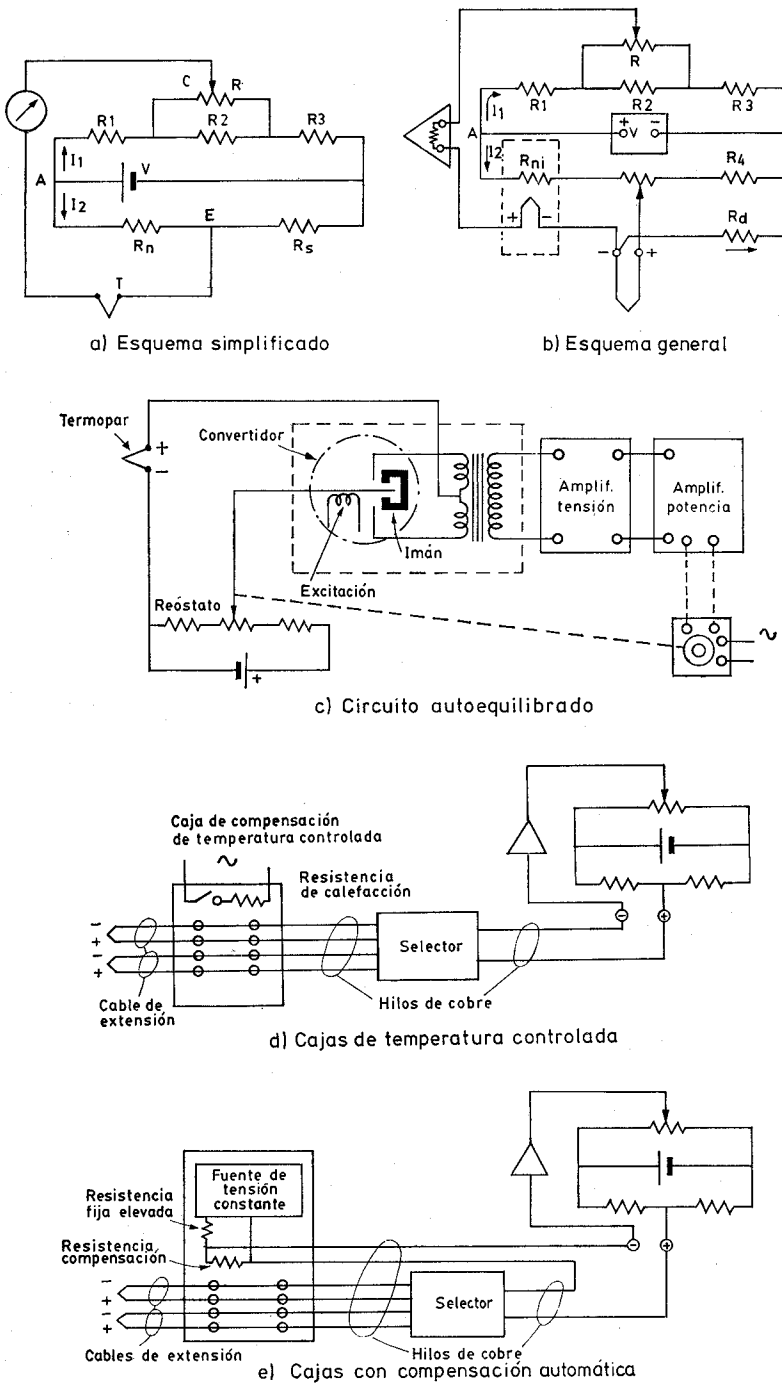
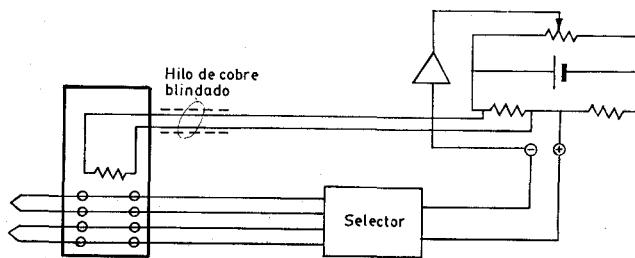
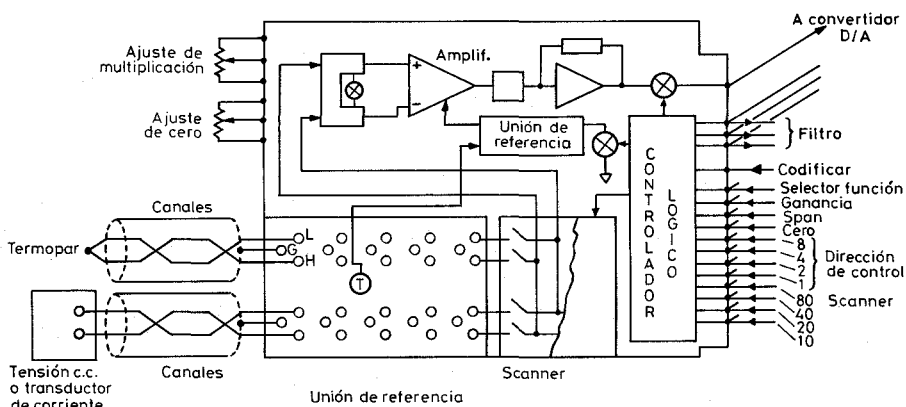


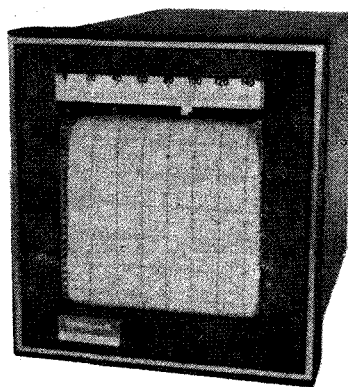
Fig. 6.24 Circuito potenciométrico.



f) caja de compensación con resistencia incorporada



g) controlador de temperatura con microprocesador



(Cortesía de Honeywell)

Fig. 6.24 (Continuación)

En el circuito potenciométrico es necesario compensar las variaciones de la temperatura en la unión de referencia del termopar.

Puede determinarse el error situando un termómetro en la caja del instrumento, y efectuando la corrección para cada lectura. No obstante, este procedimiento es poco práctico. En su lugar se emplea una resistencia para compensar la pérdida de f.e.m. al variar la temperatura de la unión de referencia. Esta resistencia es la R_{ni} de la figura 6.24 *b* y su valor a la temperatura t viene dado por la fórmula:

$$R_{nit} = R_{ni0} [1 + \alpha (t - t_0)]$$

en la que:

R_{nit} = valor de R_{ni} a $t^\circ \text{C}$

R_{ni0} = valor de R_{ni} a 0°C

α = coeficiente de resistencia

$t - t_0$ = diferencia de temperaturas

y absorbe una tensión

$$\Delta V = I_2 (R_{nit} - R_{ni0}) = I_2 \cdot R_{ni0} \cdot \alpha (t - t_0)$$

en la que I_2 = intensidad a través de R_{ni} .

Esta tensión es equivalente a la f.e.m. que tendría el termopar con la unión caliente a la temperatura de la caja del instrumento, y la unión fría a 0°C .

Si bien la resistencia de compensación de la unión o junta fría no es un sistema perfecto, su exactitud basta para que el instrumento cumpla con la precisión de medida del fabricante. En efecto, la resistencia varía linealmente con la temperatura, mientras que el termopar se caracteriza por una relación temperatura-f.e.m. que no es lineal. Se obtiene así una compensación perfecta en sólo dos puntos mientras que en los restantes la compensación si bien no es perfecta, es más que suficiente en la mayor parte de las aplicaciones industriales. Cuando se desea una gran exactitud en la medida o bien el instrumento no posee una resistencia de compensación interna es necesario utilizar cajas exteriores de compensación instaladas generalmente en proceso y en cuyo interior se encuentra la unión de referencia. Estas cajas pueden ser de temperatura controlada o bien pueden compensar automáticamente las variaciones de temperatura ambiente.

Las cajas de temperatura controlada (fig. 6.24 *d*) contienen un termostato con una resistencia de calefacción que mantiene la caja a una temperatura constante superior a la ambiente. Tienen el inconveniente de la potencia disipada necesaria y de la necesidad de utilizar termostatos.

Las cajas con compensación automática (fig. 6.24 *e*) permiten que la unión de referencia esté a la temperatura ambiente y le restan la f.e.m. requerida para que la f.e.m. resultante equivalga a la que desarrollaría la unión fría a la temperatura de referencia. Para ello, una fuente de tensión constante alimenta en serie una resistencia fija de valor elevado y una resistencia de cobre o níquel. La caída de tensión que provoca esta última equivale a una variación similar en la unión fría del termopar por lo que, añadida al circuito, actúa como la resistencia clásica de compensación colocada dentro del instrumento. En otro sistema (figu-

ra 6.24 f), la caja de compensación incorpora la propia resistencia de compensación del instrumento.

Las cajas de compensación pueden emplearse también cuando su instalación (caja + hilo de cobre) es más barata que la del sistema clásico o hilo de compensación desde el termopar hasta el instrumento.

La decisión será tanto más favorable cuanto mayor sea la distancia entre el instrumento y la propia caja de compensación.

El circuito tiene también una resistencia R_d de protección contra rotura del termopar o del cable de compensación. Esta resistencia es de valor elevado, y la intensidad que circula a su través origina una caída de tensión que se suma a la generada por el termopar, produciendo un corrimiento de cero. Esta caída de tensión es despreciable, y no influye en condiciones normales de trabajo. Sin embargo, ante la rotura del termopar la resistencia R_d cierra el circuito del amplificador lo suficiente para que el cursor del reóstato se desplace hasta el tope de la escala y pueda accionar una alarma.

Los circuitos potenciométricos son afectados por las corrientes parásitas alternas. Éstas se desfazan al pasar a través del convertidor y transformador de entrada con un ángulo distinto al correspondiente a la tensión de alimentación del amplificador. La señal componente en fase hace derivar el cero mientras que la componente en 90° perturba la sensibilidad del amplificador, dando lugar a una respuesta «perezosa» ante los cambios en la señal de temperatura.

Algunas de las causas de la aparición de corrientes parásitas en el instrumento son:

- Instalación paralela de los hilos de medida y de los cables de alimentación de un transformador o de maquinaria eléctrica de alta potencia, en particular dentro del mismo conducto.
- Señal de corriente alterna del secundario del transformador de alimentación del instrumento que ha sido mal rectificada sin un buen filtraje.
- Contacto mecánico o acoplamiento de la punta del termopar con la vaina que por algún defecto está a una tensión mayor que la de masa.
- Cables de compensación de gran longitud que por su inductancia y capacidad propias son más susceptibles de captar corrientes parásitas.

A señalar que la adición de un microprocesador permite obtener, por hardware o software, circuitos potenciométricos de diferentes características, así como transmisores «inteligentes», preparados para la medida automática de la temperatura con diferentes tipos de termopares o señales en milivoltios, con compensación de temperatura de la unión fría, con rutinas de autodiagnóstico, con linealización de la señal de salida de 4-20 mA c.c. y con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida (lo que permite la conexión a tierra del sensor con una protección elevada contra ruidos). El circuito potenciométrico tiene en memoria las tablas de f.e.m./temperatura o bien funciones polinómicas (ver tabla 6.5).

En los transmisores, un intercomunicador portátil permite la realización de todos estos cambios desde el panel de control o desde el propio transmisor.

En los registradores con microprocesador, el usuario puede configurarlo me-

diante un teclado, para que, aparte de realizar la compensación de la temperatura de la unión fría y de la linealización de la medida, imprima informes en los que figure: la fecha y hora, el tipo de señal de entrada, el formato del informe, el campo de medida de los gráficos, los puntos de alarma, las unidades de me-

TABLA 6.7 Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos

	<i>Galvanométrico</i>	<i>Potenciométrico (o Digital)</i>
Precisión	$\pm 1 \%$	$\pm 0,25$ a $\pm 0,5 \%$ ($\pm 0,1$ a $0,5 \%$)
Influencia de las variaciones de resistencia con la temperatura de los cables de compensación	Influye	No influye por no pasar corriente en el momento de la lectura
Compensación temperatura ambiente	Espiral bimetálica Termistor	Resistencia de níquel
Vibraciones	Desgastan los apoyos de la bobina móvil	Resistente
Piezas móviles	Bobina espiral metálica, espiral bimetálica	Motor de equilibrio robusto
Posición	Debe ser horizontal	No influye
Control	Ampolla de mercurio Microrruptores Fotoeléctrico Oscilador	Ídem con la posibilidad de ser más robustos
Calibración	Local-influida por las variaciones de temperatura del cable de compensación Temperatura ambiente en la caja no compensada perfectamente	Independiente del cable de compensación. Buena compensación de la temperatura ambiente
Intercambiabilidad de campos de medida	Necesario ajustar la resistencia de línea y la resistencia interna	Independiente de la resistencia de línea Se cambia sólo en circuito impreso de medida. (configurable por teclado)
Facilidad lectura a distancia	Normal	Facilitada por gran escala
Precio	Barato	Medio o caro

didada, los mensajes de preguntas al operador, la velocidad del gráfico, el código de seguridad del usuario, diagnósticos de funcionamiento, etc.

En la figura 6.24 g puede verse el esquema de un controlador de temperatura con microprocesador.

6.7.4 Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos

En la tabla 6.7 puede verse una comparación entre los circuitos galvanométricos y potenciométricos para la medida de temperaturas mediante termopar.

6.7.5 Verificación de un instrumento y de un termopar

Dos casos pueden presentarse en la medida de temperaturas con termopares: la comprobación de un instrumento galvanométrico o potenciométrico y la verificación de la f.e.m. de un termopar.

a) *Comprobación de un instrumento galvanométrico o potenciométrico con compensación de temperatura ambiente*

En este caso interesará simular con un potenciómetro (ver el capítulo 10 correspondiente a *Calibración*) la f.e.m. conveniente para que el instrumento marque varias divisiones en la escala, y colocar sobre la caja un termómetro de mercurio que nos dé la temperatura ambiente. Utilizando las tablas de conversión de f.e.m. referidas a 0° C de la unión fría, se restarán la f.e.m. V correspondiente a una temperatura determinada t y la V_a debida a la temperatura ambiente t_a , ya que en condiciones normales de trabajo, el instrumento recibirá la f.e.m. $V - V_a$ y marcará la temperatura t correspondiente a la f.e.m., puesto que tiene compensación de temperatura ambiente.

Un ejemplo aclarará la explicación anterior.

Sea un instrumento de escala 0-700° C, tipo J, con compensación de temperatura ambiente, y se trata de comprobarlo para la temperatura de 700° C. Se conecta el potenciómetro al aparato y con un termómetro de mercurio se lee 20° C como temperatura ambiente. Consultadas las tablas de conversión para el termopar tipo J se encuentran los valores siguientes:

F.e.m. correspondiente a 700° C = 39,130 mV

F.e.m. correspondiente a 20° C = 1,019 mV

Diferencia = 38,111 mV

Así pues, situaremos en el potenciómetro la señal de 38,111 mV debiendo el índice del instrumento situarse en 700° C si está bien calibrado.

En el caso de potenciómetros con microprocesador, la operación es más sencilla, ya que el aparato tiene compensación de temperatura de la unión fría y dispone en memoria de los valores f.e.m./temperatura para los diferentes tipos de termopares industriales, o bien de polinomios de valores de la f.e.m. en fun-

ción de la temperatura (ver la tabla 6.5), por lo que bastaría situar directamente, bien 700° C, bien 38,111 mV.

b) Verificación de la f.e.m. de un termopar

En este caso, el potenciómetro está conectado a los bornes del termopar y se dispone de un instrumento patrón (conectado a un termopar patrón), que mide la temperatura real t del proceso. Un termómetro de mercurio colocado en la caja del potenciómetro dará la temperatura ambiente t_a . Utilizando las tablas de conversión se sumarán la f.e.m. V_p , leída en el potenciómetro, y la V_a correspondiente a la temperatura t_a , ya que dentro del potenciómetro se encuentra la junta fría y la f.e.m. leída es menor en un valor V_a (correspondiente a t_a) a la V que se obtendría si la unión fría estuviera a 0° C.

Un ejemplo aclarará la explicación al lector. Sea un termopar tipo J de hierro-constantán a verificar. Conectado el potenciómetro se lee una f.e.m. de 38,111 mV. El termómetro de mercurio situado sobre la caja da una temperatura ambiente de 20° C. Consultadas las tablas de conversión se encuentra una f.e.m. de 1,019 mV para el termopar tipo J a 20° C.

La f.e.m. que generaría el termopar con la unión fría a 0° C sería:

$$38,111 + 1,019 = 39,130 \text{ mV}$$

que en la tabla de conversión corresponde a 700° C.

Ésta es, pues, la temperatura que otro termopar patrón conectado a otro instrumento patrón debería señalar. De no ser así el termopar sería defectuoso o estaría envejecido.

Hay que señalar que los razonamientos expuestos en los dos casos están basados en la ley de las temperaturas sucesivas expuesta al inicio del estudio de los termopares.

Si el potenciómetro fuera digital con compensación de temperatura, leería directamente 700° C, con lo que la verificación es mucho más cómoda.

6.8 Pirómetros de radiación

Los pirómetros de radiación se fundan en la ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante (en J/s por unidad de área) emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin) del cuerpo, es decir, $W = ET^4$. En la figura 6.25 se representa el gráfico de energía radiante de un cuerpo negro a varias temperaturas en función de la longitud de onda. Desde el punto de vista de medición de temperaturas industriales, las longitudes de onda térmicas abarcan desde 0,1 micra para las radiaciones ultravioletas, hasta 12 micras para las radiaciones infrarrojas.

Puede observarse que la radiación visible ocupa un intervalo entre la longitud de onda de 0,45 micras para el valor violeta hasta 0,70 micras para el rojo.

Los pirómetros de radiación miden, pues, la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación. Los instrumentos que miden la temperatura de un cuerpo en función de la radiación luminosa que éste emite, se denominan

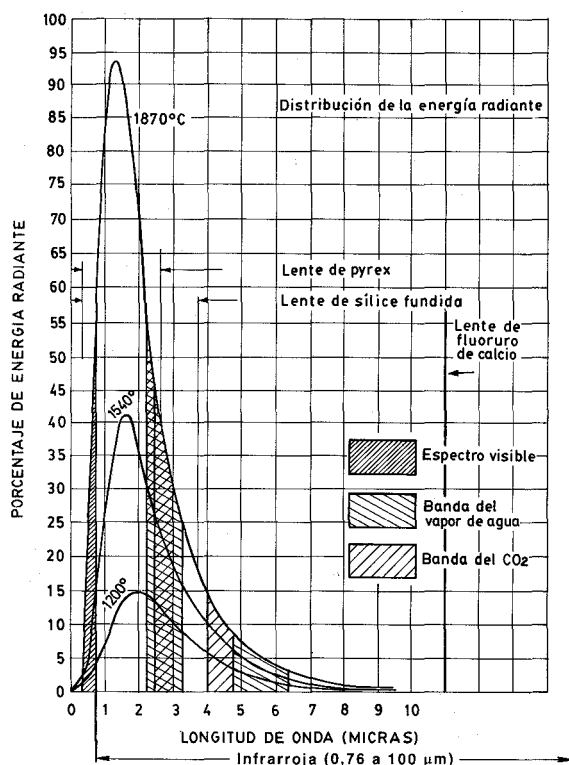


Fig. 6.25 Gráfico de la energía radiante de un cuerpo.

pirómetros ópticos de radiación parcial o pirómetros ópticos y los que miden la temperatura captando toda o una gran parte de la radiación emitida por el cuerpo, se llaman pirómetros de radiación total.

6.8.1 Pirómetros ópticos

Los pirómetros ópticos manuales se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado. Pueden ser de dos tipos: *a)* de corriente variable en la lámpara y *b)* de corriente constante en la lámpara con variación del brillo de la imagen de la fuente (fig. 6.26).

Los pirómetros ópticos automáticos son parecidos a los de radiación infrarrojos que se estudian más adelante y consisten esencialmente en un disco rotativo que modula desfasadas la radiación del objeto y la de una lámpara estándar que inciden en un fototubo multiplicador. Éste envía una señal de salida en forma de onda cuadrada de impulsos de corriente continua que convenientemente acondicionada modifica la corriente de alimentación de la lámpara estándar hasta que coinciden en brillo la radiación del objeto y la de la lámpara. En este momento, la intensidad de corriente que pasa por la lámpara es función de la temperatura.

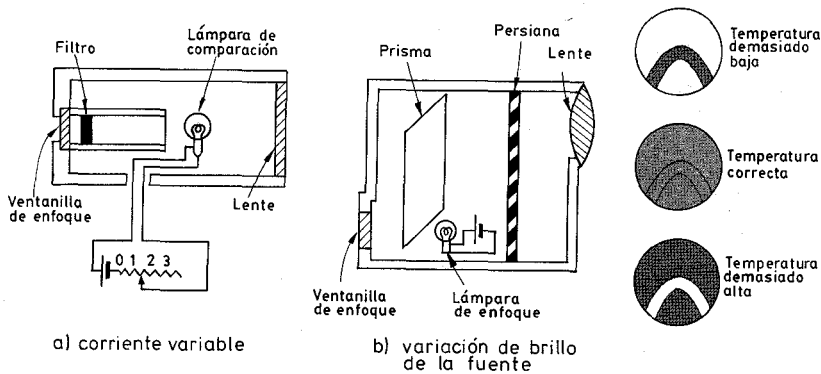


Fig. 6.26 Pirómetros ópticos.

En algunos modelos, el acondicionamiento de señal se realiza con un microprocesador, lo que permite alcanzar una precisión de $\pm 0,5\%$ en la lectura, con la posibilidad adicional de trabajar en modo continuo o de integrar picos o valles de la radiación, en el caso del paso de objetos delante del pirómetro. Un juego de lentes parecido al de una cámara fotográfica permite efectuar la lectura de objetos tan pequeños como de $\varnothing 0,4$ mm.

El *coeficiente de emisión de energía radiante* (medida de la característica relativa del cuerpo para emitir energía radiante) depende mucho del estado de la superficie del cuerpo emisor; para un metal como el cobre pasa de 0,10 a 0,85 si el metal perfectamente pulido se recubre bruscamente con una capa de óxido, y lo mismo sucede con un baño metálico líquido. En la tabla 6.8 se indican los valores de los coeficientes de emisión.

El pirómetro dirigido sobre una superficie incandescente no nos dará su temperatura verdadera si la superficie no es perfectamente negra, es decir, que absorba absolutamente todas las radiaciones y no refleje ninguna. En los casos generales es preciso hacer una corrección de la temperatura leída (temperatura de brillo S) para tener en cuenta el valor de absorción (o de emisión ϵ) de la superficie. Las correcciones pertinentes vienen indicadas en la tabla 6.9.

6.8.2 Pirómetro de infrarrojos

El pirómetro de infrarrojos capta la radiación espectral del infrarrojo, invisible al ojo humano, y puede medir temperaturas menores de 700°C , supliendo al pirómetro óptico que sólo puede trabajar eficazmente a temperaturas superiores a 700°C , donde la radiación visible emitida es significativa.

En la figura 6.27 puede verse un esquema del pirómetro de infrarrojos. La lente filtra la radiación infrarroja emitida por el área del objeto examinado y la concentra en un sensor de temperatura (termopar o termistor). La distancia focal de la lente varía entre 500 y 1500 mm. Análogamente al pirómetro óptico, debe considerarse el coeficiente de emisión del cuerpo. El aparato dispone de un compensador de emisividad

TABLA 6.8 Coeficientes de emisión monocromáticos de metales y cuerpos corrientes a 0,65 micras y para distintas temperaturas

<i>Cuerpos</i>	<i>Temperaturas °C</i>	<i>Coeficiente de emisión</i>
Cobre sólido	—	0,11
Cobre líquido	1100	0,15
	1200	0,13
Hierro sólido	1050	0,39
	1530	0,36
Hierro líquido	1535	0,36
Níquel	—	0,37
Platino sólido	—	0,31
Platino líquido	—	0,35
Tungsteno	1000	0,45
	2000	0,43
	3400	0,40
Carbono (grafito)	1000	0,85
	2000	0,90
	3000	0,95
Acero fundido (promedio)	—	0,40
Cupro-níquel fundido (55/45)	—	0,28
Nichrom	600	0,95
	1200	0,80
Óxido de cobre	1000	0,80
	1100	0,60
Óxido de hierro	800	0,98
	1200	0,92
Óxido de níquel	800	0,96
	1300	0,85
Óxido de níquel fundido	—	0,68
Óxido de aluminio puro	900	0,15
	1600	0,15
Óxido de magnesio puro	900	0,20
	1700	0,45
Sílice (briquetas industriales) (promedio)	1000 a 1500	0,52
Silicio-aluminosos (briquetas)	1000 a 1500	0,60-0,80
Carborundum (briquetas)	1000	0,86

que permite corregir la temperatura leída, no sólo para la pérdida de radiación en cuerpos con emisividad menor que uno, sino también cuando hay vapores, gases, humos o materiales transparentes que se interponen en el camino de la radiación. La precisión es del $\pm 0,3\%$.

TABLA 6.9 Corrección a añadir a la temperatura de brillo S leída en un pirómetro monocromático, para obtener la temperatura verdadera

Coeficiente de emisión monocromático a 0,65 micras	Temperaturas de brillo S leídas en el pirómetro							
	800 (°C)	1000 (°C)	1200 (°C)	1400 (°C)	1700 (°C)	2100 (°C)	2500 (°C)	3000 (°C)
0,10	+ 137	+ 201	+ 276	+ 365	+ 530	+ 810	+ 1170	+ 1800
0,20	94	133	183	240	342	510	725	1200
0,30	69	96	130	170	245	360	510	750
0,40	51	73	97	125	180	265	370	495
0,50	38	55	72	95	133	197	273	400
0,60	27	39	53	69	97	142	195	290
0,70	19	28	37	48	66	90	134	170
0,80	12	17	23	29	41	59	83	115
0,90	6	8	11	14	19	27	39	55

6.8.3 Pirómetro fotoeléctrico

El pirómetro fotoeléctrico, al tener un detector fotoeléctrico, es mucho más rápido que los sensores térmicos, pero debe mantenerse refrigerado a muy baja temperatura mediante nitrógeno líquido para reducir el nivel de ruido eléctrico.

La señal de salida depende de la temperatura instantánea del volumen del detector, por lo que evita los retardos inherentes al aumento de la temperatura de la masa del detector que existen en los otros modelos de pirómetros.

El detector genera una tensión proporcional al cubo de la temperatura $V = K T^3$.

En la figura 6.28 puede verse la sensibilidad espectral de cuatro detectores foto-

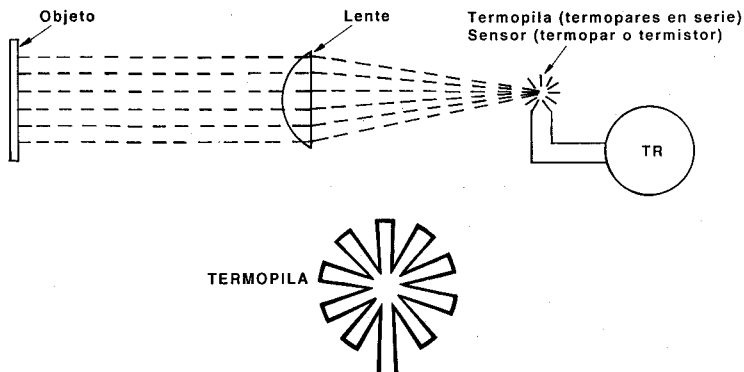


Fig. 6.27 Pirómetro de infrarrojos o radiación total.

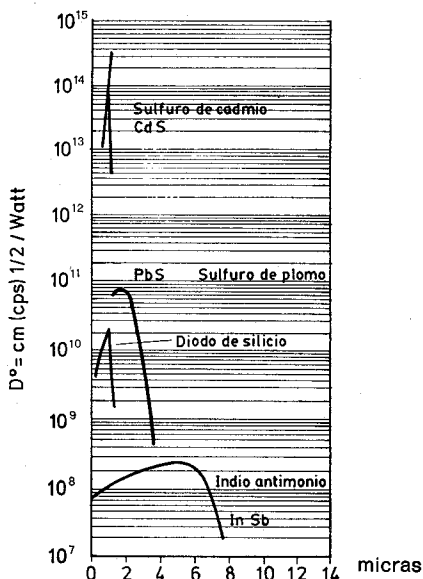


Fig.6.28 Energía relativa en función de la longitud de onda de cuatro detectores fotoeléctricos.

eléctricos. Para amplificar la señal, el instrumento interrumpe la misma mediante un disco ranurado a varios cientos de hertz, con lo que se obtiene una señal de c.a. que puede ser amplificada con un amplificador de c.a. de alta ganancia (figura 6.29)

En aplicaciones de la industria del vidrio, tales como la medición de la temperatura de las gotas de vidrio en su caída, el instrumento indicaría picos de temperatura y para disminuir la curva de onda en diente de sierra obtenida se utiliza un integrador electrónico que las reduce prácticamente a una línea casi recta (figura 6.29 b). Un instrumento de este tipo trabaja con longitudes de onda de 4,8 a 5,6 micras, que dan una mínima interferencia con el vapor de agua, dióxido de carbono y la luz solar, en el intervalo de 35 - 540° C con una constante de tiempo de 0,2 a 0,5 segundos.

El instrumento con detector fotoeléctrico de uso general tiene un campo de trabajo de 35 a 1200° C, pudiendo enfocar desde 1 m hasta el infinito, posee una constante de tiempo de 2, 20 o 200 ms y una señal de salida de 10 mV.

El perfeccionamiento de estos instrumentos ha conducido a las cámaras infrarojas que utilizan un detector fotoeléctrico de In Sb (indio antimonio) y que exploran la superficie del objeto con un espejo plano oscilante alrededor de un eje horizontal y un prisma rotativo que gira alrededor de un eje vertical. El aparato produce una imagen de 16 cuadros/segundo y 100 líneas/cuadro con tonalidades de gris que representan la distribución de temperatura del cuerpo.

6.8.4 Pirómetros de radiación total

El pirómetro de radiación total (fig. 6.27) está formado por una lente de pyrex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares de Pt-Pt/Rh, de pequeñas dimensio-

nes y montados en serie. La radiación está enfocada incidiendo directamente en las uniones calientes de los termopares. Su reducida masa les hace muy sensibles a pequeñas variaciones de la energía radiante, y, además muy resistentes a vibraciones o choques. La parte de los termopares expuesta a la radiación está ennegrecida, para comportarse como un cuerpo negro, aumentado así sus propiedades de absorción de energía, y proporcionando la f.e.m. máxima.

La f.e.m. que proporciona la termopila depende de la diferencia de temperaturas entre la unión caliente (radiación procedente del objeto enfocado) y la unión fría. Esta última coincide con la de la caja del pirómetro, es decir, con la temperatura ambiente. La compensación de ésta se lleva a cabo mediante una resistencia de níquel conectada en paralelo con los bornes de conexión del pirómetro y colocada en su interior de modo que su temperatura es siempre igual a la del cuerpo de éste. Al aumentar la temperatura ambiente aumenta el valor de la resistencia de la bobina de níquel, lo que compensa la pérdida de f.e.m. de la termopila que acompaña el calentamiento del cuerpo del instrumento. En los

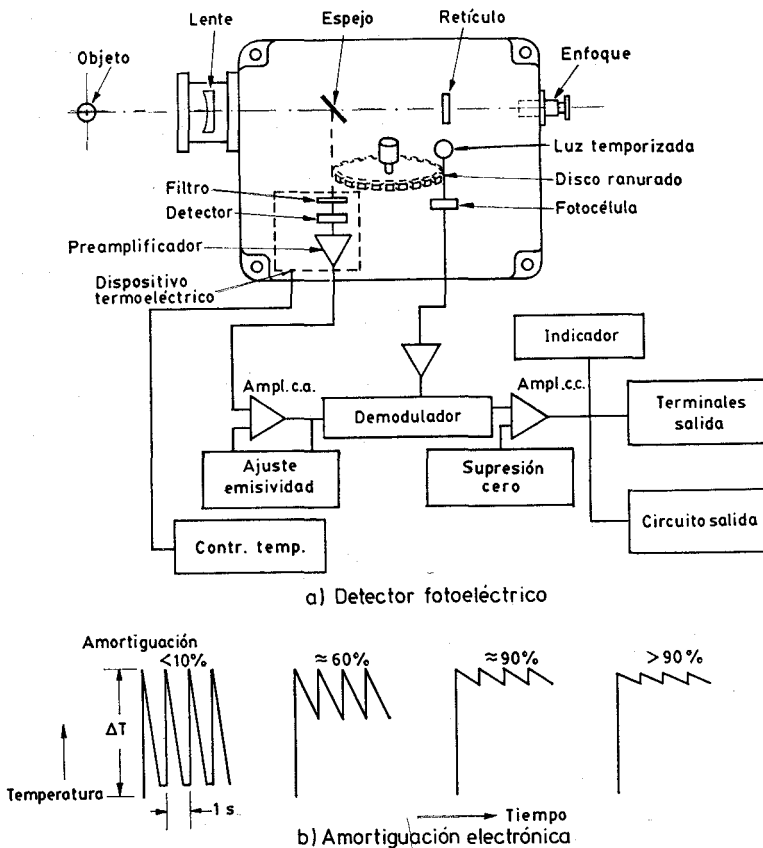


Fig. 6.29 Esquema de funcionamiento de un detector fotoeléctrico

bornes de la termopila va conectado un cable de cobre que llega hasta el instrumento.

La compensación descrita se utiliza para temperaturas ambientes máximas de 120°C . A mayores temperaturas se emplean dispositivos de refrigeración por aire o por agua, que disminuyen la temperatura de la caja en unos 10 a 40°C por debajo de la temperatura ambiente.

En la medición de bajas temperaturas, la compensación se efectúa utilizando además una resistencia termostática adicional que mantiene constante la temperatura de la caja en unos 50°C , valor que es poco más alto que la temperatura ambiente que pueda encontrarse y lo suficientemente bajo como para no reducir apreciablemente la diferencia de temperaturas útil.

El pirómetro puede disponer de los siguientes accesorios:

- Lente posterior para enfocar correctamente la radiación en la termopila.
- Dispositivo de refrigeración por aire (fig. 6.30 a) que protege la lente contra un calentamiento excesivo y, al mismo tiempo, la mantiene limpia de los gases o vapores que pueden estar en contacto con el tubo de mira.

Se recomienda que el caudal del aire de purga sea constante, y que su presión no supere los $0,7\text{ kg/cm}^2$. Se utiliza usualmente un pequeño rotámetro con regulador de caudal de una capacidad aproximada en aire de $140\text{-}1400\text{ NI/h}$ (5 a 50 scfh). De este modo, la atmósfera en contacto con la lente se encuentra libre de gases o vapores que podrían dañar la lente o condensarse en la misma, dando lugar a una disminución de la temperatura leída. Una presión mayor en el aire de purga podría dar lugar a un escape de aire a través de las juntas de la lente, y enfriar la termopila, lo que alteraría la medida.

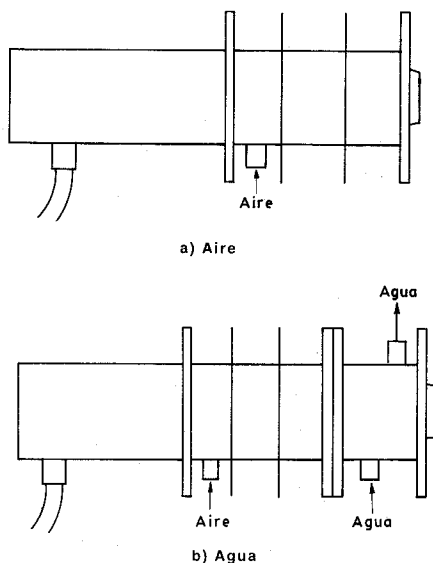


Fig. 6.30 Dispositivos de refrigeración.

- Dispositivo de refrigeración por agua (fig. 6.30 *b*) empleado usualmente con el dispositivo de refrigeración por aire. Este accesorio impide que el cuerpo del pirómetro se caliente excesivamente por conducción a lo largo del tubo de mira, o por radiación de otras fuentes.
- Dispositivo automático de seguridad para aislar la lente del proceso y proteger el pirómetro en el caso de que una llama lo alcance directamente.
- Tubos de mira con extremo abierto (fig. 6.31 *a*) que se utiliza para proteger la lente, o bien para impedir la llegada de radiaciones de otras fuentes extrañas a las que se está apuntando.
- Tubos de mira con extremo cerrado (fig. 6.31 *b*) que se emplean en hornos con atmósfera a presión, o con gases particularmente agresivos y en las medidas de temperatura de metales fundidos en los que el tubo de mira debe estar sumergido (por la existencia de escorias en la superficie de metal, que darían lugar a una temperatura leída errónea). El fondo del tubo es la fuente de radiación, y las paredes laterales tienen poca influencia. Al ser el tubo cerrado, las condiciones de trabajo se aproximan a las de cuerpo negro.

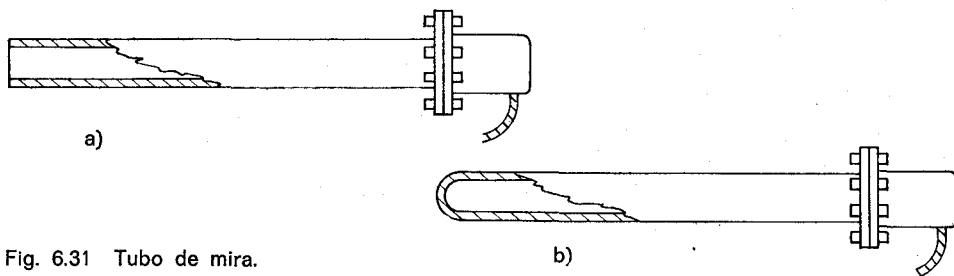


Fig. 6.31 Tubo de mira.

Los tubos pueden ser metálicos o cerámicos. Los primeros son de acero inoxidable o aleaciones metálicas resistentes al calor y a la corrosión y se emplean a temperaturas que no superan generalmente los 1100°C . Permiten una respuesta más rápida a los cambios de temperatura que los tubos cerámicos. En la tabla 6.10 pueden verse las características de estos tubos.

Los tubos cerámicos se utilizan hasta 1650°C y pueden verse en la tabla 6.11.

Los tubos cerámicos más utilizados están formados esencialmente de los materiales:

- Carburo de silicio, que se utiliza principalmente en hornos por ofrecer buenas características térmicas, respuesta rápida a las variaciones de temperatura y resistencia a los cambios bruscos de temperatura.
- Sillramic, material refractario vitrificado que, a temperaturas elevadas, presenta gran resistencia al choque térmico y a la penetración de los gases presentes en el horno, pero posee baja resistencia mecánica. Por estos motivos, este tubo debe ser usado con gran precaución. En los tratamientos térmicos en baños de

TABLA 6.10 Aleaciones resistentes a la corrosión a alta temperatura y a sales fundidas

Aleación	Composición química (%)						Aplicaciones
	Ni	Cr	Fe	Ti	Si	Al+Ni	
Inconel 600	76	17	7	—	—	—	Para atmósferas carburantes, gases de combustión, nitruración, carbo-nitruración, amoníaco disociado, baños de sales de temple y cementación
Nimonic 75	76	20	4	0,1	—	—	Igual que el anterior, no fragilizándose por el hidrógeno a alta temperatura
Incoloy 800	32	20	Resto	—	—	0,6	Parecidas al Inconel, pero menos eficaz
Incoloy D S	38	20	Resto	—	2,5	—	Igual que el anterior

sales conviene, en la puesta en marcha, calentarlo lentamente y sumergirlo a poca velocidad (se recomienda unos 25 mm por minuto), para evitar un brusco choque térmico que daría lugar a su rotura. Al cabo de unas pocas inmersiones es necesario sustituirlo, si bien, el coste es menor que si se empleara para la medida termopar de Pt-Pt/Rh.

La relación entre la f.e.m. generada y la temperatura del cuerpo es independiente de la distancia entre el cuerpo y la lente (excluyendo la presencia de gases o vapores que absorban energía) siempre que la imagen de la superficie

TABLA 6.11 Tubos cerámicos

Material	Composición	Temperatura máxima (°C)	Observaciones
Cuarzo	Sílice fundida	1260	Resistencia excelente al choque térmico
Ladrillo refractario		1450	Protección secundaria para tubos Sillramic
Sílice	Sílice	1600	En crisoles para vidrio
Sillramic	Sílice-aluminio	1650	{ Resistencia al choque térmico { Resistencia mecánica débil
Mullite	Sílice-aluminio	1650	Protección secundaria de choque mecánico y térmico. De mayor diámetro que el anterior
Aluminio de alta pureza	99 % aluminio puro	1870	Resistencia al choque mecánico y térmico
Óxido de berilio	Óxido de berilio	2200	{ Resistencia excelente al choque térmico { Resistencia débil al choque mecánico
Tubos metálicos-cerámicos	Cromo-aluminio	1425	{ Resistencia excelente a los sulfuros { Buena resistencia al choque térmico y mecánico

del cuerpo emisor de la radiación cubra totalmente la unión caliente de la termopila. El fabricante normaliza la relación entre las dimensiones del objeto y su distancia a la lente, para garantizar unas buenas condiciones de lectura. De este modo existen pirómetros de radiación de ángulo estrecho (factor de distancia 20 : 1) y de ángulo ancho (factor de distancia 7 : 1) (fig. 6.32).

Un problema de gran importancia es la selección del material de la lente que debe transmitir la máxima energía compatible con la gama de radiación emitida.

Las lentes de pyrex se utilizan en el campo de temperaturas de 850 a 1750° C, la lente de sílice fundida en el intervalo de 450 a 1250° C y la lente de fluoruro de calcio para temperaturas inferiores.

En la figura 6.25, de distribución de energía radiante, puede verse que la radiación visible representa el área entre 0,4 y 0,75 micras, que las lentes de pyrex permiten el paso de ondas de 0,3 a 2,7 micras; que las de sílice fundida dejan pasar ondas de 0,3 a 3,5 micras, y que las de fluoruro de calcio, lo hacen hasta 12 micras; las llamas no luminosas irradian y absorben energía en una banda ancha de 2,4 a 3,2 micras debido a la presencia de CO₂ y vapor de agua. De este modo, el empleo de la lente de pyrex elimina prácticamente todas las longitudes de onda correspondientes a la energía irradiada por el CO₂ y vapor de agua y por consiguiente la medida de la temperatura no viene influida por la presencia de llamas no luminosas. Sin embargo, un pirómetro con lente de sílice que deja pasar ondas entre 0,3 y 3,8 micras es sensible a la radiación de la llama no luminosa si ésta interfiere en la línea de mira del instrumento. Asimismo, un pirómetro especial, constituido por una lente de fluoruro de calcio y con un ángulo de enfoque ancho para captar la mayor cantidad posible de energía (que a bajas temperaturas es muy débil), permite medir temperaturas muy bajas, de 50 a 200° C.

Señalemos ahora algunos aspectos de la aplicación de los pirómetros de radiación en la medición de temperaturas de cuerpos negros, opacos y transparentes.

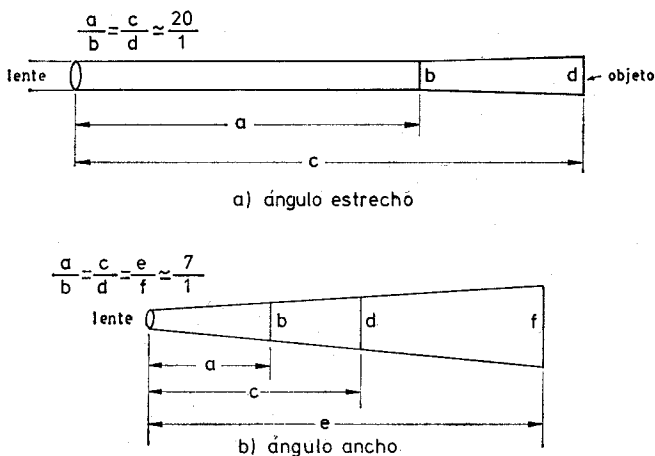


Fig. 6.32 Pirómetros de radiación de ángulos estrecho y ancho.

Un cuerpo opaco emite a una temperatura dada una cantidad de energía de radiación que depende del material y de la forma de la superficie. La medida de la característica relativa del cuerpo para emitir energía radiante recibe el nombre de *coeficiente de emisión o emisividad*. El cuerpo puede reflejar energía radiante adicional, procedente de cuerpos próximos, llamas, etc., de modo que si tiene un bajo coeficiente de emisión reflejará una gran cantidad de energía incidente, y, al contrario, con un alto coeficiente de emisión la energía reflejada será baja.

El cuerpo negro posee una emisividad igual a la unidad y emite la máxima energía radiante. Los cuerpos cuyo coeficiente de emisión es menor que la unidad se conocen como cuerpos opacos.

Si la emisividad del cuerpo es conocida, el instrumento receptor lleva acoplado un pequeño reóstato de ajuste que permite ajustar directamente la lectura a la temperatura exacta del cuerpo caliente.

Al captar la radiación de un cuerpo opaco, la f.e.m. observada en la termopila es menor que la correspondiente a la temperatura verdadera, siendo su relación:

$$\text{f.e.m. equivalente} = \text{f.e.m. observada} / \text{emisividad}$$

La energía radiante que emerge de una pequeña abertura en la pared de un recinto calentado uniformemente y con paredes opacas (que tenga o no objetos en su interior a la misma temperatura), tiende a ser radiación de cuerpo negro, ya que la energía que entra o sale de la abertura no se refleja sino que es absorbida a través de las innumerables reflexiones internas. Éste es el caso de muchas instalaciones industriales en las que el pirómetro enfoca directamente a una abertura del horno, o al extremo de un tubo de mira cerrado.

Un pirómetro de radiación calibrado para condiciones de cuerpo negro indicará una baja temperatura al enfocar a un cuerpo opaco instalado en el exterior de forma que éste no refleje prácticamente energía radiante de otras fuentes. En la tabla 6.12 pueden verse los coeficientes de emisión de varias sustancias situadas en estas condiciones.

Hay que señalar que los coeficientes de emisión de materiales tales como óxido de cobre, óxido de hierro y óxido de níquel son lo suficientemente elevados para medir de forma muy exacta la temperatura sin demasiados errores procedentes de radiaciones parásitas.

Sin embargo, los materiales de superficie limpia, tales como aluminio, níquel, acero inoxidable y latón poseen bajos coeficientes de emisión y por consiguiente reflejan un gran porcentaje de energía. En estos casos el empleo de un pirómetro de radiación puede dar lugar a grandes errores, a menos que la medida se efectúe en condiciones controladas. Lo mismo ocurre ante la presencia de una película de aceite y de escoria.

En la tabla 6.13 pueden verse los valores de la f.e.m. de los pirómetros de radiación según el tipo de lente que utilizan.

El coeficiente de emisión de un cuerpo a 0,65 micras (longitud de onda a la que es sensible el pirómetro óptico) es mayor que su emisividad total (ver tablas 6.8, 6.12 y 6.13) y por lo tanto los errores que se cometen al tomar un coeficiente igual a la unidad en condiciones que se desvían del cuerpo negro son mayores en el pirómetro de radiación total que el óptico. Así pues, con correcciones

TABLA 6.12 Coeficientes de emisión total de sustancias diversas

Material	Zona de valores observados	Valor probable para el óxido formado en la superficie de los metales
Latón (oxidado)	—	0,60
Cobre recalentado	0,28	—
Cobre recalentado (oxidado)	—	0,19
Acero recalentado (oxidado)	—	0,57
Refractario	0,75	—
Esmalte dorado	0,37	—
Plomo (oxidado)	—	0,63
Monel (oxidado)	—	0,43
Níquel (oxidado)	—	0,85
Aluminio oxidado	0,22 a 0,40	0,30
Berilio oxidado	0,07 a 0,37	0,35
Óxido de cerio	0,58 a 0,80	—
Óxido de cromo	0,60 a 0,80	0,70
Óxido de cobalto	—	0,75
Óxido de culombio	0,55 a 0,71	0,70
Óxido de cobre	0,60 a 0,80	0,70
Óxido de hierro	0,63 a 0,98	0,70
Óxido de magnesio	0,10 a 0,43	0,20
Óxido de níquel	0,85 a 0,96	0,90
Óxido de torio	0,20 a 0,57	0,50
Óxido de estaño	0,32 a 0,60	—
Óxido de titanio	—	0,50
Óxido de uranio	—	0,30
Óxido de vanadio	—	0,70
Óxido de itrio	—	0,60
Óxido de zirconio	0,18 a 0,43	0,40
Alumel (oxidado)	—	0,87
Fundición de hierro (oxidado)	—	0,70
Cromel P(90 Ni - 10 Cr) (oxidado)	—	0,87
80 Ni - 20 Cr (oxidado)	—	0,90
60 Ni - 24 Fe - 16 Cr (oxidado)	—	0,83
55 Fe - 37,5 Cr - 7,5 Al (oxidado)	—	0,78
70 Fe - 23 Cr - 5 Al - 2 Co (oxidado)	—	0,75
Constantán (55 Cu-45 Ni) (oxidado)	—	0,84
Acero al carbono (oxidado)	—	0,80
Acero inoxidable (18-8) (oxidado)	—	0,85
Porcelana	0,25 a 0,50	—

de emisividad adecuadas, el pirómetro óptico es muy útil para comprobar los pirómetros de radiación.

La determinación de las temperaturas verdaderas con un pirómetro de radiación puede efectuarse aplicando uno de los dos métodos siguientes:

1. Corrección empleando las tablas de coeficientes de emisión y las curvas de las figuras 6.33, 6.34, 6.35 y 6.36.
2. Corrección empleando las tablas de coeficientes de emisión, la fórmula f.e.m. equivalente = f.e.m. observada/emisividad, y la tabla 6.13 de f.e.m.

Invitamos al lector a verificar los siguientes ejemplos:

Ejemplo 1

- | | |
|-----------------------------------|--|
| — Objeto | — Acero con superficie oxidada |
| — Instrumento | — Pirómetro de radiación con lente de sílice fundida |
| — Temperatura indicada | — 1067° C (1953° F) |
| — Temperatura verdadera calculada | — 1132° C (2069° F) |

TABLA 6.13 F.e.m. de los pirómetros de radiación

Lente de pyrex

°C	400	500	600	700	800	900	1000
MILIVOLTIOS							
0	0,04	0,13	0,29	0,65	1,29	2,31	3,81
10		0,14	0,32	0,70	1,37	2,43	3,99
20	0,05	0,15	0,35	0,75	1,46	2,57	4,17
30		0,16	0,38	0,81	1,55	2,71	4,35
40	0,07	0,17	0,41	0,87	1,64	2,85	4,55
50		0,19	0,44	0,93	1,74	2,99	4,77
60	0,09	0,21	0,48	0,99	1,85	3,14	4,99
70		0,23	0,52	1,06	1,96	3,30	5,21
80	0,11	0,25	0,56	1,13	2,07	3,46	5,43
90		0,27	0,60	1,21	2,19	3,63	5,65
100	0,13	0,29	0,65	1,29	2,31	3,81	5,89

Lente de sílice fundida

°C	400	500	600	700	800	900	1000
MILIVOLTIOS							
0	0,16	0,38	0,79	1,53	2,69	4,39	6,72
10		0,41	0,85	1,62	2,83	4,59	7,00
20	0,20	0,44	0,91	1,72	2,97	4,79	7,29
30		0,47	0,97	1,82	3,13	5,00	7,59
40	0,24	0,51	1,04	1,93	3,29	5,22	7,89
50		0,55	1,11	2,04	3,45	5,46	8,20
60	0,28	0,59	1,19	2,16	3,63	5,70	8,52
70		0,64	1,27	2,28	3,81	5,94	8,84
80	0,33	0,69	1,35	2,41	3,99	6,19	9,18
90		0,74	1,44	2,55	4,19	6,45	9,52
100	0,38	0,79	1,53	2,69	4,39	6,72	9,88

°C	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
MILIVOLTIOS							
0	5,88	8,79	12,66	17,57	23,66	30,95	39,54
10	6,14	9,13	13,10	18,13	24,34	31,74	40,48
20	6,40	9,49	13,55	18,70	25,02	32,54	41,43
30	6,67	9,85	14,01	19,28	25,71	33,37	42,39
40	6,95	10,22	14,49	19,86	26,41	34,22	43,36
50	7,24	10,60	14,97	20,46	27,13	35,08	44,34
60	7,54	10,99	15,47	21,08	27,87	35,94	45,34
70	7,84	11,40	15,98	21,70	28,63	36,82	46,34
80	8,15	11,82	16,50	22,34	29,39	37,71	47,36
90	8,47	12,24	17,03	22,99	30,17	38,62	48,38
100	8,79	12,66	17,57	23,66	30,95	39,54	49,40

°C	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
MILIVOLTIOS							
0	9,88	13,99	19,20	25,64	33,41	42,53	53,07
10	10,25	14,46	19,78	26,36	34,26	43,51	54,19
20	10,63	14,94	20,37	27,08	35,13	44,53	55,33
30	11,01	15,44	20,99	27,82	36,00	45,55	56,49
40	11,41	15,94	21,62	28,57	36,88	46,58	57,66
50	11,81	16,45	22,26	29,35	37,76	47,62	58,86
60	12,23	16,97	22,90	30,13	38,68	48,66	60,08
70	12,66	17,51	23,56	30,92	39,62	49,74	61,31
80	13,10	18,07	24,24	31,73	40,59	50,84	62,55
90	13,54	18,63	24,94	32,56	41,56	51,95	63,80
100	13,99	19,20	25,64	33,41	42,53	53,07	65,06

Lente de fluoruro de calcio

°C	100	200	300	400	500	600
MILIVOLTIOS						
0	0,02	0,11	0,31	0,67	1,26	2,16
10		0,13	0,34	0,72	1,34	2,27
20		0,14	0,37	0,77	1,42	2,38
30	0,04	0,16	0,40	0,82	1,50	2,51
40		0,18	0,43	0,88	1,58	2,64
50	0,06	0,20	0,47	0,93	1,67	2,77
60	0,07	0,21	0,50	1,00	1,76	
70	0,08	0,24	0,54	1,06	1,86	
80	0,09	0,26	0,58	1,12	1,96	
90	0,10	0,28	0,63	1,19	2,06	
100	0,11	0,31	0,67	1,26	2,16	

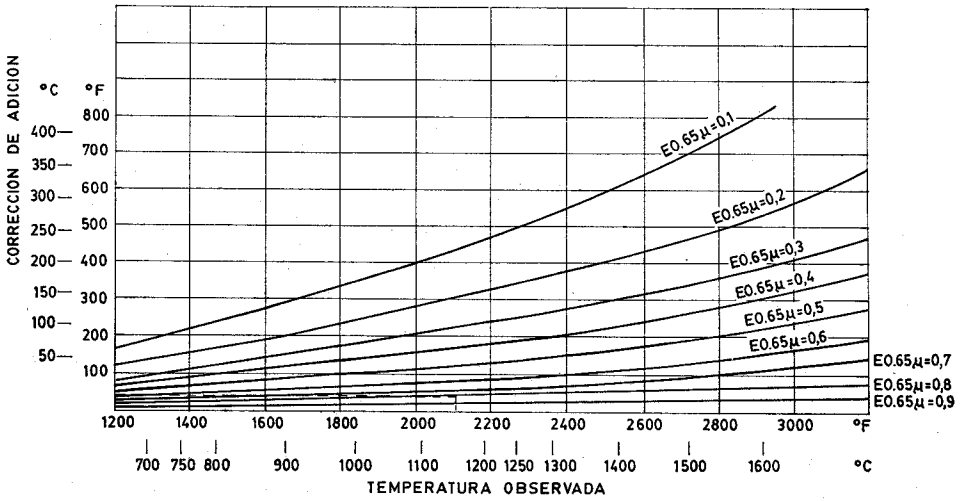


Fig. 6.33 Factores de corrección para pirómetros ópticos.

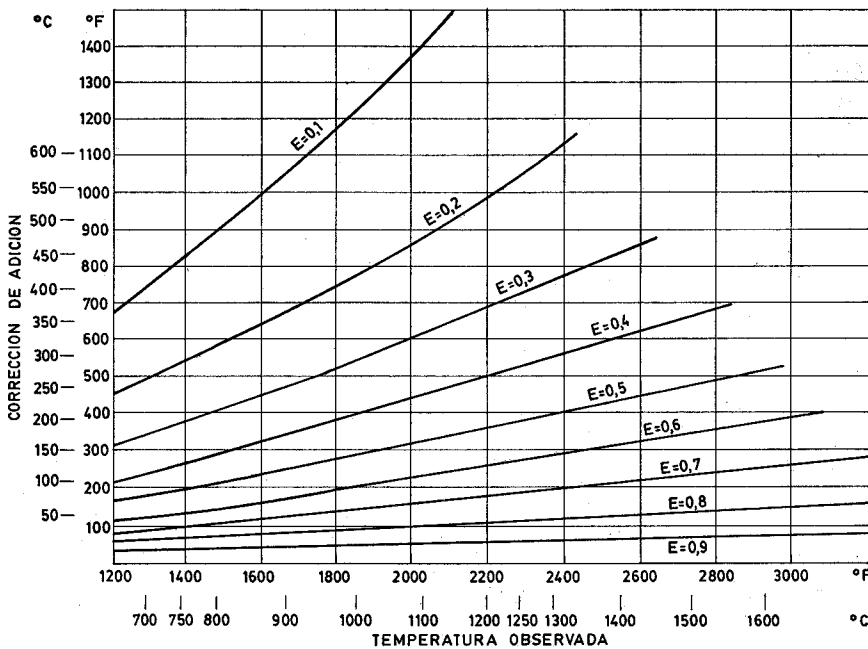


Fig. 6.34 Factores de corrección para pirómetros de radiación total con lente de Pyrex.

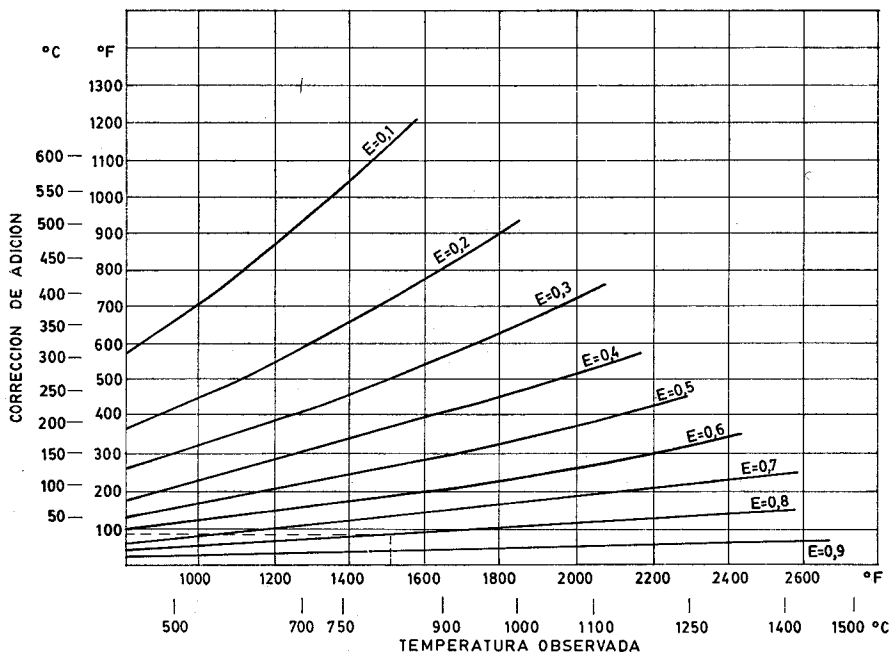


Fig. 6.35 Factores de corrección para pirómetros de radiación total con lente de sílice fundida.

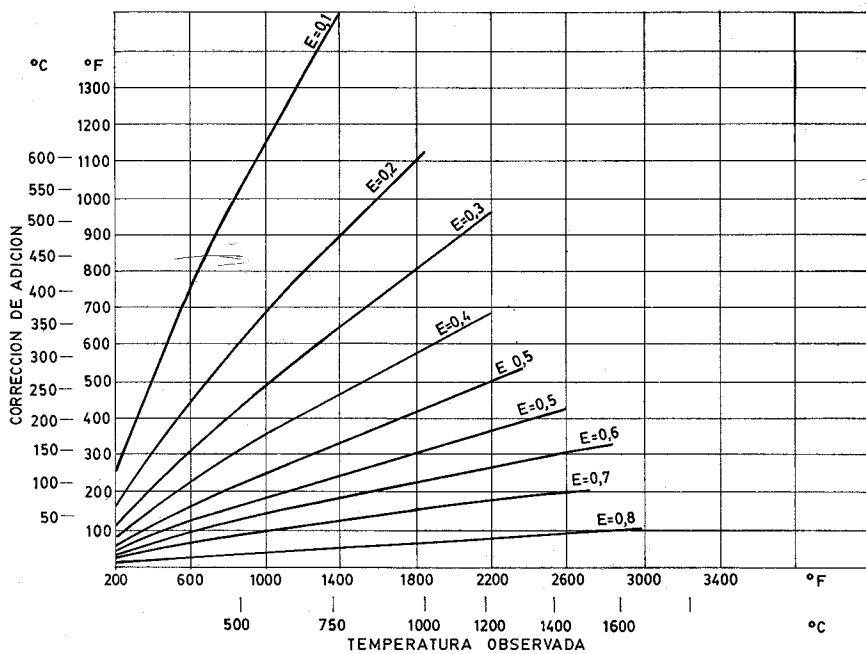


Fig. 6.36 Factores de corrección para pirómetros de radiación total con lente de fluoruro de calcio.

Ejemplo 2

— Objeto	— Aluminio con superficie oxidada
— Instrumento	— Pirómetro de radiación con lente de fluoruro de calcio
— Temperatura verdadera	— 593° C (1100° F)
— Temperatura indicada calculada	— 393° C (740° F)

Las consideraciones anteriores se han aplicado a cuerpos opacos y son válidas también para cuerpos no opacos (como el vidrio), pero incluyendo un término adicional de transparencia (o transmisión).

Dentro de la banda de ondas de operación, el pirómetro no puede distinguir entre la energía emitida por el cuerpo y la transmitida y reflejada por otras fuentes de radiación. En la figura 6.37 puede verse que el pirómetro *P* recibe la energía reflejada *R* emitida por el cuerpo *A*, la energía transmitida *T* emitida por el cuerpo *C* y la energía *E* emitida por el cuerpo *B*. Cualesquiera de las radiaciones recibidas puede ser la deseada, ya que, por ejemplo, puede interesar la temperatura de *C*, y *B* puede consistir en llamas o humos, y *A* las paredes del horno. En el caso de medir la temperatura de *B*, la condición más desfavorable se presenta cuando su temperatura es baja y sus coeficientes de reflexión o de transmisión o ambos son altos y la temperatura de *A* o *C*, o ambas, son elevadas. La radiación deseada queda muy enmascarada. Tal es el caso de una chapa de aluminio expuesta a radiaciones parásitas de superficies calientes, llamas etc. El empleo de blindajes ayuda a resolver el problema.

En un crisol conteniendo vidrio en fusión, la energía radiante emitida por el fondo a las paredes del crisol puede emerger a través del vidrio. Si el crisol es opaco, su energía radiante es la propia de un cuerpo negro y puede transmitirse parcialmente a través del vidrio hacia el exterior. Así pues, la energía radiante emitida estará compuesta de la del crisol y de la propia del vidrio.

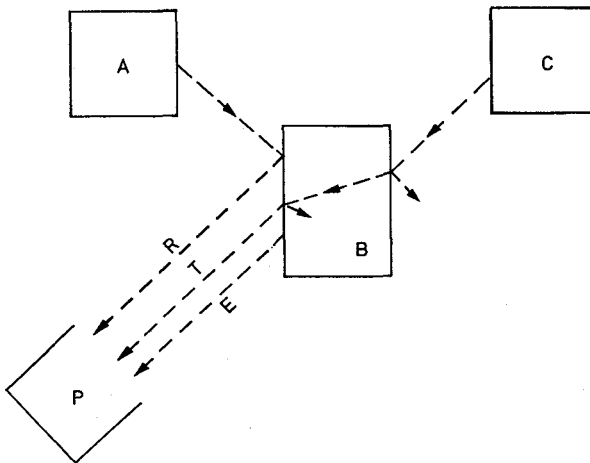


Fig. 6.37 Radiación recibida por el pirómetro.

Las dificultades expuestas y los problemas que se presentan para determinar la temperatura verdadera de un cuerpo mediante pirómetros de radiación pueden hacer creer al lector que la regulación de temperaturas con estos instrumentos es muy difícil. Sin embargo, hay que señalar afortunadamente que en muchos procesos las condiciones de trabajo son repetitivas; de este modo aunque se desconozcan la emisividad o se presenten radiaciones parásitas o el cuerpo sea transparente se controlará el proceso en condiciones idénticas, es decir, a iguales indicaciones del instrumento, ya que es más importante este punto que la detección de la temperatura real del proceso.

En la figura 6.38 pueden verse varios esquemas de aplicaciones industriales de los pirómetros de radiación.

Han habido varios intentos para proyectar un pirómetro cuyas lecturas fueran independientes del coeficiente de emisión del cuerpo. El modelo más logrado es el denominado pirómetro de relación, o de dos colores, que divide la radiación del objeto en dos haces medidos por dos células fotoeléctricas de silicio similares, una de ellas dispone de un filtro que sólo deja pasar la radiación de longitud de onda más corta (0,65 micras) y la otra en la zona de 0,9 micras. La relación entre las dos corrientes de salida de la célula es una medida de la temperatura del objeto. Su empleo es excelente

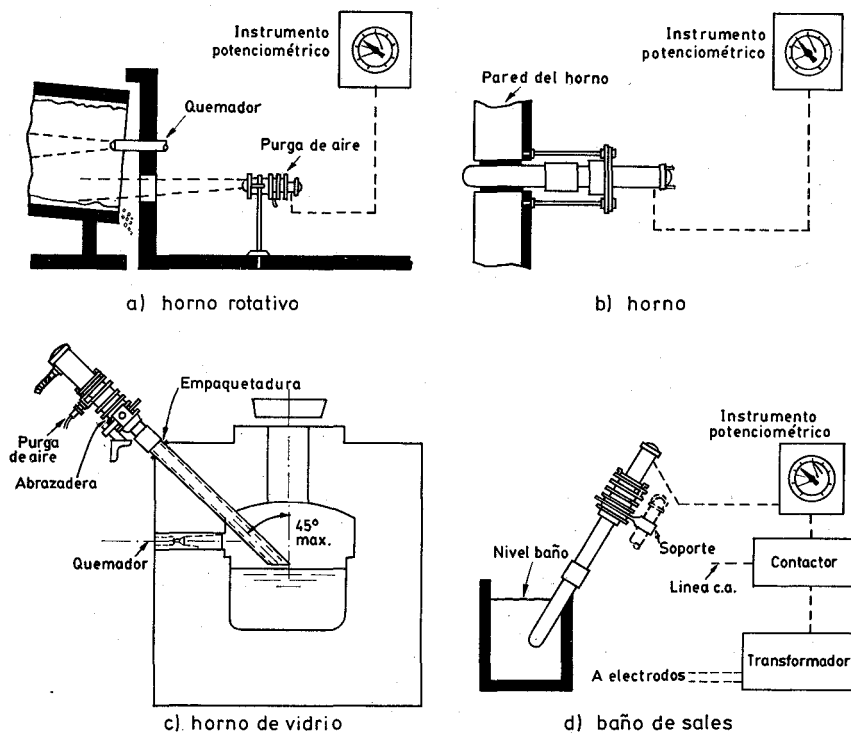


Fig. 6.38 Aplicaciones de los pirómetros de radiación.

en los llamados cuerpos grises, es decir, aquellos cuyo coeficiente de emisión es constante para todas las longitudes de onda. Por otro lado, este pirómetro permite medir a través de atmósfera de humos, vapor y polvo ya que, por su principio de funcionamiento, la lectura es teóricamente independiente de la absorción de la atmósfera intermedia.

La técnica del láser aplicada en pirometría resuelve los problemas descritos que presenta el pirómetro de dos colores, de tal modo que, en una superficie con emisividad desconocida, un rayo láser que se refleje en la superficie proporciona un valor de la emisividad próximo a la unidad.

Otros métodos de medida de temperatura utilizan instrumentos y técnicas muy elaboradas.

El sensor de temperaturas de fibra óptica consiste en una fibra óptica que conduce la radiación captada por un cristal de óxido de aluminio que actúa como un cuerpo negro. La fibra óptica, con una longitud máxima de 100 m, tiene una lente en su extremo que enfoca la radiación sobre un detector (diodo fotoeléctrico de silicio) que mediante un amplificador genera una corriente proporcional a la intensidad de la radiación. Se utilizan principalmente en la medida de la temperatura de las paletas de turbinas de gas. La precisión es del orden de 5 K dentro del intervalo de 1000 a 1600 K.

Un termómetro ultrasónico puede medir temperaturas dentro del intervalo de 2-20 K con una gran precisión. Su funcionamiento está basado en la determinación de la velocidad del sonido en el gas helio. Esta velocidad es casi proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta.

El termómetro de cristal de cuarzo mide la frecuencia de un oscilador de cuarzo en contacto con el cuerpo cuya temperatura desea medirse, mediante un contador que utiliza como reloj de referencia la señal de un oscilador a temperatura controlada. Su margen de trabajo es de -80 a $+250^{\circ}\text{C}$, y su precisión es muy elevada de $\pm 0,075^{\circ}\text{C}$.

Algunas sales paramagnéticas, tales como el sulfato amónico férrico, tienen la propiedad de cambiar de estado de energía bajo la acción de un fuerte campo magnético.

Manteniendo como única variable la susceptibilidad magnética de la sal es posible medir temperaturas muy bajas, inferiores a 1 K (procesos criogénicos).

Un elemento parecido al termistor es el sensor de germanio que consiste en un cristal de germanio con cuatro hilos: dos hilos para la corriente de alimentación (I) y los otros dos para obtener una caída de tensión gracias a la resistencia interna R que varía con la temperatura a través del cristal. La señal de salida es I^2R , teniendo presente que la potencia disipada por la corriente de alimentación sea baja para no dar lugar a errores de autocalentamiento. El sensor es capaz de medir temperaturas muy bajas, de 1,5 a 10 K, su escala no es lineal y se utiliza en procesos criogénicos con preferencia sobre las sales paramagnéticas.

Otros métodos de medición de temperaturas muy bajas incluyen la resonancia cuadrupolar nuclear del ^{35}Cl (hasta 11 K), las uniones de efecto túnel (entre 0,3 y 3 K)...

6.9 Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura

La constante de tiempo de un instrumento es el tiempo necesario para que alcance el 63,2 % de la variación total de temperatura que experimenta. Es decir, si un instrumento cuya sonda o elemento primario pasa de un recinto de 70°C a otro de 270°C puede alcanzar el 63,2 % de la diferencia $270 - 70 = 200^{\circ}\text{C}$ en 0,1 segundo; este tiempo será la constante de tiempo de la medida con el instrumento (fig. 6.39).

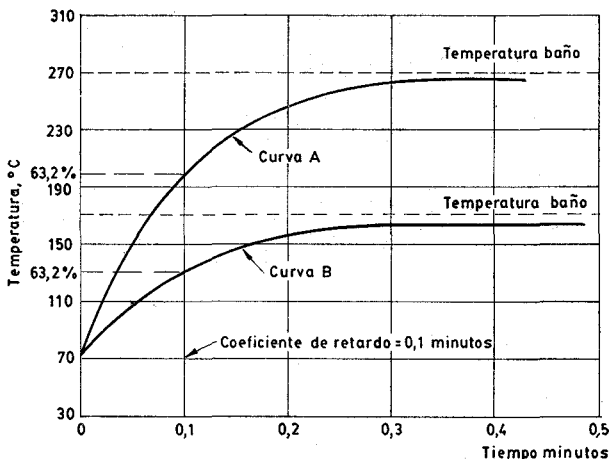


Fig. 6.39 Velocidad de respuesta.

La constante de tiempo de un sistema de bulbo y capilar dependerá de la longitud y del diámetro interno del tubo capilar y del volumen del elemento receptor. Los termómetros de bulbo y capilar rellenos de mercurio y de líquido tienen una respuesta muy rápida por la incompresibilidad del fluido que los llena; en cambio, los termómetros de gas y de vapor tienen un retardo más acusado a causa de la compresibilidad del fluido interno. En la figura 6.40 puede verse un gráfico de la respuesta de estos tipos de sondas.

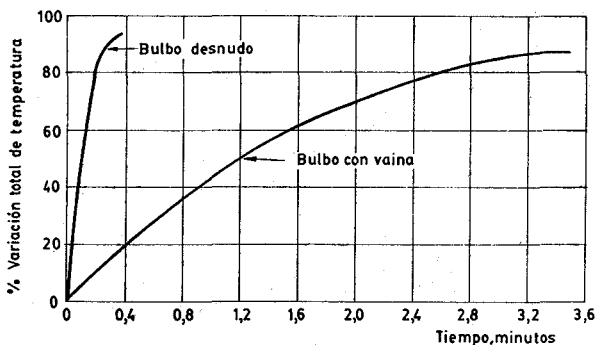


Fig. 6.40 Respuesta de un termómetro de bulbo y capilar.

Los elementos primarios eléctricos, sondas de resistencia, termistores, termopares y pirómetros de radiación se caracterizan porque el tiempo de respuesta depende únicamente del intercambio térmico entre el fluido y el elemento, ya que la corriente eléctrica circula por los cables de conexión a la velocidad de la luz, directamente al receptor.

En la sonda de resistencia, la masa a calentar está formada por una bobina de hilo arrollada en un núcleo y embebida en una cápsula rígida. Véase la curva de respuesta en la figura 6.41.

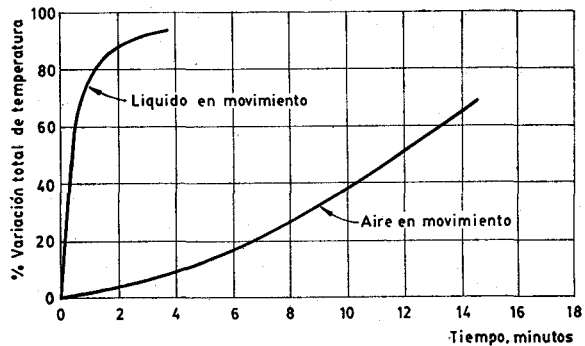


Fig. 6.41 Respuesta de una sonda de resistencia.

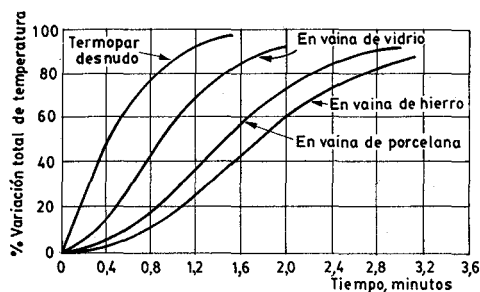
Los termistores son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta varía de fracciones de segundo a minutos, de acuerdo con su capacidad térmica dada por el tamaño y forma del elemento sensible.

En el termopar, dos hilos soldados en un extremo constituyen la masa a calentar, la que depende de la galga o diámetro de los hilos y de la forma de la soldadura, hilo torcido o soldado a tope (fig. 6.42).

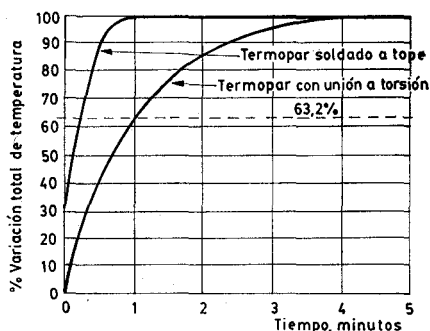
El pirómetro de radiación responde rápidamente a los cambios en la temperatura por dos razones principales: la captación de energía radiante es prácticamente instantánea y la masa de la termopila es muy pequeña.

En la figura 6.43 puede verse la respuesta de los pirómetros de radiación total, debiendo señalar que en los pirómetros de infrarrojos la velocidad de respuesta es muy alta, del orden de 10 a 100 milisegundos.

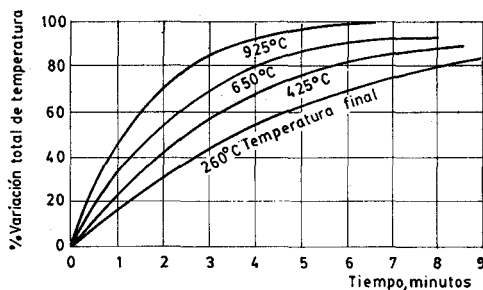
Los elementos de temperatura están normalmente inmersos en vainas termométricas o en tubos de protección para tener así una protección mecánica o bien estar aislados del fluido cuya temperatura miden. La vaina se emplea para altas temperaturas y presiones y el espesor de sus paredes es mayor que el de los tubos de protección, por lo cual, lógicamente, su velocidad de respuesta será menor que el de éstos. Por otro lado, las vainas o tubos deben tener un diámetro interior en el cual ajusten perfectamente los elementos; de este modo se consigue que la transmisión térmica se realice casi exclusivamente por conducción a través de las paredes sin que exista un volumen apreciable de aire que dé lugar a una transmisión intermedia por convección. Hay que señalar que cuando las temperaturas de trabajo son relativamente bajas puede introducirse en el extremo inte-



a) En aire



b) En líquido



c) En un horno

Fig. 6.42 Respuesta de un termopar.

rior de la vaina o del tubo una grasa especial de alta conducción calorífica o bien aceite, que colaboran eficazmente en la obtención de una respuesta muy rápida del sistema.

Siempre que ello sea posible, se recomienda prescindir de las vainas o tubos de protección para eliminar el retardo considerable que presentan a la transmisión de la temperatura.

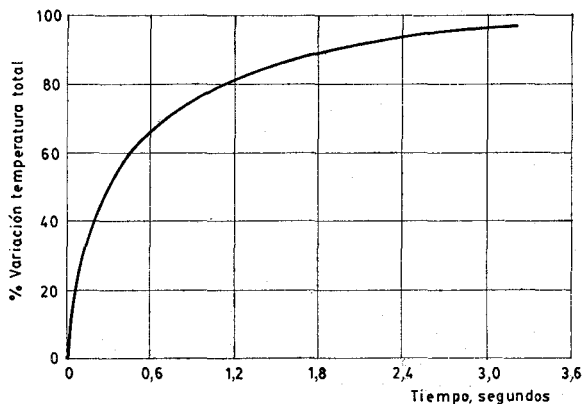


Fig. 6.43 Respuesta de un pirómetro de radiación.

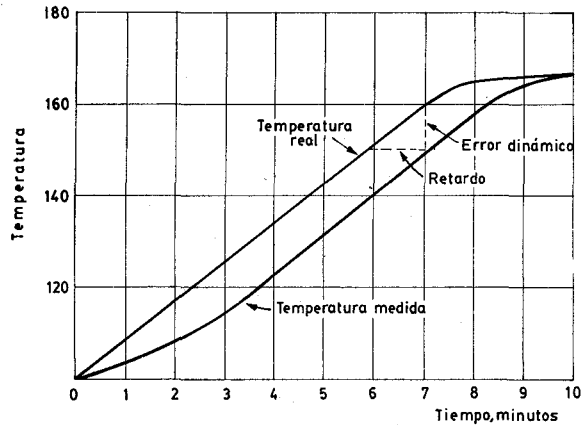


Fig. 6.44 Error dinámico.

Otros factores que influyen en la respuesta son la clase de fluido que rodea al elemento y la velocidad de circulación, cuanto mayor sea esta última tanto mayor será el suministro de calor del fluido al elemento de temperatura. En el aire, por ejemplo, el elemento tiene una constante de tiempo mayor que en un líquido, por lo cual se recomienda que la velocidad del aire sea como mínimo de 2 m/s para reducir así el coeficiente de retardo. Si la velocidad del fluido es excesiva, la frecuencia de la onda turbulenta generada puede igualar la frecuencia natural de la vaina o del tubo, con lo que éstos pueden entrar en resonancia y romperse. Para evitarlo, la vaina debe tener las paredes gruesas.

La profundidad de inmersión tiene también su importancia. Si es insuficiente, no permite una respuesta suficientemente rápida y existe el riesgo de un error dinámico importante (fig. 6.44).

El error dinámico es inherente a toda medida, ya que siempre se transfiere energía entre el fluido y el elemento y esta transferencia requiere necesariamente un cierto tiempo para efectuarse.

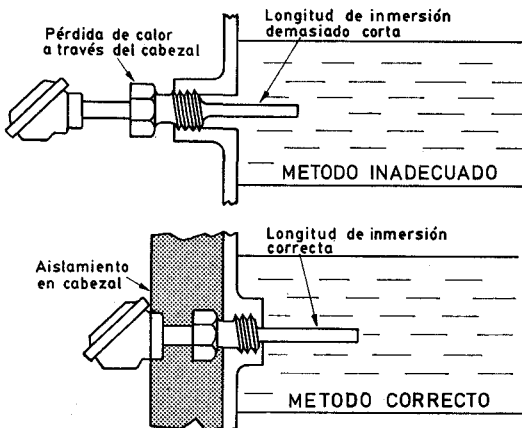


Fig. 6.45 Instalación de una vaina o tubo de protección.

Un elemento con un cabezal no aislado de la atmósfera ambiente conjuntamente con una escasa profundidad de inmersión (fig. 6.45), está sujeto a errores ya que el calor del fluido se pierde en parte a través de las paredes del recipiente o tubería sin transferirse totalmente al elemento. Este efecto es tanto más importante cuanto más baja sea la temperatura y más se aproxime a la ambiente.

6.10 Tabla comparativa de características

En la tabla 6.14 puede verse un resumen de características de los instrumentos de temperatura.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo 8		Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

OTRAS VARIABLES

En los capítulos anteriores se ha estudiado la medición y transmisión de las variables de proceso más comunes que se encuentran en la industria: la presión, el caudal, el nivel y la temperatura.

Existen otras muchas variables que son también de interés industrial y que pueden clasificarse como físicas y químicas.

Las variables físicas son aquellas relacionadas con las causas físicas que actúan sobre un cuerpo, con su movimiento o bien con las propiedades físicas de las sustancias. Entre ellas estudiaremos: el peso, la velocidad, la densidad y el peso específico, la humedad y el punto de rocío, la viscosidad y la consistencia, la llama, el oxígeno disuelto, la turbidez y la radiación solar.

Las variables químicas están relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición. Entre ellas se encuentran la conductividad, el pH, redox, y la composición de los gases en una mezcla.

7.1 Variables físicas

7.1.1 Peso

El peso de un cuerpo es la fuerza con que es atraído por la Tierra. La relación entre la masa del cuerpo, es decir, la cantidad de materia que contiene, y su peso viene dado por la expresión

$$P = m g$$

en la que

P = peso

m = masa

g = aceleración debida a la gravedad

Como la masa de un cuerpo es constante y la aceleración de la gravedad varía con el lugar (es de 9,78 en el ecuador y 9,83 en los polos) y también con la altura, es obvio que el peso del cuerpo variará según el lugar de la Tierra y la altura a que esté sobre el nivel del mar.

Esto es evidente efectuando la medida con una balanza o resorte. Sin embargo, en una balanza clásica de cruz, la medida se efectúa por comparación con pesos conocidos y como éstos están sometidos también a la misma fuerza de gravitación, la lectura será independiente del lugar donde se realiza la medición. Asimismo, como los demás tipos de básculas se ajustan usualmente con pesos patrón, las medidas realizadas serán también independientes de las variaciones de g con la altura y con el lugar de la Tierra donde estén instaladas. Otro factor que influye en la medición es la diferencia de empuje del aire (por el principio de Arquímedes) sobre el cuerpo y sobre el peso patrón; su influencia es tan pequeña que el error cometido queda comprendido dentro del error normal aceptado en las operaciones de pesaje.

En la industria interesa determinar el peso de las sustancias en las operaciones de inventario de materias primas, de productos finales, en la mezcla de ingredientes, etc.

Existen varios métodos para medir el peso:

- a) Comparación con otros pesos patrones (balanzas y básculas);
- b) Células de carga a base de galgas extensométricas;
- c) Células de carga hidráulicas;
- d) Células de carga neumáticas.

La comparación con otros pesos patrones la realizan las *balanzas* y las *básculas*.

La balanza clásica está constituida por una palanca de brazos iguales llamada cruz que se apoya en su centro y de cuyos extremos cuelgan los platillos, que soportan los pesos. Puede medir desde unos pocos gramos hasta 300 kg. La balanza de Roberval consiste esencialmente en un paralelogramo articulado que puede oscilar alrededor del punto central del lado superior del paralelogramo, manteniéndose verticales las varillas laterales que soportan los platillos; se caracteriza porque su equilibrio se alcanza independientemente de la posición de los pesos en los platillos. Su campo de medida llega hasta 40 kg y se emplea en las operaciones de llenado o de comprobación de pesos de objetos terminados. En las figuras 7.1 *a* y *b* pueden verse estos dos tipos de balanzas.

La *báscula clásica* (fig. 7.1 *c*) consiste esencialmente en una palanca apoyada en un punto de la que cuelgan en un extremo el peso a medir y en el otro que tiene la forma de un rectángulo, dos pesos móviles uno para ajuste basto y el otro para ajuste fino; un fiel indica cuándo la báscula está ajustada. La *báscula automática* (fig. 7.1 *d*) consiste en una palanca en ángulo apoyada en su centro con un peso conocido en un extremo y el desconocido en el otro. La báscula alcanza siempre una posición de equilibrio marcando directamente en una escala graduada y se le puede adaptar fácilmente una máquina impresora o transmisora del peso.

Las balanzas y las básculas son sencillas y de gran precisión pudiendo alcanzar las primeras del $\pm 0,002$ al 0,05 % y las segundas el $\pm 0,1$ %. Sin embargo, presentan los inconvenientes de su lenta velocidad de respuesta, la posible corrosión que ataca al juego de palancas en particular en los puntos de apoyo y que es debida a la suciedad, al polvo, a los vapores y a la humedad presentes en los ambientes industriales y al desgaste de las piezas móviles, lo que redundará en perjuicio de la precisión de las pesadas.

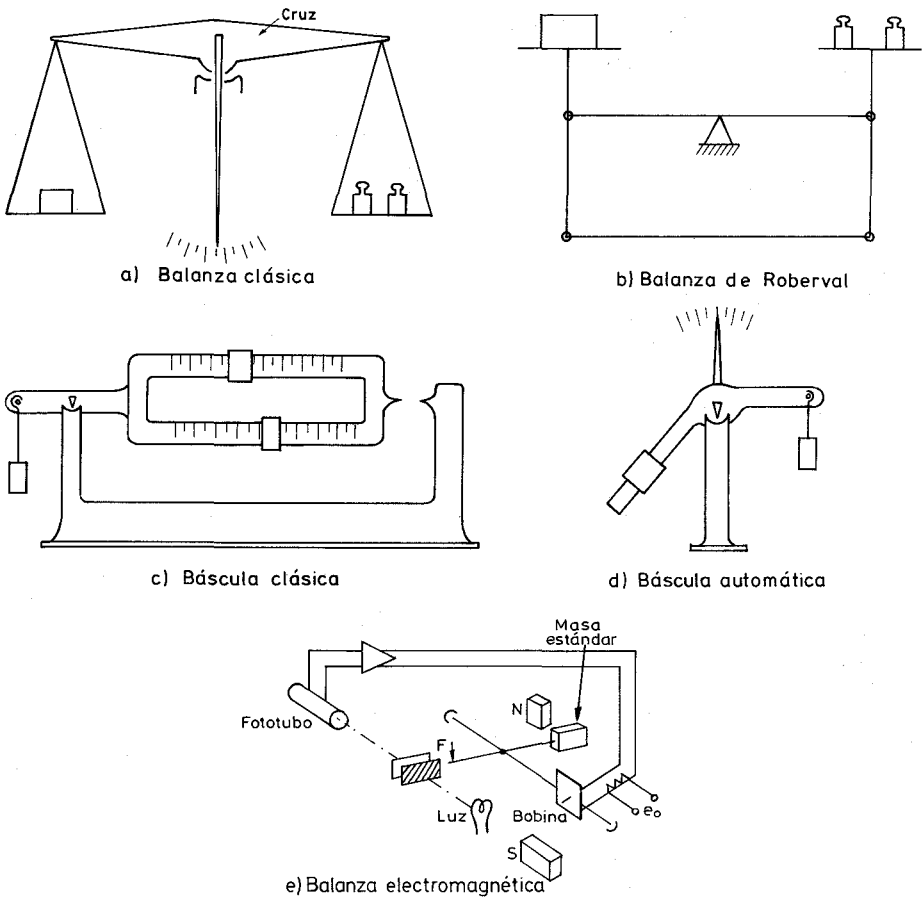


Fig. 7.1 Balanzas y básculas.

La *balanza electromagnética* utiliza un sensor de desplazamiento y una bobina de par montados en un servosistema que equilibra un peso patrón y el peso desconocido. La señal eléctrica de salida puede aplicarse a un microprocesador, lo que proporciona una tara automática, unas rutinas estadísticas con cálculo de la media y la desviación estándar de las pesadas y una compensación de la temperatura. Puede añadirse un módulo de comunicaciones para el envío a distancia del valor de la pesada. La precisión típica es de 1 mg en 500 g.

La *célula de carga a base de galgas extensométricas* (fig. 7.2) consiste esencialmente en una célula que contiene una pieza de elasticidad conocida (tal como el acero de módulo de elasticidad $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) capaz de soportar la carga sin exceder de su límite de elasticidad. A esta pieza está cementada una galga extensométrica formada por varias espiras de hilo pegado a un soporte de papel o de resina sintética. La tensión o la compresión a que el peso somete a la célula

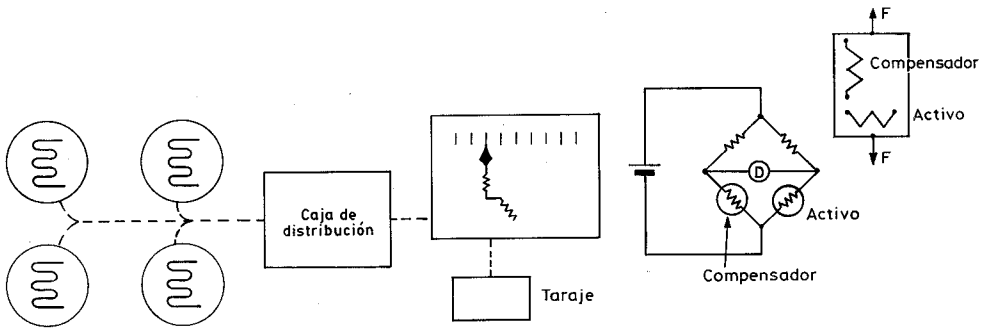


Fig. 7.2 Galgas extensométricas.

de carga, hace variar la longitud del hilo metálico y modifica por lo tanto su resistencia eléctrica.

Esta resistencia es igual a:

$$R = \rho \frac{l_0}{A_0} = \rho \frac{l_0 + \Delta l}{A_0 - \Delta A}$$

siendo:

R = resistencia del hilo

l_0 = longitud inicial sin tensión

Δl = incremento de longitud

ΔA = incremento de área

Como el volumen del hilo es constante, antes y después de someterse a tensión, resulta:

$$V_0 = l_0 A_0 = (l_0 + \Delta l) \times (A_0 - \Delta A)$$

$$R \approx \rho \frac{l_0}{A_0} \left(1 + 2 \frac{\Delta l}{l_0} \right)$$

con lo que el cambio de resistencia es

$$\Delta R \approx 2 R_0 \frac{\Delta l}{l_0}$$

En la realidad se usa el llamado factor de galga igual a :

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

que en los metales se aproxima a 2.

La temperatura influye mucho en la medida. Por ejemplo, el cambio de 1°C da lugar a una variación de resistencia de:

$$\Delta R t = R_0 \alpha \Delta t$$

Si la resistencia es de $100\ \Omega$, el coeficiente $\alpha = 0,004/^{\circ}\text{C}$, y la relación $\Delta l/l_0 = 1000\ \mu\text{m}/\text{m}$ resulta:

$$\text{Sin variación de temperatura } \Delta R = 2 \times 100 \times 0,001 = 0,2\ \Omega$$

Con 1°C de variación de temperatura $\Delta R t = 100 \times 0,004 \times 1 = 0,4\ \Omega$ que es prácticamente el doble que el cambio de resistencia debido a la tensión.

Se usan acondicionadores de señal que son puentes de Wheatstone que captan pequeños cambios en la resistencia y compensan los efectos de la temperatura (figura 7.2). La adición de un microprocesador eleva la precisión de la medida mediante la utilización de algoritmos de corrección de errores y facilita el ajuste y la calibración.

La *galga extensométrica de semiconductor* cambia de resistencia con la tensión gracias a cambios en la estructura cristalina que varían la movilidad de los electrones. El factor de galga es mayor que en las galgas metálicas, del orden de -50 a -200 . El acondicionador de señal es también un puente de Wheatstone con la posibilidad de añadir un circuito a microprocesador.

En los instrumentos de pesaje se aplican las normas metroológicas de la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) que clasifican los aparatos en cuatro categorías:

Precisión especial	— Clase I
Precisión fina	— Clase II
Precisión media	— Clase III
Precisión ordinaria	— Clase IV

El microprocesador aporta compensación de temperatura al realizar medidas promedio e ignorar los cambios de señal de las células debidos a variaciones de la temperatura; facilita la carga repetitiva al controlar la diferencia de pesada del contenedor con relación al peso deseado; proporciona la comunicación con el sistema de control del proceso; utiliza código de barras para automatizar la pesada; con «inteligencia» incorporada puede formar parte del control distribuido; con un montaje adecuado son inmunes a la influencia del viento y a las interferencias electromagnéticas; y con seguridad intrínseca incorporada pueden trabajar en atmósferas explosivas.

Las células están protegidas contra la humedad y el polvo, tienen una precisión de $\pm 0,2\ \%$, admiten indicación a distancia y pueden medir pesos de $20\ \text{kg}$ a más de $150\ \text{t}$. Necesitan compensación de temperatura del hilo de resistencia y de la pieza de acero deformable y son relativamente caras.

Las *células de carga hidráulicas* (fig. 7.3) consisten en un pistón sobre el que se apoya la carga, que ejerce una presión sobre un fluido hidráulico. Según la carga y de acuerdo con el área conocida del pistón se crea una presión en el aceite que puede leerse en un manómetro Bourdon y que por lo tanto refleja in-

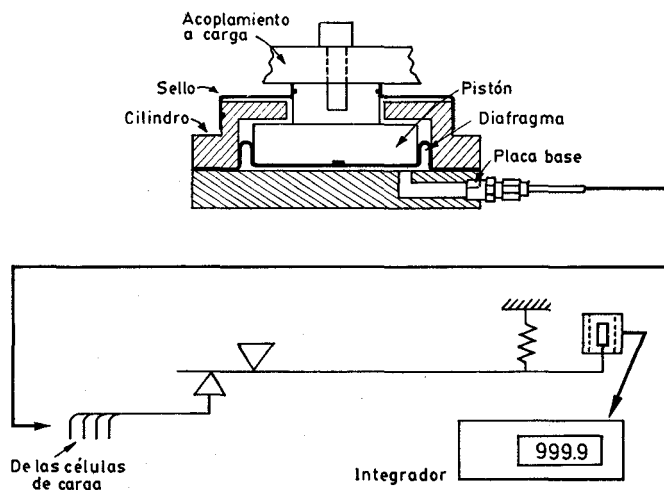


Fig. 7.3 Célula de carga hidráulica.

directamente la carga. Sumando las presiones hidráulicas de varias células de carga y aplicándolas a un transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas se obtiene una señal eléctrica que puede leerse en un indicador digital y utilizarse en sistemas de pesaje electrónicos.

Las células de carga hidráulicas se fabrican para unas capacidades de carga de 40 kg hasta 90 t, son de respuesta rápida (menos de 2 segundos), su precisión es de $\pm 0,2 \%$, admiten sobrecargas hasta el 40 %, pueden fabricarse a prueba de explosión y son resistentes a vibraciones.

Las células de carga neumáticas (fig. 7.4) consisten en un transmisor neumático de carga en el que el peso situado en la plataforma de carga se compara con el esfuerzo ejercido por un diafragma alimentado a una presión de tarado ajustable.

El sistema adopta una posición de equilibrio gracias al conjunto tobera-obturador y a la cámara de realimentación del transmisor. La presión del aire al-

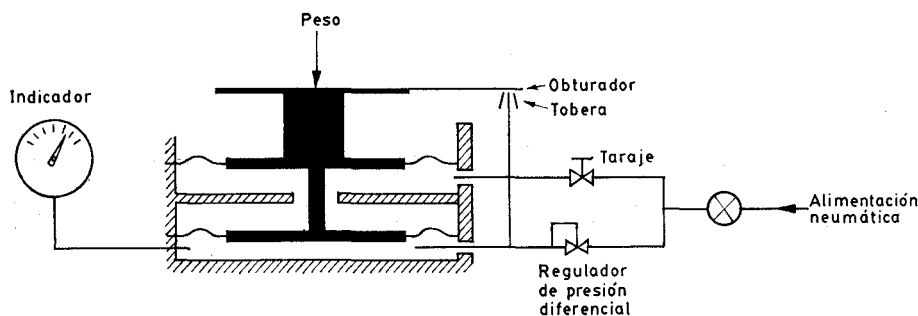


Fig. 7.4 Célula de carga neumática.

canzada en esta cámara indica el peso. La capacidad de carga de las células neumáticas varía de 10 kg a 10 t, poseen una precisión de $\pm 0,2 \%$ y se adaptan fácilmente al control neumático con el inconveniente de precisar de aire comprimido de instrumentos.

Una comparación de los sistemas de medida del peso puede verse en la tabla 7.1.

7.1.2 Velocidad

La medición de la velocidad en la industria se efectúa de dos formas: con tacómetros mecánicos y con tacómetros eléctricos. Los primeros detectan el número de vueltas del eje de la máquina por medios exclusivamente mecánicos pudiendo incorporar o no la medición conjunta del tiempo para determinar el número de revoluciones por minuto (r.p.m.), mientras que los segundos captan la velocidad por sistemas eléctricos.

Para usos industriales se suelen utilizar los tacómetros eléctricos porque permiten la transformación directa de la señal para alimentar los instrumentos registradores o controladores de panel. Un caso de aplicación típica lo constituye la medida de la velocidad de giro del eje de una turbina en una central de energía.

TABLA 7.1 Sistemas de medida de peso

Sistema	Capacidad	Precisión %	Ventajas	Desventajas
Balanza	gramos a 300 kg	0,002-0,05	Simple, precisa, barata	Lenta, corrosión local
Báscula	gramos a toneladas	0,1	Simple, precisa, barata	Lenta, corrosión local
Galga extenso-métrica	20 kg-400 t	0,02-0,2	Instalación simple. Indicación a distancia, protegida contra la corrosión	Caras, compensación temperatura
Célula hidráulica	40 kg-90 t	0,2	Instalación simple, resistente a vibración, admite 400 % sobrecarga. A prueba explosión. Indicación a distancia	Caras, transmisor electrónico para sumar señales de varias células. Afectada por la temperatura. Calibración frecuente
Célula neumática	10 kg-10 t	0,2	Se adapta bien a control neumático. Indicación a distancia	Aire instrumentos. Afectada por la temperatura. Calibración frecuente

7.1.2.1 Tacómetros mecánicos

El *tacómetro mecánico* más utilizado es el típico contador de revoluciones empleado para medir localmente la velocidad de rotación de toda clase de máquinas o dispositivos giratorios. Este contador (fig. 7.5) consiste básicamente en un eje elástico terminado en punta que se apoya sobre el centro de la pieza giratoria. El eje elástico al girar mueve a través de un tren de engranajes dos dials calibrados concéntricos. Cada división del dial exterior representa una vuelta del eje giratorio mientras que en el dial interior una división da una revolución del dial exterior; conocido el tiempo de trabajo del contador, medido mediante un cronómetro, es fácil calcular la velocidad media en r.p.m.

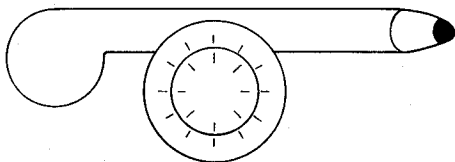


Fig. 7.5 Tacómetro mecánico.

Los *tacómetros centrífugos* (fig. 7.6) se basan en el volante centrífugo clásico empleado inicialmente en las calderas de vapor. Dos pesos rotativos articulados a un eje giratorio aumentan su radio de giro debido a la fuerza centrífuga y comprimen un resorte. La medida de la compresión del resorte leída en una escala representa la velocidad de giro del eje. La velocidad límite que pueden medir estos instrumentos es de más de 40 000 r.p.m., con una precisión de $\pm 1\%$. Estos aparatos pueden disponer de transmisión hidráulica o neumática.

7.1.2.2 Tacómetros eléctricos

Los tacómetros eléctricos emplean un transductor que produce una señal analógica o digital como conversión de la velocidad de giro del eje de la máquina.

Existen varios tipos de tacómetros según los transductores:

Tacómetro de corrientes parásitas (fig. 7.7) en el que el eje de la máquina hace girar un imán dentro de una copa de aluminio. El giro del imán induce co-

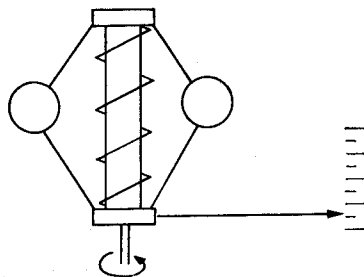


Fig. 7.6 Tacómetro centrífugo.

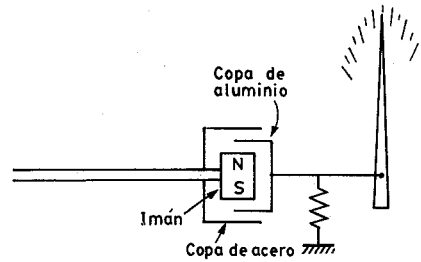


Fig. 7.7 Tacómetro de corrientes parásitas.

rrientes parásitas en el aluminio que crean un par resistente proporcional a la velocidad. Un resorte frena el cabezal del aluminio quedando éste en una posición que se señala en un dial. De este modo funciona el tacómetro eléctrico empleado en el automóvil; en aviación la máquina hace girar el imán permanente a través de un grupo generador-motor síncronos, mientras que en las máquinas de ferrocarril se utiliza un rotor que produce un campo magnético giratorio. En otro sistema empleado en la industria el par resistente del cilindro de aluminio se aplica a un sistema neumático de equilibrio de fuerzas. El campo de medida es de 0-15 000 revoluciones por minuto.

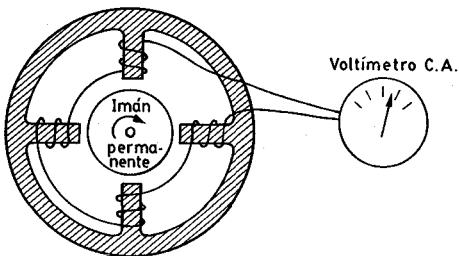


Fig. 7.8 Tacómetro de corriente alterna.

El *tacómetro de corriente alterna* consiste en un estator bobinado multipolar en el que el rotor dotado de imán permanente induce una corriente alterna. Un voltímetro señala la corriente inducida y por lo tanto el giro en r.p.m. del eje de la máquina. En la figura 7.8 puede verse este tipo de tacómetro.

El *tacómetro de corriente continua o dínamo tacométrica* (fig. 7.9) consiste

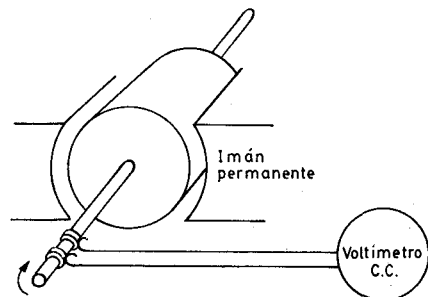


Fig. 7.9 Dínamo tacométrica.

en un estator de imán permanente y un rotor con un entrehierro uniforme. La tensión continua recogida en las escobillas del rotor es proporcional a la velocidad en r.p.m. de la máquina. Esta tensión puede leerse en un voltímetro indicador o bien alimentar un instrumento potenciométrico a través de una resistencia divisora de tensión.

La precisión en la medida alcanza $\pm 0,5 \%$ para velocidades que llegan hasta las 6000 r.p.m.

El *tacómetro de frecuencia o frecuencímetro* (fig. 7.10) mide la frecuencia de la señal de c.a. captada por transductores del tipo electromagnético, capacitivo u óptico que dan impulsos cuyo número es proporcional a la velocidad de giro de la máquina. El transductor no tiene contacto mecánico con el eje rotativo. La medida de la frecuencia puede pasarse a un contador electrónico basado en la medida de las revoluciones por unidad de tiempo.

Otro modelo de tacómetro de frecuencia mide ópticamente la velocidad. Dispone de un disco opaco perforado periféricamente y acoplado al eje cuya velocidad desea medirse, de una fuente de luz y de una fotocélula. Esta genera una frecuencia dependiente de los impulsos luminosos que pasan a través del disco, es decir, es función de la velocidad.

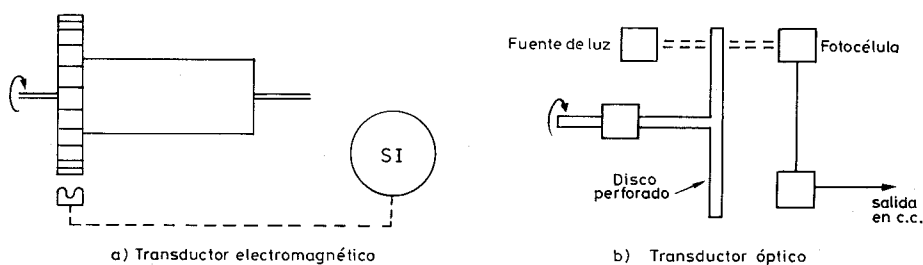


Fig. 7.10 Tacómetro de frecuencia.

7.1.3 Densidad y peso específico

7.1.3.1 Introducción

La densidad o masa específica de un cuerpo se define como su masa por unidad de volumen, expresándose normalmente en g/cm^3 (o kg/m^3). Como la densidad varía con la temperatura y con la presión (en los gases) se especifica para un valor base de la temperatura que en líquidos suele ser de 0°C o de 15°C y en los gases de 0°C y para un valor estándar de la presión que en los gases es de 1 atmósfera. La densidad relativa es la relación para iguales volúmenes de las masas del cuerpo y del agua a 4°C en el caso de líquidos, y en los gases la relación entre la masa del cuerpo y la del aire en condiciones normales de presión y de temperatura (0°C y 1 atmósfera).

Evidentemente, la densidad relativa no tiene dimensiones. Además hay que señalar que, siendo la densidad del agua a 4° C de 1 g/cm³, los valores numéricos de la densidad relativa de un líquido coinciden con los de la densidad.

El peso específico es el peso del fluido por unidad de volumen. Por lo tanto, entre el peso específico y la densidad existirá la relación

$$\text{peso específico} = \text{densidad} \times g$$

siendo g la aceleración debida a la gravedad. Si el peso específico y la densidad se refieren al agua en el caso de líquidos o al aire en el caso de gases (densidad relativa), como g tiene el mismo valor en el lugar en donde se efectúa la medición, resultará que el peso específico relativo será igual a la densidad relativa. Por esto en el lenguaje vulgar suelen tomarse como sinónimos:

$$\text{peso específico} = \text{densidad} \times g$$

$$\text{peso específico agua} = \text{densidad agua} \times g$$

Otras unidades de medida de densidad son las siguientes:

- Grados A P I equivalen a $\frac{141,5}{\text{densidad relativa a } 15^\circ \text{ C}} - 131,5$
y están normalizados por el *American Petroleum Institute* para productos petrolíferos.
- Grados Baumé empleados para ácidos, jarabes, etc., que equivalen a:
 $\frac{140}{\text{densidad relativa a } 15^\circ \text{ C}} - 130$, para líquidos más ligeros que el agua;
 $145 - \frac{145}{\text{densidad relativa a } 15^\circ \text{ C}}$, para líquidos más pesados que el agua.
- Grados Brix empleados casi exclusivamente en la industria azucarera. Representan el tanto por ciento en peso de azúcar en solución a 17,5° C.

En los procesos industriales la densidad es una variable cuya medida es a veces vital. Tal es el caso de la determinación de la concentración de algunos productos químicos como el ácido sulfúrico, la medida exacta del caudal en gases o vapores que viene influida por la densidad, la medida de la densidad en un producto final que garantiza las cantidades de los ingredientes que intervienen en la mezcla, etc.

Entre los diversos métodos de medida de densidad figuran los que siguen.

7.1.3.2 Areómetros

Los areómetros (figura 7.11) consisten en un flotador lastrado en su parte inferior con un vástago superior graduado. El aparato se sumerge hasta que su peso es equilibrado por el líquido que desaloja hundiéndose tanto más cuanto menor sea la densidad del líquido. Puede graduarse en cualquiera de las unidades anteriores. Incorporándole un transductor de inductancia variable con la armadura fija en la parte inferior del flotador y con la bobina dispuesta en el exterior del

recipiente es posible transmitir eléctricamente a distancia la densidad, siempre que se mantenga una altura constante del líquido con un rebosadero (fig. 7.11 b).

Una variante del areómetro anterior (fig. 7.11 c) consiste en un flotador con un lastre en forma de cadena sujeta a un punto fijo del recipiente. El flotador está completamente sumergido dentro del líquido y según su densidad se sumerge más o menos variando proporcionalmente el peso efectivo de la cadena. Un transformador diferencial (ver capítulo 3) capta la posición del flotador y da una señal de salida en c.a. función de su desplazamiento. Para compensar las variaciones de densidad causadas por los cambios de temperatura en el fluido se utiliza una sonda de resistencia que se conecta al receptor eléctrico de puente de inductancias de corriente alterna.

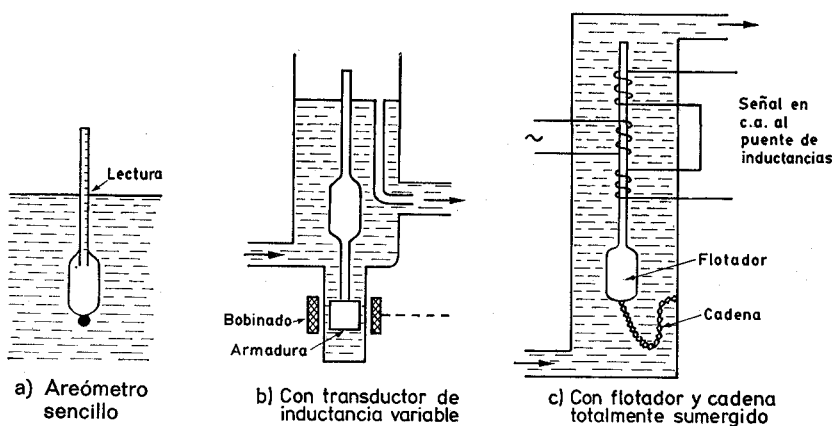


Fig. 7.11 Areómetro.

La precisión general de los areómetros es de ± 1 a $\pm 3\%$ y admiten presiones y temperaturas máximas de servicio de 6-8 bar y 120-230°C respectivamente. Las viscosidades inferiores a 50 centipoises no influyen en la lectura. A viscosidades superiores, o con caudales elevados, conviene trabajar con un caudal intermitente para así captar la posición del flotador durante los períodos de flujo nulo. Su campo de medida de densidad relativa es de 0,5 a 4 y disponen de compensación de temperatura. Son aptos para trabajar con líquidos limpios.

7.1.3.3 Métodos de presión diferencial

En este sistema se fijan dos puntos en el tanque o en una tubería vertical del proceso y se les conecta un instrumento de presión diferencial, bien directamente o bien a través de una cámara de medida.

Como la diferencia de alturas en el líquido es fija, la única variable que altera la presión diferencial es la densidad. En la figura 7.12 a puede verse un esquema de funcionamiento.

La presión diferencial medida por el instrumento es:

$$P = h\gamma g$$

Si el campo de medida de densidad del líquido es de 0,8 a 0,9 y el instrumento a emplear tiene un margen de 0-100 mm c. de a. la distancia entre las tomas será:

$$h = \frac{100 \cdot g}{(0,9-0,8) 1000 \cdot g} = 1 \text{ m}$$

Como la lectura de densidad debe empezar en 0,8 el instrumento debe tener una elevación de

$$100 \times 0,8 = 80 \text{ mm c.d.a} = 0,00784 \text{ bar}$$

ya que la presión diferencial mínima es:

$$1\text{m} \times 0,8 = 800 \text{ mm c.d.a} = 0,0784 \text{ bar}$$

y la presión diferencial máxima es de

$$1\text{m} \times 0,9 = 900 \text{ mm c.d.a} = 0,0882 \text{ bar}$$

En el caso de fluidos no demasiado limpios, muy viscosos o corrosivos, existe el riesgo de que las conexiones al instrumento se obturen o se destruyan.

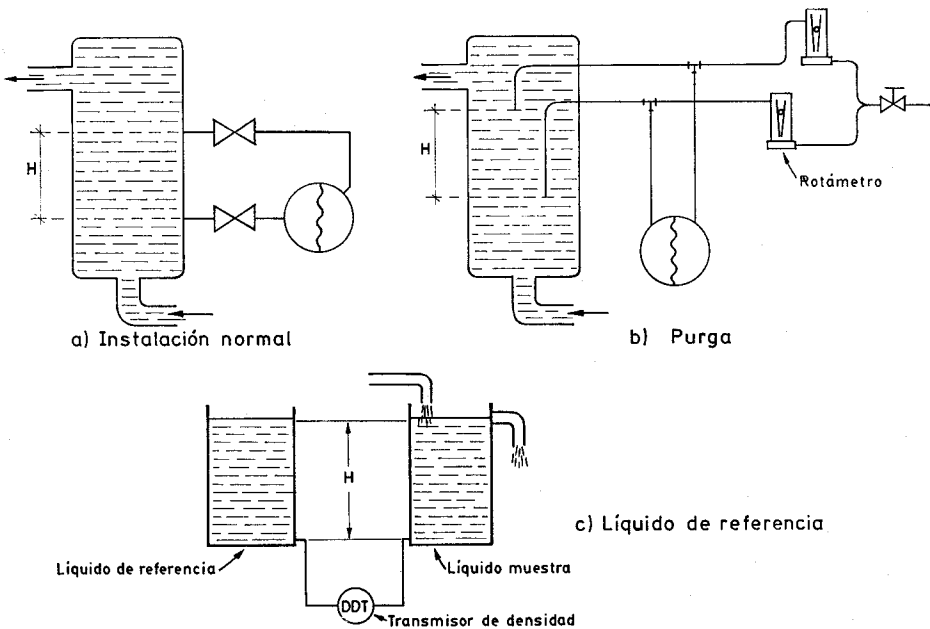


Fig. 7.12 Medida de densidad por presión diferencial.

En este caso puede emplearse el sistema de purga de aire o de gas e incluso de líquido (fig. 7.12 b) a través de dos tuberías colocadas en el seno del líquido y cuyos extremos están separados una distancia fija. En el ejemplo anterior esta separación sería de 1 m y el instrumento debería disponer de un resorte de elevación ajustado a 80 mm de c. de a.

En otro sistema utilizado en cámaras de medida a presión atmosférica se llena el ramal de menor presión del instrumento con un líquido de altura constante, que sirve como referencia (fig. 7.12 c), cuya densidad puede ser mayor o menor que la del líquido de proceso.

Estos instrumentos de presión diferencial tienen una precisión de 0,5-1 % y pueden trabajar con presiones y temperaturas de 300 bar y 170° C respectivamente.

7.1.3.4 Método de desplazamiento

En este sistema (fig. 7.13) se emplea un instrumento de desplazamiento o barra de torsión parecido al utilizado en la medición de nivel de líquidos. El flotador está totalmente sumergido en el líquido y está equilibrado exteriormente para que el par de torsión desarrollado represente directamente la densidad del líquido.

El método de desplazamiento tiene una precisión de $\pm 1\%$ con una amplitud de medida de densidad que puede llegar hasta un mínimo de 0,005. Las presiones y temperaturas de servicio alcanzan los 40 kg/cm² y 200° C. Este sistema puede emplearse en líquidos limpios no siendo adecuado en los líquidos pegajosos o que tengan sólidos en suspensión ya que podrían adherirse al flotador y falsear la medida.

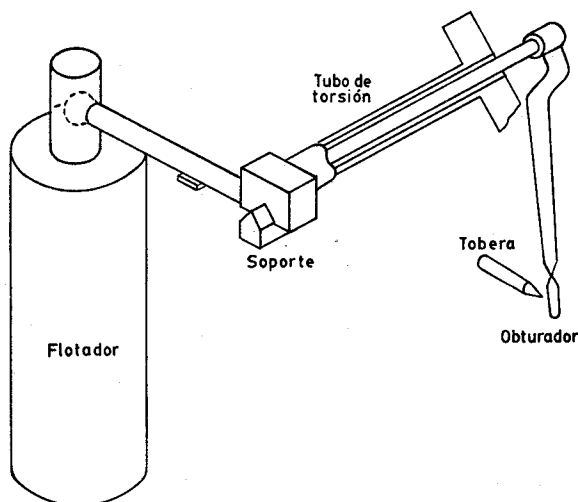


Fig. 7.13 Medición de densidad por desplazamiento.

7.1.3.5 Refractómetro

Los refractómetros (fig. 7.14) se utilizan en los fluidos limpios. El modelo de prisma rotativo (fig. 7.14 a) consiste en una fuente luminosa de filamento de tungsteno que incide en el líquido con un ángulo determinado tal que la reflexión de luz pase a refracción. El haz luminoso se enfoca en un prisma rotativo que barre el líquido del proceso. La refracción que se presenta cuando el rayo luminoso incide con el ángulo crítico se detecta con una célula fotoeléctrica y la señal es amplificada para su registro o control correspondiente.

El índice de refracción puede relacionarse con la concentración de sólidos del líquido, es decir, inferencialmente con la densidad.

Una variante de este modelo barre el líquido del proceso con un haz luminoso transmitido a través de fibras ópticas sumergidas en el líquido. La luz que sale de la fibra es tanto mayor, y tanto menor la que alcanza el detector, cuanto más próximo sea el índice de refracción del líquido al de la fibra.

En el modelo de prisma fijo, el ángulo crítico viene determinado por la relación entre la zona sombreada/zona clara de un detector que capta la luz reflejada a través de un prisma. El detector óptico está formado por 256 fotocélulas que

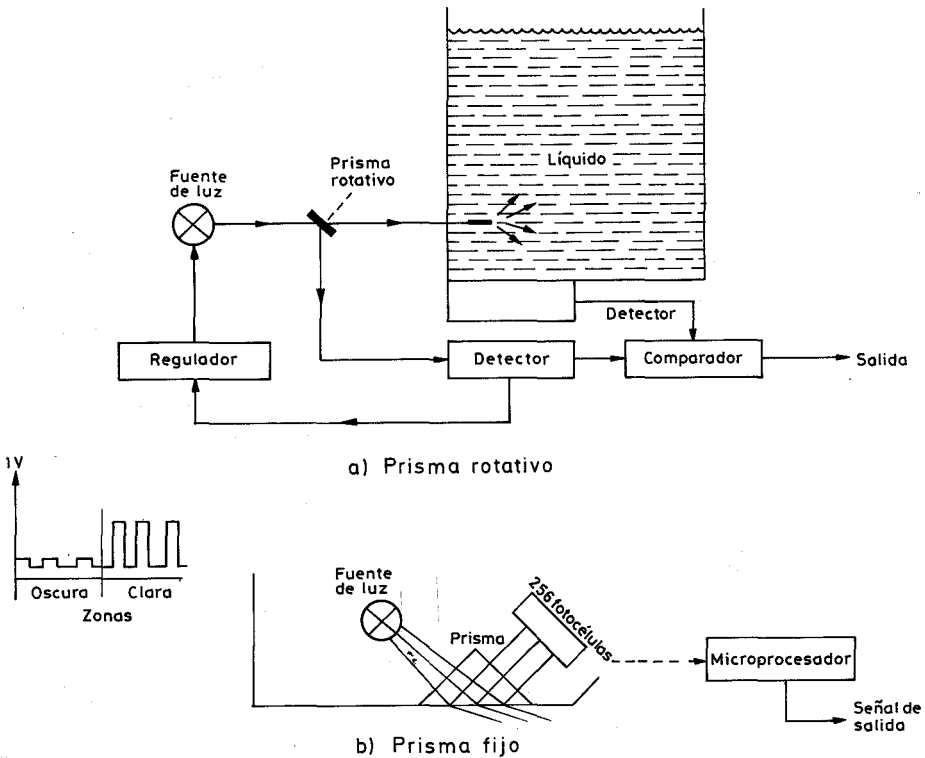


Fig. 7.14 Refractómetro.

envían trenes de impulsos. El número de impulsos altos corresponde a la zona clara de la imagen, y por lo tanto define la posición del borde sombreado. Un microprocesador compensa las variaciones de temperatura, linealiza la señal y entrega como señal de salida las unidades de concentración del fluido.

Los refractómetros no son influidos por los sólidos no disueltos ni por el aire en disolución. Su campo de medida mínimo es de 0,004 y su precisión es de 0,0001 g/cm³. Los líquidos pegajosos o con sólidos en suspensión pueden recubrir el prisma y éste precisa entonces de una limpieza periódica que puede ser automática con vapor de agua intermitente. Se emplean en evaporadores, en la concentración de licor negro en la industria papelera, etc.

7.1.3.6 Método de radiación

El método de radiación (fig. 7.15) se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. La radiación residual es medida con un contador de centelleo que suministra pulsos de tensión, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad.

La intensidad de la radiación residual captada a través del fluido es:

$$I = I_0 \times \rho - u' \cdot \rho \cdot L$$

en la que:

I_0 = radiación de la fuente

u' = coeficiente de atenuación del fluido

ρ = densidad del fluido

L = longitud de la radiación

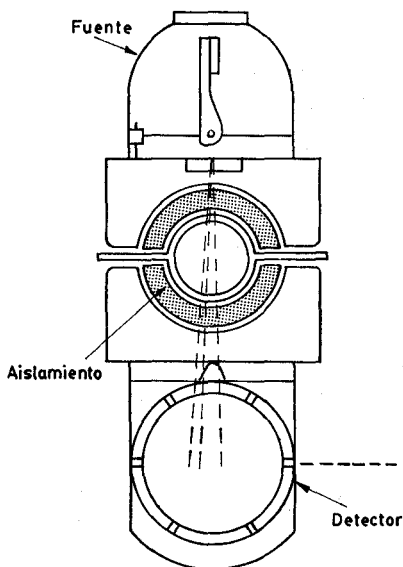


Fig. 7.15 Medidor de densidad de radiación.

La fuente de radiación utilizada industrialmente es principalmente el cesio 137 de vida media 30 años (también se emplea en casos especiales el americio 241 de vida media 458 años).

Como el coeficiente de atenuación del fluido μ' permanece constante para todos los elementos de peso atómico comprendido entre 2 y 30, y la longitud de la radiación es constante, se sigue que la intensidad de radiación residual es directamente proporcional a la densidad del fluido. Físicamente, el instrumento consiste en una tubería o en un tanque a cuyo través pasa el líquido, con la fuente blindada dispuesta en la parte exterior de la tubería o del tanque y con el receptor de la radiación instalado en la parte opuesta. Las conexiones eléctricas del receptor van a un registrador o controlador situado en el panel de control.

El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida, y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, extremo este último a tener en cuenta para conservar la misma precisión de la puesta en marcha. Como desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación, que en nuestro país están reglamentadas por la Junta de Energía Nuclear.

La precisión en la medida es de $\pm 0,5$ a $\pm 2\%$, y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido.

7.1.3.7 Método de punto de ebullición

En este sistema que puede verse en la figura 7.16 se mide la diferencia de temperaturas entre el punto de ebullición del líquido que se está concentrando y el punto de ebullición del agua en las mismas condiciones de presión. Esta diferencia de temperaturas es función de la densidad del líquido y se mide mediante sondas de resistencia inmersas una en el líquido y la otra en agua, conectadas a un instrumento diferencial de puente de Wheatstone graduado directamente en densidad. El agua a la misma presión que el líquido se obtiene con una purga de vapor conectada a una pequeña cámara de condensación donde se encuentra la sonda de resistencia; esta cámara está instalada en la tubería de salida del vapor del líquido.

El método de punto de ebullición se emplea con preferencia en los evaporadores.

7.1.3.8 Medidor de ultrasonidos

Mide la velocidad del sonido dentro del fluido e inferencialmente calcula su densidad. La medida se realiza disponiendo el conjunto emisor-receptor de ultrasonidos inmerso dentro del líquido o exterior al tanque o a la tubería. Las variaciones de la velocidad del sonido son provocadas por cambios en la densidad, que varían el acoplamiento acústico entre los transductores y el fluido, pero además pueden ser factores perturbadores, los cambios en la temperatura, que debe ser compensada, y las variaciones en la viscosidad y en la compresibilidad, por lo

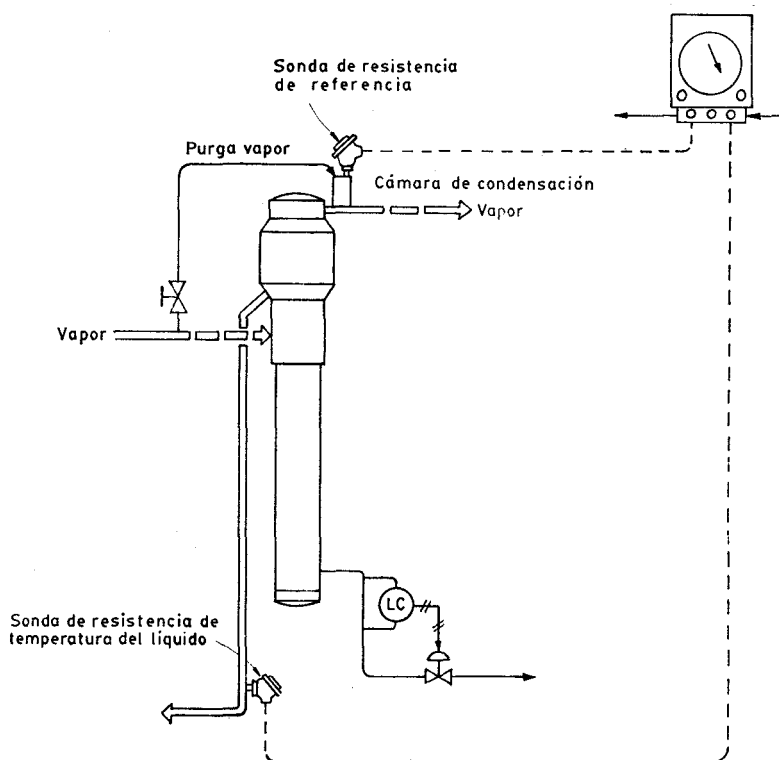


Fig. 7.16 Método de punto de ebullición.

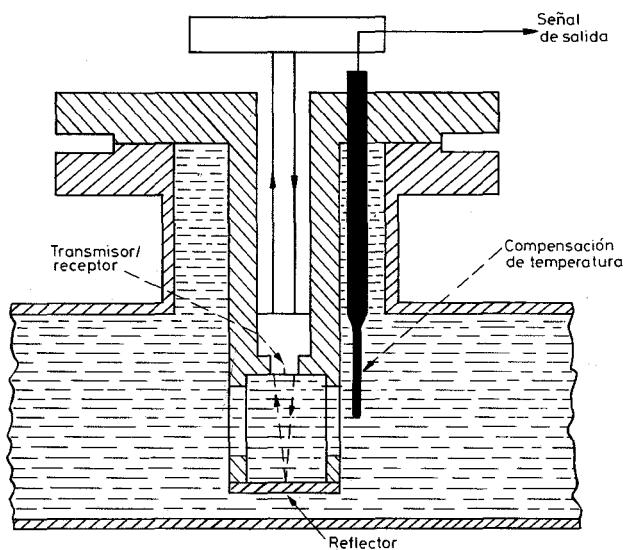


Fig. 7.17 Medidor de densidad de ultrasonidos.

que la medida queda restringida a una familia de líquidos de similares características. Por otro lado, si la velocidad de flujo del fluido es importante, las dos velocidades opuestas del sonido desde el emisor al receptor y del receptor al emisor son distintas, y aparece como complicación adicional las variaciones de frecuencia debidas al efector Doppler. Para compensar debidamente este efecto, es necesario efectuar una medida adicional de la velocidad en otra dirección.

En la figura 7.17 puede verse un esquema de este tipo de medidor.

7.1.3.9 Medidores inerciales

Los medidores de inercia se basan en aprovechar la variación de la masa inercial de una masa inmersa en el fluido al entrar la misma en vibración dentro de una cámara de volumen constante. Las variaciones de densidad del fluido contribuyen a una carga inercial de la masa, variando su masa efectiva. Como la frecuencia natural de un elemento depende de su masa efectiva, se sigue que midiendo la frecuencia natural o resonancia de la masa inmersa, se tendrá una medida correlacionada de la densidad del fluido. La temperatura medida del fluido debe compensarse.

La fórmula de cálculo correspondiente es:

$$\rho_0 = K_0 + K_1 \cdot T + K_2 \cdot T^2$$

en la que:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \text{Lectura de densidad del aparato} \\ K_0, K_1, K_2 &= \text{Constantes de calibración de cada aparato} \\ T &= \text{Período natural (inverso de la frecuencia natural)} \end{aligned}$$

El circuito de medida incorpora un cristal piezoeléctrico para detectar la frecuencia natural en el estado de resonancia de la masa, y ésta se mantiene continuamente en dicho estado gracias a un circuito de control.

El sistema sirve tanto para la medición de densidad en líquidos como en gases.

Existen varios tipos de medidores inerciales:

El *medidor de torsión* consiste en dos cilindros huecos dispuestos en una tubería donde circula el fluido. La excitación y la detección de la frecuencia de resonancia son proporcionadas por activadores y sensores piezoeléctricos.

En el *método de horquilla* (fig. 7.18) la masa en vibración tiene forma de horquilla y la aspiración del fluido (líquido o gas) tiene lugar mediante una bomba auxiliar a través de un by-pass. El sistema debe aislarse perfectamente para que las condiciones de servicio de temperatura correspondan exactamente a las del fluido. La precisión del sistema es del orden de $\pm 0,2 \%$.

El *método de tubo en U* (fig. 7.19) consiste en un tubo que tiene forma de U que incorpora una armadura rígida situada dentro del campo de una bobina excitadora alimentada por una corriente pulsante. La vibración que el tubo experimenta es función de la masa del fluido contenida en el tubo y, por lo tanto, de su densidad.

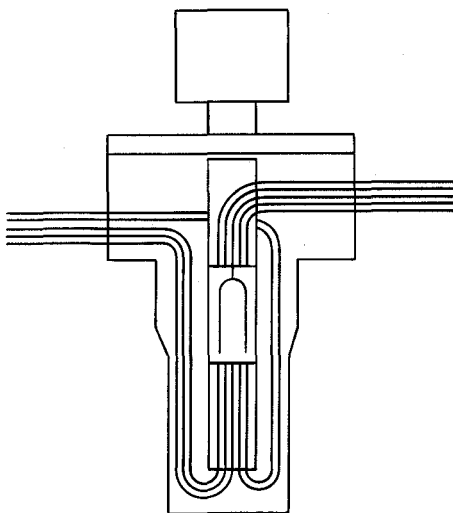


Fig. 7.18 Método de horquilla oscilante.

La excitación electromagnética correspondiente hace que el tubo vibre a su frecuencia natural:

$$f = 2 \cdot \left(\frac{C}{M_0 + V_0 \cdot \rho} \right)^{1/2}$$

en la que:

- f = Frecuencia de la vibración
- M_0 = Masa del tubo
- V_0 = Volumen en vibración
- C = Constante de elasticidad
- ρ = Densidad a medir

La medida es compensada según la temperatura real del fluido a su paso a través del tubo.

La vibración induce una corriente alterna en una bobina receptora y esta corriente es convertida a una señal de corriente continua y enviada a un controlador o registrador.

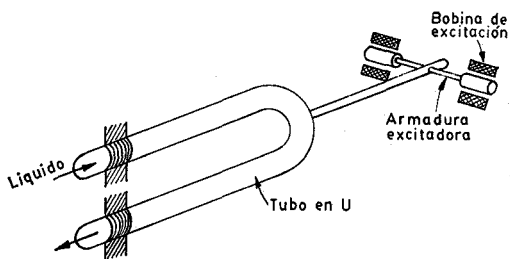


Fig. 7.19 Método de tubo en U oscilante.

La precisión de medida del instrumento alcanza $\pm 0,0001 \text{ g/cm}^3$ y puede trabajar a unas presiones y temperaturas máximas de 50 kg/cm^2 y 150°C con fluidos viscosos y corrosivos gracias al material del tubo en U. Algunos fluidos tienen tendencia a recubrir el tubo a pesar de la vibración a que está sometido y obligan a parar el proceso para limpiar el tubo.

7.1.3.10 Medidor de Coriolis

El medidor de Coriolis descrito en 4.2.2.3 (caudal masa) puede emplearse en la medida de la densidad. En efecto, siendo las características de la vibración en el tubo:

w = frecuencia angular

f = frecuencia

T = período

K = constante de elasticidad

m = Masa

m_f = masa del fluido

m_c = masa del medidor

V = volumen interior del tubo sensor

resulta,

$$m = m_f + m_c$$

$$w = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{\rho v + m_c}}$$

y despejando,

$$\rho = \frac{KT^2}{4\pi^2 V} - \frac{m_c}{V} = k_1(t_c) \cdot T^2 - k_2$$

t_c es la corrección de temperatura sobre el módulo de elasticidad del tubo.

Utilizando dos fluidos A y B de densidad conocida resulta:

$$\rho_a = K_1(t_{ca}) \cdot T_a^2 - K_2$$

$$\rho_b = K_1(t_{cb}) \cdot T_b^2 - K_2$$

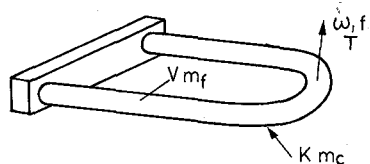


Fig. 7.20 Medidor de Coriolis.

y efectuando operaciones

$$\rho = (\rho_b - \rho_a) - \left(\frac{t_c T^2 - t_{ca} T_a^2}{t_{cb} T_b^2 - t_{ca} T_a^2} \right) + \rho_a$$

por lo tanto, conocidos los períodos del tubo T_a , T_b para dos fluidos A y B a una temperatura conocida, es posible determinar la densidad de un fluido midiendo el período T de la vibración y su temperatura.

7.1.3.11 Medidores de balanza

Consiste en un *tubo en U* apoyado con conexiones flexibles en la carcasa del aparato y suspendido de una báscula que trabaja por el principio de equilibrio de fuerzas, y que según el tipo de transmisor dará una señal neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA). En este último caso, el sistema de medida es por puente de Wheatstone de dos o de tres hilos. Como en la mayor parte de los métodos descritos, la medida debe ser compensada para las variaciones de temperatura del fluido circulante.

En la figura 7.21 puede verse este tipo de medidor.

El método es adecuado en la medición de densidad en líquidos. La precisión de la medida es de $\pm 1\%$.

El *medidor de balanza* empleado en los *gases* es un sistema muy sensible que se basa en la aplicación del principio de Arquímedes. En el interior de una cámara de medida en la que puede entrar el gas a medir se encuentra una balanza formada por una esfera llena de aire o de otro gas patrón o de referencia que se apoya en su centro y lleva en el otro extremo un contrapeso. El gas al circular dentro de la cámara desequilibra la balanza y transmite estas desviaciones a través de un acoplamiento magnético al sistema de indicación o registro. La precisión en la medida es de $\pm 0,25\%$.

El ordenador personal IBM PC o compatible se está utilizando en la medida de la densidad en un sistema de valoración hidrostática de la capacidad de tanque, en el cual se mide la presión diferencial en dos puntos fijos del tanque y se compensa con relación a la temperatura. La medida de la densidad efectuada por la diferencia de presiones captada, conjuntamente con la temperatura y las características tabuladas del tanque, son introducidos en un ordenador personal con placas de adquisición de datos. La precisión conseguida en el cálculo inventariable del volumen del tanque es de $\pm 0,1\%$, frente al típico $\pm 0,3\%$ conseguido con un medidor de nivel hidrostático clásico.

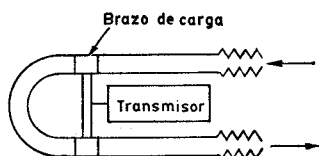


Fig. 7.21 Medidor de balanza de tubo en U.

TABLA 7.2 Sistemas de medida de densidad

<i>Sistema</i>	<i>Precisión % amplitud medida</i>	<i>Ampli- tud mínima</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Aplicaciones</i>
Areómetro	1-3	0,5-4	Sencillos		Líquidos limpios
Presión diferencial	0,5-1	0,01	Tanques a pre- sión		Líquidos
Desplazamiento	1	0,005	»	No puede usarse en fluidos que recubran el flotador	Líquidos
Refractómetro	± 0,1 %	0,004	Insensible a sólidos y aire	Íd. en fluidos que recubran el prisma	Líquidos
Radiación	1	0,05	Sin contacto con el proceso	Influido por aire o gases disueltos. Caro, inspecciones, seguridad radiación	Líquidos
Punto de ebullición	—	—	Simple montaje en línea	Necesita vapor a la misma presión que el proceso	Líquidos en evaporadores
Ultrasonidos	1	—	Simple montaje en línea	Compensación de temperatura y viscosidad	Líquidos
Medidores inerciales					
Torsión	0,5-1	—	»	»	Líquidos
Vibración tubo en U	1-3	0,05	Medida en línea a alta presión	Posible recubrimiento del tubo por algunos fluidos	Líquidos y gases
Horquilla	0,2	—	»	»	»
Coriolis	0,2	—	»	Caro	»
Medidor de balanza	0,25-1	—	Respuesta rápida simple	Medida indirecta	Líquidos y gases

En la tabla 7.2 se señalan las características principales de los sistemas de densidad descritos.

7.1.4 Humedad y punto de rocío

Las variables humedad y punto de rocío son de extraordinaria importancia en la industria y se utilizan en el acondicionamiento de aire, en atmósferas protectoras

empleadas en tratamientos térmicos, en secadores y humidificadores, en la industria textil, en la conservación de fibras, etc.

Varios términos se emplean al hablar de humedad o punto de rocío en el aire o en los gases:

Humedad absoluta. Cantidad de agua en kg por kg de aire seco.

Porcentaje de humedad. Cociente multiplicado por 100 entre la cantidad en kg del vapor de agua contenido en 1 kg de aire seco y la cantidad en kg del vapor de agua contenida en 1 kg de aire seco si el aire está en condiciones de saturación.

Humedad relativa. Es el cociente entre la presión parcial del vapor de agua a una temperatura t_0 y la presión total del vapor a saturación y a la misma temperatura t_0 . Equivale al porcentaje de humedad.

Temperatura seca. Temperatura del aire medida con un termómetro con el bulbo seco, es decir, en contacto directo con la atmósfera.

Temperatura húmeda. Es la temperatura de equilibrio dinámico alcanzado por una superficie húmeda cuando se la expone al aire. Puede medirse con un termómetro cuyo bulbo está en ambiente de saturación lo que se consigue envolviéndolo con un paño que se mantiene húmedo continuamente (bulbo húmedo).

Punto de rocío. Es la temperatura límite a la que el vapor de agua existente en el aire o en el gas se condensa pasando al estado líquido.

En los sólidos, la humedad puede venir expresada en varias formas:

Contenido de humedad. Expresado en tanto por ciento, es la cantidad de agua existente en las sustancias sólidas por unidad de peso o de volumen del sólido seco o húmedo. El término se aplica con preferencia en relación al sólido seco, es decir, viene expresado en base seca.

Contenido de humedad comercial. Contenido de humedad expresado en kilogramo de agua por kilogramo del material al salir éste del proceso de secado.

7.1.4.1 Humedad en aire y gases

En la determinación de la humedad en el aire y en los gases pueden emplearse varios métodos.

Método de elemento de cabello (o nailon). Se basa en la expansión o contracción lineal que son características de los materiales sensibles a las variaciones de humedad, tales como los cabellos naturales o de fibra de nailon.

En la figura 7.22 se puede observar el funcionamiento de dichos instrumentos. Su precisión es del orden de ± 3 a ± 5 % y su campo de medida de 15 a 95 % H. R.

Bulbo seco y bulbo húmedo (fig. 7.23). Este instrumento se basa en la captación de la temperatura ambiente o seca y de la temperatura húmeda, mediante dos termómetros, uno seco y otro con su bulbo constantemente humedecido.

Observando en el diagrama psicométrico las temperaturas del bulbo seco y del bulbo húmedo sobre las líneas correspondientes, se obtiene por intersección la humedad relativa.

En lugar de consultar el diagrama psicométrico para cada lectura puede utili-

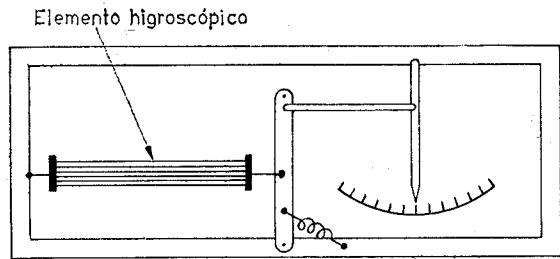


Fig. 7.22 Elemento de cabello.

zarse un instrumento que mida directamente la temperatura diferencial entre los dos bulbos, seco y húmedo respectivamente, con lo que el índice o la pluma de registro del instrumento indicará directamente la humedad relativa.

El instrumento tiene la ventaja de dar una gran precisión cuando la humedad relativa está próxima a la saturación, con lo que permite el uso de aparatos con un campo de medida muy estrecho a la H.R. próxima a 100 %. A H.R. menor de 20 % su precisión es pobre. Por otro lado, su uso es desaconsejado en pequeñas cámaras, ya que el agua del bulbo húmedo se incorpora al ambiente y falsea la lectura.

Célula de cloruro de litio

La célula de cloruro de litio para medir la humedad relativa puede verse en la figura 7.24 y consiste en una célula embebida en cloruro de litio con una rejilla de láminas de oro. La sal tiene la propiedad de variar considerablemente de resistencia al aumentar o disminuir la humedad ambiente ya que libera o absorbe iones de la película soporte. Como la humedad relativa viene determinada simultáneamente por el contenido de la humedad y por la temperatura del aire, es obvio que es necesario compensar ésta. En la figura 7.24 b, puede verse un gráfico resistividad - H. R. en función de la temperatura ambiente. La proporción de la sal de cloruro de litio en la película que recubre la célula determina el campo de medida de la humedad; cuanto más alta

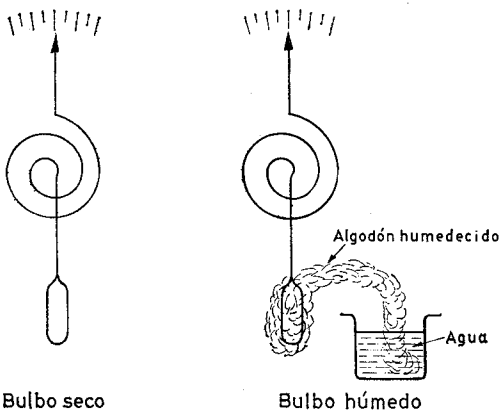
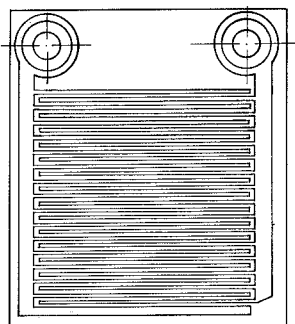
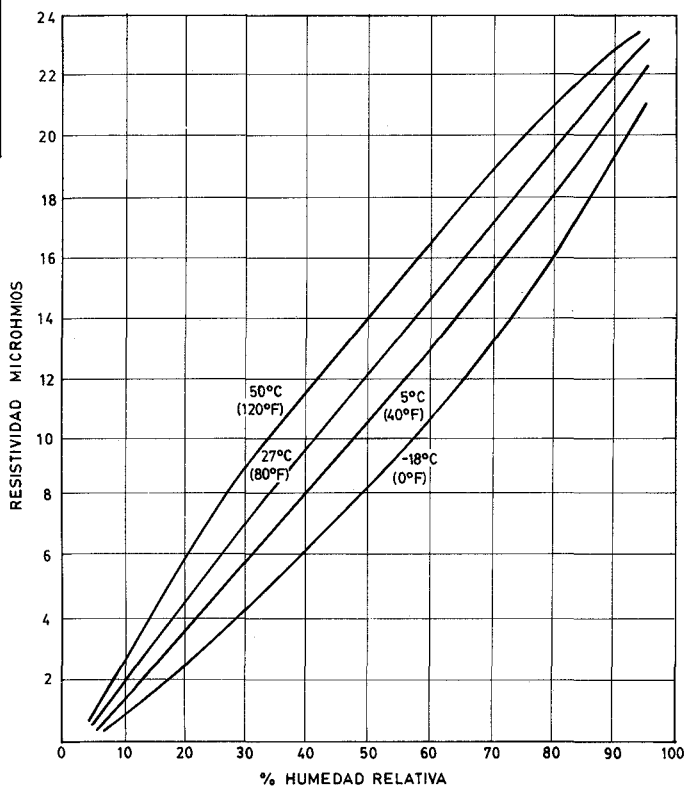


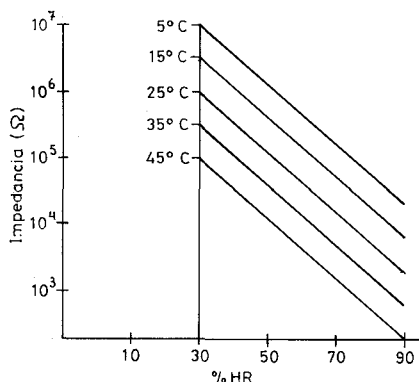
Fig. 7.23 Bulbo seco y bulbo húmedo.



a) Célula de cloruro de litio



b) Gráfico resistividad - humedad relativa de la célula de cloruro de litio
(Cortesía de Honeywell)



c) Gráfico sensor de polímero

Fig. 7.24 Célula de cloruro de litio y sensor de polímero.

sea la proporción de la sal tanto más bajo será el campo de medida. El elemento no puede utilizarse en atmósferas con mucho polvo, con dióxido de azufre, vapores ácidos, amoníaco, cloro, vapores alcalinos, acetileno, óxido de etileno y atmósferas contaminadas con sal.

El elemento envejece, disminuyendo su indicación en 1 a 2 % por año. La precisión suele ser de ± 2 a ± 3 % de humedad relativa y el elemento puede medir de 5 a 95 % de H. R.

Sensor de polímero

El sensor está formado por una rejilla conductora con una base de poliestireno tratada con ácido sulfúrico. La variación de humedad ambiente (30 a 90 % H. R.) cambia la resistencia de la superficie del sensor, debido a que el radical sulfato (SO_4) libera o absorbe los iones hidrógeno (H^+) procedentes de la humedad del ambiente. En la figura 7.24 c pueden verse las curvas de impedancia según la temperatura de trabajo. Se utilizan compensadores de temperatura y el sensor está conectado a un puente de Wheatstone.

7.1.4.2 Humedad en sólidos

En la determinación de la humedad de los sólidos se emplean varios métodos:

Secado térmico que es el método más antiguo; se emplea normalmente como comprobación de los demás sistemas. Consiste en aplicar calor al material en estado sólido, granular, fibroso e incluso en forma líquida hasta que no puede liberarse más agua a no ser que se aumente la temperatura. El agua se evapora mientras su presión de vapor dentro del material es mayor que la del aire del horno que le rodea; de este modo pueden mejorarse las condiciones de secado trabajando a temperaturas altas y manteniendo baja la humedad dentro del horno (con sustancias absorbentes del agua o en hornos al vacío). La muestra del producto debe mantenerse un cierto tiempo a la temperatura de secado para llegar a un equilibrio de humedad en su interior, pudiendo variar este tiempo de 2 horas a 15 horas.

El método de secado es fácil de realizar, pero tiene el inconveniente del excesivo tiempo que requiere y no distingue entre la humedad y las materias volátiles que el cuerpo puede contener o que puedan producirse por descomposición térmica. No obstante, el método correctamente realizado permite comprobar los demás sistemas de determinación de humedad.

El *método de conductividad* (fig. 7.25) se basa en la medida de la conductividad de una muestra del producto al pasar una corriente a través de los electrodos en contacto con el mismo. Estos electrodos forman parte de un puente de Wheatstone con la indicación, el registro o el control de la humedad.

El método da buenos resultados y es repetitivo. Sin embargo, la lectura viene influida considerablemente por el estado de la superficie de contacto de los electrodos, por la presión de los mismos en el material, por la temperatura, etc. en particular en los materiales de alta resistividad como el papel.

El *método de capacidad* se basa en la variación de la constante dieléctrica

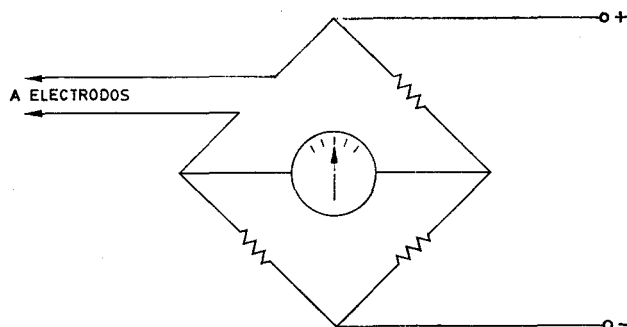


Fig. 7.25 Método de conductividad.

que el material experimenta entre el estado húmedo y el estado totalmente seco. Por ejemplo, en el caso del papel, la variación puede estar entre 2,8 al salir del horno y 80 que es la constante dieléctrica del agua.

Los electrodos que constituyen las placas de un condensador cuyo dieléctrico es el material cuya humedad ha de medirse forman parte de un oscilador de radiofrecuencia cuya salida alimenta un puente de medida de capacidades (figura 7.26).

El sistema se emplea en materiales con un contenido de humedad menor de 20 a 25 % y es independiente de la presión del contacto de los electrodos o de los cambios en la temperatura.

Método de infrarrojos

En el método de infrarrojos (fig. 7.27) aplicado preferentemente en la fabricación del papel, una fuente de rayos infrarrojos emite un haz de rayos hacia la superficie del ma-

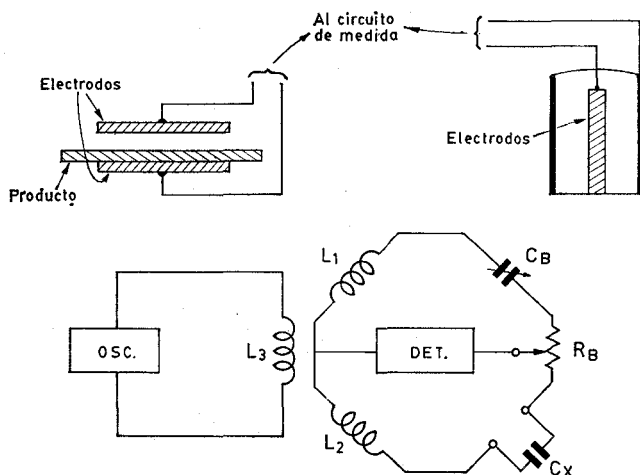


Fig. 7.26 Puente de capacidades para medida de humedad.

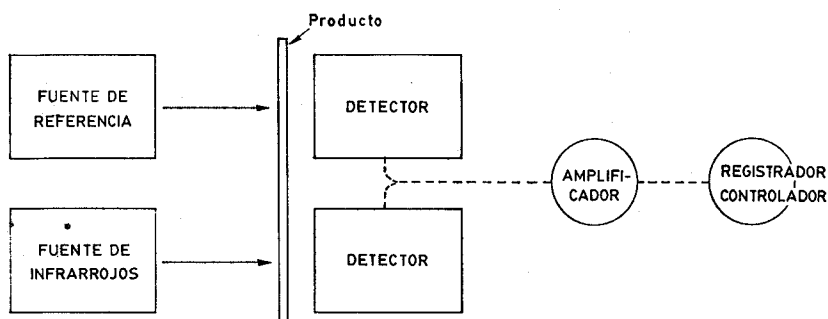


Fig. 7.27 Medida de humedad por infrarrojos.

terial cuya humedad desea medirse. La onda emitida está seleccionada de tal forma que el agua contenida en el producto absorbe la máxima radiación infrarroja mientras que la celulosa absorbe el mínimo.

De este modo, un detector capta la radiación que atraviesa el material e indica la humedad correspondiente. Para que la medida sea independiente de la capa de aire intercalada entre el emisor, el material y el detector, de las variaciones de espesor del material y de su posición relativa entre el emisor y el detector, se acostumbra a utilizar otra fuente adicional que actúa como referencia. El conjunto emisor-detector suele ser móvil para de este modo explorar toda la banda de papel.

Método de radiación

En el método de radiación (fig. 7.28) una fuente de neutrones de alta energía se dirige contra el material del proceso y parte de la radiación emitida es reflejada principalmente por los átomos de hidrógeno existentes en las moléculas del material. Como el hidrógeno está asociado químicamente con el agua, es posible determinar muy exactamente la humedad del material. El método es caro, requiere una supervisión de seguridad y una comprobación periódica de la fuente de neutrones.

7.1.4.3 Punto de rocío

En la medición del punto de rocío se emplean la cámara de niebla, la célula de

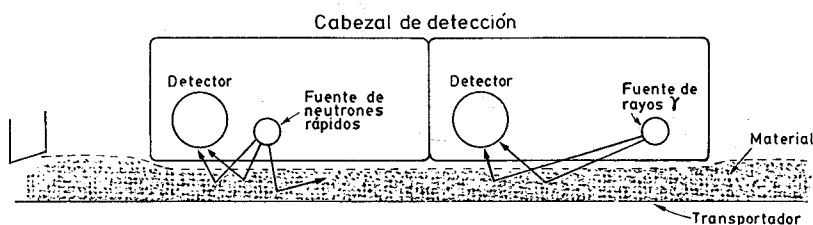


Fig. 7.28 Medida de humedad por radiación.

cloruro de litio, el sistema de condensación en un espejo y el analizador de infrarrojos.

La *cámara de niebla* realiza una medida manual discontinua del punto de rocío. Consiste en un pequeña cámara con una bomba manual que permite comprimir una muestra del gas. El operador anota la presión y la temperatura iniciales del gas y lo comprime a una presión dada. A continuación abre una válvula de escape a la atmósfera con lo que el gas sufre una expansión adiabática y baja de temperatura. El ensayo se repite varias veces comprimiendo cada vez más el gas hasta que la temperatura alcanzada en la expansión hace aparecer niebla en la cámara. Esta temperatura corresponde al punto de rocío.

La *célula de cloruro de litio* (fig. 7.29) consiste en un manguito de tela impregnado con una solución de cloruro de litio, envolviendo una bobina. Sobre el manguito

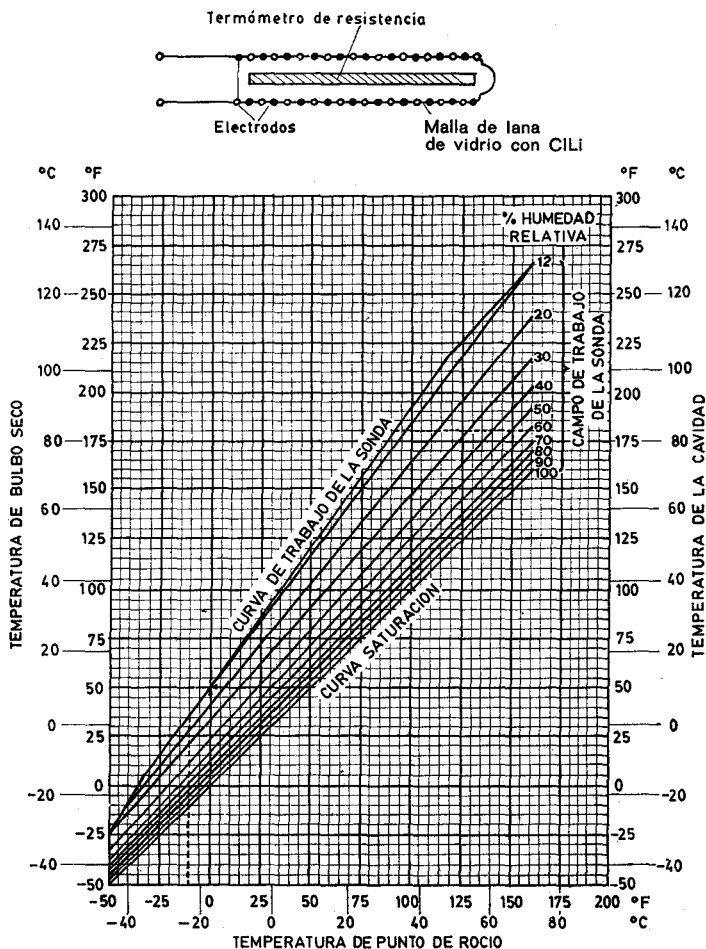


Fig. 7.29 Célula de cloruro de litio. — (Cortesía de Honeywell).

está arrollado un hilo bifilar abierto en un extremo y alimentado a través del secundario de un transformador, con lo que circula una corriente entre los hilos a través de la sal de cloruro de litio. Ésta tiene la propiedad característica de mantenerse con una humedad relativa del 11 % en equilibrio con la atmósfera húmeda. A valores inferiores al 11 % la sal cristaliza y deja de ser conductora.

La sal es altamente higroscópica, por lo cual tiene una gran afinidad por la humedad ambiente; cuanto más alta sea ésta tanto más conductora será la sal y tanto más se calentará la bobina por la circulación de corriente a través del hilo bifilar. La temperatura de equilibrio de la bobina está pues relacionada con el punto de rocío del aire o del gas de modo que puede medirse con una sonda de resistencia y un instrumento de puente de Wheatstone graduado directamente en temperatura del punto de rocío. En la figura 7.29 pueden verse las características de trabajo de la célula de cloruro de litio.

La célula es apta para temperaturas ambientes de -30 a 130°C (-25 a 265°F). A temperaturas superiores a 130°C el punto de rocío puede medirse admitiendo el paso de aire a una cámara de temperatura constante y enfriándolo a menos de 80°C (180°F) antes de circular a través de la célula.

La célula exige que los gases cuyo punto de rocío se mida no contengan ni amoníaco, ni dióxido de azufre, ni cloro, ni sal, ni partículas en suspensión. En caso de contaminación de la célula, es necesario regenerarla limpiándola y sumergiéndola en una solución de cloruro de litio.

El sistema de condensación en un espejo está representado en la figura 7.30 y consta de una cámara con un sistema calefactor y refrigerante que controla la tempe-

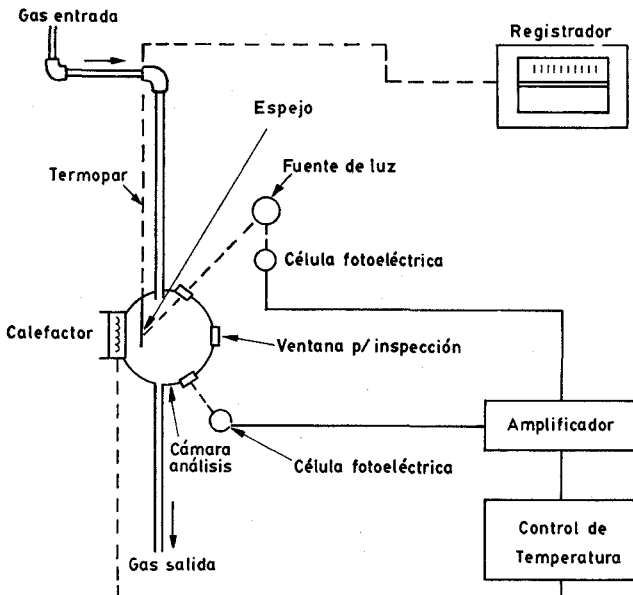
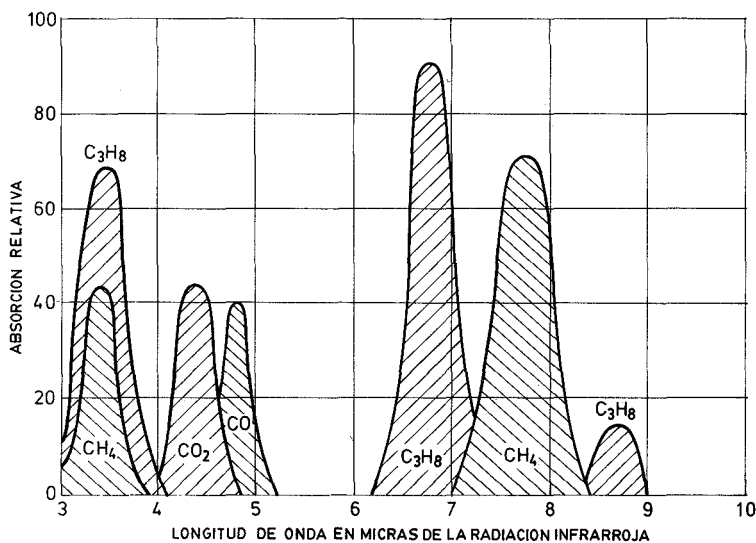


Fig. 7.30 Sistema de condensación en un espejo.

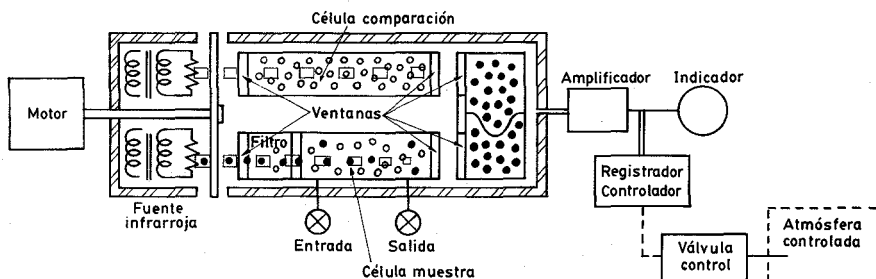
ratura de la superficie de un espejo situado en su interior y a cuyo través circula una corriente del gas cuyo punto de rocío hay que determinar. Una célula fotoeléctrica actúa sobre el sistema de refrigeración o calentamiento para conseguir el empañamiento constante de la superficie especular. La temperatura de esta superficie indica el punto de rocío del gas.

El *analizador de infrarrojos* no sólo puede medir el punto de rocío (vapor de agua) sino también cualquiera de varios constituyentes, tales como CO_2 , CO , CH_4 , C_3H_8 , SO_2 , NH_3 .

Hay que señalar que la radiación infrarroja es absorbida por estos gases de un modo característico (fig. 7.31). El analizador de infrarrojos que está representado en la figura 7.31 *b* consiste en una fuente pulsante de infrarrojos (filamentos de Nichrome), dos células, una de referencia y otra de muestra a cuyo través pasan las radiaciones infrarrojas, y un detector.



a) Curvas de absorción de radiación infrarroja para varios gases



b) Analizador de infrarrojos

Fig. 7.31 Sistema de infrarrojos.

Si la cámara detectora está llena de vapor de agua, la radiación infrarroja es absorbida proporcionalmente a la concentración de vapor de agua en la célula de gas muestra, con lo cual disminuye la presión en esta cámara como resultado de la energía intermedia absorbida. Si se bloquean las dos radiaciones, una la que pasa por la célula de referencia y la otra la que pasa a través de la célula de muestra del gas a analizar, no hay variación de presión en la cámara.

Si la célula de referencia contiene un gas no absorbente, tal como el nitrógeno y por la célula muestra pasa el gas húmedo, la radiación a través del gas muestra, tal como se ha indicado, estará atenuada en la longitud de onda del vapor de agua en el gas mientras que la radiación a través del gas patrón N_2 permanecerá invariable.

Se obtiene así una presión variable pulsante en el detector; éste contiene dos cámaras separadas por un diafragma que actúa como un micrófono a condensador y convierte los impulsos de presión a una señal eléctrica que es amplificada, rectificada y finalmente registrada.

TABLA 7.3 Sistemas de medición de humedad y punto de rocío

	Sistema	Precisión	Campo de medida	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
HUMEDAD	Cabello	3-5 %	15-95 % H.R.	Útil hasta 70 %	Poca precisión	Aire
	Bulbo seco y húmedo	1-2 %	0-100 % H.R.	Útil hasta 100° C	Temperatura diferencial bulbo húmedo	Gases
	Cloruro de litio	± 2 a ± 3 %	5-95 % H.R.	Útil hasta 70 %	Envejecimiento	Gases excepto SO ₂ , NH ₃ ,...
	Polímero	1-2 %	30-90 % H.R.	—	»	»
	Secado térmico	—	0-100 %	Patrón	Lentitud. No apto control	Método patrón en sólidos
	Conductividad	2-3 %	—	Simple Repetitivo	Estado superficie	Sólidos
	Capacidad	2-3 %	<25 %	Insensible a presión contacto	—	—
	Infrarrojos	± 1 %	0-100 %	Sin contacto	Caro	Papel
	Radiación	± 1 %	0-100 %	»	{ Caro. Inspección seguridad	{ Papel, materiales granulares
PUNTO DE ROCÍO	Cámara de niebla	Método manual	—	—	—	Gases
	Cloruro de litio	± 1 %	- 45 a 60° C	Barato	{ Lento. Envejecimiento no apto para SO ₂ , NH ₃ , ...	{ Gases excepto SO ₂ , NH ₃ ,...
	Espejo	± 1 %	- 70 a 37° C	Rápido	{ Caros. gases limpios	Gases limpios
	Analizador infrarrojos	± 1 %	0-30 000 ppm	Rápido	Caro	Gases

El instrumento además de medir el punto de rocío puede determinar los porcentajes de varios componentes en el gas a analizar. El lector interesado puede consultar el apartado 7.2.7.3 donde se estudia el analizador de infrarrojos en la determinación de la composición de los gases.

Los analizadores infrarrojos son de respuesta rápida, aptos para el registro de varias muestras de gas, pueden analizar atmósferas conteniendo amoníaco y con la ayuda de cilindros patrón son de fácil calibración.

En la tabla 7.3 figuran las características de los sistemas descritos de humedad y punto de rocío.

7.1.5 Viscosidad y consistencia

7.1.5.1 Introducción

La viscosidad y la consistencia son términos que se aplican a los fluidos y que representan la resistencia que ofrecen al flujo o a la deformación cuando están sometidos a un esfuerzo cortante.

La *viscosidad* de un fluido definida por Newton es la resistencia que ofrece el fluido al movimiento entre dos placas paralelas separadas por una distancia unidad, una de ellas fija y la otra móvil que se mueve con la unidad de velocidad (figura 7.32 a). Esta resistencia se expresa como cociente entre el esfuerzo cortante por unidad de área (F/A) y la velocidad cortante por unidad de espesor de la capa de fluido (V/e).

$$\text{Es decir: } \mu = \frac{F/A}{V/e}$$

Los fluidos newtonianos se caracterizan por la relación lineal entre el esfuerzo cortante unitario y la velocidad cortante unitaria, es decir, la representación gráfica de F/A con relación a V/e es una línea recta. Otros fluidos tienen pendientes variables y no siguen la definición de Newton, estando representados en la figura 7.32 b (fluidos no newtonianos).

Muchos plásticos requieren la aplicación de una cierta fuerza a la placa mó-

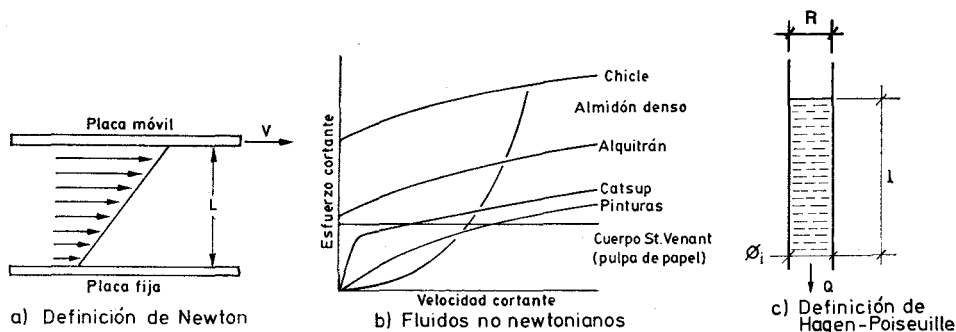


Fig. 7.32 Definición de viscosidad.

vil antes de que ésta se mueva y una vez en movimiento la viscosidad aparente disminuye al incrementarse la velocidad de la placa (la pendiente baja). Otros materiales que en reposo están coagulados, pasan al estado líquido al ser agitados (tixotrópicos). El cuerpo St Venant representa sustancias que no tienen prácticamente pendiente (pasta de papel).

Hagen-Poiseuille definieron la viscosidad en términos más prácticos expresando la relación entre los esfuerzos y las velocidades cortantes para un tubo capilar en la forma siguiente (fig. 7.32 c):

$$\mu = \frac{\Delta P/2 l}{4Q/\pi R^4} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 Q l}$$

en la que:

ΔP = Presión diferencial a través del líquido en el tubo capilar

R = Radio interior del tubo

Q = Caudal del fluido

l = Longitud del tubo

Los términos relacionados con la viscosidad son:

Viscosidad dinámica o absoluta definida por la fórmula de Hagen-Poiseuille cuya unidad en el sistema de unidades internacionales SI es el $\text{Pa} \cdot \text{s}$ o el $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ($1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) unidad que ha sustituido en el sistema CGS al *poise* ($1 \text{ dina} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) y al *centipoise* (cp) equivalente a 0,01 poise ($1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ centipoise}$). El agua a 20°C tiene una viscosidad de 1 centipoise.

Viscosidad cinemática que es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. Su unidad en el sistema internacional (SI) es el m^2/s y en el CGS el cm^2/s llamado stoke y para valores pequeños se emplea el centistoke (cs) igual a 0,01 stoke ($1 \text{ m}^2/\text{s} = 10\,000 \text{ stokes}$).

Si la viscosidad se expresa en función del tiempo que un volumen determinado del fluido emplea para pasar a través de un orificio o de un tubo capilar (viscosímetro, fig. 7.33 a) se utilizan las siguientes unidades.

Escala Saybolt (Estados Unidos), Redwood (Gran Bretaña) y Engler (Europa).

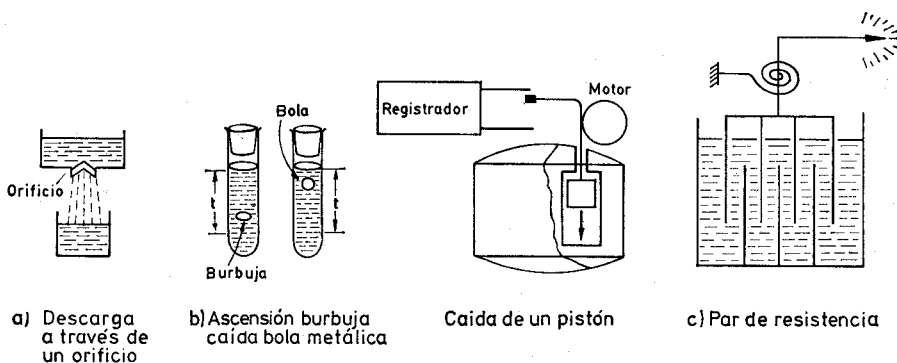


Fig. 7.33 Métodos discontinuos de medida de viscosidad.

Existe una relación entre la viscosidad cinemática (ν) y las unidades anteriores dada por la fórmula

$$\nu = At - \frac{B}{t}$$

con los valores de A y B dados por la tabla

Viscosímetro	A	B
Saybolt	0,0022	1,8
Redwood	0,0026	1,72
Engler	0,00147	3,74

La *consistencia* es el grado de deformación que presentan los fluidos cuando se les somete a un esfuerzo cortante. El término representa esencialmente la viscosidad de suspensiones de partículas insolubles en un líquido y es una característica de fluidez del mismo. El término consistencia se aplica en la industria en la fabricación de pinturas, de papel, en el envase de productos alimenticios, etc.

Las unidades de consistencia son totalmente distintas de las de viscosidad y se expresan en unidades arbitrarias. Por ejemplo, en la industria papelera, la consistencia designa la proporción entre el peso de materia seca o fibra de pulpa seca y el peso total de los sólidos más el agua que los transporta. Y así:

$$\text{Consistencia \%} = \frac{\text{Peso sólidos secos en kg}}{\text{Peso sólidos secos} + \text{agua en kg}} 100$$

La consistencia podrá detectarse, de acuerdo con la definición dada presionando sobre la pulpa de papel con una cuchilla especialmente diseñada para eliminar el rozamiento y la fuerza de impacto.

En la industria se emplean los siguientes sistemas para la medida de viscosidad.

7.1.5.2 Viscosímetros

Viscosímetros discontinuos que se basan en:

- Medir el tiempo que emplea un volumen dado del fluido para descargar a través de un orificio (fig. 7.33 *a*) El orificio puede sustituirse por un tubo capilar.
- Tiempo de caída de una bola metálica o de ascensión de una burbuja de aire en el seno del fluido contenido en un tubo o bien de caída de un pistón en un cilindro (fig. 7.33 *b*).
- Par de resistencia de un elemento estacionario en una taza rotativa que gira a velocidad constante. El par se mide por el desplazamiento angular de un resorte calibrado unido al elemento fijo (fig. 7.33 *c*).

Entre los viscosímetros continuos que permiten el control de la viscosidad se encuentran los siguientes:

- Caída de presión producida por un tubo capilar al paso del fluido que se bombea a caudal constante (fig. 7.34 *a*). Dos tomas situadas antes y después del

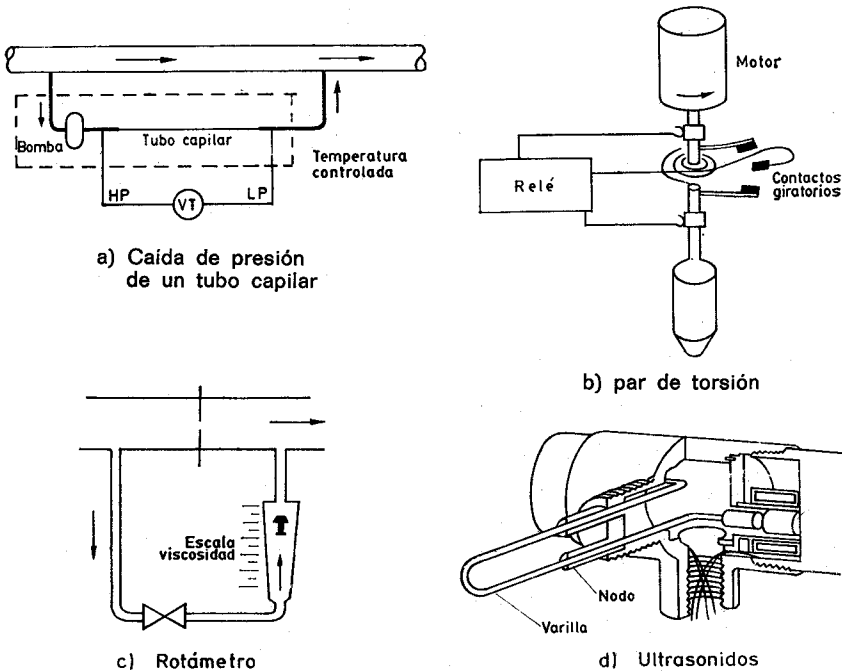


Fig. 7.34 Viscosímetros continuos.

tubo capilar se conectan a un transmisor de presión diferencial neumático o electrónico.

2. Par de torsión necesario para hacer girar un elemento en el fluido. El elemento de forma dada gira a través de un resorte calibrado por medio de un motor síncrono. El ángulo de desviación en el movimiento entre el eje del motor y el elemento inmerso en el fluido es proporcional a la viscosidad. Este ángulo se mide en desplazamiento de contactos o en variación de resistencia o capacidad (fig. 7.34 b).
3. Rotámetro con flotador sensible a la viscosidad (fig. 7.34 c). Se mantiene un caudal constante del fluido con lo que la posición del flotador depende de la viscosidad. Al rotámetro se le puede acoplar un transmisor neumático o electrónico.
4. Vibraciones o ultrasonidos (fig. 7.34 d). Se mide la energía necesaria para excitar una probeta en vibración continua o que vibra ultrasónicamente en el seno del fluido.

7.1.5.3 Medidores de consistencia

La consistencia se mide en la industria de las formas siguientes:

Medida de la distancia que recorre el fluido sobre una regla graduada y en un tiempo determinado. En la figura 7.35 a puede verse este sistema.

Medidor de consistencia de disco rotativo (fig. 7.35 b) que mide el par de

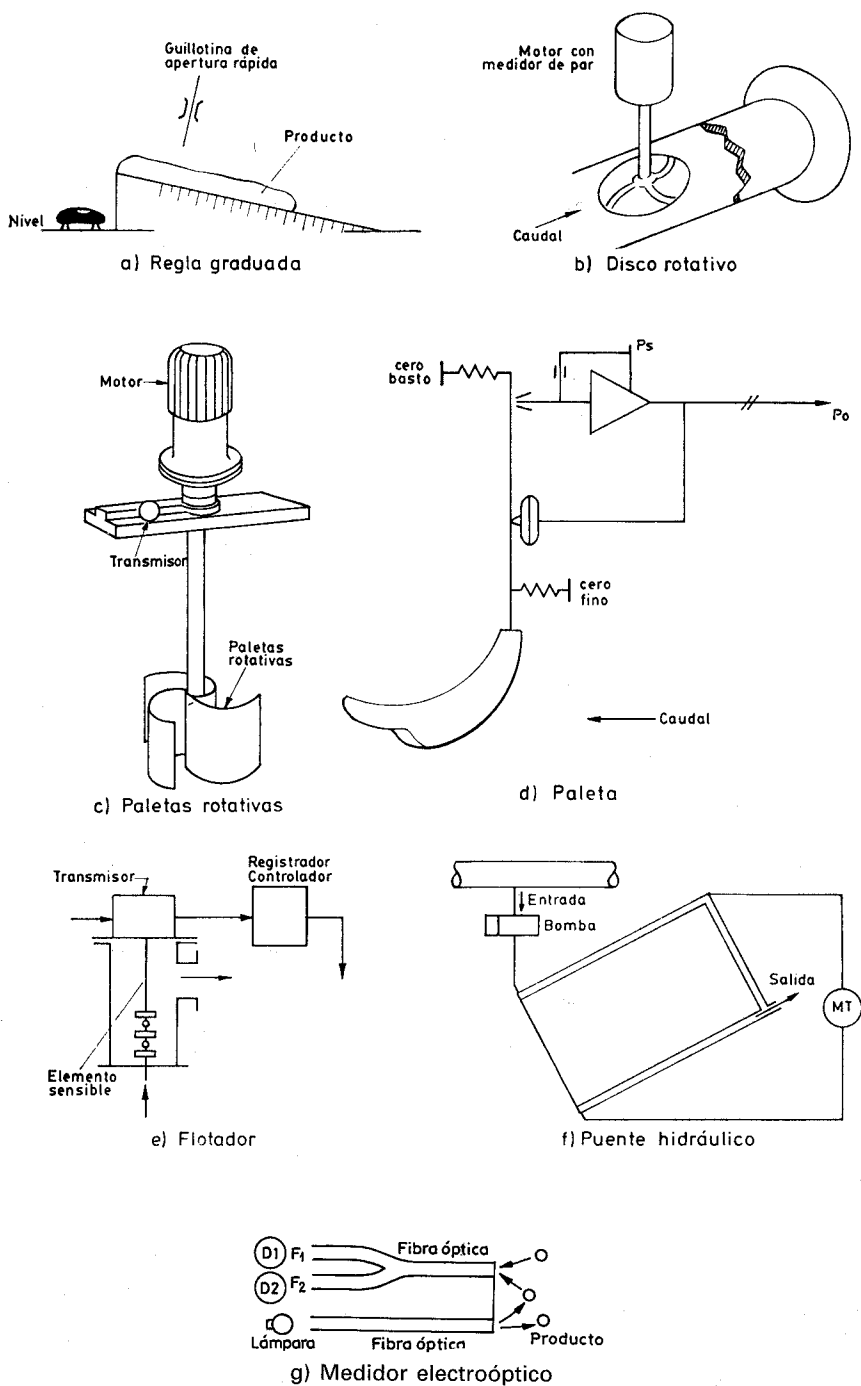


Fig. 7.35 Medidores de consistencia.

torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un disco con perfiles caracterizados dentro del fluido.

En otro instrumento parecido al anterior, apto para instalarlo en un tanque del proceso (fig. 7.35 c) un motor hace girar un agitador de paletas dentro del fluido. El par desarrollado por el agitador se mide con un transmisor neumático de par que permite actuar sobre un controlador y regular así directamente la consistencia del producto.

En el medidor de paleta (fig. 7.35 d), una paleta de forma especial situada en el seno del fluido mide el esfuerzo cortante, no siendo influida por las fuerzas de impacto ni por las de rozamiento gracias a su forma geométrica. Un transmisor neumático o electrónico envía la señal correspondiente al valor de la consistencia.

En el medidor de flotador que puede verse en la figura 7.35 e el fluido es forzado a circular por un tubo en cuyo interior se encuentra un eje sensible con varias placas transversales incorporadas. La deformación que sufre el líquido al pasar entre las placas es función de la consistencia, y la fuerza resultante que experimenta el elemento sensible es detectada por un transmisor neumático o electrónico.

El medidor de puente hidráulico (fig. 7.35 f) consiste en una bomba que deriva parte del fluido a través de un paralelogramo o puente hidráulico que crea una presión diferencial entre dos de sus vértices. Un transmisor de esta presión diferencial señalará directamente la consistencia del producto.

El medidor electroóptico (fig. 7.35 g) se basa en la captación de la luz reflejada de una mezcla de pulpa de papel y agua. Dos detectores D_1 y D_2 captan esta luz reflejada a través de fibra óptica y de dos filtros F_1 y F_2 , de tal modo que en uno de ellos el agua del fluido absorbe la luz mientras que en el otro no interviene prácticamente. Así, el cociente de las dos señales es una función de la cantidad de agua existente entre las partículas del producto, es decir, de la consistencia de la pulpa.

7.1.5.4 Tabla comparativa

En la tabla 7.4 se encuentra un resumen de características de los instrumentos medidores de viscosidad y consistencia.

7.1.6 Llama

La detección de la llama en la industria es muy importante desde el punto de vista de seguridad. Los quemadores de gas o fuel-oil utilizados en los hornos o en las calderas de vapor, necesitan para que su funcionamiento sea correcto que la llama producida por el combustible sea estable y de calidad y que se mantenga en estas condiciones mientras el quemador esté en marcha. Ante un fallo en la llama, el sistema de protección debe actuar inmediatamente excitando el circuito eléctrico de enclavamiento previsto en la instalación para que el conjunto «caiga» en seguridad, y evite la entrada de combustible sin quemar eliminando así el peligro de su eventual encendido y explosión subsiguiente.

Tabla 7.4 Medidores de viscosidad y consistencia

	<i>Sistema</i>	<i>Precisión</i>	<i>Campo de medida</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Aplicaciones</i>
VISCOSIDAD	Tiempo de descarga	$\pm 0,1 \%$	Hasta 20.000 cp		Discontinuo	Pinturas y barnices Laboratorio
	Tiempo de caída de una bola o de ascensión de una burbuja	Alta	Hasta 200.000 cp		»	Aceites de alta viscosidad Laboratorio
	Tiempo de caída de un pistón	$\pm 1 \%$	0,2-200.000 cp	Repetibilidad	»	Pinturas, aceites, jabones, plásticos
	Par de resistencia en una taza		Amplio		»	General
	Presión diferencial en un tubo capilar	$\pm 2 \%$	Hasta 3000 cp	Continuo, solución directa a ecuación Hagen-Poiseuille Transmisión		
	Par de torsión de un elemento	$\pm 1 \%$	Hasta 300.000 cp	Continuo Transmisión Tanques abiertos o cerrados		General
	Rotámetro con flotador sensible	$\pm 2 \text{ a } \pm 4 \%$	3-30.000 cp	Continuo		Fuel-oil
CONSISTENCIA	Ultrasonidos	—	Amplio hasta 50.000 cp	Continuo Compensación temperatura		General
	Distancia de recorrido en una pendiente	0,1 %	Amplio		Discontinuo	Industria alimenticia Laboratorio
	Disco rotativo	$\pm 1 \%$	»	Neumático		Industria papelera
	Paletas rotativas	»	»	Continuo		»
	Paleta	»	»	»		»
	Flotador	$\pm 0,1 \%$	0,5-8 %	»		»
	Puente hidráulico	$\pm 1 \%$	Amplio	»		Productos alimenticios y papel
	Electroóptico	$\pm 0,1 \%$	0,2-6 %	»		Papel

Los detectores de llama aprovechan varias características de la llama para su funcionamiento: calor, ionización y radiación.

7.1.6.1 Detector de calor

El *calor* lo utilizan los detectores térmicos formados por bimetales, termopares, varillas de dilatación y dispositivos a expansión de líquidos que proporcionan un control relativamente satisfactorio en instalaciones domésticas.

7.1.6.2 Detectores de ionización-rectificación

La *ionización* es el fundamento de los detectores de llama de rectificación. Una tensión alterna aplicada a dos electrodos colocados dentro de la llama hace cir-

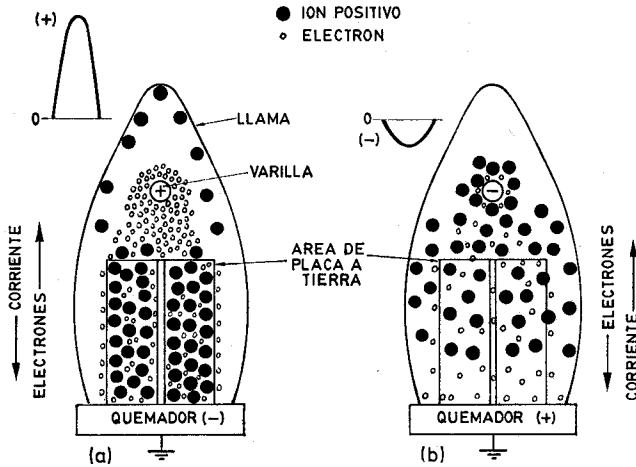


Fig. 7.36 Detector de llama por electrodos de rectificaci3n.

cular una peque1a corriente alterna ya que los gases en la llama est3n ionizados. La resistencia de la llama es bastante alta, del orden de 250 000 a 150 000 000 ohmios y la corriente que pasa es de unos pocos microamperios. Estos detectores de conductividad tienen el inconveniente de que un cortocircuito de alta resistencia entre los electrodos simula la llama.

Los detectores de llama de rectificaci3n (fig. 7.36) se basan en que al aplicar una tensi3n alterna a los electrodos (varilla y quemador) la corriente circula con mayor facilidad en un sentido que otro si la superficie activa de uno de los electrodos — superficie expuesta a la llama — es varias veces mayor que la del otro electrodo (4 : 1). De este modo se obtiene una corriente alterna rectificada, parecida a una corriente continua pulsante, con lo cual si se presenta un cortocircuito de alta resistencia en los electrodos se genera una se1al alterna que es detectada como falsa por el circuito electr3nico. Tienen el inconveniente de que no pueden usarse satisfactoriamente en quemadores de fuel-oil ya que la llama del fuel quema en despegue del inyector del quemador y adem3s se forman sedimentos e incluso corrosiones en la varilla por la combusti3n de fuel-oil.

7.1.6.3 Detectores de radiaci3n

Los detectores basados en la *radiaci3n* se fundan en la radiaci3n de energ3a que una llama irradia en forma de ondas que producen luz y calor. En el gr3fico de la figura 7.37 pueden verse las radiaciones visible (10 % de la total) infrarrojos (90 % de la total) y ultravioleta (1 % de la total), as3 como las propias de la llama de fuel-oil, de gas y del refractario.

Los detectores disponibles pueden clasificarse como sigue:

- Los detectores de radiaci3n *visible* son de dos tipos: sulfuro de cadmio y 3xido de cesio. El primero (fig. 7.38), que es el m3s utilizado, consiste en un ele-

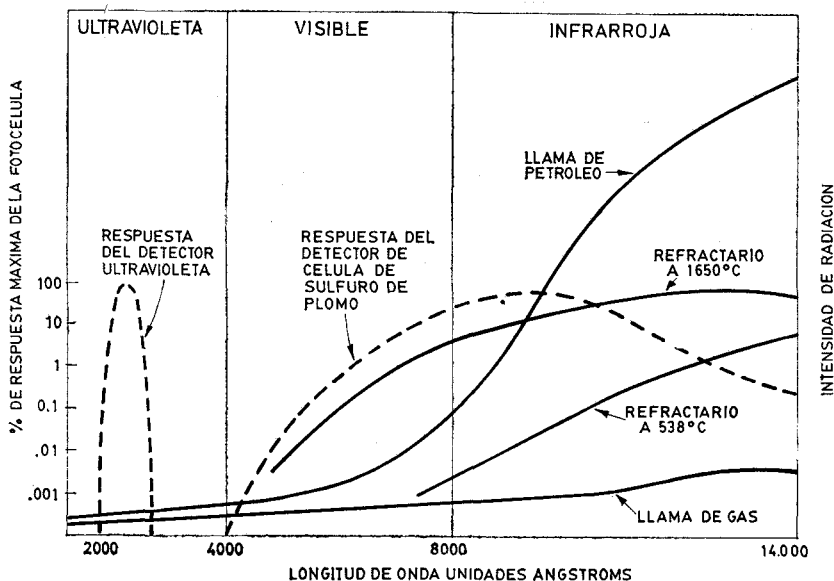


Fig. 7.37 Gráfico de radiación de la llama.

mento de sulfuro de cadmio que varía su resistencia de forma inversamente proporcional a la intensidad luminosa, mientras que el segundo consiste en un tubo de vacío que contiene un cátodo y ánodo emitiendo aquél electrones cuando la luz incide sobre su superficie. La aplicación de estos detectores requiere una llama luminosa quedando su uso limitado a quemadores de combustibles líquidos. Son incapaces de diferenciar la luz procedente de una llama de la de otras fuentes (luz natural, refractario, etc.).

- b) Los detectores de radiación *infrarroja* emplean la célula de sulfuro de plomo (fig. 7.39) cuya resistencia eléctrica decrece al aumentar la intensidad de radiación. La célula de sulfuro de plomo no distingue entre la radiación infrarroja

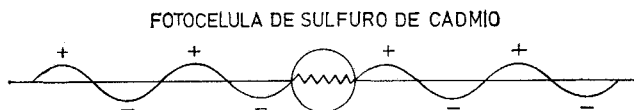


Fig. 7.38 Fotocélula de sulfuro de cadmio.

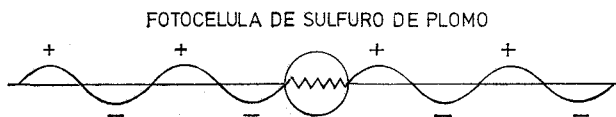


Fig. 7.39 Fotocélula de sulfuro de plomo.

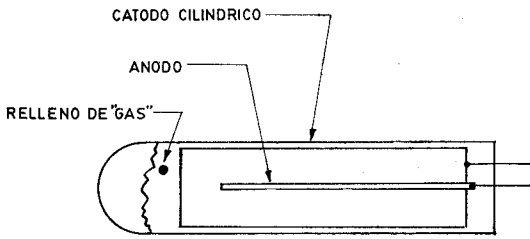


Fig. 7.40 Detector de radiación ultravioleta.

emitida por el refractario o por la llama. Sin embargo, la emisión de energía radiante de la llama tiene una característica parpadeante que permite a un circuito electrónico especialmente concebido, discriminar entre la señal de llama y la señal uniforme del refractario. No obstante, el movimiento de los gases calientes frente al refractario puede simular este parpadeo, excitando a la célula.

- c) Los detectores de radiación *ultravioleta* (fig. 7.40) consisten en un tubo que contiene dos electrodos, normalmente de tungsteno. El tubo es de material permeable a la radiación ultravioleta, cuarzo por ejemplo y está lleno de un gas inerte. El funcionamiento es similar al de un tubo Geiger.

Si una radiación ultravioleta penetra en el tubo e incide sobre el cátodo éste emite electrones que son atraídos por el ánodo a causa del campo eléctrico establecido entre ambos. Este proceso ioniza el gas en el tubo con lo que éste conduce una corriente.

Para asegurar una verificación constante de la presencia de llama, es preciso interrumpir periódicamente la tensión entre cátodo y ánodo, con el fin de que se establezca la conductividad del tubo un número de veces por segundo, dado que dicho tubo presenta, una vez excitado, una descarga automantenida en tanto que exista un campo eléctrico entre los electrodos.

La ventaja principal de los detectores de radiación ultravioleta es su total insensibilidad a las radiaciones infrarroja y visible no siendo afectados por este motivo, por las radiaciones del refractario caliente. Dado que ambas llamas de gas y de fuel-oil generan radiaciones ultravioletas, estos detectores son idóneos para instalaciones mixtas.

7.1.6.4 Tabla comparativa de detectores

En la tabla 7.5 se indica una comparación de los sistemas de seguridad de llama.

7.1.6.5 Programadores

Los detectores descritos están conectados a programadores que pueden abarcar desde la simple alarma de fallo de llama hasta una programación completa de puesta en marcha y paro de la instalación incluyendo las fases de prepurga (para limpiar totalmente la cámara de combustión antes de cada encendido) supervisión de llama piloto y principal, pospurga, interruptores de enclavamiento para fallos

TABLA 7.5 Características comparativas de los detectores de llama

<i>Detección de llama</i>		<i>Rectificación</i>	<i>Infrarrojo</i>	<i>Radiación visible</i>	<i>Ultravioleta</i>
<i>Tipo de detector</i>		<i>Electrodo de rectificación</i>	<i>Fotocélula de sulfuro de plomo</i>	<i>Fotocélula de sulfuro de cadmio</i>	<i>Tubo detector ultravioleta</i>
↑ VENTAJAS ↓	Igual detector para llama de gas o fuel-oil		X		X
	Capaz de enfocar un punto de la llama	X			
	Capaz de enfocar un plano de la llama		X	X	X
	No influido por el refractario caliente	X			X
	Autocomprobación antes de cada arranque	X	X	X	X
↑ INCONVENIENTES ↓	Dificultad en apuntar a la llama		X		
	Deterioro rápido del electrodo a altas temperaturas	X			
	Insensible a la llama de gas con alta concentración de aire		X	X	
	Corriente gases calientes en refractario puede simular la llama		X		
	Refractario caliente puede simular la llama			X	
	Ignición eléctrica puede simular la llama				X

en la presión de vapor de atomización, presión de aire de control, alimentación eléctrica, nivel bajo en la caldera, ventilador de aire forzado, etc. (fig. 7.41).

El sistema detector-programador debe ser capaz de detectar la llama en un tiempo lo más breve posible. Como ejemplo señalemos que en los detectores de llama de tipo térmico el tiempo de respuesta es del orden de 1 a 3 minutos. En un quemador de gas de una potencia de 600 000 kcal/h con un consumo aproximado de 60 m³/h de gas natural y ante un fallo de llama el detector térmico necesitaría 1 minuto para cortar el paso de combustible y durante este tiempo habrían entrado en la cámara de combustión 1 m³ de gas y una cantidad de aire diez veces superior, totalizando 11 m³ de mezcla explosiva potencial. En cambio, un

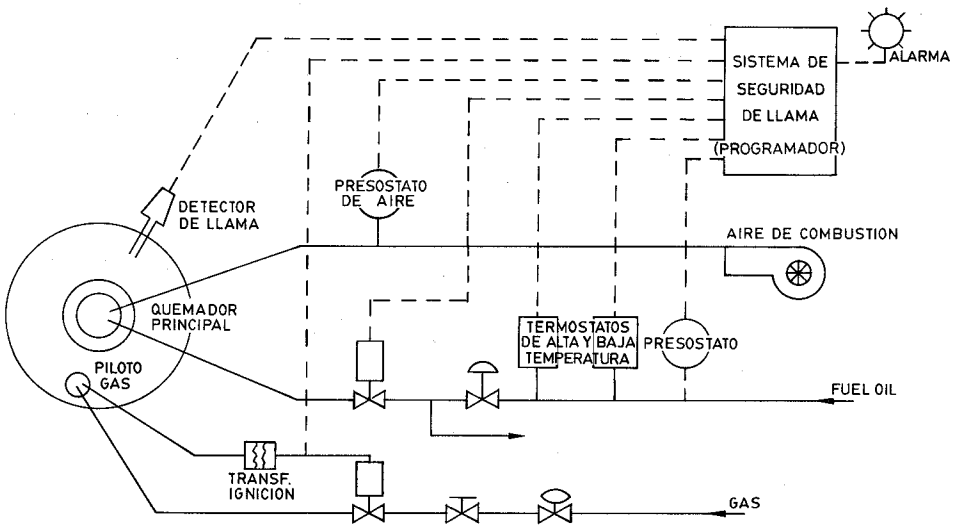


Fig. 7.41 Supervisión de llama en quemador de caldera de vapor.

sistema electrónico hubiera actuado en un tiempo aproximado de un segundo, siendo el volumen liberado, en este caso, de sólo $0,2 \text{ m}^3$.

Asimismo, el sistema debe disponer de una autocomprobación de sus componentes en cada arranque.

A primera vista parece lógico pensar que en una instalación dada pueden presentarse gran número de explosiones. De hecho no es así, dado que para que se produzca una explosión deben aparecer fallos sincronizados. Es decir, el fallo de un componente y el de la llama o de la ignición deben ocurrir dentro del mismo ciclo.

La posibilidad de que concurren estas circunstancias en un mismo ciclo es remota. Sin embargo, a medida que el número de ciclos operativos disminuye, la posibilidad de un doble fallo aumenta, ya que el tiempo entre puestas en marcha y por tanto entre verificaciones de componentes, es mayor, tal como sucede en navegación o en industrias que sólo paran un número limitado de veces al año.

En estas condiciones, la protección total se logra con una autocomprobación periódica de sus componentes durante la marcha de la caldera.

Si se presenta una simulación de fallo de llama, el dispositivo de autocomprobación impedirá el arranque del quemador o bien, si dispone de autocomprobación periódica, lo parará si estaba en marcha.

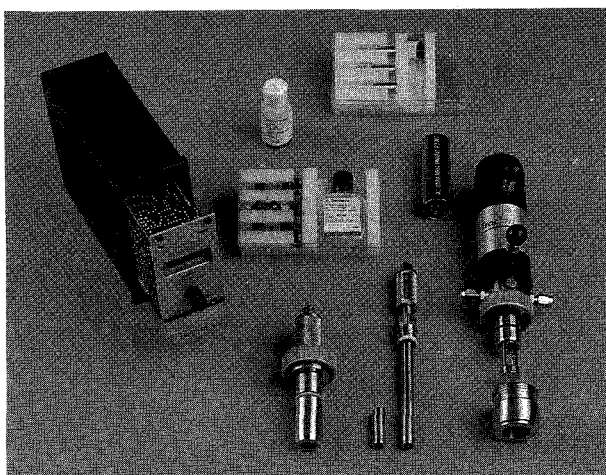
La autocomprobación periódica durante la marcha se logra con un detector ultravioleta dotado de un diafragma oscilante que dispara unas 50-90 veces por minuto de acuerdo con los impulsos emitidos por un relé en el programador. De este modo, la llama deja de ser vista por el detector y el relé de impulsos asegura la autocomprobación del circuito una vez por segundo. Cualquier defecto en los componentes electrónicos del detector y del programador da lugar a un paro de seguridad en unos 4 segundos.

Los programadores con microprocesador proporcionan una comprobación lógica continua de todo el circuito, la detección y solución de averías, la optimización de los períodos de prepurga y postpurga con el consiguiente ahorro de combustible y la secuencia automática de puesta en marcha y paro de la instalación.

7.1.7 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno libre en el agua que no se encuentra combinado ni con el hidrógeno (formando agua) ni con los sólidos existentes en el agua.

La cantidad de oxígeno disuelto es vital para la vida marina. Sin oxígeno esta



(Cortesía de Crison)

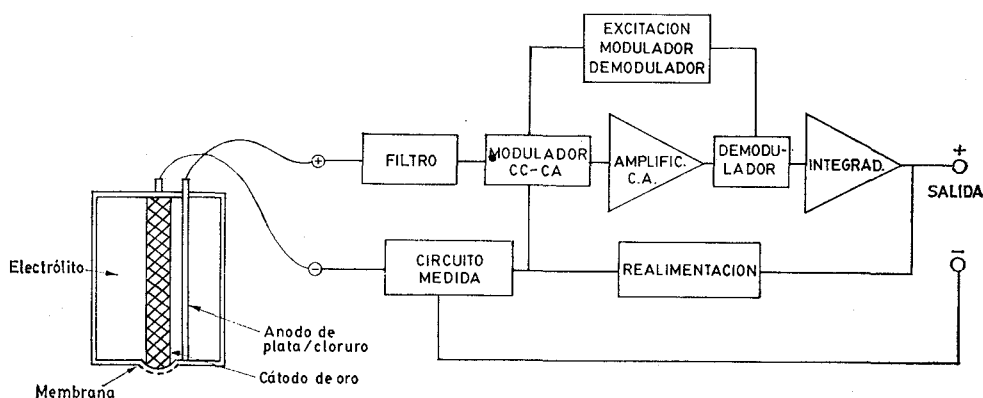
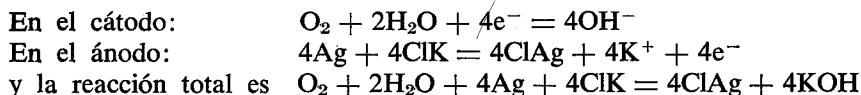


Fig. 7.42 Sensor de oxígeno disuelto.

vida muere. La determinación del oxígeno disuelto es importante en el tratamiento de aguas y en el control de aireación.

El sensor de oxígeno disuelto (fig. 7.42) es una célula polarográfica consistente en un cátodo de aleación oro-plata-platino y ánodo de plata-cloruro de plata sumergidos en un electrólito de solución de potasa y cloruro potásico en agua. Una fina membrana de teflón permeable a los gases permite la difusión del oxígeno procedente de la muestra de agua. Las reacciones químicas que tienen lugar son:



Como para cada molécula de oxígeno que se reduce entran cuatro electrones en la célula y cuatro abandonan el ánodo, se obtiene una corriente eléctrica de cátodo a ánodo que es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno que pasó a través de la membrana. La tensión óptima entre ánodo y cátodo que permite seleccionar el componente «oxígeno libre» en el agua, es de 0,8 V c.c.

La cantidad de oxígeno reducida en el cátodo, es decir, la cantidad de oxígeno que pasó, a través de la membrana depende de la presión ejercida por el oxígeno disuelto en el agua sobre la membrana, que es la presión parcial del oxígeno. La cantidad de oxígeno disuelto se mide en mg/l (miligramos de oxígeno por litro de agua), en p.p.m. (partes por millón) siendo

$$\text{p.p.m.} = \text{mg/l} \times \frac{1}{\text{densidad del agua en g/cm}^3}$$

o bien, en % de saturación (relación entre la cantidad de oxígeno disuelta en el agua y la correspondiente a la saturación).

El oxígeno disuelto viene influido por la temperatura, de aquí que es necesario incorporar al circuito termocompensadores que refieran automáticamente la medida a una temperatura estándar.

La precisión en la medida es de $\pm 1\%$ y el campo de medida suele estar entre 2 y 25 mg/l, o bien, 0-100 % saturación.

7.1.8 Turbidez

La turbidez es una medida de la falta de transparencia de una muestra de agua debida a la presencia de partículas extrañas. Estas partículas pueden ser plancton, microorganismos, barro, etc.

La medida de la turbidez se efectúa para determinar el grado de penetración de la luz en el agua o a su través y permite interpretar conjuntamente con la luz solar recibida y la cantidad de oxígeno disuelto el aumento o disminución del material suspendido en el agua.

La turbidez está expresada en unidades arbitrarias determinadas empíricamente con un turbidímetro Jackson (fig. 7.43) consistente en un tubo graduado que descansa en un soporte de vidrio en cuya parte inferior se encuentra una vela

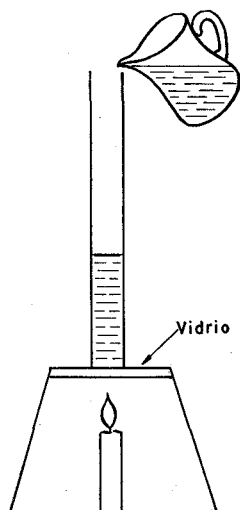


Fig. 7.43 Turbidímetro Jackson.

encendida. La muestra del agua se introduce lentamente en el tubo hasta que a su través deja de verse la llama de la vela.

La turbidez puede medirse en forma continua de dos formas:

Luz reflejada. Una lámpara incandescente emite un rayo de luz que un sistema de lentes enfoca en la muestra de agua. Una célula fotoeléctrica capta la luz reflejada por las partículas en suspensión generando una corriente proporcional a la concentración de sólidos suspendidos.

Luz absorbida. La lámpara y la célula están situadas una enfrente de la otra, con una columna de la muestra de agua que las separa. La célula mide la absorción de la luz por los sólidos en suspensión.

La precisión en la medida es de ± 5 a ± 10 % y el campo de medida de 0-2400.

7.1.9 Intensidad de radiación solar

La intensidad de radiación solar tiene un interés particular en el tratamiento de aguas y en la determinación del rendimiento de los paneles solares.

Consiste en un detector provisto de placas blancas y negras que reflejan y absorben respectivamente la energía solar radiada. Una termopila de termopares de cobre-constantán recoge en forma de corriente continua la energía recibida por período de tiempo. La señal enviada es nominalmente del orden de 10 mV/caloría/cm²/minuto, el campo de medida está entre 0-3 calorías/cm²/minuto y la linealidad ± 1 %.

7.2 Variables químicas

7.2.1 Conductividad

La conductividad es la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica. El agua destilada pura no conduce en principio la corriente pero, si se le disuelven sólidos minerales aumenta su capacidad de conducción. Estos sólidos al disolverse se separan en iones positivos y negativos en equilibrio con el cuerpo.

Los iones son susceptibles de desplazarse bajo la acción de un campo eléctrico y también de combinarse con otros iones para formar iones nuevos o cuerpos distintos que ya no se ionizarán. La conductividad de los iones es función de su concentración y de su movilidad de tal modo que dos electrodos a tensión sumergidos en un líquido, en el que existe una sal en solución, por ejemplo ClNa , producirán el fenómeno siguiente:

Los iones positivos Na^+ emigrarán al electrodo cargado negativamente, mientras que los iones negativos Cl^- serán atraídos por el electrodo positivo. Al llegar a los electrodos, los iones adquieren cargas de signo contrario y se neutralizan. De este modo se establece una corriente a través de la solución y del circuito eléctrico exterior que depende de:

1. Número y tipo de iones presentes en la solución.
2. Área efectiva de los electrodos.
3. Diferencia de potencial y distancia entre los electrodos.
4. Temperatura de la solución.

Luego, si en una solución de un producto químico dado se mantienen constantes los puntos 2, 3 y 4, la conductividad de la solución dependerá únicamente del número de iones en la solución y si el producto está disociado totalmente será una medida directa de la concentración del mismo en la solución.

La *conductividad eléctrica específica* se define como el recíproco de la resistencia en ohmios, medida entre dos caras opuestas de un cubo de 1 cm de lado sumergido en la solución. La unidad es el mho o siemens (recíproco de ohmio) que es la conductancia de una solución que con una diferencia de potencial de un voltio entre las caras de los electrodos da lugar a la circulación de un amperio. Como esta unidad es demasiado grande se emplea a menudo en soluciones diluidas el micro-mho (μmho) que es la millonésima parte de un mho.

En la tabla 7.6 se indican los valores de conductividad de varios tipos de soluciones.

Es obvio que a partir de esta definición de conductividad, el primer sistema de medida que se empleó fue situar en la solución dos placas paralelas conectadas a un circuito de puente de Wheatstone de corriente alterna, tal como puede verse en la figura 7.44. El sistema tiene el inconveniente de que la acumulación gradual de suciedad en los electrodos falsea la medida.

Uno de los métodos para compensar los efectos eléctricos de acumulación de suciedad en los electrodos puede verse en la figura 7.45.

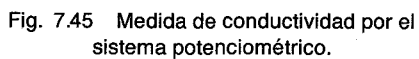
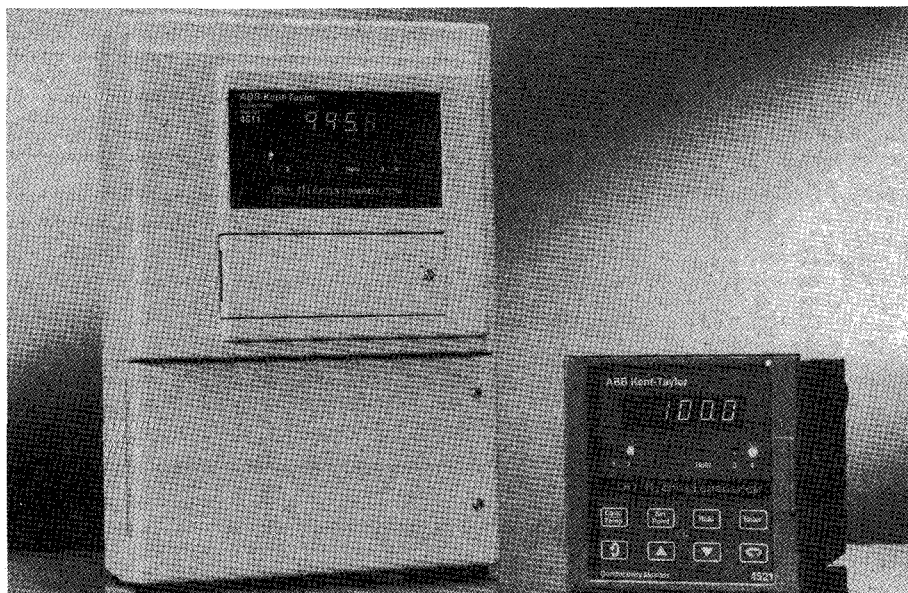


TABLA 7.6 Valores de conductividad de soluciones dadas

Resistencia específica Ohmios/cm	100 MEG	10 MEG	1000 k	100 k	10 k	1000	100	10	1
Conductividad específica Micromhos/cm	0,01	0,1	1	10	100	1000	10 k	100 k	1000 k
	Agua ultrapura		Agua destilada		Agua	0,05 % NaCl		Agua de mar	
									30 % H ₂ SO ₄

k = 1000
MEG = 1 millón

En el esquema se aprecia que si se mantiene constante la diferencia de potencial V_0 entre los electrodos 2 y 3 con independencia de la resistencia de la solución, la corriente I_c mantendrá una relación lineal con la conductividad de la solución.



(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)

Fig. 7.45 (Continuación)

En efecto:
$$V_o = I_c R_2 = I_c \frac{1}{G}$$

o sea
$$G = \frac{I_c}{V_o}$$

y como V_o es constante resulta $G = K \cdot I_c$

siendo
$$K = \frac{1}{V_o}$$

Por consiguiente, si el circuito mantiene una diferencia de potencial V_o constante entre dos electrodos, independientemente de los depósitos de sólidos que se vayan acumulando, la medida será proporcional a I_c con la constante de proporcionalidad igual a la inversa de V_o . El circuito de la figura 7.45 satisface estos requerimientos: V_o se compara con la tensión de referencia VR_1 y si hay diferencia, ésta es amplificada por el servoamplificador que excita un motor de equilibrio que mueve a su vez el brazo móvil del reóstato, hasta que el nuevo valor de I_c hace que el producto $I_c R_2 = V_o$ sea igual a VR_1 . El circuito es pues un circuito potenciómetro autoequilibrado en corriente alterna. Al trabajar en corriente alterna se logra que la alimentación a los electrodos y al circuito de medida estén en fase al estar conectados al mismo transformador.

El empleo de la corriente alterna en la medida de la conductividad permite

TABLA 7.7 Valores de pH de varias soluciones

	pH	Concentración H ⁺ Mols/litro	Concentración OH ⁻ Mols/litro	pH de productos alimenticios comunes	pH de varios productos químicos a 25° C
Acido	0	1	0,00000000000001		0 ← Ácido sulfúrico 4,9 % (1 N)
	1	0,1	0,00000000000001		1 ← Ácido hidroclicórico 0,37 % (0,1 N)
	2	0,01	0,00000000000001	Jugo limón →	2
	3	0,001	0,00000000000001	Jugo naranja →	3 ← Ácido acético 0,6 % (0,1 N)
	4	0,0001	0,00000000000001	Cerveza →	4
	5	0,00001	0,00000000000001	Queso →	5 ← Ácido hidroclicórico 0,27 % (0,1 N)
Neutro →	6	0,000001	0,0000000001	Leche →	6
	7	0,0000001	0,00000001	Agua pura →	7
	8	0,00000001	0,0000001	Huevos blancos →	8
	9	0,000000001	0,000001	Bórax →	9 ← Bicarbonato sódico 0,84 % (0,1 N)
Básico	10	0,0000000001	0,0001	Magnesia →	10 ← Acetato de potasio 0,98 % (0,1 N)
	11	0,00000000001	0,001		11 ← Amoníaco 0,017 % (0,01 N) Amoníaco 1,7 % (1,0 N)
	12	0,000000000001	0,01		12 ← Sosa cáustica 0,04 % (0,01 N)
	13	0,00000000000001	0,1		13
	14	0,000000000000001	1		14 ← Sosa cáustica 4 % (1,0 N)

equilibrar en parte el fenómeno de polarización de los electrodos. Este fenómeno se produce en corriente continua cuando los iones llegan a estar muy concentrados alrededor de un electrodo y su carga equivale a la de éstos; al ion le es difícil alcanzar el electrodo ya que el potencial neto que queda es muy pequeño para atraer iones adicionales.

La medida de la conductividad requiere la compensación de la temperatura de la solución con relación a la temperatura estándar escogida de 25° C. Esta compensación suele ser automática y uno de los sistemas puede verse en la figura 7.45 consistiendo en un termistor y una resistencia R_n .

La precisión en la medida es de $\pm 0,5 \%$ y el campo de medida llega a un máximo de 0-150 000 μmhos .

7.2.2 pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos. Su expresión viene dada por el logaritmo de la inversa de la concentración del ion H expresada en moles por litro.

$$\text{pH} = \log \frac{1}{[\text{H}^+]}$$

Señalemos que el agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrógeno de 10^{-7} moles por litro. Luego el pH será

$$\text{pH} = \log \frac{1}{10^{-7}} = 7$$

Una disolución ácida tiene mayor concentración de ion hidrógeno que el agua pura y por lo tanto su pH será menor de 7. Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas del pH se encuentran entre los valores 0 a 14. En la tabla 7.7 figuran las concentraciones de varios tipos de soluciones con su pH correspondiente.

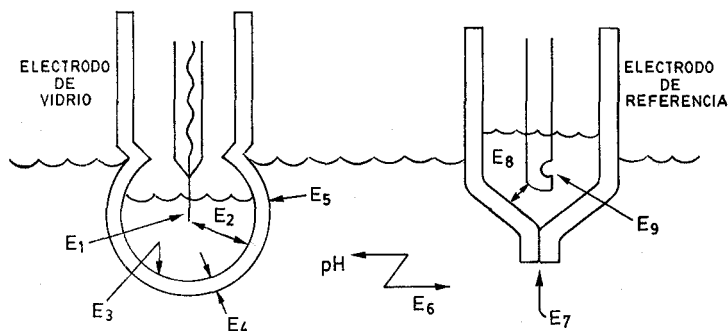
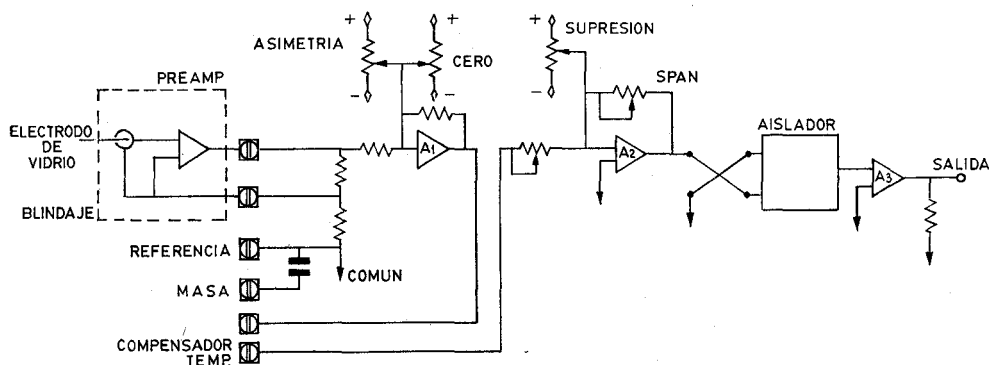
En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales los más exactos y versátiles de aplicación industrial son: el sistema de electrodo de vidrio y el de transistor (ISFET-Ion Sensitive Field Effect Transistor).

El electrodo de vidrio consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno del pH.

En la parte interna de esta membrana se encuentra una solución de cloruro tampón de pH constante dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata.

Aunque el mecanismo que permite que el electrodo de vidrio mida la concentración de ion hidrógeno no es exactamente conocido, está establecido que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial relacionado directamente con la concentración del ion hidrógeno del líquido. Es decir, si esta concentración es mayor que la interior del electrodo existe un potencial positivo a través de la punta del electrodo y si es inferior, el potencial es negativo.

Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54,2 mV a 0° C a 74 mV a 100° C por unidad de pH. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es necesario disponer en la solución de un segundo elemento o electrodo de referencia. Éste, aparte de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del



(Cortesía de Crison)

Fig. 7.46 Electrodo y potenciales en la medida del pH.

electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrólito de cloruro de potasio. Este electrólito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que por lo tanto proporciona una referencia estable de potencial.

En la figura 7.46 puede verse la disposición interna de los electrodos y los potenciales que miden.

Los potenciales existentes son los siguientes:

- E_1 : Potencial entre el electrodo metálico interior y la solución tampón que puede considerarse constante para una temperatura dada. Las temperaturas extremadamente altas pueden dar lugar a la disolución del revestimiento de cloruro de plata del electrodo.
- E_2 : Caída de potencial entre el electrodo interior y la cara interna de la membrana de cristal que puede considerarse despreciable.
- E_3 : Potencial entre solución tampón y superficie de la membrana de cristal que es constante gracias a la estabilidad de la solución tampón y de la membrana de cristal.
- E_4 : Caída de potencial a través de la membrana que se mantiene constante en cortos períodos mientras la membrana de cristal no sufra alteraciones de origen químico o mecánico. Si este potencial deriva, se calibra con una solución tampón de pH conocido.
- E_5 : Potencial entre superficie exterior de la membrana de cristal y la solución ensayada que varía con la concentración de iones hidrógeno (pH) de la solución ensayada.
- E_6 : Caída de potencial a través de la solución ensayada que se considera despreciable, salvo si se trata de agua poco conductora o de soluciones no acuosas.
- E_7 : Representa el potencial de la unión líquida entre la solución ensayada y la de referencia. Su valor es despreciable, aunque un atascamiento o un exceso de presión externa contra la unión puede influir en la medición.
- E_8 : La caída de potencial dentro del electrodo de referencia es despreciable.
- E_9 : Potencial de contacto entre el electrodo de referencia y la solución de ClK que puede considerarse constante si dicha solución no está contaminada.

La ecuación de Nernst da la f.e.m. E_5 , desarrollada en el electrodo de referencia

$$E = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{H}^+] \text{ exterior al electrodo}}{[\text{H}^+] \text{ interior en el electrodo}} = -\frac{RT}{F} \text{pH}$$

en la que:

- E = Potencial
- R = Constante de los gases perfectos
- F = Número de Faraday
- T = Temperatura absoluta
- $[\text{H}^+]$ = Concentración de iones hidrógeno

La medida del pH con el electrodo de vidrio se reduce a medir un potencial resultante entre los electrodos de E_1 - E_9 con una resistencia interna considerable. En la medida pueden presentarse algunas dificultades. Las más comunes son:

- a) Recubrimiento o abrasión de la membrana del electrodo de vidrio (influye en el potencial E_4 y/o en el E_5).
- b) Soluciones no acuosas o de alta resistencia (influye en E_6 y E_5).
- c) Taponamiento o fallo mecánico de la unión del líquido en el electrodo de referencia (influye en E_7) que impide el paso de ClK , quedando el circuito abierto. Si el taponamiento es parcial se desarrolla un potencial indeterminado.
- d) Entrada de la solución de ensayo dentro de la solución interna del electrodo de referencia (influye en E_8 y de modo más importante en E_9) con lo que se destruye el potencial constante deseado.
- e) Variación con el tiempo del potencial de asimetría que depende de la naturaleza del vidrio, del tipo de fabricación, de las impurezas, de la disolución gradual del vidrio en la solución, del desgaste por erosión de la punta del vidrio, etcétera. Este potencial sólo es de unos pocos mV, pero se mantiene constante aunque existan las mismas soluciones a ambos lados del electrodo de vidrio.

Los instrumentos de pH disponen de un ajuste para corregir este potencial.

La variación de temperatura influye en la medida del pH. A pH constante alcanza los 0,2 milivoltios por grado centígrado. En la figura 7.47 puede verse esta influencia. Como en el instrumento final de indicación o registro o control, la medida se realiza en unidades de pH en lugar de mV, es necesario compensar la influencia de las variaciones de temperatura de la solución de ensayo (véase la fórmula

$E = -\frac{RT}{F} \text{ pH}$). Hay que señalar que el termocompensador o sonda de resistencia compensa sólo la relación tensión-temperatura del electrodo de vidrio y que sólo asegura la medida del pH real de la solución a su temperatura real. No detecta las variaciones con la temperatura propias del pH de cada solución, que siguen una ley distinta de una solución a la otra y para las cuales habría que diseñar un compensador especial para cada una de ellas.

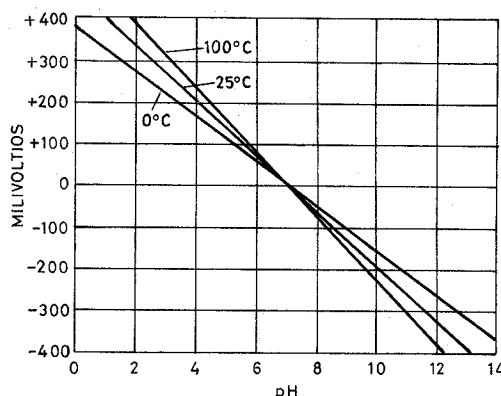
Así, pues, la medida del pH es sólo válida a la temperatura a que se encuentra la solución.

Aunque la variación de señal en mV por unidad de pH es relativamente grande (58,2 mV/pH a 20 °C), la alta resistencia del circuito de los electrodos aconseja utilizar un amplificador de pH que por las características del circuito debe poseer una alta impedancia de entrada, un bajo nivel de ruido para disminuir los errores, y opcionalmente un aislamiento de señal entre la entrada y la salida para eliminar los bucles de masa ya que la unión de referencia está al potencial de masa. El registro o el control del pH una vez amplificada la señal se realiza en un instrumento potenciométrico.

En la medición del pH puede presentarse el recubrimiento de los electrodos, en cuyo caso el electrodo se comporta como si apreciara bajas concentraciones de ion H^+ y, por tanto, el instrumento registrador leería altos valores de pH. En estos casos es, pues, necesario limpiar periódicamente el electrodo con una frecuencia que la experiencia determina en cada caso. Existen métodos automáticos de

$^{\circ}\text{C}$	mV/pH
0	54,2
15	57,2
20	58,2
25	59,2
30	60,2
35	61,1
50	64,1

Fig. 7.47 Relación mV-pH en función de la temperatura.



limpieza (ultrasonidos, chorro de limpieza, cepillos mecánicos) que todavía no han dado un resultado completamente satisfactorio y dispositivos de extracción manual o automática que permiten la extracción y limpieza del electrodo sin interrumpir el servicio.

El electrodo de transistor ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) es prácticamente irrompible, de estado sólido y proporciona una respuesta muy rápida. El sensor posee una señal de pH de baja impedancia, lo que le da una gran fiabilidad, y tiene una larga duración, funcionando en los líquidos más sucios y con más impurezas. Incorpora un electrodo de referencia recambiable.

Los instrumentos de pH tienen una precisión de $\pm 0,25$ a ± 1 %, o bien, $\pm 0,03$ pH.

El microprocesador aporta «inteligencia» al transmisor de pH, proporcionando insensibilidad a vibraciones, compensación automática de temperatura, autodiagnóstico y una precisión de $\pm 0,1$ %.

7.2.3 Redox (potencial de oxidación-reducción)

El potencial de oxidación-reducción de materiales disueltos en agua se mide con un metal noble y un electrodo de referencia y es una medida de su potencial electrónico de equilibrio y de su capacidad relativa para reaccionar con otros materiales oxidantes o reductores que pueden añadirse al agua.

Hay que señalar que en la medida del pH, el electrodo de vidrio capta los cambios en la concentración del ion hidrógeno activo mientras que en la medida del potencial de oxidación-reducción el electrodo de metal noble (normalmente es platino) es sensible a los cambios en la relación entre el agente reductor y el agente oxidante. Así, pues, el electrodo de metal noble puede denominarse «electrodo sensible a los electrones» de forma paralela al electrodo de vidrio considerado como «elemento sensible al ion hidrógeno».

El estándar cero de medida de potencial es el del electrodo de hidrógeno definido como



Este estándar se aplica en laboratorio; en la industria se utilizan principalmente dos tipos de electrodos:

1. Electrodo de plata/cloruro de plata con electrólito 4NClK de $E_0 = -0,199$ voltio.
2. Electrodo de calomel con electrólito de ClK saturado con $E_0 = -0,244$ voltio.

La medida del potencial de oxidación-reducción viene dada por la diferencia de potencial entre el electrodo de metal noble y el de referencia según la fórmula:

$$ORP = E_h - E_0 = - \frac{RT}{nF} \ln \frac{(\text{Oxid})}{(\text{Red})}$$

en la que:

E_h = potencial de oxidación relativo al electrodo de hidrógeno

E_0 = potencial de oxidación del electrodo de referencia relativo al electrodo de hidrógeno

R = constante de los gases perfectos

T = temperatura absoluta

n = número de electrones transferidos

F = carga de Faraday

(Oxid) = concentración del material en forma oxidante

(Red) = concentración del material en forma reductora.

Los instrumentos amplificadores e indicadores o registradores de Redox, utilizan la misma construcción y los mismos circuitos básicos que los instrumentos de pH. Su precisión es de $\pm 1\%$ o de ± 2 mV, alcanzando $\pm 0,1\%$ en los transmisores inteligentes de Redox.

7.2.4 Concentración de gases

En la industria interesa determinar la concentración de los gases tales como CO_2 , $CO + H_2$, O_2 u otros, bien en el análisis de humos de salida de las calderas de vapor para comprobar su combustión correcta, bien en el análisis de concentración de gases desde el punto de vista de seguridad ante una eventual explosión, etcétera.

Los analizadores se basan en general en propiedades características de los gases, tales como la conductibilidad térmica, el paramagnetismo del oxígeno y el coeficiente de absorción infrarroja.

7.2.4.1 Conductividad térmica

Un caso clásico de aplicación del principio de conductividad térmica es la determinación del contenido en dióxido de carbono de los gases de combustión de

una caldera de vapor. Esta determinación se basa en la diferente conductividad térmica de dicho gas cuando se compara en una célula con el aire u otros posibles constituyentes del gas de combustión. El gas se aspira con una bomba o con succión por entrada de agua a través de un filtro y pasa a la célula. Ésta contiene un hilo de resistencia calentado eléctricamente y mantenido a una temperatura ligeramente superior a la de las paredes. Con un buen diseño y limitando la elevación de temperaturas del hilo caliente se consigue que la transmisión de calor por convección y radiación sea despreciable y que la temperatura y, por consiguiente la resistencia del hilo central sea inversamente proporcional a la conductividad del gas que lo rodea. Las variaciones en la temperatura del gas y del instrumento se compensan en general por medio de una célula cerrada idéntica de medida de la conductividad térmica, que contiene aire de composición conocida (o bien dos células de muestra y dos células de referencia). La medida efectuada en la práctica es la diferencia de resistencia de los hilos en contacto con el aire y con el gas de combustión, respectivamente, y se realiza con un circuito de puente de Wheatstone (figura 7.48).

El sistema se utiliza básicamente para la mezcla aire-CO₂ pero también puede emplearse en otros gases. En la tabla que sigue se encuentran relacionadas algunas mezclas y los porcentajes máximos que pueden medirse.

<i>Mezcla</i>		<i>Porcentaje máximo</i>
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a/b</i>
CO ₂	- aire	0 — 5 %
O ₂	- aire	0 — 16 %
SO ₂	- aire	0 — 3 %
O ₂	- N ₂	0 — 52 %
CO ₂	- N ₂	0 — 7 %
CO ₂	- O ₂	0 — 6 %

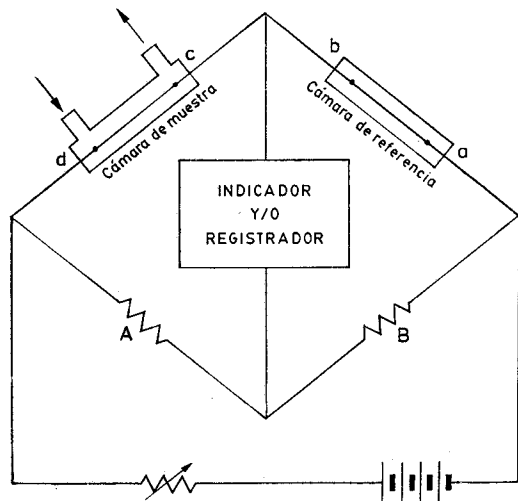


Fig. 7.48 Analizador de conductividad térmica.

Otro ejemplo de utilización de estos analizadores lo constituye la determinación del *monóxido de carbono* e *hidrógeno* en los gases de combustión de la caldera de vapor. Como estos gases son combustibles se queman con un exceso de aire y se determina el calor desprendido en un tubo provisto de un alambre calentado eléctricamente cuya resistencia varía con el aumento de la temperatura en la combustión. El alambre se conecta a una rama de un puente de Wheatstone, y las variaciones en la temperatura exterior se compensan intercalando un tubo semejante, pero cerrado en la rama opuesta. El resultado expresado en porcentaje $\text{CO} + \text{H}_2$ se convierte en señal indicada o registrada.

En otra aplicación se determina el contenido de *oxígeno* en los gases de combustión, por la variación de conductividad térmica cuando los gases se pasan sobre carbono a temperatura elevada, con lo que todo el oxígeno presente se convierte en dióxido de carbono. El instrumento es semejante al utilizado para la determinación de CO_2 con un par de células de conductividad térmica en cada rama de un puente de Wheatstone. Los gases de combustión se hacen pasar a través de un par, a continuación por un pequeño horno que contiene barras de carbono a temperatura elevada, y finalmente a través del otro par de células. Se mide el cambio en la conductividad térmica y por consiguiente el aumento en la proporción de CO_2 . El resultado puede indicarse o registrarse.

Otro aparato completo que trabaja según el principio de la conductividad térmica es el *cromatógrafo* que permite determinar los componentes de una muestra de gas en pocos minutos. Consta de una columna de separación de los componentes del gas, una toma de muestras, una cámara de temperatura controlada encerrando el detector y un registrador que marca en el gráfico los picos correspondientes a los componentes.

Se inyecta en la columna una cantidad exacta del gas a analizar y ésta absorbe en forma distinta a cada uno de los componentes de tal modo que éstos avanzan a distinta velocidad llegando uno tras otro al detector de conductividad que compara las conductividades térmicas entre el gas portador y la mezcla dando una tensión proporcional a la concentración del gas correspondiente. El área de cada pico indica la cantidad de cada componente en la mezcla y el tiempo de retención identifica la clase de componente. En la figura 7.49 puede verse el diagrama de un cromatógrafo y los componentes identificados en un ensayo.

El cromatógrafo, normalmente requiere ser instalado en una habitación con aire acondicionado y limpio.

7.2.4.2 Paramagnetismo del oxígeno

El paramagnetismo es una propiedad que poseen varios materiales, entre ellos el oxígeno; se magnetizan cuando se exponen a la acción de un campo magnético. De este modo una bola suspendida en equilibrio en un campo magnético variará de posición al pasar el gas a analizar ya que el oxígeno del gas absorberá parte de la energía magnética disponible en el campo.

Este principio se emplea en el analizador de la figura 7.50 en el que el gas circula por dos cámaras idénticas con dos pequeños calefactores. Uno de ellos está en el seno de un fuerte campo magnético con lo que el oxígeno que es para-

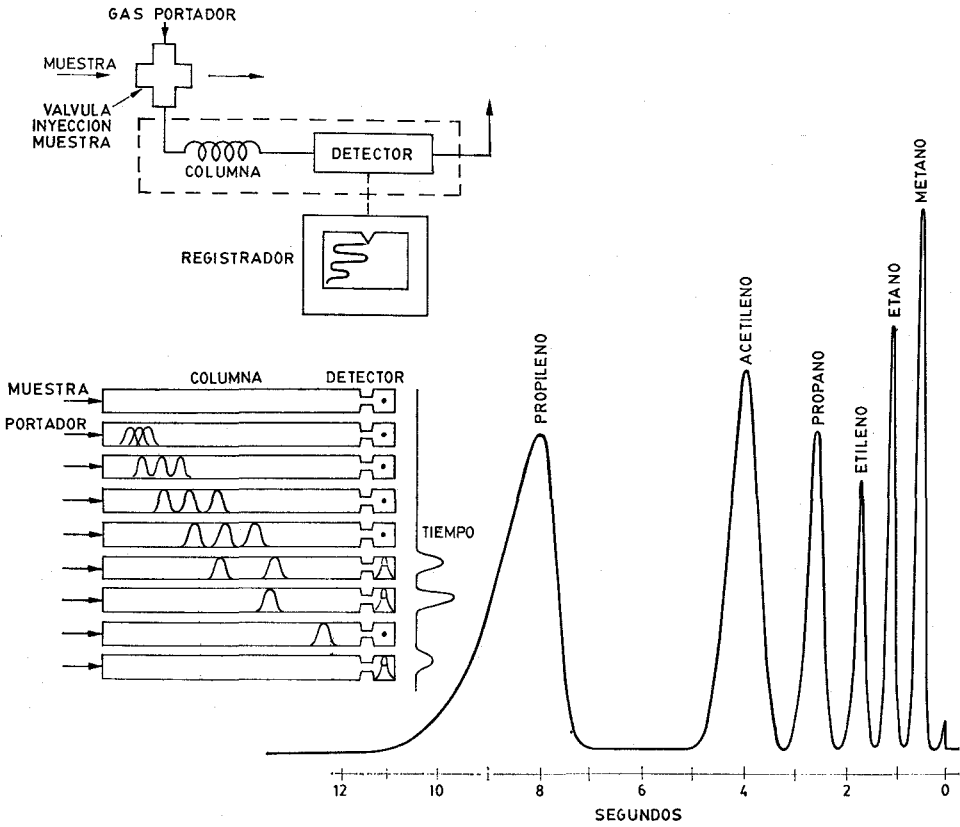


Fig. 7.49 Cromatógrafo.

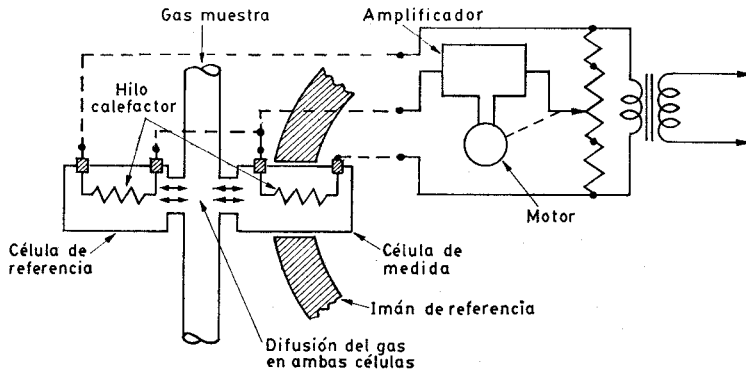


Fig. 7.50 Analizador de oxígeno paramagnético.

magnético desplaza los otros gases y el elemento calefactor se enfría más rápidamente. De este modo, las diferencias de temperatura medidas con un circuito de puente de Wheatstone son proporcionales a la susceptibilidad magnética del gas y al ser el oxígeno el único gas paramagnético presente, son también proporcionales al contenido de oxígeno.

7.2.4.3 Analizador de infrarrojos

El analizador de infrarrojos (fig. 7.51) fue estudiado ya al describir la medida del punto de rocío de los gases. La radiación infrarroja es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético, y es absorbida en cantidades distintas por varios gases. Algunos gases tales como el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, el cloro y otros elementales no absorben prácticamente radiaciones infrarrojas. Otros, sin

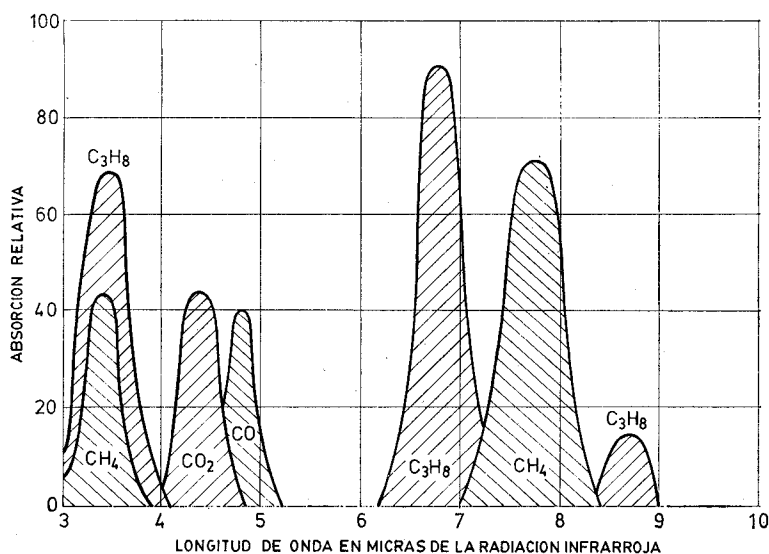
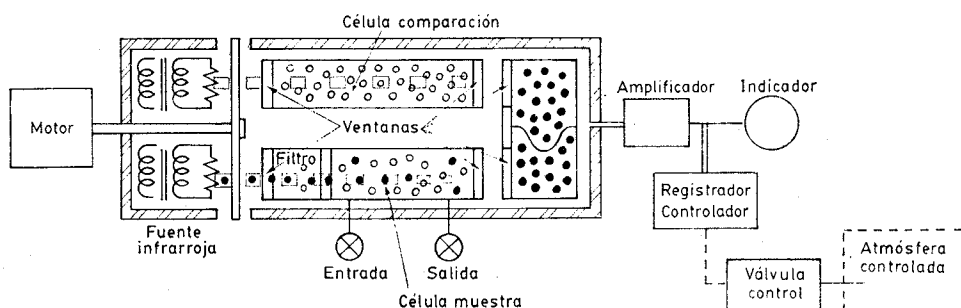


Fig. 7.51 Analizador de infrarrojos.

embargo, como el CO_2 , CO , CH_4 , C_3H_8 , SO_2 , NH_3 o vapor de agua lo absorben en cantidades detectables de acuerdo con la forma de la figura 7.51 b.

Señalemos que para preparar el analizador para un gas determinado, por ejemplo el CO_2 , se llena la célula de comparación con un gas no absorbente, por ejemplo el N_2 y la cámara detectora con CO_2 y recordemos que la radiación infrarroja es interrumpida alternativamente hacia la célula de comparación y hacia la de muestra. En estas condiciones, la radiación que pasa a través de la célula de comparación no se atenúa mientras que la que atraviesa la célula de muestra, si el gas contiene CO_2 es absorbida proporcionalmente al porcentaje de CO_2 . Ambas radiaciones inciden alternativamente en las dos cámaras del detector y varían alternativamente la presión, captándola mediante un condensador microfónico una de cuyas placas es la membrana metálica que divide las dos cámaras. La señal es amplificada, rectificada y registrada.

Este analizador se denomina selectivo o de filtraje positivo ya que absorbe energía sólo en la zona para la que está preparado. Otro tipo, denominado de filtraje negativo, filtra todas las radiaciones en la zona seleccionada antes de que alcancen el detector.

Éste consiste en dos termopilas conectadas diferencialmente y la unidad no necesita la interrupción alternativa de la radiación infrarroja.

TABLA 7.8 Analizadores de infrarrojos, componentes y campo de medida típicos

Dióxido de carbono CO_2	0-0,5 %	0-1 %	0-2 %
Monóxido de carbono CO	0-1,0 %	0-5 %	0-10 %
Metano CH_4	0-5,0 %	0-10 %	0-25 %
Amoníaco NH_3	0-0,5 %	0-1 %	0-100 %

En la tabla 7.8 figura una lista de los gases componentes que pueden analizarse con este sistema.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja ten- sión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de cali- bración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias	.....	733
Glosario	.....	741

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

8.1 Válvulas de control

8.1.1 Generalidades

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bu-

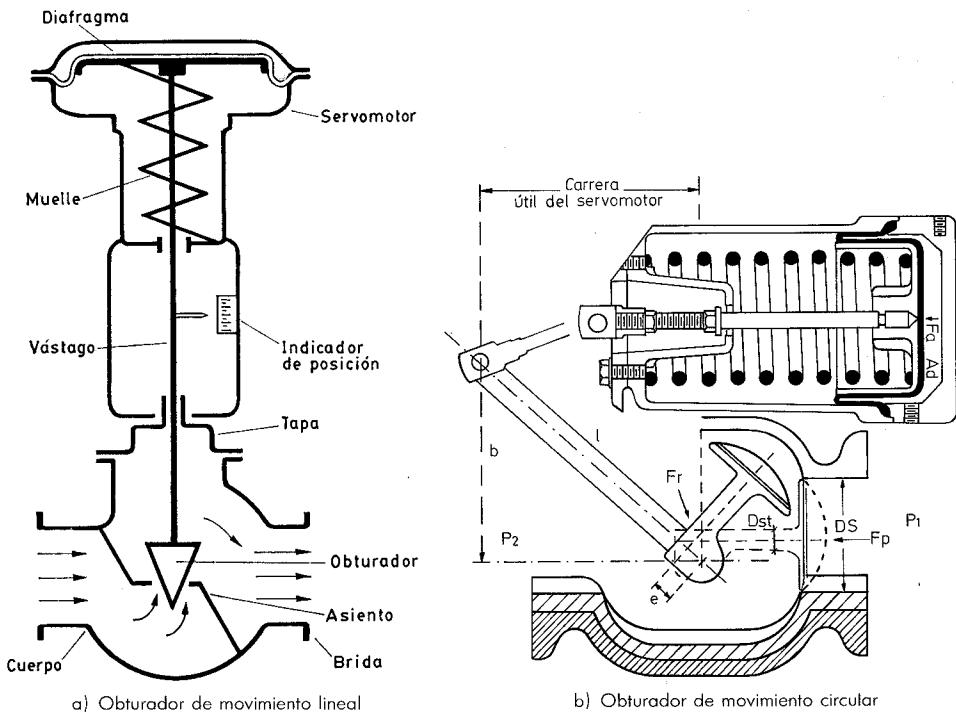


Fig. 8.1 Válvula de control representativa.

cle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. En la figura 8.1 puede verse una válvula de control típica. Se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

8.1.2 Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

Las válvulas de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

8.1.2.1 Válvula de globo

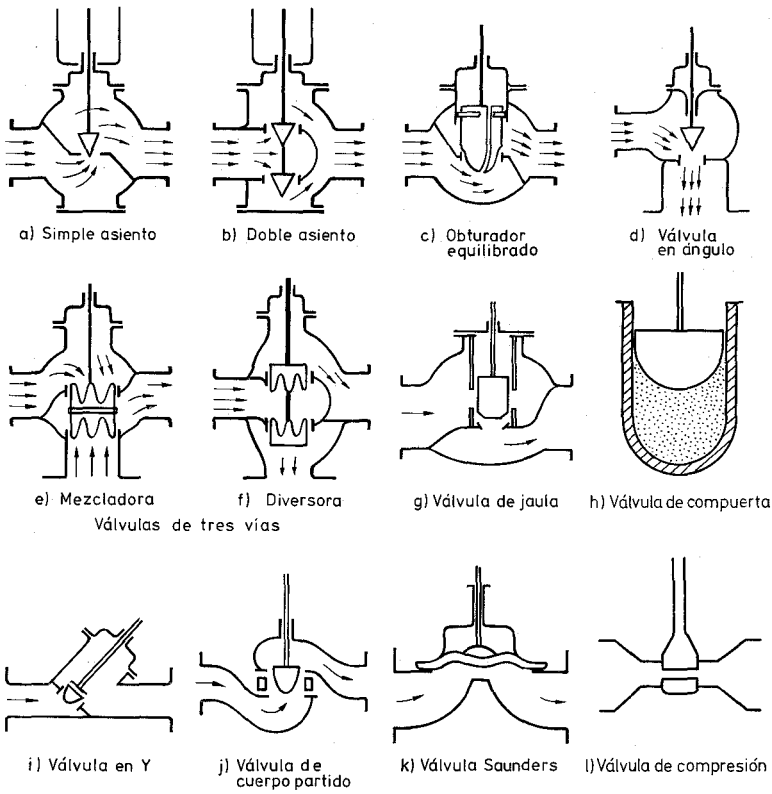
Puede verse en las figuras 8.2 *a*, *b* y *c* siendo de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

Como dato orientativo puede señalarse que según la norma ANSI B 16.104-1976, las fugas admisibles son de 0,1 % del caudal máximo en la válvula de simple asiento y de 0,5 % en la válvula de doble asiento. Asimismo, las válvulas con obturador dotado de anillo de teflón para cierre hermético admiten un caudal de fuga de 1 a 40 burbujas de aire o NZ por minuto.

8.1.2.2 Válvula en ángulo

Esta válvula representada en la figura 8.2 *d*, permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan (*flashing*), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión.

OBTURADORES DE MOVIMIENTO LINEAL



OBTURADORES DE MOVIMIENTO CIRCULAR

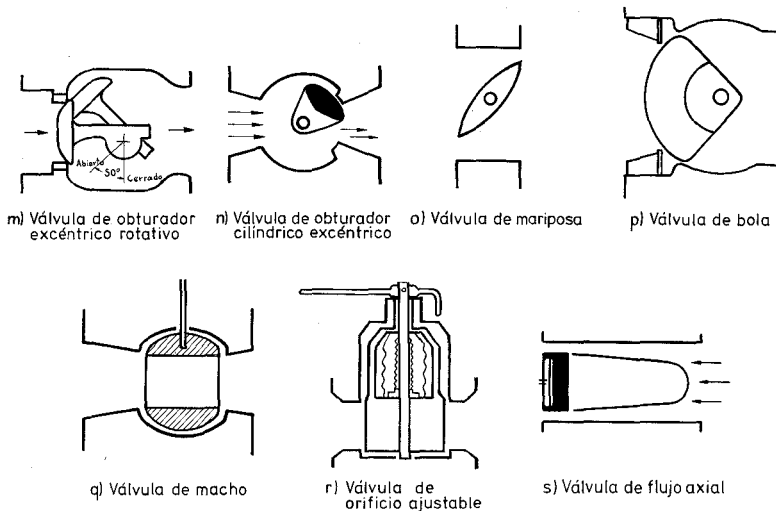


Fig. 8.2 Tipos de válvulas de control.

8.1.2.3 Válvula de tres vías

Este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos — válvulas mezcladoras (fig. 8.2 *e*) — o bien para derivar de un flujo de entrada dos de salida — válvulas diversoras (fig. 8.2 *f*). Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.

8.1.2.4 Válvula de jaula

Consiste en un obturador cilíndrico que desliza en una jaula con orificios adecuados a las características de caudal deseadas en la válvula (fig. 8.2 *g*). Se caracterizan por el fácil desmontaje del obturador y porque éste puede incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial favoreciendo la estabilidad del funcionamiento. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. Como el obturador está contenido dentro de la jaula, la válvula es muy resistente a las vibraciones y al desgaste. Por otro lado, el obturador puede disponer de aros de teflón que, con la válvula en posición cerrada, asientan contra la jaula y permiten lograr así un cierre hermético.

8.1.2.5 Válvula de compuerta

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo-nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total (fig. 8.2 *h*).

8.1.2.6 Válvula en Y

En la figura 8.2 *i* puede verse su forma. Es adecuada como válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada inclinada con un cierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.

8.1.2.7 Válvula de cuerpo partido

Esta válvula (fig. 8.2 *j*) es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento. Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentaria.

8.1.2.8 Válvula Saunders

En la válvula Saunders (fig. 8.2 *k*), el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrando así el paso del fluido.

La válvula se caracteriza porque el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos.

Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.

8.1.2.9 Válvula de compresión

Esta válvula funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo, un tubo de goma. Igual que las válvulas de diafragma se caracterizan porque proporcionan un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplican fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión (ver figura 8.2 l).

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican como se detalla a continuación.

8.1.2.10 Válvula de obturador excéntrico rotativo

Consiste en un obturador de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo excéntrico y que está unido al eje de giro por uno o dos brazos flexibles (fig. 8.2 m).

El eje de giro sale al exterior del cuerpo y es accionado por el vástago de un servomotor. El par de éste es reducido gracias al movimiento excéntrico de la cara esférica del obturador.

La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, comparable a las válvulas mariposa y a las de bola y por su elevada pérdida de carga admisible.

8.1.2.11 Válvula de obturador cilíndrico excéntrico

Esta válvula (fig. 8.2 n) tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma o teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador. La válvula es de bajo coste y tiene una capacidad relativamente alta. Es adecuada para fluidos corrosivos y líquidos viscosos o conteniendo sólidos en suspensión.

8.1.2.12 Válvula de mariposa

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular (fig. 8.2 o). La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60° , a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

8.1.2.13 Válvula de bola

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola (de ahí su nombre) (fig. 8.2 *p*). La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75 % del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

Una válvula de bola típica es la *válvula de macho* (fig. 8.2 *q*) que consiste en un macho de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro interior de la tubería. El macho ajusta en el cuerpo de la válvula y tiene un movimiento de giro de 90°. Se utiliza generalmente en el control manual todonada de líquidos o gases y en regulación de caudal.

8.1.2.14 Válvula de orificio ajustable

El obturador de esta válvula consiste en una camisa de forma cilíndrica que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida y que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor. El giro del obturador tapa parcial o totalmente las entradas y salidas de la válvula controlando así el caudal. La válvula incorpora además una tajadera cilíndrica que puede deslizarse dentro de la camisa gracias a un macho roscado de accionamiento exterior. La tajadera puede así fijarse manualmente en una posición determinada para limitar el caudal máximo (fig. 8.2 *r*).

La válvula es adecuada en los casos en que es necesario ajustar manualmente el caudal máximo del fluido, cuando el caudal puede variar entre límites amplios de forma intermitente o continua y cuando no se requiere un cierre estanco. Se utiliza para combustibles gaseosos o líquidos, vapor, aire comprimido y líquidos en general.

8.1.2.15 Válvula de flujo axial

Las válvulas de flujo axial consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual a su vez comprime un fluido hidráulico contra un obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expansiona para cerrar el flujo anular del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso. Otra variedad de la válvula de flujo axial es la válvula de manguito, que es accionada por compresión exterior del manguito a través de un fluido auxiliar a una presión superior a la del propio fluido. Se utiliza también para gases (ver figura 8.2 *s*).

8.1.3 Cuerpo de la válvula

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producidas por el fluido.

El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras, según puede verse en las figuras 8.3 y 8.4.

Cabe señalar los puntos siguientes:

- a) Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2";
- b) Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas, machihembradas con junta de anillo;

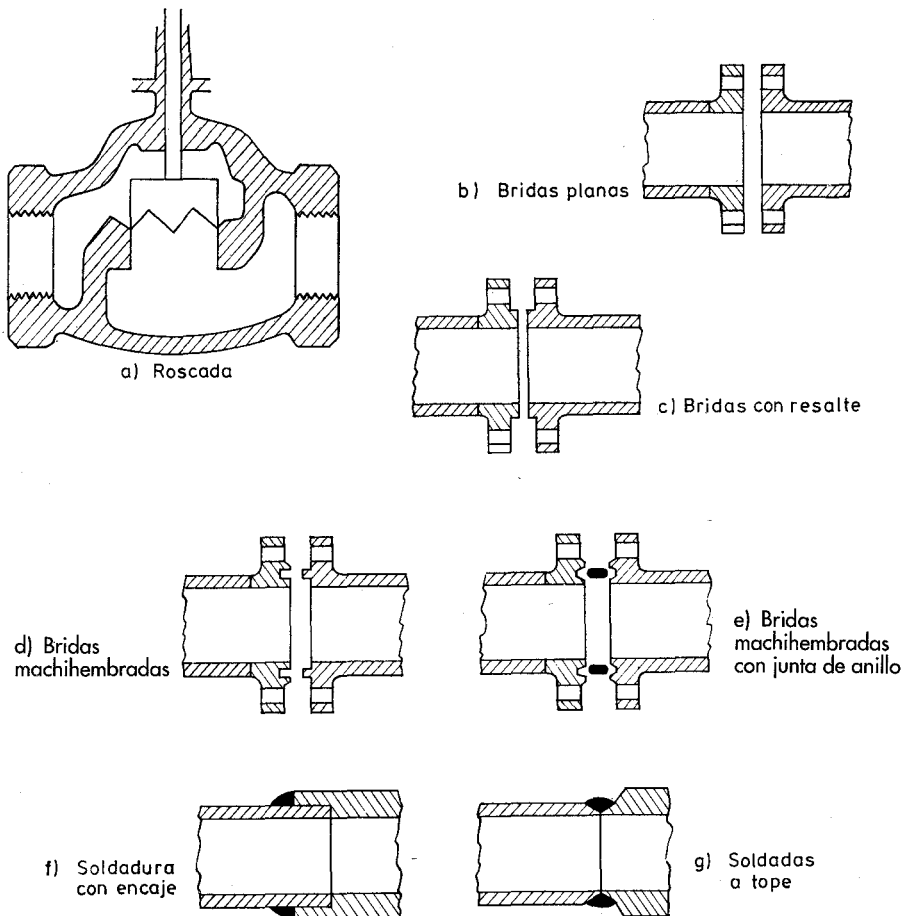
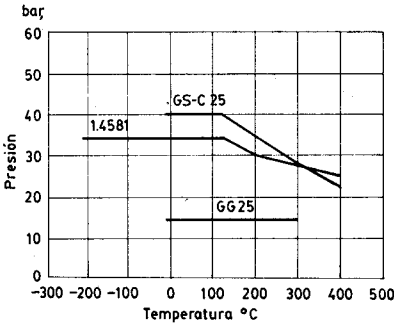


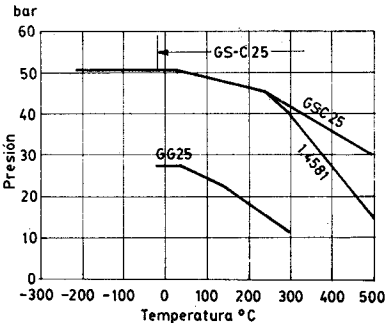
Fig. 8.3 Tipos de conexiones del cuerpo a la tubería.

a) Cuerpos de bronce e hierro fundido

Material	Nominal lb	bar a °C	bar a °C	Norma ANSI
Bronce	150	10,3 –208	15,5 –65	B16.24-1971 Material ASTM B62
	300	20,7 –216	34,5 –65	
Hierro fundido	125	8,5 –178	12 –65	B16.1-1975 Material ASTM A126
	250	17 –207	27 –65	



b) Normas DIN



c) Normas ANSI

Fig. 8.4 Normas DIN, ANSI de cuerpos de válvulas de control.

c) Las conexiones soldadas pueden ser con encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2" y las segundas desde 2 1/2" a tamaños mayores.

El cuerpo suele ser de hierro, acero y acero inoxidable y en casos especiales los materiales pueden ser de monel, hastelloy B o C, etc. En las tablas 8.1 y 8.2 a y b figuran los materiales más empleados con su composición principal.

TABLA 8.1 Materiales estándar para el cuerpo de la válvula

Tipo	Especificación DIN * ASTM	Composición %								
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	Otros
Hierro fundido	GG 25									
	A 126-clase B*									
Acero al carbono	GS-C 25	0,25	0,8	0,5	0,05	0,05	3 máx			
	A 216-WCB*	0,3	1,0	0,6	0,05	0,06				
Acero inox. 18/8/3	1.4581	0,08	1,5	1,5	0,05	0,03	17-19,5	10,5-12,5	2-2,5	Nb > 8 × % C
	A 351-CF10 Mc*	0,10	1,5	1,5	0,04	0,04	15-18	13-16	1,75-2,5	Nb > 10 × % C 1,2 % máx.

TABLA 8.2 a Materiales especiales para el cuerpo de la válvula

Tipo	Especificación DIN * ASTM	Composición %								
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	Otros
Acero CrMo	7357	0,20	0,8	0,5	0,04	0,04	1-1,5		0,45-0,55	
	A 217-WC 6*	0,20	0,8	0,6	0,05	0,06	1-1,5		0,45-0,65	
Acero CrMo 5 %	7362	0,12	0,5	0,4	0,04	0,04	4-6,5		0,45-0,65	
	A 217-C 5*	0,20	0,7	0,75	0,05	0,06	4-6,5		0,45-0,65	
Acero Ni 3,5 %	5638	0,12	0,8	0,5	0,025	0,025		3,3-3,8		
	A 352-LC 3*	0,15	0,8	0,6		0,05		3-4		
Inox. 18/8	4552	0,10	2	1,5	0,04	0,04	17,5-20	9-11		Nb > 8 × % C
	A 351-CF 8 C*	0,08	1,5	2	0,04	0,04	18-21	9-12		Nb > 10 × % C 1,2 % máx.
Inox. 18/8	4308	0,08	2	2	0,04	0,04	17,5-20	9-11		
	A 351-CF 8*	0,08	1,5	2	0,04	0,04	18-21	8-11		
Acero LC	4404	0,03	2	1	0,04	0,04	16,5-18,5	11-13	2-2,5	
	A 351-CF 3 M*	0,03	1,5	1,5	0,04	0,04	17-21	9-13	2-3	
Hastelloy B	Euzonit 70	0,03						62-65	28-32	Fe 1 máx.
	Hastelloy B	0,05						62-65	26-30	Fe 4-7 Co 2,5
Hastelloy C	Euzonit 60	0,02					17	60	20	Fe 1 máx.
	Hastelloy C	0,08					15-17	54	15-17	Fe 7 W 3-4,5 Co 2,5 V 0,35
Monel	G-NiCu30Si2	0,35	1,5	2				62-68		Cu 26-33 Fe 2,5
	Monel	0,3	1,5	1,5				62-68		Cu 28-32 Fe 3
Bronce (Oikusi)	G-CuZn16Si4									Cu 80 Si 4 Zn 16
	B 198-13 B									Cu 80 Si 4 Zn 16

Empiezan a utilizarse nuevos materiales termoplásticos para el cuerpo de las válvulas. En la tabla 8.2b pueden verse las características de algunos materiales.

En aplicaciones químicas hasta 140° C y 10 bar, las válvulas termoplásticas son de elección en particular por su resistencia a la corrosión, abrasión y congelación, por

TABLA 8.2 b Materiales termoplásticos para el cuerpo de la válvula

<i>Tipo</i>	<i>Resistencia a la tensión</i>	<i>Resistencia a la flexión</i>	<i>Resistencia a compresión</i>	<i>Dureza Rockwell</i>	<i>Temperatura máxima (° C)</i>	<i>Presión máx (bar)</i>
Cloruro Polivinilo (PVC)	480	1030	890	115	77	10
Cloruro Polivinilo Clorinado (CPVC)	620	1100	1030	118	107	10
Polipropileno (PP)	340	620	620	95	107	10
Polipropileno fibra vidrio (PPG)	690	—	—	107	122	10
Fluoruro Polivinilideno (PVDF)	510	960	960	110	137	10

su alta pureza y por su bajo coste. No son adecuadas en casos de fuerte vibración o en ambientes con posible abuso mecánico.

8.1.4 Tapa de la válvula

La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su través desliza el vástago del obturador accionado por el motor. Este vástago dispone generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula.

Para que el fluido no se escape a través de la tapa es necesario disponer una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago. La empaquetadura ideal debe ser elástica, tener un bajo coeficiente de rozamiento, ser químicamente inerte y ser un aislante eléctrico, con el fin de no formar un puente galvánico con el vástago que dé lugar a una corrosión de partes de la válvula. La empaquetadura que se utiliza normalmente es de teflón cuya temperatura máxima de servicio es de 220° C. A temperaturas superiores o inferiores a este valor es necesario o bien emplear otro material o bien alejar la empaquetadura del cuerpo de la válvula para que se establezca así un gradiente de temperaturas entre el fluido y la estopada y esta última pueda trabajar satisfactoriamente.

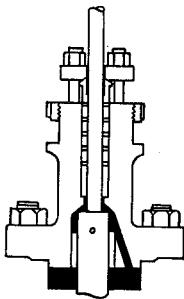
La empaquetadura normal no proporciona un sello perfecto para el fluido. En el caso de fluidos corrosivos, tóxicos, radiactivos, o muy valiosos hay que asegurar un cierre total en la estopada. Los fuelles de estanqueidad lo proporcionan al estar unidos por un lado al vástago y por el otro a la tapa. La estanqueidad lograda es tan perfecta que las posibles fugas sólo pueden detectarse mediante ensayos realizados con un espectrómetro de masas.

TABLA 8.3

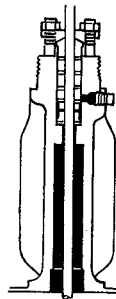
Tamaño de la válvula en pulgadas	Temperaturas de trabajo	
	— 21 a — 80° C	— 81 a — 150° C
½ a 2 ½	400 mm	600 mm
3 a 6	600 mm	800 mm
8 a 12	800 mm	1000 mm

Así pues, según las temperaturas de trabajo de los fluidos y el grado de estanqueidad deseada existen los siguientes tipos de tapas:

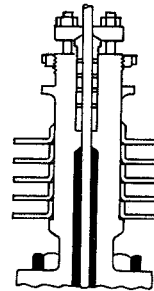
1. Tapa normal (fig. 8.5 a) adecuada para trabajar a temperaturas del fluido variables entre 0 y 220° C.
2. Tapa con aletas de radiación (fig. 8.5 b) circulares o verticales que puede trabajar entre — 20 a 450° C, recomendándose que por encima de 350° C, la válvula se monte invertida para facilitar el enfriamiento de la empaquetadura.
3. Tapa con columnas de extensión (fig. 8.5 c). Las columnas son adecuadas cuando el fluido está a temperaturas muy bajas. Como guía en su selección se recomiendan las longitudes de la tabla 8.3.



a) Tapa normal

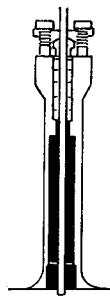


Aletas verticales

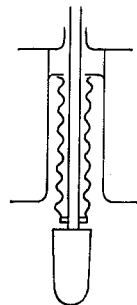


Aletas circulares

b) Tapa con aletas de radiación



c) Columnas de extensión



d) Fuelle de estanqueidad

Fig. 8.5 Tipos de tapas.

4. Tapa con fuelle de estanqueidad (fig. 8.5 *d*) para temperaturas de servicio entre -20 y 450°C .

La caja de empaquetadura de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca (fig. 8.6 *a*) o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas (fig. 8.6 *b*). La empaquetadura puede ser apretada manualmente de modo periódico o bien ser presionada elásticamente con un muelle apoyado interiormente en la tapa (fig. 8.6).

La empaquetadura normal suele ser de aros de teflón, de sección en V, comprimidos con un resorte con la ventaja de que el teflón es autolubrificante y no necesita engrase. Cuando el fluido y las condiciones de servicio no permiten el empleo aislado del teflón se utiliza grafito en forma de filamento, laminado y cinta. El grafito sustituyó al amianto que fue dejado de utilizar por cuestiones de salud humana. El grafito tiene un coeficiente de dilatación semejante al metal del vástago, de modo que el choque térmico no es un problema. Su coeficiente de rozamiento es del orden de 7 a 10 veces mayor que el del teflón, por lo que siempre que sea posible debe emplearse éste. No debe permitirse que se inicie una fuga porque es difícil solucionarla después. El grafito en presencia de humedad puede dar lugar a una severa corrosión galvánica del vástago, con lo que pueden presentarse fugas cuando el vástago empieza a moverse. En los casos en que el fluido es tan tóxico que debe impedirse su fuga a través de la estopada y por alguna razón no pueden emplearse los fuelles de estanqueidad, se utilizan empaquetaduras dobles (fig. 8.6 *c*) con dos collarines de lubricación. Esta disposición permite la inyección de gas inerte. Incluso, si partes pequeñas del fluido se fugan, pueden recuperarse por succión a través de dichos collarines.

Existen diversos tipos de empaquetaduras según sean las presiones y temperaturas de trabajo y el tipo de fluido. En la tabla 8.4 puede verse una guía de selección.

Las empaquetaduras con engrase están dejando de utilizarse por precisar de una válvula de engrase que periódicamente debe apretarse.

La Norma de Aire Limpio (Clean Air Act) de 1990 limita las fugas de fluidos químicos orgánicos volátiles desde las válvulas a la atmósfera. Su observancia ha conducido a los fabricantes de válvulas de control a rediseñar las empaquetaduras del vástago, que son la causa principal de las emisiones que se producen. Se han mejorado los materiales obteniendo una vida útil más larga sin degradación de la empaquetadura, y se ha conseguido un menor rozamiento con lo que no ha sido necesario pensar en aumentar el tamaño del actuador como en algunas aplicaciones de válvulas normales.

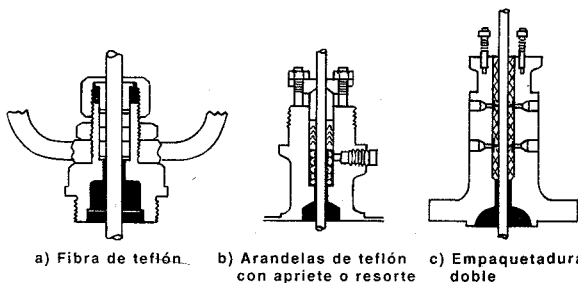


Fig. 8.6 Tipos de empaquetaduras.

TABLA 8.4 Tipos de empaquetaduras

<i>Descripción</i>	<i>Presión máx. (bar)</i>	<i>Campo de temperaturas °C</i>	<i>Observaciones</i>
Teflón en V (anticorrosión)	40	-180 a 200	Adecuado en general para todo tipo de productos Inadecuado para aceite y para productos que precipitan cristales o que contienen fangos
Perfluoroelastómero con anillos de teflón rellenos con fibras de grafito	—	0-250	Bajo nivel de fugas, bajo rozamiento, bajo mantenimiento
Grafito en filamento o laminado o en cinta		650-1650	Fluidos no oxidantes 650-1650° C

Las fugas en las empaquetaduras más usuales (aros de teflón en V, ...) se deben a la pérdida de la carga axial debida al desgaste, y al choque térmico por los diferentes coeficientes de dilatación del acero del vástago y del material de la empaquetadura (el teflón 10 veces más que el acero). En las válvulas normales, la carga axial se mantiene apretando periódicamente la empaquetadura, lo que aparte de un mantenimiento más caro, comporta un mayor rozamiento de la estopada, con el correspondiente aumento de la histéresis y de la zona muerta de la válvula y un empeoramiento del control. Los nuevos sistemas de estopadas contienen aros de perfluoroelastómero (PFE) alternando con aros de teflón rellenos con fibras de grafito. Mientras que la estopada clásica de aros de teflón muestra fugas mayores de 500 ppm después de ser sometida a 10.000 - 40.000 ciclos, la nueva estopada después de 250.000 ciclos (3 años de funcionamiento) se mantiene todavía muy por debajo de las 500 ppm.

El mantenimiento normal de las válvulas con empaquetadura estándar consiste en inspecciones cuatrimestrales y en un programa activo de mantenimiento de las válvulas que manejan fluidos orgánicos volátiles. Con las nuevas empaquetaduras, si se llega como máximo a fugas mayores de 500 ppm en sólo el 0,5 % de las válvulas de la planta, la Norma de Aire Limpio permite efectuar únicamente inspecciones anuales.

8.1.5 Partes internas de la válvula. Obturador y asientos

8.1.5.1 Generalidades

Como partes internas de la válvula se consideran generalmente las piezas metálicas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son el vástago, la empaquetadura, el collarín de lubricación en la empaquetadura (si se emplea), los anillos de guía del vástago, el obturador y el asiento o los asien-

tos. Hay que señalar que el obturador y el asiento constituyen el «corazón de la válvula» al controlar el caudal gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

En el texto se estudiarán el obturador y los asientos debiendo señalar que en su selección intervienen tres puntos principales:

1. Materiales normales y los especiales aptos para contrarrestar la corrosión, la erosión y el desgaste producidos por el fluido.
2. Características de caudal en función de la carrera.
3. Tamaño normal o reducido que permite obtener varias capacidades de caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo.

8.1.5.2 Materiales

El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido. En las tablas que siguen figuran los materiales estándar y los especiales utilizados en los obturadores y asientos.

Cuando la velocidad del fluido es baja, pueden utilizarse PVC, fluorocarbonos y otros materiales blandos, solos o reforzados con fibras de vidrio o grafito. En algunas válvulas pueden utilizarse obturadores y asientos de cerámica.

Los materiales especiales resistentes a la corrosión y a la erosión tanto en el obturador y asientos como en el cuerpo se estudian más adelante.

TABLA 8.5 Materiales estándar en las partes internas

Tipo	Especificación DIN * ASTM	Composición %								
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	Otros
Acero inoxidable	4006	0,1	1	1	0,05	0,03	12-14			
	A 276 tipo 410*	0,15	1	1	0,04	0,03	11,5-13,5			
	4059	0,25	1	1	0,05	0,04	15,5-17,5	1-2		
	A 296-CB 300*	0,2	1	1,5	0,04	0,03	18-21	2 máx.		
	4027	0,25	1	1	0,05	0,04	12,5-14,5			
	A 296 CA 15*	0,15	1	1,5	0,05	0,05	11,5-14	1	0,5	
Acero inox. 18/8/3	4580	0,1	2	1	0,05	0,03	16,5-18,5	10,5-13,5	2-2,5	Nb > 8 × % C
	A 276 tipo 316*	0,08	2	1	0,05	0,03	16-18	10-14	2-3	
	4581	0,08	1,5	1,5	0,05	0,03	17-19,5	10,5-12,5	2-2,5	Nb > 8 × % C
	A 351-CF 10Mc*	0,10	1,5	1,5	0,04	0,04	15-18	13-16	1,75-2,5	Nb > 10 × % C 1,2 % máx.

* Norma ASTM, resto norma DIN.

TABLA 8.6 Materiales especiales en las partes internas

Tipo	Especificación DIN • ASTM	Composición %								
		C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Cr	Ni	Mo	Otros
Hastelloy B	Euzonit 70	0,03						62-65	28-32	Fe 1 máx.
	Hastelloy B	0,05						62-65	26-30	Fe 4-7 Co 2,5
Hastelloy C	Euzonit 60	0,02					17	60	20	Fe 1 máx.
	Hastelloy C	0,08					15-17	54	15-17	Fe 7 W 3-4,5 Co 2,5 V 0,35
Monel	G-NiCu30Si2	0,35	1,5	2				62-68		Cu 26-33 Fe 2,5
	Monel	0,3	1,5	1,5				62-68		Cu 28-32 Fe 3
Stellite	8877	1					28			Co rest W 4,5
	Stellite, n.º 6	1,3					28			Co rest W 4,5
17-4PH endurecido	4540	0,07	1	1	0,04	0,03	17	4		Cu 4 Nb 0,3
	17-4 PH	0,05	1	1	0,04	0,03	17	4		Cu 4 Nb 0,3

8.1.5.3 Características de caudal inherente

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina *característica de caudal inherente* y se representa usualmente considerando como abscisas la carrera del obturador de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

Las curvas características más significativas son la de apertura rápida, la lineal y la isoporcentual, siendo las más importantes estas dos últimas. Otras curvas son las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de tajadera, mariposa, Saunders, y con obturador excéntrico rotativo.

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que al variar la carrera el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En la figura 8.7 pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.

El obturador con *característica de apertura rápida* (fig. 8.7 a) tiene la forma de un disco plano. En la figura 8.8 a puede verse que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.

En el obturador con *característica lineal* (figs. 8.7 b, f, g, i), el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

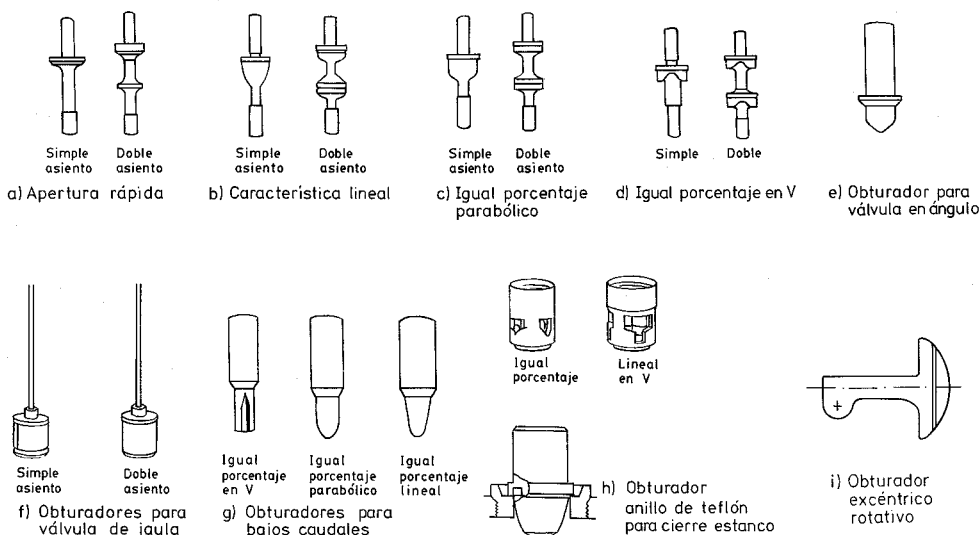


Fig. 8.7 Tipos de obturadores.

$$q = Kl$$

en la que:

q = caudal a pérdida de carga constante

K = constante

l = carrera de la válvula

Gráficamente se representa por la línea recta de la figura 8.8 a. La «rangeability» o campo de control de caudales que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente es en la válvula lineal de 15 a 1 o de 30 a 1. Si bien teóricamente podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan a este valor.

En el obturador con *característica isoporcentual* (figuras 8.7 c, d, f, g, cada incremento de carrera del obturador produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{dq}{dl} = a \cdot q$$

en la que:

q = caudal a pérdida de carga constante

l = carrera

a = constante

de aquí: $\frac{dq}{q} = a \, dl$

e integrando $\int \frac{dq}{q} = a \int dl$

luego

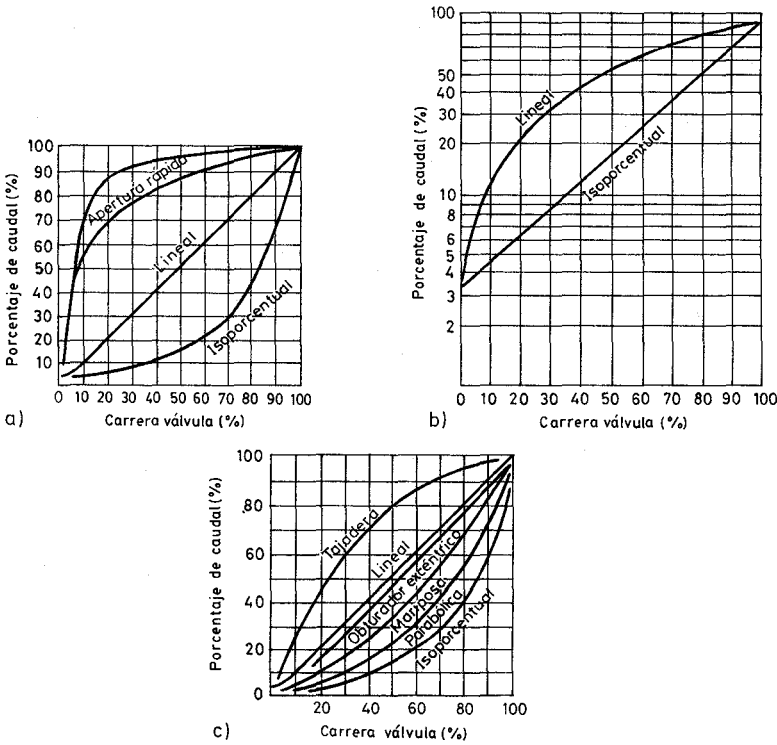


Fig. 8.8 Tipos de características inherentes de la válvula.

$$q = b e^{at}$$

en la que:

a y b son constantes

e = base de los logaritmos neperianos

Esta expresión está representada en la figura 8.8.

Si suponemos los valores siguientes:

$$\begin{aligned} l = 0 & \quad q = q_{\text{mínimo}} = b \\ l = 1 & \quad q = q_{\text{máximo}} = q_{\text{mín}} e^a \end{aligned} \quad \left\{ \text{luego } q = q_{\text{mín}} \left(\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}} \right)^l \right.$$

$$\text{y } \frac{q}{q_{\text{máx}}} = \frac{1}{\left(\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}} \right)} \cdot \left(\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}} \right)^l = \frac{1}{R} \cdot R^l$$

que da el porcentaje de caudal en función del campo de control o «rangeability» de la válvula.

y si $R = 50$

$$q/q_{\text{máx}} = 0,02 \cdot 50^l$$

En la figura 8.8 puede verse su representación gráfica; ésta varía si cambia el valor de R . La curva isoporcentual se caracteriza porque al principio de la carrera de la válvula, la variación de caudal es pequeña, y al final, pequeños incrementos en la carrera se traducen en grandes variaciones de caudal.

La curva *característica parabólica* (fig. 8.8 c) corresponde a la ecuación

$$q = K P^2$$

Las curvas características de las válvulas de tajadera y mariposa pueden verse en la figura 8.8 c.

8.1.5.4 Características de caudal efectivas

Hay que señalar que en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de *característica de caudal efectiva*.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentará inevitablemente curvas características efectivas distintas.

Sea, por ejemplo, un circuito típico de un proceso industrial formado por una bomba centrífuga, la válvula de control y la tubería (fig. 8.9 a). Es evidente que las características de impulsión de la bomba y la pérdida de carga absorbida por el sistema variarán según sea el grado de apertura de la válvula. En la figura 8.9 b puede verse que las diferencias entre la presión de impulsión de la bomba y la pérdida de carga de la tubería al variar el caudal corresponden a la pérdida de carga absorbida por la válvula y que ésta aumenta al disminuir el caudal.

Expresando la pérdida de la presión de la válvula a su capacidad nominal (apertura completa), con relación a la pérdida de carga del sistema (línea + válvula) se obtiene un coeficiente r . El valor de este coeficiente dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería (menor \varnothing de válvula mayor valor de r) y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto (menor resistencia mayor r). Para cada valor de r puede construirse una curva característica efectiva que se apartará de la curva inherente y que coincidirá con ella cuando $r = 1$, es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda toda disponible para la válvula. Si el valor de r fuera muy pequeño la válvula de control absorbería muy poca presión y quedaría muy distorsionada la característica inherente (figs. 8.9 c y d).

Para que la exposición sea más clara estudiemos la variación de r en un proceso más sencillo en el que la pérdida de carga total del sistema es constante (caso de un depósito que descarga a un nivel más bajo a través de una válvula de control [fig. 8.9 e]) en lugar de depender de la característica de una bomba como en el ejemplo anterior estudiado.

De un modo general, el caudal que pasa por la válvula corresponde a la ecuación

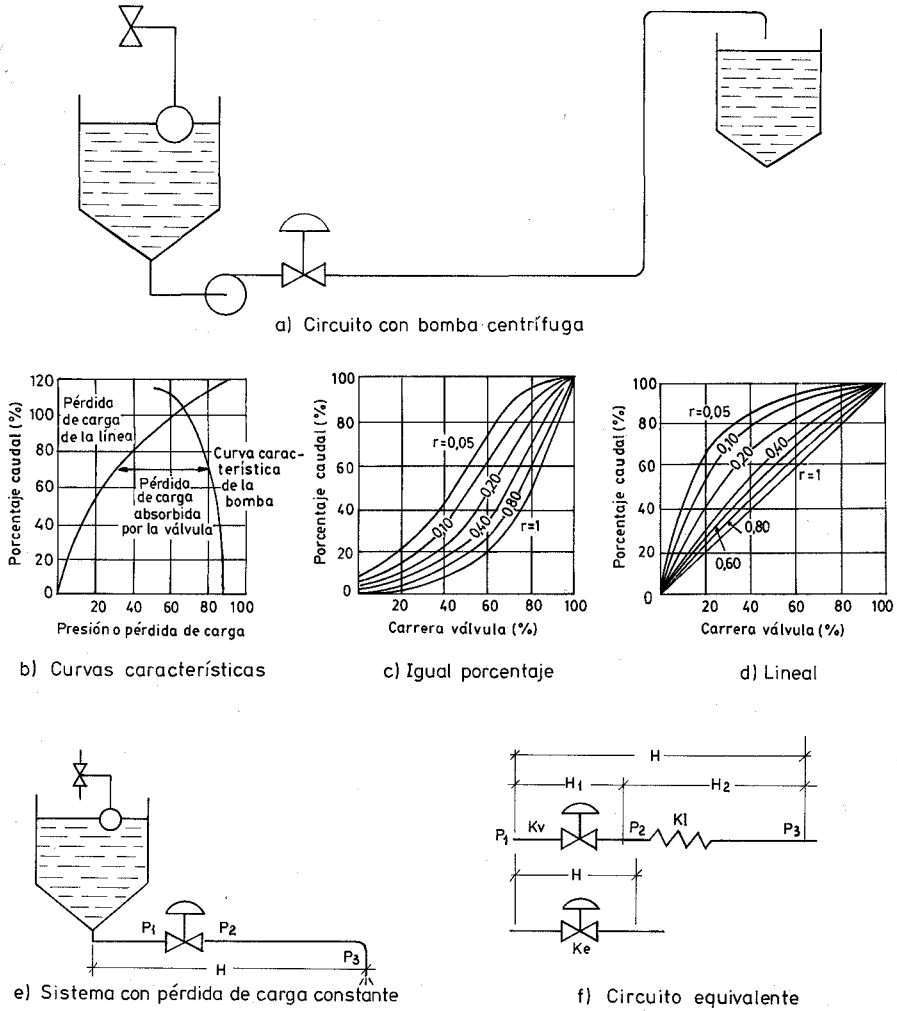


Fig. 8.9 Curvas características efectivas de una válvula de control.

$$Q_v = KA \sqrt{\Delta p}$$

en la que:

Q_v = caudal a través de la válvula

K = constante

A = área de paso

Δp = presión diferencial a través de la válvula

Si consideramos una pérdida de carga de 1 bar y llamamos K_v al caudal que circula tenemos

$$K_v = KA \cdot 1$$

luego

$$Q_v = K_v \sqrt{\Delta p}$$

y por analogía, el caudal que pasa por la tubería es: $Q_l = K_l \sqrt{\Delta p}$, expresión en la que K_l es el caudal que pasa por la tubería con una pérdida de carga de 1 kg/cm²; es decir, es una constante.

Por otro lado, el coeficiente efectivo de la válvula que sustituye al conjunto anterior válvula + tubería sería K_e .

En la figura 8.9 *f* pueden establecerse las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} Q &= K_v \sqrt{H_1} = K_l \sqrt{H_2} = K_e \sqrt{H} \\ H &= H_1 + H_2 = Q^2 \left(\frac{1}{K_v^2} + \frac{1}{K_l^2} \right) \end{aligned} \right\} \text{ luego: } K_e = \frac{K_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{K_v}{K_l} \right)^2}}$$

y como $\frac{K_v}{K_{v \max}} = q_1$

siendo q_1 la característica de caudal inherente resulta:

$$K_e = \frac{K_{v \max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v \max}}{K_l} \right)^2 + 1}} \quad \text{cuyo valor máximo es } K_{e \max} = \frac{K_{v \max}}{\sqrt{\left(\frac{K_{v \max}}{K_l} \right)^2 + 1}}$$

Luego:

$$\frac{K_e}{K_{e \max}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{K_{v \max}}{K_l} \right)^2 + 1}{\left(\frac{K_{v \max}}{K_l} \right)^2 + 1}}$$

y como

$$r = \frac{H_1}{H} = \frac{\frac{Q_{\max}^2}{K_{v \max}^2}}{\frac{Q_{\max}^2}{K_{v \max}^2} + \frac{Q_{\max}^2}{K_l^2}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_{v \max}}{K_l} \right)^2}$$

y sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene la expresión final

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{q_1^2}}} \quad (1)$$

que es una familia de curvas efectivas función del valor de r y de la característica inherente q_1 .

Si $r = 1$ la característica inherente se confunde con la efectiva. Si la característica

es lineal $q_1 = Kl$, resulta $q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{K^2 l^2}}}$

Si la característica es isoporcentual con «rangeability» $R = 50$, $q_1 = 0,02 \times 50$ resulta:

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1 - r + \frac{r}{0,0004 \times 50^{2t}}}}$$

Estas dos familias de curvas están representadas en las figuras 8.9 *c* y *d* respectivamente.

En la figura 8.9 *c* puede verse que, la característica isoporcentual se desplaza gradualmente hacia una curva característica lineal al ir disminuyendo r , es decir al bajar la pérdida de carga disponible para la válvula y aumentar simultáneamente el porcentaje de pérdida de presión en la línea.

Asimismo, en la figura 8.9 *d* la curva característica inherente lineal se va aproximando a una curva de apertura rápida al ir disminuyendo el valor de r .

8.1.5.5 Selección de la característica de la válvula

Las curvas efectivas de las válvulas de control plantean un problema, el de la selección de la curva adecuada que satisfaga las características del proceso. Este punto no está suficientemente definido y es motivo de discusión constante motivada en parte por la falta de datos completos del proceso, de los cuales se carece a menudo: incluso a veces existe un desacuerdo aparente entre los estudios prácticos y teóricos realizados sobre la válvula.

Desde un punto de vista ideal, la característica efectiva de la válvula debe ser tal que el bucle de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso. Un bucle de control es estable si la ganancia del bucle es menor que 1.

En el proceso (fig. 8.10 *a*) la ganancia total del bucle de control equivale al producto de las ganancias del proceso, del transmisor, del controlador y de la válvula de control. Es decir, a:

$$G = \frac{\Delta v}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s}$$

expresión en la que

Δq = variación de caudal del fluido de control

Δv = incremento de la variable del proceso

Δt = incremento de la señal de salida del transmisor

Δs = incremento de la señal de salida del controlador a la válvula de control.

Para facilitar el estudio dinámico, el transmisor y la válvula de control se consideran incluidos dentro del proceso con lo cual la expresión anterior pasa a

$$G = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\Delta s}$$

Es evidente que la válvula de control puede modificar la ganancia del bucle. De aquí la conveniencia de estudiar esta influencia a fin de que las variaciones

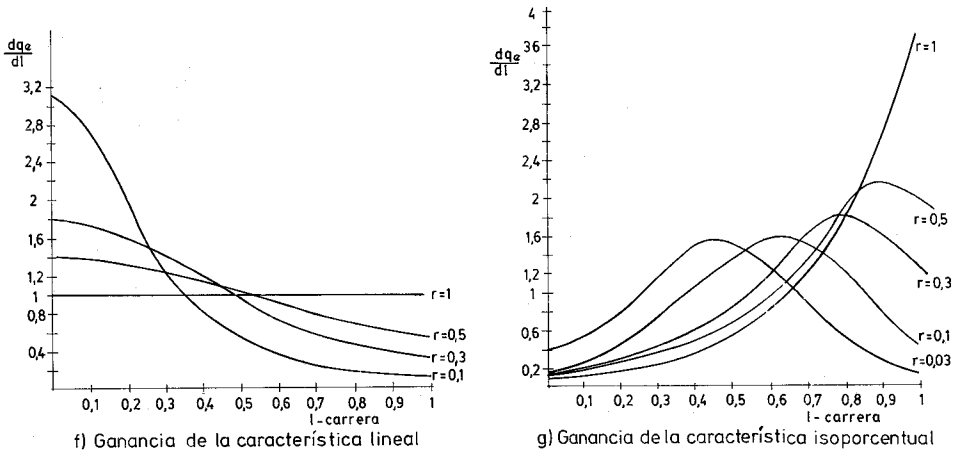
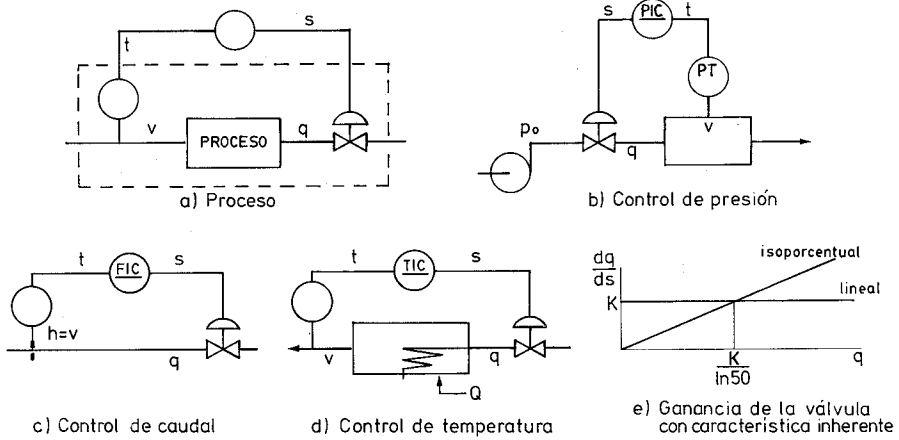


Fig. 8.10 Ganancias de los elementos del bucle de control.

que produzca sobre la ganancia total del bucle no den lugar a inestabilidad en el proceso para algunos puntos o en toda la carrera de la válvula.

Para simplificar el estudio consideraremos que las ganancias del transmisor y del controlador son constantes.

Señalemos que muchos procesos son lineales, es decir, sus ganancias se mantienen constantes $\left(\frac{\Delta v}{\Delta q} = \text{cte}\right)$. Así sucede en el control de nivel y de caudal con señal lineal.

En otros procesos la ganancia deja de ser constante tal como ocurre en el control de presión, en la medida de caudal con diafragma y en el control de temperatura en un intercambiador.

En el control de presión de la figura 8.10 b la ganancia del proceso es $\frac{\Delta v}{\Delta q}$

Aplicando la fórmula clásica de las válvulas de control que más adelante se expondrá resulta

$$q = K_v \sqrt{\frac{v - p_o}{\rho_o}}$$

en la que:

$$\begin{aligned} q &= \text{caudal} \\ K_v &= \text{constante} \\ v - p_o &= \text{presión diferencial} \\ \rho_o &= \text{densidad del fluido} \end{aligned}$$

o bien

$$v - p_o = \frac{q^2}{K_v^2} \cdot \rho_o$$

con lo cual

$$\frac{\Delta v}{\Delta q} = \frac{2q}{K_v^2} \cdot \rho_o$$

expresión en la que puede verse que la ganancia del proceso es directamente proporcional al caudal del producto.

En el control de caudal medido con una placa-orificio (fig. 8.10 c) la ganancia del proceso equivale a la relación.

$$\frac{\Delta v}{\Delta q} = \frac{\Delta h}{\Delta q} = \frac{dh}{dq} = \frac{2q}{K^2} \quad \text{ya que} \quad q = K \sqrt{h}$$

siendo q el caudal, K una constante y h la presión diferencial generada por la placa-orificio.

Esta ganancia es, pues, directamente proporcional al caudal.

En los procesos de regulación de temperatura en intercambiadores de calor la ganancia es inversamente proporcional al caudal del producto. En efecto, sea por ejemplo el control de temperatura realizado mediante un fluido térmico y representado en la figura 8.10 d para un producto que, para simplificar, consideramos agua.

Se verifica la ecuación:

$$Q \cdot 1 \cdot v = q \cdot c \cdot t_t$$

en la que:

$$\begin{aligned} Q &= \text{caudal de agua} \\ v &= \text{temperatura de salida} \\ q &= \text{caudal de fluido térmico} \\ c &= \text{calor específico del fluido térmico} \\ t_t &= \text{temperatura del fluido térmico} \end{aligned}$$

habiendo considerado que el rendimiento de la instalación es la unidad y que la temperatura de referencia es 0°C .

Luego, derivando la expresión anterior con relación a q resulta

$$Q \frac{dv}{dq} = c t_t$$

luego:

$$\frac{dv}{dq} = \frac{ct_f}{Q}$$

es decir, que la ganancia del proceso es inversamente proporcional a los cambios de carga del producto.

Hay que señalar que los casos estudiados son muy simples y se han simplificado. Por otro lado, existen varios factores de no linealidad que alteran las características de caudal supuestas. Entre estos factores se encuentran:

— Exceptuando las válvulas de movimiento rotativo, en las proximidades del cierre, las curvas reales de caudal se apartan de las teóricas.

— El área del diafragma del servomotor neumático y la fuerza de la presión diferencial sobre el obturador, en relación a la carrera, no son constantes, si bien el problema puede solucionarse suficientemente con los posicionadores.

— La curva característica de caudal en los líquidos es distinta en los gases y vapores.

Así pues, cuando se consideran los cambios de carga y las perturbaciones reales que pueden presentarse puede ocurrir muy bien que no exista ninguna válvula de control comercial que compense totalmente las variaciones de ganancia del proceso, en cuyo caso la selección de la válvula será un compromiso entre la estabilidad del bucle y su rapidez de respuesta ante las perturbaciones. Examinaremos ahora la ganancia de la válvula de control.

La ganancia de la válvula de control viene expresada como la relación entre el incremento del caudal de salida y el incremento en la señal de entrada. Como en la práctica la variación en la señal de entrada es casi lineal con la carrera, puede admitirse que la ganancia equivale a

$$\frac{dq_e}{dl}$$

siendo q_e el caudal efectivo de paso por la válvula y l la carrera.

Por otro lado,

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{dq_e}{dq_i} \cdot \frac{dq_i}{dl}$$

siendo q_i la característica inherente de la válvula.

Luego de la expresión (1) de la característica efectiva resulta:

$$\frac{dq_e}{dq_i} = -\frac{1}{2} \cdot \left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^{-3/2} \cdot \left(-\frac{r \cdot 2q_i}{q_i^4}\right) = \frac{r}{q_i^3} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^3}}$$

y si la válvula es lineal ($q_i = K \cdot l$) resulta

$$\frac{dq_i}{dl} = K$$

Si la válvula es isoporcentual con «rangeability» 50 ($q_i = 0,02 \times 50^l$) resulta

$$\frac{dq_i}{dl} = 0,02 \times 50^l \cdot \ln 50 = q_i \cdot \ln 50$$

con lo cual la ganancia en la válvula lineal es

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{K^3 l^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{K^2 l^2}\right)^3}} \cdot K \quad (2)$$

y en la válvula isoporcentual es:

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{(0,02 \times 50^2)^3} \cdot \frac{0,02 \times 50^2 \cdot \ln 50}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{(0,02 \times 50^2)^2}\right)^3}} \quad (3)$$

que están representadas en las figuras 8.10 *f* y *g*.

Como es natural, si considerásemos sólo las características inherentes las ganancias serían:

$$\text{Válvula lineal} \quad \frac{dq_i}{dl} = K$$

$$\text{Válvula isoporcentual con} \quad \frac{dq_i}{dl} = q \cdot \ln 50$$

«rangeability» 50, $e^a = 50$

Estas últimas ecuaciones nos indican que la válvula lineal tiene ganancia constante y que en la válvula isoporcentual la ganancia es directamente proporcional al caudal (fig. 8.10 *e*).

En los procesos lineales, con ganancia constante — nivel, caudal con señal lineal — interesará que la válvula se comporte también linealmente, es decir, que tenga ganancia constante a fin de no cambiar la ganancia total del bucle. La familia de curvas de la figura 8.10 *f* nos señala las variaciones de ganancia que tienen lugar al modificarse la carrera. Comparando estas curvas con las de la figura 8.9 *d* se aprecia que el control deja de ser apreciablemente lineal por debajo de $r = 0,4$, que es demasiado sensible y casi inestable en la parte inicial de la carrera y que se vuelve notablemente «perezoso» en la parte final al necesitar una variación grande en la carrera de la válvula para aumentar apreciablemente el caudal. Así pues, en estos procesos lineales, la válvula isoporcentual es la más adecuada para r menor de 0,4 ya que su característica efectiva se aproxima a la curva característica lineal.

Según se verá más adelante, la pérdida de carga que se considera en el cálculo de la válvula de control suele ser del 30 % de la pérdida de carga total del sistema. Con esta práctica es obvio que la válvula más idónea a emplear es la isoporcentual. Asimismo, aceptando que la válvula automática debe absorber una pérdida de carga determinada para realizar bien sus funciones de control, cuanto mayor sea ésta con relación a la total del sistema (r lo mayor posible) tanto más preferible será la selección de una válvula lineal.

En los procesos de caudal y de control de temperatura estudiados en que la ganancia era directamente proporcional al caudal de la válvula e inversamente proporcional al caudal del producto respectivamente es preferible la característica isoporcentual según se desprende de las figuras 8.9 *c* y 8.10 *g*. En efecto, en la ca-

racterística isoporcentual inherente de la válvula con «rangeability» 50, la ganancia es $q \ln 50$ directamente proporcional al caudal, lo que compensa bastante las variaciones de ganancia del proceso. Al ir disminuyendo el valor de r la válvula tiende a una característica lineal con ganancia casi constante y la compensación existirá para caudales bajos hasta la mitad de la carrera aproximadamente; esto indica que un bucle de control ajustado a valores bajos de demanda de caudal del fluido de control, es decir, con la válvula sobredimensionada se volverá «perezoso» para valores altos ya que en esta zona la ganancia de la válvula será pequeña.

Hay que señalar que la ganancia de la válvula isoporcentual de la figura 8.10 g suele presentar picos por encima del valor unidad, de tal modo que es posible que en procesos determinados se presenten inestabilidades en algunos puntos de la carrera de la válvula. Estas anomalías pueden corregirse disminuyendo la ganancia del controlador con lo que desaparecen estos puntos o zonas de inestabilidad, pero entonces el control se vuelve más perezoso en los restantes puntos de la carrera, siendo más lenta la respuesta del sistema. Este fenómeno podría subsanarse con una válvula de curva característica especial, pero ello es antieconómico y difícil de realizar porque esta curva característica debería calcularse desarrollando cálculos teóricos engorrosos que en general no sería factible efectuar por el desconocimiento de los datos completos del proceso.

Si en algún caso la característica de la válvula no es la adecuada para el proceso a controlar, puede acudir a sustituir el obturador o bien a emplear un posicionador con levas adecuadas que modifiquen la característica, punto éste que se estudiará más adelante.

Por otro lado, hay que hacer notar que la válvula isoporcentual tiene una «rangeability» superior a la de la válvula lineal (50 : 1 la primera contra 15 : 1 la segunda).

Así, pues, la elección se centra fundamentalmente en la válvula lineal o en la isoporcentual. El lector, en base a los estudios anteriores, puede sacar sus propias conclusiones sobre la dificultad de selección del tipo más adecuado. En gene-

TABLA 8.7 Selección de curvas características de las válvulas de control

Variable	Aplicaciones	Característica
Presión	Líquidos y gases en general Gas con retardo considerable entre la toma de presión y la válvula de control y con alta pérdida de carga de la válvula de control	Igual porcentaje (%)
		Lineal
Caudal	Margen de caudal amplio Margen de caudal estrecho y alta pérdida de carga de la válvula de control	Lineal
		Igual porcentaje (%)
Nivel	Pérdida de carga constante Aumento de la pérdida de carga de la válvula con la carga del sistema sobrepasando el doble la pérdida de carga mínima de la válvula	Lineal
		Apertura rápida
Temperatura	En general	Igual porcentaje (%)

ral, podemos afirmar que la válvula más empleada es la isoporcentual, en particular cuando el comportamiento dinámico del proceso no es bien conocido o bien se sospecha que la válvula está mal calculada por no ser fiables los datos del proceso que han servido de base al cálculo, o bien existen cambios de carga importantes.

En la tabla 8.7 se expone un resumen de criterios de selección de la curva característica de la válvula de control.

8.1.6 Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales

No existe actualmente ningún material que resista la corrosión de todos los fluidos, por lo cual en muchos casos es necesario utilizar materiales combinados cuya selección dependerá del medio específico donde deban trabajar.

La tabla 8.8 *a* permite seleccionar los materiales resistentes a la corrosión, debiendo señalar que sólo constituye una guía sin ser una recomendación exacta ya que la gran variedad de condiciones de servicio puede alterar las características de resistencia del material; realmente, la selección particular de un material específico dependerá de las pruebas experimentales a que se someta en el proceso.

Cuando el material resistente a la corrosión es caro o no adecuado, pueden utilizarse materiales de revestimiento, tales como plásticos, fluorocarbonos, elastómeros, vidrio, plomo y tantalio. Como es lógico, el revestimiento no debe fallar pues el fluido atacaría el metal base y la válvula se perforaría.

La erosión se produce cuando partículas a alta velocidad en el seno del fluido chocan contra la superficie del material de la válvula. Estas condiciones se encuentran en la vaporización de un líquido (*flashing*), con arena, fangos, etc. La posible presencia del fenómeno de la erosión ante el gran número de fluidos y la gran variedad de condiciones de servicio que se encuentran actualmente en la industria obliga a seleccionar el tipo y material del cuerpo y del obturador a fin de resistirla, en particular en condiciones extremas de presión diferencial y de temperatura.

TABLA 8.8 a Materiales resistentes a la corrosión

<i>Grado de resistencia</i>	<i>Velocidad de corrosión mm/año</i>	<i>Observaciones</i>
A	0,125	Pequeña velocidad de corrosión. Material adecuado
B	0,125-1,25	Materiales utilizados si es permisible una corrosión limitada, si los materiales de mayor resistencia son demasiado caros o si no existen materiales adecuados.
C	> 1,25	Materiales inaceptables

TABLA 8.8 a (Continuación)

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones Temperatura (°C)	13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpen-ter 20	Inconel	Monel	Haste-lloy B	Haste-lloy C	Haste-lloy D	Alumi-nio	Níquel	Cobre	Plomo	Titanio
Ácido clorhídrico	≤ 1	≤ 30	C	C	B	B	B	B	B	A	A	B	B	B	B	B	A
		≤ 50	C	C	C	B	≤ ^B 80° C	B	B	A	A	B	C	B	C	C	A
		< punto ebullición	C	C	C	B	C	B	B	A	> ^C 70° C	C	C	B	C	C	C
	1 ~ 5	≤ 30	C	C	B	B	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B	A
		≤ 50	C	C	C	B	B	B	≤ ^B 75° C	A	≤ ^B 70° C	C	C	B	C	C	A
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C
	5 ~ 10	≤ 30	C	C	C	B	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B	B
		≤ 70	C	C	C	≤ ^B 50° C	C	C	C	A	≤ ^B 50° C	C	C	C	C	C	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
	10 ~ 20	≤ 30	C	C	C	B	C	B	B	A	A	B	C	B	B	B	B
		≤ 70	C	C	C	≤ ^B 50° C	C	C	C	A	≤ ^B 50° C	C	C	C	C	B	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
	> 20	≤ 30	C	C	C	C	C	C	C	A	B	C	C	B	C	< ^B 30%	C
		≤ 80	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	< ^B 30%	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C

TABLA 8.8 a (Continuación)

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones Temperatura (°C)	13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpen-ter 20	Inconel	Monel	Haste-lloy B	Haste-lloy C	Haste-lloy D	Alumi-mio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio
Hidróxido sódico	≤ 10	≤ 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	C	A	B	B	A
		≤ 90	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C	A	B	≤ ^B 90° C	A
		< punto ebullición	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C	A	B	C	A
	10 ~ 30	≤ 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	B	B	A
		≤ 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	≤ ^B 80° C	C	A
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	A
	30 ~ 50	≤ 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	A
		≤ 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	B
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	B
	50 ~ 70	≤ 30	C	A	A	B	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	A
		≤ 80	C	≤ ^A 100° C	≤ ^A 100° C	C	≤ ^A 100° C	A	A	—	—	B	C	A	C	C	B
		< punto ebullición	C	≤ ^B 150° C	≤ ^B 150° C	C	B	A	A	—	—	B	C	A	C	C	B
	70 ~ Anhidro	≤ 260	C	B	B	C	B	B	B	—	—	C	C	A	C	C	B
	Solución NaOH	≤ 480	C	C	C	C	C	B	B	—	—	C	C	A	C	C	B
Amoniaco	< 28	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—
Amoniaco vapor	< 100	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—
Amoniaco anhidro	100	< 300	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	C	A	A

TABLA 8.8 a (Continuación)

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones Temperatura (°C)	13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpen-ter 20	Inconel	Monel	Haste-lloy B	Haste-lloy C	Haste-lloy D	Alumi-nio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio	
Acido sulfúrico	CIH seco		≤200° C	≤200° C	≤200° C	≤150° C	C	≤500° C	≤200° C	≤450° C	≤450° C	≤400° C	C	≤500° C	≤100° C	≤200° C	C	
		≤ 0,25	≤ 30	C	A	A	A	A	B	A	A	A	B	B	B	A	A	
		0,25 ~ 5	≤ 50	C	B	A	≤ 80° C	A	B	B	A	A	≤ 80° C	C	B	B	A	—
			< punto ebullición	C	C	B	B	A	B	C	A	B	B	C	C	C	A	—
			≤ 30	C	B	B	A	A	B	B	A	A	A	C	B	B	A	A
		5 ~ 25	≤ 80	C	C	≤ 50° C	A	A	C	B	A	A	A	C	B	B	A	—
			< punto ebullición	C	C	C	B	B	C	C	A	B	B	C	C	C	A	—
			≤ 30	C	C	B	A	A	B	B	A	A	A	C	B	B	A	B
		25 ~ 50	≤ 50	C	C	C	≤ 80° C	A	C	B	A	≤ 80° C	≤ 80° C	C	B	B	A	—
			< punto ebullición	C	C	C	B	≤ 80° C	C	C	A	B	B	C	C	C	A	—
			≤ 30	C	C	C	A	A	—	B	A	A	A	C	B	B	A	C
		50 ~ 60	≤ 50	C	C	C	≤ 80° C	A	—	B	A	≤ 65° C	≤ 80° C	C	B	B	A	—
			< punto ebullición	C	C	C	C	> 60° C	—	C	≤ 120° C	> 90° C	B	C	C	C	A	—
			≤ 30	C	C	C	A	A	—	B	A	A	A	C	B	B	A	B
		60 ~ 75	≤ 60	C	C	C	≤ 80° C	B	—	B	≤ 95° C	≤ 70° C	A	C	B	B	≤ 120° C	—
			< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	≤ 120° C	C	A	C	C	C	B	—
			≤ 30	C	C	C	A	A	—	B	A	A	A	C	B	B	A	C
		75 ~ 95	≤ 60	C	C	C	A	B	—	B	≤ 80° C	≤ 70° C	A	C	B	B	≤ 120° C	—
			< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	≤ 120° C	C	A	C	C	C	B	—
			≤ 30	C	B	B	A	A	B	C	A	A	A	C	C	C	A	C
			≤ 50	C	C	B	A	≤ 80° C	—	C	≤ 80° C	≤ 65° C	A	C	C	C	≤ 120° C	C
			< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	> 95° C	> 95° C	A	C	C	C	≤ 200° C	C

TABLA 8.8 a (Continuación)

Fluido corrosivo	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpen-ter 20	Inconel	Monel	Haste-lloy B	Haste-lloy C	Haste-lloy D	Alumi-nio	Níquel	Cobre	Plomo	Titanio
	Concentración (%)	Temperatura (°C)															
Ácido sulfúrico	95 ~ 100	≤ 30	C	A	A	A	A	—	C	A	A	A	C	C	C	—	C
		≤ 70	C	B	B	A	≤ 50° C	—	C	B	B	A	C	C	C	—	C
		< punto ebullición	C	C	C	A	≤ 100° C	—	C	C	C	≤ 150° C	C	C	C	—	C
	> 100	≤ 30	C	A	A	—	A	—	C	C	C	—	B	C	C	—	—
		≤ 60	C	A	A	—	A	—	C	C	C	—	C	C	C	—	—
		< punto ebullición	C	≤ 200° C	≤ 200° C	—	≤ 200° C	—	C	C	C	—	C	C	C	—	—
Ácido nítrico	≤ 0,5	≤ 30	A	A	A	A	A	A	C	C	A	C	B	C	C	C	A
		≤ 60	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
		< punto ebullición	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
	0,5 ~ 20	≤ 30	A	A	A	A	A	A	C	C	A	C	C	C	C	C	A
		≤ 60	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
		< punto ebullición	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	C	C	C	C	A
	20 ~ 40	≤ 30	B	A	A	A	A	A	C	C	A	C	C	C	C	C	A
		≤ 60	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B
	40 ~ 70	≤ 30	B	A	A	A	A	A	C	C	A	C	C	C	C	C	A
		≤ 80	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B
	70 ~ 80	≤ 30	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	B	C	C	C	A
		≤ 70	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B

TABLA 8.8 a (Continuación)

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones Temperatura (°C)	13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpen-ter 20	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Alumi-nio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio
Ácido nítrico	80 ~ 95	≤ 30	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	A	C	C	C	A
		≤ 70	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B
	> 95	≤ 30	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	A	C	C	C	B
		≤ 50	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
Ácido ortofosfórico	≤ 5	≤ 30	C	A	A	A	A	A	B	A	A	A	C	B	B	A	A
		≤ 60	C	C	A	A	A	B	≤ 70° C	A	A	A	C	C	B	≤ 95° C	B
		< punto ebullición	C	C	A	A	A	C	C	A	A	A	C	C	C	B	B
	5 ~ 25	≤ 30	C	B	A	A	A	A	B	A	A	A	C	B	B	A	A
		≤ 90	C	C	A	A	A	B	B	A	A	A	C	C	≤ 60° C	A	C
		< punto ebullición	C	C	A	A	A	C	C	A	A	A	C	C	C	B	C
	25 ~ 50	≤ 30	C	C	A	A	A	A	B	A	A	A	C	B	B	A	A
		≤ 90	C	C	A	A	A	B	B	A	A	B	C	B	≤ 60° C	A	C
		< punto ebullición	C	C	B	A	A	C	C	A	A	B	C	C	C	B	C
	50 ~ 85	≤ 30	C	C	A	A	A	B	B	A	A	A	C	C	B	A	C
		≤ 90	C	C	≤ 120° C	A	A	B	B	A	≤ 65° C	≤ 65° C	C	C	≤ 50° C	A	C
		< punto ebullición	C	C	C	A	A	C	C	A	C	C	C	C	C	≤ 205° C	C
SO ₂ húmedo	≤ 30	C	A	A	C	A	C	C	C	C	A	C	A ^(Sólo vapor)	B	C	B	A
	≤ 100	C	B	A	C	A	C	C	C	C	A	C	A ^(Sólo vapor)	B	C	C	B
Ácido sulfuroso	≤ 200	C	C	A	C	A	C	C	C	C	A	C	A ^(Sólo vapor)	B	C	C	B
SH ₂ húmedo			C	B	B	A	A	—	B	—	A	—	A	B	C	—	A

(Cortesía de Yamatake-Honeywell)

TABLA 8.8 b Materiales termoplásticos resistentes a la corrosión

Tipo	Acidos débiles	Acidos fuertes	Acidos oxidantes	Alcalis débiles	Alcalis fuertes	Disolventes orgánicos (100 %)	Disolventes orgánicos	Gas agresivo Cl ₂ , SO ₂
Cloruro Polivinilo (PVC)	√	√	√	√	√	X	√	√
Cloruro Polivinilo Clorinado (CPVC)	√	√	√	√	√	X	√	√
Polipropileno (PP)	√	√	X	√	√	*	√	X-√
Polipropileno fibra vidrio (PPG)	√	√	X	√	*	*	√	X-√
Fluoruro Polivinilideno (PVDF)	√	√	√	√	*	√	√	X-√

√ = Bueno

* = Admisible (alguna influencia en el material)

X = No recomendado

Los materiales termoplásticos son resistentes a la corrosión frente a muchos materiales químicos (ácido sulfúrico, ácido nítrico, etc.) y poseen unas buenas características dieléctricas (de 0,9 a 1,18 kV/m con el ensayo ASTM D149). No resisten las vibraciones mecánicas, pero pueden ser el material de recubrimiento de metales para manejar las dos condiciones, corrosión y vibraciones. En la tabla 8.8 b pueden verse sus características.

Frente a la erosión los materiales termoplásticos tienen el doble de duración que los metálicos en los casos en que el caudal no supera los 3 m/s y el tamaño de las partículas flotantes en el líquido no supera los 300 mesh. El desgaste por abrasión por día para dos materiales termoplásticos comparado con el hierro fundido es:

Cloruro de Polivinilo (PVC)	0,10 gramos/día	0,07 cm ³ /día
Polipropileno (PP)	0,13 gramos/día	0,14 cm ³ /día
Hierro fundido	7,85 gramos/día	1,12 cm ³ /día

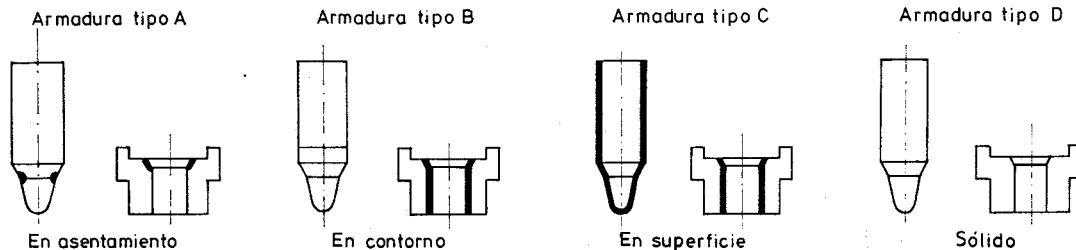
Figuran a continuación, en orden decreciente de resistencia a la erosión, los tipos de válvulas más adecuados.

1. Válvula en ángulo de simple asiento, con obturador contorneado — fluido tendiendo a cerrar.
2. Válvula de jaula de cierre estanco.
3. Válvula de globo de simple asiento con obturador contorneado.
4. Válvula de globo de simple asiento con obturador en V.
5. Válvula de jaula equilibrada.
6. Válvula de globo de doble asiento con obturador contorneado.
7. Válvula de globo de doble asiento con obturador en V contorneado.

TABLA 8.9 Materiales especiales resistentes a la erosión

Material DIN	Denominación	C	Cr	Ni	Fe	Cu	Nb	W	Co	Si	Mn	B	Dureza a 20° C	Dureza a 400° C	Temp. máx. de servicio °C
1.8877	Stellite n.º 6	1,1	30	3,0	3,0	—	—	4,5	66	1,5	—	—	38-44	33	500
1.4034	—	0,45	13	—	Equil.	—	—	—	—	1,0	1,0	—	54-57	—	300
1.4540	17-4 PH	0,05	17	4,0	Equil.	4,0	0,3	—	—	1,0	1,0	—	40-47	33-36	450
—	Colmonoy n.º 5	0,65	11,5	77	4,25	—	—	—	—	3,75	—	2,5	45-50	40-46	700

Tipos de partes internas resistentes a la erosión



Nótese que la válvula de doble asiento sometida a una alta presión diferencial tiene una velocidad de fuga del fluido elevada cuando está próxima a la posición de cierre, con lo cual los efectos de la erosión son mayores que en la válvula de simple asiento que casi no tiene fugas.

Asimismo un obturador contorneado es más adecuado que uno en V; éste distribuye el flujo de fluido a través de uno o dos de los orificios en V mientras que el primero lo hace alrededor de la periferia del obturador.

La válvula en ángulo es más favorable que la de globo ya que su cuerpo y su obturador no están sometidos a un tan alto grado de variación de recorrido de los filetes de fluido.

El obturador y el asiento son los más castigados por la erosión. Existen materiales especiales que recubren el obturador y el asiento o que los forman totalmente según sea el grado de protección deseado.

En la tabla 8.9 figuran estos materiales especiales resistentes a la erosión con el tipo de recubrimiento que se les aplica.

La utilización de estos materiales exige respetar unos límites de presión diferencial y de temperatura en el obturador y el asiento, que pueden verse en la tabla 8.10.

TABLA 8.10 Límites de presión diferencial (bar) y de temperatura °C

<i>Materiales</i>	<i>Vapor</i>	<i>Aire</i>	<i>Agua</i>	<i>Aceite</i>	<i>Fangos</i>	<i>Límites de temperatura °C</i>
4006/4059 4571/4581	10	20	10	15	—	— 270 a 450
4535 Endurecido	40	40	40	40	15	0 a 300
4540 (AP 417 Endurecido)	30	40	40	40	8	— 100 a 400
8877 (Stellite n.º 6) Superficie de asentamiento	20	20	20	20	8	— 270 a 450
8877 (Stellite n.º 6) Superf. recubierta totalmente	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	8	— 270 a 450
8877, Sólido (SL 22)	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	8	— 270 a 450
Colmonoy n.º 5 Superf. recubierta totalmente	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	8	— 100 a 700

8.1.7 Servomotores

Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90 % de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Los servomotores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

Las válvulas digitales disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas que, a su vez, son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Su respuesta es muy rápida (una compuerta 500 ms), y el grado de abertura depende de la combinación de las compuertas (8 compuertas darán 1, 2, 4, ..., 128 relaciones de capacidad). Aunque estas válvulas están limitadas a fluidos limpios y no corrosivos, presentan interés para el mando digital directo, si bien su velocidad de apertura instantánea no representa una ventaja esencial frente a las válvulas neumáticas industriales (5 a 20 segundos según el tamaño), y su coste es elevado.

8.1.7.1 Servomotor neumático

El servomotor neumático (fig. 8.11 a) consiste en un diafragma con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15 psi (0,2-1 bar), es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi (0,2 y 1 bar).

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se

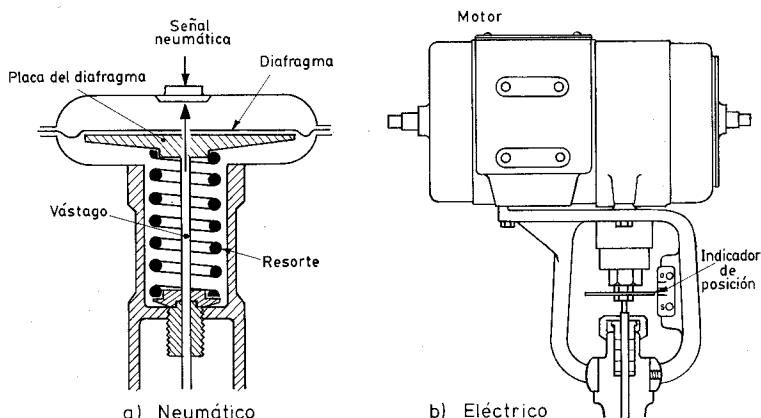


Fig. 8.11 Tipos de servomotores o actuadores.

llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

Idealmente, con una señal de 3 psi (0,2 bar) la válvula debe estar en la posición 0 de su carrera y para una señal de 15 psi (1 bar) en la posición 100. Asimismo, debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las causas siguientes:

1. Rozamientos en la estopada.
2. Histéresis y falta de linealidad del resorte que son poco importantes desde el punto de vista de este estudio práctico.
3. Área efectiva del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
4. Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
5. Fuerza adicional del servomotor necesaria para conseguir un cierre efectivo entre el obturador y el asiento (fuerza de asentamiento).

En la válvula existe un equilibrio entre estas diversas fuerzas que viene dado por la siguiente fórmula (fig. 8.12).

$$F_a \geq F_r + F_s + F_w + F_{b_1} \pm F_{b_2} + F_p$$

en la que:

F_a = Fuerza resultante obtenida por el servomotor, en kg

F_r = Fuerza de rozamiento, en kg

F_s = Fuerza de asentamiento, en kg

F_w = Peso del obturador, en kg

F_{b_1} = Fuerza elástica del fuelle de estanqueidad, en kg

F_{b_2} = Fuerza de desequilibrio del fuelle de estanqueidad, en kg

F_p = Fuerza estática y dinámica sobre el obturador, en kg

La fuerza resultante F_a obtenida por el actuador depende de la acción de la válvula (aire cierra, aire abre). En una válvula de acción directa (aire cierra) vale:

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1,02 - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02$$

con

$$F_{sr} = A_d F_2 \times 1,02$$

en la que:

A_d = área efectiva del diafragma, en cm^2

P_a = presión de aire sobre el diafragma, en bar

F_{sr} = fuerza debida a la compresión final del muelle a carrera total, en kg

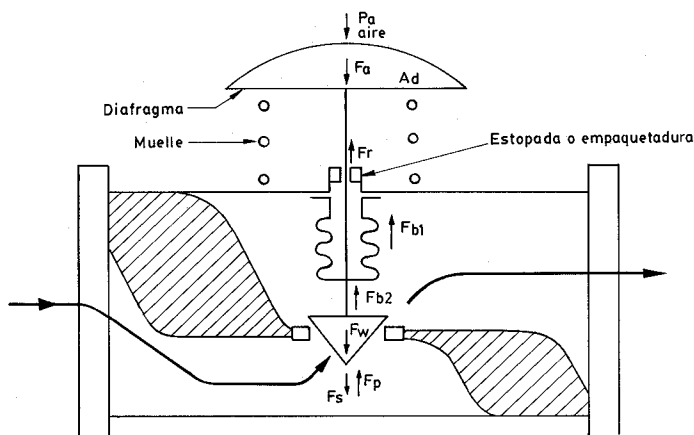
F_2 = compresión final del muelle a carrera total, en bar

En una válvula de acción inversa (aire abre) es:

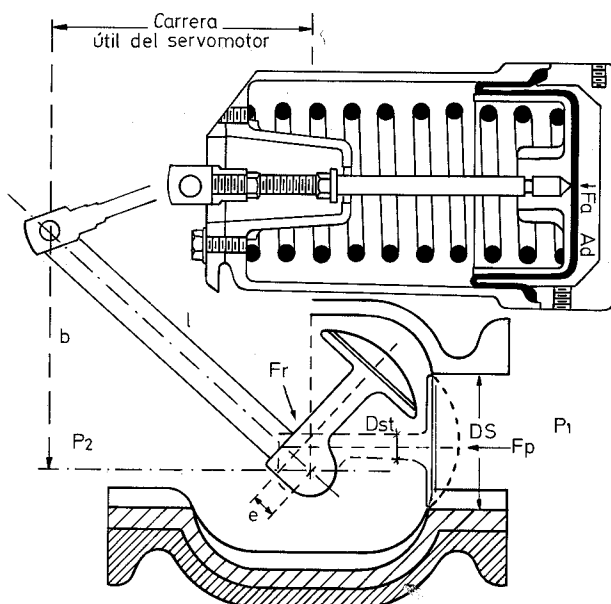
$$F_a = A_d F_1 \times 1,02$$

en la que F_1 = compresión inicial del muelle a carrera cero, en bar.

Los fabricantes de válvulas normalizan los tamaños de los servomotores de



a) Obturador de movimiento lineal



b) Obturador de movimiento circular

Fig. 8.12 Fuerzas que actúan en una válvula de control.

acuerdo con el tamaño de los cuerpos de las válvulas donde van montados. A veces ocurre que la fuerza que proporciona un servomotor estándar no es suficiente y es necesario utilizar un actuador sobredimensionado que para el mismo campo de compresión permita una mayor fuerza gracias a su mayor área efectiva en el diafragma y a la mayor carrera del vástago del obturador.

Hay que señalar que los muelles que se oponen al diafragma poseen las características siguientes:

Margen de compresión. Por ejemplo, 3 a 15 psi (0,2-1 bar).

Carrera.

Gradiente. Fuerza requerida para comprimir el muelle 1 cm.

Flexión total. Centímetros de longitud con que el muelle puede comprimirse hasta que las espiras se toquen y sea imposible una compresión ulterior.

Para asegurar que las espiras del muelle no se toquen entre sí se acostumbra a utilizar solamente entre el 80 y 85 % de la flexión total como máximo. Esto significa que restando de los cm de flexión total la carrera de la válvula queda como remanente la longitud de compresión inicial del muelle. Es decir, esta compresión inicial en centímetros multiplicada por el gradiente del muelle es igual a la fuerza que ejerce el resorte cuando no hay señal neumática en el servomotor.

En válvulas de acción directa (aire cierra) cuanto más bajo sea el campo de trabajo del muelle tanta más fuerza se dispondrá para la misma señal neumática. Disminuyendo la compresión inicial del muelle se obtiene una compresión final más baja.

La fuerza de rozamiento F_r en la estopada se produce entre el vástago de la válvula y la empaquetadura y depende del tipo de empaquetadura (teflón, teflón-asbestos, grafito-asbestos, etc.), de su longitud, de la compresión a que está sometida, de la temperatura, de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico, del estado de la superficie del vástago..., etc. Es prácticamente imposible calcular exactamente estas influencias en una válvula de control. Una regla práctica da los valores siguientes:

Tipo de empaquetadura	Tamaño válvula	Rozamiento
Apriete con resorte	$\frac{1}{2}$ a $1\frac{1}{4}$ "	5 kg
	$1\frac{1}{2}$ a $2\frac{1}{2}$ "	10 kg
	3 a 12"	15 kg
Ajuste manual	$\frac{1}{2}$ a $1\frac{1}{4}$ "	10 kg
	$1\frac{1}{2}$ a $2\frac{1}{2}$ "	20 kg
	3 a 12"	30 kg

Las válvulas con obturador de movimiento circular y con servomotor de acoplamiento directo con oscilación libre del vástago, sólo tienen un rozamiento en la estopada en la superficie en contacto con el árbol de giro del obturador.

La fuerza de asentamiento permite cerrar la válvula y conseguir que la fuga de fluido sea mínima: su valor depende del grado de mecanización del asiento y del obturador.

La fuerza de asentamiento en kg equivale aproximadamente a 0,25-0,75 veces la circunferencia en cm del aro del asiento. Puede aplicarse la fórmula general con un valor medio de 0,5:

$$F_s = 0,5 \pi D_s$$

en la que:

F_s = fuerza de asentamiento, en kg

D_s = \varnothing interior del asiento, en cm

En las válvulas con obturador de movimiento circular, la fuerza de asentamiento se ve facilitada por la relación de brazos de palanca del acoplamiento entre el vástago del servomotor y el árbol del obturador. Esta relación es de 3 o más, con lo cual el servomotor puede ser más pequeño que en las válvulas con obturador de movimiento lineal. Por otro lado, el rozamiento en posición de cierre de las válvulas de obturador excéntrico y de mariposa sólo se presenta para ángulos de apertura muy pequeños, mientras que en las válvulas de globo y de bola el elemento de cierre está en contacto con el asiento, con lo que el rozamiento es más importante.

El *peso del obturador* F_w sólo se considera cuando la válvula está en posición vertical.

La *fuerza elástica* F_{b_1} del *fuelle de estanqueidad* obliga a una fuerza adicional en el servomotor para comprimir o tensionar los fuelles.

La *fuerza de desequilibrio* F_{b_2} del *fuelle de estanqueidad* es igual al producto del área efectiva del fuelle por la presión del fluido existente en la válvula de control.

Las *fuerzas estáticas y dinámicas* F_p en las válvulas de control son debidas en su mayor parte a la presión del fluido sobre el obturador. En la práctica, las fuerzas dinámicas no se conocen perfectamente debido a la falta de datos de ensayo suficientes. Entre las mismas figuran el empuje lateral del fluido, y el fenómeno de succión del obturador cuando éste se aproxima al asiento debido al aumento de velocidad que se produce. La influencia de las fuerzas dinámicas es casi despreciable frente a las demás fuerzas estáticas en particular con el obturador en la posición de cierre. Estas fuerzas varían según el tipo de válvula:

En una válvula de simple asiento en la posición de cierre, la presión de salida P_2 es generalmente igual a cero. Examinando la figura 8.13 a puede verse:

$$F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02 - (A_s - A_{st}) P_2 \times 1,02$$

y si $P_2 = 0$ resulta $F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02$

en las que:

$$A_s = \text{Área del asiento en cm}^2 = \frac{\pi D_s^2}{4}$$

$$A_{st} = \text{Área transversal del vástago en cm}^2 = \frac{\pi D_{st}^2}{4}$$

$$P_1 = \text{Presión de entrada en bar}$$

$$P_2 = \text{Presión de salida en bar}$$

y para una válvula de acción inversa sería

$$F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1,02 - A_s P_2 \times 1,02 = A_s (P_1 - P_2) \times 1,02 - A_{st} \cdot P_1 \times 1,02$$

y si $P_2 = 0$ $F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1,02$

En una válvula con obturador equilibrado (fig. 8.13 b)

$$F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02 - (A_p - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02 \quad \text{cuando} \quad P_2 = 0$$

en la que $A_p =$ área superior del obturador.

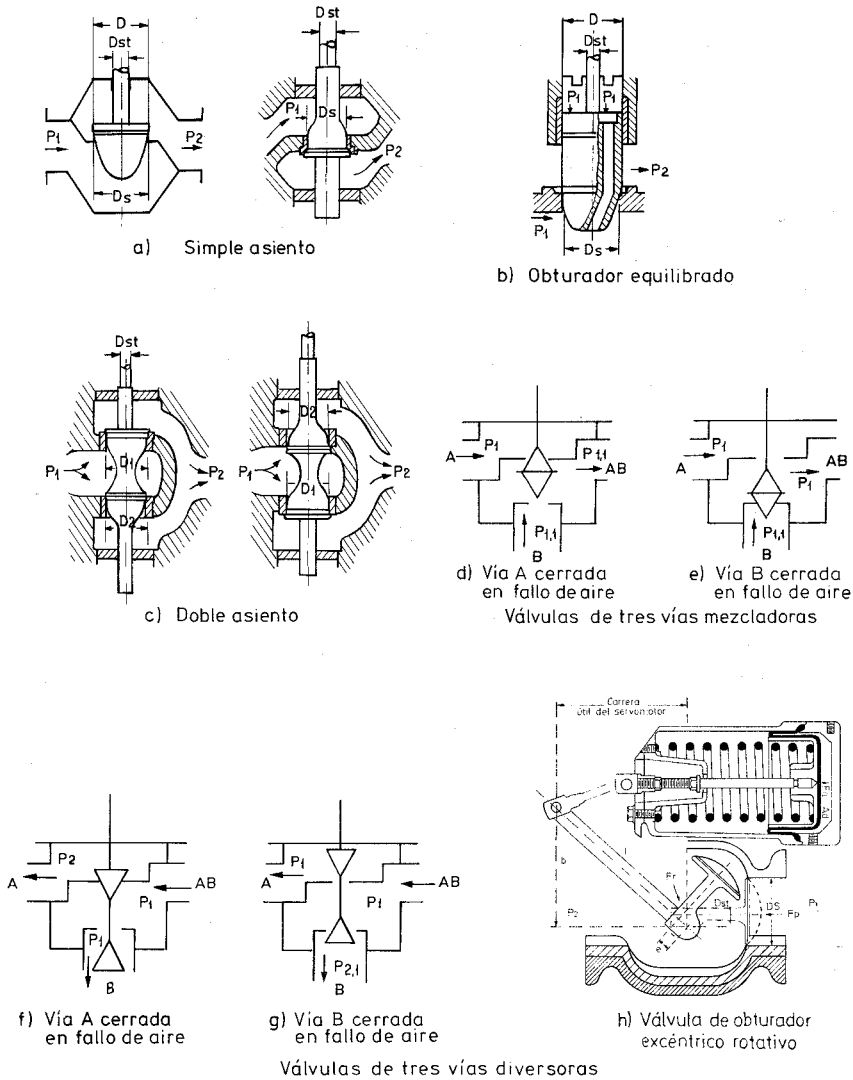


Fig. 8.13 Fuerzas estáticas sobre el obturador en varios tipos de válvulas.

En una válvula de doble asiento equilibrada (fig. 8.13 c) las áreas de los dos asientos son distintas para permitir que un obturador pase por el área libre del asiento del otro y así poder montar o desmontar la válvula. Luego:

$$F_p = (A_{s1} - A_{s2}) P_1 \times 1,02 \quad \text{con} \quad P_2 = 0$$

en la que:

A_{s1} = área del asiento superior, en cm^2

A_{s2} = área del asiento inferior, en cm^2

En las válvulas de tres vías mezcladoras se presentan los siguientes casos:

a) Servomotor de acción directa. — Vía A cerrada en fallo de aire (fig. 8.13 d)

$$F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1,02 - A_s \cdot P_{11} \times 1,02$$

o bien $F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1,02$ cuando $P_{11} = 0$.

La fuerza sobre el diafragma F_a , que debe equilibrar la fuerza sobre el obturador, es igual a $A_d \cdot F_1$ cuando la vía B está cerrada, siendo F_1 la compresión inicial del muelle a carrera cero del obturador en bar. Luego:

$$F_p = A_s \cdot P_{11} \times 1,02 - (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02$$

con $F_p = A_s \cdot P_{11} \times 1,02$ cuando $P_1 = 0$

y siendo F_{sr} = fuerza debida a la compresión final del muelle a carrera total, en kg

F_2 = compresión final del muelle a carrera total, en bar

resulta

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1,02 - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02$$

b) Servomotor de acción inversa. — Vía B cerrada en fallo de aire (fig. 8.13 e)

Cuando la vía B está cerrada $F_a = A_d \cdot F_1 \times 1,02$

Cuando la vía A está cerrada $F_a = A_d \cdot P_a - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02$

En las válvulas de tres vías diversoras pueden presentarse los siguientes casos:

a) Servomotor de acción inversa. — Vía A cerrada en fallo de aire (fig. 8.13 f)

Cuando la vía A está cerrada

$$F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02 - (A_s - A_{st}) \cdot P_2 \times 1,02$$

con

$$F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02 \quad \text{para} \quad P_2 = 0$$

y

$$F_a = A_d \cdot F_1 \times 1,02$$

Cuando la vía B está cerrada

$$F_p = (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02 - A_s \cdot P_{21} \times 1,02$$

con P_{21} la presión posterior en la vía B

con

$$F_p = (A_s - A_{st}) P_1 \times 1,02 \quad \text{si} \quad P_{21} = 0$$

y

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1,02 - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02$$

b) Servomotor de acción directa. — Vía B cerrada en fallo de aire (fig. 8.13 g)

Cuando la vía B está cerrada

$$F_a = A_d F_1 \times 1,02$$

Cuando la vía A está cerrada

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1,02 - F_{sr} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02$$

En las válvulas de obturador excéntrico rotativo (fig. 8.13 h) en posición de cierre, y con el fluido tendiendo a abrir, el equilibrio entre fuerzas da:

$$F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02 - (A_s - A_{st}) \cdot P_2 \times 1,02$$

y si $P_2 = 0$ resulta: $F_p = A_s \cdot P_1 \times 1,02$

y para una válvula con el fluido tendiendo a cerrar

$$F_p = (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02 - A_s \cdot P_2 \times 1,02 = A_s \cdot (P_1 - P_2) \times 1,02 - A_{st} \cdot P_1 \times 1,02$$

y si $P_2 = 0$ resulta: $F_p = (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02$

A señalar que para pasar de la fuerza F_p sobre el obturador, al par que debe ejercer el servomotor para cerrar la válvula, se tiene:

$$F_p \cdot l$$

Y el par que debe ejercer el servomotor para cerrar la válvula es:

$$\text{Par de cierre} = F_p \cdot e$$

siendo e la distancia entre el eje del obturador y su centro de giro.

La fuerza que ejerce el servomotor es $(F_p \cdot e)/l$, siendo l la longitud del brazo de unión entre el vástago del servomotor y el obturador.

Varios ejemplos aclararán este estudio al lector.

EJEMPLO 1

Determinar la fuerza máxima del servomotor en una válvula de control de las siguientes características:

$$A_d = 940 \text{ cm}^2$$

Campo de trabajo del muelle = 0,4-2 bar

Carrera del servomotor = 51 mm

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador en V

Ø interior del asiento = 5,08 cm. Área del asiento = 20,27 cm²

Carrera del obturador = 23,8 mm. Área transversal del vástago = 0,97 cm²

Peso del obturador = 8 kg

Acción inversa = aire abre

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de 23,8 mm

$$\frac{2 - 0,4}{51} \cdot 23,8 = 0,74 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es, pues,

$$2 - 0,74 = 1,26 \text{ bar}$$

y el margen de compresión será $1,26 - 2 \text{ bar}$

Luego la fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es

$$F_a = A_d F_1 = 940 \times 1,26 \times 1,02 = 1208 \text{ kg}$$

La fuerza de rozamiento es aproximadamente

$$F_r = 10 \text{ kg (válvulas de } 1\frac{1}{2} \text{ a } 2\frac{1}{2}''\text{)}$$

La fuerza de asentamiento

$$F_s = 0,5 \pi \cdot 5,08 \text{ cm} = 8 \text{ kg}$$

El peso del obturador $F_w = 8 \text{ kg}$

La fuerza estática sobre el obturador

$$F_p = (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02 = (20,27 - 0,97) \cdot P_1 \times 1,02$$

y finalmente

$$1208 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + (20,27 - 0,97) P_1 \times 1,02$$

resolviendo esta ecuación $P_1 = 58,8 \text{ bar}$ (60 kg/cm^2) es decir, la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido será de $58,8 \text{ bar}$ (60 kg/cm^2).

EJEMPLO 2

Con la misma válvula, pero de acción directa (abre en fallo de aire) y con un campo de trabajo de $0,2$ a 1 kg/cm^2 y una presión máxima de aire de $1,4 \text{ kg/cm}^2$, resulta:

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del obturador de $23,8 \text{ mm}$

$$\frac{(1 - 0,2) \cdot 23,8}{51} = 0,37 \text{ bar}$$

Compresión final del muelle $0,2 + 0,37 = 0,57 \text{ bar}$

Margen de compresión $0,2 - 0,57 \text{ bar}$

$$F_a = A_d (P_a - F_2) \times 1,02 = 940 \cdot (1,4 - 0,57) \times 1,02 = 795,8 \text{ kg}$$

$$F_r = 10 \text{ kg} \quad F_s = 8 \text{ kg} \quad F_w = 8 \text{ kg}$$

$$F_p = A_s \cdot P_1 = 20,27 \cdot P_1 \times 1,02$$

$$795,8 \text{ kg} = F_a \geq 10 + 8 + 8 + 20,27 \cdot P_1 \times 1,02$$

resolviendo esta ecuación resulta:

$$P_1 = 37,2 \text{ bar} = 37,9 \text{ kg/cm}^2$$

que es la máxima presión de cierre o la presión de entrada del fluido.

EJEMPLO 3

Válvula de obturador excéntrico rotativo de las siguientes características:

Campo de trabajo del muelle = 0,4 a 1 bar

Carrera del servomotor = 89 mm

Área del servomotor = 90 cm²

Válvula de tamaño 2" (50 mm) con obturador excéntrico rotativo

Diámetro interior del asiento = 5,2 cm

Área del asiento = 21,2 cm²

Área transversal del brazo del obturador = 1 cm²

Giro del obturador = 60°

Longitud del brazo del obturador = 5,5 cm

Distancia entre el eje del árbol y el eje del obturador = 1,8 cm

Acción inversa = aire abre (sin aire cierra)

El movimiento lineal del vástago del servomotor equivalente al desplazamiento angular total del obturador es:

$$5,5 \cdot \cos 60^\circ = 2,75 \text{ cm}$$

Margen de trabajo del muelle para un recorrido del vástago del servomotor de 89 mm

$$\frac{1 - 0,4}{89} \cdot 27,5 = 0,18 \text{ bar}$$

La compresión inicial del muelle es:

$$1 - 0,18 = 0,82 \text{ bar}$$

y el margen de compresión será:

$$0,82 - 1 \text{ bar}$$

La fuerza del actuador con la válvula en posición de cierre es:

$$F = A \cdot P = 90 \cdot 0,82 \times 1,02 = 73,4 \text{ kg}$$

Y la fuerza equivalente a nivel del obturador es:

$$\frac{73,4 \cdot 5,5}{1,8} = 214 \text{ kg}$$

La fuerza estática sobre el obturador es:

$$224 = (A_s - A_{st}) \cdot P_1 \times 1,02 = (21,2 - 1) \cdot P_1 \times 1,02$$

Luego resulta

$$P_1 = 10,8 \text{ kg/cm}^2$$

es decir, que la máxima presión de entrada del fluido o de presión diferencial en la posición de cierre del obturador será de $10,8 \text{ kg/cm}^2$.

En el estudio anterior se han considerado principalmente las fuerzas que actúan sobre la válvula en su posición de cierre. El conocimiento de estas fuerzas es esencial para el correcto dimensionamiento de la válvula, de tal modo que los fabricantes de válvulas tienen tabulados los valores de la presión diferencial máxima del fluido que puede admitir la válvula en posición de cierre. Las presiones diferenciales superiores a este valor máximo impiden que la válvula cierre, lo cual puede ser inadmisibile en el proceso. Por lo tanto, es necesario consultar estas tablas para una correcta selección de la válvula.

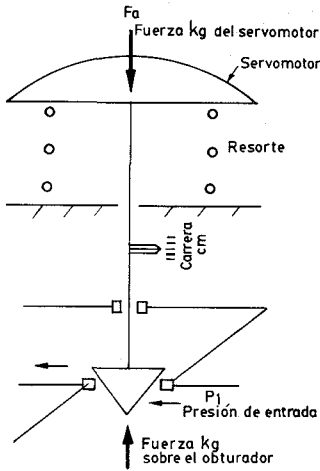
Cuando la válvula no está cerrada, la presión diferencial que el fluido ejerce sobre la misma varía con el grado de abertura. Esta variación distorsiona la relación lineal teórica entre la fuerza ejercida por el servomotor y la correspondiente carrera del obturador. Sea por ejemplo la válvula de la figura 8.14 *a*. En la posición de cierre, un presión diferencial de $3,3 \text{ kg}$ (50 psi) da lugar a una fuerza dirigida hacia arriba que el fluido ejerce sobre el obturador de 250 kg (630 lbs). A medida que la válvula abre, esta fuerza se reduce ya que el obturador se aleja del área de máxima caída de presión. En la figura 8.14 *b* puede verse un gráfico típico carrera-fuerza sobre el obturador.

El servomotor compensa esta fuerza además de vencer las restantes descritas en la ecuación de equilibrio de la válvula y, en particular proporciona una fuerza adicional para comprimir el resorte que asienta el obturador contra el asiento cuando la válvula está cerrada con un cierre casi estanco (ver normas de caudal de fuga en el apartado 8.1.7.3).

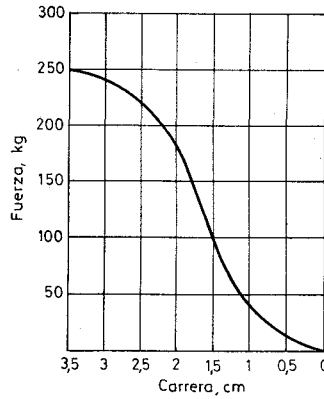
La curva de trabajo de la válvula (fig. 8.15 *a*) puede obtenerse sumando la curva carrera—fuerza sobre el obturador de la figura 8.14 *b* y la curva carrera—presión de aire sobre el diafragma correspondiente al campo de trabajo del muelle y considerando despreciables la fuerza de rozamiento y el peso del obturador y suponiendo la válvula sin fuelle de estanqueidad. Nótese que la figura 8.14 *b* se ha transformado para que en abscisas figure la presión sobre el diafragma de la válvula y que en la figura 8.15 *a* se ha incluido la fuerza de asentamiento.

En el ejemplo anterior se trataba de una válvula con aire cierra (sin aire abre); en una válvula con aire abre (sin aire cierra) la compresión inicial del resorte debe ser tal que proporcione los 250 kg de fuerza requerida para cerrar la válvula y una fuerza adicional de asentamiento de 100 kg , dando lugar a un resorte de campo de 9 a 20 psi , tal como indica la figura 8.15 *b*.

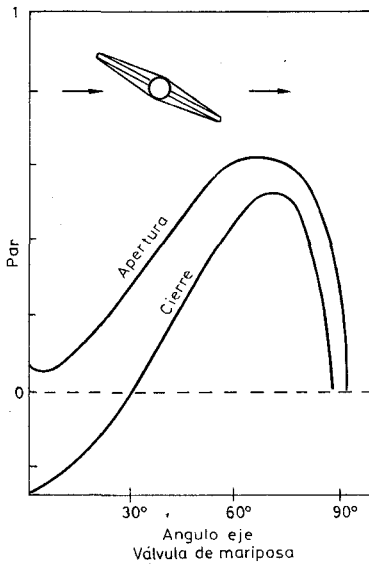
En las curvas resultantes de las figuras 8.15 *a* y *b* se observa que las variaciones de presión en el servomotor neumático no se corresponden linealmente con



a) Válvula



b) Gráfico carrera - fuerza



c/ Gráfico par-ángulo de giro en una válvula de mariposa

Fig. 8.14 Relación carrera-fuerza en el obturador de una válvula de control de acción directa.

la carrera. Sin embargo, podremos considerar con una cierta aproximación que la relación presión en membrana/carrera es casi lineal.

En el caso de una válvula con obturador de movimiento circular, el servomotor actúa con un par motor sobre el eje del obturador a través de un brazo de enlace. La correspondiente representación del campo de trabajo de la válvula

puede verse en la figura 8.15 c, que indica la relación entre el par motor y el desplazamiento angular del eje del motor. Se observa que siendo la conexión directa entre el vástago del servomotor y el brazo del obturador, el par varía, siendo el máximo cuando el giro del obturador es de 45° .

8.1.7.2 Servomotor eléctrico

El servomotor eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes (fig. 8.11 b). El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido (usualmente 1 minuto) para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa. Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor: todo-nada, flotante y proporcional.

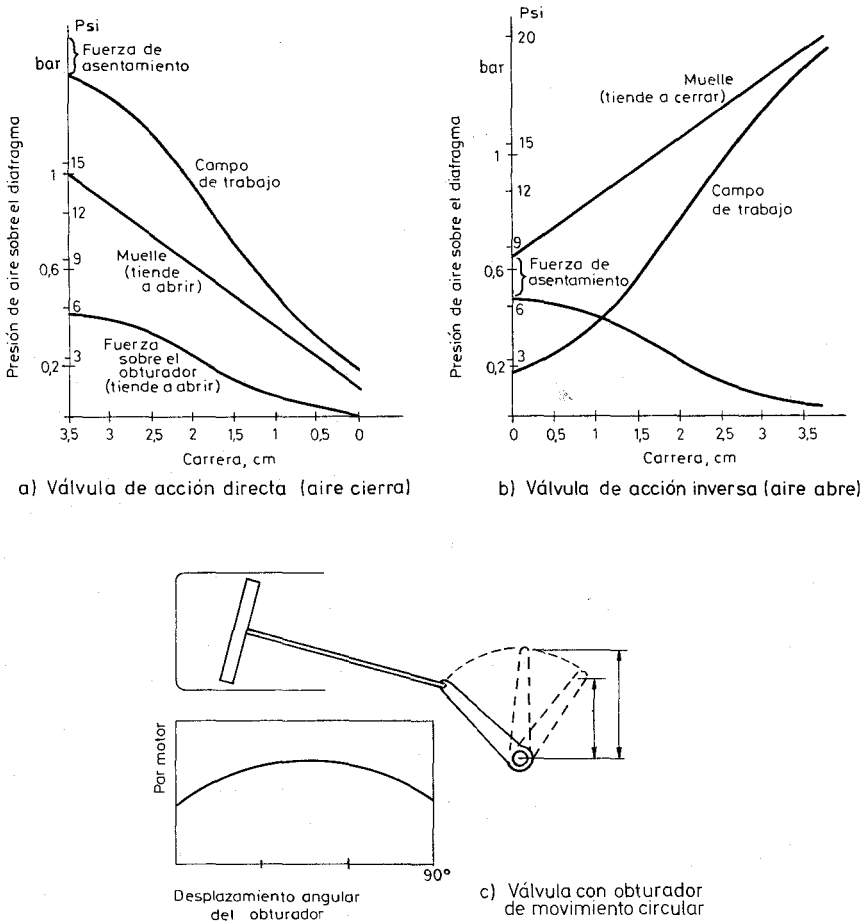


Fig. 8.15 Campo de trabajo de una válvula.

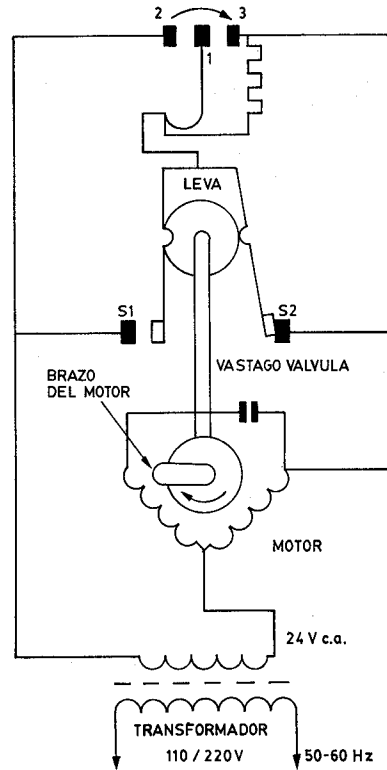


Fig. 8.16 Servomotor eléctrico para circuito todo-nada.

El circuito *todo-nada* representado en la figura 8.16 consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado al vástago de la válvula con una leva que fija el principio y el final de la rotación del motor gracias a dos interruptores de fin de carrera S_1 y S_2 . Según la posición del elemento de control (cierre entre los contactos 1-2 o entre 1-3) se excita el devanado de la derecha o el de la izquierda de la figura y el motor gira en uno u otro sentido hasta el final de su carrera.

El circuito *flotante* de la figura 8.17 consiste en un motor eléctrico bidireccional con interruptores de fin de carrera, acoplado al vástago de la válvula. El interruptor del controlador «flota» entre los dos contactos de accionamiento y es de disparo lento. El motor gira a derechas o a izquierdas según que el controlador cierre el contacto correspondiente y se para si el contacto móvil no toca ninguno de los fijos o bien cuando llega al final de su carrera.

El circuito *proporcional* de la figura 8.18 está formado por un motor bidireccional, un relé de equilibrio y un potenciómetro de equilibrio. El controlador es un potenciómetro cuyo brazo móvil se mueve de acuerdo con el valor de la variable del proceso.

El corazón del circuito es el relé de equilibrio. Consiste en una armadura ligera en forma de U que pivota en su centro entre dos bobinados de control; posee una lámina con un contacto móvil que flota entre dos contactos fijos conectados a las bobinas del motor a través de dos interruptores de fin de carrera.

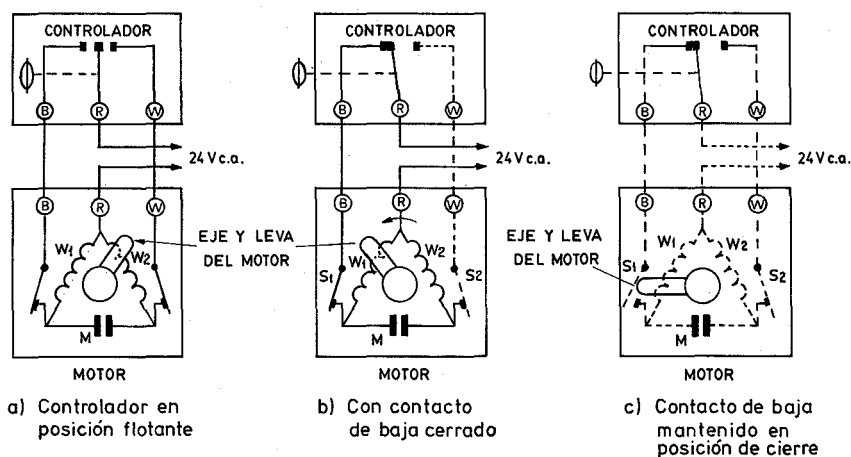


Fig. 8.17 Servomotor eléctrico flotante.

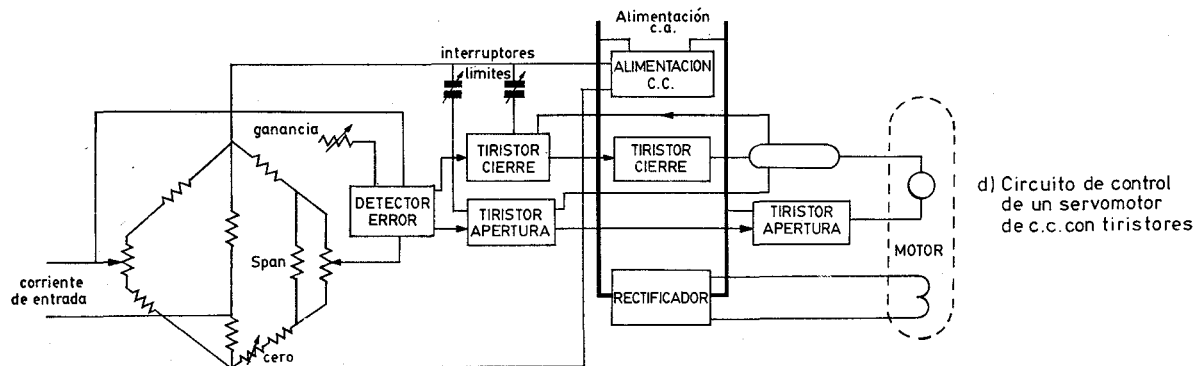
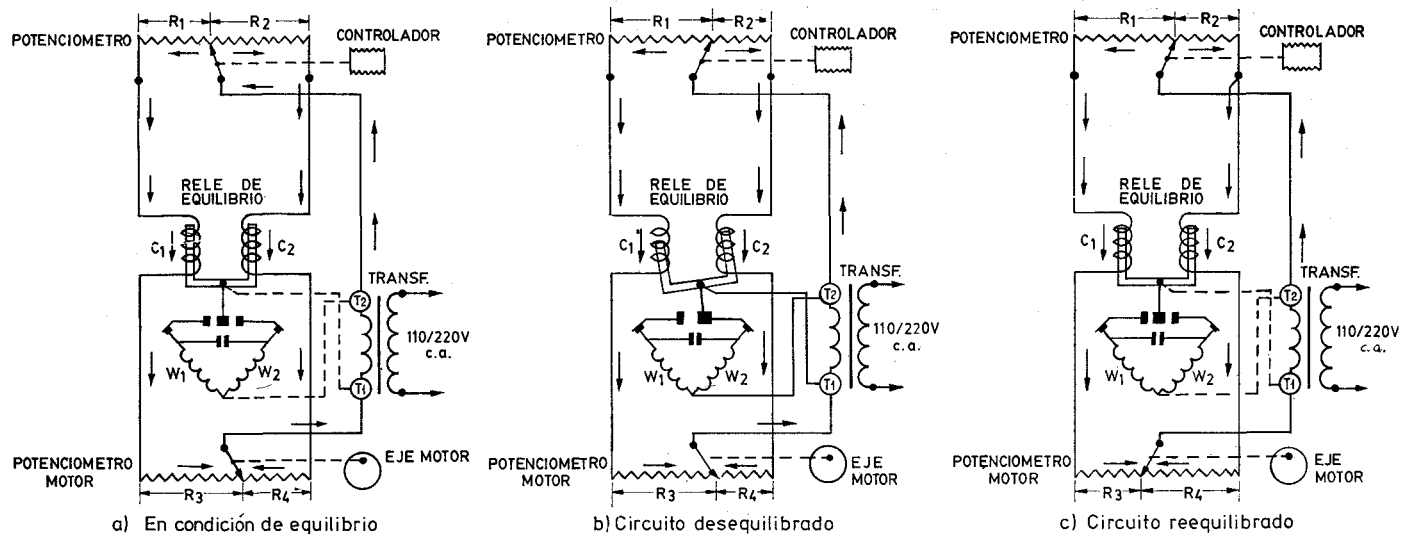
Si las posiciones de los brazos móviles en los dos potenciómetros, el del controlador y el del motor se corresponden, la corriente que fluye en los dos bobinados de control es la misma y la armadura del relé de equilibrio permanece neutra. Por el contrario, si varía la señal de salida del controlador, el brazo móvil de su potenciómetro cambia de posición, variando la corriente de paso entre los dos bobinados de control. La armadura bascula y el contacto móvil cierra el circuito de excitación de uno de los dos bobinados del motor con lo cual éste gira en el sentido correspondiente hasta que la posición del brazo móvil de su potenciómetro se corresponde con la del controlador; en este instante la armadura queda equilibrada y el motor se para.

El tiempo de recorrido del vástago varía de 15 s hasta 4 minutos y el par normal suele ser de 125 cm·kg. Cuanto más alto sea el par disponible, tanta más fuerza podrá hacerse en el vástago de la válvula para vencer las resistencias que actúan sobre la misma, en particular la presión diferencial provocada por el fluido que es máxima cuando la válvula está en posición de cierre. Análogamente al caso del servomotor neumático, los fabricantes tienen tabuladas las presiones diferenciales máximas admisibles con la válvula en posición de cierre.

El motor eléctrico descrito es perfectamente adecuado para servicio intermitente. Sin embargo, cuando las características de control exigen una modulación continua de la posición de la servoválvula, el conjunto motor-relé de equilibrio está sometido a un trabajo demasiado duro, y su vida útil de servicio queda considerablemente acortada.

En estas condiciones, el sistema más idóneo es el circuito de estado sólido a base de tiristores, a pesar de presentar los inconvenientes de su mayor coste y de la necesidad de disponer de dispositivos de protección adecuados contra las tensiones transitorias y los encendidos casuales.

Si el par necesario es grande, es preferible emplear un motor de c.c. que tiene la ventaja adicional de reducir la energía cinética del movimiento, gracias



d) Circuito de control de un servomotor de c.c. con tiristores

Fig. 8.18 Servomotor proporcional.

a la miniaturización del circuito impreso. Sin embargo, presenta el inconveniente de precisar inevitablemente de conmutador y de escobillas que influyen adversamente en su mantenimiento. Una solución típica puede verse en la figura 8.18 d. El campo de excitación del motor shunt de c.c. es alimentado con c.c. obtenida rectificando una fase de la c.a. de alimentación y el inducido o rotor bobinado es alimentado en media onda a través de tiristores que abren y cierran el circuito dotado de control del ángulo de conducción. El tiristor adecuado dispara cuando existe una señal de error entre la tensión de realimentación generada por el potenciómetro de posicionamiento de la válvula y la tensión derivada de la señal de control de entrada. Por lo tanto, el motor se moverá en el sentido adecuado para reducir y eliminar el error. Si la señal de error es pequeña, un circuito repetidor enciende el disparador adecuado para excitarlo más rápidamente durante un instante y ayudar así a vencer el rozamiento inicial que presenta la válvula en estado de reposo. Por otro lado, el grado de encendido es proporcional al error, por lo cual el motor decelera automáticamente cuando llega a la posición correcta y de este modo disminuye el rebasamiento que de otro modo se produciría al tender el sistema a buscar la posición de equilibrio.

Un perfeccionamiento del circuito anterior es la reducción del peso móvil del inducido del motor gracias a disponer los conductores del rotor en un circuito impreso que gira entre imanes permanentes.

Estos sistemas pueden alcanzar una precisión en el posicionamiento del motor de 0,5 % de la carrera, con velocidades del vástago de hasta 10 mm/segundo.

Algunos motores permiten el ajuste del par (30 % al 100 % del máximo), el ajuste de la velocidad (25 % al 100 % de la máxima) y el ajuste de la carrera, mediante un módulo electrónico de control CMOS. Este módulo se encarga también del giro del motor en la dirección correcta, y de la protección frente a objetos que puedan introducirse dentro de las partes internas de la válvula y que impidan el cierre, es decir, el asentamiento del obturador contra el asiento.

Los *servomotores hidráulicos* consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

8.1.7.3 Tipos de acciones en las válvulas de control

Según su acción, los cuerpos de las válvulas se dividen en válvulas de acción directa, cuando tienen que bajar para cerrar, e inversa cuando tienen que bajar para abrir. Esta misma división se aplica a los servomotores, que son de acción directa cuando aplicando aire, el vástago se mueve hacia abajo, e inversa cuando al aplicar aire el vástago se mueve hacia arriba (fig. 8.19).

Al combinar estas acciones se considera siempre la posición de la válvula

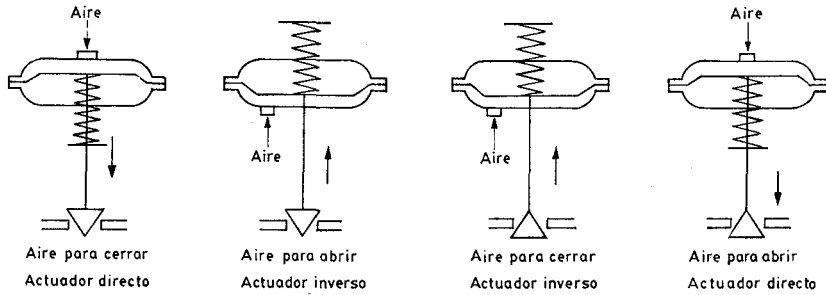


Fig. 8.19 Tipos de acciones en las válvulas de control.

sin aire sobre su diafragma, con el resorte manteniendo el diafragma y por tanto la válvula en una de sus posiciones extremas.

Cuando la válvula se cierra al aplicar aire sobre el diafragma o se abre cuando se quita el aire debido a la acción del resorte, se dice que la válvula sin aire abre o aire para cerrar (acción directa).

Al abrir la válvula cuando se aplica aire sobre el diafragma y se cierra por la acción del resorte cuando se quita el aire, se dice que la válvula sin aire cierra o aire para abrir (acción inversa).

Consideraciones análogas se aplican a las válvulas con servomotor eléctrico:

acción directa: con el servomotor desexcitado la válvula está abierta;

acción inversa: con el servomotor desexcitado la válvula está cerrada.

Al seleccionar la válvula es importante considerar estos factores desde el punto de vista de seguridad. Ninguna instalación está exenta de averías y una de ellas puede ser un fallo de aire o de corriente de alimentación con lo cual la válvula pasa naturalmente a una de sus posiciones extremas y ésta debe ser la más segura para el proceso. En las válvulas de acción inversa en las que el resorte del servomotor neumático o eléctrico asienta el obturador en el asiento, cerrando la válvula, es importante consultar las tablas del fabricante para comprobar la presión diferencial máxima con que la válvula podrá cerrar. Por ejemplo, en el caso de un intercambiador de calor en el que una alta temperatura sea perjudicial para el producto, interesará que la válvula de control cierre sin aire (válvula neumática) o bien cierre con el servomotor desexcitado (válvula eléctrica).

Con la válvula en posición de cierre, la fuga de fluido que se produce está normalizada en la norma ANSI B16.104-1976, en las siguientes clases:

- | | |
|-----------|---|
| Clase I | Fuga sin especificar |
| Clase II | 0,5 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal |
| Clase III | 0,1 % del caudal a apertura total en válvulas de doble asiento, y con asiento metal-metal |
| Clase IV | 0,01 % del caudal a apertura total en válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal |

Clase V $5 \cdot 10^{-4}$ ml agua/minuto/pulgada de diámetro orificio/psi de presión diferencial, (o $3 \cdot 10^{-3}$ ml agua/minuto/mm de diámetro orificio/bar de presión diferencial) válvulas de simple asiento, y con asiento metal-metal

Clase VI Fluido de prueba aire o N_2 con los caudales:

Diámetro nominal	Caudal de fuga
1"	0,15 cm ³ /min (1 burbuja/min)
1½"	0,30 cm ³ /min (2 burbujas/min)
2"	0,45 cm ³ /min (3 burbujas/min)
3"	0,90 cm ³ /min (6 burbujas/min)
4"	1,70 cm ³ /min (10 burbujas/min)
6"	4,00 cm ³ /min (25 burbujas/min)
8"	6,75 cm ³ /min (40 burbujas/min)

Para válvulas con asiento resiliente

8.1.8 Accesorios

La válvula de control puede tener acoplados diversos tipos de accesorios para realizar funciones adicionales de control. Entre los mismos se encuentran los que siguen.

8.1.8.1 Camisa de calefacción

Para los fluidos que exigen una temperatura mínima de trabajo (superior a la ambiente) por debajo de la cual se destruyen o se solidifican haciendo imposible el trabajo normal del proceso, es necesario disponer de camisas en el cuerpo o bien incluso en la tapa (tenga o no ésta fuelle de estanqueidad) para permitir la entrada continua de vapor de calefacción. Las conexiones de la camisa a la tubería de vapor son usualmente bridadas según normas DIN o ASA (fig. 8.20).

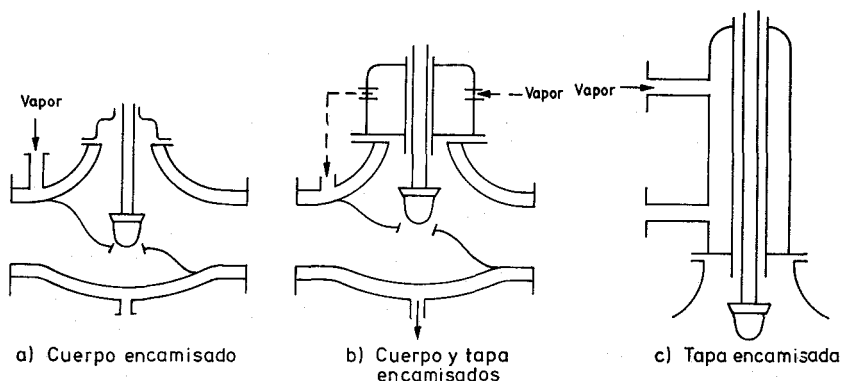


Fig. 8.20 Camisas de calefacción de la válvula.

8.1.8.2 Posicionador

Las fuerzas de desequilibrio que actúan en la válvula de control influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea errático e incluso inestable. Estas fuerzas que ya se estudiaron en el apartado 8.1.7.1 de servomotores neumáticos son esencialmente las siguientes:

1. Fuerza de rozamiento del vástago al deslizarse a través de la empaquetadura, variable según que el vástago esté en movimiento o parado y según el estado de su superficie.
2. Fuerza estática del fluido sobre el obturador que depende de la presión diferencial existente, o sea, del grado de abertura de la válvula y de las presiones anterior y posterior a la misma.

Estas fuerzas pueden compensarse empleando el posicionador. Esencialmente es un controlador proporcional de posición con punto de consigna procedente del controlador, variable entre 3 a 15 psi (o bien, 0,2-1 bar según sea la señal estándar adoptada).

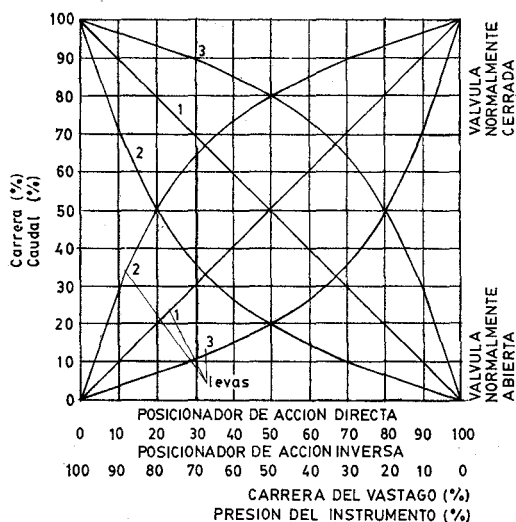
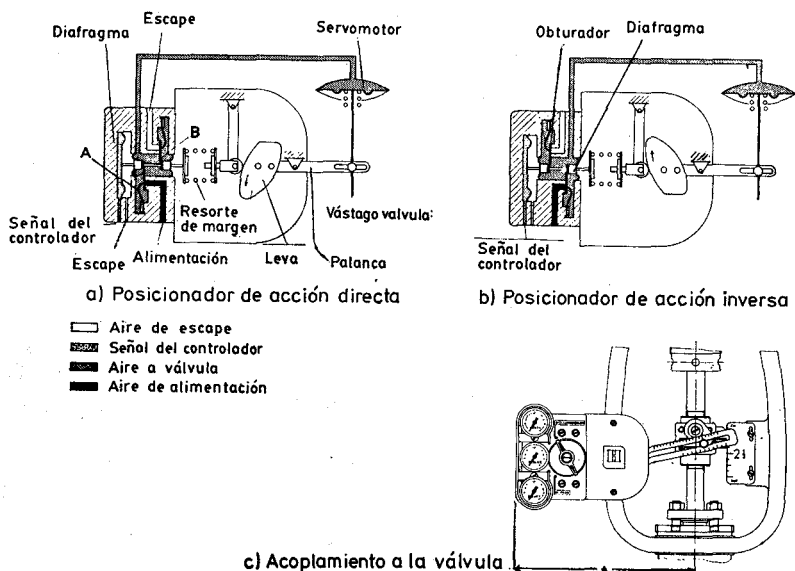
El posicionador compara la señal de entrada con la posición del vástago y si ésta no es correcta (existe una señal de error) envía aire al servomotor o bien lo elimina en el grado necesario para que la posición del vástago corresponda exactamente o bien sea proporcional a la señal neumática recibida; en este último caso el posicionador actúa además como un amplificador, por ejemplo señal de entrada 3-9 psi, señal de salida 3-15 psi, es decir, la válvula efectuará toda su carrera para la señal 3-9 psi del controlador.

El posicionador es generalmente un instrumento neumático del tipo de equilibrio de fuerzas (fig. 8.21). La fuerza ejercida por un resorte de margen, comprimido por una leva unida al vástago de la válvula se equilibra contra la fuerza con que actúa un diafragma alimentado neumáticamente por un relé piloto. Por ejemplo, en la figura 8.21 *a* puede verse que cualquier aumento de la señal de salida del controlador de la variable o bien de la estación de mando manual según sea el caso, cambia la señal neumática del piloto, flexa el obturador A y permite la entrada de más aire a la cámara de la válvula. Al bajar el vástago, la nueva fuerza ejercida por el resorte de margen se equilibra con la ejercida por el diafragma del posicionador alimentado por el relé piloto.

Por el contrario, al disminuir la señal exterior, baja la señal del relé piloto y el obturador de escape B abre permitiendo el escape de aire de la cámara de la válvula hacia la atmósfera; sube así el vástago hasta que se equilibran de nuevo las fuerzas.

La forma de la leva determina la relación entre la señal de entrada y la posición del vástago y puede cambiar por completo la curva característica inherente de la válvula. En la figura 8.21 *d* se representan tres tipos de levas. La leva 1 no cambia la señal; la leva 2 cambia una característica lineal de la válvula a apertura rápida o bien transforma una característica de igual porcentaje a otra lineal; la leva 3 aproxima una característica lineal a una de igual porcentaje o bien un obturador de apertura rápida a uno lineal.

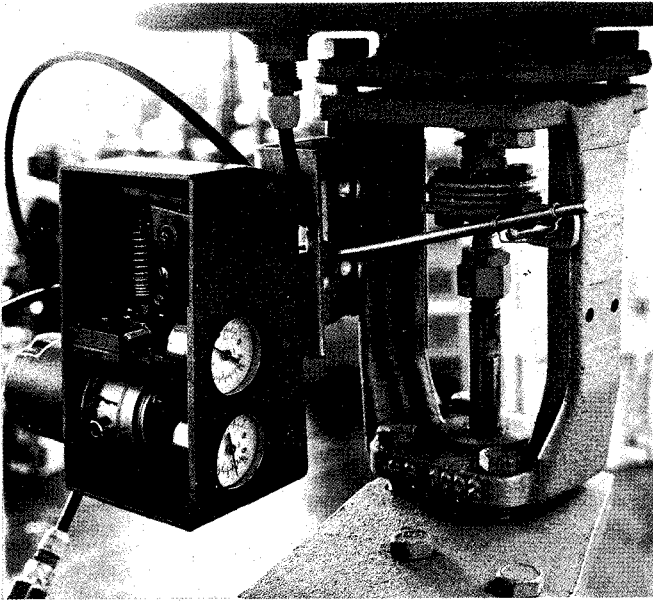
El posicionador dispone normalmente de tres manómetros para indicar las presiones del aire de alimentación, de la señal procedente del controlador y de la señal de salida del posicionador a la válvula. Dispone también de una válvula by-pass que permite la conexión directa entre la señal procedente del controlador



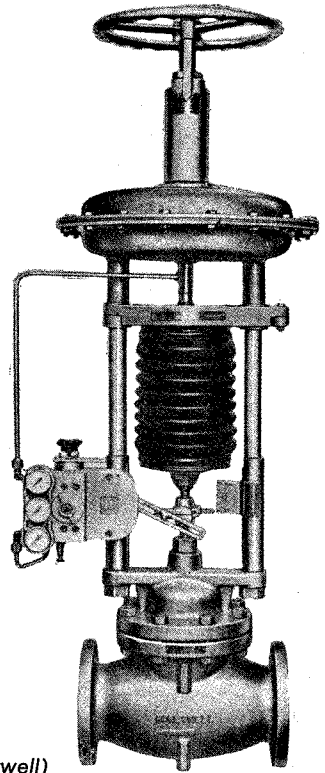
d) Tipos de levas

Fig. 8.21 Posicionador.

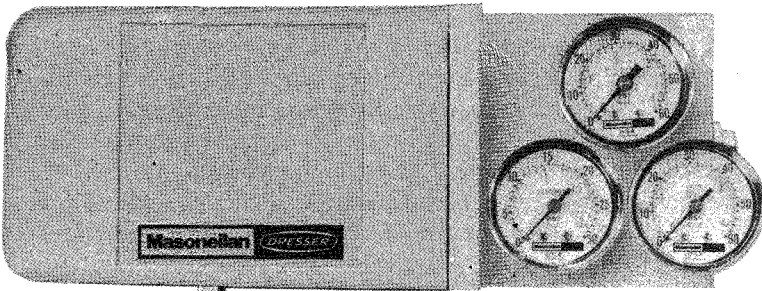
y la válvula. De este modo es posible desconectar el posicionador para una eventual reparación en campo sin necesidad alguna de interrumpir el trabajo de la válvula. El posicionador puede también cambiarse fácilmente de acción, de directa a inversa o viceversa permitiendo así combinaciones entre el controlador y la válvula.



(Cortesía
de Gulde)



(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de
Masoneilan)

Fig. 8.21 (Continuación)

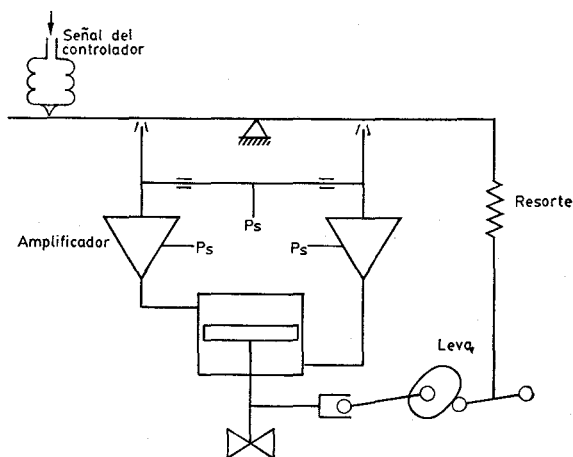


Fig. 8.22 Posicionador de doble acción

El posicionador descrito en la figura 8.21 es de simple acción. Existen posicionadores de doble acción (fig. 8.22) para actuar sobre cilindros neumáticos o cámaras de válvula con señales dirigidas a la parte superior e inferior del pistón o del diafragma respectivamente. Se llega a una posición de equilibrio cuando estas presiones son iguales.

Cuando la señal del controlador es electrónica o digital, el propio posicionador puede contener un convertidor para pasar de señal electrónica o digital a neumática (fig. 8.23).

En el posicionador electroneumático el transductor es del tipo de equilibrio de fuerzas y varía su presión de salida hasta que la fuerza producida por el sistema de realimentación equilibra la fuerza generada por la bobina electromagnética.

Puede verse en la figura que la bobina está excitada por la señal de corriente del controlador y que la señal de salida neumática es siempre proporcional a la señal electrónica.

El posicionador electroneumático digital funciona del modo siguiente:

Un motor paso a paso de c.c. es excitado por la señal de entrada en escalón y gira unos 200 pasos por revolución, con un total de 5 revoluciones para el campo de medida total. El eje del motor arrastra en su giro una tuerca que tensa un resorte. Este actúa sobre el conjunto tobera-obturador y el relé piloto, alimentando la válvula a una señal neumática proporcional a la señal de entrada. La realimentación es proporcionada por una palanca fijada al vástago de la válvula. La señal neumática a la válvula se mantiene en un valor fijo cuando el momento creado por el resorte del mecanismo de tornillo iguala el momento producido por el resorte de la palanca de realimentación.

El posicionador inteligente dispone de una interfaz con protocolos de comunicación HART o Fieldbus.

Proporciona las siguientes funciones estándar: registro del recorrido del vástago, rozamiento de la estopada, fuerza de asentamiento del obturador, velocidad del vástago, margen de trabajo, accionamiento libre de las alarmas, registro del tiempo de

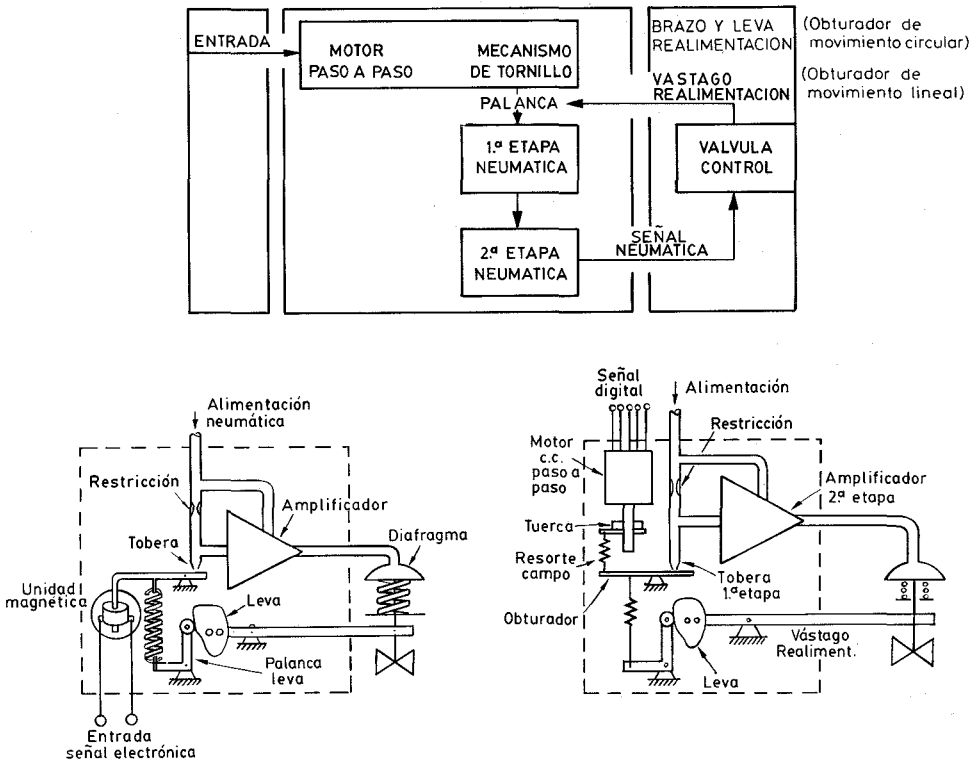


Fig. 8.23 Posicionador electroneumático.

funcionamiento, datos históricos de calibración, configuración de la válvula y base de datos iniciales del fabricante.

Otras funciones avanzadas son: mantenimiento predictivo que permite averiguar el estado de la válvula sin desmontarla (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o «firmas» del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago), diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y análisis de fallos.

Los posicionadores no sólo compensan los rozamientos en el movimiento del obturador sino que también son útiles para reducir el tiempo de transmisión de la señal en el bucle de control; tienen un volumen de entrada muy pequeño y una gran capacidad de caudal de aire. Su empleo es muy conveniente en el control de temperatura donde interesa reducir al máximo la histéresis y el tiempo de reacción del bucle.

Se utilizan también en el control de margen partido, donde, por ejemplo, una válvula trabaja con la señal de control de 3-9 psi y la otra de 9-15 psi, y en la caracterización de las válvulas de control. Su empleo no es conveniente en los lazos de recuperación rápida, tales como el caudal y la presión, donde disminuyen la constante de tiempo del servomotor y pueden dar lugar a inestabilidades en el lazo de control.

8.1.8.3 Volante de accionamiento manual

En los casos en que se exige la máxima seguridad de funcionamiento de una instalación y el proceso debe continuar trabajando independientemente de las averías que puedan producirse en el bucle de control es necesario mantener un control de la apertura de la válvula en condiciones de fallo de aire.

El volante de accionamiento manual permite realizar esta función; puede ser superior (fig. 8.24 a) o lateral (fig. 8.24 b).

8.1.8.4 Repetidor

El repetidor o booster (fig. 8.25) reduce el tiempo de transmisión de la señal en el bucle de control. Los retardos en la transmisión del controlador a la válvula son debidos a la resistencia interna del controlador, a la capacidad y resistencia del tubo de conexión y a la gran capacidad del servomotor de la válvula. El repetidor es esencialmente un convertidor P/P (presión neumática a presión neumática) de razón 1 : 1 alimentado con aire con un volumen de entrada muy pequeño y con una gran capacidad de entrega de caudal de aire. Estas características le permiten aumentar varias veces la velocidad de apertura o de cierre de la válvula, al suprimir prácticamente la gran capacidad de ésta. Como dato orientativo puede indicarse que una válvula de 1" dotada de repetidor necesita sólo 1,5 segundos para efectuar su carrera completa, mientras que una de 2" necesita 6 segundos.

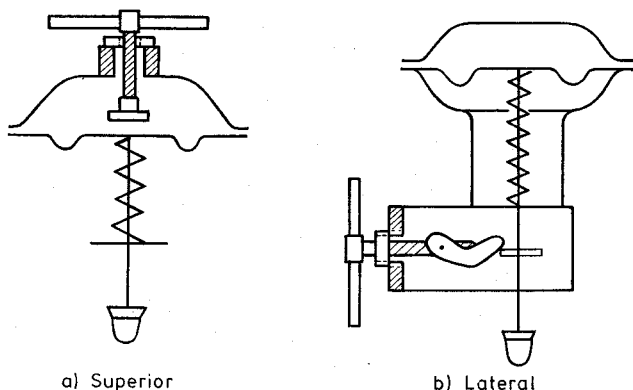


Fig. 8.24 Volante de accionamiento manual.

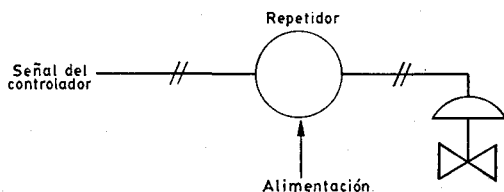


Fig. 8.25 Repetidor (booster).

8.1.8.5 Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera

Los transmisores de posición transmiten la posición del vástago (y, por lo tanto, la apertura de la válvula) al panel de control para información del operador, o para realizar alguna acción de control. Los transmisores de posición neumáticos son idénticos a los posicionadores, mientras que los electrónicos o eléctricos contienen un reóstato, conectado al vástago de la válvula que actúa como divisor de tensión y que proporciona una señal de 4-20 mA c.c. proporcional a la posición de la válvula. Los transmisores de posición optoelectrónicos disponen de un prisma montado en el accionamiento del obturador que refleja el haz luminoso emitido por un LED fijado en el cuerpo de la válvula. El haz reflejado impacta en la pista fotosensible de un disco estacionario dotado de tres pistas (las otras dos resistiva y conductiva). El conjunto formado por las tres pistas actúa como un potenciómetro generando una señal de 4-20 mA c.c. El detector no tiene rozamiento, no produce chispas ni ruido eléctrico, es intrínsecamente seguro e insensible a vibraciones.

Los microrruptores de fin de carrera (fig. 8.26) están colocados en el yugo de la válvula y son excitados por una pequeña palanca fijada al vástago. Pueden ser electromecánicos y de proximidad y permiten la señalización a distancia en el panel de control, de la apertura, del cierre o del paso por una o varias posiciones determinadas del obturador de la válvula. Revelan estos puntos con mucha mayor seguridad que la simple indicación de la señal de salida del controlador leída en un manómetro situado en el panel de control: no presentan la posibilidad de una avería en la línea neumática y no poseen el error dinámico inherente a la transmisión de la señal del controlador a la válvula.

El detector de proximidad es un elemento de estado sólido, que contiene un oscilador. Éste es amortiguado cuando se aproxima a una placa metálica cambiando su señal de salida. Puede montarse lateralmente en la válvula de control y excitar relés, alarmas, etc.

8.1.8.6 Válvula de solenoide de tres vías

La válvula de solenoide de tres vías (fig. 8.27) permite enclavar la válvula de control en una posición que suele ser la correspondiente a fallo de aire.

En esta maniobra, la excitación de la válvula de solenoide comunica la vía de la cámara del servomotor con la vía conectada a la atmósfera con lo que la válvula de control pierde aire y pasa a la posición de sin aire abre o sin aire cierra (según su acción); la cámara puede también comunicarse con aire a presión pasando así la válvula a la posición inversa de con aire abre o con aire cierra. Asimismo, la válvula de solenoide puede estar conectada a un manorreductor; de este modo la válvula de control puede accionarse manualmente independientemente del controlador. Para una máxima seguridad intrínseca la válvula de solenoide está continuamente excitada; de este modo, si falla la corriente la válvula de control pasa a la posición de seguridad.

8.1.8.7 Válvula de enclavamiento (fig. 8.28)

Se utiliza cuando el proceso requiere el mantenimiento de la señal neumática en el servomotor en el último valor que tenía antes de que se produjera algún fallo

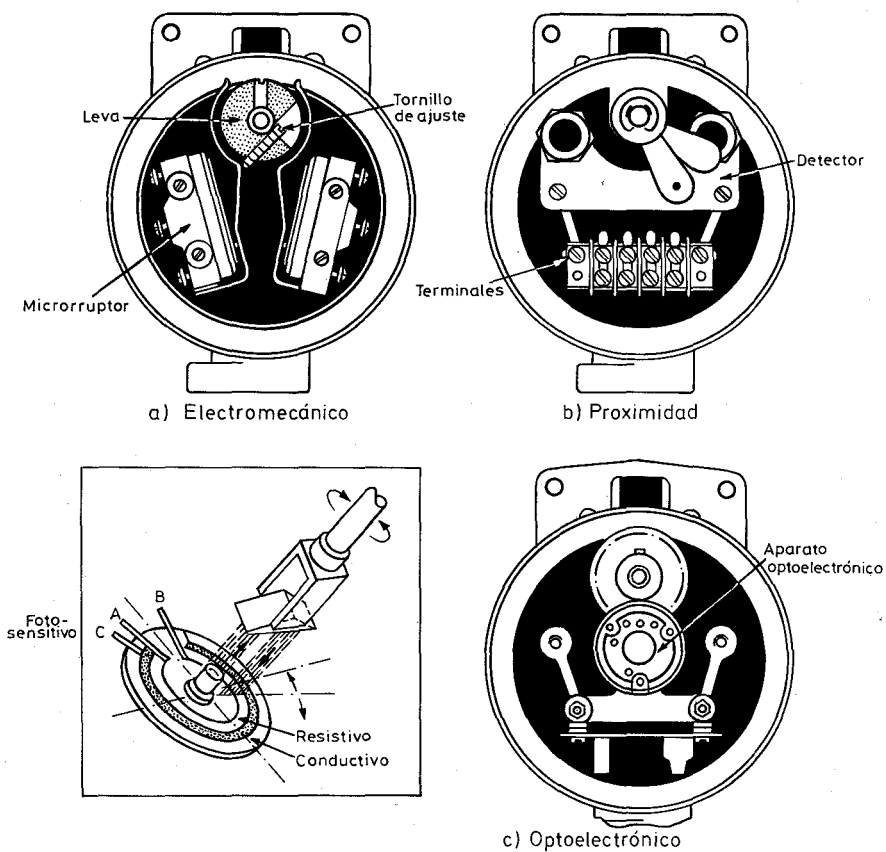


Fig. 8.26 Microinterruptores de fin de carrera. (Cortesía de Masoneilan)

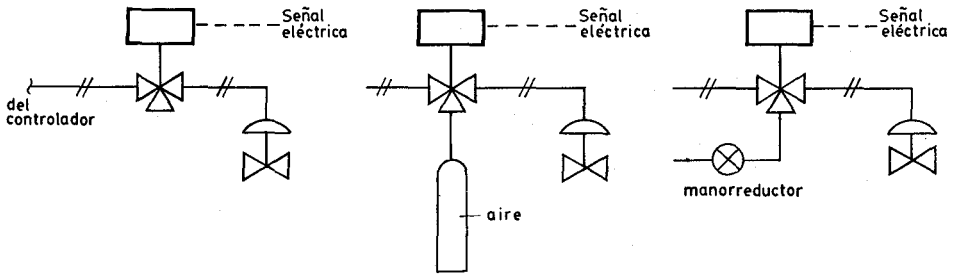


Fig. 8.27 Válvula de solenoide de tres vías.

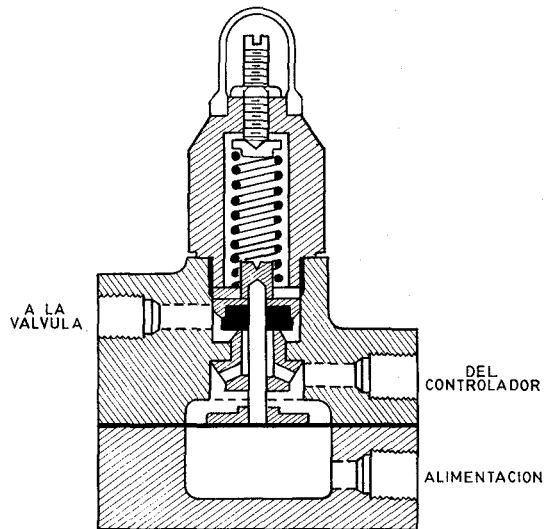


Fig. 8.28 Válvula de enclavamiento.

en el suministro de aire. Bloquea automáticamente el aire entre el controlador y la válvula de control cuando la presión del aire de alimentación disminuye por debajo de un valor prefijado.

8.1.8.8 Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables (fig. 8.29)

Existen válvulas de control con el coeficiente C_v o K_v ajustable con una relación que llega a 100:1. En estas válvulas se limita en un valor ajustable la carrera del obturador, con lo que se reduce el valor de C_v o K_v , pero se mantiene la misma señal de control de 4-20 mA c.c. o 0,2-1 bar en toda la carrera ajustada de la válvula, aumentando así la sensibilidad y, por lo tanto, la resolución. En otras palabras, puede variarse la ganancia de la válvula:

$$\frac{\text{Variación de carrera}}{\text{Variación de la señal de control (16 mA c.c. o 0,8 bar)}}$$

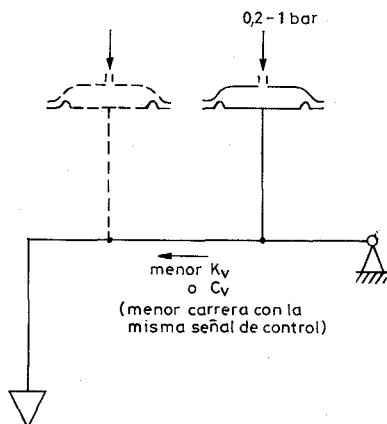


Fig. 8.29 Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.

adaptándola así al proceso, lo que facilita que el controlador regule con una menor banda proporcional y una menor acción integral, aumentando así la estabilidad del lazo de control. La variación del C_v o el K_v está dentro de la relación 100:1. En el caso de válvulas de microflujo para muy pequeños caudales, el C_v puede variarse desde 0,0016-0,004 hasta 1,5-3,8, y para válvulas de mayor tamaño la variación abarca desde 45 a 2.800.

Estas válvulas eliminan el sobredimensionamiento que puede producirse si los datos para el cálculo del coeficiente C_v o K_v son erróneos y se selecciona una válvula mayor de la necesaria.

8.1.9 Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v

8.1.9.1 Definiciones

La necesidad universal de normalizar el cálculo de las dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula que se utilizó fue el denominado C_v , que empleado inicialmente en Estados Unidos, se define como: «Caudal de agua en galones USA por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada (psi).»

En los países que emplean unidades métricas se suele utilizar además el coeficiente K_v , que la norma internacional IEC-534-1987 sobre Válvulas de Control de Procesos Industriales define del siguiente modo:

«Caudal de agua (de 5 a 40° C) en m^3/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 bar (10^5 Pa) (1,02 bar).

El coeficiente K_v para la válvula totalmente abierta se denomina K_{vs} mien-

tras que el mínimo valor recibe el nombre de K_{v0} . Por lo tanto, la relación $\frac{K_{vs}}{K_{v0}}$ es la denominada «rangeability» o «campo de control» que expresa la relación de caudales que la válvula puede controlar. En las válvulas de control isoporcentuales, esta relación suele valer 30 a 1 o bien 50 a 1 y en las lineales 15 a 1 o 30 a 1. La equivalencia entre los coeficientes K_v y C_v para válvula totalmente abierta es:

$$K_v = 0,86 C_v \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$C_v = 1,16 K_v \text{ (galones por minuto)}$$

8.1.9.2 Fórmula general

La válvula se comporta esencialmente como un orificio de paso variable que permite la circulación de un cierto caudal con una determinada pérdida de carga.

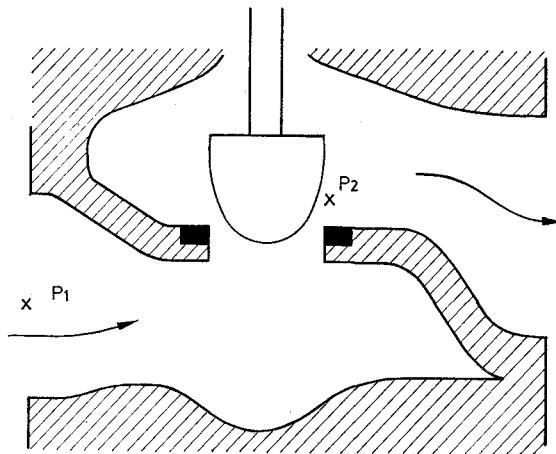


Fig. 8.30 Válvula de control.

Aplicando el teorema de Bernouilli en los puntos 1 y 2 de la figura 8.30 resulta:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}$$

suponiendo fluidos incompresibles $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ luego:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2 \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

y como V_2 es mucho mayor que V_1 queda:

$$V_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2h}$$

Por otro lado, la forma de la válvula da lugar a una resistencia que disminuye la velocidad. Luego ésta es:

$$V = \beta \sqrt{2h}$$

en la que:

β = coeficiente de resistencia (sin dimensiones)

V = velocidad del fluido, en m/s

h = altura de presión entre la entrada y salida de la válvula, en m

y como

$$q = FV$$

siendo q = caudal a través de la válvula, en m³/s

F = sección del orificio de paso, en m²

resulta

$$q = F\beta\sqrt{2h} = F\beta\sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1)$$

en la que:

Δp = pérdida de carga en bar a través de la válvula (1 bar = 10⁵ Pascal)

ρ = densidad del fluido, en kg/dm³

Como por definición el coeficiente de la válvula K_v corresponde al caudal en m³/h para una pérdida de carga $\Delta P = 1$ bar y la densidad del agua entre 5 y 40° C es de 1000 kg/m³, o 1 kg/dm³, resulta:

$$K_v = 3600 F\beta\sqrt{200} \text{ m}^3/\text{h} = 50.911 F\beta \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

fórmula que permite determinar el contorno del obturador ya que relaciona el caudal en función del área de paso.

Sustituyendo la fórmula anterior en (1) resulta:

$$q = \frac{K_v}{3600} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \text{ m}^3/\text{h}$$

y de aquí

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \text{ m}^3/\text{h}$$

expresiones en las que:

Q = caudal máximo, en m^3/h

ρ = densidad, en kg/dm^3 o g/cm^3

Δp = pérdida de carga, en bar para el caudal máximo

De la fórmula (2) se desprende que el coeficiente de la válvula depende del área de paso y de la resistencia al paso del fluido, es decir, de la configuración hidráulica, del estado de las superficies interiores, del tipo de válvula, etc. Son tantas estas variables y tan compleja su variación que es prácticamente imposible fijar los valores de K_v sin recurrir a la experimentación.

Las normas VDI/VDE describen los procedimientos de ensayo para la determinación práctica del coeficiente de la válvula. Sigue a continuación un estudio resumido de esta determinación.

La válvula de dos vías se instala en una estación de ensayo según la figura 8.31 formada por un conjunto de tuberías, un depósito de compensación de agua y una bomba que hace circular el agua en circuito cerrado. Las tuberías son comerciales, con las superficies internas lisas. Para garantizar un régimen laminar, la longitud aguas arriba de la válvula (1) debe ser como mínimo 20 veces el diámetro interior de la tubería y aguas abajo del orden de 15 diámetros como mínimo. Los puntos de toma de presión deben instalarse a 1 diámetro de la brida de entrada de la válvula y en la salida a 10 diámetros de la brida de la válvula. La presión diferencial se mantiene constante mediante el controlador (3) y la válvula (2). La

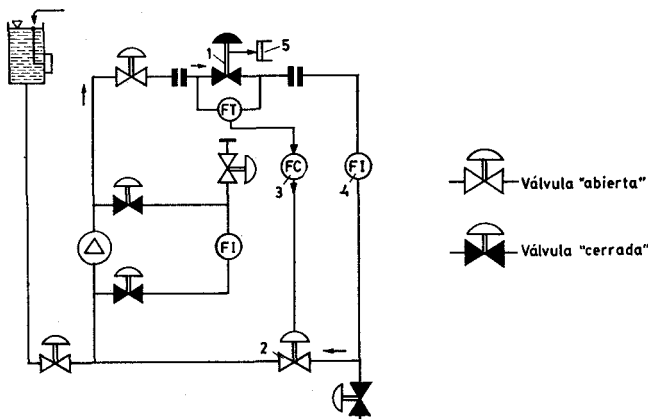


Fig. 8.31 Estación de ensayo para válvula de dos vías.

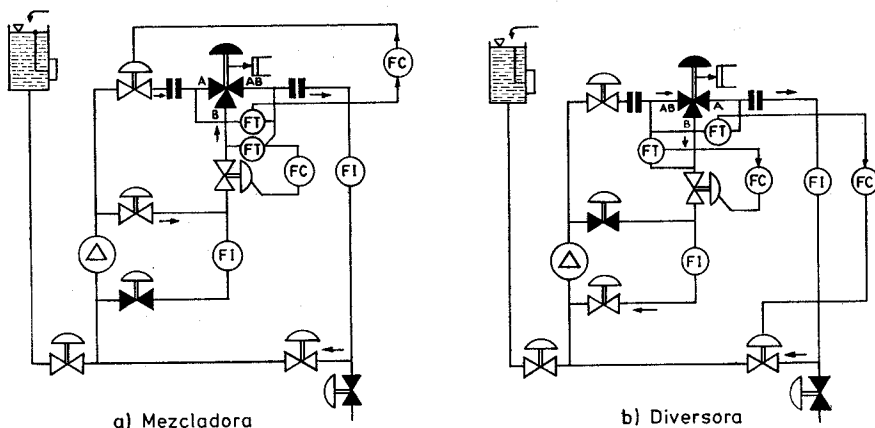


Fig. 8.32 Estación de ensayo para válvula de 3 vías.

carrera de la válvula se mide mediante un potenciómetro (5) y el caudal de paso con el medidor (4). Las válvulas marcadas en negro están en posición de cierre durante el ensayo.

En las figuras 8.32 *a* y *b* pueden verse las estaciones de ensayo para válvula de 3 vías mezcladora y 3 vías diversora respectivamente.

En las figuras 8.33 *a* y *b* se muestran las estaciones para una válvula en ángulo: en la primera el agua fluye contra el obturador lateralmente y en la segunda lo hace contra la parte superior del obturador.

Estas estaciones de ensayo permiten determinar el caudal Q (m^3/h) que

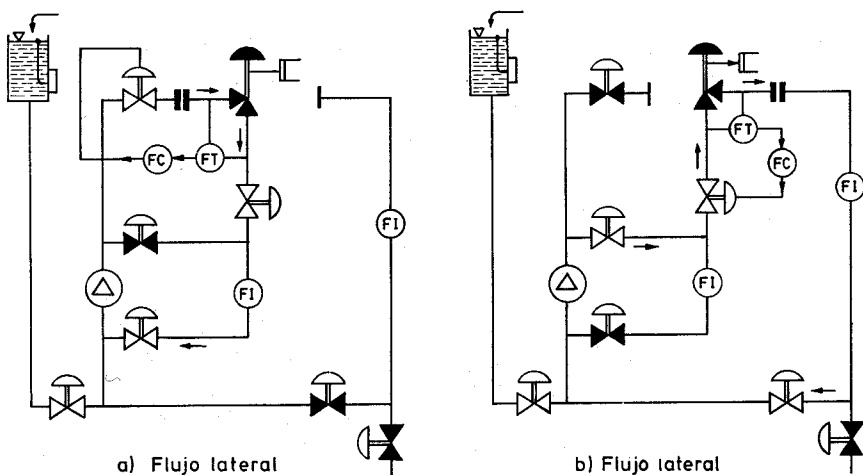


Fig. 8.33 Estación de ensayo para válvula en ángulo.

pasa a través de la válvula de control con una pérdida de carga Δp (bar), con lo cual el coeficiente K_v vale

$$\frac{K_v}{Q} = \frac{F \cdot v_0}{F \cdot v}$$

en la que:

v = velocidad del fluido en m/s

v_0 = velocidad del fluido en m/s para una pérdida de carga de 1 bar

luego

$$K_v = Q \frac{F v_0}{F v} = Q \frac{F \beta \sqrt{\frac{2g}{\rho_0} \cdot \Delta p_0 \cdot 10}}{F \beta \sqrt{\frac{2g}{\rho} \cdot \Delta p \cdot 10}} = Q \sqrt{\frac{\rho \Delta p_0}{\rho_0 \Delta p}}$$

y como $\rho_0 = 1 \text{ kg/dm}^3$ e $\Delta p_0 = 1 \text{ bar}$

resulta $K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}} \text{ m}^3/\text{h}$ con

Q = caudal máximo, en m^3/h

ρ = densidad, en kg/dm^3 o g/cm^3

Δp = pérdida de carga, en bar, para el caudal máximo

Las instalaciones de ensayo descritas no sólo permiten calcular el coeficiente de la válvula K_v para la válvula completamente abierta (K_{vs}) sino también determinar la curva característica inherente que relaciona el porcentaje K_v/K_{vs} con la relación de posiciones del vástago H/H_{100} de la válvula siendo H_{100} la máxima apertura.

En las figuras 8.34 y 8.35 pueden verse las curvas obtenidas para una válvula de igual porcentaje y otra lineal.

Los fabricantes admiten $\pm 10 \%$ de desviación con relación al valor máximo de K_v . Además, el ángulo de desviación de la curva real con relación al ángulo de la curva teórica se fija con una tolerancia de $\pm 30 \%$. Cuanta mejor calidad de fabricación tenga la válvula tanto menos se desviará su característica de la curva teórica.

Para calcular el K_v es necesario partir de datos tales como la pérdida de carga Δp , el caudal Q y el peso específico ρ y debe considerarse la viscosidad del fluido cuando ésta es alta.

La caída de presión o pérdida de carga Δp de la válvula es función de la pérdida total de la línea donde está instalada. Para seleccionar el valor de la pérdida de carga Δp de la válvula, deben evaluarse los factores que influyen en la presión disponible para la válvula y el coste de la propia válvula, es decir, la bomba de impulsión, si ésta existe, la tubería, y la potencia consumida en la instalación. Una buena regla práctica es fijar la pérdida de carga en la válvula en un valor no menor del 30 % de la pérdida total del sistema, si bien en los sistemas con alta caída de presión la experiencia ha demostrado que puede llegarse a

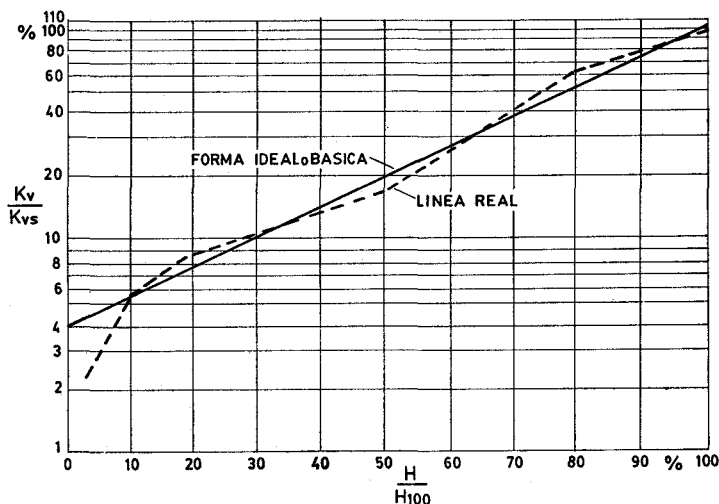


Fig. 8.34 Curva característica real para una válvula de igual porcentaje.

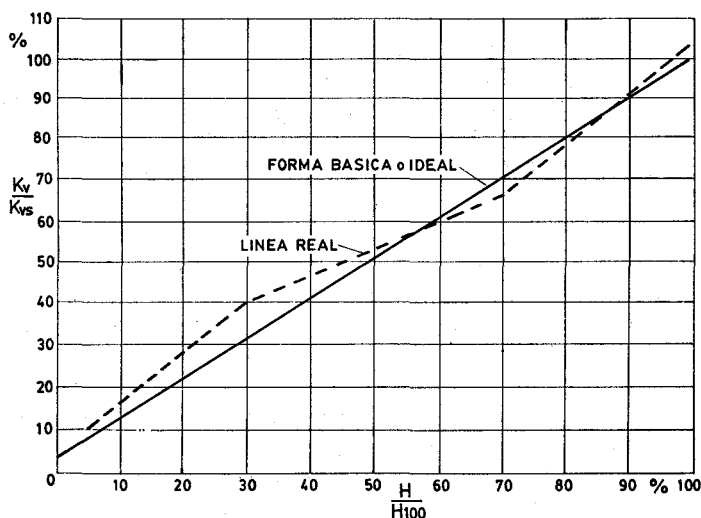


Fig. 8.35 Curva característica real para una válvula lineal.

admitir hasta un 15 % de la pérdida total del sistema. Por otro lado, gracias al diseño mejorado, y al punto de vista de ahorro de energía (tégase en cuenta que la válvula en sí misma está gastando energía, ya que para poder controlar bien el caudal del fluido debe necesariamente emplear parte de la energía de presión del sistema), la pérdida de carga que puede considerarse es de 10 a 15 % de la pérdida total del sistema.

Esta relación debe ser aumentada cuando el campo de variación del caudal es amplio y debe ser reducida cuando las variaciones de caudal son pequeñas. Si

la pérdida de carga provocada por la válvula es sólo un pequeño porcentaje de la pérdida total del sistema, la válvula pierde rápidamente su capacidad para aumentar ulteriormente el caudal. Cuando Δp es de valor adecuado, la válvula de control es más pequeña que el diámetro de la tubería donde está instalada. Si así no resultase en el cálculo, es necesario revisar los datos de partida y las operaciones efectuadas por si hay algún error y en caso negativo comprobar los datos de la línea del proceso.

Otra forma de determinar la pérdida de carga ΔP para la válvula completamente abierta es la siguiente:

Siendo,

P_s = Presión de entrada fija al sistema

F = Pérdida de carga del proceso

Q_d = Caudal de diseño

Q_m = Caudal máximo

F = Pérdida de carga de la tubería

P_b = Pérdida de carga de la válvula completamente abierta

Para el caudal máximo Q_m , el aumento admisible de la pérdida de carga es:

$$1,1[(Q_m/Q_d)^2 - 1] \cdot F$$

habiendo aplicado un coeficiente de seguridad del 10 %.

Para la tubería, el aumento de la pérdida de carga es $0,05 P_s \cdot P_b$ como promedio vale:

Válvula	P_b (bar)
simple asiento	0,7
doble asiento	0,5
jaula	0,3
mariposa	0,01
bola en V	0,07

La pérdida de carga asignada a la válvula en posición completamente abierta es:

$$\Delta P = 1,1 \cdot [(Q_m/Q_d)^2 - 1]F + 0,05 \cdot P_s + P_b$$

con lo cual, previa estimación de F y Q_m puede determinarse ΔP con mayor precisión.

Veamos la justificación de estas reglas.

Sea el circuito de la figura 8.36 *a* formado por una bomba de caudal Q y de presión de impulsión constante H , una tubería que absorba únicamente H_t y una válvula de control que tenga una pérdida de carga H_v . Es evidente que

$$H = H_t + H_v$$

y que por el circuito fluirá un caudal menor que Q . Para reducir esta disminución de caudal puede bajarse el valor de H_v o bien aumentar la presión total H del sis-

tema. Por motivos económicos, se acude a reducir la pérdida de carga en la válvula H_v , si bien será necesario comparar el coste total de la instalación y su mantenimiento con el mayor coste de la válvula al ser ésta de mayor tamaño por causa de su baja pérdida de carga.

Del estudio efectuado en la deducción de la familia de curvas características efectivas puede considerarse la fórmula

$$O = K_v \sqrt{H_v} = K_l \sqrt{H_l} = K_e \sqrt{H}$$

siendo K_v , K_l y K_e los coeficientes válvula, tubería y equivalente, respectivamente.

Recordemos que se determinaba:

$$K_e = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{K_v}\right)^2 + \left(\frac{1}{K_l}\right)^2}}$$

Por otro lado, el caudal máximo es: $Q_{\max} = K_l \sqrt{H}$, considerando que la válvula no existe en el sistema.

De este modo,

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{K_e}{K_l} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{K_l}{K_v}\right)^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(K_v/K_l)^2}}}$$

o bien como

$$\frac{K_l}{K_v} = \sqrt{\frac{H_v}{H_l}} \quad \text{resulta:} \quad \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{H_v}{H_l}}}$$

o bien como

$$\frac{H_v}{H} = \frac{H_v}{H_v + H_l} = \frac{1}{1 + \frac{H_l}{H_v}}$$

resulta:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \sqrt{1 - \frac{H_v}{H}}$$

Estas tres ecuaciones están representadas en la figura 8.36 *b*, *c*, *d* y de ellas, la más idónea para nuestro estudio es la 8.36 *b* ya que presenta mayores variaciones de pendiente.

Puede verse fácilmente que en la parte superior derecha de la curva a partir

del valor $\frac{K_v}{K_l} = 2$, la válvula no regula bien, puesto que debe existir mucha variación relativa para que Q/Q_{\max} cambie apreciablemente. Por otro lado, a valores inferiores a $K_v/K_l = 1$ la válvula absorbe mucha pérdida de carga del sistema (50 a 100 % leído en la escala de abscisas $\frac{H_v}{H}$) pudiendo sólo controlar hasta el 70 %

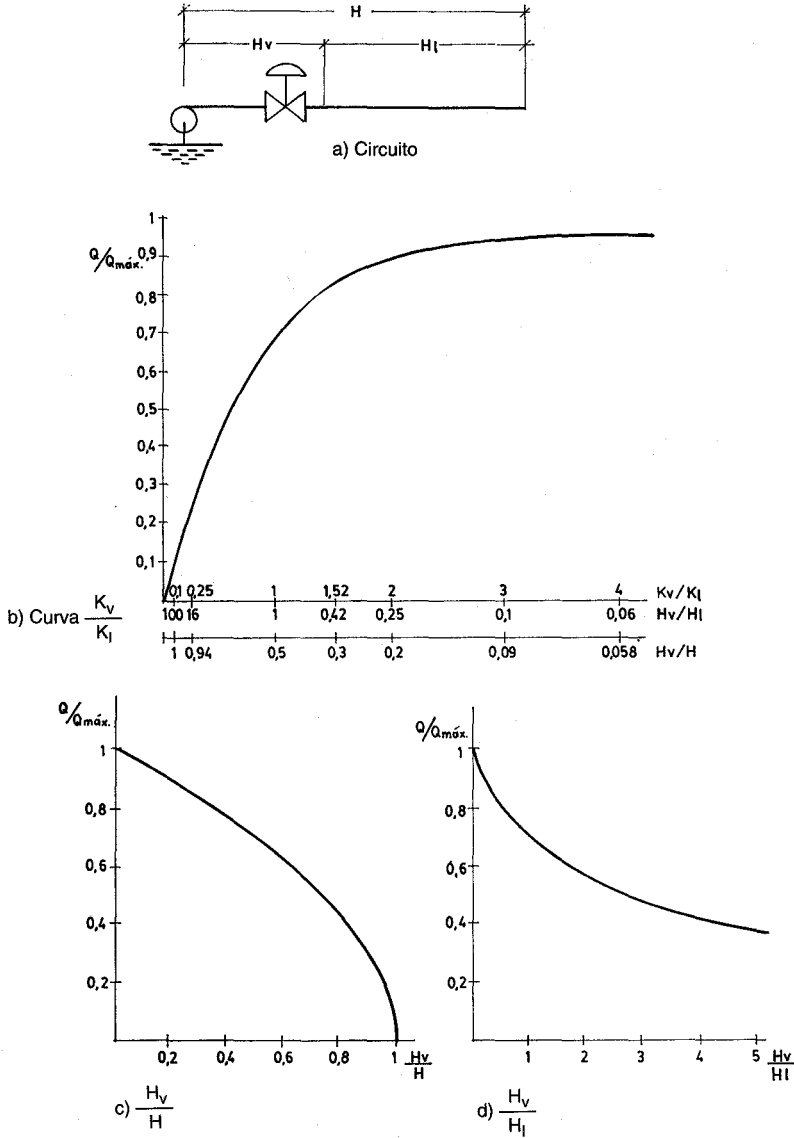


Fig. 8.36 Circuito con válvula de control.

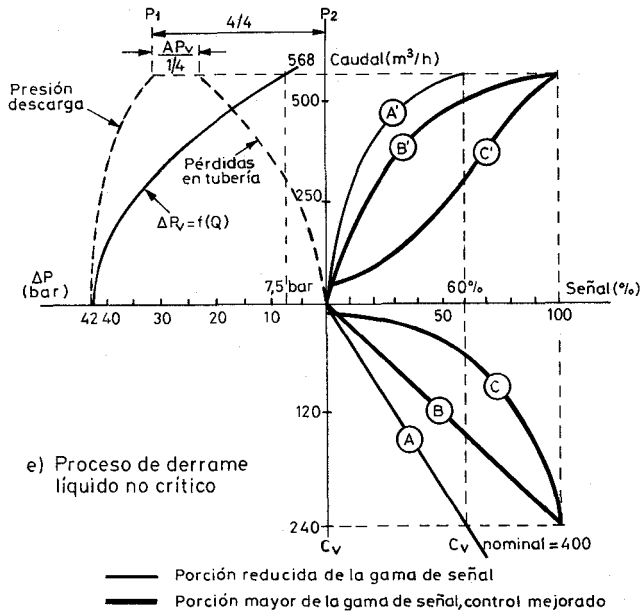


Fig. 8.36 (Continuación)

del caudal máximo, es decir, la válvula restringe demasiado la capacidad de caudal del sistema.

Por lo tanto, la zona idónea está comprendida entre $1 < \frac{K_v}{K_l} < 2$ o bien, $0,2 < \frac{H_v}{H} < 0,5$ y se toma el valor intermedio $\frac{H_v}{H} = 30\%$ que corresponde a un porcentaje de caudal máximo aprovechable del sistema de $\frac{Q}{Q_{\max}} = 83,6\%$.

El *caudal máximo* de cálculo de la válvula de control debe ser de 15 a 60 % superior al máximo del proceso. Este aumento constituye un factor de seguridad para evitar que la válvula tenga que regular en una posición extrema de completa apertura o próxima a ella. Los valores prácticos utilizados son 25 % cuando los datos de la válvula son conocidos, y 50 % cuando estos datos son aproximados. De este modo, la válvula trabaja en los 2/3 de su carrera, que es la mejor zona de trabajo. La Sociedad de Instrumentos de América (ISA) recomienda que las válvulas trabajen al 80 % de su carrera.

Por otro lado es conveniente verificar que al caudal máximo del proceso no se le hayan añadido factores de seguridad adicionales. Si fuera así no es necesario aplicar el factor de seguridad indicado.

En las fórmulas del caudal, el coeficiente de la válvula es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. Si en un líquido no se conoce la densidad real puede estimarse su valor con un efecto casi despreciable en el cálculo de la ca-

pacidad de la válvula. Por ejemplo, una densidad de 0,9 en lugar de 0,8 da lugar a un error menor de 5 % en el caudal. En el caso de un gas, la densidad en condiciones normales de presión y temperatura (1 atmósfera y 15° C) se calcula fácilmente dividiendo su peso molecular por 29.

Los estudios sobre el rendimiento de la válvula de control han llevado al desarrollo de las válvulas de control con la carrera o el K_v o C_v ajustables (ver apartado 8.1.8.8). Tal como se ha indicado, la capacidad de una válvula se elige un 25 % superior con relación al caudal máximo y, por otro lado, al elegir el tamaño consultando las tablas del fabricante se escoge la correspondiente al K_v o C_v superior al que resulta del cálculo. Esto hace que la válvula esté más sobredimensionada cuanto mayor sea el tamaño, siendo el promedio del 40 %. Por ejemplo, el K_v de una válvula de 3" es de 130 y el de una de 4" es de 235. Como consecuencia, la válvula queda sobredimensionada en: $1,25 \times 1,4 = 1,75$ %, es decir en un 75 %. De este modo, la válvula regula el caudal máximo con sólo el $1/1,75 = 0,57$ % ≈ 60 % de la amplitud de la señal de control, es decir, que sólo se aprovechará el intervalo de 0,2-0,68 bar.

Se aprovecha, pues, sólo el 60 % con lo que aumenta la zona muerta de la válvula, y además se incrementa la ganancia de la válvula

Variación de carrera

Variación de la señal de control (0,68-0,2)

lo que empeora el control al precisar de una banda proporcional más amplia y de un tiempo de acción integral más reducido.

Una válvula con K_v o C_v ajustable fija la señal de control íntegra (0,2-1 bar) a la carrera ajustada, aumentando la sensibilidad (la zona muerta disminuye) y reduciendo la ganancia del lazo de control con lo que permite una menor banda proporcional y un mayor tiempo de acción integral, mejorando así el control.

En la figura 8.36 e puede verse el gráfico comparativo entre una válvula de globo de 6" sobredimensionada ($K_v = 340$, $C_v = 400$) (curva A) y otra válvula de 6" con K_v ajustable ($K_{v\max} = 470$, $C_v = 550$) ajustado a $K_v = 200$ ($C_v = 240$) (curva B con leva lineal o curva C con leva isopercentual). Se observa en la figura que la característica instalada de caudal es casi lineal, con lo que la ganancia del lazo de control es casi constante, lo que es sumamente beneficioso para el control.

8.1.9.3 Líquidos

Se aplica la fórmula general ya deducida

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

en la que:

Q = caudal máximo, en m³/h

ρ = densidad, en kg/dm³

Δp = pérdida de carga, en bar, para el caudal máximo

Las fórmulas correspondientes al C_v en unidades métricas y americanas pueden encontrarse en la tabla 8.13.

EJEMPLO 1

Cálcular el K_v de la válvula para las siguientes condiciones de trabajo

Caudal máximo = 120 000 l/h a 15° C

Densidad = 0,9 a 15° C

Temperatura = 80° C

Pérdida de carga $\Delta p = 5$ bar

Aumentando el caudal dado en 25 % resulta:

$$K_v = 150 \sqrt{\frac{0,9}{5}} = 63,6$$

y $C_v = 1,16 \times 63,6 = 73,7$

y en las tablas del fabricante se seleccionará la válvula.

Corrección de viscosidad

La viscosidad es una medida de la resistencia del fluido que circula. Cuando el líquido tiene una viscosidad superior a 43 centistokes (CS) o 100 Saybolt (SSU), el régimen del fluido pasa a ser prácticamente laminar, en lugar de ser turbulento, con lo que es necesario corregir el valor del K_v . Esto ocurre usualmente a bajos valores del número de Reynolds. Representando la relación entre el coeficiente de descarga F_R (1 = flujo turbulento) y el número de Reynolds correspondiente, se obtiene la curva de la figura 8.37, en la que pueden verse tres zonas diferenciadas:

— En la primera, correspondiente a un flujo laminar, el caudal varía linealmente con la presión diferencial a través de la válvula, en lugar de hacerlo con su raíz cuadrada (ver figura 8.40). En estas condiciones, el valor del caudal es:

$$Q = 218 \frac{\Delta p}{\mu} \cdot (F_s \cdot K_v)^{3/2}$$

en la que

μ = viscosidad cinemática en centipoises

F_s = coeficiente de flujo laminar (tabla 8.11)

La fórmula de cálculo de la válvula pasa a ser:

$$K_v = \frac{0,0276}{F_s} \sqrt[3]{\left(\frac{\mu \cdot Q}{\Delta p}\right)^2}$$

— La segunda corresponde a un flujo de transición y es una zona empírica que depende de cada tipo de válvula. Para verificar si la zona de trabajo de la válvula es la laminar, o la transicional, o la turbulenta, se calcula el coeficiente

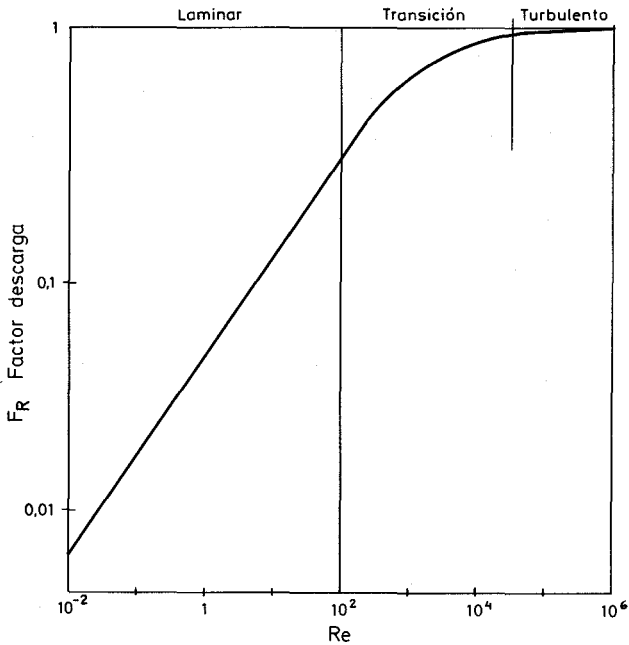


Fig. 8.37 Curva Factor de descarga - N.º Reynolds.

K_v a partir de las expresiones del régimen laminar y del turbulento, que se sustituyen en la siguiente expresión del factor del número de Reynolds.

$$F_r = 1,034 - 0,353 \cdot (K_v \text{ laminar} / K_v \text{ turbulento}) 0,615$$

Si el valor de F_r se encuentra dentro de la zona transicional, se escoge el K_v mayor de los dos calculados para los regímenes laminar y turbulento.

— La tercera zona pertenece al régimen turbulento ya estudiado.

La equivalencia entre CP , CS y SSU es:

$$CP = \frac{CS}{G}, \quad CP = 0,22 \cdot G \cdot SSU - \frac{180 \cdot G}{SSU}$$

con G = densidad relativa.

EJEMPLO 2

Determinar el K_v de la válvula de globo de simple asiento con fluido tendiendo a abrir.

Caudal máximo = 10 000 l/h a 15° C

Densidad = 0,95 a 38° C

Temperatura de trabajo = 38° C

$$\Delta p = 0,35 \text{ bar}$$

Viscosidad = 2800 SSU a 38° C = 600 centistokes

De la tabla 8.11 resulta $F_s = 1,05$. La viscosidad en centipoises es:

$$600 \times 0,95 = 570 \text{ cp}$$

Aumentando el caudal máximo en 25 % resulta:

$$K_v = 12,5 \sqrt{\frac{0,95}{0,35}} = 20,6 \text{ (régimen turbulento)}$$

$$K_v = \frac{0,0276}{1,05} \sqrt{\left(\frac{570 \times 12,5}{0,35}\right)^2} = 19,16 \text{ (régimen laminar)}$$

$$\text{El factor } F_R \text{ es igual a } 1,034 - 0,353 \times \left(\frac{19,16}{20,6}\right)^{0,615} = 0,69$$

lo que corresponde a la zona de transición (figura 8.37)

Escogeremos el valor de $K_v = 20,6$.

$$\text{Luego } C_v = 1,16 \times 20,6 = 23,9$$

Vaporización (flashing)

El líquido, de acuerdo con su presión y su temperatura, puede existir en estado líquido o de vapor. A temperaturas inferiores al punto de ebullición es un líquido y a temperaturas superiores es un vapor. Por otro lado, el punto de ebullición es función de la presión; cuanto más alta sea ésta, tanto mayor es la temperatura del punto de ebullición.

En algunas aplicaciones de las válvulas de control el fluido existe antes de la válvula en estado líquido y aguas abajo en estado de vapor. Es evidente que en estas circunstancias se ha presentado una vaporización parcial o completa en alguna parte de la válvula por la estrangulación que ésta crea, al existir en la salida una presión inferior o igual a la tensión de vapor del líquido a la temperatura de derrame. Es difícil precisar si desde el punto de vista de cálculo el fluido debe ser considerado como líquido o como vapor y por lo tanto no pueden aplicarse las fórmulas convencionales anteriores.

En el agua caliente, a una temperatura próxima a la de saturación, consideraciones termodinámicas indican que a la salida de la válvula existirá una mezcla de agua y de vapor. Para la determinación del coeficiente de la válvula se calcula empíricamente la pérdida de carga admisible y se compara con la real, utilizando en el cálculo la más pequeña de las dos.

Las fórmulas empíricas son las siguientes:

1. Si la temperatura de entrada es inferior en menos de $2,8^{\circ}\text{C}$ a la temperatura de saturación del agua, es decir, si $\Delta T < 2,8^{\circ}\text{C}$ (5°F), la pérdida de carga admisible es: $\Delta P = 0,06 P_1$.
2. Cuando la temperatura de entrada es inferior en más de $2,8^{\circ}\text{C}$ a la temperatura de saturación del agua, es decir, si $\Delta T > 2,8^{\circ}\text{C}$ (5°F), la pérdida de carga admisible es: $\Delta P = 0,9 (P_1 - P_s)$.

En estas fórmulas:

ΔT = diferencia entre la temperatura de saturación correspondiente a la presión de entrada P_1 y la temperatura de entrada en $^{\circ}\text{C}$.

P_1 = presión de entrada en bar absolutos

P_s = presión de saturación correspondiente a la temperatura de entrada en kilogramo por centímetro cuadrado absolutos.

EJEMPLOS

Determinar el coeficiente de la válvula

Caudal máximo = 16 000 l/h H_2O

Presión anterior = 8,475 bar absolutos

Temperatura anterior = 171°C

Caída de presión = 2,1 bar absolutos

En las tablas del vapor de agua, la presión de entrada de 8,475 bar corresponde a una temperatura de vaporización de 172°C . Luego la temperatura anterior es inferior en 1° a esta temperatura de vaporización.

Luego, ΔP admisible = $0,06 \times 8,475 = 0,5$ bar que comparada con la ΔP real de 2,1 kg/cm^2 le es inferior.

Luego, aumentando el caudal en 25 % resulta:

$$K_v = 20 \sqrt{\frac{1}{0,5}} = 28,3$$

$$C_v = 1,16 K_v = 33$$

Determinar el coeficiente de la válvula:

Caudal máximo = 55 000 l/h H_2O

Presión anterior = 11,456 bar absolutos

Temperatura anterior = 166°C

Presión posterior = 5 bar absolutos

En las tablas del vapor de agua se lee una temperatura de vaporización de 185°C para la presión de entrada de 11,456 kg/cm^2 . La temperatura de entrada es inferior en más de $2,8^{\circ}\text{C}$ a la de vaporización luego:

$$\Delta P_{\text{admisible}} = 0,9 (11,456 - 7,325) = 3,7 \text{ kg}/\text{cm}^2 < 6,456 \text{ bar real}$$

Luego

$$K_v = 68,75 \sqrt{\frac{1}{3,7}} = 35,7$$

y

$$C_v = 1,16 K_v = 41,4$$

habiendo aumentado el caudal en 25 %.

La vaporización de otros líquidos distintos del agua es difícil de evaluar y no existe una fórmula totalmente exacta sino varios métodos empíricos que constituyen una aproximación a la solución del problema.

En un método se estima el grado de vaporización y se calculan dos coeficientes K_v uno para el líquido y otro para el gas. La suma de los dos coeficientes es el K_v requerido. Este método es muy conservativo ya que supone que el vapor existe en el líquido en el tramo anterior a la válvula cuando en la realidad se forma al pasar el líquido a través de la válvula y caer la presión. Asimismo, el método supone que el vapor y el líquido tienen la misma velocidad.

El fenómeno de la vaporización da lugar al paso de la mezcla líquido-vapor a gran velocidad a través de la válvula, con lo que el choque de gotas del líquido sobre el material de las paredes de la válvula y de la tubería erosiona la superficie, dando un aspecto mate y liso a la misma, y provocando vibraciones de mucha menor importancia que en el fenómeno de la cavitación, que se describe a continuación.

Cavitación

En la estrangulación de la vena del líquido, llamada zona de vena contraída, el fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si en esta zona, la velocidad es suficiente, la tensión de vapor del líquido llega a ser inferior a la presión del vapor saturado, formando pues burbujas de vapor que colapsan (implosión) si a la salida de la válvula la presión es superior a la presión de saturación del líquido. Este fenómeno de formación continua de burbujas de vapor y su desaparición a la salida de la válvula recibe el nombre de cavitación. El intercambio continuo entre la presión y la velocidad del líquido a lo largo de su recorrido a través de la válvula se denomina «recuperación de presión» y tal como veremos juega un papel importante en la determinación precisa del tamaño de la válvula cuando trabaja en estas condiciones.

La cavitación se inicia a presiones estáticas algo superiores a la tensión de vapor del líquido. Las cavidades que nacen dentro del líquido y que colapsan súbitamente limitan la capacidad de la válvula a partir de un determinado caudal crítico y pueden generar ruidos y vibraciones excesivos con el peligro de causar daños mecánicos graves provocados por el impacto de las burbujas de vapor en implosión con alguna parte sólida de la válvula o de la tubería; la energía liberada por las burbujas es lo suficientemente grande como para destruir el material o la superficie de protección en poco tiempo. La cavitación debe pues evitarse y desaparece cuando la presión en la vena contraída es superior a la tensión de vapor.

En la figura 8.38 pueden verse las condiciones de presión con que se presentan la vaporización y la cavitación.

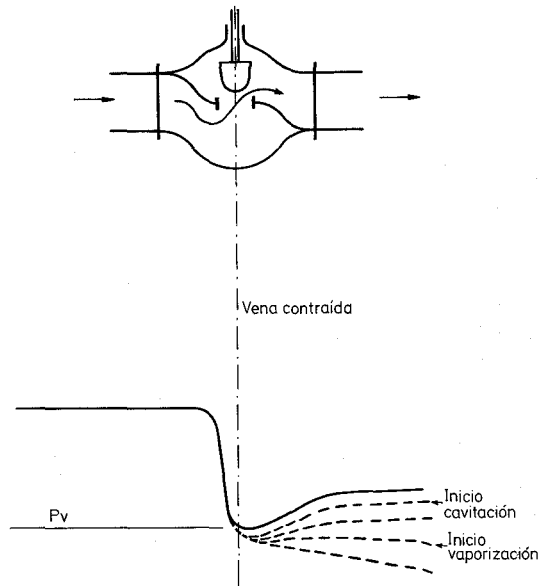


Fig. 8.38 Vaporización y cavitación.

En la figura 8.39 puede verse el grado de recuperación de presión que existe después de la válvula y que depende del tipo de la misma. En la figura se aprecia que en el caso de un líquido, si la presión de salida es menor que su presión de vapor se presenta el fenómeno de la vaporización; pero si la presión en la zona interna de la válvula donde el líquido alcanza su máxima velocidad es menor que su presión de vapor, y al mismo tiempo la presión de salida, debido a la recuperación de presión, es mayor que la presión de vapor del líquido, se forman burbujas de vapor en el interior de la válvula que colapsan a la salida apareciendo el fenómeno de la cavitación. La vaporización y la cavitación limitan el paso del líquido y el caudal no aumenta a pesar de que baje la presión de salida.

En el caso de un gas, tal como se verá más adelante, la disminución gradual de la presión de salida, manteniendo constante la presión de entrada aumenta la velocidad del fluido en la vena contraída hasta alcanzarse la velocidad del sonido, y a partir de este punto, el caudal de gas no aumenta aunque baje más la presión de salida (caudal estrangulado [*choked flow*]). Se está en condiciones de caudal crítico con una relación crítica $R_c = \frac{P_{vc}}{P_1}$ entre la presión en la vena contraída en condiciones de estrangulamiento de caudal y la presión de entrada del gas que evidentemente es menor que la relación crítica de presiones $\frac{P_2}{P_1}$ entre la entrada

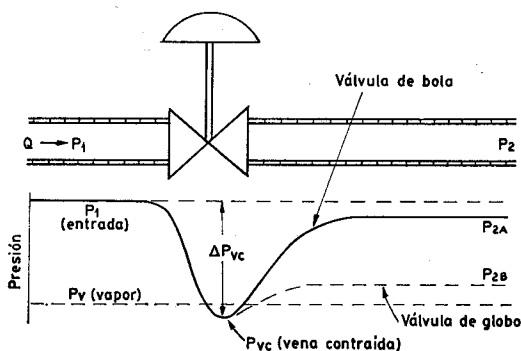
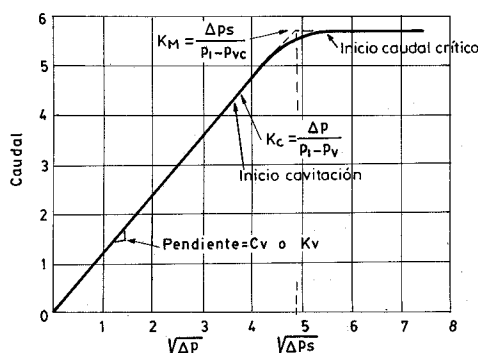


Fig. 8.39 Recuperación de presión en dos tipos de válvulas.

y la salida. La condición de caudal crítico se alcanza, pues, antes de lo que sería previsible por la relación $\frac{P_2}{P_1}$.

Los fenómenos descritos indican la necesidad de modificar el caudal crítico aparente afectándolo de un coeficiente de corrección para tener en cuenta la capacidad de recuperación de presión de la válvula. Cuanto mayor es ésta tanto más rápidamente se llega a las condiciones de caudal crítico.

Fig. 8.40 Curva de ensayo caudal- $\sqrt{\Delta p}$ para el agua.

En ensayos realizados con agua se determinó la curva que relaciona el caudal Q con la $\sqrt{\Delta p}$, siendo Δp la pérdida de carga a través de la válvula. Esta curva está representada en la figura 8.40 pudiendo observarse que su pendiente inicial es constante ya que corresponde a la fórmula

$$\frac{q}{\sqrt{\Delta p}} = K_v \text{ deducida de } K_v = q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Al aumentar gradualmente la pérdida de carga con una presión de entrada constante, la curva empieza a desviarse a partir de un punto que revela la cavi-

tación incipiente que se inicia y que viene definida por el coeficiente, denominado índice de cavitación

$$K_c = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_v} = \frac{\Delta p}{p_1 - p_v}$$

en la que:

p_1 = presión de entrada a la válvula

p_2 = presión de salida de la válvula

p_v = presión de vapor del líquido en la entrada (igual también a la presión en la vena contraída)

Δp = pérdida de carga a través de la válvula.

Existe un coeficiente F_L , denominado de recuperación de presión, que depende de la forma geométrica de la válvula y que es igual a:

$$F_L = \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_{vc}}}$$

siendo p_{vc} = presión en la vena contraída.

Este coeficiente F_L es igual al C_f (cuyo significado sigue inmediatamente) y, cuanto mayor sea su valor, tanto menor será el riesgo de cavitación. De este modo, las válvulas de mariposa y de bola son susceptibles de cavitación, mientras que las válvulas especiales anticavitación de reducción de presión multietapa con $F_L = 1$, no pueden experimentar el fenómeno de la cavitación.

Cuando la válvula de control es de diámetro más pequeño que la tubería, conviene tener en cuenta el efecto de los conos reductores que conectan la tubería a la válvula de control. Dan lugar a una pérdida de carga adicional que proporciona un menor caudal con el mismo K_v (o C_v). Por este motivo, se usa un coeficiente de corrección F_p que divide al K_v calculado, dando una válvula de mayor coeficiente de caudal (es la relación entre el K_v de una válvula con conos y el K_v de la válvula). Su valor depende de la relación de diámetros de la válvula a la tubería, y considera sólo cambios en la velocidad y en la presión. Para obtener una precisión en el cálculo de $\pm 5\%$, F_p debe determinarse por ensayo (ver tabla 8.11). Los valores calculados de F_p corresponden a la expresión:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Sigma \xi}{N_2} \cdot \left(\frac{C}{d^2}\right)^2}} \quad \text{con } \Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_{B1} - \xi_{B2}$$

siendo ξ_1 = coeficiente efectivo de resistencia de velocidad aguas arriba

ξ_2 = coeficiente efectivo de resistencia de velocidad aguas abajo

ξ_{B1} = coeficiente de velocidad de Bernouilli en la entrada

ξ_{B2} = coeficiente de velocidad de Bernouilli en la salida

Si los conos reductores (reductor y expansor) son de igual tamaño $\xi_{B1} = \xi_{B2}$ con lo que

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 = 1,5 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2$$

N_2 vale 0,0016 para $C = R_v$

y así

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,5 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{K_v}{0,04 \cdot d^2} \right)^2}} \approx \sqrt{1 - 1,5 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 \cdot \left(\frac{K_v}{0,04 \cdot d^2} \right)^2}$$

Aumentando todavía más la pérdida de carga, la curva se transforma en horizontal lo que indica que se ha llegado a la condición de «caudal estrangulado» (*choked flow*) es decir, que una ulterior disminución de la presión posterior no aumenta el caudal.

El punto de intersección de la recta de pendiente K_v y de la horizontal permite obtener el valor de C_f^2 o F_L^2 según la nomenclatura ISA (o también, K_m).

Luego:

$$C_f^2 = \frac{\Delta P_s}{P_1 - P_{vc}}$$

en la que:

ΔP_s = pérdida de carga a través de la válvula necesaria para producir caudal estrangulado

P_{vc} = presión en la vena contraída

Así pues, la condición de caudal crítico se obtiene cuando

$$\Delta P \geq \Delta P_s = C_f^2 (P_1 - P_{vc})$$

Es decir, el caudal crítico se alcanza antes de lo que sería previsible por la relación entre las presiones anterior y posterior respectivamente. Es obvio que la pérdida de carga debe limitarse para que no se presenten estas condiciones de caudal crítico e incluso conviene prevenir el fenómeno de la cavitación observando la fórmula

$$\Delta P \leq K_c (P_1 - P_v)$$

Experimentalmente, se encontró en ensayos efectuados en aire y en agua que C_f (o F_L) se mantiene en valores coincidentes, tanto para líquidos en condiciones de vaporización o de cavitación como en gases con caudales críticos, lo cual indica que las válvulas presentan el mismo grado de recuperación de presión en los líquidos, en los gases o en los vapores.

En la tabla 8.11 pueden verse valores representativos para distintos tipos de válvulas debiendo señalar que sólo constituye una guía de aplicación y que ante un caso práctico es conveniente consultar las tablas publicadas por los fabricantes.

TABLA 8.11 Factores de caudal de válvulas de control

Tipo de válvula	Fluido tiende a	$C_f(F_L)$	F_s	K_c (índice de cavitación)	Conos reductores			
					$d/D = 1,5$		$d/D = 2$	
					F_p	F_{Lp}	F_p	F_{Lp}
Globo, simple asiento	abrir	0,9	1,05	0,65	0,96	0,85	0,94	0,85
	cerrar	0,85	1,09	0,58	0,96	0,80	0,94	0,80
Globo, doble asiento	obt. parabólico	0,9	0,85	0,7	0,96	0,85	0,94	0,76
	obt. en V	0,98	0,84	0,8	0,96	0,89	0,94	0,89
Cuerpo partido	abrir	0,75		0,46	0,96	0,72	0,94	0,72
	cerrar	0,8		0,51	0,96	0,77	0,94	0,76
Ángulo	abrir	0,9	1,08	0,65	0,96	0,84	0,94	0,84
	cerrar	0,8	1,12	0,52	0,96	0,78	0,94	0,77
Mariposa Bola		0,65	0,92	0,32	0,81	0,60	0,72	0,59
		0,6	1,25	0,24	0,87	0,55	0,80	0,54

Así pues, de los estudios anteriores se deduce un método más preciso que el conservativo para calcular las válvulas de control en condiciones cercanas a las críticas sin dejar de observar que habrá que escoger después el tamaño de la válvula entre varios C_v o K_v de válvulas comerciales con la posibilidad de obtener el mismo tamaño empleando cualquiera de los dos métodos.

La deducción de estas fórmulas en los líquidos es:

- Condiciones subcríticas cuando $\Delta P < C_f^2 (P_1 - P_{ve})$, siendo válidas las fórmulas conservativas.
- Condiciones críticas si $\Delta P \geq C_f^2 (P_1 - P_{ve}) = C_f^2 \cdot \Delta P_{ve}$ con cavitación o vaporización.

En este caso,
$$K_v = \frac{q}{C_f} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{ve}}}$$

una fórmula que da ΔP_{ve} es

$$\Delta P_{ve} = P_1 - \left(0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_1}{P_{ve}}} \right) P_v$$

Si el caudal es crítico, el conjunto válvula más conos reductores tiene un coeficiente F_{Lp} que se encuentra en la tabla 8.11.

Si se desea calcular F_{Lp} , su valor es:

$$F_{Lp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_f^2} + \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot \left(\frac{K_v}{0,056 \cdot d^2}\right)^2}}$$

La fórmula del K_v pasa a $K_v = \frac{Q \cdot F_{Lp}}{C_f} \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_{vc}}}$

8.1.9.4 Gases

Los gases son fluidos en estado suficiente de sobrecalentamiento como para que puedan aplicárseles las leyes de los gases perfectos (aire, oxígeno, nitrógeno, argón, helio, etc.).

La fórmula general ya deducida es

$$K_v = Q_s \sqrt{\frac{\rho_s}{\Delta p}} \text{ m}^3/\text{h}$$

con el caudal Q_s (m^3/h) y la densidad ρ_s (kg/dm^3) en las condiciones de servicio correspondientes y con Δp en bar para el caudal máximo de paso del fluido a través de la válvula. Esta fórmula puede aplicarse en los gases cuando la presión de entrada es muy próxima a la presión de salida porque en estas condiciones el caudal Q_s y la densidad ρ_s no varían apreciablemente.

Si ρ_n es la densidad del gas en condiciones estándar de presión

$$P_n = 1 \text{ atmósfera} = 1,013 \text{ bar y temperatura } T_n = 273^\circ \text{ C}$$

tenemos:

$$\rho_s = \rho_n \frac{P_s}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_s} \quad \text{y} \quad Q_s = Q_n \frac{P_n}{P_s} \cdot \frac{T_s}{T_n}$$

expresando los subíndices s las condiciones de servicio, y los n las condiciones estándar.

Señalemos que la densidad ρ_s en las condiciones de servicio está referida a la presión de servicio P_s . Según donde se tome esta presión, la densidad variará ya que al pasar el gas a través de la válvula sufre una pérdida de carga. Si se emplea la densidad anterior a la válvula, como la presión P_1 es mayor, resultará un valor menor en el K_v y la válvula será más pequeña. Si se utiliza la densidad aguas abajo, P_2 es menor, K_v será mayor y la válvula quedará sobredimensionada. Se considera la densidad efectiva a una presión intermedia $\frac{P_1 + P_2}{2}$, supuesto que ensayos efectuados confirman como válido.

Luego:

$$K_v = Q_n \frac{P_n}{\frac{P_1 + P_2}{2}} \cdot \frac{T_s}{T_n} \sqrt{\frac{\rho_n}{\Delta p} \cdot \frac{P_1 + P_2}{2 P_n} \cdot \frac{T_n}{T_s}} = Q_n \sqrt{\frac{\rho_n}{\Delta p} \cdot \frac{2 P_n}{P_1 + P_2} \cdot \frac{T_s}{T_n}}$$

o bien,

$$K_v = Q_n \sqrt{\frac{G \cdot 0,001293}{\Delta p} \cdot \frac{2 \times 1,033}{P_1 + P_2} \frac{T_s}{288}}$$

y

$$K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G \cdot T_s}{\Delta p (P_1 + P_2)}}$$

en la que:

Q_n = caudal en m^3/h referido a 1 atmósfera y 15°C

G = densidad con relación al aire (aire = 1)

Δp = pérdida de carga en bar

P_1 = presión anterior en bar absolutos

P_2 = presión posterior en bar absolutos

T_s = temperatura en grados Kelvin ($^\circ\text{C} + 273$).

En otra forma de cálculo, en lugar de considerar el peso específico medio entre la presión de entrada y la de salida se aplica un factor llamado de expansión Y a la fórmula general correspondiente a los líquidos. Este factor depende de la relación $\Delta P/P_1$ (pérdida de carga a presión absoluta de entrada) y del tipo de válvula. En la figura 8.41 pueden verse los valores correspondientes de Y en función de estos dos factores.

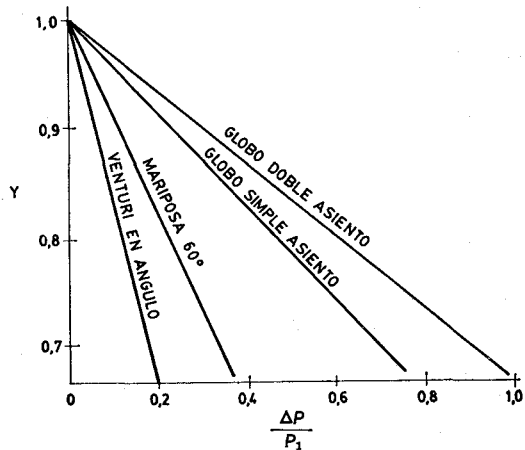


Fig. 8.41 Factor de expansión Y .

La fórmula del K_v queda:

$$K_v = \frac{Q_s}{Y} \sqrt{\frac{\rho_s}{\Delta p}}$$

con el caudal Q_s en m^3/h en las condiciones de servicio; ρ_s en kg/dm^3 en las condiciones de servicio, y Δp en bar.

Como los gases son fluidos compresibles pueden llegar a alcanzar una velocidad de saturación igual o próxima a la del sonido cuando pasan a través de la restricción que presenta la válvula. La velocidad del gas aumenta a medida que

crece la pérdida de carga y la saturación se presenta cuando la presión posterior P_2 baja aproximadamente a 50 % o menos de la presión absoluta anterior P_1 , es decir, cuando la pérdida de carga Δp iguala o es mayor que $\frac{P_1}{2}$.

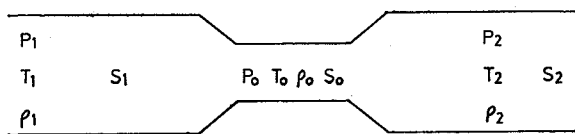


Fig. 8.42 Tubería con estrangulamiento.

En efecto, sea la tubería de la figura 8.42 con un estrangulamiento que representa una válvula. Cuando el fluido se mueve a la velocidad del sonido en la restricción, las ondas sónicas desarrolladas en el gas no pueden desplazarse a más velocidad y por lo tanto, aunque la presión de salida P_2 fuera menor que P_0 no sería posible que pasase un mayor caudal de gas.

Luego el caudal másico crítico es constante e igual a

$$Q_{m0} = s_1 v_1 \rho_1 = s_0 v_0 \rho_0$$

Por otro lado, la velocidad del sonido en un gas es

$$v_0 = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{R T_0}{M}} = \sqrt{K \frac{R T_0}{M}}$$

en la que:

- C_p = calor específico del gas a presión constante
- C_v = calor específico del gas a volumen constante
- R = constante de los gases perfectos
- T_0 = temperatura absoluta del gas
- M = peso molecular del gas

y como por la ley de Mayer $\frac{R}{M} = C_p - C_v$

Tenemos: $v_0^2 = K \frac{R T_0}{M} = K (C_p - C_v) T_0 = C_p \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) T_0$

y aplicando el teorema de Bernouilli

$$(H_1 - H_0) + \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_0^2}{2} \right) = 0$$

en la que H es la entalpía; como $H = C_p T$ y despreciando v_1 respecto a v_0 resulta:

$$C_p (T_1 - T_0) - \frac{v_0^2}{2} = 0 \quad v_0^2 = 2 C_p (T_1 - T_0)$$

$$y \quad C_p \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) T_0 = 2 C_p (T_1 - T_0)$$

$$\text{o bien} \quad \frac{T_0}{T_1 - T_0} = \frac{2}{K - 1}$$

y de aquí, aproximadamente:

$$\frac{T_0}{T_1} = \frac{2}{K + 1}$$

y por las ecuaciones de Poisson

$$\frac{P_0}{P_1} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{K}{K-1}} = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}}$$

$$\text{en el argón, } K = 1,67 \text{ resulta: } \frac{P_0}{P_1} = 0,49$$

$$\text{en el aire, } K = 1,4 \text{ resulta: } \frac{P_0}{P_1} = 0,53$$

$$\text{es decir, que aproximadamente: } \frac{P_0}{P_1} = 0,5$$

Así pues, en condiciones de velocidad de saturación del gas, una disminución ulterior de la presión posterior (y por lo tanto, una mayor pérdida de carga) no aumenta apreciablemente el caudal. Se dice que la válvula trabaja en condiciones de «caída de presión crítica» o bien de «velocidad crítica» o de «caudal crítico».

En estos casos se toma como valor de la pérdida de carga Δp y de la presión posterior P_2 el valor $\frac{P_1}{2}$.

La fórmula resultante que se obtiene en estas condiciones es:

$$K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G T_s}{\Delta p (P_1 + P_2)}} = \frac{Q_n \sqrt{G T_s}}{284 \cdot P_1}$$

Las fórmulas anteriores para gases han sido deducidas aplicando las leyes de los gases perfectos. Estas leyes no son satisfactorias a partir de presiones superiores a 7 bar, por lo cual en estos casos es necesario aplicar un factor de corrección de compresibilidad Z , de tal modo que la ecuación de los gases perfectos pasa a ser $pV = ZRT$.

El factor Z viene relacionado en función de la temperatura reducida y de la presión reducida, T_r y P_r , respectivamente, cuyos valores son:

$$P_r = \frac{\text{Presión de entrada absoluta}}{\text{Presión crítica absoluta}}$$

$$T_r = \frac{\text{Temperatura de entrada absoluta}}{\text{Temperatura crítica absoluta}}$$

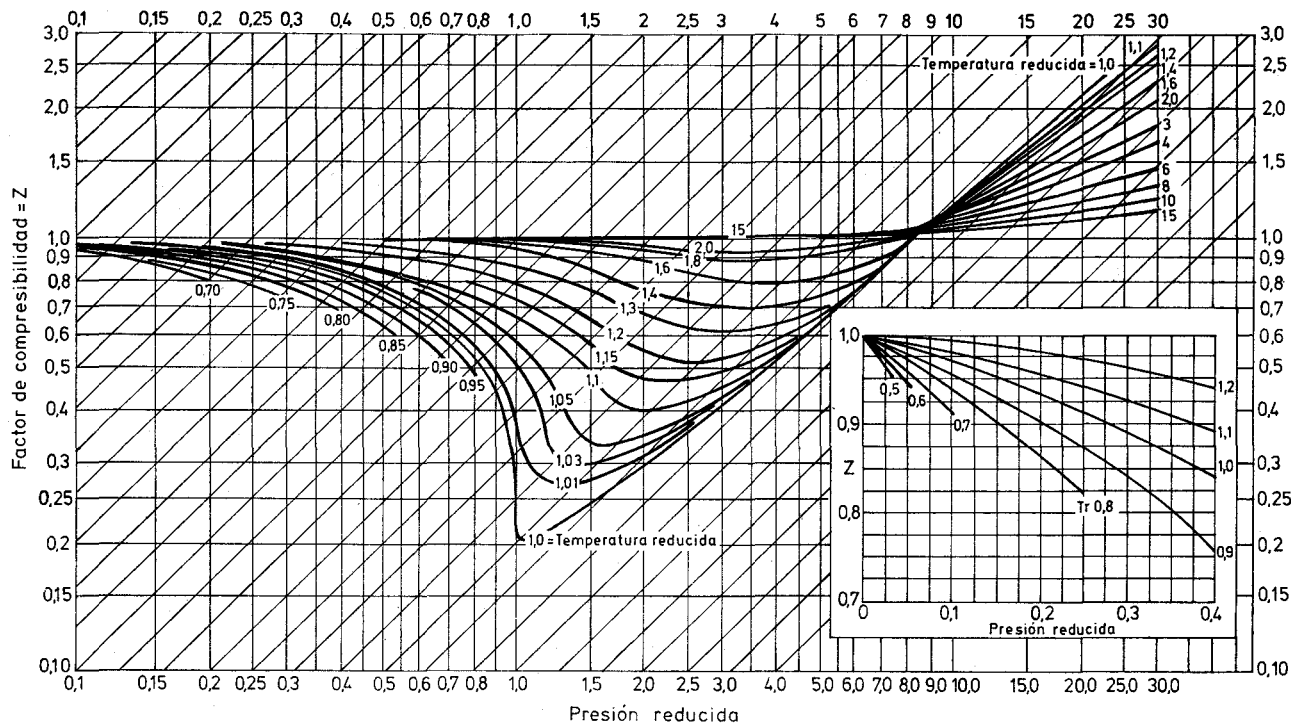


Fig. 8.43 Factor de compresibilidad Z .

El factor Z está representado en la figura 8.43 y se aplica como corrección de la densidad del gas. Figura, por lo tanto, en la fórmula del K_v o C_v afectado bajo raíz cuadrada. Así, pues:

$$K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G T_s Z}{\Delta p (P_1 + P_2)}}$$

o bien en condiciones de caudal crítico

$$K_v = \frac{Q_n \sqrt{G T_s Z}}{284 \cdot P_1}$$

En la tabla 8.12 se dan las presiones y temperaturas críticas de gases típicos.

Aplicando el coeficiente de recuperación C_f para una determinación más precisa del caudal en condiciones cercanas al caudal crítico se tiene:

— Condiciones subcríticas si $\Delta P < \Delta P_M = 0,5 C_f^2 P_1$ aplicándose las fórmulas conservativas.

— Condiciones críticas si $\Delta P \geq \Delta P_M = 0,5 C_f^2 P_1$.

En este caso,

$$K_v = \frac{Q_n \sqrt{G T_s}}{284 P_1 C_f}$$

o bien si se tiene en cuenta el factor de compresibilidad

$$K_v = \frac{Q_n \sqrt{G T_s Z}}{284 P_1 C_f}$$

EJEMPLO

Determinar el coeficiente de la válvula:

Caudal máximo = 30 500 Nm³/h

Densidad = 0,6 a 15° C

Temperatura = 15° C

$\Delta p = 2,8$ bar

Presión anterior = 7 bar abs.

Aplicando la fórmula $K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G \cdot T_s}{\Delta p (P_1 + P_2)}}$ resulta:

$$K_v = \frac{38\,125}{328} \sqrt{\frac{0,6 \times 288}{2,8 \times (7 + 4,2)}} = 273$$

$$C_v = 273 \times 1,17 = 319$$

habiendo aumentado el caudal en 25 %.

Si utilizáramos el coeficiente de expansión Y resultaría

$$K_v = 38\,125 \cdot \frac{1,033}{7} \cdot \frac{1}{Y} \sqrt{\frac{1}{2,8} \times 0,6 \times 0,001293 \cdot \frac{7}{1,033} \cdot \frac{288}{288}} = \frac{244}{Y}$$

TABLA 8.12

<i>Elemento</i>	<i>Presión crítica — P.</i>		<i>Temperatura crítica — T.</i>	
	<i>psia</i>	<i>bars (abs)</i>	<i>°F</i>	<i>°C</i>
Ácido acético	841	58,0	612	322
Acetona	691	47,6	455	235
Acetileno	911	62,9	97	36
Aire	547	37,8	— 222	— 141
Amoníaco	1638	113,0	270	132
Argón	705	48,6	— 188	— 122
Benzeno	701	48,4	552	289
Butano	529	36,5	307	153
Dióxido de carbono	1072	74,0	88	31
Monóxido de carbono	514	35,5	— 218	— 139
Tetracloruro de carbono	661	45,6	541	283
Cloro	1118	77,0	291	144
Etano	717	49,5	90	32
Alcohol etílico	927	64,0	469	243
Etileno	742	51,2	50	10
Éter etílico	522	36,0	383	195
Flúor	367	25,3	— 247	— 155
Helio	33,2	2,29	— 450	— 268
Heptano	394	27,2	513	267
Hidrógeno	188	13,0	— 400	— 240
Ácido clorhídrico	1199	82,6	124	51
Isobutano	544	37,5	273	134
Alcohol isopropílico	779	53,7	455	235
Metano	673	46,4	— 117	— 83
Alcohol metílico	1156	79,6	464	240
Nitrógeno	492	34,0	— 233	— 147
Óxido nitroso	1054	72,7	99	37
Octano	362	25,0	565	296
Oxígeno	730	50,4	— 182	— 119
Pentano	485	33,5	387	197
Fenol	889	61,3	786	419
Fosgeno	823	56,7	360	182
Propano	617	42,6	207	97
Propileno	661	45,6	198	92
Refrigerante 12	582	40,1	234	112
Refrigerante 22	713	49,2	207	97
Dióxido de azufre	1142	78,8	315	157
Agua	3206	221,0	705	374

y como Y para una válvula de globo con

$$\frac{\Delta P}{P_1} = \frac{2,8}{7} = 0,4 \quad \text{vale} \quad Y = 0,82$$

resulta:
$$K_v = \frac{244}{0,82} = 297$$

y si la válvula fuera de doble asiento, en V , resultaría $Y = 0,86$

$$K_v = \frac{244}{0,86} = 284$$

EJEMPLO

Determinar las dimensiones de la válvula:

Caudal máximo de cálculo = $3850 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Densidad = 1 a 15°C

Temperatura = 15°C

$\Delta p = 56 \text{ bar}$

Presión anterior = 70 bar absolutos

Presión posterior = 14 bar absolutos

Como el gas está en condiciones de caudal crítico ya que

$$\Delta p = 56 \text{ bar} > \frac{70}{2} = 35$$

resulta:
$$K_v = \frac{Q_n}{284} \cdot \frac{\sqrt{G T_s Z}}{P_1} = \frac{3850}{284} \cdot \frac{\sqrt{1 \cdot 288 \cdot 0,9}}{70} = 3,12$$

al ser para $P_r = \frac{70}{37,8} = 1,85$ y $T_r = \frac{288}{132} = 2,18$,

$$C_v = 1,16 \times 3,12 = 3,62$$

y para una mayor precisión en el cálculo, suponiendo se trata de una válvula en ángulo con el fluido tendiendo a abrir ($C_t = 0,9$)

$$\Delta P \geq 0,5 C_t^2 P_1 = 0,5 \cdot 0,9^2 \cdot 70 = 28,3 \text{ bar}$$

$$K_v = \frac{Q_n}{284} \cdot \frac{\sqrt{G T_s Z}}{P_1 C_t} = \frac{3850}{284} \cdot \frac{\sqrt{1 \cdot 288 \cdot 0,9}}{70 \cdot 0,9} = 3,46$$

$$C_v = 1,16 \times 3,46 = 4,01$$

8.1.9.5 Vapores

Los vapores son fluidos gaseosos que se encuentran en un estado próximo a la condición de saturación. Como pueden pasar con facilidad al estado líquido se expresan en unidades de peso en lugar de volumen. Los vapores comunes son vapor de agua, amoníaco, cloro, freón, etc.

El caudal en peso del vapor equivale a:

$$W \text{ (kg/h)} = Q_s \text{ (m}^3\text{/h)} \times \frac{1000}{V_s \left(\frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \text{ a presión } P_s \right)}$$

Como la presión P_s es intermedia entre P_1 y P_2 puede suponerse que $V_s = \frac{V_1 + V_2}{2}$

siendo V_1 y V_2 los volúmenes específicos del vapor en $\frac{\text{dm}^3}{\text{kg}}$ o $\frac{\text{cm}^3}{\text{g}}$

Luego:

$$W \text{ (kg/h)} = Q_s \text{ (m}^3\text{/h)} \times \frac{2000}{(V_1 + V_2) \left(\frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} \text{ a presión } \frac{P_1 + P_2}{2} \right)}$$

y sustituyendo en la ecuación general del K_v :

$$\begin{aligned} K_v &= Q_s \sqrt{\frac{Q_s}{\Delta p}} = Q_s \sqrt{\frac{1}{\Delta p \cdot v_s}} = \\ &= \frac{W}{2000} (V_1 + V_2) \sqrt{\frac{2}{\Delta p (V_1 + V_2)}} = \frac{W}{1420} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\Delta p}} \end{aligned}$$

en la que:

W = caudal en peso, kg/h

V_1 = volumen específico a la presión P_1 , en dm^3/kg

V_2 = volumen específico a la presión P_2 , en dm^3/kg

$\Delta P = P_1 - P_2$, en bar

Como antes, los vapores alcanzan una velocidad de saturación cuando la pérdida de carga $\Delta p \gg \frac{P_1}{2}$

Si ocurre así se toma $\Delta p = \frac{P_1}{2}$ para efectuar el cálculo de la válvula y el valor de V_2 debe corresponder a $\frac{P_1}{2}$

Luego:

$$K_v = \frac{W}{1420} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{P_1/2}} = \frac{W}{1004} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{P_1}}$$

con V_1 y V_2 como volúmenes específicos expresados a las presiones P_1 y $\frac{P_1}{2}$ respectivamente.

En el caso del vapor de agua, y partiendo de la fórmula del K_v en los gases:

$$K_v = Q_s \sqrt{\frac{Q_s}{\Delta p}}$$

y como

$$W \text{ (kg/h)} = Q_s \text{ (m}^3\text{/h)} \times 1000 \varrho_s \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \text{ a presión } P_s \right)$$

$$K_v = \frac{W}{1000 \varrho_s} \sqrt{\frac{\varrho_s}{\Delta p}} = \frac{W}{1000} \frac{1}{\sqrt{\Delta p \cdot \varrho_s}}$$

Por otro lado, en el vapor recalentado existe una relación aproximadamente lineal entre $\sqrt{\frac{P_s}{\varrho_s}}$ y C , siendo C los grados centígrados de sobrecalentamiento del vapor.

$$\sqrt{\frac{P_s}{\varrho_s}} = 44,33 (1 + 0,0013 C)$$

la presión P_s varía de P_1 a P_2 en el proceso de expansión a través de la válvula, por lo cual se adopta la presión media $P_s = \frac{P_1 + P_2}{2}$

Relación que sustituida da

$$K_v = \frac{W}{1000} \frac{1}{\sqrt{\Delta p}} \cdot \frac{44,33 (1 + 0,0013 C)}{\sqrt{\frac{P_1 + P_2}{2}}}$$

luego

$$K_v = \frac{W (1 + 0,0013 C)}{16 \sqrt{\Delta p (P_1 + P_2)}}$$

en la que:

W = caudal, en kg/h

$\Delta p = P_1 - P_2$, en bar

P_1 = presión anterior, en bar

P_2 = presión posterior, en bar

C = grados centígrados de recalentamiento del vapor.

Cuando el vapor de agua alcanza la velocidad de saturación se aplican las fórmulas análogas en los vapores, es decir,

$$\text{cuando } \Delta p \geq \frac{P_1}{2} \text{ se toma } \Delta p = \frac{P_1}{2} = P_2$$

y de aquí

$$K_v = \frac{W (1 + 0,0013 C)}{16 \sqrt{\frac{P_1}{2} \cdot \frac{3 P_1}{2}}} = \frac{W (1 + 0,0013 C)}{13,85 P_1}$$

Aplicando el coeficiente C_f para una determinación más precisa del caudal

— Condiciones subcríticas si $\Delta P < \Delta P_M = 0,5 C_f^2 P_1$ aplicándose las fórmulas conservativas.

— Condiciones críticas si $\Delta P \geq \Delta P_M = 0,5 C_f^2 P_1$

En este caso,

$$K_v = \frac{W}{1004 C_f} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{P_1}}$$

y si se trata de vapor de agua

$$K_v = \frac{W (1 + 0,0013 C)}{13,85 P_1 C_f}$$

EJEMPLO

Determinar las dimensiones de la válvula:

Caudal máximo = 16 400 kg/h

$\Delta p = 9,1$ bar

Presión anterior = 26,6 atm

Presión posterior = 17,5 atm

Recalentamiento = 93,33° C

Aplicando la fórmula del caudal para un caudal máximo de cálculo de 16 400 \times 1,25 = 20 500 kg/h

$$K_v = \frac{W (1 + 0,0013 C)}{16 \sqrt{\Delta p (P_1 + P_2)}} = \frac{20\,500 (1 + 0,0013 \times 93,33)}{16 \sqrt{9,1 \times (27,6 + 18,5)}} = 70$$

8.1.9.6 Régimen bifásico

Líquido-gas

Una mezcla líquido-gas tiene un peso específico efectivo ρ_e resultante de la fracción de gas en el líquido. Se supone que el gas es insoluble en el líquido o que sólo se disuelve en una pequeña parte que puede despreciarse, que el líquido no se vaporiza al pasar a través de la válvula y que la velocidad de la mezcla a su paso por la válvula es suficiente para asegurar una buena mezcla turbulenta.

Se supone que el peso específico efectivo ρ_e es el promedio de los pesos específicos a la entrada y a la salida de la válvula.

Luego:

$$\rho_e = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

y

$$\rho_1 = \frac{1}{V_1} = \frac{1}{X_g (V_{g1} - V_l) + V_l} \quad \rho_2 = \frac{1}{V_2} = \frac{1}{X_g (V_{g2} - V_l) + V_l}$$

ρ_1, ρ_2 = pesos específicos efectivos de la mezcla a la entrada y a la salida de la válvula

X_g = fracción en peso del gas

V_{g1}, V_{g2} = volumen específico efectivo del gas a la entrada y a la salida de la válvula

V_l = volumen específico del líquido

TABLA 8.13 Fórmulas de coeficientes de válvulas

$$(C_v = 1,16 K_v // K_v = 0,86 C_v)$$

	K_v (unidades métricas)	C_v (unidades americanas)
LÍQUIDOS	$K_v = Q \sqrt{\frac{Q}{\Delta P}}$	$C_v = Q \sqrt{\frac{Q}{\Delta P}}$
	$K_v = \frac{Q}{F_p} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P}}$	$C_v = \frac{Q}{F_p} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P}}$
	<p>Conos reductores (consultar F_p en tabla 8.10) o aplicar</p> <p>Corrección de viscosidad</p> $F_p = \sqrt{1 - 1,5 \times \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{K_v}{0,04 d^2}\right)^2}$ $F_R = 1,034 - 0,353 \cdot (K_v/K_{v1})^{0,615}$	$F_p = \sqrt{1 - 1,5 \times \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{C_v}{30 d^2}\right)^2}$ $F_R = 1,034 - 0,353 \cdot (C_v/C_{v1})^{0,615}$
	<p>l = laminar t = turbulento</p> <p>Cavitación Caudal crítico</p> <p>En la figura 8.37 se determina la zona de régimen Si es transicional se escoge el mayor coeficiente</p> <p>se presenta a: $\Delta P \geq K_v (P_1 - P_v)$ se presenta a: $\Delta P \geq C_v^2 (P_1 - P_{vc})$</p>	
	$K_v = \frac{Q}{C_t} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P_{vc}}}$ $K_v = \frac{Q \cdot F_{Lp}}{C_t} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P_{vc}}}$ $F_{Lp} = \left(\frac{1}{C_t^2} - \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \cdot \left(\frac{K_v}{0,056 \cdot d^2}\right)^2 \right)^{-1/2}$ $\Delta P_{vc} = P_1 - \left(0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_1}{P_{vc}}}\right) P_v$	$C_v = \frac{Q}{C_t} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P_{vc}}}$ $C_v = \frac{Q \cdot F_{Lp}}{C_t} \sqrt{\frac{Q}{\Delta P_{vc}}}$ $F_{Lp} = \left(\frac{1}{C_t^2} - \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) \cdot \left(\frac{C_v}{30 d^2}\right)^2 \right)^{-1/2}$ $\Delta P_{vc} = P_1 - \left(0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{P_1}{P_{vc}}}\right) P_v$
GASES	<p>Si $\Delta P < \frac{P_1}{2}$</p> $K_v = \frac{Q_n}{328} \sqrt{\frac{G \cdot T_s \cdot Z^*}{\Delta P (P_1 + P_2)}}$	$C_v = \frac{Q_n}{963} \sqrt{\frac{G \cdot T_s \cdot Z^*}{\Delta P (P_1 + P_2)}}$
	<p>Si $\Delta P \geq \frac{P_1}{2}$</p> $K_v = \frac{Q_n}{284} \frac{\sqrt{G \cdot T_s \cdot Z^*}}{P_1}$	$C_v = \frac{Q_n}{835} \frac{\sqrt{G \cdot T_s \cdot Z^*}}{P_1}$
	<p>Fórmulas más precisas } $Z^* =$ Factor de compresibilidad aplicable a presiones > 7 bar (ver figura 8.43) caudal crítico se presenta a $\Delta P \geq 0,5 C_v^2 P_1$</p> $K_v = \frac{Q_n \sqrt{G \cdot T_s \cdot Z^*}}{484 C_t P_1}$	$C_v = \frac{Q_n}{257} \frac{\sqrt{G \cdot T_s \cdot Z^*}}{C_t P_1}$
VAPORES	<p>Si $\Delta P < \frac{P_1}{2}$</p> $K_v = \frac{w}{1420} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\Delta P}}$	$C_v = \frac{w}{89,6} \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{\Delta P}}$
	<p>Si $\Delta P \geq \frac{P_1}{2}$</p> $K_v = \frac{w}{1004} \sqrt{\frac{V_1 + V_2^{**}}{P_1}}$	$C_v = \frac{w}{63,3} \sqrt{\frac{V_1 + V_2^{**}}{P_1}}$
	<p>Fórmulas más precisas } ** V_2 debe corresponder a $\frac{P_1}{2}$ caudal crítico se presenta a $\Delta P \geq 0,5 C_v^2 P_1$</p> $K_v = \frac{w}{1004 \cdot C_t} \sqrt{\frac{V_1 + V_2^{**}}{P_1}}$	$C_v = \frac{w}{63,3 \cdot C_t} \sqrt{\frac{V_1 + V_2^{**}}{P_1}}$

TABLA 8.13 (Continuación)

	K_v (unidades métricas)	C_v (unidades americanas)
VAPOR DE AGUA	$\text{Si } \Delta P < \frac{P_1}{2}$	$C_v = \frac{w(1 + 0,0007 \cdot F)}{2,12 \sqrt{\Delta P (P_1 + P_2)}}$
	$\text{Si } \Delta P \geq \frac{P_1}{2}$	$C_v = \frac{w(1 + 0,0007 \cdot F)}{1,84 P_1}$
	Fórmulas más precisas	caudal crítico se presenta a $\Delta P \geq 0,5 C_t^2 P_1$
		$C_v = \frac{w(1 + 0,0007 \cdot F)}{1,84 P_1 C_t}$
CÓDIGO DE SÍMBOLOS		
	Q = caudal en m ³ /h ρ = kg/dm ³ o g/cm ³ ΔP = Presión diferencial en bar (1 bar = 1,02 kg/cm ²) C_s = viscosidad en centistokes a la temperatura de servicio SSU = $\dot{\text{Id.}}$ en Saybolt P_1 = Presión absoluta anterior, bar (1 bar = 1,02 kg/cm ²) P_v = Presión absoluta del vapor del líquido en la entrada, bar (1 bar = 1,02 kg/cm ²) P_{ve} = Presión absoluta del vapor del líquido en la vena contraída a caudal crítico, bar (1 bar = 1,02 kg/cm ²) K_c = índice de cavitación K_m = coeficiente de recuperación P_2 = Presión absoluta posterior, bar (1 bar = 1,02 kg/cm ²) Q_n = Caudal normal en m ³ /h a 1 atmósfera y 15° C G = Peso específico relativo (aire $G = 1$) T_s = Temperatura absoluta (273 + °C) w = Caudal en peso, kg/h V_1 = Volumen específico a la presión P_1 en dm ³ /kg V_2 = $\dot{\text{Id.}}$ a la presión P_2 C = grados centígrados de calentamiento del vapor	Q = caudal en gpm (U.S.) ρ = densidad relativa (agua = 1) ΔP = Presión diferencial en psi C_s = viscosidad en centistokes a la temperatura de servicio SSU = $\dot{\text{Id.}}$ en Saybolt P_1 = Presión absoluta anterior, psia P_v = Presión absoluta del vapor del líquido en la entrada, psia P_{ve} = Presión absoluta del vapor del líquido en la vena contraída a caudal crítico, psia P_2 = Presión absoluta posterior, psia Q_n = Caudal normal en pies ³ /h a 14,7 psia y 60° F G = Peso específico relativo (aire $G = 1$) T_s = Temperatura absoluta (460 + °F) w = Caudal en peso, lbs/h V_1 = Volumen específico a la presión P_1 en pies ³ /lb V_2 = $\dot{\text{Id.}}$ a la presión P_2 F = grados Fahrenheit de calentamiento del vapor

Luego:

$$K_v = Q_p \frac{1}{\sqrt{\Delta p \cdot \rho_e}} = \frac{1,41 Q_p}{\sqrt{\Delta p (\rho_1 + \rho_2)}}$$

con:

$$Q_p = \text{Tm/h}$$

Δp = pérdida de carga en bar para el caudal máximo

ρ_1, ρ_2 = peso específico, en kg/dm³

Líquido-vapor

Cuando una mezcla de líquido y su vapor penetra en la válvula se presenta una vaporización adicional. Actualmente, en el estado alcanzado por la técnica es imposible predecir con exactitud la capacidad de la válvula trabajando en estas condiciones. Uno de los motivos que impide un cálculo exacto de la válvula es la variación tan grande que puede sufrir el peso específico efectivo si cambia la fracción del fluido que se vaporiza.

De forma aproximada puede emplearse la fórmula de los líquidos, considerando sólo el peso específico efectivo en la entrada

$$K_v = \frac{Q_p}{\sqrt{\Delta p \cdot \rho_1}}$$

8.1.9.7 Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas

Puede verse en la tabla 8.13 para líquidos, gases y vapores. Hay que señalar que los fabricantes de válvulas disponen de reglas de cálculo especiales que determinan rápidamente los coeficientes K_v o C_v de las fórmulas con la suficiente aproximación para el trabajo técnico corriente.

Asimismo, los fabricantes pueden suministrar programas de ordenador para el cálculo de las válvulas de control, debiendo señalar que, si las condiciones de servicio de la válvula son muy complejas, puede ser necesario realizar los cálculos a mano, ya que es difícil que un programa pueda prever exhaustivamente todos los casos.

Figura a continuación un programa en BASIC para el cálculo de válvulas de control.

```

10 REM- *****
20 REM- CALCULO DE VALVULAS DE CONTROL
30 REM- *****
40 CRITIX = 0
50 INPUT "¿CALCULO DEL TAMAÑO (Kv o Cv) o del RUIDO? T/R "; TR$
60 IF TR$ = "T" OR TR$ = "t" THEN 90
70 IF TR$ = "R" OR TR$ = "r" THEN 1230
80 BEEP: GOTO 50
90 INPUT "LIQUIDOS (L); VAPOR DE AGUA (V); VAPORES (Y); GASES (G);"; FLUID$
100 IF FLUID$ = "L" OR FLUID$ = "l" THEN 120 ELSE 730

```

```

110 REM-*****
120 REM-VALVULAS PARA LIQUIDOS
130 REM-*****
140 INPUT "CAUDAL MAXIMO en m3/h"; QM
150 INPUT "DENSIDAD DEL LIQUIDO en gramos/cm3"; D
160 INPUT "PRESION DIFERENCIAL en bar"; PD
170 INPUT "¿ES EL REGIMEN LAMINAR (Alta viscosidad o Muy Baja pérdida de carga)?
    S/N"; VIS$
180 IF VIS$ = "S" OR VIS$ = "s" THEN 190 ELSE 280
190 INPUT "¿COEFICIENTE DE FLUJO LAMINAR - Fs "; FS
200 INPUT "¿VISCOSIDAD CINEMATICA en centipoises "; MU
210 KVT = QM * SQR(D / PD); KVL = (.0276 / FS) * (MU * QM / PD) ^ (2 / 3)
220 FR = 1.034 - .353 * (KVL / KVT) ^ .615: PRINT
230 IF FR > .5 AND FR < .95 THEN PRINT "FLUJO TRANSICIONAL": GOTO 240 ELSE GOTO
    260
240 IF KVL / KVT >= 1 THEN KVL = (INT(KVL * 10 + .5)) / 10: PRINT "KV = "; KVL,
    "CV = "; (INT(1.16 * KVL * 10 + .5)) / 10 ELSE KVT = (INT(KVT * 10 + .5)) / 10:
    PRINT "KV = "; KVT, "CV = "; (INT(1.16 * KVT * 10 + .5)) / 10
250 END
260 IF FR < .5 THEN PRINT "FLUJO LAMINAR": KVL = (INT(KVL * 10 + .5)) / 10: PRIN
    T "KV = "; KVL, "CV = "; (INT(1.16 * KVL * 10 + .5)) / 10: END ELSE 270
270 IF FR >= .95 THEN PRINT "FLUJO TURBULENTO": KVT = (INT(KVT * 10 + .5)) / 10:
    PRINT "KV = "; KVT, "CV = "; (INT(1.16 * KVT * 10 + .5)) / 10: END
280 INPUT "¿DESEA COMPROBAR CONDICIONES DE CAVITACION Y CAUDAL CRITICO? S/N"; SI
    NO$
290 IF SI NO$ = "S" OR SI NO$ = "s" THEN 300 ELSE 560
300 INPUT "COEFICIENTE DE CAVITACION KC"; KC
310 INPUT "COEFICIENTE CF"; CF
320 INPUT "PRESION ANTERIOR en bar"; P1
330 INPUT "PRESION DE VAPORIZACION DEL LIQUIDO en bar abs."; PV
340 INPUT "PRESION DE VAPORIZACION DEL LIQUIDO EN LA VENA CONTRAIDA en bar abs."
    ; PVC
350 CAV = KC * (P1 - PV)
360 PRINT
370 IF PD >= CAV THEN PRINT "EXISTE CAVITACION":GOTO 410
380 IF PD < CAV THEN PRINT "NO EXISTE CAVITACION":GOTO 410
390 IF PD >= CF ^ 2 * (P1 - PVC) THEN PRINT "EXISTE CAUDAL CRITICO": PDVC = P1
    (.96 - .28 * SQR(P1 / PVC)) * PV: CRITIX = 1
400 KV = (1 / CF) * QM * SQR(D / PDVC): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10: GOTO 420
410 KV = QM * SQR(D / PD): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
420 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.16 * KV * 10 + .5)) / 10: PRINT "SI EL ";
    CHR$(237); "< "; CHR$(237); "TUBERIA Y DESEA CONSIDERAR LA INFLUENCIA DE LOS CO
    NOS REDUCTORES:": PRINT "REPITA EL CALCULO CON Kv y Cf VALVULA COMERCIAL SELECCI
    ONADA"
430 INPUT "¿DESEA CONSIDERAR LA INFLUENCIA DE LOS CONOS REDUCTORES? S/N"; CRICON
    $
440 IF CRICON$ = "S" OR CRICON$ = "s" THEN 450 ELSE END
450 PRINT "SELECCIONE EL TAMAÑO DE LA VALVULA"
460 INPUT "¿Kv REAL"; KVCON
470 INPUT "¿Cf REAL"; CFCON
480 INPUT "¿DIAMETRO TUBERIA en mm."; DTUB
490 INPUT "¿DIAMETRO VALVULA en mm."; DVAL
500 IF CRITIX = 1 THEN FLP = 1 / SQR((1 / CF ^ 2) + (1 - (DVAL / DTUB) ^ 2) ^ 2
    * (KVCON / (.056 * DVAL ^ 2) ^ 2))
510 IF CRITIX = 1 THEN KV = (FLP / CF) * QM * SQR(D / PDVC): KV = (INT(KV * 10 +
    .5)) / 10: GOTO 540
520 FP = SQR(1 - 1.5 * (1 - (DVAL / DTUB) ^ 2) ^ 2 * (KVCON / (.04 * DVAL ^ 2) ^
    2))
530 KV = (1 / FP) * QM * SQR(D / PD): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
540 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.16 * KV * 10 + .5)) / 10
550 END

```

```

560 INPUT "¿DESEA CONSIDERAR LA INFLUENCIA DE LOS CONOS REDUCTORES? S/N"; CONO$
570 IF CONO$ = "S" OR CONO$ = "s" THEN 580 ELSE 690
580 IF CONO$ = "S" OR CONO$ = "s" THEN KV = QM * SQR(D / PD): KV = (INT(KV * 10
+ .5)) / 10: PRINT : PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.16 * KV * 10 + .5)) / 10
590 PRINT "REPITA EL CALCULO CON EL KV y CF de LA VALVULA COMERCIAL SELECCIONADA
INICIALMENTE"
600 PRINT "SELECCIONE EL TAMARO DE LA VALVULA"
610 INPUT "¿KV REAL"; KVCON
620 INPUT "¿CF REAL"; CFCON
630 INPUT "¿DIAMETRO TUBERIA en mm."; DTUB
640 INPUT "¿DIAMETRO VALVULA en mm."; DVAL
650 FP = SQR(1 - 1.5 * (1 - (DVAL / DTUB) ^ 2) ^ 2 * (KVCON / (.04 * DVAL ^ 2) ^
2))
660 KV = (1 / FP) * QM * SQR(D / PD): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
670 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.16 * KV * 10 + .5)) / 10
680 END
690 KV = QM * SQR(D / PD): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
700 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.16 * KV * 10 + .5)) / 10
710 END
720 REM-*****
730 REM-VALVULAS PARA VAPOR DE AGUA
740 REM-*****
750 IF FLUID$ = "V" OR FLUID$ = "v" THEN 760 ELSE 890
760 INPUT "CAUDAL MAXIMO en Kg/h"; W
770 INPUT "GRADO DE RECALENTAMIENTO del vapor"; C
780 INPUT "PRESION ANTERIOR en bar abs"; P1
790 INPUT "PRESION POSTERIOR en bar abs."; P2
800 INPUT "COEFICIENTE CF"; CF
810 IF P1 - P2 >= .5 * CF ^ 2 * P1 THEN PRINT "EXISTE CAUDAL CRITICO": GOTO 850
820 KV = W * (1 + .0013 * C) / (16 * SQR((P1 - P2) * (P1 + P2))): KV = (INT(KV *
10 + .5)) / 10
830 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
840 END
850 KV = (1 / CF) * W * (1 + .0013 * C) / (13.85 * P1): KV = (INT(KV * 10 + .5))
/ 10
860 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
870 END
880 REM-*****
890 REM-VALVULAS PARA VAPORES
900 REM-*****
910 IF FLUID$ = "Y" OR FLUID$ = "y" THEN 920 ELSE 1060
920 INPUT "CAUDAL MAXIMO en Kg/h"; W
930 INPUT "VOLUMEN ESPECIFICO EN LA ENTRADA en m3/Kg"; V1
940 INPUT "VOLUMEN ESPECIFICO EN LA SALIDA en m3/Kg"; V2
950 INPUT "PRESION ANTERIOR en bar abs."; P1
960 INPUT "PRESION POSTERIOR en bar abs."; P2
970 INPUT "COEFICIENTE CF"; CF
980 IF P1 - P2 >= .5 * CF ^ 2 * P1 THEN PRINT "EXISTE CAUDAL CRITICO": GOTO 1020
990 KV = (W / 1420) * SQR((V1 + V2) / (P1 - P2)): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
1000 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
1010 END
1020 KV = (W / (1004 * CF)) * (SQR((V1 + V2) / P1)): KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
1030 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
1040 END
1050 REM-*****
1060 REM-VALVULAS PARA BASES
1070 REM-*****
1080 IF FLUID$ = "G" OR FLUID$ = "g" THEN 1090 ELSE BEEP: GOTO 90
1090 INPUT "CAUDAL MAXIMO en m3/h"; QN

```

```

1100 INPUT "DENSIDAD RELATIVA AL AIRE"; G
1110 INPUT "TEMPERATURA DEL GAS en oC"; TS
1120 INPUT "FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Z"; Z
1130 INPUT "PRESION ANTERIOR en bar abs."; P1
1140 INPUT "PRESION POSTERIOR en bar abs."; P2
1150 INPUT "COEFICIENTE CF"; CF
1160 IF P1 - P2 >= .5 * CF ^ 2 * P1 THEN PRINT "EXISTE CAUDAL CRITICO": GOTO 1200
1170 KV = (GN / 328) * SQR(G * (TS + 273) * Z / ((P1 - P2) * (P1 + P2))) : KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
1180 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
1190 END
1200 KV = (GN / 284) * (SQR(G * (TS + 273) * Z)) / (CF * P1) : KV = (INT(KV * 10 + .5)) / 10
1210 PRINT "KV = "; KV, "CV = "; (INT(1.17 * KV * 10 + .5)) / 10
1220 END

```

8.1.10 Ruido en las válvulas de control

8.1.10.1 Generalidades

En las industrias de proceso intervienen muchos factores que contribuyen al mantenimiento de altos niveles de ruido, entre los cuales, uno de los más importantes es el generado durante el funcionamiento de las válvulas de control instaladas en tuberías que transportan líquidos, gases y vapores. Las leyes y normas aparecidas en la industria sobre el nivel de ruido admisible han contribuido a desarrollar con ímpetu creciente el estudio de su reducción en las válvulas de control.

Como es natural, es básico analizar a fondo las causas del ruido en las válvulas para reducirlos a niveles aceptables. De este modo, es posible evitar problemas acústicos en el proyecto de nuevas instalaciones.

El cálculo del nivel de ruido de las válvulas de control es un problema que actualmente no puede resolverse en forma precisa debido al desconocimiento del valor de los distintos parámetros que intervienen. La predicción del nivel de ruido se hace empíricamente tomando como bases los múltiples datos tomados en el laboratorio.

Los términos más comúnmente empleados son:

Sonido. — Forma de vibración que se propaga a través de medio elástico tal como el aire, por medio de una alternativa compresión y liberación de las moléculas a una frecuencia característica del medio.

Frecuencia del sonido, en Hz. — Número de ondas sónicas que pasan por una posición en un segundo, o bien, número de veces con que la presión sónica varía en un ciclo completo (compresión y liberación) por segundo.

Presión del sonido, Ps. — La onda sónica tiene una presión que fluctúa por encima y por debajo de la presión atmosférica y que produce la sensación auditiva del sonido. La presión del sonido es el valor cuadrático medio (valor eficaz) de los valores que la presión va tomando al ir variando de un valor alto en la compresión a un valor bajo en la expansión.

Decibelio, dB. — Número sin dimensiones que expresa la razón de dos valores

numéricos en una escala logarítmica. En acústica, el decibelio relaciona el nivel de presión del sonido o un nivel de potencia sónica con un nivel de referencia seleccionado.

Nivel de presión del sonido, spl (sound pressure level). — Expresado en decibelios, el nivel de presión del sonido es 20 veces el logaritmo en base 10 de la relación entre la presión de este sonido y una presión de referencia que se toma generalmente de 0,0002 microbars

$$dB = 20 \log_{10} \frac{\text{nivel medido}}{\text{nivel de referencia}}$$

El nivel de referencia se toma igual a 2×10^{-5} pascal (N/m^2)

dB A. — Nivel de presión medido en decibelios en la escala «A» de frecuencia de un medidor de nivel de sonido. El circuito «A» simula con mucha aproximación la sensibilidad del oído humano; éste tiene una cresta en la respuesta frecuencial a unos 1000 Hz aproximadamente.

Atenuación. — Debilitamiento o reducción del nivel de presión de sonido.

Otros términos empleados:

C_v = Coeficiente nominal de capacidad de la válvula

P_1 = Presión anterior a la válvula, bar

P_2 = Presión posterior a la válvula, bar

P_v = Presión del vapor del fluido, bar

F_L = Razón de recuperación de presiones en la válvula, sin dimensiones

Z_1 = Punto de cavitación incipiente

Z_2 = Punto donde existe el máximo de nivel de presión sónica en el flujo de un líquido

ΔP = Diferencia de presiones $P_1 - P_2$, bar

$\Delta P/P_1$ = Razón de presiones (diferencia de presiones dividida por la presión anterior).

Los valores corrientes del nivel de presión del sonido se encuentran en la tabla 8.14, que figura a continuación.

TABLA 8.14 Nivel de presión sónica de ruidos comunes

<i>dB</i>	<i>Fuente de sonido</i>	<i>dB</i>	<i>Fuente de sonido</i>
155	Sirena próxima	70	Oficina ruidosa
140	Jet (umbral de dolor)	60	Conversación
130	Prensa hidráulica	50	Oficina
120	Claxon fuerte	40	Biblioteca
110	Camiones	30	Estudio de grabación
100	Metro; avión a hélice	20	Reloj eléctrico (3 m)
90	Orquesta sinfónica	10	Crujido de la hierba
80	Tráfico pesado	0	Umbral de silencio

8.1.10.2 Causas del ruido en las válvulas

La alta velocidad de los fluidos en las tuberías es una causa importante del ruido en las válvulas. Sin embargo, no pueden darse reglas de velocidad por la gran cantidad de variables que influyen. Como guía pueden considerarse los siguientes valores:

Líquidos: 1,5-3 m/s a 12-15 m/s

Gases: 75-120 m/s hasta 0,3 Mach

Vapor de agua o vapores: 20-30 m/s (hasta 2 bar) 30-50 m/s (saturado hasta 2 bar) 35-100 bar (vapor sobrecalentado hasta 15 bar o 0,15 Mach).

Tres son las causas principales del ruido en las válvulas de control: vibración mecánica, ruido hidrodinámico y ruido aerodinámico.

La *vibración mecánica* es debida a las fluctuaciones de presión casuales que se producen dentro del cuerpo de la válvula y al choque del fluido contra las partes móviles de la misma.

Estos fenómenos dan lugar a la vibración del elemento correspondiente.

La vibración mecánica que se presenta con más frecuencia en la válvula es el movimiento lateral del obturador con relación a las superficies de guía. El ruido de esta vibración se parece a un golpeteo metálico y su frecuencia es normalmente menor de 1500 Hz.

Otra causa es la entrada en resonancia de un componente de válvula vibrando a su frecuencia natural. El ruido se reconoce por su característica altura de tono de alta frecuencia comprendido normalmente entre 3000 y 7000 Hz. Se produce una alta fatiga mecánica del material que puede llegar a destruirlo.

La mejora gradual en la calidad de fabricación de las válvulas de control ha disminuido la importancia de la vibración mecánica frente a los fenómenos de cavitación y de turbulencia. Por otro lado puede eliminarse la vibración mecánica variando las condiciones del proceso o bien, si ello no es posible, cambiando la masa del obturador.

El *ruido hidrodinámico* es producido por los líquidos al circular a través de la válvula, pudiendo encontrarse en varios estados: sin cavitación, con cavitación, con vaporización, que se representan en la curva que relaciona el cociente de presiones $\Delta P/P_1$ y el nivel del ruido generado (SPL) (fig. 8.44). Se encuentra primero una banda estrecha (L) sin casi emisión de sonido, sigue a continuación una banda más ancha (T) en la que aumenta moderadamente el nivel de ruido y a partir de un cierto punto Z_1 , el ruido aumenta bruscamente para alcanzar un valor máximo Z_2 .

La *cavitación* iniciada en el punto Z_1 tiene lugar en dos etapas.

En la primera el fluido alcanza su máxima velocidad al pasar a través del orificio interno existente entre el obturador y el asiento y si esta velocidad es suficiente, la presión en la vena contraída puede reducirse a la presión de vaporización del líquido pasando éste al estado de vapor en forma de burbujas. La segunda etapa tiene lugar aguas abajo donde el fluido disminuye su velocidad y aumenta paralelamente su presión por encima de la presión de vapor y las burbujas formadas anteriormente se aplastan. La cavitación puede provocar graves

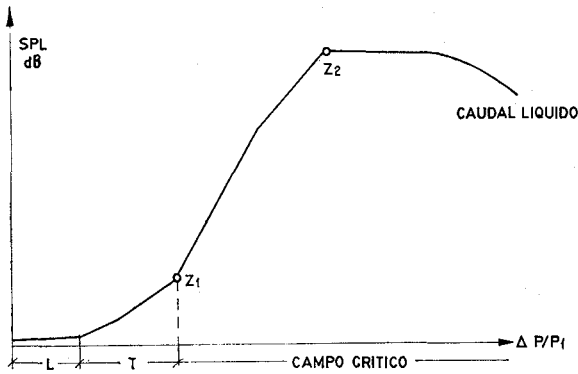


Fig. 8.44 Nivel de ruido en líquidos.

daños y problemas importantes de vibración en las válvulas de control. Sin embargo, es fácil evitarla seleccionando adecuadamente los límites en las condiciones de servicio (ver estudio de cavitación). En Z_2 existe el máximo nivel de presión del sonido. A continuación sigue una potencia acústica radiada casi constante que se reduce al aumentar todavía más la relación $\Delta P/P_1$. Este último fenómeno se presenta porque la presión de salida P_2 se aproxima a la presión de vapor del líquido, es decir, la diferencia $P_2 - P_v$ tiende a cero y en estas condiciones prevalece más bien una evaporación continua en una fase de vapor comparativamente estable que una evaporación rápida con la subsiguiente condensación brusca. Por tanto, ello se traduce en una disminución del grado de cavitación y por consiguiente en un menor nivel de presión del sonido.

La Norma IEC 534-8-4 de 1995 permite el cálculo del ruido hidrodinámico.

El *ruido aerodinámico* es la causa principal del ruido producido por la válvula. Proviene del flujo turbulento del vapor, del aire y de otros gases, siendo despreciable prácticamente en los líquidos. El ruido aerodinámico puede producirse por obstrucciones en el flujo del fluido, por expansión rápida o deceleración del gas a alta velocidad al salir de la válvula, o por codos o curvas bruscas existentes en el sistema de tuberías. Si el fluido alcanza la velocidad del sonido (Mach 1) se crean altos niveles de ruido; sin embargo, también pueden generarse ruidos importantes a velocidades tan bajas como 0,4 mach y a bajas pérdidas de carga con grandes caudales. El ruido aerodinámico es aperiódico, con frecuencias comprendidas entre 2000 y 8000 Hz.

Los factores a considerar en la generación de este tipo de ruido son el tipo de fluido, el caudal, la presión anterior a la válvula, la pérdida de carga, la configuración de la tubería, y las propiedades físicas del fluido. Entre los elementos que pueden producirlo directamente figuran los diafragmas, los autorreguladores de presión, etc.

La Norma IEC 534-8-3 de 1995 permite el cálculo del ruido aerodinámico.

Los diferentes regímenes de generación de ruido son el resultado de diversos fenómenos sónicos o reacciones entre las moléculas del gas y las células de choque sónicas. Los regímenes son:

- Régimen I flujo subsónico.
 P_2 (presión de salida) $\geq P_{2c}$ (presión de salida en condiciones críticas)
- Régimen II flujo sónico con interacciones entre las células de choque y la mezcla de caudal turbulento estrangulado.
 P_{2c} (presión absoluta de salida en condiciones críticas) $>$
 $> P_2$ (presión de salida) \geq
 $\geq P_{vcc}$ (presión absoluta en la vena contraída en condiciones críticas).
- Régimen III flujo supersónico con dominio del mecanismo de esfuerzo cortante del flujo turbulento.
 P_{vcc} (presión absoluta en la vena contraída en condiciones críticas) $>$
 $> P_2$ (presión de salida) \geq
 $\geq P_{2B}$ (presión absoluta de salida en el punto de ruptura).
- Régimen IV con interacción del flujo turbulento de las células de choque.
 P_{2B} (presión absoluta de salida en el punto de ruptura) $>$
 $> P_2$ (presión de salida) \geq
 $\geq P_{2CE}$ (presión absoluta de salida donde se inicia la zona de rendimiento acústico constante).
- Régimen V con un rendimiento acústico constante. Un aumento de la presión de salida P_2 no aumenta el ruido.
 P_{2CE} (presión absoluta de salida donde se inicia la zona de rendimiento acústico constante) $> P_2$ (presión de salida).

Los cálculos son muy complicados y dependen del régimen en el que se encuentre el flujo del fluido. Los fabricantes de válvulas de control facilitan programas de ordenador que permiten realizar rápidamente los cálculos de predicción del ruido. El lector interesado puede consultar la Norma IEC 534-8-3 de 1995 para más información.

8.1.10.3 Reducción del ruido

La reducción del ruido en las válvulas de control se logra bien atacando la fuente de ruido, o bien atenuando la transmisión del sonido.

En el primer caso se suele utilizar una válvula de bola o rotativa con el obturador perforado o un obturador del tipo jaula (fig. 8.45), dotado de múltiples orificios de forma variada parecidos a panales de abeja. Con un cuerpo de tamaño adecuado y con este tipo de obturador es fácil disminuir el ruido en unos 20 dB en comparación con una válvula de globo convencional seleccionada teniendo en cuenta sólo su capacidad.

En otros tipos de válvulas (fig. 8.46) se emplean conductos laberínticos en las partes internas entre el obturador y los asientos para aumentar la resistencia hidráulica del fluido y limitar su velocidad reduciendo así el ruido.

Un conducto laberíntico complejo es el formado por un conjunto de discos con

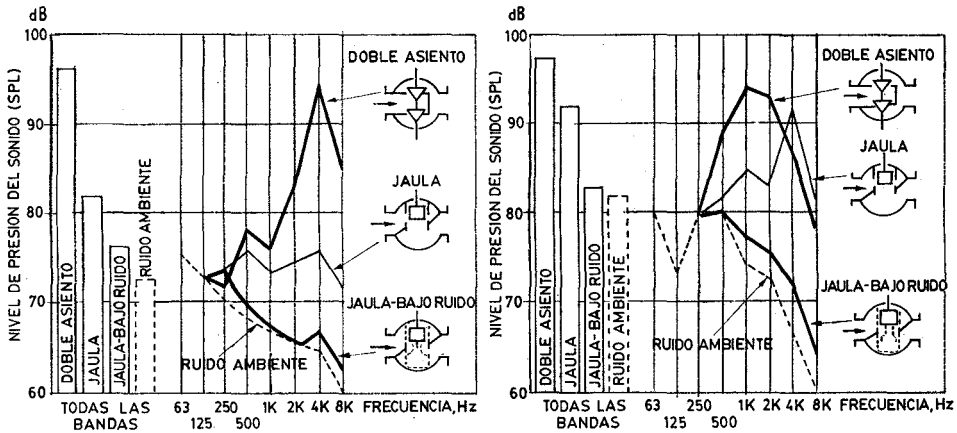


Fig. 8.45 Reducción del ruido en un obturador tipo jaula.

canales incorporados o cortados que forman pasos múltiples. De este modo se reduce la velocidad y se aumentan las pérdidas por transmisión al incrementar la frecuencia. La reducción del ruido es del orden de los 30 dB.

La atenuación de la transmisión del sonido se logra por disipación de la energía acústica mediante materiales absorbentes. El material absorbente se sitúa aguas abajo y lo más próximo posible de la válvula de control. En la figura 8.47 puede verse un silenciador típico en forma de placa de expansión que puede atenuar el ruido en unos 30 dB o más.

Si el tipo de válvula seleccionada o el silenciador o ambos no atenúan suficientemente, es necesario aislar el ruido del exterior. Para ello se disponen aislamientos sobre las fuentes en forma de manguitos, cajas aislantes o bien incluso cámaras y edificios especiales.

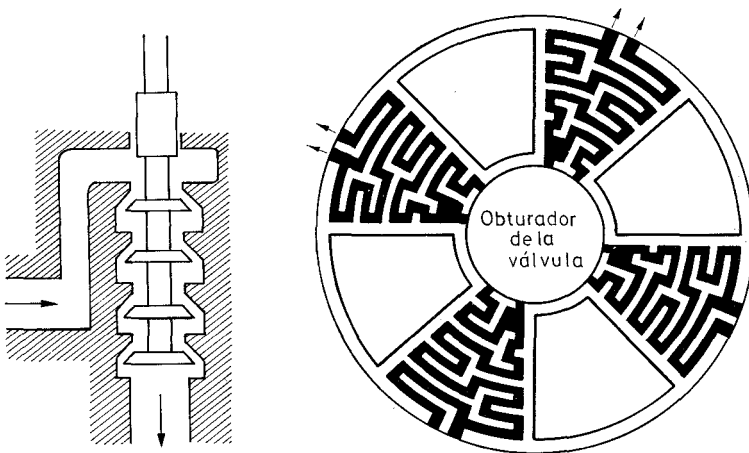


Fig. 8.46 Asiento y obturador en laberinto.

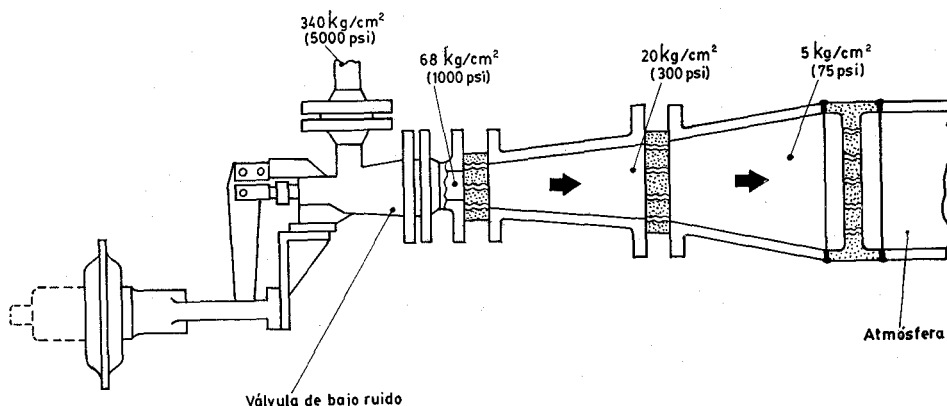


Fig. 8.47 Placa de expansión.

8.2 Elementos finales electrónicos

En los procesos industriales altamente sofisticados, tales como hornos, tratamientos térmicos, máquinas de extrusión, máquinas de hilar fibra sintética, etc., la regulación precisa de la variable controlada (suele ser la temperatura) obliga a controlar la potencia entregada a las resistencias finales de calefacción.

Los primeros elementos que salieron al mercado y que permitieron el control continuo de la potencia (sin considerar el control todo-nada) fueron el tiratrón y el ignitrón que eran respectivamente un tubo de vacío lleno de gas y un tubo con mercurio; sus dimensiones eran demasiado grandes y su costo excesivo para las potencias que se necesitaban. Apareció después el amplificador magnético o bobina saturable de bajo costo relativo, que ha sido realmente un equipo robusto que ha aportado la primera solución práctica de aplicación industrial. El rectificador controlado de silicio apareció hace pocos años, ha representado una revolución en el control de potencia por sus dimensiones reducidas y por trabajar con una alta densidad de corriente. Características que entre otras que se verán hacen que sea el más utilizado actualmente.

Estos elementos se comportan en forma parecida a una válvula de control: varían la corriente en la línea de alimentación a la carga en la misma forma en que una válvula cambia el caudal de fluido en un tubería.

8.2.1 Amplificador magnético saturable

El amplificador magnético saturable puede describirse básicamente como un dispositivo magnético con un núcleo de láminas de hierro y dos pares de bobinados, uno en serie con la carga llamado bobinado de carga y el otro que cambia el flujo magnético del aparato y que se denomina bobinado de control (fig. 8.48 a).

Al variar la señal de salida de 4 a 20 mA c.c. del controlador en el bobinado de control cambia el grado de saturación del núcleo, con lo cual el circuito de

carga pasa a tener entonces una impedancia elevada si el núcleo no está saturado o bien una impedancia variable que disminuirá a medida que aumente la saturación del núcleo (fig. 8.48 b). Así, pues, la señal del controlador fijará el punto de arranque o de cebado en la curva de imantación. Si además es grande la relación entre las espiras del bobinado de control y las del bobinado de carga, una pequeña intensidad de corriente controlará un valor muy elevado en la intensidad de salida y será posible gobernar una potencia considerable en la carga.

Para obtener un buen rendimiento en el control, la carga debe absorber una potencia que no baje de 50 % de la potencia nominal del amplificador magnético. Éste debe pues seleccionarse respetando esta condición. En caso de no ser ello posible se recomienda la instalación de una carga ficticia en paralelo con la salida o en paralelo con el bobinado de control del amplificador con el objeto de situar la potencia de trabajo de éste en 75 % de la nominal.

Cuando se emplea un amplificador magnético saturable, no es posible anular totalmente la potencia de la alimentación de la carga; ésta alcanza un mínimo de 10 % con tensión nula en el bobinado de control ya que la impedancia en la bobina no puede hacerse infinita, y a la inversa, al no anularse totalmente ésta, la tensión en la bobina de control llega como máximo a 90 % de la tensión de línea. Se recomienda en general que la carga sea de 60 % de la potencia nominal del aparato.

Las desventajas mencionadas de tamaño excesivo, campo de control de 10 a 90 % de la tensión de línea, imposibilidad de cortar totalmente la alimentación a la carga y necesidad de seleccionar el tamaño para que la potencia desarrollada se acople bien a las necesidades de la carga, han eliminado gradualmente el em-

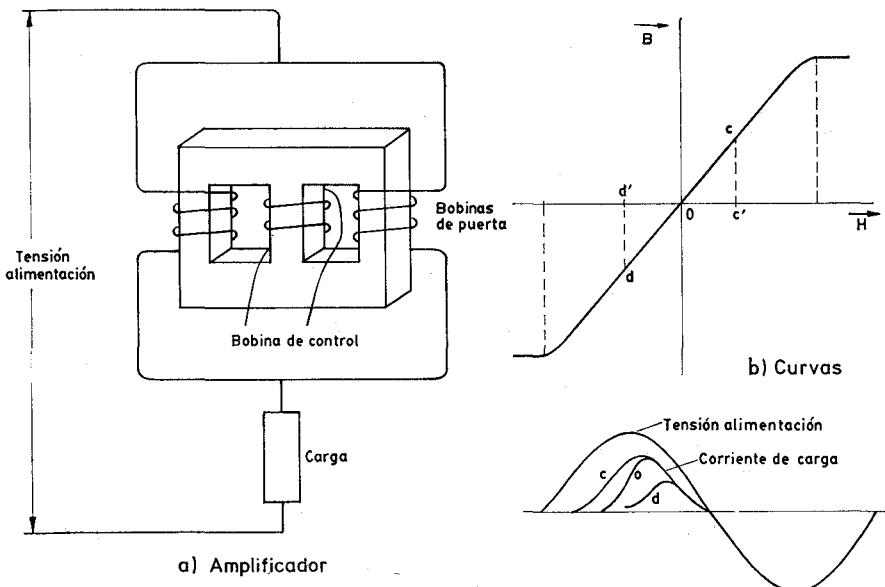


Fig. 8.48 Amplificador magnético.

pleo del amplificador magnético saturable en muchas aplicaciones en beneficio del rectificador controlado de silicio.

8.2.2 Rectificadores controlados de silicio

Los rectificadores controlados de silicio o SCR (*silicon controlled rectifier*) o tiristores se han desarrollado rápidamente en el campo de control de potencia, sustituyendo gradualmente al amplificador magnético gracias a sus mejores características. Emplean rectificadores de silicio que bloquean el paso de la corriente en sentido inverso, igual que los convencionales, pero que además la bloquean en sentido directo hasta tanto no se aplica una pequeña señal en el cable de control o puerta. Una vez el rectificador pasa al estado de conducción la señal puede desconectarse y aquél continuará en el mismo estado hasta tanto la corriente no cambie de sentido. No hay nuevo paso de corriente si la excitación no «enciende» nuevamente el rectificador (fig. 8.49 a).

Existen dos sistemas de encendido: por ángulo de desfase entre la corriente alterna de carga y el impulso de excitación (*phase control*) y por encendido discreto con disparo en el instante de cruzar el valor cero la corriente alterna de carga (*zero cross switching*).

En el sistema de *ángulo de fase*, la carga se alimenta con una corriente alterna recortada en un porcentaje controlado en cada ciclo. La señal de puerta que selecciona la parte deseada de potencia de esta corriente de alimentación de la carga, es un impulso de corta duración y a la misma frecuencia de la corriente. En la figura 8.49 b puede verse la zona de conducción de la onda de corriente según el ángulo de encendido.

Para aprovechar el hem ciclo negativo se suele utilizar otro elemento SCR en oposición o bien su equivalente, una unidad triac (fig. 8.50).

El sistema de encendido de ángulo de fase puede aplicarse en el control de cargas resistivas e inductivas. En las figuras 8.51 y 8.52 se representa el control de éstas con las ondas de tensión y corriente correspondientes.

Se observará que la forma de la onda de la corriente de carga tiene muchos

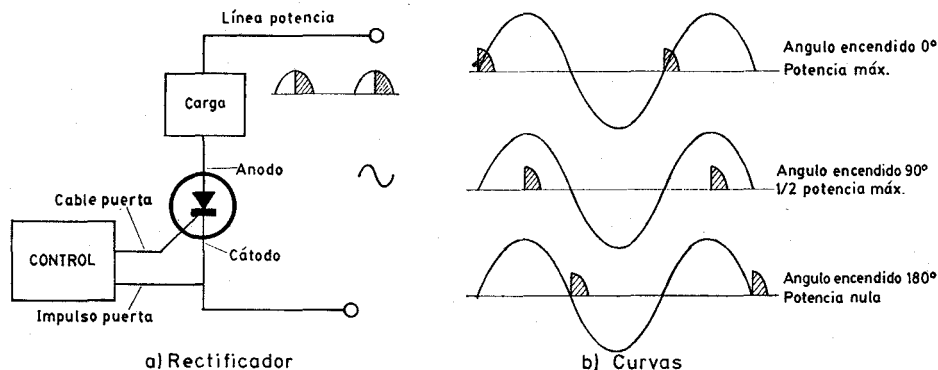


Fig. 8.49 Rectificador controlado de silicio (SCR).

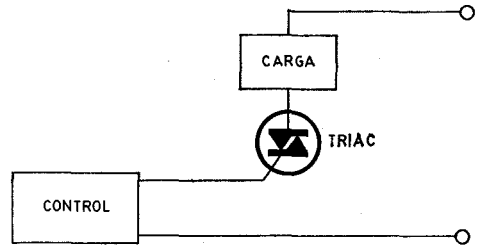


Fig. 8.50 Triac.

armónicos debido a que queda muy recortada. Esta forma de onda produce interferencias electromagnéticas ya que la corriente de carga crece abruptamente al pasar del valor cero al valor nominal en unos pocos microsegundos, desarrollando así unas potencias transitorias y una distorsión importantes que pueden afectar el funcionamiento de otros aparatos de control que se alimenten de la misma fuente.

Un circuito de filtrado puede reducir la energía de interferencia, pero si la potencia de carga es elevada el filtro llega a ser voluminoso y caro, inclinando la selección al sistema de encendido discreto por disparo al paso de cero, una de cuyas características es la eliminación virtual de las interferencias de radiofrecuencia.

En el circuito de *encendido discreto por paso de cero* (*zero cross switching*) la corriente alterna es entregada a la carga en forma de paquetes de ondas discontinuas. Este tren de ondas se genera mediante una excitación continua o bien por medio de impulsos sincronizados que actúan antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en lugar de un impulso sincronizado en fase como ocurría

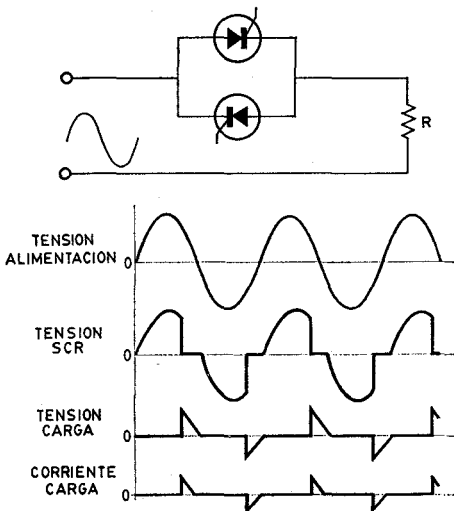


Fig. 8.51 Control de una carga resistiva.

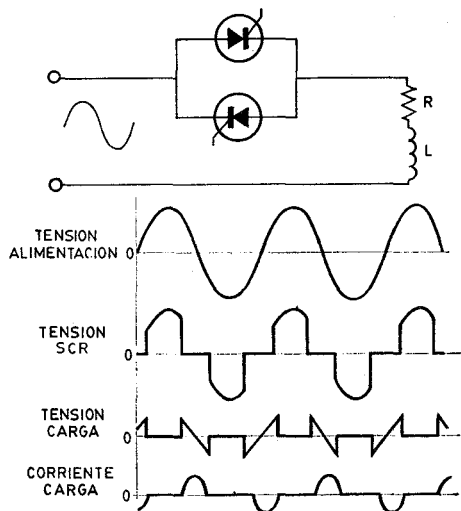


Fig. 8.52 Control de una carga inductiva.

en el sistema de ángulo de fase. La señal de excitación mantiene el tiristor o el triac encendidos y al anularse aquélla, éstos dejan de conducir. El sistema se emplea típicamente en control proporcional en tiempo: se emiten una señal continua o una serie de impulsos sincronizados, antes de que la tensión de línea cruce el valor cero, en número proporcional a la señal de control de 4-20 mA c.c. Si esta señal es, por ejemplo, de 12 mA c.c. y la base de tiempos o duración del ciclo es de 1 segundo, a la carga pasarán 25 ciclos («on») y dejarán de pasar 25 ciclos («off»), tal como puede verse en la figura 8.53.

El circuito de encendido discreto se emplea con preferencia para cargas resistivas en calentamiento de hornos. En cargas ligeramente inductivas puede utilizarse con precaución siempre que se limite el ángulo de encendido para evitar que la componente inductiva de la corriente dispare el circuito de protección (debe ser casi cero antes del encendido de la media onda).

Las unidades SCR requieren un sistema de protección para limitar la corriente de carga, en particular en el calentamiento de hornos donde el valor de las resistencias de calefacción varía del estado frío al estado caliente o de régimen. Esta limitación puede ser automática o manual, recomendándose la primera en hornos con elementos de calefacción de molibdeno o de platino.

Las condiciones más desfavorables de funcionamiento se tienen en el arran-

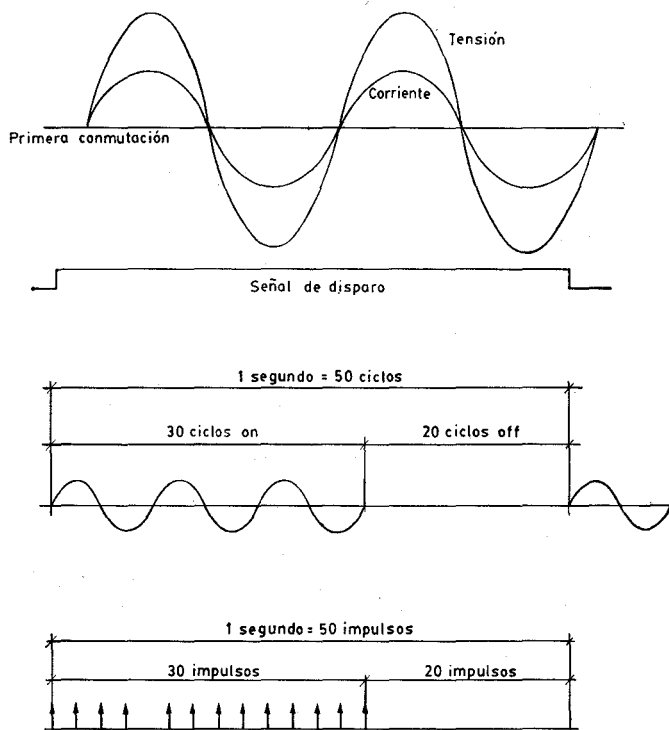


Fig. 8.53 Circuito de encendido discreto.

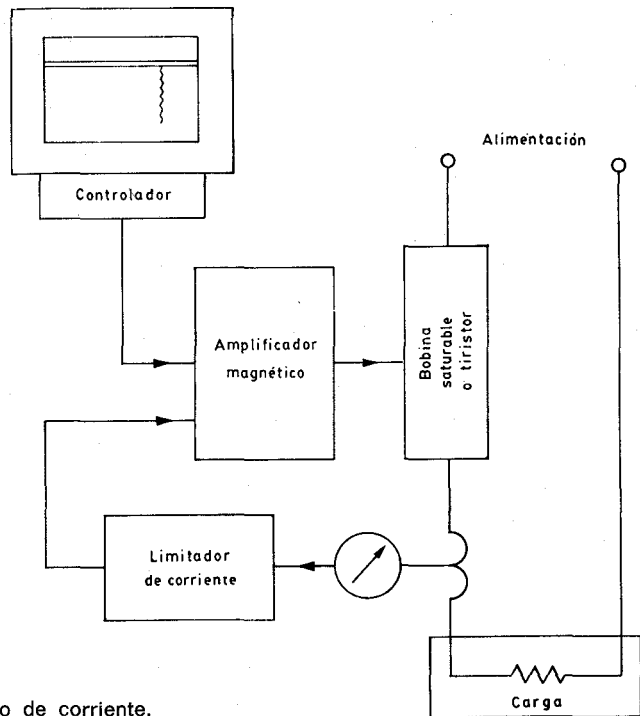


Fig. 8.54 Limitador automático de corriente.

que ya que al aplicar la tensión total pasa una corriente excesiva, lo cual acorta la vida útil del elemento calefactor y sobrecarga el equipo de protección.

En la figura 8.54 se representa el dispositivo limitador automático de corriente montado en serie con el circuito de medida de carga. Si las características de la carga varían y la corriente de carga llega a exceder el valor de seguridad, el limitador envía una señal al circuito de control del SCR a fin de mantener la corriente de salida a la carga en un valor soportable para los rectificadores de silicio.

Esta disminución de corriente cambia a medida que los elementos se van calentando gradualmente y van disminuyendo su resistencia eléctrica. El proceso continúa hasta funcionamiento normal, en el cual el limitador de corriente no tiene prácticamente influencia.

El método manual se emplea con los elementos Global, cuya resistencia cambia gradualmente con el tiempo, necesitando progresivamente tensiones de línea más altas para producir el mismo efecto de calefacción. Se utiliza un transformador con tomas que se ajusta manualmente para elevar la tensión de alimentación.

El tiristor necesita también una protección contra tensiones transitorias y fusibles como protección contra sobrecorrientes.

Los rectificadores de silicio controlado van provistos de indicadores del por-

centaje de corriente de carga graduados 0—100 %, de un conmutador automático manual y de un mando manual para el ajuste de la carga.

Las características de aplicación de los SCR son las siguientes:

- Ganancia extremadamente alta con un límite de 10 000 o superior.
- Su linealidad es excelente, de ± 2 % en todo el campo de medida.
- Su salida mínima es de 0 V. Ello indica que la potencia de alimentación a la carga puede anularse completamente.
- Bajas caídas de tensión de modo que a la carga puede aplicársele de 96 a 99 % de la tensión de línea.
- El tiempo de respuesta es corto, del orden de varios ciclos (1/50 s).
- Son de pequeño tamaño.
- Necesitan una protección contra corrientes transitorias.
- Su potencia nominal debe disminuirse si aumenta la temperatura de servicio.

8.2.3 Válvula inteligente

Aparecida gracias al desarrollo de los microprocesadores, contiene un controlador digital, y sensores de medición de temperatura, caudal y presión montados en la propia válvula. El controlador digital controla la presión manométrica antes o después del orificio de la válvula, y la temperatura o el caudal, y envía la señal de salida al módulo del posicionador electroneumático acoplado al actuador. Cada válvula tiene grabada en una memoria ROM la variación del C_v correspondiente al intervalo 0 al 100 % de abertura de la válvula y el valor del factor de recuperación C_p , lo que permite conocer y controlar el caudal que está pasando a través de la válvula, gracias al microprocesador que calcula el caudal utilizando las fórmulas correspondientes (fig. 8.55). El software permite seleccionar la característica deseada de la válvula: lineal, igual porcentaje, apertura rápida y la que pueda especificar el usuario.

La válvula inteligente acepta la entrada del valor externo del punto de consigna y la comunicación digital a través de la interfaz RS-485 con el protocolo adecuado para comunicarse con los sistemas de control distribuido. De este modo, accede a los valores de la variable de proceso, el punto de consigna y las alarmas.

La válvula inteligente puede efectuar un diagnóstico de sí misma al medir la carrera del vástago y las presiones del actuador. Puede captar el excesivo rozamiento del vástago o el pegado de las partes internas. Además permite llevar el proceso a una condición de seguridad en el caso de problemas graves. Por ejemplo, si se pierde la comunicación con el control distribuido, el sistema puede ser programado para conducir la válvula a una posición de seguridad que impida la pérdida del material o para prevenir una condición de peligro para el operador de la planta.

8.3 Otros elementos finales de control

Otros elementos que constituyen una alternativa a las válvulas de control son:

Bombas dosificadoras accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y

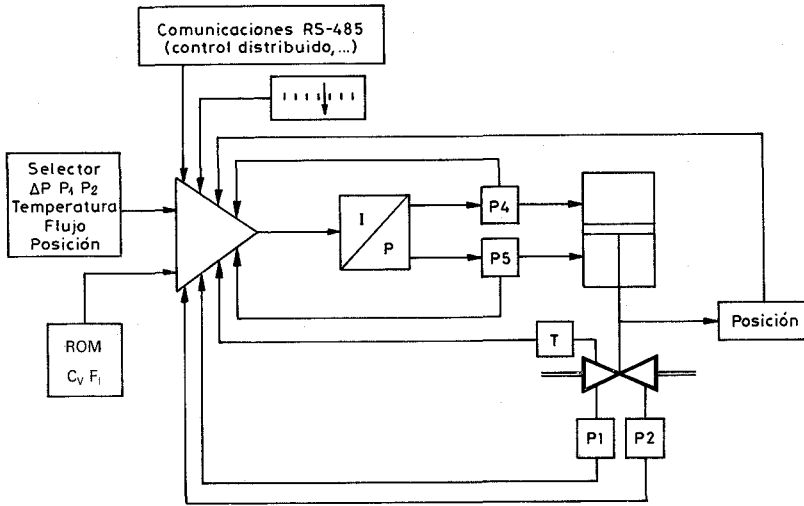


Fig. 8.55 Válvula inteligente. (Cortesía de Valtek International Inc.)

utilizadas principalmente en el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, en casos tales como el control de pH, tratamiento de aguas, adición de productos en la industria alimenticia, etc., aplicaciones que se caracterizan por bajos caudales, altas presiones, altas viscosidades, etc.

Actuadores de velocidad variable que gobiernan la velocidad de bombas centrífugas, ventiladores, compresores, etc., variando así el caudal de fluido, y que presentan la ventaja de evitar la pérdida de energía que necesariamente absorben las válvulas de control.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos.....	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos.....	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos.....	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas.....	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos.....	58
2.3 Transmisores electrónicos.....	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia.....	58
2.3.1.2 Transformador diferencial.....	60
2.3.2 Transmisores digitales.....	60
2.4 Comunicaciones.....	65
2.5 Comparación de transmisores.....	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetalico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja ten- sión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de cali- bración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

XIV Índice

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

REGULACION AUTOMATICA

9.1 Introducción

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. Un caso típico fue el control de acabado de un producto en el horno. El operario era realmente el «instrumento de control» que juzgaba la marcha del proceso por el color de la llama, por el tipo de humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto y decidía así el momento de retirar la pieza; en esta decisión influía muchas veces la suerte, de tal modo que no siempre la pieza se retiraba en las mejores condiciones de fabricación. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

9.2 Características del proceso

El bucle de control típico está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control.

El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos revisten las formas más diversas, desde las más simples hasta las más complejas. Una aplicación típica que consideraremos repetidamente a lo largo del texto la constituye un intercambiador de calor, tal como el de la figura 9.1.

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

- a) Compara la variable medida con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error;
- b) Estabiliza el funcionamiento dinámico del bucle de control mediante circuitos especiales para reducir o eliminar el error.

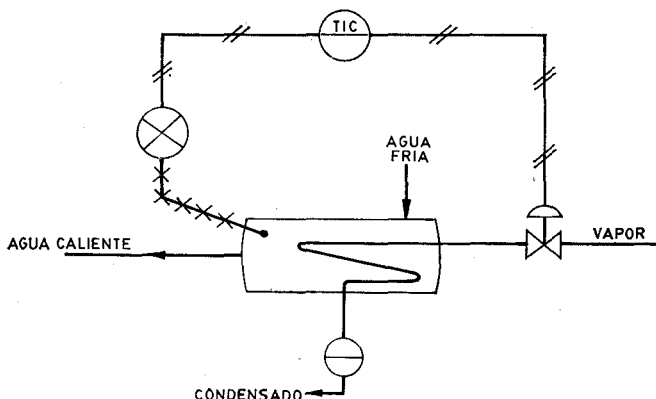


Fig. 9.1 Intercambiador de calor.

En la figura 9.2 puede verse el diagrama de bloques del bucle de control.

Un circuito abierto de regulación carece de detector de señal de error y de controlador. Un ejemplo puede consistir en el calentamiento de agua en un tanque por medio de un intercambiador a resistencia eléctrica sumergido. Dada una tensión de alimentación, una temperatura de entrada del agua, unas condiciones externas y una demanda del agua constante, la temperatura de salida del agua permanecerá constante. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua debe variar.

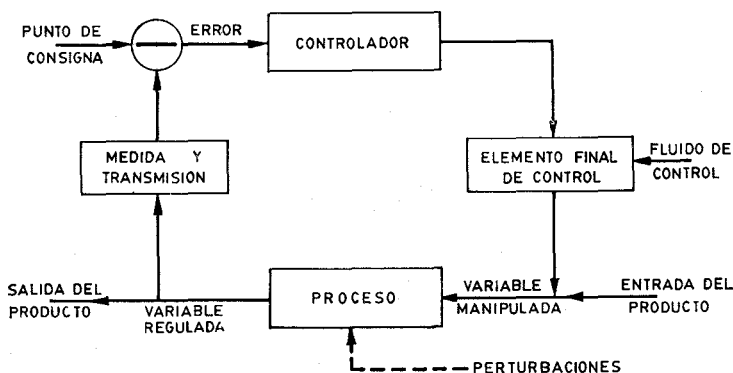


Fig. 9.2 Diagrama de bloques.

Consideraremos ahora el control manual del proceso que servirá de base para estudiar las características del proceso.

La figura 9.3 representa el control manual del intercambiador. El operario nota la temperatura de salida del agua con la mano y acciona la válvula de vapor para

mantener el agua a la temperatura deseada. Supongamos que en estas condiciones, existiendo una temperatura constante en la salida, hay un aumento en el caudal de agua de entrada. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el intercambiador no llegará a calentar el mayor caudal del agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida deberá disminuir. Ahora bien, debido a la inercia del proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría alcance la mano izquierda del operario. Cuando éste nota la disminución de la temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente cuántas vueltas debe dar la válvula de vapor y en qué sentido, y a continuación realizar esta corrección manual en la misma. Se necesita cierto tiempo para llevar a cabo estas decisiones y corregir la posición de la válvula.

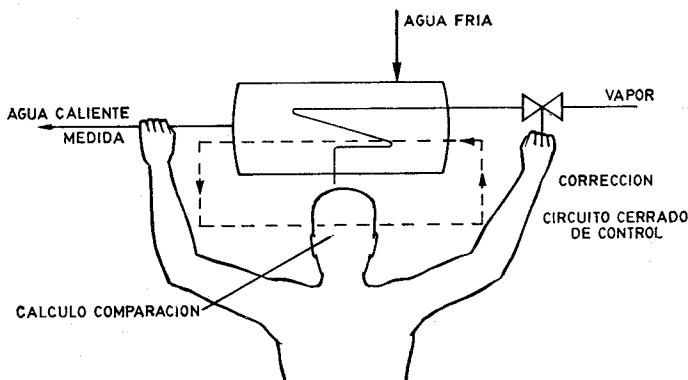


Fig. 9.3 Control manual.

También es cierto que pasa cierto tiempo hasta que los efectos de corrección de la válvula se notan en la temperatura de salida y pueden ser captados por el operador. Sólo entonces éste es capaz de saber si su primera corrección ha sido escasa o excesiva. En este punto, efectuará una segunda corrección, que al cabo de un tiempo dará lugar a otro cambio de temperatura. El operador observará los resultados de esta segunda corrección y realizará una tercera, y así sucesivamente.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección, constituyen una cadena cerrada de acciones y se realizan una y otra vez por el operador, hasta que transcurre un cierto tiempo y la temperatura del agua se equilibra finalmente al valor deseado por el operador siempre que naturalmente no hayan cambiado las condiciones del proceso. El conjunto de elementos en circuito cerrado que hacen posible este control reciben el nombre de «bucle, lazo o anillo del control» (*loop control*).

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

- a) los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente *cambios de carga*;

- b) el tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una o a varias propiedades del proceso: *capacitancia*, *resistencia* y *tiempo de transporte*.

Cambios de carga. — La carga del proceso es la cantidad total del fluido o agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas. En el ejemplo anterior, cuando el agua fría circula con un determinado caudal y la salida de agua caliente debe estar a una temperatura dada, es necesaria una determinada cantidad de vapor. En estas condiciones, un aumento en el caudal de agua da lugar al consumo de más cantidad de vapor y constituye por tanto un cambio en la carga del proceso. Por otro lado, un aumento en la temperatura de entrada del agua fría, precisa una menor cantidad de vapor y es también un cambio de carga.

En general, los cambios de carga del proceso son debidos a las siguientes causas:

1. Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado. En el ejemplo del intercambiador de calor de la figura 9.1, un aumento en el caudal de agua o una disminución en su temperatura da lugar a un cambio de carga porque requiere el consumo de más cantidad de vapor.
2. Variaciones en la calidad del fluido de control. Una disminución de presión en el vapor del ejemplo de la figura 9.1 da lugar a un aumento del caudal en volumen del vapor para mantener la misma temperatura controlada, ya que las calorías cedidas por el vapor al condensarse disminuyen al bajar la presión.
3. Cambios en las condiciones ambientales. — Son muy claros en el caso de instalaciones al aire libre donde las pérdidas de calor por radiación varían mucho según la estación del año, la hora del día y el tiempo.
4. Calor generado o absorbido por la reacción química del proceso (proceso exotérmico o endotérmico respectivamente). Se presenta un cambio de carga porque el proceso necesita una menor o una mayor cantidad del agente de control.

Los cambios de carga en el proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda.

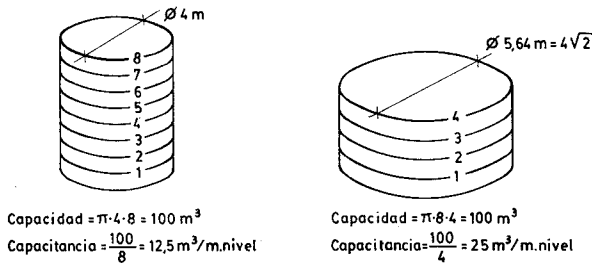
Las perturbaciones en la alimentación consisten en un cambio en la energía o en los materiales de entrada en el proceso. Por ejemplo, las variaciones en la presión de vapor o en la apertura de la válvula de vapor son perturbaciones en la alimentación del proceso.

Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía o de material del proceso. Los cambios en la temperatura del agua fría y las variaciones en el caudal de agua pertenecen a este tipo.

Capacitancia. — La capacitancia de un proceso es un factor muy importante en el control automático. Es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. No debe confundirse con capacidad del proceso que representa simplemente las características propias de almacenar energía o material.

Por ejemplo, los dos depósitos de la figura 9.4 *a* tienen la misma capacidad de 100 m^3 , pero tienen distinta capacitancia por unidad de nivel: $12,5 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más alto y $25 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más bajo.

En un proceso, una capacitancia relativamente grande es favorable para mantener constante la variable controlada a pesar de los cambios de carga que puedan presentarse. Sin embargo, esta misma característica hace que sea más difícil cambiar la variable a un nuevo valor, e introduce un retardo importante entre una variación del fluido de control y el nuevo valor que toma la variable controlada. En las figuras 9.4 *b* y *c* pueden verse dos procesos con dos tipos de capacitancias térmicas, una grande y la otra limitada, respectivamente.



a) Capacitancia con relación a capacidad

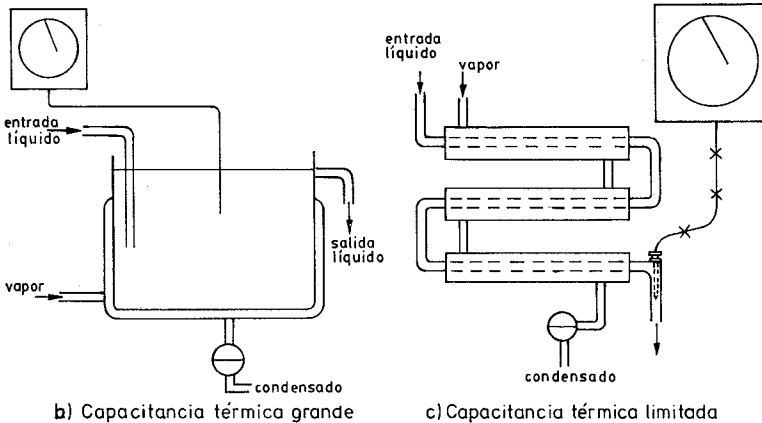


Fig. 9.4 Capacitancia.

En la figura 9.4 *b* el tanque contiene una gran cantidad de líquido de tal modo que esta masa considerable del líquido estabiliza y resiste los cambios que puedan causarse a la temperatura por variaciones en el caudal del líquido, en la presión del vapor o en la temperatura ambiente. Estas mismas perturbaciones aplicadas al intercambiador de la figura 9.4 *c* influyen poderosamente en la temperatura al ser pequeña la masa del líquido. Si este último proceso se controlara manualmente, el operador debería estar muy atento y le sería casi imposible mantener la temperatura en un valor constante.

Resistencias. — La resistencia es la oposición total o parcial de la transferencia de energía o de material entre las capacitancias. En la figura 9.1, las capacitancias son el serpentín de vapor y el tanque, y su resistencia se manifiesta porque las paredes de los tubos del serpentín de vapor y las capas aislantes de vapor y de agua que se encuentran a ambos lados de los mismos, se oponen a la transferencia de energía calorífica entre el vapor del interior de los tubos y el agua que se encuentra en el exterior.

Tiempo de transporte. — En el intercambiador de calor de la figura 9.1, si disminuye la temperatura del agua de entrada, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría pueda circular a través del tanque y alcance la sonda termométrica. Hay que hacer notar que durante el tiempo de transporte, la sonda termométrica no capta ningún cambio en la temperatura. El valor del tiempo de retardo depende a la vez de la velocidad de transporte y de la distancia de transporte.

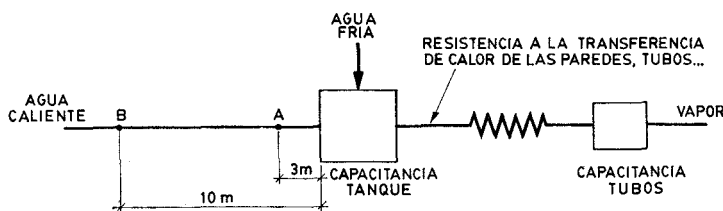


Fig. 9.5 Capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

En la figura 9.5, por ejemplo, si el agua circula con una velocidad de un metro por segundo, con el bulbo a tres metros del tanque, el tiempo de transporte es de 3 s. Si el bulbo está en el punto B, a 10 m del tanque, el tiempo será de 10 s. Pero si la velocidad del agua es de 0,5 m/s el tiempo es de 6 y 20 s, respectivamente.

La situación de la válvula de control puede contribuir también al tiempo

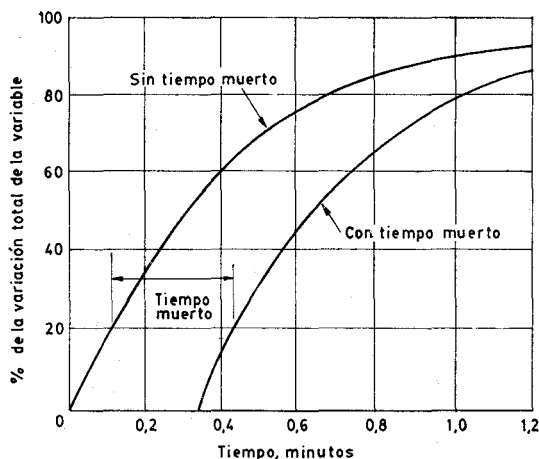


Fig. 9.6 Efecto del tiempo de transporte.

muerto de transporte, en particular en el caso de un horno tubular empleado en la industria petroquímica en el que el fuel debe pasar a través de varios cientos de metros de tubería para atravesar totalmente el horno. El tiempo de transporte retarda la reacción del proceso, existiendo un tiempo muerto durante el cual el controlador no actúa ya que para iniciar una acción de corrección debe presentarse primero una desviación (fig. 9.6).

9.3 Sistemas de control neumáticos y eléctricos

En el control manual, descrito en la figura 9.3, el operador puede hacer las correcciones en la válvula de vapor de varias formas:

1. Puede abrir o cerrar instantáneamente la válvula.
2. Puede abrir o cerrar la válvula lentamente, a una velocidad constante, mientras se mantenga la desviación.
3. Puede abrir la válvula en mayor grado cuando la desviación es más rápida.
4. Puede abrir la válvula un número de vueltas constante, por cada unidad de desviación.

Asimismo el operador puede emplear otros métodos o combinaciones en la manipulación de la válvula.

En los sistemas industriales se emplea uno o una combinación de los siguientes sistemas de control:

- a) De dos posiciones (todo-nada);
- b) Proporcional de tiempo variable (anticipatoria);
- c) Flotante;
- d) Proporcional;
- e) Proporcional + integral;
- f) Proporcional + derivada.
- g) Proporcional + integral + derivada.

9.3.1 Control todo-nada

En la regulación todo-nada el elemento final de control se mueve rápidamente entre una de dos posiciones fijas a la otra, para un valor único de la variable controlada. En la figura 9.7 se representa un control de este tipo, que se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial (fig. 9.8) o zona neutra en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal.

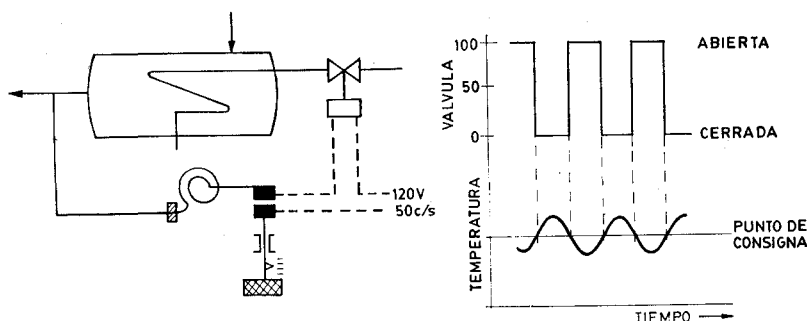


Fig. 9.7 Control todo-nada.

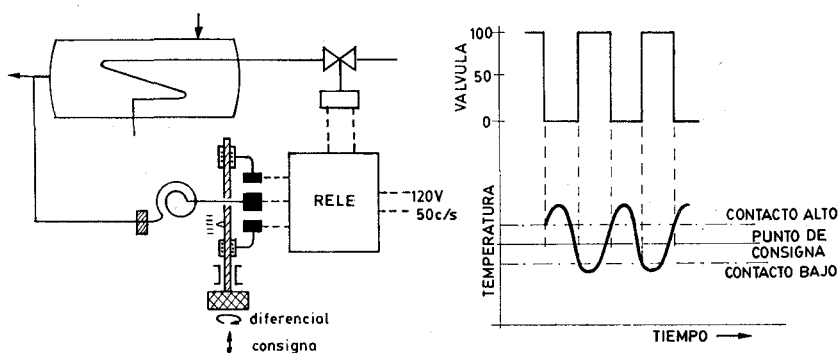


Fig. 9.8 Control todo-nada con banda diferencial o zona muerta.

Es evidente que la variable controlada oscila continuamente y que estas oscilaciones variarán en frecuencia y magnitud si se presentan cambios de carga en el proceso.

9.3.2 Control flotante

El control flotante, denominado realmente control flotante de velocidad constante (fig. 9.9 a), mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, una regulación todo-nada puede convertirse en una regulación flotante si se utiliza una válvula motorizada reversible de baja velocidad (con un tiempo de recorrido de 1 minuto, o más, desde la posición abierta a la cerrada o viceversa).

El control flotante de velocidad constante con una zona neutra (fig. 9.9 b) se obtiene al acoplar a un control todo-nada con una zona neutra una válvula motorizada reversible de baja velocidad. La válvula permanece inmóvil si la variable queda dentro de la zona neutra y cuando la rebasa, la válvula se mueve en la dirección adecuada hasta que la variable retorna al interior de la zona neutra, pudiendo incluso la válvula llegar a alcanzar sus posiciones extremas de apertura o de cierre.

El control flotante, análogamente al control todo-nada, tiende a producir

oscilaciones en la variable controlada, pero estas oscilaciones pueden hacerse mínimas eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final para que compense las características del proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable ante los más rápidos cambios de carga que puedan producirse en el proceso.

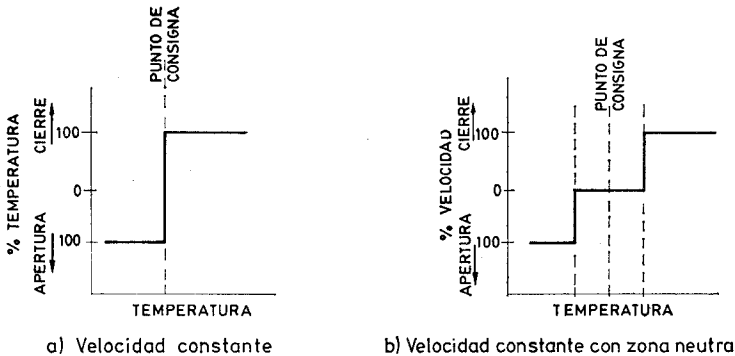


Fig. 9.9 Control flotante.

La ventaja principal del control flotante es que puede compensar los cambios de carga lentos del proceso desplazando gradualmente la posición de la válvula. Sin embargo, no es adecuado si hay un retardo importante o si los cambios de carga, aunque sean pequeños, son muy rápidos.

9.3.3 Control proporcional de tiempo variable

En este sistema de regulación existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. Es decir, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (conexión + desconexión) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión dentro de cada ciclo varía al desviarse la variable controlada del punto de consigna.

En la figura 9.10 puede verse un ejemplo de este controlador que tiene un ci-

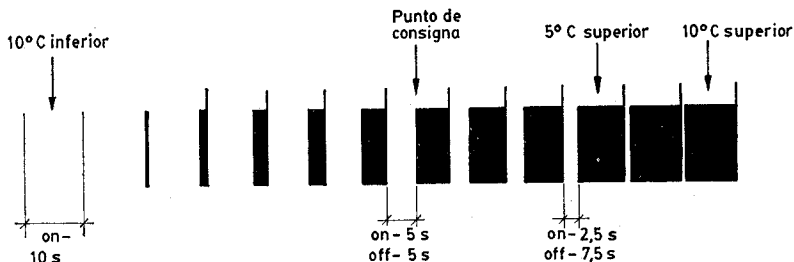


Fig. 9.10 Control proporcional de tiempo variable.

clo completo de 10 segundos y una banda proporcional de 20°C . En el punto de consigna el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo desconecta 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10°C el elemento final está siempre conectado. A 5°C por encima del punto de consigna el elemento final está conectado sólo 2,5 segundos, desconecta durante 7,5 segundos, y así sucesivamente.

Este tipo de control se emplea sólo en controladores eléctricos. Un caso típico de aplicación lo constituye la regulación de temperatura de un horno eléctrico en que el elemento final es una resistencia o un conjunto de resistencias de calefacción.

9.3.4 Control proporcional

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación.

En la figura 9.11 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 150°C y cuyo intervalo de actuación es de 100 - 200°C . Cuando la variable controlada está en 100°C o menos la válvula está totalmente abierta; a 200°C o más está totalmente cerrada y entre 100 y 200°C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 125°C está abierta en un 75 %; a 150°C en un 50 %.

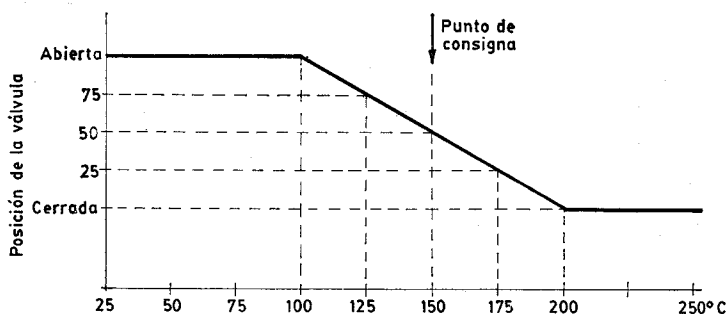


Fig. 9.11 Control proporcional.

En la figura 9.12 puede verse un controlador proporcional neumático típico compuesto de un comparador, un transductor y una realimentación.

El comparador establece la diferencia o señal de error entre la variable controlada y el valor deseado de la variable o punto de consigna (desplazamiento del punto C a C' o D a D' en la figura).

El transductor, ante esta señal de error, como el punto E está inicialmente fijo en el espacio, hace que el obturador se separe de la tobera pasando ésta al punto X' . Esta nueva separación disminuye la presión posterior P_1 y a través del amplificador neumático hace bajar P_0 .

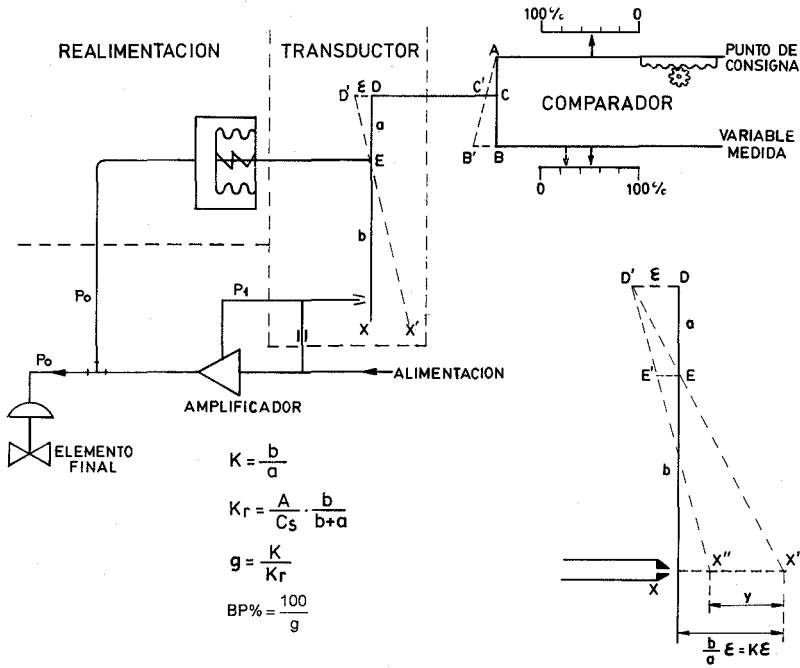


Fig. 9.12 Control proporcional típico.

En el circuito de realimentación, el nuevo valor de la presión de salida P_o expansiona el fuelle, desplazando el punto E a E' , con lo cual el obturador toma otra posición de equilibrio a nivel de la tobera definida por el punto X'' . El resultado de esta serie de acciones es que a cada valor del error, la señal de salida P_o toma otro valor determinado.

Sea ϵ la diferencia entre el punto de consigna y la variable. El transductor (conjunto-tobera-obturador) mantiene en cualquier momento una separación x entre la tobera y el obturador que resulta de la suma de las señales de error $\frac{b}{a} \epsilon = K \epsilon$ y de la realimentación, consideradas ambas a nivel de la tobera. Luego:

$$x = K \epsilon - y$$

siendo K el factor de amplificación del error a nivel de la tobera $K = \frac{b}{a}$

Ante esta señal de error, la presión posterior P_1 varía en

$$\Delta P_1 = K_t \cdot (K \epsilon - y)$$

siendo K_t el factor de conversión del conjunto tobera-obturador. La variación en la señal de salida es: $\Delta P_o = \Delta P_1 \cdot K_a = K_t K_a (K \epsilon - y)$, siendo K_a el factor de amplificación de la válvula piloto o amplificador, y como

$$y = \Delta P_o \cdot \frac{A}{C_s} \cdot \frac{b}{b+a} = \Delta P_o \cdot K_r$$

siendo:

A = área del fuelle

C_s = constante elástica del resorte

K_r = el factor de amplificación o ganancia de la realimentación a nivel de

$$\text{la tobera } K_r = \frac{A}{C_s} \cdot \frac{b}{b+a}$$

resulta

$$\Delta P_o = K_t K_a \cdot K \varepsilon - K_t K_a K_r \cdot \Delta P_o$$

y de aquí

$$\Delta P_o = \frac{K_a K_t K}{1 + K_a K_t K_r} \varepsilon = \frac{K}{\frac{1}{K_a K_t} + K_r} \cdot \varepsilon \simeq \frac{K}{K_r} \varepsilon = g \varepsilon$$

ya que el factor de amplificación K_t es muy grande, y habiendo llamado g = ganancia a la relación $\frac{K}{K_r}$.

La *ganancia* del controlador proporcional es, pues, la relación entre la variación en la señal de salida y el error que la produce (diferencia entre la variable y el punto de consigna). El término ganancia se utiliza en el control digital.

Muchos controladores neumáticos y electrónicos emplean en lugar de ganancia la denominada *banda proporcional* que es la inversa de la ganancia

$$BP \% = \frac{100 \%}{K}$$

y cuya definición es:

Banda proporcional es el porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. El valor de la banda proporcional de un instrumento particular, se expresa usualmente en tanto por ciento de su campo de medida total. Por ejemplo, si la escala del instrumento es 200° C, y se necesitan 50° C de cambio para provocar una

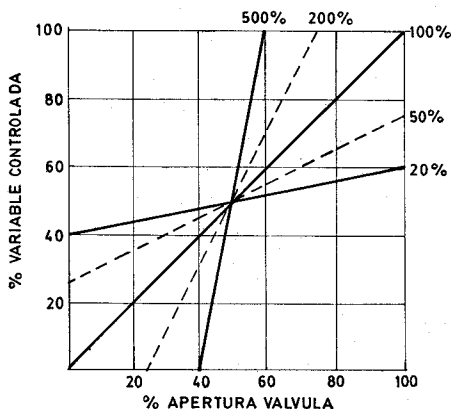


Fig. 9.13 Banda proporcional.

carrera total de la válvula, el tanto por ciento de la banda proporcional es 50/200, o sea, 25 %. En los controladores prácticos, la banda proporcional puede variar desde 1 hasta 500 % aproximadamente. En la figura 9.13 se explica claramente el concepto de banda proporcional en tanto por ciento. Nótese que la banda proporcional superior a 100 % no puede causar una carrera total incluso para un cambio completo en la variable controlada.

En el apartado 9.8 «análisis dinámico de los controladores» se examinan los varios sistemas para cambiar la banda proporcional en un instrumento neumático.

El offset es una característica indeseable del control proporcional. En la figura 9.14 se indican los regímenes de carga, temperatura y la posición de la válvula de control para el intercambiador de calor de la figura 9.1. Inicialmente, el

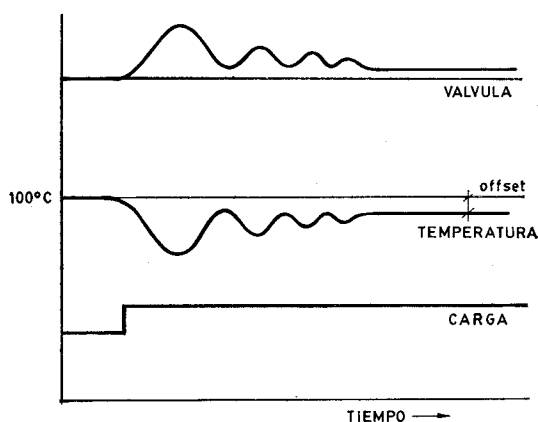


Fig. 9.14 Offset.

punto de consigna está en el valor deseado de 100° C. Al cabo de un tiempo se presenta un cambio de carga, originado, por ejemplo, por un aumento en el consumo de agua caliente, por apertura simultánea de mayor número de válvulas de consumo. Nótese que la temperatura no vuelve al valor de consigna, sino que la misma se estabiliza a los 90° C. Es obvio que la temperatura final difiere de la primitiva, puesto que si así no fuera, por las características del control proporcional, la posición de la válvula sería la inicial, lo cual es imposible, ya que en esta posición se ha presentado la disminución de temperatura inicial y existiría el absurdo de mantener la misma temperatura de salida con la válvula de control en la misma posición dando el mismo paso de caudal de vapor, tanto para el consumo de agua caliente en el régimen inicial como para el aumento de este consumo.

La desviación puede eliminarse reajustando manualmente el punto de consigna. Hay que hacer notar que el control proporcional es un sistema de estabilización potente, capaz de ajuste y aplicación amplísima, pero tiene la característica indeseable del error de offset.

9.3.5 Control proporcional + integral

En el control integral, el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada.

En la figura 9.15 puede verse un controlador neumático típico proporcional más integral. Se observará que se diferencia con relación al controlador proporcional de la figura 9.12 en la adición de un segundo fuelle dotado de una restricción variable que realimenta positivamente la señal de salida.

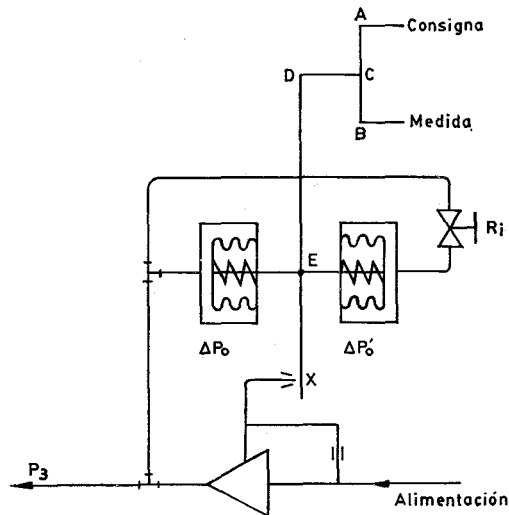


Fig. 9.15 Controlador proporcional + integral.

La combinación de la restricción R_i con la capacidad del fuelle da lugar a una función de retardo con una constante de tiempo τ (fig. 9.16).

Cuando existe una pequeña diferencia de presiones ($P - P'$) entre la entrada y el interior del fuelle, el caudal Q que pasa a través de la restricción capilar R corresponde a un régimen laminar, por lo cual existe la relación

$$P - P' = R \cdot Q \quad (1)$$

siendo R la resistencia de la restricción.

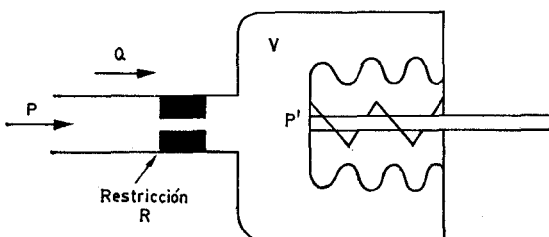


Fig. 9.16 Fuelle con restricción.

Este caudal introduce en el fuelle una cantidad de aire Qdt por unidad de tiempo dt , dando lugar a una variación de presión dP' . El sistema se comporta como un condensador eléctrico de capacidad C que se cargará con una intensidad Q ante una diferencia de tensiones dP' . Luego:

$$C = \frac{Qdt}{dP'} \quad (2)$$

que sustituida en (1) da:

$$P - P' = RC \frac{dP'}{dt}$$

o sea,

$$P = P' + RC \frac{dP'}{dt}$$

y como en electricidad la combinación de una resistencia R y una capacidad C introduce una constante de tiempo τ resulta:

$$P = P' + \tau_1 \frac{dP'}{dt}$$

y si en esta ecuación se introducen valores instantáneos se obtiene:

$$P_o + \Delta P = P_o + \Delta P' + \tau_1 \frac{d(P_o + \Delta P')}{dt}$$

es decir,

$$\Delta P = \Delta P' + \tau_1 \frac{d(\Delta P')}{dt}$$

Examinando la figura 9.15 y siguiendo el mismo razonamiento que en el controlador proporcional de la figura 9.12 puede deducirse que ante un error ε entre la variable y el punto de consigna, el desplazamiento final «y» del obturador es la resultante entre la realimentación negativa «i» del fuelle de acción proporcional de la izquierda de la figura y la realimentación positiva «d» del fuelle de acción integral dibujado a la derecha.

$$\text{Luego:} \quad y = K\varepsilon = i - d = K_r \Delta P_o - K_r \Delta P'_o$$

$$\text{y de aquí} \quad \Delta P'_o = \Delta P_o - \frac{K}{K_r} \varepsilon$$

$$\text{luego} \quad K\varepsilon = K_r \tau_1 \frac{d(\Delta P'_o)}{dt} = K_r \tau_1 \left[\frac{d(\Delta P_o)}{dt} - \frac{K}{K_r} \frac{d\varepsilon}{dt} \right]$$

$$\text{y despejando:} \quad \frac{d(\Delta P_o)}{dt} = \frac{K}{K_r} \cdot \frac{\varepsilon}{\tau_1} + \frac{K}{K_r} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{g}{\tau_1} \varepsilon + g \frac{d\varepsilon}{dt}$$

siendo g la ganancia del controlador proporcional.

E integrando los dos miembros de la ecuación resulta:

$$\Delta P_o = g\varepsilon + \frac{g}{\tau_1} \int \varepsilon dt$$

ecuación que da la señal de salida del controlador en función de dos términos, el primero de acción proporcional y el segundo de acción integral del error.

Ante una entrada en escalón $\varepsilon = \varepsilon_o$, resulta:

$$\Delta P_o = g \varepsilon_o + g \frac{1}{\tau_i} \varepsilon_o t$$

que representa un término proporcional de respuesta inmediata $g\varepsilon_o$ y otra señal proporcional al tiempo $\frac{g}{\tau_i} \varepsilon_o t$ cuya pendiente es:

$$\frac{d(\Delta P_o)}{dt} = g \frac{\varepsilon_o}{\tau_i} = \text{constante}$$

La variación de la señal de salida se hace evidente examinando la figura 9.15 del controlador proporcional + integral. En efecto: si a la entrada del controlador se introduce un error constante ε_o (fig. 9.17) entre la variable y el punto

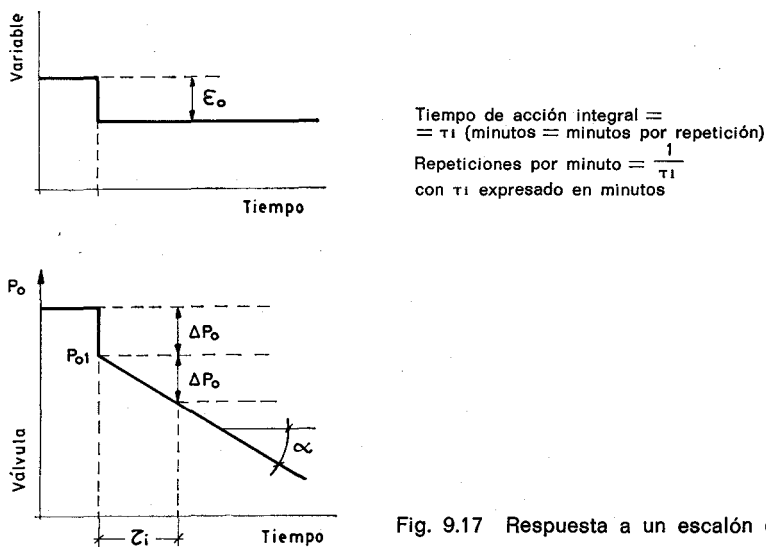


Fig. 9.17 Respuesta a un escalón del controlador PI.

de consigna, la señal de salida P_o salta un determinado valor P_{o1} por la respuesta inmediata del fuelle proporcional. Se crea así una diferencia de presiones ΔP_o entre la señal de salida P_{o1} y la señal P_o que se encontraba en el fuelle de acción integral, diferencia que se aplica directamente a ambos lados de la restricción R_1 . El caudal de aire Q que pasa a su través es proporcional a ΔP_o y al grado de abertura de R_1 . Por otro lado, la variación de volumen ΔV del fuelle en la unidad de tiempo es igual a Q , y el fuelle tiene por medidas una superficie transversal S y una longitud l .

Luego:

$$\Delta V = S \Delta l$$

o bien,
$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q = S \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

y como
$$\Delta P_o = Q \cdot R_1$$

resulta:
$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{Q}{S} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta P_o}{R_1}$$

Así pues, el fuelle integral se expande en el tiempo en una longitud $\frac{\Delta l}{\Delta t}$ y aleja la tobera del obturador con una velocidad directamente proporcional a ΔP_o e inversamente proporcional a R_1 . Esta acción provoca un nuevo descenso de la presión P_o que pasa inmediatamente a los dos fuelles. En el fuelle integral vuelve a mantenerse una diferencia de presiones ΔP_o que nuevamente aleja la tobera del obturador. Esta serie de acciones continúa hasta que se anula la presión de salida. Igual secuencia de acontecimientos ocurriría si el error hubiera sido de signo contrario en cuyo caso la presión de salida hubiera llegado a ser la máxima, es decir, la presión de alimentación.

Resumiendo: Ante un error ϵ , la señal de salida P_o experimenta un salto inicial igual a la acción proporcional y a continuación sigue una variación gradual de presión a una velocidad proporcional al error y al grado de abertura de la restricción R_1 .

Del mismo modo que la acción proporcional se definía por la banda proporcional o la ganancia, la acción integral viene definida por el denominado «tiempo de acción integral», que es el intervalo de tiempo en que, ante una señal de entrada en escalón, la parte de la señal de salida debida a la acción integral iguala a la parte debida a la acción proporcional.

Es decir:
$$g \epsilon_o = g \frac{1}{\tau_i} \epsilon_o t$$

$$t = \tau_i$$

En la figura 9.17 puede verse gráficamente la obtención de τ_i .

El tiempo de acción integral τ_i en minutos equivale a «minutos por repetición de la acción proporcional».

También se acostumbra a expresar la acción integral en «repeticiones por minuto» que es el número de veces por minuto con que se repite la acción proporcional y que es el recíproco matemático de minutos por repetición.

La comprobación de la acción integral se lleva a cabo con el instrumento en bucle abierto, aplicando escalones sucesivos en la entrada y registrando las señales de salida que el controlador envía a la válvula de control.

En efecto, en la figura 9.18 pueden identificarse estos tiempos de acción integral aplicando a los triángulos ACD , ABD y $A'C'D'$, $A'B'D'$ las ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{tg} \alpha_1 = g \frac{\epsilon_1}{\tau_i} = \frac{y}{x} \\ \operatorname{tg} \alpha_2 = g \frac{\epsilon_2}{\tau_i} = \frac{g(\epsilon_2 - \epsilon_1) + y}{x} \end{array} \right.$$

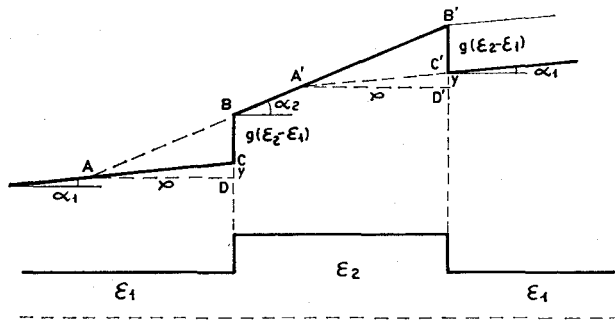


Fig. 9.18 Obtención de los tiempos de acción integral (minutos por repetición $\tau_i = x$).

resolviendo estas ecuaciones resulta:

$$x = \tau_i$$

$$y = g \varepsilon_1$$

Por lo tanto, al aplicar escalones sucesivos se obtendrán los segmentos x que representarán los minutos por repetición.

9.3.6 Control proporcional + derivado

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable, por ejemplo, la temperatura, cuanto más rápidamente varíe ésta, tanto más se moverá la válvula. En la figura 9.19 se indica esta reacción y la componente proporcional.

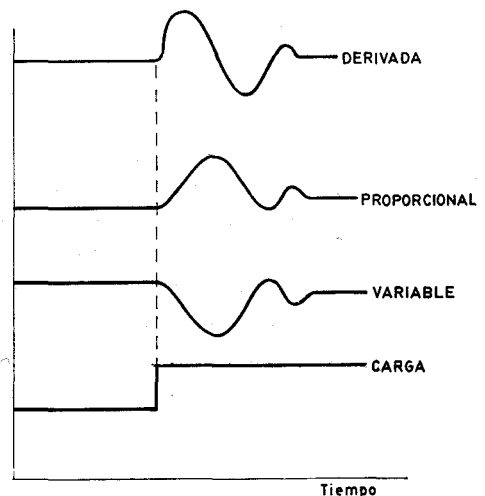


Fig. 9.19 Acción derivada.

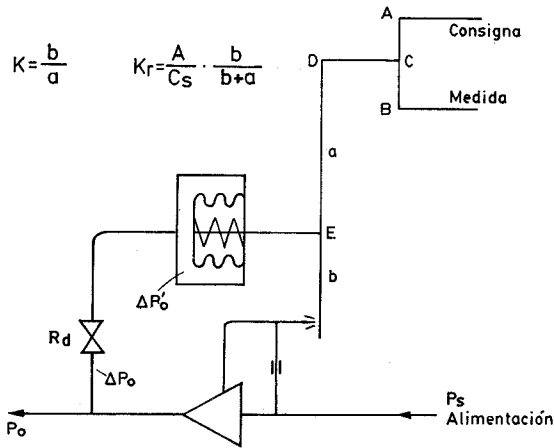


Fig. 9.20 Controlador de acción proporcional + derivada.

El factor a señalar en la acción derivada es que al oponerse ésta a todas las variaciones, posee un gran efecto de estabilización, si bien no elimina el offset característico del sistema de posición proporcional. Por este motivo la regulación derivada, suele emplearse conjuntamente con la integral.

En la figura 9.20 puede verse un controlador proporcional + derivado (PD) típico.

Ante un error ε entre la variable y el punto de consigna, la realimentación del fuelle proporcional da lugar a un desplazamiento a nivel de la tobera de

$$y = K_r \Delta P'_0 \quad \text{con} \quad y = K \varepsilon$$

Luego

$$\Delta P'_0 = \frac{K}{K_r} \varepsilon = g \varepsilon$$

Análogamente a lo estudiado en la acción integral, el fuelle proporcional se caracterizará por su capacidad y su resistencia R_d que dan lugar a una constante de tiempo τ_d tal que:

$$\Delta P_0 = \Delta P'_0 + \tau_d \frac{d(\Delta P'_0)}{dt}$$

y sustituyendo valores

$$\Delta P_0 = g \varepsilon + g \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt}$$

expresión que se compone de un término proporcional $g \varepsilon$ y de un término de acción derivada $g \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Examinando las figuras 9.20 y 9.21 se hace evidente el comportamiento del controlador. Por ejemplo, si en el tiempo t_0 la variable aumenta uniformemente siguiendo la forma de una rampa, el error variará a la velocidad constante $\frac{d\varepsilon}{dt}$ y

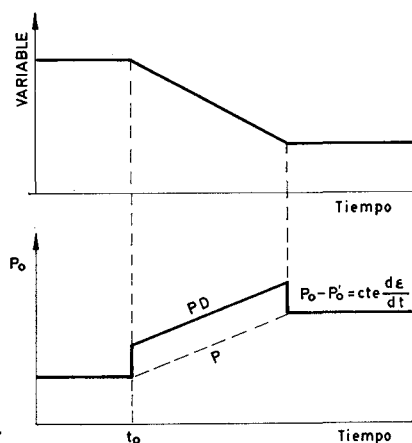


Fig. 9.21 Comportamiento del controlador P + D.

producirá una variación positiva en la presión de salida del amplificador $\frac{dP_o}{dt}$. De este modo, la presión diferencial instantánea a través de la restricción R_d será:

$$P_o - P'_o = \frac{dP_o}{dt} = K_t K_a K \frac{d\varepsilon}{dt} = \text{constante} \times \frac{d\varepsilon}{dt}$$

con K , K_t , K_a los factores de amplificación de consigna-medida a nivel de la tobera, transductor tobera-obturador y relé piloto o amplificador respectivamente.

A medida que va pasando aire a través de la restricción R_d , P'_o aumenta con el mismo grado de variación de P_o , es decir, proporcional a $\frac{d\varepsilon}{dt}$ y el fuelle proporcional se comprime actuando inmediatamente sobre el obturador, que a través del transductor tobera-obturador-amplificador, da una disminución en P_o igual a:

$$\Delta P_o = \Delta P'_o \cdot K_r \cdot K_t \cdot K_a$$

con K_r factor de amplificación del fuelle proporcional a nivel de la tobera. Esta disminución equivale al aumento que P_o estaba experimentando. Por lo tanto, se mantiene así la misma presión diferencial sobre la restricción R_d . El caudal de aire que pasa a través de ésta depende del grado de abertura de R_d . Así, pues, en la acción derivada la realimentación es disminuida y la señal de salida es aumentada en un valor proporcional a la velocidad de variación de la variable controlada en un factor ajustable $R_d C_d = \tau_d$.

Estos razonamientos pueden comprobarse matemáticamente aplicando a la expresión de la acción $P + D$ una entrada en rampa $\varepsilon = Ct$, con lo que resulta

$$\Delta P_o = g Ct + g \tau_d C$$

Para definir la acción derivada se considera el «tiempo de acción derivada» τ_d como el intervalo en que la parte de variación de la presión de salida debida a la acción proporcional equivale a la parte de variación de presión debida a la acción derivativa cuando se aplica al instrumento PD una entrada en rampa.

De este modo, si $\varepsilon = Ct$ resulta

$$g Ct = g \tau_d C$$

luego

$$t = \tau_d$$

Se acostumbra a expresar la acción derivada en «minutos de anticipo» que representan el tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control. Efectivamente, según se desprende de la figura 9.22, el «tiempo de acción derivada " τ_d "» es igual a los «minutos de anticipo».

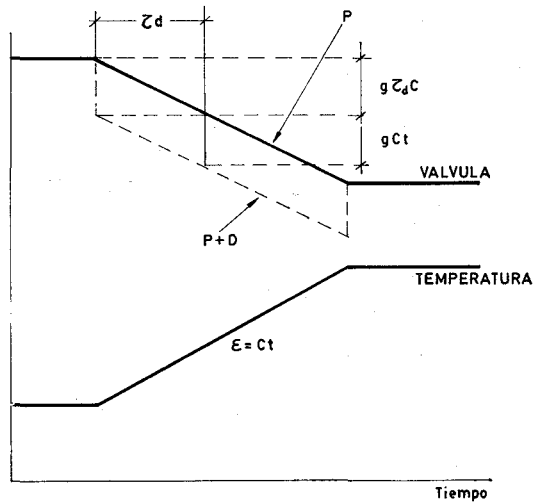


Fig. 9.22 Minutos de anticipo de la acción derivada.

La comprobación del valor de la acción derivada puede llevarse a cabo aplicando una entrada en rampa y registrando la señal de salida con el instrumento en bucle abierto. En la figura 9.22 puede verse la deducción gráfica de τ_d .

La señal en rampa puede generarse en otro instrumento provisto de acción integral: el ajuste de su tiempo integral fijará la pendiente de la señal en rampa inyectada.

La acción derivada descrita en la figura 9.20 se aplica raramente debido a la respuesta violenta que se obtiene ante una entrada en escalón (la pendiente de una señal en escalón es infinita y la válvula recibe en un instante la señal máxima o mínima según la acción directa o inversa del controlador).

Para evitar este inconveniente se acude a la llamada acción derivada modificada que puede verse en las figuras 9.23 y 9.24: los montajes con fuelle interno o bien con fuelle externo se basan en atenuar los efectos de la restricción R_d causante de la respuesta violenta de la acción derivada clásica. En la acción derivada modificada con fuelle interno, representada en la figura 9.23 parte del fuelle de realimentación responde inmediatamente a las variaciones de la presión de salida y la parte restante actúa con retardo debido a la restricción R_d .

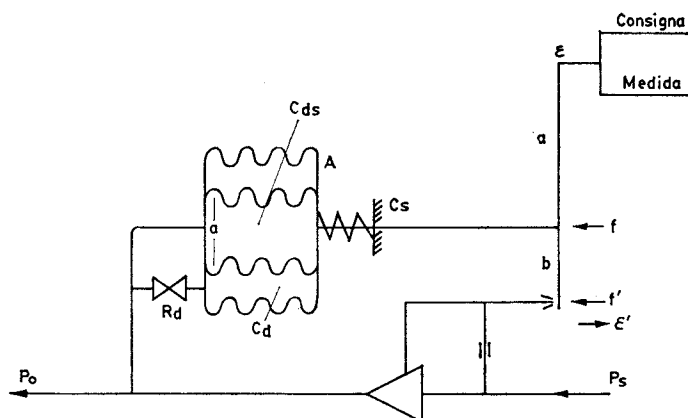


Fig. 9.23 Acción derivada modificada con fuente interno.

La acción derivada con fuente externo de la figura 9.24 se comporta de modo similar al anterior.

En el apéndice A.3 «análisis dinámico de los controladores» se encuentran más detalles de estas modificaciones de la acción derivada.

9.3.7 Control proporcional + integral + derivado

Un controlador PID neumático dispone de dos fuelles (proporcional de realimentación negativa e integral con realimentación positiva) y dos restricciones (integral y derivada). En el controlador PID de la figura 9.25, denominado simétrico, llamemos d e i los desplazamientos a nivel de la tobera de los fuelles de la derecha con reali-

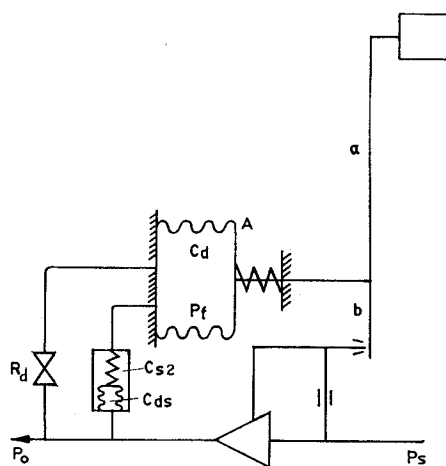


Fig. 9.24 Acción derivada modificada con fuente externo.

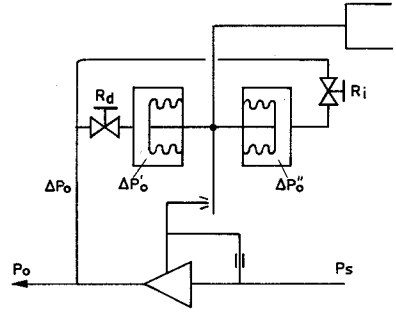


Fig. 9.25 Controlador PID simétrico.

mentación positiva (integral) y de la izquierda con realimentación negativa (proporcional) de la figura. Se tienen las ecuaciones:

$$\begin{aligned} i &= K_r \Delta P'_0 & d &= K_r \Delta P''_0 \\ \Delta P_0 &= \Delta P'_0 + \tau_d \frac{d(\Delta P'_0)}{dt} & \Delta P_0 &= \Delta P''_0 + \tau_i \frac{d(\Delta P''_0)}{dt} \end{aligned}$$

y como ante un error ε entre la variable medida y el punto de consigna, el desplazamiento inicial en la tobera es $K\varepsilon$, resulta:

$$K\varepsilon = i - d$$

Resolviendo estas cinco ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= \frac{i}{K_r} + \frac{\tau_d}{K_r} \frac{d(i)}{dt} = \frac{d}{K_r} + \frac{\tau_i}{K_r} \frac{d(d)}{dt} & (1) \\ i + \tau_d \frac{d(i)}{dt} &= d + \tau_i \left[\frac{d(i)}{dt} - K \frac{d\varepsilon}{dt} \right] \\ K\varepsilon + K\tau_i \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{d(i)}{dt} (\tau_i - \tau_d) \end{aligned}$$

integrando los dos miembros:

$$K \int \varepsilon dt + K\tau_i \varepsilon = (\tau_i - \tau_d) \cdot i$$

y despreciando la constante de integración y sustituyendo en (1) resulta:

$$\Delta P_0 = \frac{1}{K_r(\tau_i - \tau_d)} [K \int \varepsilon dt + K\tau_i \varepsilon] + \frac{\tau_d}{K_r} \frac{1}{(\tau_i - \tau_d)} \left[K\varepsilon + K\tau_i \frac{d\varepsilon}{dt} \right]$$

y agrupando términos se obtiene la expresión:

$$\Delta P_0 = \frac{K}{K_r} \frac{\tau_i + \tau_d}{\tau_i - \tau_d} \varepsilon + \frac{K}{K_r} \frac{1}{\tau_i - \tau_d} \int \varepsilon dt + \frac{K}{K_r} \frac{\tau_i \tau_d}{\tau_i - \tau_d} \frac{d\varepsilon}{dt}$$

o bien

$$\Delta P_o = \frac{K}{K_r} \frac{\tau_i + \tau_d}{\tau_i - \tau_d} \left[\varepsilon + \frac{1}{\tau_i + \tau_d} \int \varepsilon dt + \frac{\tau_i \tau_d}{\tau_i + \tau_d} \frac{d\varepsilon}{dt} \right] =$$

$$= g \left(\varepsilon + \frac{1}{\tau'_i} \int \varepsilon dt + \tau'_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$$

con

$$g = \frac{K}{K_r} \frac{\tau_i + \tau_d}{\tau_i - \tau_d} \quad \tau'_i = \tau_i + \tau_d \quad \tau'_d = \frac{\tau_i \tau_d}{\tau_i + \tau_d}$$

como expresiones de la ganancia, tiempo de acción integral y tiempo de acción derivada de un controlador ideal equivalente. Se ve claramente que en el controlador PID simétrico existe interacción entre los ajustes de las acciones PID, es decir, que un cambio en el ajuste de una acción influirá en las otras siendo, pues, relativamente laborioso conseguir un ajuste óptimo para que el controlador ante una perturbación lleve rápidamente y con el mínimo de oscilaciones la variable controlada a su punto de consigna.

En electrónica sí es posible construir un instrumento PID sin interacción entre las bandas.

Como es lógico, los instrumentos PID estudiados incorporan usualmente una banda derivada modificada para evitar saltos en la señal de salida ante un cambio brusco en el error.

9.3.8 Cambio automático — manual — automático

Es evidente que los controladores deben disponer de un accesorio que permita a voluntad del operador acfuar manualmente sobre la válvula de control desde el propio panel de proceso. Esta necesidad es básica en la puesta en marcha del proceso.

En los controladores neumáticos, este accesorio es un pequeño manorreductor que en la posición «manual»-desconecta previamente el propio controlador y acciona manualmente la válvula desde el propio instrumento. En «automático», el manorreductor queda desconectado y la señal de salida del controlador pasa directamente a la válvula de control.

Como es lógico, debe ser posible efectuar fácilmente el cambio tanto de automático a manual como de manual a automático.

El cambio debe efectuarse de tal modo que la señal a la válvula antes y después no sufra variaciones, para evitar la variación de posición brusca de la válvula que se produciría y que podría repercutir desfavorablemente en el control del proceso.

El cambio puede efectuarse sin tomar ningún cuidado, pasando directamente de manual a automático y viceversa sin que la válvula cambie de posición.

Estos sistemas se basan en el seguimiento automático de los puntos de consigna y de la señal manual a la válvula. En la figura 9.26 puede verse un instrumento cuyo funcionamiento es el siguiente:

Cambio automático-manual. — La unidad de control manual actúa como un transmisor de la posición de la rueda manual, con la salida de la tobera preparada para conectar a la entrada del piloto amplificador y con el fuelle de realimentación conectado permanentemente a la señal de salida a válvula. De este modo, al pasar de automático a manual, la señal de salida de la unidad de control manual se aplicará al relé amplificador y dará una señal a la válvula igual a la última señal existente en automático.

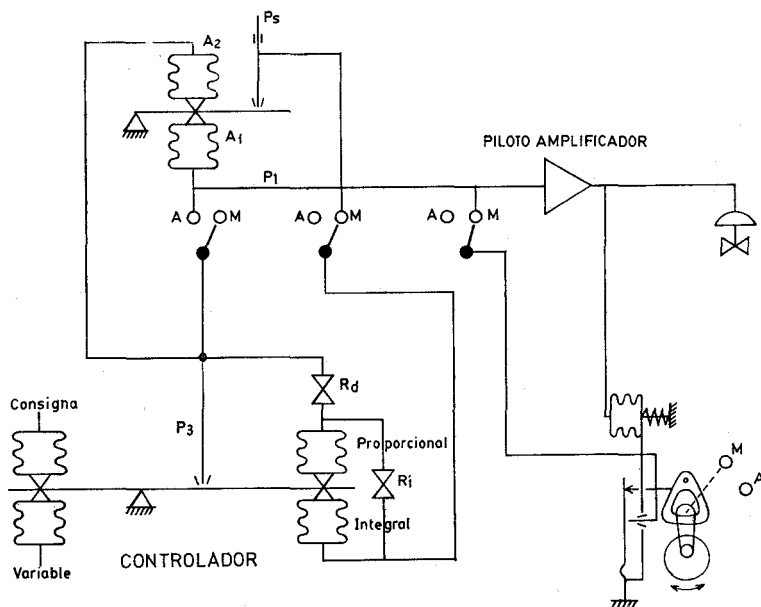


Fig. 9.26 Cambio directo automático-manual-automático.

Cambio manual-automático. — La presión posterior de la tobera de la unidad manual se aplica al fuelle A_1 , de la unidad de equilibrio. El conjunto tobera-obturador de esta unidad comunica su presión posterior al fuelle integral de la unidad controladora, cuya tobera está conectada al fuelle A_2 de la unidad de equilibrio. De este modo, el sistema se equilibra continuamente manteniendo la igualdad $P_1 = P_3$ y en cualquier momento puede pasarse directamente a automático.

9.3.9 Tendencias en los instrumentos neumáticos

Los instrumentos neumáticos de control de panel pueden ser del tipo convencional o del tipo miniatura. Estos instrumentos están actualmente muy perfeccionados y puede afirmarse que casi han llegado a su desarrollo límite. Dotados

de bloques de control de técnica fluidica modulares, disponen de acción PID, control en cascada, alarmas de desviación, relés de relación, interruptor para procesos discontinuos, conmutador automático-manual, etc. Son extraíbles de su caja de alojamiento por lo que, en caso de avería, su sustitución es inmediata.

Existen instrumentos auxiliares, situados generalmente detrás del panel de control, que transforman o relacionan entre sí las variables medias. Típicamente son los extractores de raíz cuadrada, aparatos linealizadores de la señal, relés sumadores, relés multiplicadores y divisores, relés inversores, relés de alarma, integradores, etc.

Los controladores neumáticos pueden instalarse directamente en áreas peligrosas, y se mantienen funcionando aunque falle la alimentación eléctrica, mientras exista aire en las tuberías de alimentación neumática de la planta. Deben alimentarse a través de un filtro manorreductor y a la presión de 1,4 bar (o 20 psi). El aire de alimentación debe ser limpio, si es posible sin aceite, suministrado por compresores con aros de grafito que no precisan de lubricación. Su empleo ha ido disminuyendo debido a que carecen de las ventajas de tratamiento de las señales y de la información que poseen los sistemas digitales.

9.4 Sistemas de control electrónicos y digitales

9.4.1 Generalidades

Los circuitos electrónicos actuales utilizados para obtener los diversos tipos de control hacen un uso amplio del amplificador operacional. Las posibilidades de montaje que ofrece este tipo de amplificador son muy amplias debido a sus características particulares. Es usualmente un amplificador de corriente continua (c.c.) con una ganancia en tensión en bucle abierto normalmente superior a 50 000, que, mediante la conexión de componentes adecuados dispuestos en forma de realimentación positiva o negativa, constituye el «corazón» de los controladores electrónicos. Necesita sólo una corriente de entrada del orden de los 0,5 nA ($0,5 \times 10^{-9}$ A) para dar lugar a un cambio total en la señal de salida (un valor próximo a la corriente de alimentación).

Las características más importantes del amplificador operacional pueden resumirse en:

- Ganancia de tensión en c.c. elevada entre 10^3 a 10^6 — relación entre una variación en la tensión de salida y la variación correspondiente en la entrada diferencial de tensión.
- Corriente de deriva en la entrada 1 nA a 100 μ A — corriente que fluye a través de cualquier terminal de entrada mientras la tensión de salida es nula, expresada como promedio de las dos corrientes de entrada.
- Impedancia de entrada elevada, de 10 k Ω a 1000 M Ω .
- Bajo consumo — la corriente de alimentación varía entre 0,05 a 25 mA.
- Tensión de entrada en desfase entre 0,5 a 5 mV — tensión en c.c. diferencial entre los dos terminales de entrada para que sea nula la tensión de salida.

- Corriente de entrada en desfase entre 1 nA a 10 μ A — diferencia entre las dos corrientes de entrada.
- Tensión máxima de salida de 1 a 5 V, menor que los límites de la tensión de alimentación.
- Corriente de salida de 1-30 mA.

La mayor parte de los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales que, en esencia disponen de tres terminales, dos en la entrada y uno en la salida. Una señal de entrada aplicada al terminal denominado «no inversor» hará que la salida cambie en la misma dirección: el símbolo aplicado es $+V_e$. Una variación de señal en la otra entrada hará que la señal de salida cambie en dirección inversa. Este segundo terminal se denomina «inversor» y se representa por el símbolo $-V_e$.

El símbolo utilizado para representar un amplificador operacional es un triángulo equilátero con su base vertical en la que se conectan los dos terminales de entrada, el superior es el inversor $-V_e$ y el inferior el no inversor $+V_e$, mientras que el vértice se acostumbra a situar a la derecha conectándosele el terminal de salida.

Evidentemente, el circuito real del amplificador es más complejo y está rodeado por muchas conexiones que aunque sean necesarias, no intervienen en la función principal del amplificador. En la figura 9.27 puede verse un esquema de estas conexiones así como el símbolo empleado en los circuitos electrónicos.

Se observará que las conexiones externas son dos alimentaciones $+V_s$ y $-V_s$ y dos componentes de compensación de frecuencia cuya misión es estabilizar el amplificador. Las conexiones internas equivalen a una impedancia de entrada muy grande Z_i definida como la relación entre la variación de tensión entre las dos entradas y la variación correspondiente de la corriente de entrada, y a una impedancia de salida Z_o equivalente a la relación entre la variación de la tensión de salida y la variación de la corriente de salida correspondiente.

En el resto del texto se utilizará el símbolo resumido del amplificador suponiéndose que al mismo están conectados los componentes de alimentación y de compensación de frecuencia, a menos que se indique de otro modo.

9.4.2 Control todo-nada

El amplificador operacional puede utilizarse como un controlador todo-nada muy sen-

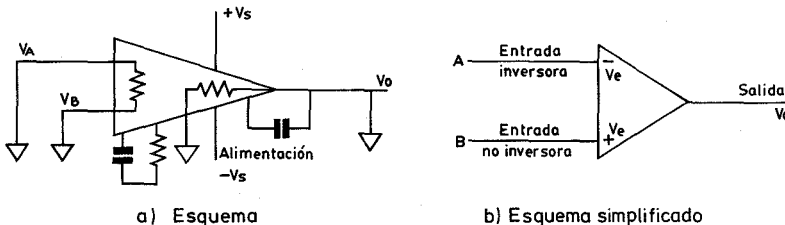


Fig. 9.27 Amplificador operacional.

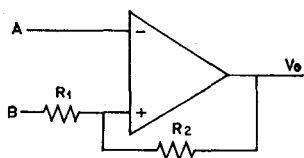


Fig. 9.28 Control todo-nada electrónico.

sible gracias a la alta ganancia del amplificador. Bastará una pequeña diferencia de señales en la entrada para que se obtenga una salida total en voltios ligeramente inferior a la tensión de alimentación. Como señal de entrada se utiliza la diferencia entre la variable y el punto de consigna y en el terminal de salida se conecta un circuito de excitación del relé final de control. La zona muerta del control todo-nada se logra mediante una resistencia conectada en serie con el terminal no inversor del amplificador y con una resistencia conectada entre este último terminal y el de salida del amplificador. En la figura 9.28 puede verse un montaje de este tipo. Su funcionamiento es el que sigue.

Cuando la señal en el terminal *B* aumenta unos pocos milivoltios con relación a la del terminal *A*, la salida V_0 aumenta y es realimentada vía la resistencia R_2 a la entrada del amplificador, bloqueando éste. El amplificador permanece en estas condiciones gracias al divisor de tensión que forman los terminales *B* y la salida.

Para que las condiciones iniciales se restablezcan, la señal de entrada debe bajar los suficientes milivoltios, con relación al terminal inversor, para compensar el efecto del divisor de tensión $R_1 R_2$. El valor de la zona muerta depende de la relación R_2/R_1 y será tanto más pequeña cuanto mayor sea esta relación.

9.4.3 Control proporcional de tiempo variable

El control todo-nada descrito anteriormente puede modificarse ligeramente para obtener un control proporcional de tiempo variable. En la figura 9.29 puede verse el esquema correspondiente que deriva del todo-nada aplicando un circuito *RC* entre la salida y la entrada inversora, para conseguir de este modo un retardo en la realimentación inversora y hacer que el circuito entre en oscilación. El circuito funciona del modo que a continuación se detalla:

Sea la tensión en *A* nula y la tensión en *B* negativa con respecto a *A*. Evidentemente, la señal de salida será negativa, con lo cual el condensador C_1 se cargará negativamente y el divisor de tensión $R_a R_1 R_2$ impedirá que el terminal

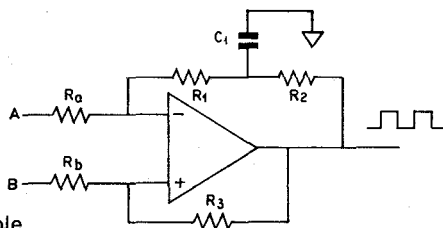


Fig. 9.29 Control proporcional de tiempo variable.

inversor del amplificador operacional tenga menor tensión negativa que la entrada no inversora.

Si ahora la entrada B se hace positiva con relación a A , la señal de salida se hará positiva, cargando también positivamente el condensador C_1 en un tiempo que depende de los valores de R_2 y C_1 . En el instante en que la carga positiva de C_1 es suficiente para compensar el divisor de tensión formado por $R_a R_1$, la entrada inversora se hace positiva, provocando el cambio de signo en la señal de salida, pasando ésta a negativa.

A continuación, la carga del condensador se hace negativa y va aumentando hasta que sobrepasa la influencia del divisor de tensión $R_a R_1$, con lo cual la entrada inversora se hará negativa y por lo tanto la señal de salida cambiará ahora a positiva, y así sucesivamente.

Estas oscilaciones en la salida tienen la forma de onda cuadrada, de amplitud casi equivalente a la tensión de alimentación. Las variaciones de la tensión de entrada B cambiarán la tensión real media de carga del condensador C_1 , lo que fijará la proporción entre el tiempo de conexión y el de desconexión del relé de salida. Es decir, si esta tensión media es de 0 V, los tiempos serán iguales y la relación valdrá 1/1. El sistema utilizará diferentes partes de la curva de carga/descarga del condensador variando la señal de entrada B . Por otro lado, la proporción entre el tiempo de conexión/desconexión del relé de salida vendrá fijada por el punto de trabajo del condensador C_1 .

9.4.4 Control proporcional

Si el amplificador operacional se usa como amplificador analógico de ganancia finita, su alta ganancia da lugar a que la entrada tenga que ser muy débil, casi nula, del orden de 0,2 mV. Para disminuir esta elevada ganancia es necesario realimentar la señal de salida a la entrada inversora $-V_e$ mediante una resistencia R_f , y como nos interesará que la señal de entrada tenga un valor distinto de cero, se añade al circuito otra resistencia R_a . En la figura 9.30 *a* puede verse el nuevo esquema de conexionado.

Consideremos ahora que las señales de entrada y salida sean nulas; evidentemente no habrá circulación de corriente a través de las resistencias R_f y R_a . Si ahora la entrada inversora A cambia a $+1$ V, la tensión de salida variará en la dirección $-V_e$ hasta que la corriente de entrada del amplificador se reduzca a cero (ya que es un amplificador diferencial). Esta condición se alcanza cuando

$$\frac{V_o \text{ (salida)}}{R_f} = \frac{V_A \text{ (entrada)}}{R_a}$$

$$\text{de aquí, ganancia del amplificador} = \frac{V_o}{V_A} = \frac{R_f}{R_a}$$

Si en lugar de variar la señal de entrada inversora A , es la entrada no inversora B la que cambia únicamente en $+1$ V, la señal de salida variará positivamente en la dirección $+V_e$ hasta que la realimentación $-V_e$, a través de la resistencia R_f , aumente la señal en la entrada inversora el mismo valor que la entrada no inversora B . En estas condiciones, la ganancia del amplificador es:

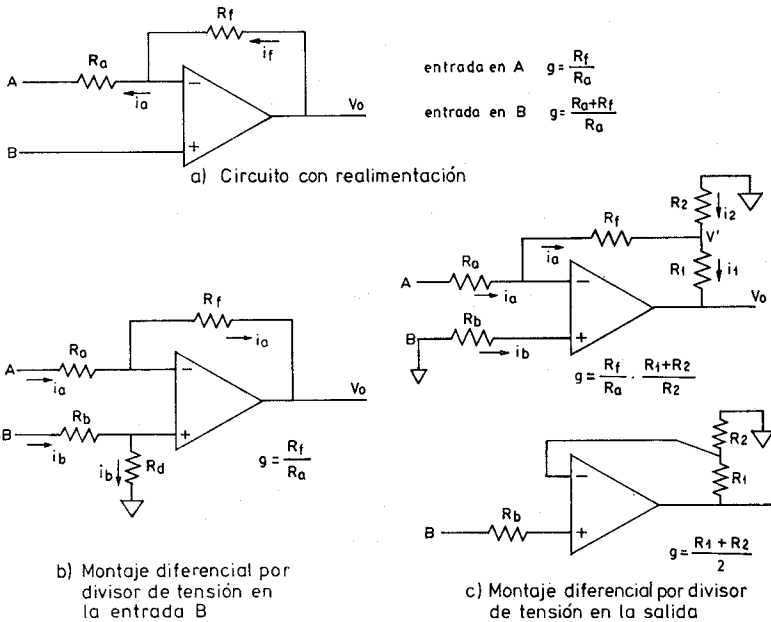


Fig. 9.30 Controlador proporcional electrónico.

$$\text{ganancia} = \frac{V_o}{V_B} = \frac{R_a + R_f}{R_a}$$

ya que se verifica

$$\begin{cases} V_o = i_f R_f + i_a R_a \\ V_B = i_a R_a \\ i_f = i_a \end{cases}$$

Esta diferencia de ganancias, aunque no sea muy acusada debido a las características particulares del amplificador, debe eliminarse en las aplicaciones verdaderamente diferenciales. La igualdad de estas dos ganancias se logra mediante un divisor de tensión aplicado a la entrada no inversora B. En el circuito de montaje diferencial de la figura 9.30 b se establecen las ecuaciones:

$$\begin{cases} V_A = i_a R_a + i_b R_d \\ V_o = -i_a R_f + i_b R_d \\ V_B = i_b R_b + i_b R_d \end{cases}$$

y suponiendo que $R_a = R_b$ y $R_f = R_d$ resulta, utilizando las dos entradas, una ganancia en tensión de

$$\frac{V_o}{V_B - V_A} = \frac{-i_a R_f + i_b R_d}{-i_a R_a + i_b R_b} = \frac{R_f}{R_a}$$

Si sólo se utiliza la entrada A y se usa la resistencia R_b para conectar la entrada no inversora a 0 V, la ganancia correspondiente es:

$$g = \frac{V_o}{V_A} = \frac{R_f}{R_a} \quad \text{ya que} \quad i_b = 0$$

Si la entrada utilizada es sólo la B , se emplea la resistencia R_b en serie en la entrada B , con lo cual

$$g = \frac{V_o}{V_B} = \frac{R_f}{R_a} \quad \text{ya que} \quad i_a = 0$$

En cualquiera de estos dos casos, se obtendrá un controlador proporcional variando la relación $\frac{R_f}{R_a}$ mediante un potenciómetro con el cursor conectado a la entrada inversora del amplificador operacional. Un método alternativo para controlar la ganancia del conjunto es conectar la resistencia R_f al centro de un divisor de tensión en la salida del amplificador, tal como puede verse en la figura 9.30 c.

Siendo las intensidades i_b e i_a muy débiles en comparación con las restantes del circuito, se verifican las ecuaciones

$$\begin{cases} \frac{V_o}{V'} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \\ V' - i_a R_f = 0 \\ V_A = i_a R_a \end{cases}$$

luego:

$$\text{ganancia } (g) = \frac{V_o}{V_A} = \frac{R_f}{R_a} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Si la señal de entrada se conecta a B , el terminal inversor se puede conectar directamente a la unión de $R_1 R_2$ (fig. 9.30 c) con lo cual se verifica

$$\frac{V_o}{V'} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$V' \simeq V_B$ ya que la intensidad i_a es muy débil en comparación con i_1 e i_2 .
Luego:

$$g = \frac{V_o}{V_B} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

En estos dos últimos casos estudiados, es fácil transformar el conjunto de resistencias $R_1 R_2$ en un potenciómetro con el cursor conectado en la realimentación al amplificador operacional. Al variar la posición del cursor, cambiará la ganancia y se obtendrá un controlador de ganancia variable, es decir, proporcional.

9.4.5 Control integral

La acción integral puede generarse en el amplificador operacional mediante un condensador conectado en serie con la línea de realimentación negativa y con una resistencia conectada en serie con el terminal inversor, según puede verse en la figura 9.31 a. Siendo i_b una intensidad débil comparada con la intensidad de corriente i_i , se verificarán las ecuaciones siguientes:

$$V_o = - \frac{\int i_i dt}{C_i}$$

$$PV-SP = i_i R_a$$

de donde

$$V_o = - \frac{1}{R_a C_i} \int_0^t (PV-SP) dt$$

que es la ecuación de la acción integral con constante de tiempo $\tau_i = R_a C_i$.

El sistema de la figura 9.31 a tiene el inconveniente de invertir la señal de salida con relación a la señal de error ($PV-SP$), lo cual es indeseable en algunas aplicaciones. Para evitarlo puede conectarse la señal de error a la entrada no inversora, dejando el condensador de integral entre la salida y la entrada inversora y conectando esta última a la línea de cero voltios a través de una resistencia (figura 9.31 b).

Cuando se aplica una señal de error positiva $PV-SP$ a la entrada no inversora B, la salida cambia en una dirección positiva, con lo cual el condensador C_i se va cargando, pasando así una corriente i a través de la resistencia R_i lo que provoca una variación de la carga del condensador. La disminución de tensión correspon-

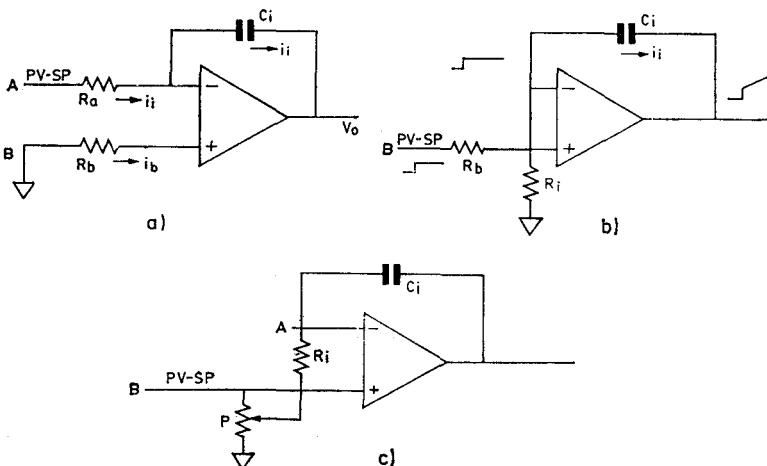


Fig. 9.31 Control integral electrónico.

diente creada en la entrada inversora del amplificador hace que la salida aumente en una dirección positiva, lo cual a su vez hace que el terminal negativo, a través del condensador C , pase a tener una tensión positiva, manteniendo la corriente i_i en la resistencia R_i y continuando indefinidamente esta cadena de acontecimientos, acción que recibe el nombre de integración.

Para un error $PV-SP$ positivo, la señal de salida cambia en forma de rampa positiva. La velocidad de variación de la salida depende de los valores de C_i y R_i así como del valor de la señal de error. La señal de error vista por el amplificador operacional, puede variarse conectando la resistencia R_i al cursor de un potenciómetro conectado entre la entrada B de la señal de error y la línea de 0 voltios. De este modo se obtendrá un ajuste fino del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia R_i . En la figura 9.31 c puede verse el esquema correspondiente.

9.4.6 Control derivativo

La acción derivativa puede conseguirse colocando un condensador C_d a la entrada inversora y una resistencia R_d en paralelo entre la salida y la entrada inversora. En la figura 9.32 a puede verse el esquema correspondiente.

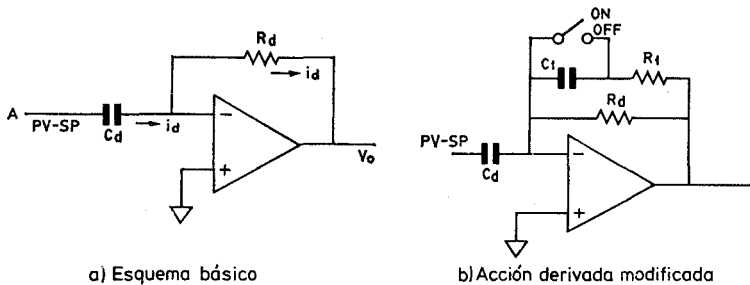


Fig. 9.32 Controlador de acción derivada.

Las ecuaciones correspondientes son:

$$V_o = -i_d R_d$$

$$PV-SP = \frac{\int i_d dt}{C_d}$$

derivando la segunda ecuación resulta:

$$\frac{d(PV-SP)}{dt} = \frac{1}{C_d} i_d$$

y sustituyendo en la primera se tiene

$$V_o = -R_d C_d \frac{d(PV-SP)}{dt}$$

que es la ecuación de la acción derivativa de constante de tiempo $\tau_d = R_d C_d$.

El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia R_d en un potenciómetro. Cuando la señal de error cambia rápidamente (debido a una variación rápida del punto de consigna o bien de la variable o quizá provocado por señales con ruido) la señal de salida aumenta muy rápidamente tomando en el límite la forma de un pico. Este efecto es indeseable ya que puede perjudicar el control del proceso.

Se soluciona este inconveniente eliminando la acción derivativa cuando el instrumento capta una variación rápida de la señal de error. Se conecta un condensador C_1 y una resistencia R_1 en serie, en paralelo con la resistencia derivativa R_d (figura 9.32 b). De este modo, como la impedancia de C_1 es inversamente proporcional a la variación de tensión que se le aplica, un cambio rápido de tensión hará que el condensador C_1 presente una baja impedancia a través de la resistencia derivativa R_d , con lo cual el tiempo de acción derivativa será necesariamente bajo, modificándose el valor derivativo ajustado, pero sólo durante el instante de la variación rápida de la señal de error. Un interruptor conectado en paralelo con el condensador C_1 permite, en la posición de conexión, eliminar la acción derivativa cuando así se desee.

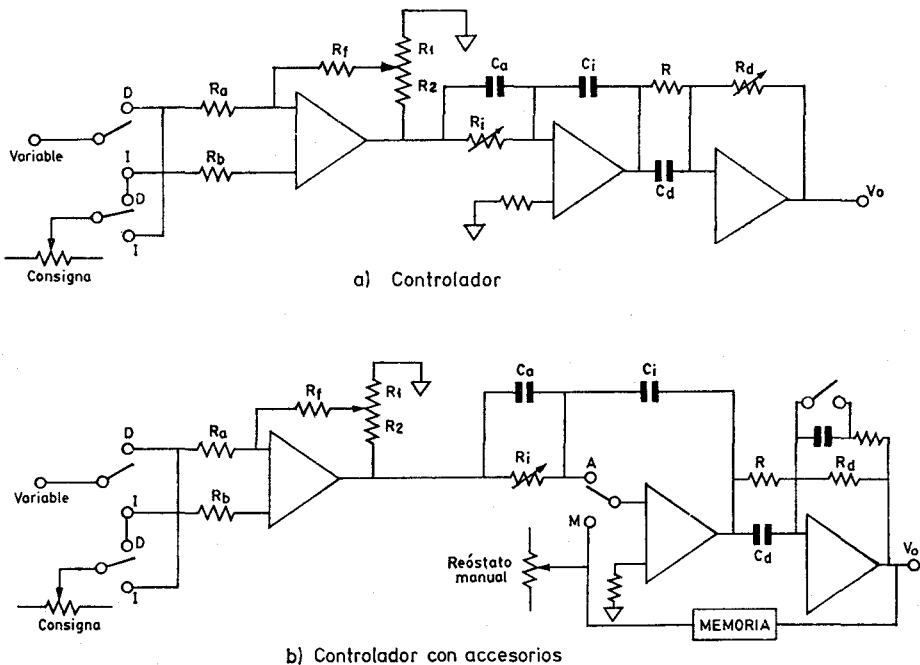


Fig. 9.33 Esquema simplificado del controlador PID.

9.4.7 Control proporcional + integral + derivativo

La unión en un circuito de los tres controladores descritos anteriormente da lugar a un instrumento electrónico proporcional + integral + derivativo.

El circuito simplificado consiste en un módulo proporcional + integral – donde se fija la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del punto de consigna y se selecciona la acción directa o la inversa del controlador – y un módulo de acción derivada modificada donde se encuentra el potenciómetro de acción derivada.

En la figura 9.33 *a* puede verse un esquema simplificado del controlador.

La ecuación correspondiente es:

$$V_o = g(PV-SP) + K' \int_0^t (PV-SP) dt + K'' \frac{d(PV-SP)}{dt}$$

En otros controladores, el potenciómetro de acción proporcional se encuentra en la salida del segundo amplificador operacional. Los controladores electrónicos suelen disponer además de un conmutador automático-manual con un reóstato para control manual y un circuito de memoria para que el cambio automático a manual se efectúe sin saltos. Estos accesorios se representan en la figura 9.33 *b*.

9.4.8 Cambio automático — manual — automático

En los instrumentos electrónicos, el cambio manual-automático o automático-manual se efectúa sin saltos en la posición de la válvula de control gracias a un circuito de «memoria» que mantiene el mismo nivel de potencial antes de la commutación. En la posición «manual» el elemento final de control recibe la salida de un potenciómetro de ajuste manual, mientras que en la posición «automática» la conexión queda establecida en el bloque PID (figura 9.33 *b*).

9.4.9 Controladores digitales

Los instrumentos electrónicos de control de panel descritos son del tipo miniatura. Dotados de las mismas funciones que el controlador neumático anterior, pueden contener un microprocesador, lo que les ha permitido la incorporación de «inteligencia» para permitir, por ejemplo, el ajuste del punto de consigna y de las acciones PID sin extraer el instrumento de su base en el panel, el autoajuste del instrumento (fijación de los valores de las acciones proporcional, integral y derivada) para acomodarse a las variaciones de régimen de carga del proceso, y el autodiagnóstico del aparato.

El *controlador digital* contiene el procesador o microprocesador (o CPU-Central Process Unit) y la memoria principal, comunicados entre sí y con los periféricos (teclado, monitor, unidad de discos, ratón, impresora, plotter y modem), a través de tres conductos o canales de señales o buses: el bus de datos, el bus de di-

recciones y el bus de control. En la figura 9.34 puede verse el esquema general de un controlador digital.

El procesador o microprocesador contiene:

La unidad aritmética y lógica (ALU) que efectúa las operaciones aritméticas básicas de suma y resta, y que dispone de los operadores lógicos de comparación AND, OR, NOT, XOR...

La unidad de control constituye el verdadero «cerebro» del ordenador y organiza el trabajo de la unidad aritmética y lógica, mediante los pulsos de frecuencia del reloj del microprocesador, que determina el tiempo de ejecución de las tareas confiadas al ordenador. Un oscilador de cuarzo típico, tal como el incluido en el microprocesador Pentium de INTEL, genera hasta 230 millones de pulsos por segundo (230 MHz).

El bus de datos transfiere datos o instrucciones de modo bidireccional entre el microprocesador y la memoria principal (ROM y RAM). El bus de datos puede disponer típicamente de 8, 16, 32, 64 o 128 canales, es decir, existen 8, o 16 o 32, o 64, o 128

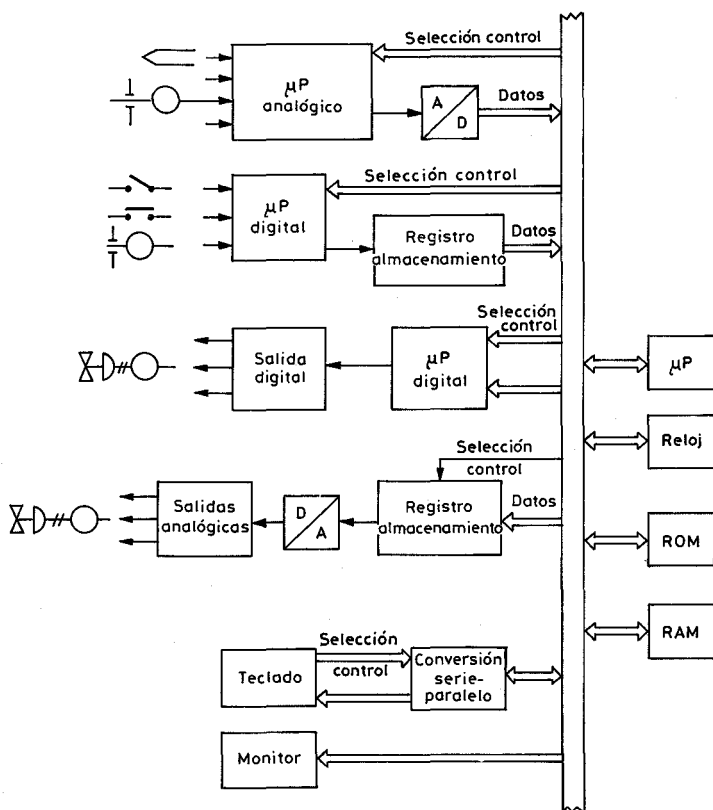


Fig. 9.34 Controlador digital.

conductores eléctricos en los circuitos impresos que transportan simultáneamente un idéntico número de impulsos eléctricos a través de las denominadas puertas paralelas (parallel ports) lo que permite un mayor manejo de datos tanto más cuanto mayor sea el número de conductores en paralelo. De aquí la denominación de ordenadores de 8, 16, 32, 64 o 128 bits (un bit es el valor 0 o el valor 1, es decir representa el paso o no de un impulso eléctrico a través de cada conductor del bus), capaces de manejar a la vez, 1, 2, 4, 8 o 16 bytes (1 byte = 8 bits).

El bus de direcciones parte del microprocesador indicando a la memoria principal la dirección exacta de la memoria donde están almacenados los datos.

El bus de control se encarga de transportar las señales de control que actúan los componentes del ordenador en el momento adecuado, como si fueran estímulos nerviosos provocados y de corta duración.

La memoria principal del ordenador almacena los datos, instrucciones y resultados obtenidos en grupos de 8 bits, denominándose a cada grupo posición de memoria o byte (se pronuncia «bait») que corresponde a 1 carácter, es decir, a una letra, o número, o símbolo, o espacio. Cada 1024 caracteres constituyen un kilobyte y 1000 kilobytes forman un megabyte. Para representar valores más altos que el byte pueden asociarse dos bytes formando lo que se denomina palabra (word). Fundamentalmente hay dos tipos de memoria:

ROM (Read Only Memory) o memoria de solo lectura, que no puede ser modificada y no se borra al desconectar el ordenador, donde se guarda el sistema operativo que proporciona la interfaz entre el ordenador y el exterior (le dice al ordenador lo que tiene que hacer). Existen varios sistemas operativos: MS-DOS, PC-DOS, CP/M-86, CCP/M, UCSD-P, PICK, UNIX y otros.

RAM (Random Access Memory) o memoria de acceso aleatorio que almacena los programas. Estos programas constituyen una especie de «memoria aprendida» o *software*, mientras que la estructura física del ordenador que soporta la información recibe el nombre de *hardware* y es «todo lo que puede verse y tocarse» incluyéndose los periféricos. La RAM es «volátil», es decir, se borra al desconectar el ordenador.

Para almacenar permanentemente los datos procesados por el ordenador, se utilizan las unidades de discos incorporadas al ordenador (duros) y las externas.

Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (batch), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura,...), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias. Este tipo de controladores permiten incluso la creación de software para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación.

Los controladores digitales, al estar dotados de microprocesador, realizan directamente las funciones de control auxiliar expuestas antes en los instrumentos neumáticos y electrónicos, y no precisan de ningún otro instrumento.

Los controladores digitales permiten el ajuste de sus acciones de control ante las perturbaciones periódicas del proceso. Por este motivo pueden trabajar con varios algoritmos de control P + I + D. El algoritmo convencional, donde las ac-

ciones se influyen mutuamente, y que corresponde a los controladores clásicos neumáticos y electrónicos, es:

$$DEF FNV(p) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{TI \cdot p}\right) \cdot \left(\frac{1 + TD \cdot p}{1 + Ta \cdot p}\right) \cdot e$$

siendo

p = operador d/dt (si fuera la letra s indicaría la variable correspondiente en el dominio de Laplace)

e = error o diferencia entre la variable y el punto de consigna

K = ganancia del controlador (100/banda proporcional)

TI = tiempo de acción integral en minutos/repetición

TD = tiempo de acción derivativa en minutos de anticipo

El algoritmo de no interacción entre las acciones (llamado también algoritmo ISA) es:

$$DEF FNV(p) = e \cdot \left(K + \frac{1}{TI \cdot p}\right) - \left(\frac{TD \cdot p}{1 + Ta \cdot p}\right) \cdot PV$$

El algoritmo llamado industrial es:

$$DEF FNV(p) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{TI \cdot p}\right) \cdot \left[PC - \left(\frac{1 + TD \cdot p}{1 + Ta \cdot p}\right) \cdot PV\right]$$

siendo

Ta = constante de tiempo de filtro (valor usual = $0,1 \cdot Td$) de la acción derivada, lo que limita la acción derivativa a altas frecuencias

PV = variable de proceso

PC = punto de consigna

En un controlador digital es necesario discretizar los valores de sus acciones. De este modo, y siendo:

T_m = período de muestreo, es decir, $T_m = t_k - t_{k-1}$

$e(t_k)$ = error o diferencia entre la variable y el punto de consigna

$e(t_{k-1})$ = error un incremento de tiempo de muestreo antes

$e(t_{k-2})$ = error dos incrementos de tiempo de muestreo antes

resulta:

$$Y(t_k) = k \left\{ e(t_k) + \frac{T_m}{T_i} e(t_k) - e(t_{k-1}) + \frac{T_d}{T_m} [e(t_k) - 2 e(t_{k-1}) + e(t_{k-2})] \right\}$$

siendo

k = ganancia de la acción proporcional

T_i = min/rep. de la acción integral

T_d = minutos de la acción derivativa

Los controladores digitales, por su propia constitución, son configurables a través del teclado, pudiendo realizarse en general, las siguientes selecciones:

- Filtrado digital de la señal de entrada.
- Presentación de la variable en unidades seleccionables (por ejemplo, m^3/h , $^{\circ}\text{C}$, etc.).
- Selección del tipo de control todo-nada. *P*, *PI*, *PD*, *PID* y de otros algoritmos.
- Selección de acción directa (al aumentar la variable aumenta la señal de salida) o acción inversa (al aumentar la variable disminuye la señal de salida).
- Límite en la acumulación de la acción integral en procesos discontinuos.
- Corrección de emisividad en la medición de temperatura por pirómetro de radiación.
- Seguimiento del punto de consigna.
- Autoajuste de las acciones de control.
- Seguridad contra manejo no autorizado.
- Autodiagnóstico.
- ...

Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (batch), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, etc.), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias. Este tipo de controladores permite incluso la creación de software para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación.

Los controladores digitales forman también parte del control distribuido, del cual se habla más adelante, en el que uno o varios microprocesadores controlan las variables que están repartidas por la planta, conectados, por un lado, a las señales de los transmisores de las variables y, por el otro, a las válvulas de control.

En este caso, análogamente a las demás variables de la planta, el operador puede cambiar el punto de consigna, modificar los valores de las alarmas, los valores de las acciones de control PID, visualizar el gráfico del lazo de control, cambiar los márgenes de medida de los transmisores y de las alarmas, examinar la bondad del control, visualizar las curvas de tendencia de las variables, etc. Y, desde el punto de vista del mantenimiento, puede ser avisado por el sistema si se presenta algún fallo en los instrumentos o en el cable de comunicaciones, o examinar su buen funcionamiento cuando lo desee.

Los controladores programables digitales sustituyen a los relés convencionales utilizando un software en un lenguaje especial basado en la lógica de relés.

Existe una tendencia por parte de los fabricantes de instrumentos y del mercado en el uso de controladores capaces de controlar individualmente una unidad

de operación de la planta. Por ejemplo, el control de un reactor o el control de un horno, o el de un compresor.

En este sentido, el controlador debe manipular una serie de entradas y de salidas y debe efectuar varias operaciones y cálculos de control para los lazos de la unidad de proceso, aparte de proporcionar las secuencias de enclavamientos de bombas y de válvulas todo-nada del proceso. Como estas operaciones deben poder realizarse para diferentes tipos de unidades de proceso, se sigue que el llamado *controlador universal* puede estar formado por ordenadores personales o bien ordenadores especiales con el adecuado hardware, bien estudiado por el suministrador, para que el usuario no tenga especiales dificultades al programar el software necesario en su proceso. Esto conlleva bastantes horas de dedicación que el suministrador puede reducir proporcionando al usuario librerías de subrutinas de funciones de control PID y lógico. No obstante, en la mayor parte de los casos, el usuario debe elaborar la mayor parte del software para «construir» la unidad controladora.

Los sistemas expertos prometen ser el futuro de los controladores universales al tener la posibilidad de incorporar gradualmente la experiencia ganada por el usuario en cada unidad de proceso.

La creciente utilización del ordenador personal pone como atrayente la solución competitiva y económica de utilizar un ordenador personal para el control de las variables del proceso. Por contra, esta solución presenta como desventaja el hecho de que el ordenador personal está preparado para trabajar en el ambiente de oficina o de laboratorio, pero no para el ambiente industrial con polvo, vibraciones, y altas o bajas temperaturas. Por otro lado, la constante modernización de los sistemas operativos (el MS-DOS dispone sólo de 640 K de memoria y una sola tarea), dotados, la mayoría de ellos, de una interfaz cómoda e intuitiva y de la capacidad de

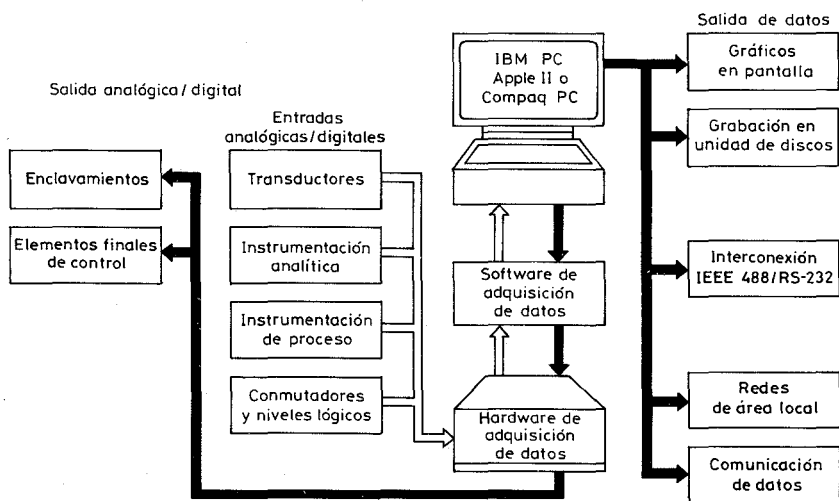


Fig. 9.35 Ordenador personal para el control de procesos.

realizar multitareas (OS2, Windows 95, etc.) han hecho del ordenador personal una herramienta indispensable para el control de procesos. La rápida evolución de las placas y tarjetas de adquisición de datos y de entrada/salida, así como la facilidad de programación de éstas y el desarrollo de nuevos softwares para el control de procesos, permiten el control del proceso en tiempo real de una manera mucho más efectiva que la de pocos años atrás.

Entre los paquetes de software que pueden emplearse figura el Labtech Notebook de Laboratory Technologies Corp. (Wilmington MA) que, creado inicialmente para adquisición de datos de laboratorios, fue mejorado para aplicaciones de control de procesos industriales (permite las acciones P + I + D), etc. Este programa permite el control en tiempo real del proceso y, además, el uso compartido del ordenador personal para otros menesteres como, por ejemplo, trabajar con un procesador de textos o con una hoja electrónica.

La aparición de los procesadores Pentium de INTEL con velocidades de reloj de hasta 230 MHz y la aparición del procesador P6 de nueva generación también de INTEL permiten tener las prestaciones suficientes para garantizar un óptimo control del proceso.

Diversos fabricantes tienen en el mercado ordenadores que subsanan el gran problema de los ordenadores personales: su poca fiabilidad para trabajar en ambientes industriales. Estos ordenadores son más robustos que sus homólogos aunque su desarrollo está en una generación anterior a la de los ordenadores personales. En la figura 9.35 pueden verse los bloques que intervienen en el uso del ordenador en procesos industriales.

9.5 Selección del sistema de control

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 9.36.

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los

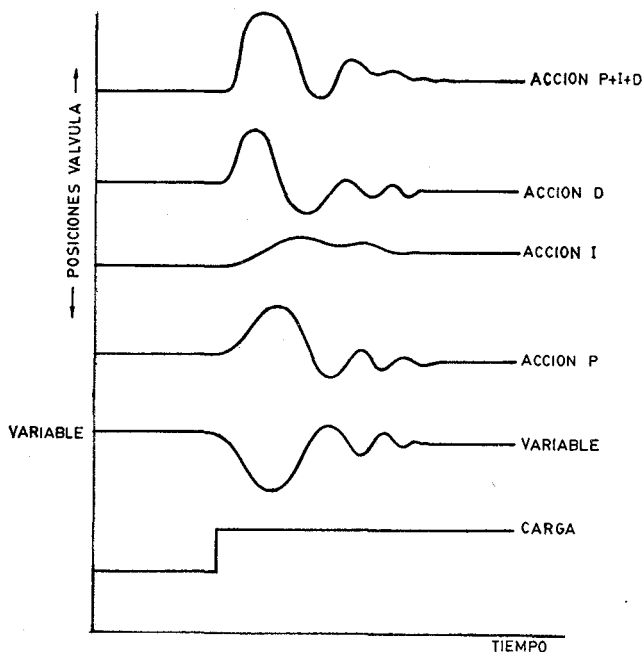


Fig. 9.36 Acciones PID.

instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones. Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección de las mismas es técnica, para que el proceso esté bien controlado, y no económica.

TABLA 9.1 Guía de selección de un sistema de control

Control	Proceso		Cambios de carga	Aplicaciones
	Capacitancia	Resistencia		
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	»	»	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderados	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional + integral	Cualquiera	»	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal
Proporcional + derivada	Media	»	»	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + integral + derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperaturas en intercambiador de calor)

En la tabla 9.1 se indica una guía general para seleccionar un sistema de control, si bien hay que señalar que sólo sirve de orientación general y debe consultarse únicamente como guía de aproximación al control idóneo.

9.6 Criterios de estabilidad en el control

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación.

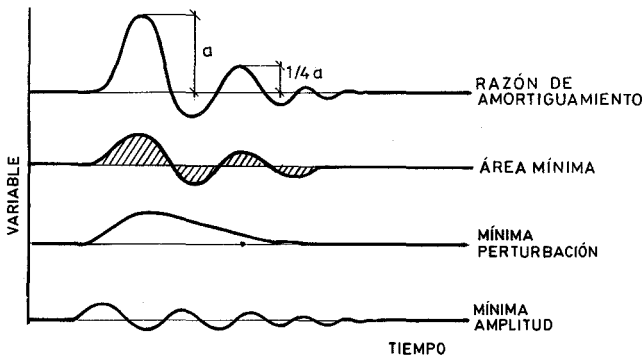


Fig. 9.37 Criterios de estabilidad.

Los criterios deseables para la estabilidad se representan en la figura 9.37 y son los siguientes:

Criterio de razón de amortiguamiento. La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitudes entre las crestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0,25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a una valor estable: una relación mayor que 1/4 dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable, mientras que una relación menor que 1/4 devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema. Este criterio es el más importante y se aplica especialmente en los procesos donde la duración de la desviación es tan importante como el valor de la misma.

Criterio de área mínima. Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto. Es decir, la expresión $\int_0^t |e| dt$, en la que $|e|$ es el valor absoluto de la desviación,

debe tener el valor mínimo. Se denomina también criterio de la integral mínima del valor absoluto del error (IAE) y es un criterio intermedio entre ISE e IAE.

Criterio de mínima integral del cuadrado del error (ISE), donde debe ser

mínima la expresión $\int_0^t [e(t)]^2 \cdot dt$ que penaliza los grandes errores [$e(t)$ está elevado al cuadrado] con lo cual las respuestas son poco amortiguadas.

Criterio de mínima integral en el tiempo del valor absoluto del error (ITAE), donde debe ser mínima la expresión $\int_0^t [e(t)] \cdot t \cdot dt$, y que penaliza los pequeños errores que se presentan al final de la curva de recuperación, con lo cual, las respuestas son altamente amortiguadas.

En general estos criterios están restringidos a tiempos de retardo pequeños y medios que cumplen la condición:

$$0 < (\text{tiempo de retardo del proceso} / \text{constante de tiempo del proceso}) \leq 1$$

Criterio de mínima perturbación. Éste requiere una curva de recuperaciones no cíclicas, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor, pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente. Otro caso puede ser el control en cascada en que la señal de salida de un controlador varíe cíclicamente y se aplique como punto de consigna en un segundo controlador creándole serias variaciones de carga.

Criterio de amplitud mínima. De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica especialmente a procesos en que el producto o el equipo puede ser dañado por desviaciones momentáneas excesivas, y en este caso la magnitud de la desviación es más importante que su duración. Por ejemplo, en el caso de fusión de algunas aleaciones metálicas, el sobrepasar temporalmente una determinada temperatura puede destruir el metal. Se aplica también este criterio en el caso de procesos exotérmicos con el punto de consigna próximo a la temperatura de disparo de la reacción incontrolable.

Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar normalmente un primer ajuste de los controladores, es decir, la fijación de los valores de las acciones PID. Dado que en la puesta en marcha el tiempo es limitado, los instrumentistas, según su experiencia, prefijan dichos valores, y más adelante los ajustan definitivamente. Como guía de aplicación de valores iniciales, figura la siguiente tabla:

TABLA 9.2 Valores de las acciones de control

	% Banda proporcional (ganancia)	Tiempo integral (min/rep)	Tiempo derivativo (minutos)
Presión	20 (5)	—	—
Caudal	80-250 (1,25-0,4)	0,5-15	—
Nivel	50-100 (2-1)	—	—
Temperatura	20-50 (5-2)	0,5-15	0,5-3

9.7 Métodos de ajuste de controladores

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, caso de que posea las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control — proceso + transmisor + válvula de control —. Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios mencionados para que el control sea estable, en particular, el de área mínima con una relación de amortiguación de 0,25 entre crestas sucesivas de la onda.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental.

El método analítico se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales y al control distribuido, que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real. Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de tres formas principales.

1. Método de tanteo (lazo cerrado)
2. Método de ganancia límite (lazo cerrado)
3. Método de curva de reacción (lazo abierto)

Otros métodos de ajuste que describiremos más adelante y que se pueden ejecutar automáticamente, son el de Nishikawa y otros, el de Chindambara y el de Kraus y Myron, existiendo una búsqueda constante de nuevos métodos gracias al uso amplio del ordenador que permite el análisis del proceso y el ensayo en tiempo real de los valores de las acciones de control.

Método de tanteo. Este método requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones, y estrecharlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Es necesario que pase un tiempo suficiente después de cada desplazamiento del punto de consigna, para observar el efecto total del último ajuste obteniendo algunos ciclos de la respuesta ante la perturbación creada. En procesos muy lentos ello puede requerir hasta 2 o 3 horas.

Para ajustar los controladores proporcionales, se empieza con una banda proporcional ancha y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Hay que hacer notar que al estrechar la banda proporcional, aumenta la inestabilidad y que al ampliarla se incrementa el error de offset, tal como se ve en la figura 9.38.

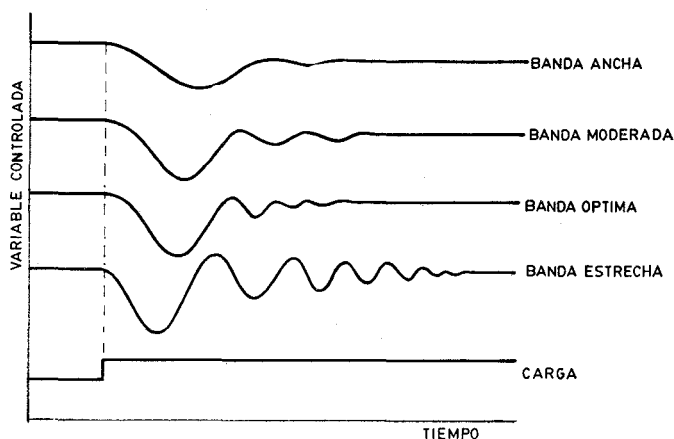


Fig. 9.38 Ajuste de banda proporcional.

Para ajustar los controladores con banda $P + I$, se procede del siguiente modo:

Con la banda integral 0, o en su valor más bajo, se sigue el procedimiento descrito anteriormente para obtener el ajuste de la banda proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximado de 0,25. Como la acción integral empeora el control y al poseerla el instrumento, su banda proporcional debe ser un poco más alta (menor ganancia del controlador), se aumenta ligeramente la banda proporcional y a continuación se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos. La última banda ensayada se reduce ligeramente. En la figura 9.39 pueden verse unas curvas características de recuperación.

Un controlador PI bien ajustado lleva la variable al punto de consigna rápidamente y con pocos ciclos sin que éstos rebasen o bajen del punto de consigna según haya sido el signo de la perturbación.

Al ajustar los controladores $P + I + D$, se procede del siguiente modo:

Con la banda derivada e integral a 0, o al mínimo, se estrecha la banda proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25.

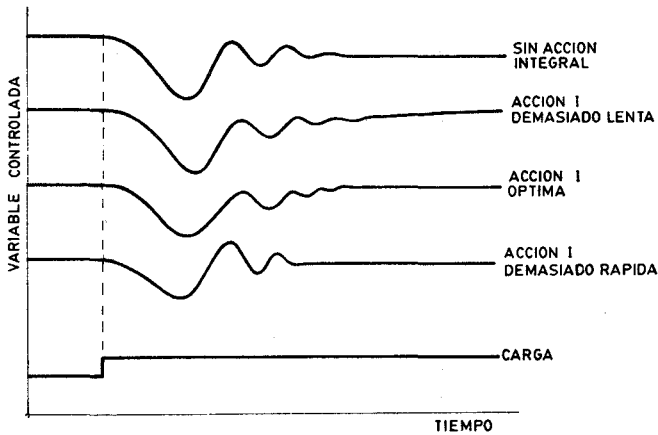


Fig. 9.39 Ajuste de banda integral.

Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes, puede estrecharse normalmente la banda proporcional con mejores resultados en el control.

Hay que señalar que una acción derivada óptima después de una perturbación lleva la variable a la estabilización en muy pocos ciclos.

En otra forma de ajuste, para obtener una óptima banda derivada se trabaja primero con una banda proporcional que da lugar a una ligera oscilación (varios ciclos) ante una perturbación, con la acción integral reducida al mínimo. Se aumenta a continuación la acción derivada hasta eliminar el ciclo de la proporcional. Se estrecha de nuevo la acción proporcional hasta que los ciclos se inician, y se aumenta todavía más la banda derivada hasta eliminarlos, continuando con estos pasos hasta que el aumento de la acción derivada no mejore la eliminación de los ciclos producidos. Finalmente se ajusta la acción integral en la forma descrita anteriormente para eliminar el offset.

En la figura 9.40, se representan unas curvas características de recuperación.

Si los ajustes efectuados son excesivos, pueden obtenerse las oscilaciones:

- Oscilación proporcional.
- Oscilación integral.
- Oscilación derivada.

Para distinguirlas, se observan las siguientes reglas:

- a) La oscilación integral tiene un período relativamente largo (fig. 9.41);
- b) La oscilación proporcional tiene un período relativamente moderado (figura 9.40);

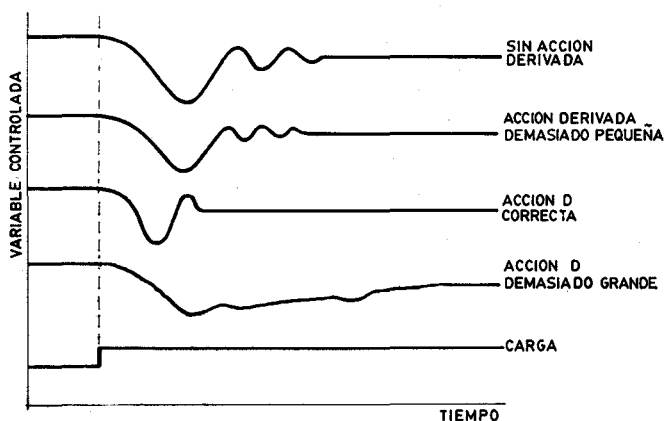


Fig. 9.40 Ajuste de banda derivada.

- c) La oscilación derivada tiene un período muy largo y la variable tarda bastante tiempo en estabilizarse (fig. 9.40).

Pueden emplearse también otros criterios de ajuste. Estos criterios están basados en la respuesta del lazo de control (abierto o cerrado) a las entradas en escalón, o a las propias perturbaciones del proceso. Incluyen el tiempo de subida (tiempo requerido para que la respuesta a una entrada en escalón alcance del 10 al 90 % del valor final), el tiempo de pico (tiempo que transcurre desde que la variable cruza el valor final hasta que alcanza su primer valor máximo o pico), el tiempo de restablecimiento (tiempo requerido para que la respuesta alcance y se mantenga dentro del 10 al 90 % del valor final), la relación de amortiguación entre picos de la variable de proceso, la integral del error al cuadrado (ISE), la integral del error absoluto (IAE) y la integral del tiempo y del error absoluto (ITAE).

Método de ganancia límite. Este método de lazo cerrado fue desarrollado por Ziegler y Nichols, en 1941 y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del bucle cerrado de control. El método se basa en estrechar gradualmente la banda proporcional con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo (fig. 9.41).

Esta banda proporcional se denomina «banda proporcional límite» (PBU). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones P_u en minutos, y la última banda proporcional PB_u . Los ajustes de control que producirán aproximadamente una respuesta con una relación de amplitudes 0,25, se calculan como sigue:

— **Controladores de banda proporcional:**

1. Banda proporcional (%) = $2 PB_u$

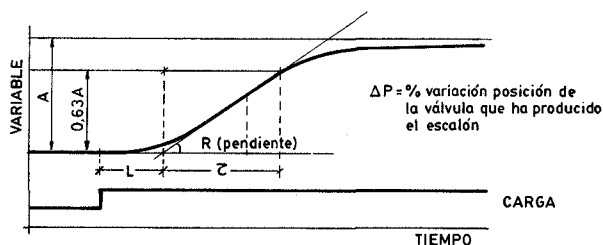


Fig. 9.42 Curva de reacción.

El retardo L es el tiempo en minutos que transcurre entre el instante del cambio en escalón y el punto en que la tangente anterior cruza el valor inicial de la variable controlada. ΔP es el % de variación de posición de la válvula de control que introduce el escalón en el proceso.

Las fórmulas a aplicar son las siguientes:

1. *Control proporcional*

$$\% BP = \frac{100 RL}{\Delta P}$$

2. *Control $P + I$*

$$\% BP = \frac{110 RL}{\Delta P}$$

$$\text{Minutos por repetición} = \frac{L}{0,3}$$

3. *Control $P + I + D$*

$$\% BP = \frac{83 RL}{\Delta P}$$

$$\text{Minutos por repetición} = \frac{L}{0,5}$$

$$\text{Minutos de anticipo} = 0,5 L$$

Hay que señalar que los procedimientos de ganancia límite y de curva de reacción fueron deducidos empíricamente después de analizar muchos tipos de procesos industriales y ambos se basan en la respuesta del proceso ante una perturbación. Como esta perturbación es provocada, se corre el riesgo de abandonar las condiciones normales de trabajo del lazo de control. Por otro lado, es evidente que las características del proceso no permanecen constantes en todo momento, por lo cual puede ocurrir que los valores de las acciones determinados en unas condiciones de carga dadas se aparten de las bandas convenientes para otras condiciones de carga distintas. De aquí, que es preferible realizar los ensayos en las peores condiciones de carga del proceso para que, de este modo, los ajustes del controlador sean válidos en todas las condiciones de servicio.

Observaciones análogas pueden aplicarse a las bandas determinadas con el método de tanteo debiendo señalar que para afinar los ajustes determinados con los otros dos métodos es conveniente realizar un procedimiento de tanteo adicional.

Métodos de ajuste automático. El instrumento controlador dispone de un algoritmo de autoajuste de las acciones de control que le permite sintonizar con una amplia gama de procesos industriales. Existen varias formas de realizar el autoajuste:

a) La aplicación de una señal de prueba al proceso, y el análisis de su respuesta con la obtención de un modelo matemático y el diseño analítico del controlador, o bien el uso de las formas del método de ganancia límite de Ziegler y Nichols.

En el primer caso, tal como el método de Nishikawa, Sannomiya, Ohta y Tanaka (1984), el operador envía una señal de prueba y el sistema obtiene un modelo que minimiza la señal de error $\int_0^{\infty} e(t) \cdot e^{(\beta t)^2} dt$ donde β está relacionado con la razón de amortiguamiento. Una vez estimadas las características del modelo, lo que precisa un cierto tiempo (tanto mayor cuanto más oscilatoria sea la respuesta), el ordenador calcula los parámetros PID que minimizan el error.

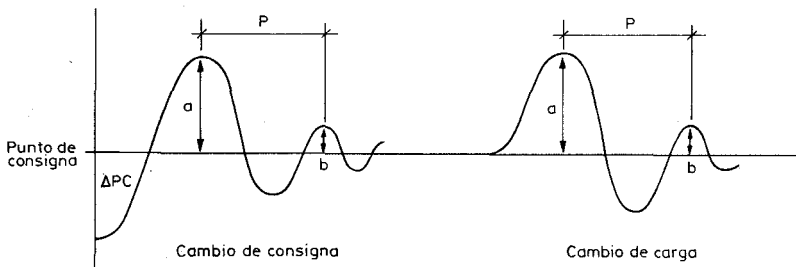


Fig. 9.43 Métodos de Chindambara y de Kraus y Myron.

Los métodos de Chindambara (1970) y de Kraus y Myron (1984) están basados en el método de ganancia límite. Analizan la señal de error obtenida ante cambios en el punto de consigna o en la carga del proceso (véase la figura 9.43) y son fácilmente programables en el ordenador del proceso.

En el método de Chindambara se dan valores aproximados a las acciones del controlador y se aplican las fórmulas siguientes para obtener de forma iterativa los nuevos valores PID.

$$\text{Controlador } P \rightarrow BP_{n+1} = \frac{BP_n}{(0,5 + 2,27 \times R)}$$

Controlador $P + I$

$$\text{Igual } BP_{n+1} \quad TI = \frac{P}{1,2\sqrt{1+R^2}} \text{ min/rep}$$

Controlador $P + I + D$

$$\text{Igual } BP_{n+1} \quad TI = \frac{P}{2\sqrt{1+R^2}} \text{ min/rep}, \quad TD = \frac{P}{8\sqrt{1+R^2}} \text{ min}$$

siendo

$$R = \frac{1}{2 \times 3,14} \ln \frac{a}{b} \text{ un valor relacionado con la relación de amortiguación}$$

(si $R = 22$ se tiene una relación de amortiguación de 0,25).

a y b son las áreas de las ondas cortadas por la recta de consigna (o de modo simplificado las longitudes de las crestas)

P = período de la oscilación amortiguada en minutos

En el método de Kraus y Myron se intenta obtener el mínimo tiempo de subida fijando limitaciones en el amortiguamiento b/a y en la primera recuperación $a/\Delta PC$. Las fórmulas de Ziegler y Nichols dan: $TI = P/1,2$ (o $P/2$ en PID) y $TD = P/8$ que aplicados al controlador darán un nuevo amortiguamiento b/a y recuperación $a/\Delta PC$ que no deben sobrepasar los límites anteriores. Si lo hacen, el controlador varía su ganancia para cumplir con esta condición y, por lo tanto, calcula nuevos valores de TI y TD .

Si al aplicar estos métodos el proceso entra en oscilación, la perturbación consiguiente puede invalidar la aplicación, si el proceso no lo permite.

b) El análisis continuo u ocasional (ante una perturbación o una modificación del punto de consigna) del proceso sin aplicar señales de prueba, sin perturbar, pues, el proceso, pero con el inconveniente de no detectar los cambios lentos del mismo. Se trata de controladores adaptativos. En la figura 9.44 pueden verse estos dos tipos de sistemas de ajuste.

El ordenador puede utilizarse (por ejemplo, dentro del control distribuido) para ajustar las acciones de control con técnicas «off-line», que trabajan con modelos dinámicos del proceso, y con técnicas «on-line», que identifican la dinámica del proceso con la planta en operación. El ordenador realiza los cálculos, verifica lo que ha hecho el operador y realiza los ajustes en el controlador.

El ordenador personal también puede utilizarse (con el software adecuado) en el análisis y ajuste del lazo de control. El programa obtiene datos de la variable de proceso a partir de la respuesta en lazo cerrado a un escalón o impulso y guarda los valores de la variable medida y de la señal de salida del controlador en ficheros ASCII, tipo Lotus o Notebook o similares. Analizando estos datos, calcula los valores de las acciones P , PI , PD o PID del controlador.

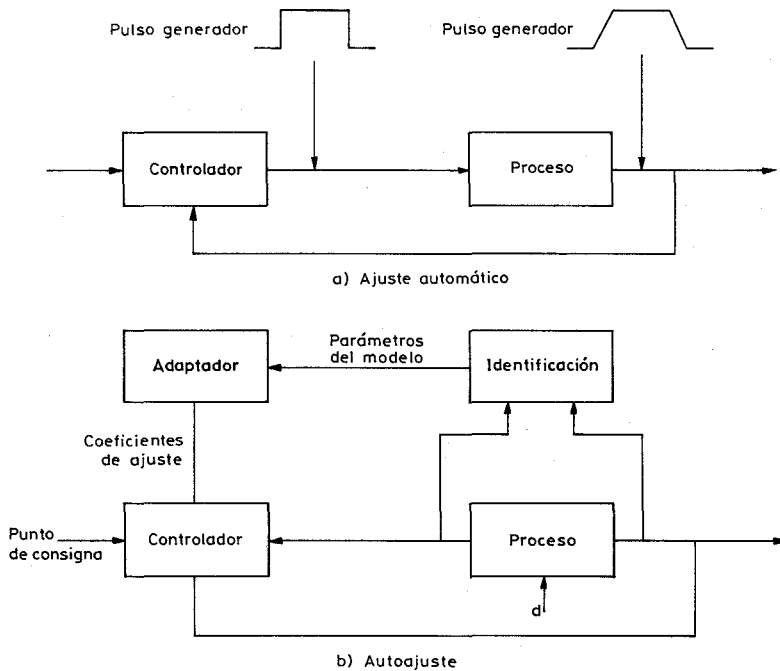


Fig. 9.44 Métodos de ajuste automático.

A señalar que en los controladores analógicos neumáticos o electrónicos, el ajuste de los valores de las acciones se realiza en diales de pequeño diámetro con graduaciones muy separadas, con lo cual la precisión del ajuste no supera $\pm 15\%$ del valor seleccionado. Por contra, los controladores digitales permiten ajustes exactos y repetitivos, lo que es indudablemente una ventaja, si cualquier aparato es sustituido por razones de mantenimiento.

9.8 Otros tipos de control

9.8.1 Generalidades

Se han visto ahora sistemas de regulación basados en la realimentación continua de la señal de error del proceso a través del controlador, consiguiéndose gracias a las características de estabilidad del lazo cerrado de control la reducción gradual del error hasta que éste se anula apreciablemente dentro de los límites de precisión de los instrumentos (o se estabiliza si sólo existe acción proporcional y hay offset).

Una gran ventaja del sistema de realimentación es que no es necesario un conocimiento completo de las características del proceso, ya que el control se inicia al presentarse una señal de error y el controlador realiza la corrección de forma externa al proceso.

Sin embargo, una gran desventaja que presenta el control de realimentación es precisamente la necesidad de que exista una señal de error para que el controlador actúe iniciando la corrección, es decir, que cuanto más retardo posea un proceso tanto más difícil será controlarlo con el sistema clásico de realimentación, ya que con tanto mayor retardo actuará el instrumento y en el intervalo de tiempo “muerto” las características del proceso pueden haber variado.

De aquí que se ha generalizado la aplicación de otras técnicas de control que son variantes o completan las P, PI o PID estudiadas o bien constituyen otro enfoque completamente distinto del clásico.

Estudiaremos seguidamente estos sistemas.

9.8.2 Control en cascada

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.

El lector puede ver claramente la conveniencia del control en cascada examinando el ejemplo de la figura 9.45 de control de temperatura de un horno. Cuando la temperatura medida se desvía del punto de consigna, el controlador varía la posición de la válvula de fuel, y si todas las características del combustible (presión, viscosidad...) y del producto permanecen constantes, el control será generalmente bueno. Sin embargo, si una de las características, por ejemplo la presión, cambia de forma incontrolada, el caudal a través de la válvula seguirá la misma variación aunque su vástago permanezca fijo. Cambiará, pues, la temperatura y, al cabo de un cierto tiempo —dependiente de las características de capacidad, resistencia y tiempo de transporte del proceso— las variaciones de temperatura llegarán al controlador y éste reajustará la posición de la válvula de acuerdo con las acciones de que disponga. Será una casualidad que las correcciones del controlador eliminen totalmente las per-

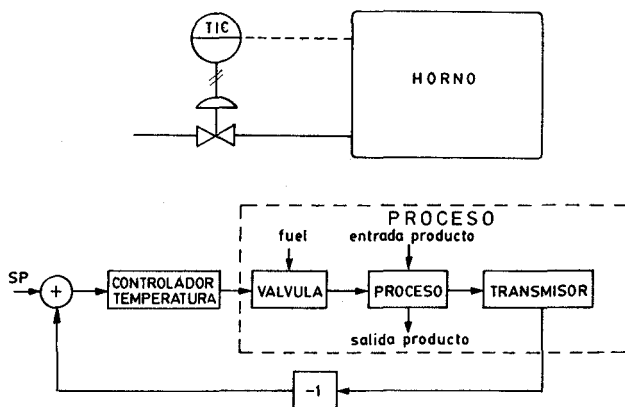


Fig. 9.45 Control de temperatura de un calefactor.

turbaciones en la presión del fuel, ya que esas perturbaciones son totalmente al azar y hay un retardo entre las mismas y el envío de la señal de corrección del controlador a la válvula. Por lo tanto, las continuas perturbaciones en la presión, no sólo darán lugar a una corrección continua e innecesaria en la válvula, sino que perjudicarán el logro de una buena regulación pudiendo incluso impedir totalmente el control del proceso.

Nótese que el control de temperatura se realiza mediante la aportación del calor cedido por el fuel que pasa a través de la válvula, es decir, la temperatura es regulada más bien por el caudal de fuel (si la calidad del fuel es constante) que por la posición del vástago de la válvula. Nótese que el caudal no está controlado, y que es de interés secundario (variable secundaria), pero es evidente que sus fluctuaciones afectan a la variable temperatura, la que necesariamente es de interés principal (variable primaria) en el control del proceso.

Desde el punto de vista de rapidez en el control del proceso sería muy conveniente el ajuste rápido de posición de la válvula tan pronto como se presenta una perturbación en la presión del fuel, mientras que las variaciones de temperatura más lentas que pueden producirse por otras causas deben ser corregidas para mantener la temperatura en el punto de consigna.

Si la señal de salida del controlador de temperatura (primario) actúa como punto de consigna de un instrumento que controle el caudal y cuya señal de salida ajuste la posición de la válvula, este segundo controlador (secundario) permitirá corregir rápidamente las variaciones de caudal provocadas por perturbaciones en la presión de fuel, manteniendo el sistema en todo momento la capacidad para

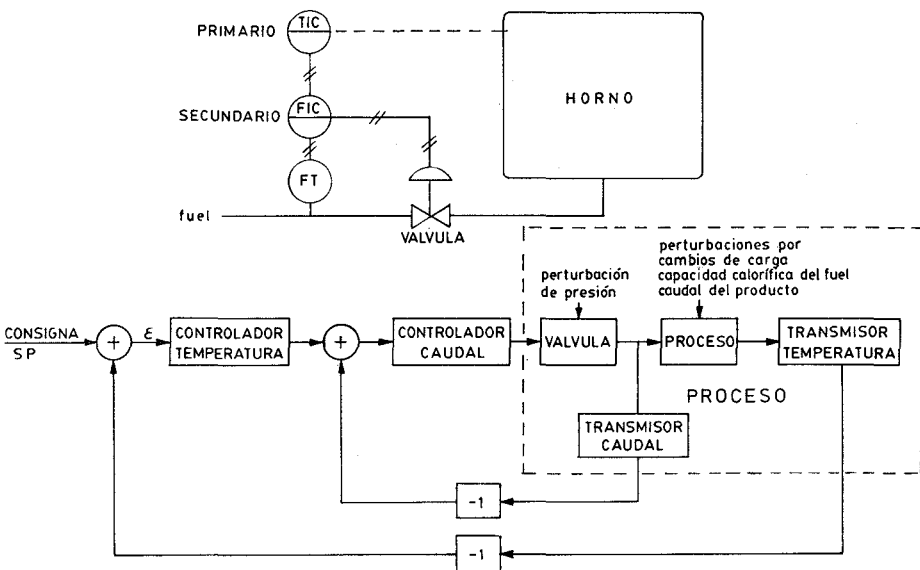


Fig. 9.46 Control en cascada.

controlar la temperatura con el instrumento primario. Estos dos instrumentos conectados en serie actúan manteniendo la temperatura constante, el controlador de temperatura manda y el de caudal obedece. Esta disposición se denomina control en cascada, y puede verse en la figura 9.46 conjuntamente con su diagrama de bloques.

Para que el control en cascada sea eficaz es necesario escoger adecuadamente la variable secundaria teniendo en cuenta las perturbaciones que pueden presentarse y las velocidades de respuesta de los distintos componentes del proceso. Para seleccionarla pueden seguirse los siguientes pasos:

1. Dibujar el diagrama de bloques del posible sistema en cascada.
2. El lazo secundario debe incluir la perturbación posible más importante.
3. El lazo secundario debe ser de respuesta rápida y para ello debe incluir los retardos mínimos del sistema de control. Como guía, la relación-constante de tiempo del lazo principal/constante de tiempo del lazo secundario = T_p/T_s , debe ser como mínimo de 3, e idealmente de 5 a 10.

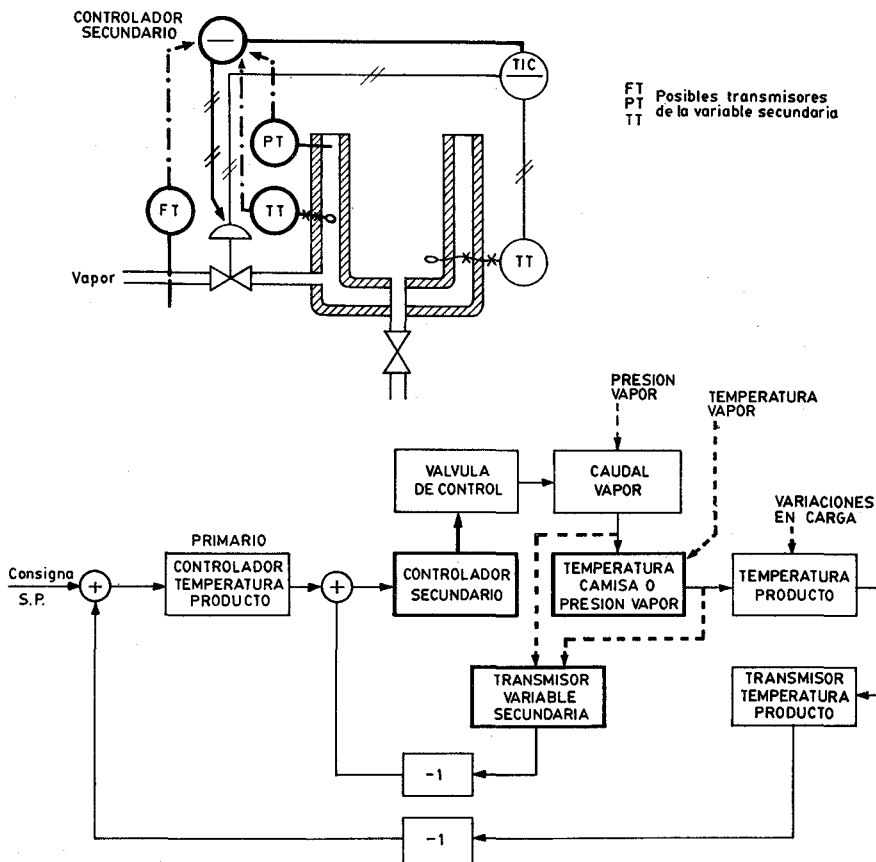


Fig. 9.47 Control de temperatura de un líquido en un tanque encamisado.

4. Los puntos de consigna de la variable secundaria deben estar relacionados directamente con los de la variable primaria y, a ser posible, su relación debe estar representada por una recta en preferencia a una línea curva. De este modo se simplificará el ajuste del controlador primario.
5. El lazo secundario debe contener el mayor número posible de perturbaciones mientras sea suficientemente rápido.
6. La variable secundaria seleccionada debe proporcionar una estabilidad al control secundario con la ganancia más alta que sea posible (BP más baja).

Estos pasos a seguir estarán naturalmente basados en el conocimiento del proceso a controlar y conviene que se apliquen con sentido común. Como ejemplo de los mismos puede verse en la figura 9.47 la aplicación del control en cascada al control de temperatura de un líquido en un tanque encamisado.

De esta figura se deriva la tabla siguiente para seleccionar la variable secundaria:

<i>Pasos</i>	<i>Posibles variables secundarias</i>		
	<i>Presión camisa A</i>	<i>Caudal vapor B</i>	<i>Temperatura camisa C</i>
2. Perturbación más importante entra en el lazo secundario	Sí	Sí	Sí
3. $T_p/T_s > 3$	Sí	Sí	Sí
4. Variables primaria y secundaria relacionadas entre sí	Posiblemente	Sí	Sí
5. Perturbaciones adicionales	No	No	Sí
6. BP del controlador secundario es relativamente pequeña	Sí	No	Sí

Es lógico seleccionar como variable secundaria la temperatura de la camisa.

En la figura 9.48 pueden verse varios ejemplos de control en cascada.

9.8.3 Programadores

Numerosos procesos industriales que siguen una relación determinada de una variable con el tiempo, requieren un control automático para seguir y reproducir un programa fijo (fig. 9.49).

Estos instrumentos se denominan programadores controladores y realizan tres funciones básicas.

1. Control automático de la variable.
2. Temporización (relés y contactos auxiliares y temporizadores para funciones adicionales).
3. Variación del punto de consigna del controlador (función de programación).

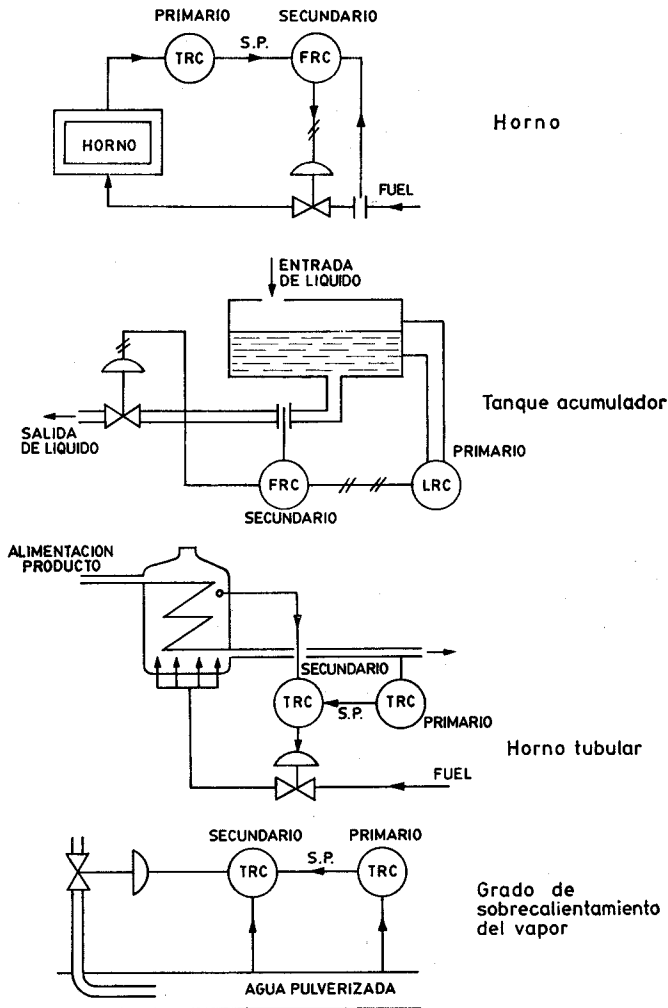


Fig. 9.48 Ejemplos de control en cascada.

El programador se compone del generador del punto de consigna, que es el componente básico del sistema que determina la temporización y fija la marcha de la variable a lo largo del tiempo, y del controlador neumático, electrónico o digital con regulación todo/nada, proporcional, PI o PID, dotado de indicación o registro de la variable.

Existen tres métodos básicos para posicionar automáticamente el índice del punto de consigna de la variable de medida:

1. El índice está fijado mecánicamente a una leva movida por un motor síncrono (programador de levass).

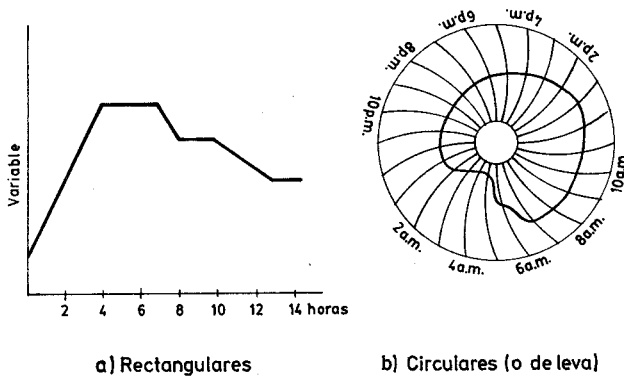


Fig. 9.49 Programadores.

2. El índice está acoplado directamente a uno o a varios motores síncronos (programador rectangular) con varios interruptores que limitan, arrancan o terminan el programa.
3. El índice forma parte de un controlador digital dedicado a ejecutar el control programado en tiempo de la variable de proceso.

En el programador de levas, el punto de consigna viene reposicionado automáticamente por una leva cortada de acuerdo con un programa de tiempo predeterminado. Detrás de la leva — que suele ser de plástico transparente de modo que puede verse el gráfico a su través — una pluma conectada al sistema de medida del instrumento registra la variable medida.

Los valores del proceso se marcan en la leva y siempre que se emplee la misma leva se obtendrá y se seguirá automáticamente el mismo programa.

Por otro lado estos programadores no son demasiado flexibles. El contorno de la leva determina el programa y la más ligera desviación que requiere el proceso precisa o bien de una nueva leva o bien del recortamiento de la actual.

Una limitación mecánica importante que presentan los programadores de levas es el valor máximo de la pendiente de aumento de la variable programada. Como orientación puede señalarse que el movimiento en toda la escala del punto de consigna no permite menos de 50° de giro de la leva.

Si no se respeta este valor, el rodillo de la leva puede doblarse (fig. 9.50). Como es lógico, esta limitación no existe cuando la variable baja de valor. En la figura 9.51 puede verse un método para cortar la leva en un plástico transparente.

PROGRAMADORES RECTANGULARES

Estos instrumentos (fig. 9.52) son de gráfico rectangular, equipados con motores síncronos que mueven el índice hacia arriba o hacia abajo y con varios interruptores que arrancan, controlan o terminan diferentes partes del programa. Existen temporizadores separados que controlan la duración de los tiempos de mantenimiento o cambio de la variable y controladores de velocidad que permiten ajustar las velocidades de subida o de bajada de la variable.

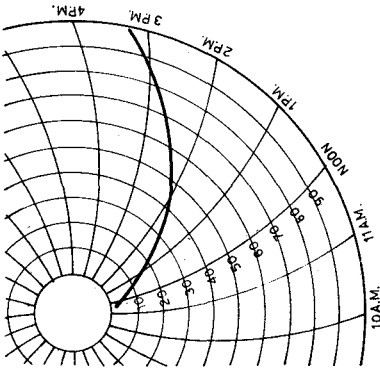


Fig. 9.50 Pendiente máxima de la variable.

Comparado con el programador de levas, éste es más versátil ya que permite cambiar fácilmente la duración de los períodos de mantenimiento (curvas *BC-DE*) ajustando sólo los temporizadores y variar la pendiente de la variable (curvas *CD-EFG*) ajustando el punto de consigna de los controladores de velocidad.

En aplicaciones en que se requieran aumentos o disminuciones de la variable no lineales, pueden montarse controladores de velocidad adicionales que interrumpen periódicamente el circuito del motor a intervalos frecuentes de modo que el índice se mueva discontinuamente; las paradas del motor son tan pequeñas que prácticamente se obtiene una línea continua.

Un caso típico se presenta en el control de temperatura. Según el tipo de termopar empleado existen distintas desviaciones de la linealidad en todo el intervalo de medida. El seguimiento de estas curvas viene determinado por el número de controladores de velocidad requeridos, limitado por otro lado por el número de interruptores disponibles en el programador. Otra solución consiste en linealizar el margen fabricando especialmente el reóstato del circuito de medida potenciométrico, solución más cara pero a menudo la única satisfactoria.

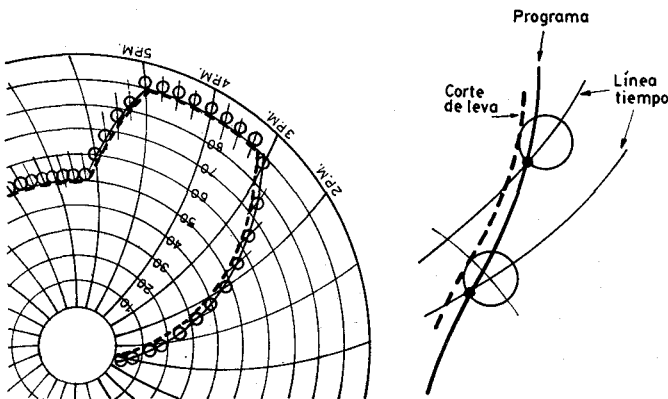


Fig. 9.51 Método exacto de corte de leva.

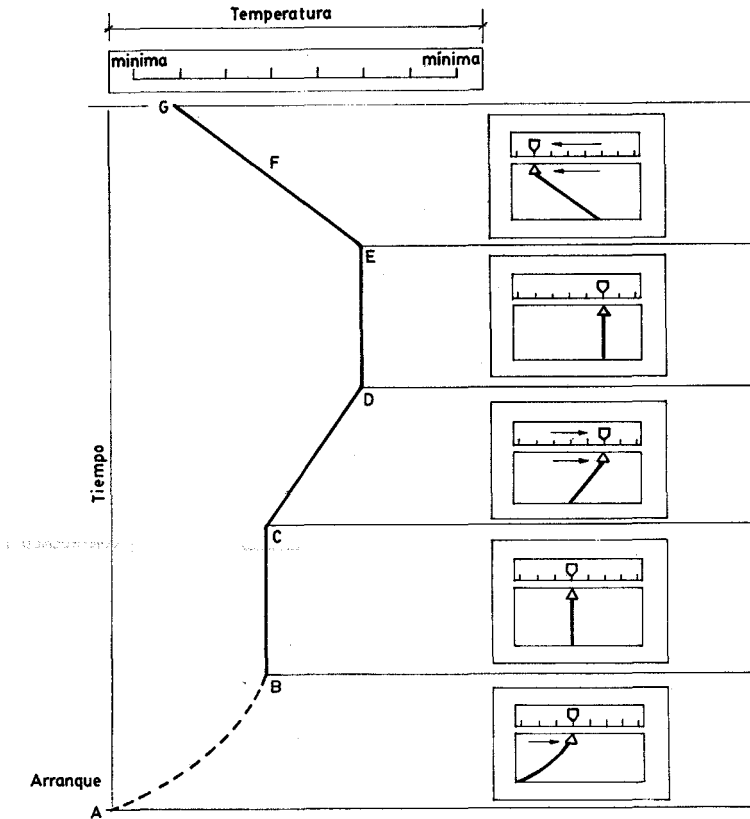


Fig. 9.52 Programadores rectangulares.

Los programadores con microprocesador permiten la programación en rampa de forma fácil y repetitiva, totalmente configurable por teclado.

El ordenador permite guardar un determinado número de programas (por ejemplo 20) que pueden llamarse cuando se desee con una salida por relé o analógica (4-20 mA c.c), pudiendo visualizarse en el monitor el programa seleccionado, y los resultados obtenidos en el proceso. El sistema es, pues, muy versátil e ideal en la programación de temperatura en procesos donde pueden fabricarse diversos productos en condiciones de servicio distintas, tal como en los reactores.

9.8.4 Control de relación

El control de relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es sólo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades.

Estas cantidades suelen ser caudales de fluidos, tal como puede verse en la

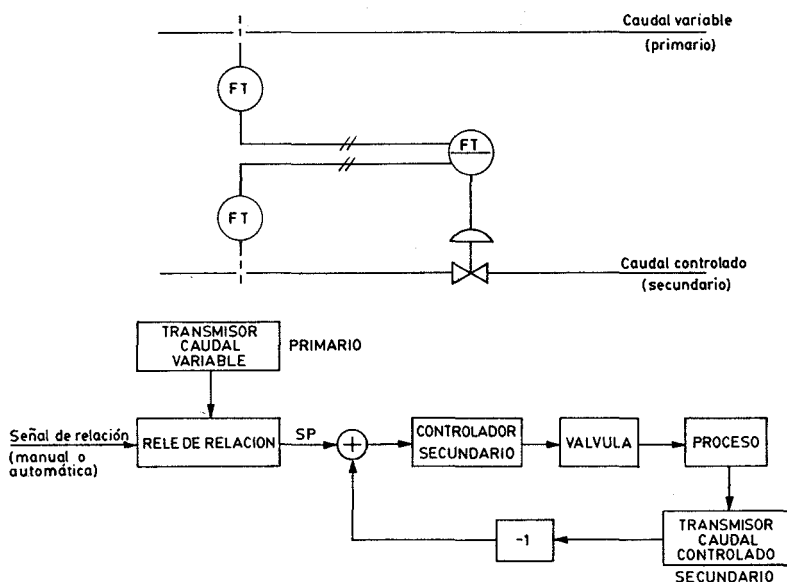


Fig. 9.53 Control de relación.

figura 9.53. La señal del transmisor de caudal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente. La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal de salida actúa directamente sobre la válvula de control.

Hay que señalar que el ajuste del relé de relación es función de los campos de medida relativos de los transmisores. Si en el ejemplo de la figura 9.53, el transmisor del caudal variable (sin controlar) tiene un campo de medida 1,5 veces mayor que el del transmisor del caudal controlado y se desea que el caudal controlado esté siempre en la proporción de 1 : 2 con relación al caudal variable, deberemos ajustar el dial del relé de relación en la posición:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1,5}{1} = 0,75$$

Por otro lado, los campos de medida de los transmisores deben estar expresados en las mismas unidades, y es necesario considerar sus campos de control que influirán inevitablemente en la precisión de la relación entre las dos variables. En efecto, si los transmisores son cuadráticos con la «rangeability» 4 : 1 y hay que mantener una razón de 0,75 el controlador perderá su precisión cuando el caudal variable (primario) baja por debajo de 0,25 % de su campo de medida, lo que equivaldrá a que se pierda también la precisión si el caudal controlado (secundario) es inferior a 33 % de su campo de medida, ya que el instrumento tiende a mantener su punto de consigna en $0,75 = \frac{\text{caudal primario}}{\text{caudal secundario}}$. Evidentemente

25 % señal salida transmisor primario = $\frac{25}{0,75} = 33,3$ % señal salida transmisor secundario = 33,3 % secundario.

Una aplicación típica del controlador de relación se encuentra en la relación caudal aire/caudal fuel en la combustión de una caldera de vapor.

9.8.5 Control anticipativo

El control de realimentación es la técnica más común empleada en el control de procesos. En este tipo de control la señal de salida (variable controlada) es comparada con un valor deseado (punto de consigna) y, la señal de error actúa sobre el controlador.

En sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas, la señal de error es detectada mucho tiempo después que se ha producido el cambio de carga, por lo cual, la corrección correspondiente es retardada y ocurre a veces que actúa cuando ya no es necesaria porque se ha eliminado el cambio de carga que dio lugar a la corrección. Este problema puede resolverse en algunas aplicaciones introduciendo el control en cascada ya estudiado. El control en cascada es realmente un lazo de control secundario dentro de otro primario, con una respuesta suficientemente rápida establecida considerando que la relación entre las constantes de tiempo del lazo primario al secundario sea de tres o mayor. Por lo tanto, aunque el control en cascada sea suficientemente rápido ante perturbaciones de la variable secundaria no deja de tener el inconveniente de necesitar que se produzca una desviación antes de actuar, con el peligro de que sólo responde rápidamente ante la variable secundaria sin que actúe del mismo modo ante variaciones en la variable primaria (por ejemplo el caudal o la temperatura del producto de entrada).

El control anticipativo (feed forward) parte de la medida de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso.

En la figura 9.54 puede verse una comparación entre controles de realimentación, en cascada y anticipativo aplicados a un típico intercambiador de calor.

Nótese que el control anticipativo requiere un conocimiento exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso, en particular la relación entre el caudal del producto y la temperatura de salida, la influencia que tienen las perturbaciones en la presión del vapor, en la temperatura del producto de entrada, en el rendimiento del intercambiador, etc. Es decir, la relación entre la temperatura de salida y el caudal de entrada constituye un modelo del proceso y es la función de transferencia del sistema de control anticipativo. Evidentemente, el controlador es quien debe responder con esta función, pero como es lógico, su eficacia depende de la precisión que se consiga en la medida de la variable o variables de entrada y de la precisión alcanzada en el modelo calculado del proceso. Por otra parte, hay que señalar que es costoso y a veces imposible determinar y duplicar el modelo exacto del proceso. Por lo tanto, siendo realmente un control en lazo abierto, su aplicación aislada dará lugar a un offset significativo, es decir, la temperatura de salida se apartará significativamente de la deseada.

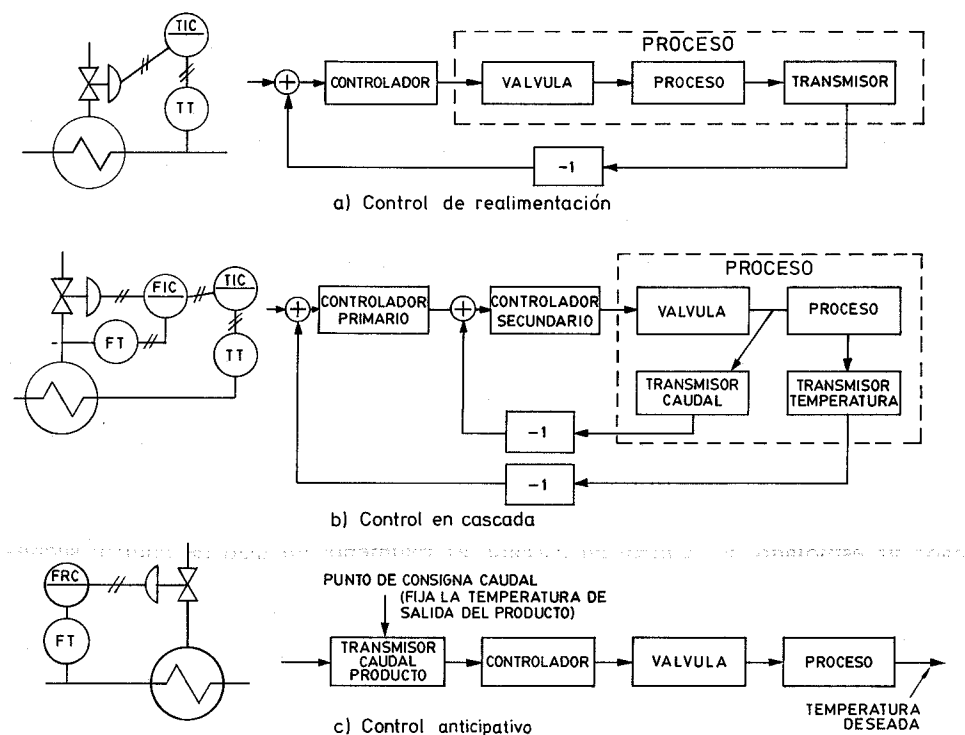


Fig. 9.54 Comparación entre controles de realimentación, en cascada y anticipativo.

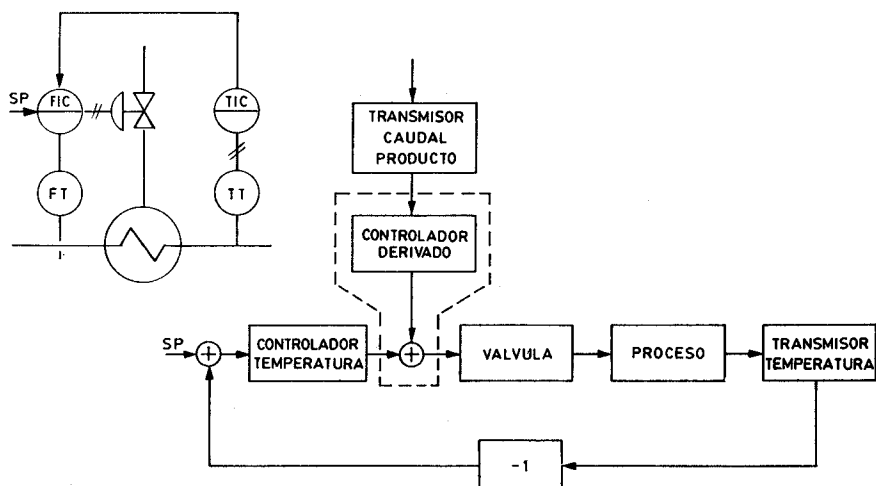


Fig. 9.55 Control de realimentación y anticipativo combinados en un intercambiador de temperatura.

En resumen, puede afirmarse que el control de realimentación puede controlar bien en régimen permanente, pero no lo hace satisfactoriamente en condiciones dinámicas de funcionamiento del proceso. En cambio, el control anticipativo es capaz de seguir rápidamente los cambios dinámicos, pero puede presentar un offset considerable en la variable de salida. Afortunadamente, las dos técnicas pueden combinarse para obtener un control dinámico sin offset, tal como puede verse en la figura 9.55.

En esta figura el controlador anticipativo es de acción derivada; de este modo si el caudal es fijo la señal procedente del controlador de temperatura pasa sin cambios hacia la válvula. En cambio, si se presentan variaciones en el caudal, la señal derivada correspondiente se suma o se resta, según el sentido de la variación, a la de temperatura. De este modo, los cambios de carga en el caudal del producto son detectados y corregidos inmediatamente y compensan los cambios anticipados que, por esta causa, pudieran producirse en la temperatura. Esta disposición recibe el nombre de «control anticipativo estático».

El control combinado anterior es relativamente sencillo, no tiene en cuenta las perturbaciones posibles en el vapor ni las variaciones en la temperatura del producto de entrada, ni la velocidad del producto a través del intercambiador. En la figura 9.56 se representa otro tipo de control anticipativo más perfecto, que recibe el nombre de «control anticipativo dinámico» (el bucle de control se ajusta más a las características dinámicas del proceso) combinado con el clásico control de realimentación.

En esta figura pueden verse varios instrumentos particulares:

X — Multiplicador con bias — La señal de salida es $0 = K_1 Q_{pt2} \pm K_2$, con K_1 como ganancia que ajusta la respuesta del sistema y K_2 como bias que ajusta indirectamente la temperatura deseada del producto.

— **Relé adelanto/retardo** para acoplar las características dinámicas del bucle de control a las características dinámicas del proceso. Esta compensación se requiere sólo en los intercambiadores de calor de gran capacidad donde es beneficioso adelantar la señal de caudal de producto porque existe retardo en la aportación calorífica al producto una vez ha aumentado el caudal de vapor. En los demás intercambiadores el producto pasa muy rápido a través del intercambiador, por lo que el caudal de vapor debe variar al mismo tiempo que cambia el caudal o la temperatura del producto y el relé es innecesario.

Si la instalación fuera un secadero de sólidos, el producto circularía lentamente y el relé de compensación debería retrasar la señal del caudal del producto.

El control anticipativo es útil en los siguientes procesos:

- a) Procesos con tiempos muertos y retardos considerables, difíciles o casi imposibles de controlar con el clásico control de realimentación (caso más frecuente de aplicación del control en adelanto).
- b) Procesos en los que la variable a controlar no puede medirse con precisión o de modo continuo.
- c) Procesos en los que la variable a controlar no es fija y viene determinada por otra variable o variables que deben ser máximas o mínimas.

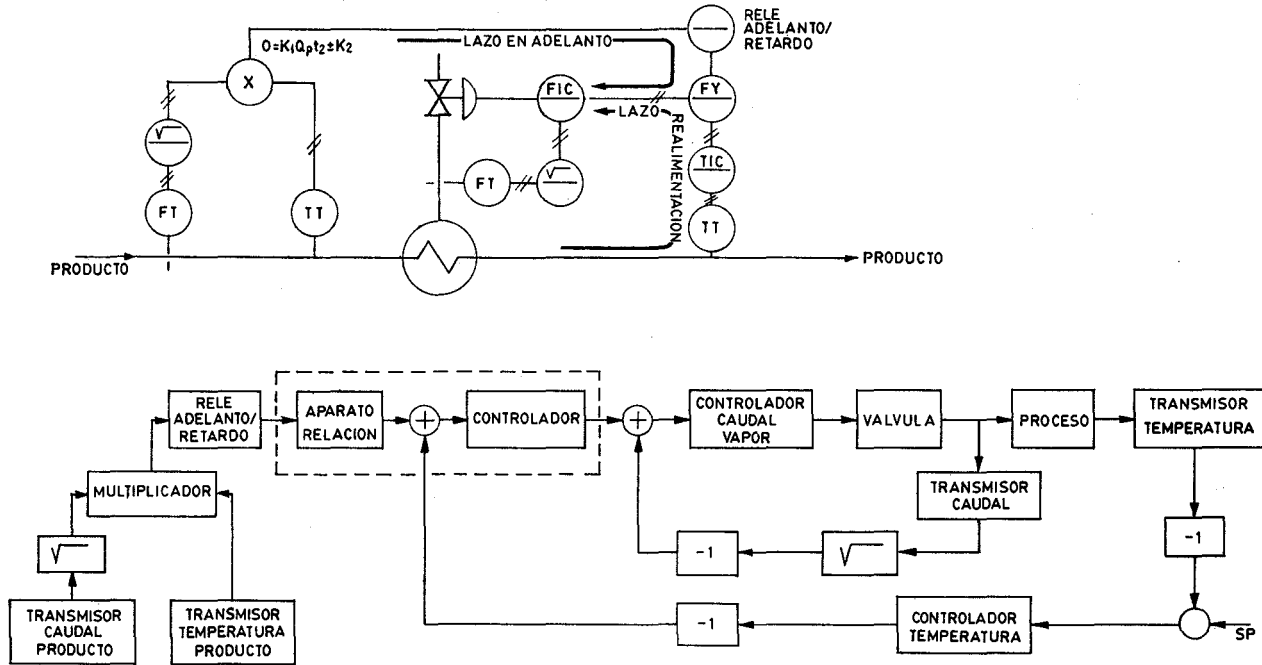


Fig. 9.56 Control de realimentación y anticipativo combinados en un intercambiador de calor.

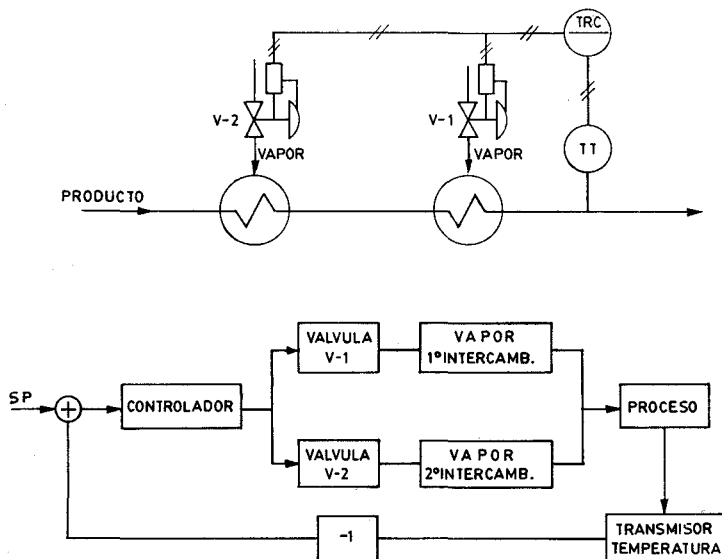


Fig. 9.57 Control de gama partida en dos intercambiadores de calor en serie.

9.8.6 Control de gama partida

El control de gama partida (*split-range control*) es una forma de control en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. En la figura 9.57 puede verse este tipo de control aplicado a dos intercambiadores de calor en serie. La instalación se utiliza para calentar un producto cuyo caudal es muy variable; cuando es bajo basta un solo intercambiador para calentarlos y cuando la fabricación es la máxima son necesarios los dos.

Suponemos que, desde el punto de vista de seguridad, las válvulas deben cerrar en caso de fallo de aire, por lo cual el controlador de temperatura debe ser de acción inversa (al aumentar la temperatura baja la señal de salida). Si el caudal de producto es bajo, actuará la válvula de vapor V-1 porque la señal de salida estará comprendida entre 50-100 % (9-15 psi). A medida que aumenta el caudal, el controlador de temperatura baja la señal gradualmente hasta que, cuando la señal baja de 50 % (9 psi), la válvula V-1 permanece totalmente abierta con el primer intercambiador trabajando al máximo, y la válvula de control V-2 empieza a abrir iniciando el funcionamiento del segundo intercambiador. A un caudal máximo determinado, las dos válvulas de control están abiertas y los dos intercambiadores trabajan al máximo.

La partición de la señal se logra usualmente mediante posicionadores acoplados a las válvulas de control que convierten el campo de señal de entrada (0-50 % o 50-100 %) en todo el campo de variación estándar 3-15 psi.

9.8.7 Control selectivo

Este tipo de control selectivo (*override control*) se emplea para limitar la variable de proceso en un valor alto o bajo con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto. Entre las aplicaciones típicas se encuentra el bombeo en oleoductos (figura 9.58).

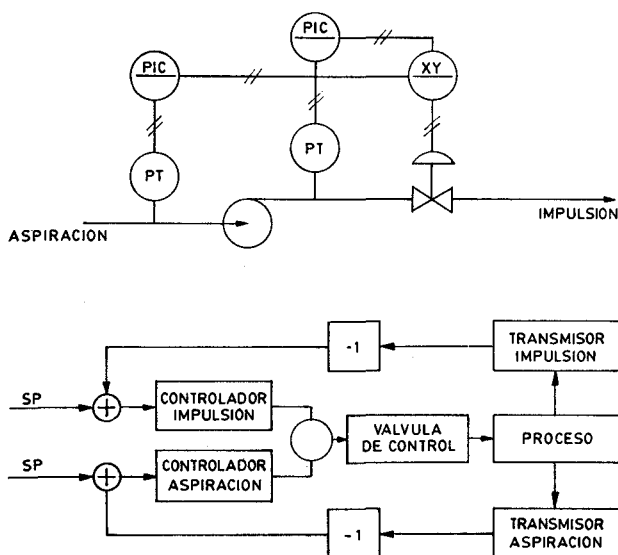


Fig. 9.58 Control selectivo.

En esta aplicación hay dos controladores de presión, uno en la aspiración y otro en la impulsión cuya señal de salida es seleccionada por un relé selector en comunicación con la válvula de control. El control se efectúa en condiciones de funcionamiento normales con el controlador de impulsión y cuando por cualquier avería baja la presión de aspiración de la bomba por debajo del límite de seguridad debe entrar en funcionamiento el controlador de aspiración en lugar del de impulsión. Para conseguirlo, este último instrumento es de acción inversa, el punto de consigna del controlador de aspiración es inferior a los valores normales de trabajo, y el relé selector selecciona la mínima de las dos señales que le llegan. De este modo, el control normal se efectuará con el controlador de impulsión y cuando baje demasiado la presión de aspiración y llegue a ser inferior a su punto de consigna, la señal de salida disminuye y llega a ser inferior a la salida del controlador de impulsión, con lo cual el relé selector la selecciona y la válvula pasa a ser controlada directamente por la presión de aspiración.

Otras aplicaciones residen en la protección de presión de un compresor con regulación del caudal de descarga, la utilización de varios tipos de combustibles en una caldera de vapor, etc.

9.8.8 Control de procesos discontinuos

En la industria química, en particular en la fabricación de polímeros, resinas, fibras y elastómeros se utilizan procesos discontinuos. En un reactor se introducen los productos a transformar y se someten a un programa de temperaturas determinado para cada producto resultante, repitiéndose ciclo tras ciclo la fabricación. Es esencial la uniformidad en la calidad del producto obtenido a través de los procesos discontinuos que se repiten, así como es conveniente la regulación precisa de las condiciones de la reacción para obtener siempre la misma calidad en el producto y evitar la pérdida total o parcial de una operación. Entre estas condiciones de reacción se encuentra la temperatura. Si el proceso no admite «offset», que suele ser el caso usual, es necesario que el controlador tenga como mínimo acción PI. Como entre el final de una operación (descarga del reactor) y el principio de la siguiente (carga de los productos y cierre del reactor) pasa un cierto tiempo, el error que se produce entre el punto de consigna y la temperatura (que baja hasta casi la temperatura ambiente) da lugar a que se acumule la acción integral quedando la válvula de control totalmente abierta. El resultado es como si la banda proporcional se desplazara con su límite inferior coincidiendo con el punto de consigna (si la variable estuviera por un tiempo por encima del punto de consigna ocurriría a la inversa y el límite superior de la banda proporcional bajaría hasta el punto de consigna). En la figura 9.59 puede verse la traslación de la banda proporcional.

Este corrimiento de la banda proporcional da lugar a elevadas oscilaciones de la temperatura al inicio de la operación ya que la válvula de control empieza a cerrar sólo cuando la variable cruza el punto de consigna porque entonces y sólo entonces el error entre la variable y el punto de consigna cambia de signo y la acción integral inicia la corrección.

Hay que señalar que la acumulación de la acción integral descrita puede tam-

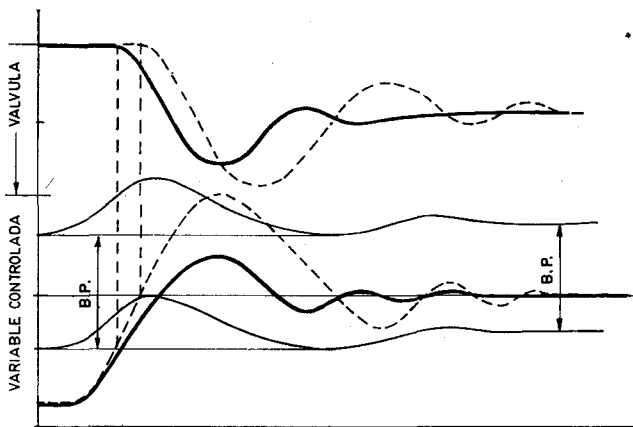


Fig. 9.59 Desplazamiento de la banda proporcional por la acción integral.

bién presentarse cuando falla temporalmente la señal de entrada o bien se presenta una perturbación considerable de larga duración.

Para prevenir este rebasamiento perjudicial, es necesario desplazar la banda proporcional hacia abajo con su límite superior coincidiendo con el punto de consigna cuando el proceso está parado.

De este modo, al arrancar la siguiente operación, la válvula de control empezará a cerrar cuando la temperatura entre dentro de la banda proporcional y la acción integral irá gradualmente elevando la banda proporcional hasta que queda fija con relación al punto de consigna y permanece así mientras estén alineados la variable y el punto de consigna y la señal de error sea nula.

En un instrumento neumático, el desplazamiento de la banda proporcional se consigue bloqueando la señal neumática hacia el fuelle integral antes de la restricción integral y eliminando la presión acumulada hacia la atmósfera. Esta acción tiene lugar cuando la señal a la válvula de control supera los 15 psi (1 bar). En la figura 9.60 puede verse un esquema de un controlador neumático para un proceso discontinuo con varias disposiciones de los elementos de anulación de la acción integral.

En la figura 9.60 *a* se elimina totalmente la presión en el fuelle integral, mientras que en las figuras 9.60 *b* y *c* puede alimentarse el fuelle a una presión predeterminada.

En un instrumento electrónico puede utilizarse un limitador de acción integral cuyo esquema simplificado puede verse en la figura 9.60 *d* y cuyo funcionamiento es el siguiente:

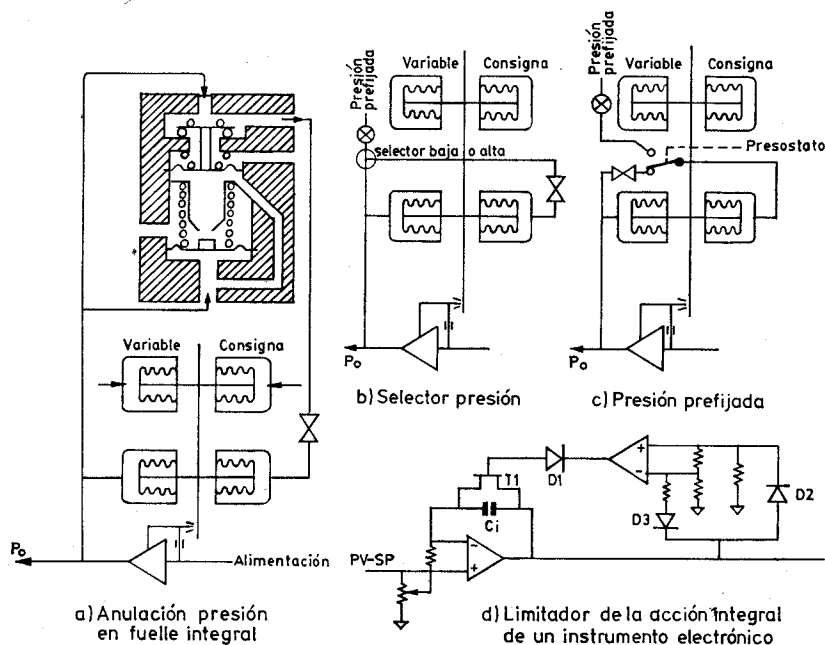


Fig. 9.60 Anulación de la acción integral en el arranque del proceso.

En la salida se conecta un amplificador operacional, que, en caso de que la señal de salida sobrepase un determinado valor (que será debido a la acumulación de la acción integral) conectará el transistor T_1 , que descargará y anulará el condensador de acción integral C_1 . La entrada inversora del amplificador operacional está conectada a un bias $R_1 R_2$ para dar una señal de salida negativa que, a través del diodo D_1 mantiene desconectado el transistor T_1 permitiendo la acción integral normal. Ahora bien, si la señal de salida sobrepasa un determinado valor positivo o negativo, uno de los diodos (D_2 si la señal es positiva o D_1 si es negativa) conduce y alimenta una de las entradas del amplificador de limitación, con lo cual el transistor T_1 es excitado a través del diodo D_1 y la acción integral no se produce.

9.8.9 Controladores no lineales

Existen procesos continuos que presentan cambios dinámicos considerables dependiendo del punto de operación, es decir, que sus ganancias y constantes de tiempo son variables según cuál sea el valor de alguna o algunas variables de la planta. Son procesos altamente no lineales que hacen difícil conseguir una buena sintonización del controlador.

En un proceso que es altamente no lineal, tal como el de pH (fig. 9.61), con el punto de consigna en A, la ganancia necesaria para la estabilidad en el controlador (relación incrementos de la señal de salida a la válvula de control/variable del proceso) es baja (por ejemplo 0,05). Si por cualquier cambio de carga la variable pasa al punto B o al C, la baja ganancia del controlador hará que el pH del proceso permanezca en B o en C, y que se añada al sistema el reactivo suficiente para que el pH vaya pasando alternativamente de B a C, dibujándose en el registrador una zona rayada entre B y C.

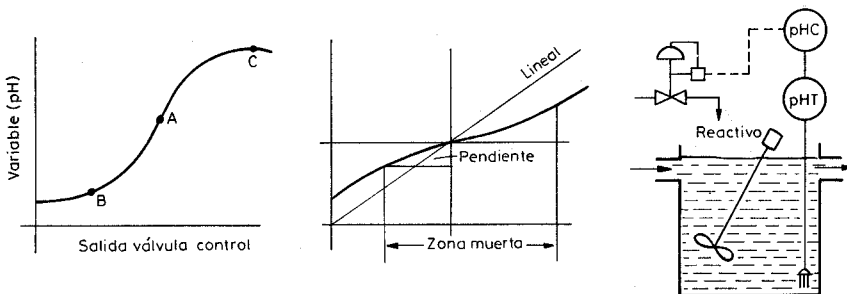


Fig. 9.61 Controladores no lineales.

Para controlar correctamente el proceso, será necesario que el controlador disponga de autoajuste de las acciones para que pueda cambiar su ganancia de acuerdo con la zona donde esté el pH, lo que representará un trabajo continuo de las rutinas de identificación del proceso y de adaptación de los coeficientes del controlador.

La solución es el llamado *control planificado*, en el que conocida la no linealidad del proceso, es decir, las variables correlacionadas con la dinámica del mismo, se adaptan los parámetros del controlador en función del punto de operación.

En el control por ganancia inversa la variable a ajustar es la ganancia. Se utiliza un controlador con características opuestas a las del proceso, en el que puedan seleccionarse la anchura de la zona muerta y la pendiente, de tal modo que la ganancia equivalente es:

$$\text{Ganancia equivalente} = 1/(\text{ganancia dial} \cdot \text{pendiente})$$

o bien en banda proporcional:

$$\text{Ganancia equivalente} = \text{Banda proporcional dial} / \text{Pendiente}$$

Si la pendiente es 1, el controlador pasa a ser lineal.

9.8.10 Instrumentos auxiliares

En el control de procesos es necesario, con frecuencia, transformar o relacionar entre sí las variables medidas para obtener todas las funciones necesarias del sistema de control. Estas relaciones o transformaciones se llevan a cabo en instrumentos llamados «instrumentos auxiliares», instalados generalmente detrás del panel de control o en un panel aparte y disponibles en el mercado tanto en instrumentos neumáticos como en electrónicos. Estas funciones auxiliares son realizadas de forma normal en los controladores digitales, tanto universales como formando parte del control distribuido. Los relés auxiliares tienen una gran importancia en el control industrial por la gran diversidad de funciones que pueden realizar. Figuran a continuación este tipo de instrumentos debiendo señalar que en las operaciones realizadas, las señales neumáticas y electrónicas tienen un «cero vivo» (3 psi en neumática o 4 mA c.c. en electrónica) por lo cual, a pesar de que en esta descripción se expongan fórmulas resumidas, es necesario restarles a las señales el valor 3 psi (o 0,2 bar), o bien 4 mA, y expresarlas como porcentajes del campo de la señal de $15 - 3 = 12$ psi ($1 - 0,2 = 0,8$ bar) en neumática y de $20 - 4 = 16$ mA c.c. en electrónica. Es decir, una señal P neumática apta para el instrumento auxiliar sería $\frac{P-3}{12}$ y una señal electrónica I pasaría a ser $\frac{I-4}{16}$.

Extractor de raíz cuadrada que lleva a cabo la extracción de la raíz cuadrada de la señal recibida y que se emplea generalmente en la linealización de la señal de caudal. La operación efectuada es

$$P_o = \sqrt{P_1} \quad \text{o bien} \quad I_o = \sqrt{I_1}$$

Relés sumadores destinados a realizar operaciones diversas con varias señales de entrada (usualmente dos) y provistos de un factor ajustable K .

La operación general que llevan a cabo es:

$$P_o = P_1 + P_2 - P_3 \pm K$$

$$(I_o = I_1 + I_2 - I_3 \pm K \text{ en electrónica})$$

siendo P_1, P_2, P_3 (o I_1, I_2, I_3) señales de entrada, K un factor ajustable y P_o (o I_o) la señal de salida.

Esta fórmula de operación general puede desglosarse en:

Suma	$P_o = P_1 + P_2$	o	$I_o = I_1 + I_2$
Resta	$P_o = P_1 - P_3$	o	$I_o = I_1 - I_3$

Inversión de signo

$$P_o = -P_3 \quad \text{o} \quad I_o = -I_3$$

Bias o suma de una cantidad constante a la señal

$$P_o = P_1 \pm K \quad \text{o} \quad I_o = I_1 \pm K$$

Promedio

$$P_o = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

deducida de $P_o = P_1 + P_2 - P_o$ o

$$I_o = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Relés de relación que se emplean en el control de relación de dos variables ya estudiado y que llevan a cabo la siguiente operación:

$$P_o = cP_1 \quad \text{o} \quad I_o = cI_1$$

siendo c la constante de la relación y P_o y P_1 (o I_o e I_1) las señales a comparar.

Relés multiplicadores o divisores que derivan de los relés de relación sustituyendo la constante por otra señal. La operación general efectuada es:

$$P_o = \frac{P_1 \cdot P_3}{P_2} \quad \text{o} \quad I_o = \frac{I_1 \cdot I_3}{I_2}$$

Utilizando, pues, esta ecuación general para dos señales puede obtenerse una multiplicación o una división.

$$P_o = P_1 \cdot P_3 \quad \text{o bien} \quad P_o = \frac{P_1}{P_2} \quad \left(\text{o } I_o = \frac{I_1}{I_2} \right)$$

o bien igualando las dos señales $P_1 = P_3$ y haciendo $P_2 = 1$, resulta

$$P_o = P_1^2 \quad (\text{o } I_o = I_1^2)$$

que es el cuadrado de la señal de entrada, o bien haciendo $P_2 = 1$ se obtiene

$$\frac{P_o}{P_1} = P_3 \quad \text{o} \quad \frac{I_o}{I_1} = I_3$$

que representa un relé de relación con razón neumática o enviada desde otro instrumento.

Relé inversor, empleado generalmente en instrumentos electrónicos y que realiza la operación

$$I_o = 24 - I_1$$

siendo I_1 la señal de entrada e I_o la señal invertida. Por ejemplo, si $I_1 = 4$ mA c.c., $I_o = 20$ mA c.c.; si $I_1 = 12$ mA c.c., $I_o = 12$ mA c.c.

Aislador de señal, utilizado en instrumentos electrónicos y que convierte una señal a otra en la relación 1 : 1, pero quedando aislados los circuitos electrónicos de ambas señales de entrada y de salida.

Otros instrumentos auxiliares existentes que pueden emplearse en operaciones muy diversas son los siguientes:

Convertidor mV a intensidad (mV/I), que permite la conversión de la señal procedente de un termopar.

Convertidor resistencia a intensidad (R/I), que permite la conversión de la señal procedente de una sonda de resistencia o bien de la variación de resistencia de un reóstato final de un controlador eléctrico, a señal electrónica.

Convertidor I/P, que pasa de señal electrónica a señal neumática.

Convertidor P/I, que pasa de señal neumática a señal electrónica.

Convertidor mV/P, que realmente engloba dos instrumentos, el mV/I y el I/P y pasa, pues, de señal en milivoltios a señal neumática.

Convertidor R/P, que análogamente al anterior pasa de señal de resistencia a señal neumática gracias a dos aparatos, el R/I y el I/P.

Relés de alarma, ajustados a un valor prefijado de la variable que cierran uno o dos contactos. Pueden ser neumáticos efectuando el disparo entre 3 a 15 psi (0,2 a 1 kg/cm²) y electrónicos, actuando entre 4 y 20 mA c.c.

Integradores, empleados generalmente en la totalización de caudal y que pueden ser tanto neumáticos como electrónicos.

9.9 Seguridad intrínseca

9.9.1 Introducción

Los instrumentos eléctricos instalados en atmósferas que contiene gases o vapores inflamables presentan un riesgo de explosión que obliga a utilizar técnicas especiales de

protección. Estas técnicas incluyen el aislamiento de la atmósfera explosiva mediante encapsulación, la utilización de material antideflagrante (capaz de confinar una explosión en su interior), la presurización (con purga de aire, impidiendo que la atmósfera pueda entrar dentro del instrumento), la inmersión en aceite (encapsulándolos para aislarlos de la atmósfera), la seguridad aumentada (adopta medidas para impedir la existencia de cualquier tipo de arco o chispa) y la seguridad intrínseca (admite la existencia de descargas y utiliza un circuito incapaz de producir chispas eléctricas que tengan la suficiente energía para la ignición de la mezcla gas-aire).

La seguridad intrínseca es la preferida por el ingeniero de instrumentos ya que presenta las siguientes ventajas con relación al material antideflagrante:

- a) Es preferible evitar una explosión que contenerla.
- b) El material antideflagrante sólo lo es si está bien mantenido.
- c) El material antideflagrante es pesado, macizo y caro de instalar.
- d) El material antideflagrante no puede sacarse de su caja a menos que se ponga fuera de servicio, mientras que el material con seguridad intrínseca, permite la sustitución de elementos estándar y la calibración de los aparatos sin tomar precauciones especiales.

La utilización de material antideflagrante y el uso de las restantes técnicas, constituye usualmente una solución de compromiso que no es siempre completamente satisfactoria.

9.9.2 Nivel de energía de seguridad

La experiencia demuestra que para producir la explosión de una mezcla gaseosa es necesario aportar un nivel crítico de energía, es decir, la explosión sólo se produce si se inyecta suficiente energía a la mezcla como para producir la ignición de un mínimo volumen crítico del material.

El diámetro de una esfera con este volumen, recibe el nombre de distancia de extinción y si la llama incipiente que pueda formarse se mantiene dentro de esta esfera, esta llama naciente no se propaga.

La energía requerida para la ignición depende de la concentración de la mezcla combustible y existe una concentración para la cual es mínima la energía de

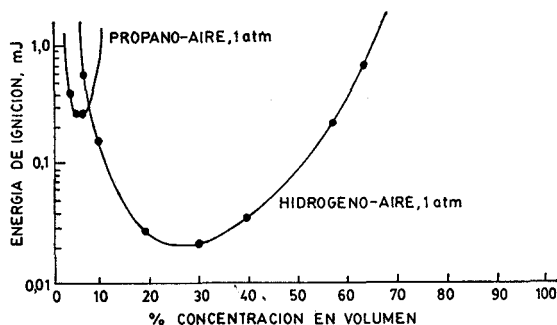


Fig. 9.62 Efecto de la concentración sobre la energía de ignición.

ignición. En la figura 9.62 puede verse la influencia de la concentración de la mezcla sobre la energía crítica de ignición en dos tipos de mezclas: propano-aire e hidrógeno-aire.

9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja tensión

A los niveles de tensión con que trabajan la mayor parte de los instrumentos, la separación entre los electrodos que producen la chispa eléctrica está comprendida dentro de la distancia de extinción. El proceso de la ignición de la mezcla depende de la forma en que se libera la chispa y del tipo de material del electrodo. En cualquier caso, el proceso es complejo y es difícil reproducir exactamente las condiciones de ignición, incluso en el laboratorio.

Pueden existir varias clases de ignición:

a) *Cierre de un contacto en un circuito capacitivo*

Cuando el contacto cierra el circuito, descarga el condensador, siendo probable que la corriente vaporice una partícula del material cuando los contactos se tocan por primera vez. Este vapor proporciona un paso para la formación de un arco que se mantiene entre los contactos al estar éstos muy próximos entre sí.

La ignición se produce, pues, con el valor máximo de la distancia de extinción.

b) *Apertura de un contacto en un circuito inductivo*

Al abrirse el contacto se interrumpe la corriente del circuito inductivo y la energía almacenada en la bobina intenta mantener la circulación de corriente; este fenómeno da lugar a un aumento de tensión entre los contactos separados hasta valores muy altos, del orden de varias veces la tensión de alimentación.

Hay que señalar que en los circuitos de alta inductancia, la tensión entre contactos es muy alta, favoreciendo el mantenimiento del arco incluso a distancias mayores que la de extinción; en este sentido es más perjudicial un contacto de apertura rápida que otro de movimiento lento. En circuitos de baja inductancia la tensión entre contactos es sensiblemente igual a la tensión de alimentación, con lo cual un contacto de movimiento lento permite, por más tiempo, la persistencia del arco y produce la ignición a niveles de corriente más bajos que el contacto de apertura rápida.

c) *Apertura o cierre de un contacto en un circuito resistivo*

El arco se inicia por vaporización del material, sea al tocarse los contactos, sea cuando se separan. La distancia de extinción es grande. El efecto es poco importante comparado con la apertura de un contacto en un circuito inductivo.

En estos tres procesos de ignición que se han descrito, juegan un papel importante la distribución, la forma y el material de los electrodos y además las características del sistema de encendido del arco.

La energía mínima de ignición es esencialmente independiente de la naturaleza de los electrodos. En las figuras 9.63, 9.64 y 9.65 pueden verse las curvas

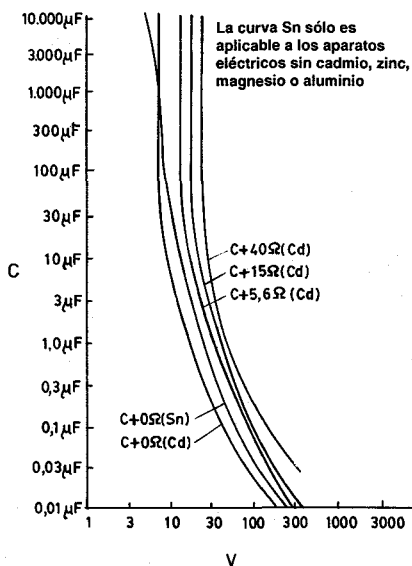


Fig. 9.63 Energía mínima de ignición en un circuito capacitivo (norma EN 50020)

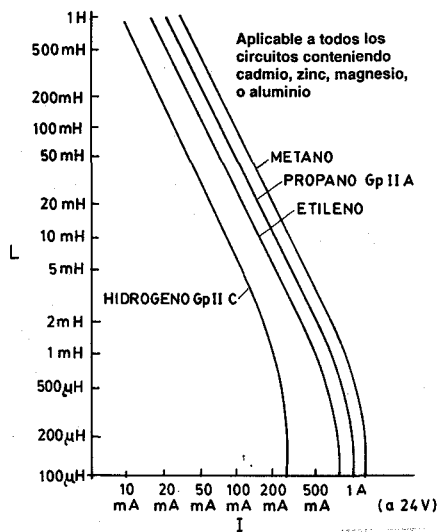


Fig. 9.64 Energía mínima de ignición en un circuito inductivo (norma EN 50020)

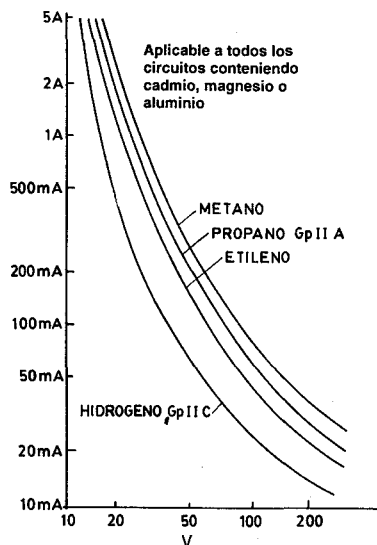


Fig. 9.65 Energía mínima de ignición en un circuito resistivo (norma EN 50020)

tensión-capacidad, intensidad-inductancia y tensión-corriente en circuitos capacitivo, inductivo y resistivo respectivamente, determinadas empleando los instrumentos de ensayo recomendados en la publicación 79-3 de la Comisión Electrotécnica Internacional.

Las curvas presentadas representan valores de corriente o de tensión que pueden provocar la ignición de la mezcla con la probabilidad de una vez en mil veces. Además, estas curvas se determinan en condiciones de laboratorio, utilizando mezclas de más fácil ignición y con contactos eléctricos dispuestos y mantenidos para favorecer la ignición. Incluso la seguridad viene aumentada utilizando factores de los cuales el más común es 1,5. Así pues, la seguridad en el término seguridad intrínseca es inherente a los datos básicos de ignición.

Por otro lado no puede afirmarse que el circuito sea intrínsecamente seguro con la única base de unos ensayos de ignición satisfactorios. Se hace preciso también asegurarse que la construcción y la disposición de los instrumentos sea tal que durante su vida útil, no se presenten problemas de envejecimiento que puedan dar lugar a la pérdida de seguridad. Los organismos correspondientes examinan, pues, físicamente los instrumentos a base de emitir el certificado de seguridad intrínseca.

d) *Ignición con superficie o hilos calientes*

Es obvio que los instrumentos que trabajan en áreas peligrosas no deben tener sus superficies excesivamente calientes. La Comisión Electrotécnica Internacional (I.E.C.) normalizó seis temperaturas superficiales máximas; la más común es de 45° C.

Existe posibilidad de ignición en un pequeño hilo calentado, por una corriente elevada. Sin embargo, exceptuando los hilos muy finos, la corriente requerida para provocar la ignición es mayor que la necesaria en la apertura de circuitos resistivos; además la ignición con hilos de cobre sólo es posible si el hilo funde, o bien si está bobinado; no es posible la ignición en un hilo de cobre recto que no funde. Incluso, cuando el hilo funde, la corriente para la ignición es más alta que la corriente de ignición necesaria en la apertura de un contacto en un circuito resistivo.

9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas

Área peligrosa es aquella en la que pueden estar presentes gases o vapores inflamables en cantidad suficiente para provocar la ignición de la mezcla.

Estas áreas se clasifican en España por el Reglamento Electrotécnico para baja tensión MI BT 026 y, en Estados Unidos, por la N.E.C. (*National Electrical Code*) como:

Clase I. — Gases o vapores o nieblas inflamables presentes en el aire en cantidad suficiente para producir mezclas explosivas o de ignición.

Clase II. — Presencia de polvo combustible.

Clase III. — Fibras o partículas suspendidas, fácilmente inflamables, pero que no es probable que estén en cantidad suficiente para producir mezclas explosivas.

Dentro de la Clase I se subclasifican grupos de gases para definir con más precisión la naturaleza del área peligrosa definida. Los gases patrones correspondientes a instalaciones distintas a la minería (Grupo I) pertenecen al Grupo II y son:

<i>Material</i>	<i>C. E. I.</i>	<i>USA y Canadá</i>
Acetileno	Grupo IIC	Clase 1 Grupo A
Hidrógeno	Grupo IIC	Clase 1 Grupo B
Etileno	Grupo IIB	Clase 1 Grupo C
Propano	Grupo IIA	Clase 1 Grupo D

Esta subclasificación definida en la norma UNE-20-322-86 y en la MIE BT 026 del Reglamento de Baja Tensión establece las siguientes divisiones:

Zona 0. — Área o espacio cerrado en el cual está continuamente presente o se prevé que esté presente durante largos períodos de tiempo o cortos períodos frecuentes, cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido, inflamable o explosiva en concentraciones comprendidas dentro de los límites inferior y superior de inflamabilidad.

Zona 1. — Área en la cual se procesa, maneja o almacena cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido inflamable o explosiva, y que en operaciones normales, presenta la posibilidad de llegar a concentraciones explosivas o de ignición en cantidad suficiente para constituir un peligro.

Zona 2. — Área en la cual, si bien se procesa, maneja o almacena cualquier sustancia, sea gas, vapor o líquido inflamable o explosiva, las condiciones de trabajo están tan bien controladas que la producción o liberación de una mezcla explosiva o de ignición en cantidad suficiente para ser peligrosa, puede sólo presentarse en condiciones anormales.

El tipo de peligrosidad de la atmósfera viene definido por la clase y el grado que están designados por la División. Por ejemplo, se puede hablar de Clase 2d, Zona 1.

Existen dos categorías de seguridad intrínseca:

Equipo de categoría i_a incapaz de provocar inflamación en funcionamiento normal en presencia de cualquier combinación de dos fallos con un coeficiente de seguridad de 1,5 en el primer fallo y de 1 en el segundo.

Equipo de categoría i_b incapaz de provocar inflamación en presencia de un fallo único con un coeficiente de seguridad de 1,5.

El coeficiente de seguridad para un circuito inductivo es:

$$\frac{\text{Corriente máxima (s/Norma EN50020)}}{\text{Corriente real}}$$

Y para un circuito capacitivo es:

Tensión máxima permitida

Tensión real

9.9.5 Normas

Se utilizan las normas de España, Canadá, Alemania, Reino Unido y los Estados Unidos.

Para que cualquier circuito o aparato cumpla estas normas y pueda disponer del correspondiente certificado, es necesario enviarlo a los correspondientes organismos indicados en las normas:

— Norma alemana, Verband Deutscher Elektrotechniker (V.D.E.) 0171, que es la especificación para la fabricación y ensayo de todos los aparatos eléctricos a emplear en atmósferas de gas explosivos en otras industrias que en la minería. El organismo de ensayo y certificación es, en Alemania, el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (P.T.B.).

— Normas americanas ANSI RP 12.6 - 87 - Installation of Intrinsically Safe Systems for Hazardous Classified Locations de I.S.A. (*Instrument Society of America*) del año 1987.

— 497-92, 497B-91, 497M-91 de prácticas recomendadas en áreas clasificadas de la National Fire Prevention Association (N.F.P.A.) en Estados Unidos.

— Norma canadiense C22.1-1990 de la *Canadian Standards Association* (C.S.A.) sobre requerimientos de seguridad en instalaciones eléctricas.

— NFPA 70-93 «National Electrical Code 1993».

— Norma Europea EN 50 020 Marzo 1977 adoptada por CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica).

— Norma Española MIBT 026 Prescripciones para las instalaciones eléctricas de emplazamiento con riesgo de incendio o explosión.

— Norma IEC-79 sobre atmósferas explosivas de la International Electro-technical Commission.

— Norma UNE 20-322-86 Clasificación de emplazamientos con riesgo de explosión debido a la presencia de gases, vapores y nieblas inflamables.

9.9.6 Barreras Zener

En cualquier sistema de seguridad intrínseca es necesario impedir que las corrientes o tensiones de los circuitos situados en la zona peligrosa puedan sobrepasar los niveles de seguridad predeterminados.

En el circuito de alimentación debe impedirse la entrada de tensiones en la red que puedan afectar un circuito situado en el área peligrosa.

En algunos aparatos existe un aislamiento mecánico suficiente entre los cables de potencia y los de señal. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el equipo está alimentado a través de un transformador; una práctica ampliamente aceptada es disponer de una pantalla puesta a masa entre los arrollamientos primario y secundario y que los hilos estén colocados de tal forma que no puedan presentarse cortocircuitos.

A menudo, los equipos situados en las áreas seguras están sometidos a tensiones tan altas que, ante cualquier fallo, pueden comunicarse a los hilos de campo. Éstos se vuelven peligrosos y para evitarlo se instalan elementos limitadores que reducen los valores de tensión y de corriente a niveles seguros tan pronto se presenta un fallo. En la figura 9.66 a puede verse el empleo de una barrera Zener y de resistencias de limitación de corriente R1 y R2 para limitar la energía suministrada al arrollamiento de campo.

La barrera Zener está proyectada para soportar una tensión de cresta de 365 V, de una fuente de impedancia nula situada en el área segura. En el circuito de la figura 9.66 a puede verse que, en caso de defectos en el equipo, la tensión de alimentación de éstos queda aplicada a la entrada de la barrera (bornes 1 y 2). Los diodos entran en conducción, limitando la tensión en la zona peligrosa (bornes 3 y 4) hasta que el fusible se funde. Si D1 pasa a la condición de circuito abierto, la seguridad se mantiene gracias al circuito duplicado de R_z y D2. La máxima corriente que puede fluir hacia el área peligrosa es:

$$I_{m\acute{a}x.} = \frac{V_z}{R_z}$$

Los diodos Zener limitan la tensión que puede aparecer en bornes de la barrera. La puesta a tierra exige una baja resistencia ($< 1 \Omega$), la conexión de la barrera en un punto y un buen mantenimiento. Por consiguiente, la barrera Zener limita la energía capaz de pasar al área peligrosa a un valor seguro y bajo condiciones de fallo severo.

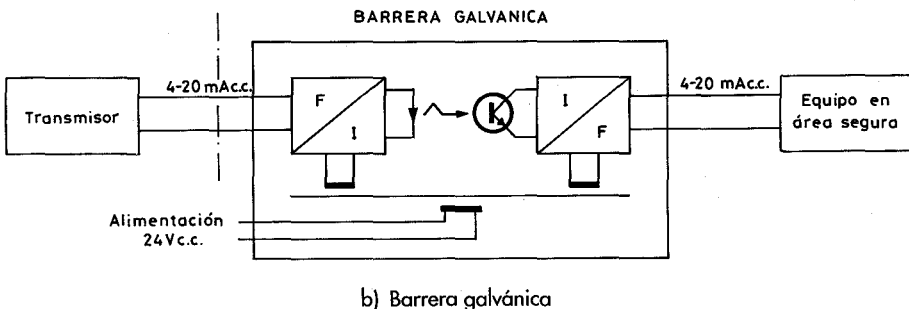
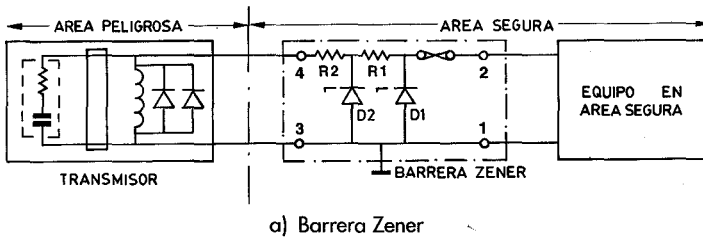


Fig. 9.66 Barreras.

Los cables de conexión entre el instrumento y la barrera Zener no deben tener una longitud excesiva que afecte a la seguridad del lazo. Por ello conviene considerar la inductancia y la capacidad del cable. Por ejemplo, para una barrera Zener de máxima capacitancia $0,17 \mu\text{F}$ y máxima inductancia $4,2 \text{ mH}$, a la que se conecta un cable de capacidad $0,13 \mu\text{F/km}$ e inductancia $2,7 \text{ mH/km}$, la longitud máxima de éste es:

$$\text{Según la capacitancia } \frac{0,17 \mu\text{F}}{0,13 \mu\text{F/km}} = 1,3 \text{ km}$$

$$\text{Según la inductancia } \frac{4,2 \text{ mH}}{2,7 \text{ mH/km}} = 1,55 \text{ km}$$

9.9.7 Barreras galvánicas

Las barreras Zener tienen el inconveniente de producir una caída de tensión y precisar una conexión a tierra cuyo coste puede ser elevado. Las barreras galvánicas, representadas en la figura 9.66 *b* evitan estos inconvenientes. Proporcionan una alimentación flotante con respecto a tierra y suministran la misma señal del transmisor gracias a un optoacoplador.

9.9.8 Factores de seguridad

La probabilidad de que un sistema de seguridad intrínseca dé lugar a una explosión es casi despreciable. Figuran a continuación las probabilidades de que ocurran varios tipos de fallos:

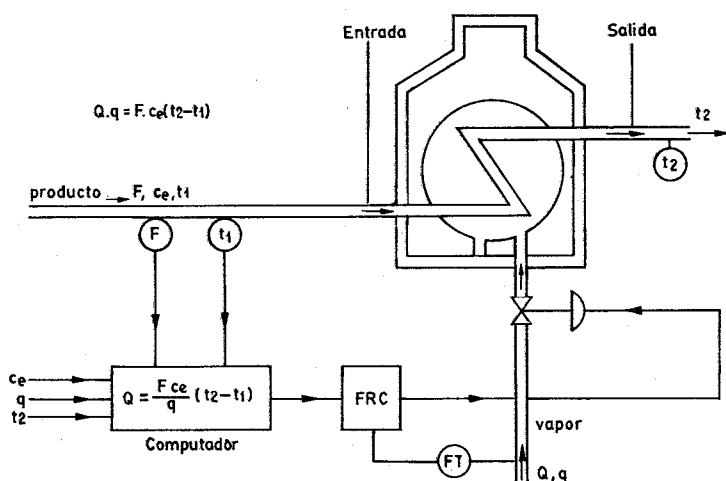


Fig. 9.67 Control de un intercambiador de calor.

- | | |
|---|-----------|
| 1. Ocurre un fallo y permanece intermitente durante 1 hora en 1000 horas | 10^{-3} |
| 2. Fallo de un componente crítico de un total de 100 componentes en el bucle de regulación | 10^{-2} |
| 3. El hilo de campo se rompe o se pone a masa produciendo una chispa durante 1 hora por año | 10^{-4} |
| 4. Área en que ocurre la rotura es próxima a la mezcla concentrada de más fácil ignición. | 10^{-2} |

Con la probabilidad de 10^{-11} de que ocurra una explosión, el equipo se certifica considerando un factor adicional de seguridad de 1,5 con respecto a condiciones que tienen solamente la probabilidad de ignición 10^{-2} bajo condiciones ideales.

9.10 Control por computador

9.10.1 Generalidades

Hoy en día, con el aumento del tamaño del proceso y el crecimiento de su complejidad, llega a ser necesario obtener su óptimo control para conseguir una marcha más perfecta de la planta y lograr los beneficios adicionales que ello comporta. Si bien existen dos tipos de computadores, el analógico y el digital, es más ventajoso emplear el segundo para los procesos industriales debido a las ventajas que presenta al tratar exclusivamente con números puros y ser ideal para la solución de los problemas numéricos. Asimismo la alta velocidad conseguida en las señales de mando a las válvulas permite realizar el control en forma prácticamente continua. Frente al analógico, el digital tiene la desventaja de que al muestrear el proceso pierde parte de la información, pero las ventajas que presenta en la fácil modificación de parámetros y variables y en su versatilidad, hacen que sea ampliamente utilizado.

El computador digital presenta las siguientes ventajas:

- Mayor rendimiento del proceso y por lo tanto una gran producción con menores costes gracias a la utilización eficiente del material y del equipo.
- Mayor calidad en los productos fabricados.
- Mayor seguridad, ya que la acción de corrección y la activación de alarmas es inmediata.
- Proporciona una gran cantidad de información a la Dirección.

La optimización idónea se consigue desarrollando un modelo que refleje exactamente el sistema de balance de energía y de materiales. Esto puede verse en forma sencilla en el intercambiador de calor de la figura 9.67. La ecuación que representa el balance de energía es:

$$Q \cdot q = F \cdot c_e(t_2 - t_1)$$

en la que:

Q = caudal de vapor

q = calor de condensación del vapor a la presión de alimentación

F = caudal de líquido

c_e = calor específico del líquido

t_1 = temperatura del líquido a la entrada

t_2 = temperatura del líquido a la salida

Se supone que no hay pérdidas o que éstas son despreciables.

Esta ecuación es el modelo matemático simple del proceso expresado en forma estática sin tener en cuenta las condiciones dinámicas (en cuyo caso estaría expresada en forma de ecuación diferencial). Como interesa controlar la temperatura de salida, ésta es

$$t_2 = t_1 + \frac{Qq}{Fc_e}$$

En el control clásico por realimentación de t_2 , se actúa únicamente sobre el caudal de vapor Q , mientras que en el control en adelanto simple se considera sólo el caudal del producto F . De aquí la importancia de tener en cuenta las demás variables que intervienen en la ecuación para conseguir el control total del proceso. Por otro lado, la ecuación puede pasarse a

$$Q = F \frac{c_e}{q} (t_2 - t_1)$$

expresión que indica que el problema del control total queda resuelto con un instrumento que resuelva la ecuación anterior midiendo las variables t_1 , t_2 , F e introduciendo o midiendo también los valores de c_e y q . Este instrumento recibe el nombre de computador. En el ejemplo, su eficacia dependerá de la precisión con que el modelo matemático o algoritmo de control se ajuste al modelo real del proceso, por lo que se aconseja añadir al sistema un control de realimentación clásico, que naturalmente puede estar también incluido en el computador.

El ejemplo expuesto es muy simple. Como es lógico, al tender los sistemas a evolucionar hacia una complejidad cada vez mayor, fue inevitable el intentar desarrollar un computador de gran capacidad que realizara la función de controlar todas las variables del proceso en una forma óptima. Este computador programable y para usos generales evolucionó en dos etapas: el control digital directo y el control supervisor.

Estos computadores iniciaron la separación de la instrumentación analógica del mando directo del operador, pasando éste gradualmente a funciones de supervisión e interviniendo sólo en caso necesario al ser avisado por el computador.

La decisión de instalación de un computador conectado al proceso se realizaba hace unos 20-25 años de acuerdo con múltiples factores de los cuales se exponen los siguientes:

- La planta debía tener una producción anual muy grande para que fuera factible obtener un pequeño porcentaje de mejora en su rendimiento que pudiera

justificar la inversión grande que representaba la instalación de control por computadores. Actualmente los costes se han abaratado enormemente y las prestaciones han mejorado espectacularmente de modo que puede afirmarse que, a partir de unos 20-25 lazos, es más barata la adquisición de instrumentos de control digital que la de analógicos (neumáticos o electrónicos).

- Que haya varias líneas del proceso muy importantes.
- Que el proceso cambie sus características internas con el tiempo, tal como en el caso de los coeficientes de transferencia del calor en un horno, en un intercambiador de calor, etc., donde se prevé que la instalación de instrumentos convencionales dará menor rendimiento.
- En procesos en desarrollo puede ser muy útil la instalación de un computador, puesto que permite realizar estudios de manera continua que facilitan su mejor diseño.

9.10.2 Control DDC

En el control digital directo que apareció hacia los años 60, el computador lleva a cabo todos los cálculos que realizaban individualmente los controladores P , $P + I$, $P + I + D$ generando directamente las señales que van a las válvulas. Este tipo de control se denomina «control digital directo» o DDC (*direct digital control*) y realiza las siguientes funciones:

- a) explora las variables de entrada analógicas o digitales;
- b) las compara con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el algoritmo de control correspondiente;
- c) envía las señales de salida a las válvulas de control del proceso;
- d) se disponen instrumentos analógicos en paralelo con el computador en los puntos críticos y actúan como reserva en caso de fallo.

En el control DDC, el computador está enlazado con el proceso en las partes que pueden verse en la figura 9.68.

Las señales procedentes de los transmisores de campo se reúnen en un terminal y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento donde son convertidas a señales digitales, para ser usadas en los cálculos posteriores del control.

Estas señales de entrada pueden tener varios orígenes:

- Señales de tensión procedentes de:
 - Termopares, que se caracterizan por una f.e.m. pequeña que les hace sensibles al ruido eléctrico, no mantienen una linealidad entre la f.e.m. y la temperatura y necesitan una compensación de la unión fría.
 - Reóstatos.
 - Tacómetros.
 - pH y conductividad.
- Señales de corriente procedentes de transmisores.
- Variaciones de resistencia de sondas que se caracterizan por una relación no lineal con relación a la temperatura.

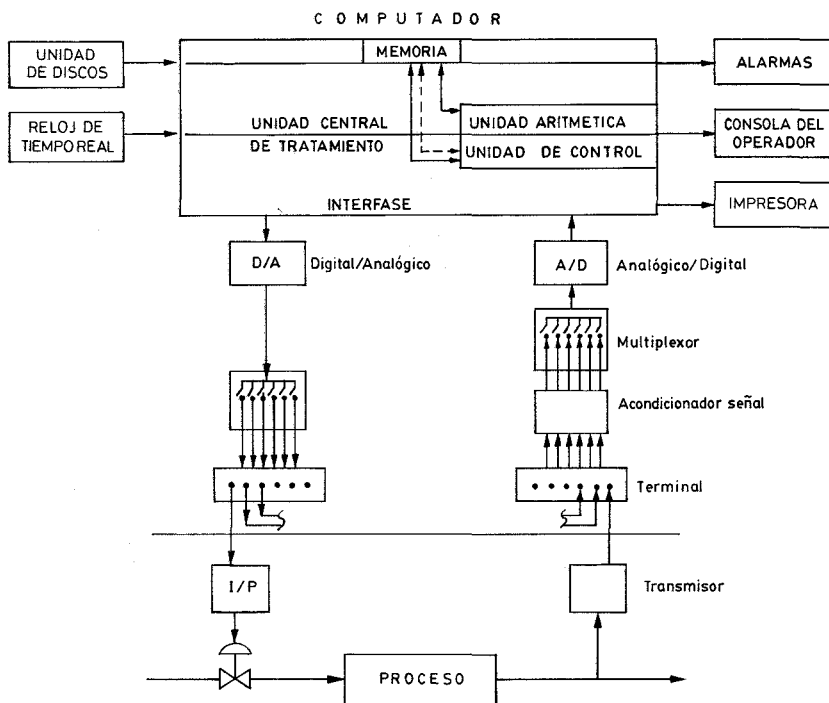


Fig. 9.68 Componentes del sistema DDC.

A continuación se conectan a un *multiplexor* donde, de forma aleatoria o secuencial, pasan al computador.

El computador permite comprobar cada señal de entrada y compararla entre límites prefijados para detectar si sale fuera de estas magnitudes y determinar así, a través de la lógica del computador, las causas de la desviación iniciando una alarma o bien imprimiendo instrucciones para la operación de la planta.

Por otro lado, el computador dispone de varios algoritmos de control, de los cuales el más típico es el PID cuya fórmula clásica es:

$$\Delta P = K_p \Delta E + K_i \tau E + K_d \frac{\Delta^2 E}{\tau}$$

en la que:

ΔP = valor incremental de salida

τ = intervalo de muestreo

E = error de la muestra

ΔE = variación del error durante el intervalo de muestreo

$\Delta^2 E$ = grado de variación del error durante el intervalo de muestreo

K_p = factor de control proporcional

K_i = factor de control integral

K_d = factor de control derivativo

y también el factor de compensación de retardo en los bucles de control que lo precisan

$$D = \frac{A}{1 + T_1 s} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{T_d}{2} s + 1 \right)^2} \right]$$

con

D = compensación del tiempo de retardo

A = ganancia de tiempo de retardo

s = operador de Laplace

T_1 = retardo dominante

T_d = ganancia de tiempo muerto

y el algoritmo de relación

$$OP = A \times PV \pm B$$

con

OP = señal de salida

A = ganancia

B = bias

PV = variable de proceso

Por otro lado, el sistema DDC compara la señal enviada a la válvula de control con la de entrada y determina la aceptabilidad de la información para la acción de control. Si ésta no es aceptable se retiene la última posición de la válvula y el operador es prevenido, tomando el computador una acción de emergencia. De este modo, los límites de operación del proceso pueden estrecharse con seguridad de manera que éste puede llevarse a un punto de operación crítico sin problemas.

El DDC permite una transferencia automático-manual sin perturbaciones y admite una fácil modificación de las acciones y de las configuraciones de los sistemas de control, lo cual es muy importante en la puesta en marcha de la planta. El DDC tiene la ventaja sobre los controladores convencionales de estar provisto de un calibrado automático que corresponde a las condiciones de operación instantáneas. Es decir, el computador ajusta la calibración de sus algoritmos de acuerdo con una función predeterminada de la variable medida o de una combinación de variables en lugar de requerir periódicamente la calibración individual de cada instrumento por un instrumentista o especialista en instrumentos, tal como ocurre en los instrumentos convencionales.

El computador propiamente dicho admite la información de entrada del sistema proveniente de cintas o disquetes u otros tipos de soporte y almacena estos datos en una «memoria» conectada a una «unidad central de tratamiento» compuesta por una «unidad aritmética» y una sección de «control»; de esta última salen y entran los datos del proceso a través de la interfaz.

La unidad de memoria almacena las instrucciones de programa y los datos empleados por la unidad central de tratamiento.

Entre los diversos tipos de memoria empleados en los computadores de proceso se encuentran la memoria de núcleo magnético, apoyada por memorias de tambor o de disco.

El tiempo de acceso en las memorias de tambor y de disco magnético es relativamente largo ya que es necesario que el tambor o el disco giren para que los cabezales se sitúen en el punto exacto de localización, y aunque la velocidad de giro sea elevada, del orden de varios miles de r.p.m., el tiempo de acceso es significativo. Por este motivo se utilizan generalmente como memorias auxiliares.

La unidad central de tratamiento es el verdadero centro nervioso del computador al realizar por un lado las operaciones aritméticas y lógicas (unidad aritmética) y por el otro controlar el flujo de datos (unidad de control).

La presentación de la información accesible al operador desde el computador puede adoptar varias formas:

- Teleimpresores e impresoras de alta velocidad.
- Pantalla de televisión que muestra a voluntad del operador el estado operacional de la planta o de una sección de la misma, o bien de un bucle de control.

Entre las ventajas del sistema DDC figuran:

- Flexibilidad en el diseño del sistema de control, pudiéndose pasar fácilmente de una acción de control a otra, diseñar la ecuación de control que más convenga al proceso, y añadir cómodamente acciones de control en adelante o en cascada.
- Rendimiento del control al trabajar muy próximamente al punto óptimo de operación.
- Seguridad al poder comprobar cada variable entre unos límites prefijados.

9.10.3 Control supervisor

A pesar de estas ventajas, el gran problema que presenta el DDC es, como todo sistema electrónico, los posibles fallos de sus componentes a pesar de los avances constantes en la tecnología de los circuitos integrados y la simplificación creciente lograda en el diseño de los computadores.

Una protección parcial se consigue utilizando estaciones de transferencia automático-manual colocadas fuera del computador y disponiendo controladores analógicos adicionales en los lazos críticos. Sin embargo, para garantizar la ausencia total de fallos habría que utilizar más de un computador interconectados entre sí para que pudieran sustituirse mutuamente en su función.

Para alcanzar la máxima seguridad de funcionamiento y lograr la optimización idónea del proceso, el computador podría determinar los puntos de consigna más convenientes en cada instante, aplicarlos a los lazos de control situados dentro del propio computador o bien en el exterior en controladores individuales. Este tipo de control recibe el nombre de «control de puntos de consigna» o SPC (*set point control*), o bien control supervisor. En la figura 9.69 puede verse un esquema de un control supervisor. Se observará que en paralelo con el bucle de control entre el

transmisor y el controlador analógico, el computador calcula los puntos de consigna y los envía secuencialmente a cada instrumento. Si se presenta cualquier avería, el controlador regula la variable del proceso en el último punto de consigna que recibió del computador.

Dentro del control supervisor se usa el término SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) significando el uso de un ordenador huésped (*host*) que usa los datos transmitidos desde el campo y presenta los resultados al operador para que actúe como supervisor e inicie alguna acción de control, y utiliza unidades remotas de transmisión situadas a largas distancias (kilómetros) del ordenador. Las unidades remotas de transmisión suelen ser «inteligentes», por lo menos en los lazos críticos.

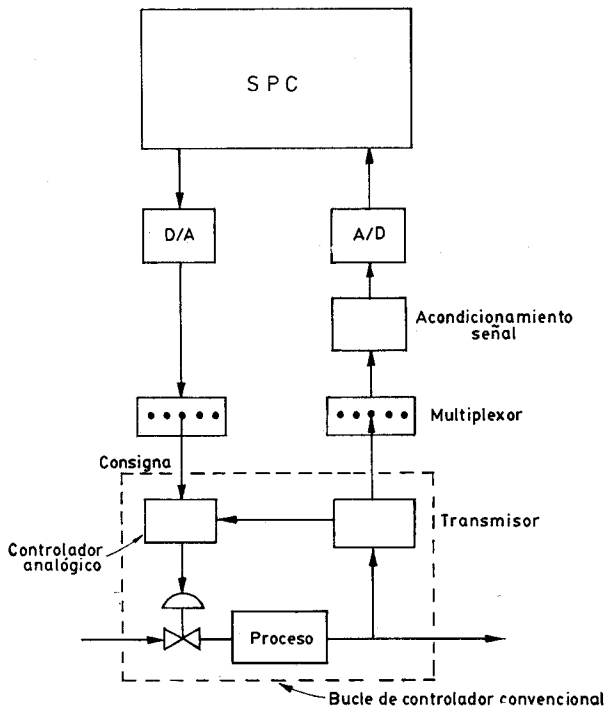


Fig. 9.69 Control supervisor.

Poco a poco, las funciones aportadas por los sistemas SCADA se han hecho semejantes al control distribuido, y la única diferencia reside en el tipo de circuito. SCADA transmite las señales a través de circuitos de baja velocidad y poco fiables para la integridad de los datos (líneas telefónicas y radio), mientras que el control distribuido lo hace mediante circuitos locales de alta velocidad y seguridad de transmisión.

9.10.4 Control distribuido

En los años setenta, dentro de los esfuerzos de investigación dedicados a la resolución del problema del control de fábricas con gran número de lazos, y teniendo en cuenta el estado de la técnica de los microprocesadores y la característica «conservadora» de la industria, se llegó a las siguientes conclusiones generales:

1. Descartar el empleo de un único ordenador (control DDC) por el serio inconveniente de la seguridad y sustituirlo por varios controladores digitales capaces de controlar individualmente un cierto número de variables, para así «distribuir» el riesgo del control único.

2. Cada controlador digital debía ser «universal», es decir, disponer de algoritmos de control seleccionables por software, que permitieran resolver todas las situaciones de control y dieran así versatilidad al sistema. (De este modo, un solo controlador digital podía efectuar un control P, o PI, o PID, o de relación, o en cascada,...)

3. La velocidad en la adquisición de los datos y su salida hacia las válvulas de control debía ser en «tiempo real», lo que obligaba a utilizar microprocesadores de 16 bits (que en los años setenta eran comercialmente una novedad).

4. Para comunicar entre sí los transmisores electrónicos de campo, los controladores y las interfaces para la comunicación con el operador de la planta, se adoptó el empleo de una vía de comunicaciones, en forma de cable coaxial instalado en la planta, con un recorrido paralelo a los edificios y a la sala de control.

5. Para eliminar el espacio de panel requerido por el control clásico, se adoptó el uso de uno o varios monitores TRC, en los cuales, el operador, a través del teclado, debía examinar las variables de proceso, las características de control, las alarmas, etc., sin perturbar el control de la planta, y con la opción de cambiar cualesquiera características de control de las variables del proceso.

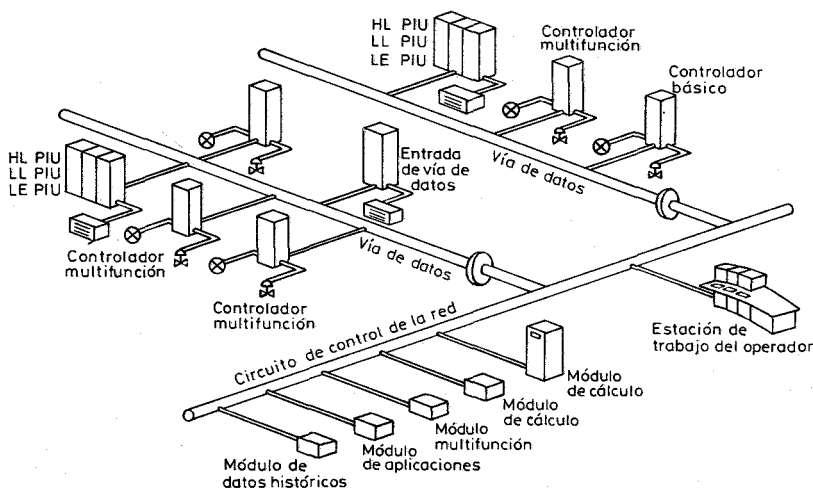


Fig. 9.70 Componentes del control distribuido.

Como resultado de estos esfuerzos, el primer «control distribuido» para la industria apareció en noviembre de 1975 (TDC 2000 de Honeywell).

En esencia, la diferencia entre el control distribuido y el control clásico puede compararse a la existencia entre el primer ordenador, el ENIAC, que se configuraba cambiando cables, y el actual ordenador personal donde los cables existen «electrónicamente» configurados por el programa escrito (software) que se ejecuta.

El *ordenador personal* también se ha incorporado al control distribuido. Permite la visualización de las señales de múltiples transmisores, el diagnóstico de cada lazo de transmisión, el acceso a los datos básicos de calibración y a los datos de configuración de los transmisores.

El *controlador básico* del sistema es un microprocesador que proporciona los clásicos controles PID y otros algoritmos de control. Es apto para el manejo de 8 lazos que proporciona, entre otros, los siguientes algoritmos de control:

Salida manual

PID normal

PID con ajuste externo del punto de consigna

PID con control anticipativo (*feedforward*)

Adelanto-retardo

Sumador

Multiplicador-Divisor

Relación

Extracción de raíz cuadrada

Rampas programadas (temperatura en procesos discontinuos)

Contador

Estos algoritmos pueden configurarse definiéndose de este modo, el último modo de control a retener en caso de avería, las unidades de ingeniería (tipo de termopar, termorresistencia,...), la acción de control (directa, inversa), el tipo de señal de entrada (lineal, raíz cuadrada,...), las alarmas, etc.

El *controlador multifunción* que, al utilizar en su programación un lenguaje de alto nivel, se asemeja a un ordenador personal, proporciona las funciones de control lógico que permiten regular un proceso discontinuo (*batch control*), y el manejo de procesos complejos, en los que el controlador básico está limitado. Tal es el caso del control de una columna de destilación, donde el control es dinámico, y es necesario realizar cálculos en «tiempo real» sobre las ecuaciones de equilibrio entre el reflujo interno y el reflujo externo en cabeza de la columna. Otros casos típicos son la manipulación de reactores en condiciones anormales, el precalentamiento de líquidos de alimentación de procesos mediante la creación matemática de modelos, etc.

El *control secuencial* enlaza el control analógico (modulante con posiciones que varían continuamente en la válvula de control) con el control lógico. Por ejemplo, el arranque y el paro de una caldera de vapor deben hacerse de modo secuencial para eliminar totalmente el riesgo de una explosión que ocurriría si, en el peor de los casos, entrara agua en la caldera con el nivel muy bajo y con los

tubos del serpentín al rojo. El control secuencial se realiza con un conjunto de instrucciones o sentencias, parecidas a programas de ordenador, que establecen en el tiempo los puntos de ajuste de cada elemento para que tenga lugar la secuencia deseada. El lenguaje empleado es de alto nivel, parecido al BASIC, y orientado al usuario del ordenador personal, por lo que es fácil de escribir y de interpretar.

En el *control discontinuo (batch control)* es usual automatizar la entrada de ingredientes, en particular en la industria farmacéutica, definiendo su naturaleza y cantidades en lo que se llama la fórmula (recipe). Debido a que se fabrican muchos productos diferentes en la misma unidad de fabricación, es necesario que el equipo de control sea versátil para satisfacer la gran variedad de fórmulas (recipes) que pueden presentarse. La práctica usual es disponer de un programa de la fórmula principal grabado en diskette, y modificar ésta dinámicamente de acuerdo con los datos de la fórmula, las fases del proceso discontinuo y el tiempo estimado de ejecución de la operación.

Los *controladores programables* sustituyen a los relés convencionales utilizados en la industria. En lugar de disponer de pulsadores y relés para los circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de los motores de la planta, con el correspondiente panel o cuadro de mandos y con los consiguientes cables de conexión, voluminosos y caros, el controlador programable aporta la solución versátil, práctica y elegante del software en un lenguaje especial, basado en la lógica de relés.

El teclado del controlador dispone de símbolos que representan la lógica de los contactos: NA (normalmente abierto), NC (normalmente cerrado), Temporización ON u OFF, Contador, Constante, etc.

De este modo, pueden desarrollarse programas que representen cualquier circuito de enclavamiento, y comprobarlos con un simulador de contactos, antes de acoplar el controlador programable a la planta.

La *estación del operador* proporciona la comunicación con todas las señales de la planta para el operador de proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de ellos, se realiza mediante programas de operación. De este modo:

1. El operador de proceso ve en la pantalla (o pantallas) un gráfico o gráficos del proceso que le interesa, y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, las curvas de tendencia, etc. Puede archivar datos históricos de la planta que crea interesantes, obtener copias en impresora de las tendencias, el estado de las alarmas, etc.
2. El ingeniero de proceso puede editar programas del proceso, construir las representaciones en la pantalla de partes del proceso, etc.
3. El técnico de mantenimiento puede fundamentalmente diagnosticar y resolver problemas en los elementos de control distribuido de la planta.

El *computador* permite implementar los programas de aplicación de los usuarios, destinados a obtener información determinada de la planta, y procesarla con objeto de analizarla más adelante. El sistema se presta a optimizar variables,

hacer cálculos especiales o complejos sobre balance de energía o de consumo de materias primas de la planta, y a confeccionar «rapports» especiales.

Por otro lado, el computador puede comunicarse con otros ordenadores de mayor capacidad para obtener información sobre el consumo de materias primas, sobre los factores que influyen en la producción y en su rendimiento, y sobre los datos analíticos que se utilicen en la optimización de la planta. Y, como es lógico, esta información actual obtenida del proceso es accesible a la dirección, que puede utilizarla para el control de costos de la planta.

El lenguaje utilizado suele ser de alto nivel, Fortran, C++, Pascal objeto. Se desarrollan programas que permiten utilizar el control distribuido de manera óptima para mejorar la productividad de la fábrica y minimizar los costes. Entre estos programas se encuentran:

- Monitorización y control de turbinas generadoras
- Mezclas en refinerías y en la industria del papel
- Autoajuste de lazos de control
- Librería de gráficos para la construcción de diagramas de flujo
- Control de calderas de vapor

La tendencia del computador es a generar cada vez más información, la que debe ser transmitida rápidamente dentro de la planta, y a veces en tiempo real. Esta información es manejada por los llamados periféricos del ordenador. Estos periféricos deben trabajar a la misma velocidad que los sistemas basados en los procesadores Pentium. Entre ellos se encuentran memorias magnéticas de 40, 80, 240 Mbytes, memorias láser de 1 Gbyte, memorias ópticas de 40 Gbytes, impresoras rápidas con escritura de alta calidad, etc.

Las *alarmas* son importantes en el control de procesos. Existen alarmas de alto y bajo valor de la variable, alarmas de desviación entre el punto de consigna y la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede de un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada o de salida, etc. Conviene evitar la instalación de un número excesivo de alarmas, ya que el operador se ve obligado a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente y, además, le predisponen a no prestarles atención. Los casos en que la alarma actúa demasiadas veces durante el día son debidos a un mal diseño o a una condición del proceso que hay que corregir. Por ejemplo, una alarma de nivel de flotador situada en un tanque con agitador, en el cual no existan dispositivos de barrera contra las olas formadas en la superficie, estará actuando intermitentemente cuando el nivel alcance justamente al flotador. La solución a este caso y a otros parecidos es la llamada alarma «inteligente» que actúa siguiendo la lógica del circuito. En el ejemplo anterior, el sistema dispondría de un circuito lógico que, después de la primera alarma, comprobaría si el nivel bajaba y se separaba en un valor mínimo de la posición del flotador, y si éste no fuese el caso no actuaría por considerar que la situación no es una condición anormal.

El control distribuido tiene una *seguridad mejorada* con relación a los sistemas convencionales de control. Tal como se ha indicado, los transmisores disponen de un sistema de autocalibración y diagnóstico de averías que permite al

personal de mantenimiento localizarlas y resolverlas rápidamente, caso de que se produzcan. El sistema es redundante y puede considerarse como una «inteligencia distribuida» que, en forma parecida a la humana, limita las consecuencias de un fallo, manteniendo el control del sistema.

Desde el punto de vista de la *fiabilidad* del equipo, el número de horas/fallo de los elementos de un sistema de control distribuido es considerable y varía en régimen permanente y a la temperatura de 25° C desde 10.000 horas/fallo en los controladores básicos hasta 220.000 horas/fallo en la vía de comunicaciones (cable coaxial), y este tiempo sigue creciendo con las nuevas técnicas de fabricación que se van incorporando a la industria.

Otro parámetro interesante es la llamada *disponibilidad*, es decir, la fracción de tiempo que el sistema es operable. Por ejemplo, una disponibilidad de 90 % significa que el sistema trabaja el 90 % del tiempo, mientras que el 10 % restante está en reparación. Pues bien, en los sistemas de control distribuido, la disponibilidad típica varía desde 99,2 hasta 99,9 %, dependiendo de la bondad del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento. Por lo tanto, si el usuario dispone en la planta de dichas piezas, y ha contratado un buen mantenimiento, la seguridad de funcionamiento es clara.

Cabe pues afirmar que los sistemas de control distribuido se han consolidado en el mercado industrial como los sistemas ideales de control y, hoy en día, sus ventajas son tan claras que, al estudiar la instrumentación y el control de una nueva fábrica o la reforma de una antigua, es inimaginable no considerarlos como posibles opciones de elección.

Los sistemas electrónicos, al usar la lógica binaria, presentan la ventaja de poder aplicarse y ser compatibles tanto para producción a gran escala como en la fabricación de un número pequeño de unidades (procesos de fabricación «batch» o por lotes).

El coste del equipo electrónico disminuye de forma continua, el software continúa su creciente desarrollo, y la presión económica que induce a la automatización se mantiene, por lo cual es de esperar que se ampliará la difusión de la automatización en los próximos años.

9.10.5 Sistemas de control avanzado

Son aquellos que se apartan de las técnicas realizadas con controladores neumáticos o electrónicos analógicos PID, control de relación y en cascada y que, en general, se emplean para mejorar el rendimiento económico del proceso.

Cuando el control convencional presenta problemas, por no ser el proceso bien conocido, ser complejo, presentar importantes retardos y grandes perturbaciones e interacciones y ser marcadamente no lineal, la alternativa es el control avanzado.

La estrategia del control avanzado viene definida por la estimación de los costos y cuantificación de los beneficios, el establecimiento de los recursos humanos y un plan de viabilidad.

El costo es importante; deben definirse las estrategias y los bloques de con-

trol del software y del hardware, los programas de simulación y de optimización, los protocolos de comunicación, los recursos humanos y la puesta en marcha.

La aplicación de los sistemas de control avanzado crece de día en día por los beneficios que permite conseguir en la automatización de la planta. Las ventajas que presenta la aplicación de los sistemas de control avanzado abarcan el ahorro de energía conseguido en la operación de la planta, el aumento de la capacidad de fabricación y la disminución del costo de operación de la planta y la disminución del porcentaje de recuperación de los productos que salen fuera de especificaciones durante el proceso de fabricación.

Los rendimientos típicos que ofrecen los sistemas de control avanzado abarcan:

El ahorro de energía se aumenta en 5 %.

La capacidad de fabricación de la planta aumenta desde 3 a 5 %.

El costo de operación de la planta se reduce de 3 a 5 %.

El porcentaje de recuperación de los productos se mejora de 3 a 5 %.

El retorno de la inversión se consigue en un tiempo de 6 meses a 5 años.

El rendimiento global es de 5 a 35 %.

Las aplicaciones de los sistemas de control avanzado aumentan de día en día y se aplican a procesos tales como fabricación del amoníaco, procesos discontinuos, hornos, calderas de vapor, plantas de cogeneración, plantas petroquímicas, sistemas de ahorro de energía, reactores químicos, plantas de gas natural, compresores, servicios generales, control estadístico del proceso, etc.

Como ejemplos generales, se expone a continuación una descripción breve de algunas de estas aplicaciones referidas a control multivariable, calderas de vapor, reactores y control de procesos en base estadística.

También corresponde al control avanzado el control anticipativo («feedforward») ya descrito, y el control con restricciones donde se imponen limitaciones a la variable controlada (por ejemplo, en un reactor el controlador de composición es sustituido por un controlador de presión cuando condiciones anormales provocan el aumento indebido de presión dentro del reactor).

En el *control multivariable* existe una relación de influencia entre varias variables del proceso que se controla. En una planta, la mayoría de los lazos de control son de una entrada y una salida y pueden ser controlados satisfactoriamente con un instrumento PID. Sin embargo, algunos lazos son de múltiples variables que se influyen mutuamente, tal como ocurre en un reactor de polimerización, en un evaporador, o en una columna de destilación, y presentan dificultades de control. Existen varios métodos para el control de multivariables que se ejecutan con ordenador:

— Modelizar el proceso con ecuaciones de estado, es decir, ecuaciones diferenciales del proceso que se linealizan en número igual al de variables ligadas y aplicar métodos de optimización que hacen mínimo el índice de funcionamiento cuadrático (equivalente al error cuadrático entre la variable y el punto de consigna más la energía consumida por el control). De este modo, cuando actúe un

controlador de una variable, se reducirá o eliminará la propagación de perturbaciones a otros controladores.

— Modelización con control predictivo con algoritmo de control basado en la igualdad entre las respuestas en lazo cerrado y en lazo abierto (se igualan las matrices de función de transferencia en lazo cerrado y en lazo abierto). Un programa de optimización determina los valores de los parámetros de ajuste del algoritmo de control. Y así, los lazos o bucles de control se harán menos interactivos.

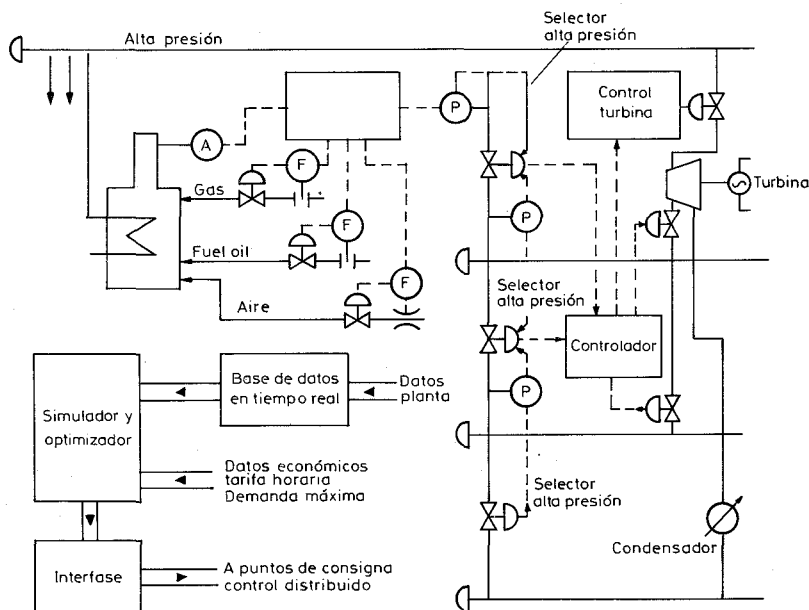


Fig. 9.71 Control avanzado de una caldera de vapor.

En las *calderas de vapor* el sistema compensa en circuito cerrado las perturbaciones que se presentan en la operación de la caldera, para reducir el consumo de combustible. El sistema dispone de un elemento de simulación y optimización de la caldera que recibe todos los datos de operación y los datos económicos de funcionamiento, y determina la forma óptima para operar la caldera, calculando los puntos de consigna de los controladores. El sistema permite la operación on-line, es decir, el funcionamiento en tiempo real de la caldera, y off-line, es decir, un estudio del comportamiento del sistema ante ensayos de funcionamiento sin peligro para el control de la caldera. En este último caso pueden probarse diversas hipótesis y sus consecuencias en el control de la caldera de vapor. En otras palabras, el control avanzado contesta a la pregunta ¿Qué pasaría si...?

El sistema permite la optimización en el uso de diversos combustibles y el cálculo del coste de la energía eléctrica suministrada por las turbinas asociadas a

la caldera. Estas se utilizan en el aprovechamiento de la energía suministrada por el vapor y no utilizada en la planta, la que se envía y factura a la compañía eléctrica.

Los *reactores* se utilizan típicamente en plantas de polietileno y en procesos de polimerización.

En las plantas de polietileno, se utilizan modelos matemáticos multivariables. Los sistemas de control avanzado predicen los productos que se fabrican y los controlan mediante la variación de los productos entrantes y permiten una transición suave de fabricación entre dichos productos.

El sistema controla las propiedades del polietileno tales como el índice MI (Melt Index) o índice de caudal FI (Flow Index), y la densidad. Estas propiedades son una función de la concentración de hidrógeno, de etileno, de comonomero (propileno,...), de la reactividad del catalizador, de la temperatura, de las impurezas y de otros factores. Existe una diversidad de modelos según el proceso, que engloban todas las variables anteriores, las que influyen en la reacción.

El modelo adoptado del proceso y las condiciones de operación predicen las propiedades del producto final que va a fabricarse, lo que permite al sistema el cálculo de las condiciones requeridas para mantener las propiedades deseadas en el producto final.

Mientras que en otros procesos basta controlar en lazo cerrado las variables, en los reactores dicho procedimiento comportaría un tiempo excesivo por la necesidad de analizar el producto para comprobar si está o no dentro de las especificaciones. Por este motivo, es necesario trabajar con un modelo del proceso que facilite la predicción rápida de la evolución de la reacción en el sentido de conocer la marcha de la fabricación de los productos. Algunas variables, tales

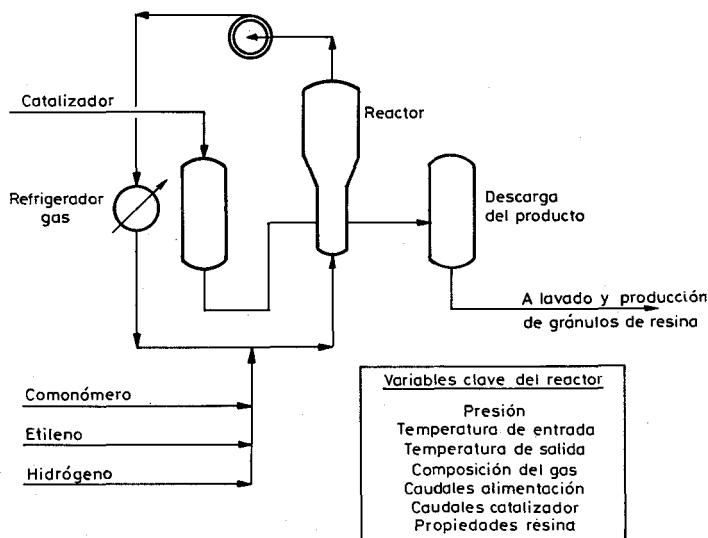


Fig. 9.72 Control avanzado de reactores.

como las desviaciones en el rendimiento del catalizador, las variaciones en el intercambio calorífico, etc., que no pueden modelizarse, se tienen en cuenta cada vez que el modelo se actualiza.

El objetivo del *control estadístico del proceso* (SPC) es monitorizar el comportamiento de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a variaciones en la calidad de los productos fabricados. La tendencia del control distribuido es a incorporar este tipo de control, extrayendo la información de la base de datos de los históricos del sistema. Los cálculos que realiza el control estadístico abarcan la determinación de la media, la desviación estándar, los valores periódicos máximos y mínimos, etc.

El sistema trabaja en tiempo real con leyes de probabilidad de las variables para los valores no aleatorios y presenta los resultados en forma de gráficos generales y de tendencia, y de tablas. Este tipo de control, mediante visualizaciones especiales, alerta al operador para que pueda actuar sobre el proceso.

Los *gráficos de control estadístico* típicos se presentan en *dos subgrupos X-R* (muestreo del rango-diferencia entre el valor más alto y el más bajo de la variable), y *X-X* (promedio muestra variable) con líneas limitantes a $\pm 3\sigma$ (desviación estándar) y con unos 25 subgrupos (puntos obtenidos durante una toma de muestras). Si el proceso está en control estadístico, el 99,73 % de los valores de los dos subgrupos permanecen dentro del margen $\pm 3\sigma$ de las líneas de control y muestran su variabilidad a corto término.

La fijación de los límites de control viene dada por las fórmulas:

Límite superior de control de la variable (UCL_x) = $\bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}$

Límite inferior de control de la variable (LCL_x) = $\bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}$

Límite superior de control del margen (UCL_r) = $D_4 \cdot \bar{R}$

Límite inferior de control del margen (LCL_r) = $D_3 \cdot \bar{R}$

donde

\bar{X} = Promedio subgrupos de la variable

\bar{R} = Promedio subgrupos de margen de la variable

A y D son constantes cuyo valor depende del tamaño del subgrupo y que se determinan estadísticamente.

Si el intervalo de muestreo de los puntos es correcto, la variación a largo término se deduce de la de corto término.

El comportamiento anormal del proceso puede verse por distintas tendencias (desviación en un sentido o recurrente, estratificación de los puntos, etc.).

Además de los gráficos *X-X*, *X-R*, existen los *gráficos de atributos* que proporcionan dos valores (conformidad, no conformidad, presente/ausente, etc.) de las variables muestradas, y que se presentan en cuatro tipos de gráficos:

- P registro de defectos en muestras de tamaño variable.
- np registro de unidades no conformes en muestras de tamaño constante.
- c número de no conformidades en muestras de tamaño constante.

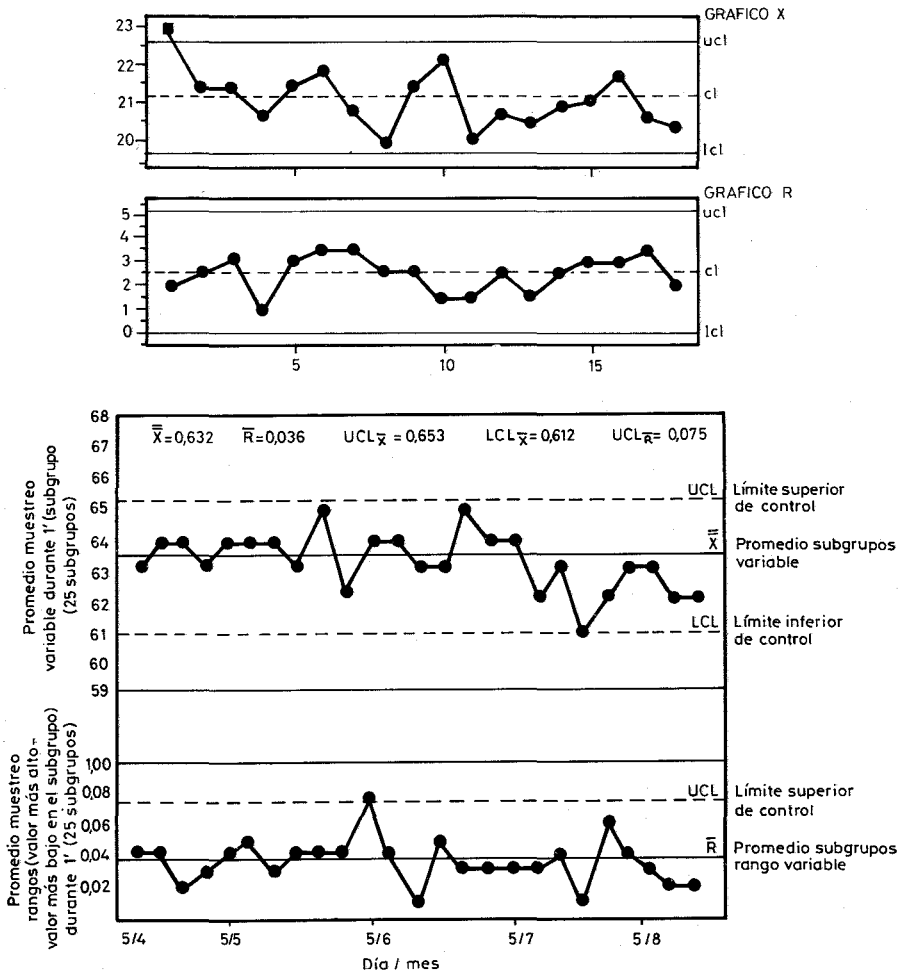


Fig. 9.73 Control avanzado en base estadística.

— u número de no conformidades por unidad a partir de muestras de tamaño variable.

Los *gráficos de suma acumulativa (CUSUM)* representan la suma algebraica de la variable menos el promedio. De este modo, cuando se presenta una tendencia clara de la variable, el gráfico indica un movimiento muy pronunciado y señala el tiempo en que ocurrió.

El control estadístico del proceso permite, mediante el análisis de Pareto, relacionar la ocurrencia de los problemas con su coste asociado, de modo que muestra la frecuencia de los mismos dando prioridad a los de mayor coste. De este modo, pueden determinarse las causas y los efectos (análisis de árbol de fa-

llos) y realizar estudios de correlación y de influencia de parámetros en la marcha del proceso.

Y así, puede averiguarse si un instrumento está averiado en el sentido de que ha quedado bloqueado en su señal de salida, si una válvula de control está con el obturador agarrotado por deformación del vástago o por otra causa, si es posible trabajar al límite de las especificaciones del producto, si los puntos de indicación de algunas variables han variado significativamente para que puedan representar algún problema de desviación, etc.

El sistema puede trabajar en tiempo real con leyes de probabilidad de las variables para los valores no aleatorios y presenta los resultados en forma de gráficos de tendencia, de tablas y de gráficos en general. Este tipo de control, mediante visualizaciones especiales, alerta al operador para que pueda actuar sobre el proceso.

Los beneficios que proporciona este sistema abarcan: evitar paros de la planta, impedir —dentro de lo posible— que las variables salgan fuera de control, asistir al departamento de mantenimiento en los programas de mantenimiento preventivo y proporcionar al cliente registros o certificados de la bondad de los productos que adquiere.

9.10.6 Sistemas expertos

Los *sistemas expertos* emulan la capacidad de toma de decisiones de un experto humano en un dominio dado de un tema. La diferencia fundamental con relación al software convencional es que el programa (razonamiento, inferencia y mecanismo de control) está separado deliberadamente de los datos (conocimiento) con que trabaja. En la figura 9.74 puede verse la arquitectura de un sistema experto on-line.

El sistema experto se integra en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección de fallos y en la solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.

Los sistemas expertos han sido posibles gracias al microprocesador. El sistema experto detecta y diagnostica los problemas potenciales que pueden presentarse en el control de procesos de una planta industrial. La elaboración del «paquete experto» es laboriosa. Es necesario adquirir el conocimiento que del proceso disponen los operadores de la planta y los ingenieros proyectistas, para incorporarlo al sistema experto. Este conocimiento se basa fundamentalmente en las señales de alarma que el operador humano capta antes de presentarse las situaciones anómalas en el proceso, que dan lugar a toda clase de fenómenos perjudiciales como son: paro de la planta, destrucción del producto, explosiones, desprendimientos de productos peligrosos, etc. Para la elaboración de las bases del conocimiento se hace un uso amplio de pantallas y menús que permiten al usuario, sin tener experiencia en sistemas expertos, y con la ayuda del programa, construir los modelos del proceso, entrar los parámetros del sistema, especificar las variables críticas y otros datos del conocimiento.

El sistema experto también debe incorporar las operaciones necesarias para solucionar correctamente las situaciones anómalas del proceso.

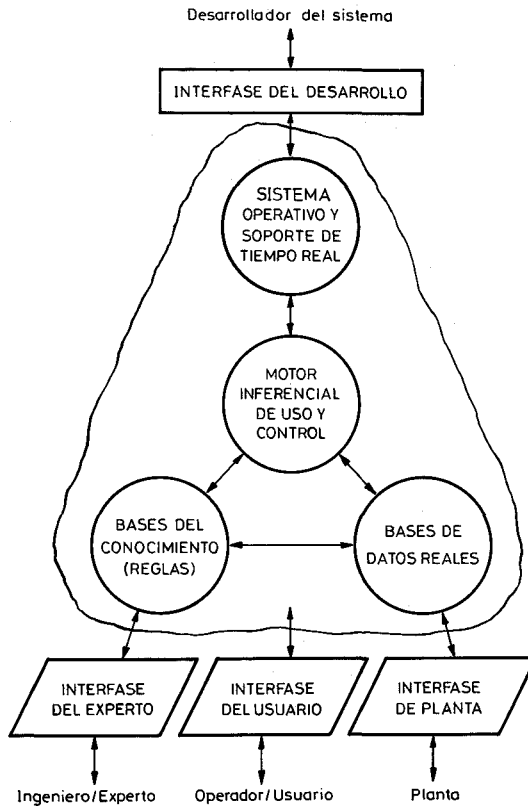


Fig. 9.74 Arquitectura de un sistema experto on-line.

El diseño de los diagramas de flujo y las configuraciones del control de la planta (presentaciones visuales, procesos simulados) requieren trabajar con un lenguaje de programación que permita al proyectista una gran versatilidad. Si bien en la industria se había trabajado inicialmente con FORTRAN (por sus características generales de cálculo científico), la versatilidad y la potencia que pide el sistema experto excluye el empleo exclusivo de este lenguaje. El uso de «cajas negras de sistemas expertos» versátiles, que se encuentran disponibles en ordenadores personales, tampoco es la solución por la falta de potencia que requiere la elaboración del sistema experto, siendo lo adecuado las estaciones de trabajo en LISP (o en PROLOG) complementadas por herramientas de cálculo numérico que utilicen FORTRAN, PASCAL o C. De este modo, estas estaciones permiten la obtención del conocimiento cualitativo y cuantitativo que exige el sistema experto.

En general, un sistema experto dispone de:

a) Un motor inferencial que controla y usa las bases del conocimiento del proceso (que contienen las reglas), para deducir conclusiones. Las reglas utilizan

profusamente la sentencia IF-THEN. Por ejemplo, en un reactor exotérmico, se utilizaría:

IF — la reacción es exotérmica — AND — el próximo paso de la reacción es bajar la temperatura — THEN — actúa (cerrando) la válvula de vapor de control de temperatura del intercambiador de calor del proceso.

b) Un sistema para manejar en tiempo real grandes cantidades de datos del proceso y a diferentes niveles de prioridad.

c) El encadenamiento hacia adelante (aplicable a la monitorización de procesos) y hacia atrás (aplicable en diagnóstico de fallos) de los diferentes árboles de decisión, proporcionando por diagnóstico y predicción una o varias conclusiones con un determinado nivel de certeza.

d) La simulación y el ensayo de la base de conocimiento antes de su uso real en el proceso.

e) Explicaciones del razonamiento empleado para información y uso por parte del usuario en la comprobación o ampliación del sistema.

Las etapas típicas con las que actúa un sistema experto en la planta son las siguientes:

a) Reconocimiento de las situaciones anómalas. Se realiza mediante la monitorización de todos los sistemas de control analógicos y digitales, tales como los controladores, alarmas, indicadores y registradores.

b) Su comparación con los datos provenientes del conocimiento del sistema experto.

c) Diagnóstico. Se efectúa a partir de la fase anterior de comparación si en la misma se han detectado situaciones problema. Se visualiza el diagnóstico de la planta en el estado actual de control.

d) Corrección del problema. El operador es asistido por el sistema inteligente de visualización que le muestra gráficamente los diagramas de flujo de interés, el resumen de alarmas, el estado de los indicadores y controladores afectados, y la secuencia de operaciones a realizar para atajar y solucionar el problema. Se dispone de ayudas en la visualización que provocan el centelleo de las áreas problemáticas dentro del diagrama de flujo.

En base a la información recibida, el operador actúa sobre el proceso, o bien puede hacerse que, eventualmente, esta actuación sea realizada automáticamente por el sistema de control, informando al operador de las acciones realizadas (lo cual es típico en el control de reactores nucleares, en los casos en que el operador no ha actuado correctamente durante el tiempo que se le permite, y es necesario proceder automáticamente a las maniobras necesarias para «salvar» el reactor de su destrucción y de la contaminación nuclear suficiente).

Entre las aplicaciones típicas que estos sistemas expertos pueden realizar figuran:

— La conexión a un sistema de control distribuido monitorizando las variables de proceso y alarmas para analizar las emergencias o las situaciones de fallos

en el control, y proporcionando al operador de la planta las instrucciones necesarios para resolver el problema.

— La adición a controladores individuales (que sólo precisan de 100 a 200 reglas) en función de autoajuste reconociendo formas de ondas del proceso y ajustando los valores de las acciones en forma parecida al ajuste por el método de tanteo realizado clásicamente por el instrumentista. Esta característica es muy útil en el control de procesos difíciles, tales como el del pH.

— La supervisión de fábricas de cemento y de papel donde es difícil obtener un modelo del proceso y el correspondiente algoritmo de control, y donde clásicamente el control se realiza manualmente por los operadores de la planta.

— El control de nivel del fondo y la optimización del rendimiento en destilado de las columnas de destilación.

El beneficio que el sistema experto aporta a la planta es la reducción de los tiempos de paro y, lo que es más importante, la disminución de la probabilidad de que el funcionamiento anómalo de la planta conduzca a situaciones catastróficas.

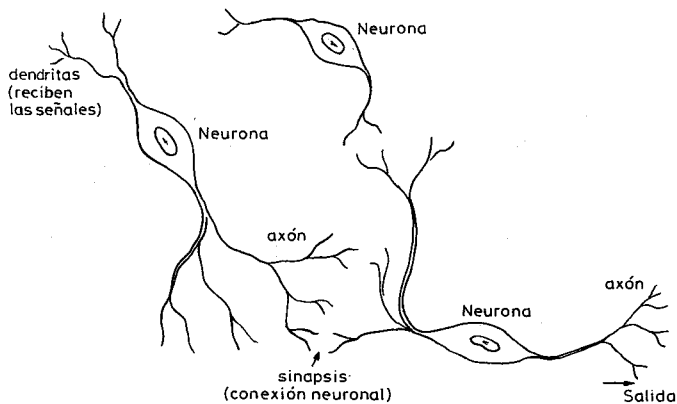
9.10.7 Control por redes neuronales

Las redes neuronales están formadas por un conjunto de elementos, las neuronas, que están conectadas entre sí en una forma semejante a la del cerebro humano. La señal procedente de las diversas entradas o «dendritas» genera excitación en la salida o «axón» de la neurona, siempre que se sobrepase un determinado umbral. Cada conexión neuronal (sinapsis) se caracteriza por un valor llamado peso que puede ser excitador (positivo), o inhibidor (negativo) del elemento del proceso. La excitación positiva o negativa depende de múltiples factores tales como el pH, la hipoxia, los medicamentos, el sueño, la vigilia, etc. En la figura 9.75 puede verse la estructura de las neuronas.

Cada neurona suma los pesos de las demás neuronas que la estimulan y el resultado de la suma recibe el nombre de función de activación. Cuando los ajustes de pesos se realizan desde las capas precedentes, se usa el término propagación de retroceso. Las redes neuronales pueden distribuirse en capas (de entrada, ocultas y de salida) conectadas entre sí hacia adelante o en conexión total (cada salida de una capa pasa a través de cada nodo en la siguiente capa). Los pesos de las neuronas deben modificarse para adaptar las salidas a las entradas de la red (mediante una memoria situada en la sinapsis) que guarda los cálculos anteriores y, de este modo, puede cambiar los pesos para permitir a los elementos de proceso modificar su comportamiento en respuesta a las entradas) y este proceso se llama *aprendizaje*.

De este modo, puede simularse cualquier proceso mediante la aplicación de arquitecturas neuronales, siempre que se tenga la información sobre la entrada y salida del proceso. En la figura 9.76 puede verse un esquema de la red neuronal.

Una aproximación al controlador PID para obtener una respuesta deseada de la planta puede verse en la figura 9.77. Contiene un módulo generador de características a la salida de la planta que es comparado con un módulo de las respuestas deseadas.



- 1 Estimulación de la fibra nerviosa si la intensidad total de las entradas supera el umbral de sensibilidad
- 2 El cambio electroquímico arranca el impulso
- 3 La neurona recupera el estado inicial para un nuevo impulso

Figura 9.75 Estructura de las neuronas.

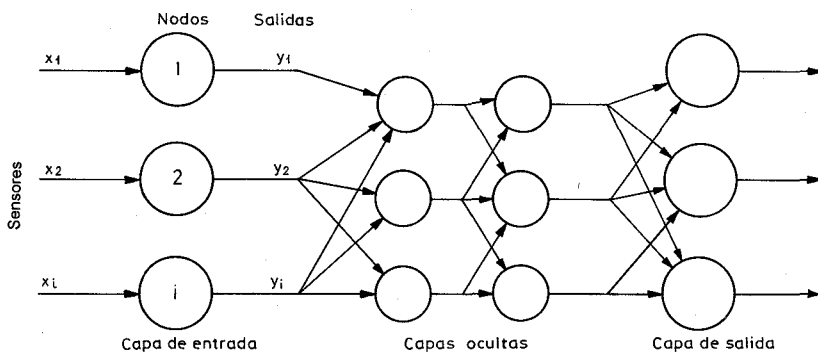
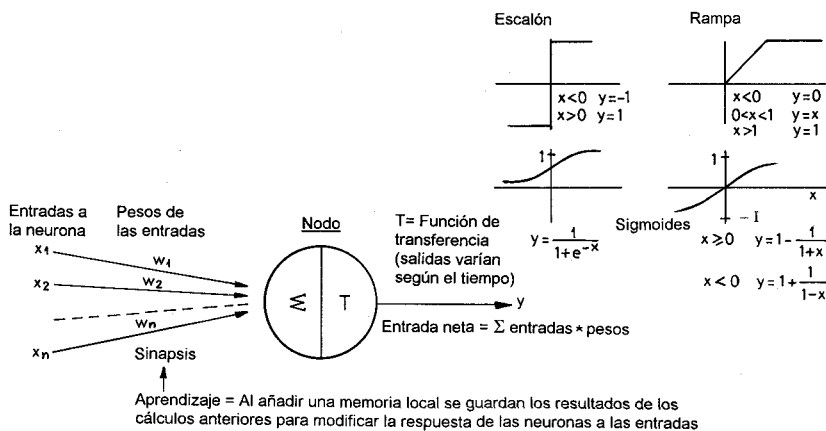


Figura 9.76 Esquema de una red neuronal.

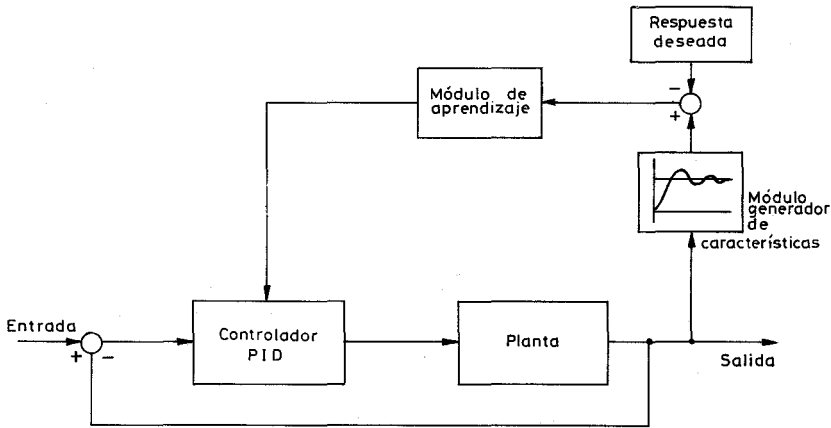


Figura 9.77 Esquema de aprendizaje del controlador PID.

La señal de error de características alimenta un módulo de aprendizaje que cambia los valores de las acciones PID. La habilidad para aprender es la característica más importante del módulo de aprendizaje, y las dificultades que presenta la creación de algoritmos estimulan todavía más los trabajos en el campo del control. Una vez diseñado el sistema de aprendizaje es necesario verificarlo y validarlo.

Un sistema que se presta al control por redes neuronales es el control de pH. Es difícil tener un buen control por retroalimentación con un controlador PID, ya que el proceso es altamente no lineal. Mediante el modelo predictivo del proceso y el del controlador, el módulo de aprendizaje es capaz de llegar al punto de consigna en varias pruebas.

9.10.8 Control por lógica difusa (fuzzy)

La lógica difusa fue desarrollada por Zadeh en 1965 y es adecuada para el control de procesos no lineales y con un comportamiento variable en el tiempo. En el control digital la señal de salida es un conjunto de bits con dos valores o señales posibles, sí o no, todo o nada, 1 o 0. La lógica difusa o borrosa utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas. Por ejemplo, aplicada al control de temperatura de un producto, afirmar «el producto está un poco caliente», o «algo frío», o «muy caliente» o «justo lo caliente que deseamos». La lógica difusa hace mucho más humano el control, pues tiene muchos puntos en contacto con el lenguaje corriente. En 1970 apareció el controlador estático por lógica difusa al que siguió inmediatamente el controlador adaptativo.

Un simple instrumento muy utilizado en la industria que puede considerarse de lógica difusa es el termostato. Trabaja con dos reglas:

- (1) SI la temperatura es inferior al punto de consigna ENTONCES da calor
[IF temperatura < consigna THEN contacto cerrado (da calor)].

- (2) SI la temperatura es superior al punto de consigna ENTONCES no da calor
[IF temperatura > consigna THEN contacto abierto (no da calor)].

En el control adaptativo, las reglas son:

- (1) la regla inicial puede no ser conocida exactamente,
- (2) regla de adaptación a los cambios paramétricos del proceso,

lo que permite un control y aprendizaje simultáneos.

En la figura 9.78 puede verse un ejemplo de control por lógica difusa, la relación que existe entre la temperatura de una habitación y las velocidades del motor del ventilador de aire acondicionado, considerando constante su temperatura.

El control por lógica difusa, aunque está siendo utilizado desde hace veinte años, todavía no está reconocido totalmente en algunos sectores del control industrial. Existe un área de solape entre el control por lógica difusa y los circuitos neuronales.

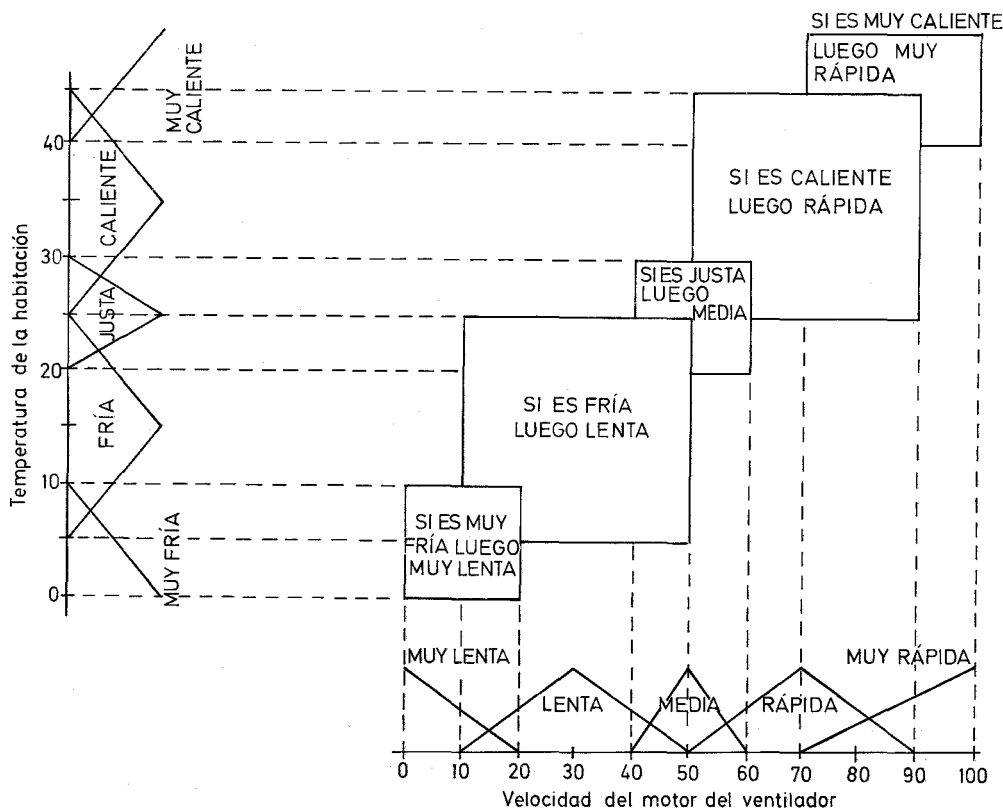


Figura 9.78 Control por lógica difusa del aire acondicionado de una habitación.

9.11 Evolución de la instrumentación

Los instrumentos de control fueron naciendo a medida que las exigencias del proceso lo impusieron. Las necesidades de la industria fueron (y son actualmente) el motor que puso en marcha la inventiva de los fabricantes o de los propios usuarios para idear y llevar a cabo la fabricación de los instrumentos convenientes para los procesos industriales.

El desarrollo se inició con los manómetros, termómetros y válvulas manuales localmente montados. En esta fase eran necesarios muchos operadores para observar los instrumentos y maniobrar las válvulas (fig. 9.79). Los procesos y los instrumentos eran proyectados empíricamente basándose en la intuición y en la experiencia acumulada y no estaban centralizados para conseguir una mayor eficiencia en las funciones del operador.

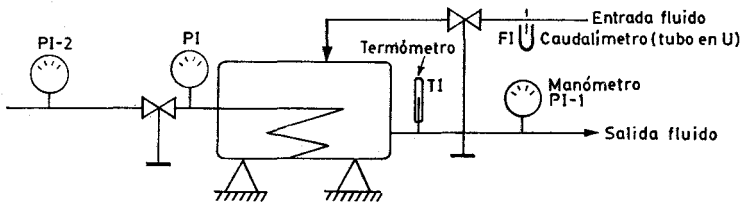


Fig. 9.79 Instrumentos locales.

La siguiente etapa fue la centralización de las funciones de medida y de control más importantes, pertenecientes a una operación del proceso, en un panel localmente montado. De este modo podía observarse y controlarse el funcionamiento de cada elemento particular de la instalación de una manera más coordinada y eficaz. Para hacer esto posible, se desarrollaron instrumentos galvanométricos operados por termopar, termómetros con largos capilares y caudalímetros con largos tubos de conducción de la presión diferencial (fig. 9.80).

Sin embargo, los procesos se hicieron más complejos y críticos y llegó a hacerse necesario que los operadores observaran el funcionamiento de varias unida-

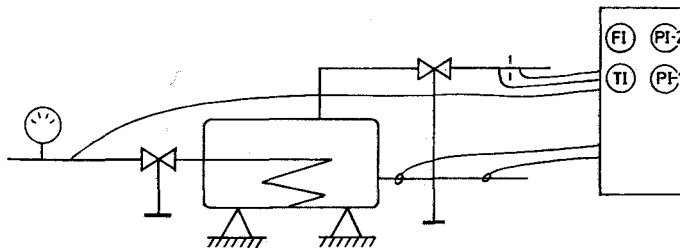


Fig. 9.80 Centralización en panel.

des de la instalación simultáneamente. El desarrollo de los transmisores neumáticos permitió la centralización de las funciones de medida y de regulación de toda una unidad del proceso en una sala de control, utilizándose como receptores los instrumentos registradores controladores neumáticos de caja grande que aparecieron hacia el año 1940. Estos instrumentos se perfeccionaron con un diseño modular hacia el año 1946, conservando la unidad automático-manual de 4 posiciones en un subpanel aparte.

A medida que pasó el tiempo, estas salas de control se hicieron indebidamente grandes, debido al crecimiento de los procesos y al tamaño de los instrumentos convencionales y se desarrolló la instrumentación neumática miniatura que apareció en el mercado hacia el año 1947, dotada ya con conmutación automático-manual incorporada, pero con el mismo tipo de transferencia.

A principios de los años 50 aparecen los primeros instrumentos electrónicos a válvulas. Más tarde se perfecciona la unidad automático-manual neumática, consiguiéndose el cambio en un solo paso, sin que se produzcan saltos en la señal de salida a la válvula y aparecen paralelamente los instrumentos electrónicos miniatura alrededor de los años 1960. El tamaño de estos instrumentos neumáticos y electrónicos es ya reducido, pero todavía experimentará una normalización posterior.

Los complejos de múltiples procesos empezaron a utilizar salas de control separadas y la coordinación y la comunicación entre los operadores en estas salas de control comenzaron a plantear algunos problemas. Además se introdujeron equipos centrales de tratamiento de datos que requerían la disponibilidad de diversas señales de medida en un punto central.

Los paneles de alta densidad permitieron básicamente que un operador supervisase un gran complejo compuesto por muchos procesos.

Los sistemas de instrumentación de alta densidad (fig. 9.81) normalizaron sus dimensiones a 6×3 " (150×75 mm) en indicadores controladores y 6×6 " (150×150 mm) en registradores, y tuvieron que satisfacer los siguientes requisitos básicos e importantes:

- a) Permitir que el operador asimile rápidamente la información.
- b) Permitir que el operador tome sus decisiones muy rápidamente.
- c) Permitir una rápida ejecución de las decisiones del operador.

La primera característica la proporcionó el indicador de desviación, que facilita tres elementos de información:

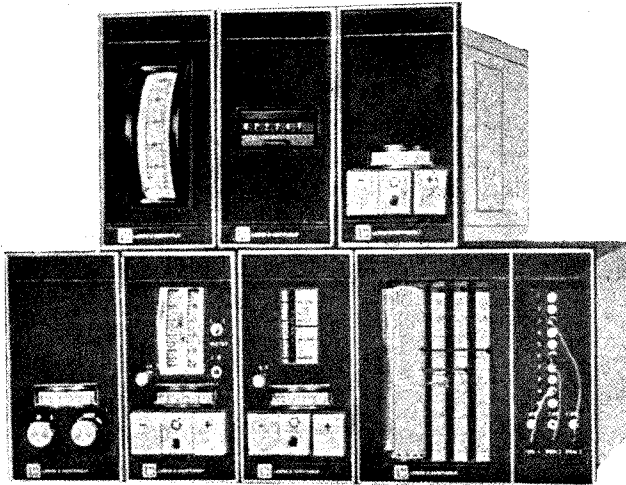
- La existencia de una desviación.
- Si la desviación es positiva o negativa.
- Cuál es la magnitud de la desviación.

La desviación se pone de manifiesto con dos índices de distintos colores, el de la variable de color rojo o naranja y el del punto de consigna de color verde. Cuando no hay desviación, el índice de color rojo o naranja no es visible en absoluto, y todo lo que se ve es una línea verde que se extiende a través de la fila de los controladores de indicación. Cualquier desviación que se presente en

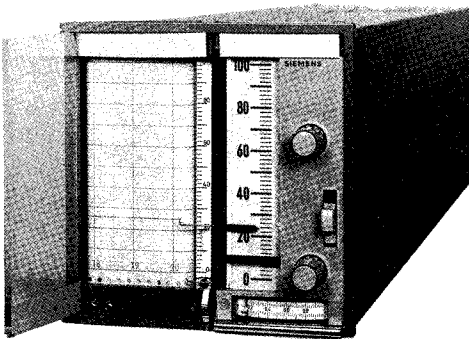
cualquier instrumento, será fácilmente visible al destacar el índice rojo o naranja de la línea verde que mantienen los restantes instrumentos.

Otro complemento de la información lo constituyen las lámparas señalizadoras incorporadas en los anunciadores de alarma. Éstos toman muchas formas, desde la más sencilla con un final de carrera conectado a una luz indicadora en el panel, pasando por la forma normal con ventanillas iluminadas que ante una condición de alarma generada por un presóstato, termostato, etc. centellea y hace sonar una bocina, hasta las formas más complejas que memorizan la secuencia de acontecimientos que conduce al paro parcial o total de la planta.

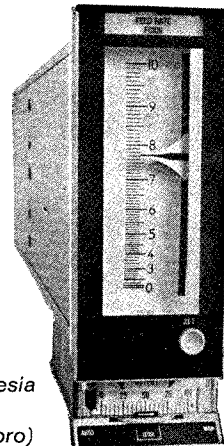
Habiendo adquirido rápidamente información sobre cualesquiera condiciones anormales, el operador tiene que decidir lo que piensa hacer. Necesita refrescar



(Cortesía de Honeywell)

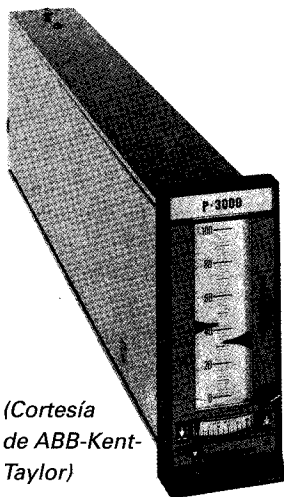


(Cortesía de Siemens)

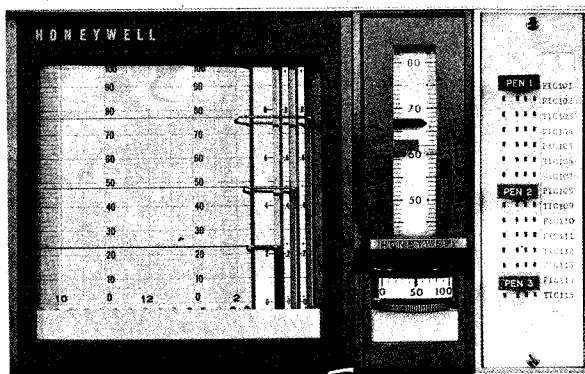


(Cortesía de Foxboro)

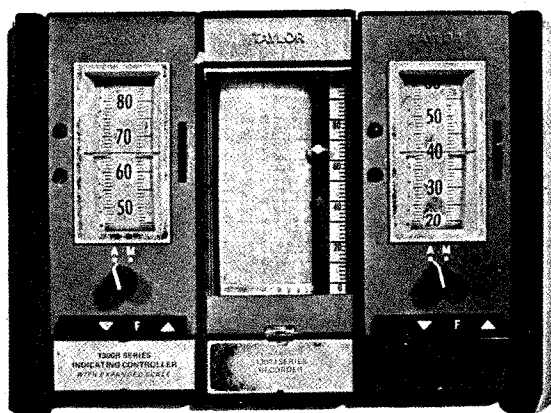
Fig. 9.81 Instrumentación de alta densidad.



(Cortesía
de ABB-Kent-
Taylor)



(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía
de ABB-Kent-Taylor)

Fig. 9.81 (Continuación)

su memoria sobre el organigrama que cubre el proceso o los varios procesos que tiene asignados. La presentación inicial de información que se ideó fueron los *paneles gráficos* (fig. 9.82) en los que los instrumentos, los pulsadores y pilotos de bombas y las alarmas estaban dispuestos en el panel, siguiendo el trazado del proceso y colocados en su posición real. El problema que presentaba esta disposición era el excesivo espacio de panel ocupado y la imposibilidad de cambiar los instrumentos de lugar ante eventuales modificaciones o ampliaciones del proceso. Se solucionaron parcialmente estos problemas con los *paneles semigráficos* (fig. 9.83) donde los instrumentos se montan empotrados en filas de dos o cuatro a una altura conveniente para su manejo por parte del operador, los pulsadores y pilotos de bombas se encuentran en una fila más baja, las alarmas van montadas en la parte superior y sobre ellas o a un nivel inferior se encuentra un semigráfico, es decir,

un diagrama del proceso con los instrumentos representados y codificados. De este modo, se aprovecha más el espacio del panel, pero subsiste el inconveniente del semigráfico. Éste, si bien resulta útil en la puesta en marcha, más tarde se convierte en un elemento puramente decorativo, que debe modificarse si cambia el proceso.

Por otro lado, la asignación al operador de uno o varios procesos complejos da lugar a un panel de dimensiones bastante considerables, lo que pone un límite a la capacidad de asimilación del operador y al mismo tiempo restringe la legibilidad de los detalles del proceso dibujados en el semigráfico.

Dentro de la corriente de simplificación se utilizan registradores de tres plumas conmutables para 15-20 señales y montados debajo de los indicadores controladores, de modo que sea fácil distinguir rápidamente los puntos que se están registrando. Para tener una mayor flexibilidad en la puesta en marcha pueden conectarse registradores portátiles montados sobre un mueble tipo carro.

Para tener todavía información más detallada se presenta la información en la pantalla mediante un proyector de diapositivas. Oprimiendo dos o tres botones, el operador puede exigir la presentación sobre la pantalla de cualquier diapositiva de proyector coloreada seleccionada. Puede haber una selección de 100 o más diapositivas, dando partes diferentes del organigrama del proceso y toda la información adicional que el operador pueda necesitar.

El operador ha recibido ya, de este modo, indicaciones rápidas de cualesquiera condiciones anormales del proceso y a la vista de la información clara del

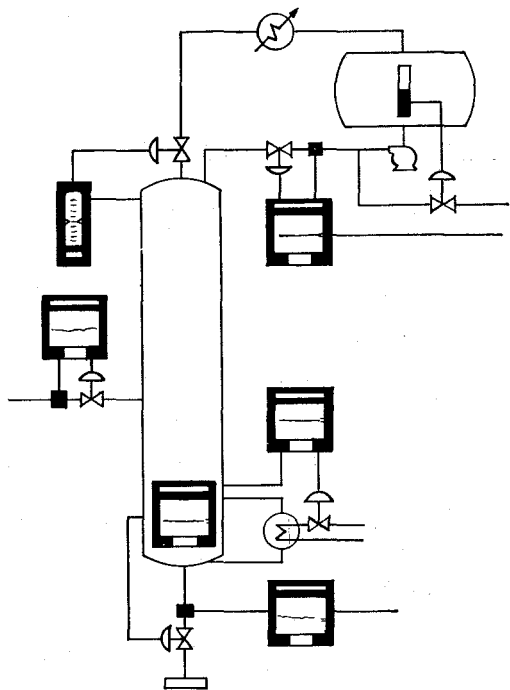
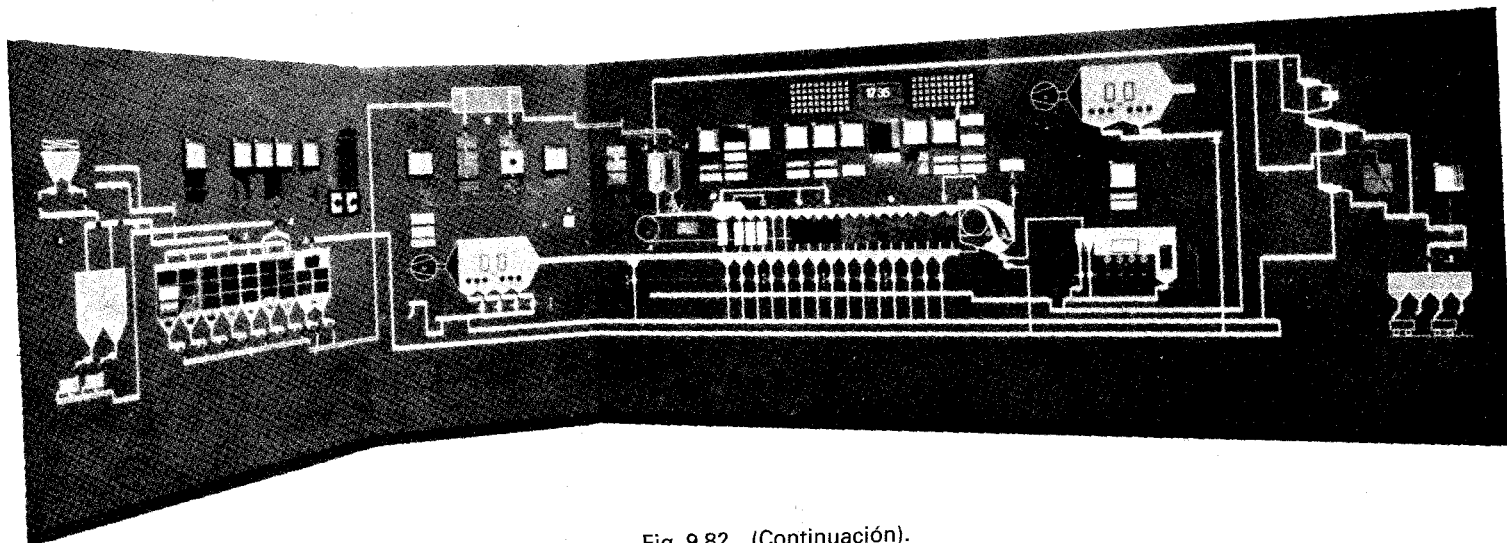


Fig. 9.82 Panel gráfico.



(Cortesía de Controlmatic Ibérica, S. A.)

Fig. 9.82 (Continuación).

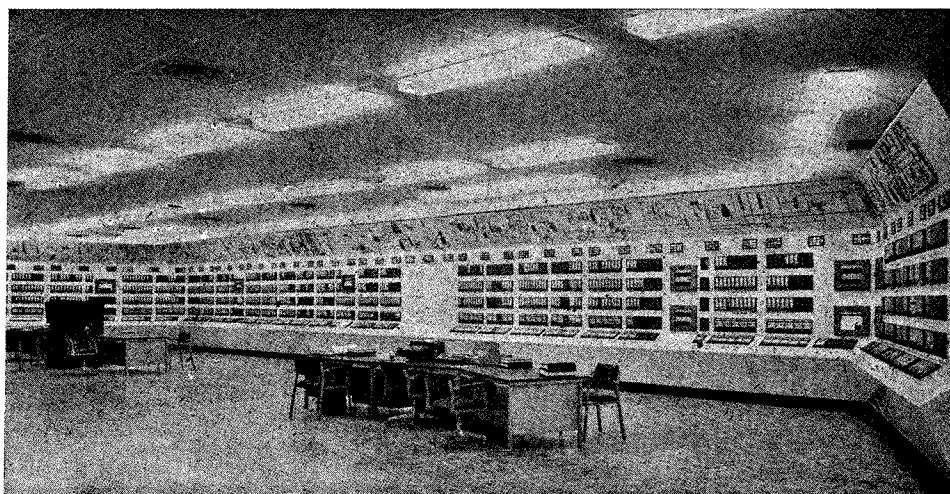
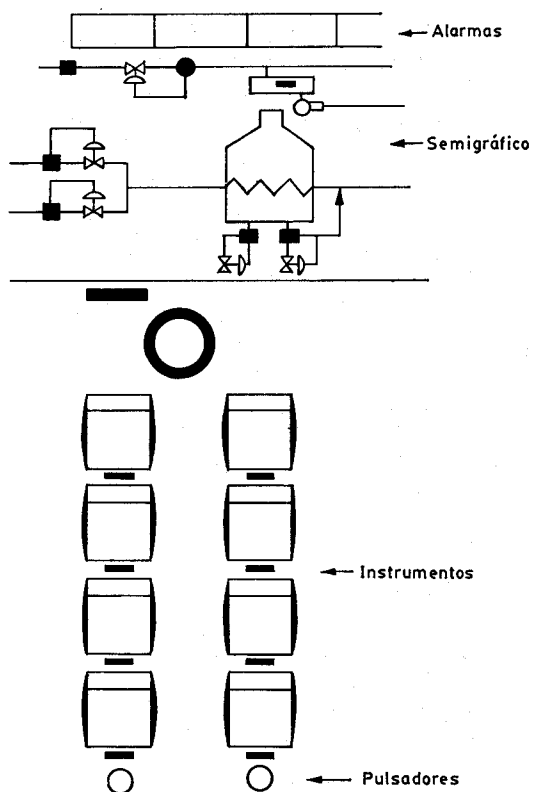


Fig. 9.83 Panel semigráfico. (Cortesía de Control y Montajes Industriales CYMI, S. A.).

proceso presentada, ha tomado ya una decisión, y ahora debe ejecutarla, lo cual se hace posible por la disposición física de los elementos que gobiernan el funcionamiento del controlador.

Una vez desarrollados los instrumentos miniatura neumáticos y electrónicos, los procesos se fueron haciendo poco a poco mucho más complejos y su optimización llegó a ser una necesidad. En esta etapa es donde empezaron a utilizarse los computadores. El primer computador electrónico apareció hacia el año 1946, pero los verdaderos computadores de proceso se desarrollaron realmente en los años 1960-1965 y se aplicaron principalmente en centrales térmicas, industrias metalúrgicas, químicas y petroquímicas. Permitieron optimizar y controlar las operaciones de la planta obteniendo productos de calidad alta y constante con ahorros importantes en el proceso, a pesar de su coste elevado.

Desarrollados los computadores y vistas las características de los instrumentos miniatura analógicos en paneles de alta densidad, la evolución continua de los procesos y la complejidad creciente que los mismos iban adquiriendo hizo que los fabricantes, en colaboración con los usuarios de instrumentos, fueran buscando

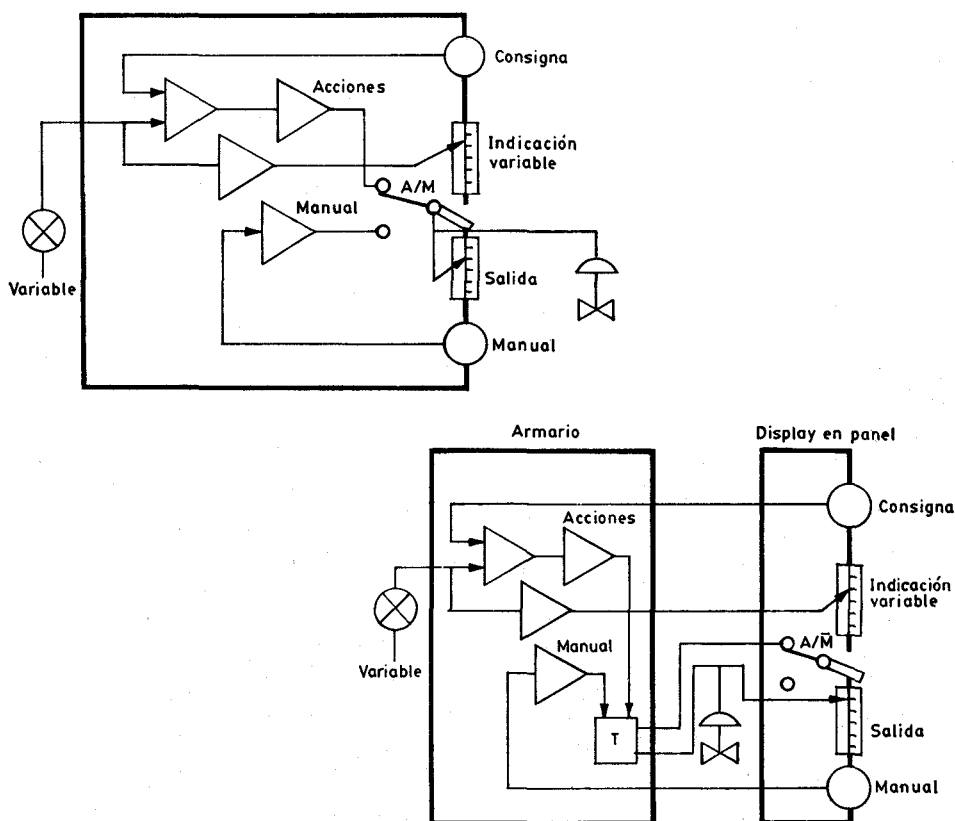


Fig. 9.84 Instrumentos miniatura integrales y de funciones separadas.

otras soluciones para que sin utilizar ningún computador o en todo caso empleándolo como auxiliar, el operador no se viera desbordado por la necesidad de captar rápidamente una gran cantidad de información que le era necesaria para llevar a cabo un buen control. Evidentemente, le es difícil «dominar» un proceso complejo con una gran cantidad de instrumentos dispuestos en un panel de excesiva longitud.

La primera tendencia que apareció en 1972 en el mercado fue separar las partes de los instrumentos que realizaban las funciones auxiliares y de control analógico de las de indicación, registro o variaciones del punto de consigna que el operador debía efectuar. De este modo, el primer grupo pasó a una habitación aparte y fue dispuesto de forma modular para que fuera lo más accesible y lo más ventajoso posible para el personal de mantenimiento. El segundo grupo de instrumentos eran puramente aparatos receptores (indicadores y registradores) y otros con posibilidad de envío de señal de punto de consigna (controladores) montados en un panel en la sala de control a la vista del operador o del supervisor de proceso. En la figura 9.84 puede verse un esquema comparativo de los instrumentos miniatura electrónicos integrales y los de funciones separadas. Señalemos que los instrumentos miniatura de funciones separadas se han aplicado con preferencia en calderas y en centrales térmicas quizá debido a la naturaleza compleja de sus sistemas de control.

Existe la necesidad de coordinar los diversos controladores estableciendo una jerarquización entre los mismos y lograr una versatilidad que permita el cambio fácil del tipo de control y obtener la mayor economía posible en el control de la planta.

Estas características las reúne el denominado «control distribuido» (figura 9.85) introducido en 1975 en el que uno o varios microprocesadores se encuentran repartidos en varios puntos de la planta donde están conectados a varias señales de proceso correspondientes, en general, a una parte homogénea de la planta. Estos microprocesadores se distribuyen de forma arquitectónica y están conectados entre sí a través de una vía de comunicaciones, la cual comunica a su vez con el centro supervisor del con-

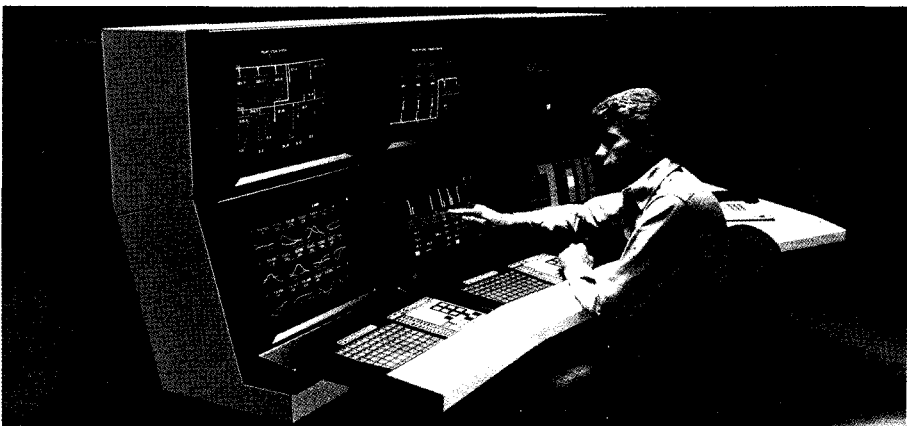


Fig. 9.85 Control distribuido. (Cortesía de Honeywell).

trol central, desde donde se tiene acceso de modo automático o manual a todas las variables de proceso de la planta.

En el control distribuido, el proveedor suministra las consolas de control, de modo que aquí es innecesario el proyecto y realización del panel de control. Conviene que el usuario indique los tipos de presentación visual que le interesen, prestando su ayuda en el diseño de las pantallas para la representación del proceso, incluyendo la participación de los futuros operadores de la planta, para que ellos, aparte de verse envueltos y reconocido su papel en la planta, puedan influir en la construcción o fabricación de los diagramas, con los que después van a controlar el proceso.

La presentación visual o mímica en las consolas puede configurarse incorporando a voluntad del usuario las formas (tuberías, tanques, bombas, etc.) disponibles en la librería gráfica, situando colores diferentes y haciendo que el diagrama visualice los valores medidos en la pantalla, y que el aspecto del proceso sea lo más real posible, por ejemplo, con tanques que se llenan o vacían, con tuberías que cambian de color según el valor de la temperatura, etc. La llamada a la información puede agilizarse por medio de un sistema de infrarrojos que detecta la posición del dedo del operador, al tocar éste la pantalla. De este modo, aparte de las entradas por teclado, el operador, aunque no tenga experiencia, puede pedir al sistema menús de ayuda, diagramas de flujo, presentación de alarmas, etc., sin tener que preocuparse por la sintaxis de las órdenes.

La visualización de las alarmas aparece en la pantalla o en la impresora en forma de páginas de listado. Por otro lado, los bloques de alarmas típicos de los paneles gráficos y semigráficos que proporcionaban un pequeño número de datos críticos del proceso se transforman, incorporando un microprocesador y un monitor, con una disposición reticular de las alarmas que pueden comunicarse de modo inteligente con el sistema y que posibilitan la conexión con unidades remotas de 64 puntos o más cada una y con la configuración que se desee.

La ventaja fundamental del control distribuido es la mayor seguridad y economía de funcionamiento, al ser los lazos de control de cada microprocesador de menor longitud (por estar situado en el centro óptimo de las variables de proceso captadas) y menos vulnerables al ruido o a los daños; por otro lado, ante la posible (pero poco probable) pérdida de la vía de comunicaciones (que suele ser redundante) los controladores continúan operando localmente. Además, el operador tiene acceso a todos los datos de los controladores (puntos de consigna, variables de proceso, señales de salida a válvulas, etc.) y puede visualizarlos a través de pantallas de televisión, ya que se halla en contacto con los mismos a través de la vía de comunicaciones.

Si se desea puede acoplarse un computador al conjunto del sistema para resolver problemas complejos de la Dirección de la planta, desde los más sencillos como tendencias de variables y su interrelación hasta los más complejos como la auditoría energética y la optimización de costos de las diversas secciones de la fábrica. La arquitectura distribuida de las funciones del computador permite analizar y comunicar entre sí los valores de variables tales como el estado del inventario y análisis de los productos (tanto materias primas como productos terminados), la automatización de la producción y el mantenimiento

y la información necesaria para la Dirección para una toma correcta de decisiones sobre la marcha de la Planta (optimización de la producción, mejora de la calidad y ahorro de energía).

El control distribuido ha evolucionado en los siguientes aspectos:

- Controladores multifunción para uso en procesos discontinuos en la modificación fácil y repetitiva de operaciones (recipes), incluyendo control lógico y secuencial, paros de emergencia, compensadores y diversos algoritmos de control.
- Sistemas de optimización de plantas coordinando múltiples controladores programables.
- Aplicaciones crecientes en el área de modernización de plantas.
- Microprocesadores cada vez más rápidos pasando por versiones de 8 bits, 16 bits y 32 bits.
- Apoyo cada vez más perfeccionado al operador, a producción y a mantenimiento, en su integración en el manejo de la planta (consolas, control avanzado, módulos históricos ...).
- Perfeccionamiento en las vías de comunicaciones utilizando cables coaxiales y fibras ópticas, así como nuevos protocolos de comunicaciones.

Se emplean también controladores programables que realizan fundamentalmente funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos sustituyendo así a los clásicos circuitos de enclavamiento a relés en los paneles de control. Los controladores programables son microordenadores que admiten programas de secuencia de funciones todo-nada de acuerdo con las necesidades de la instalación y que asimismo, como complemento, pueden realizar funciones de control PID.

Los controladores digitales universales basados en microprocesador sustituyen a los clásicos controladores miniatura de panel. Cada microprocesador contiene una unidad central, un reloj, memorias, módulos de entrada/salida, convertidores A/D, temporizadores y una fuente de alimentación, incluyendo físicamente estos elementos en una única tarjeta de circuito impreso. El microprocesador se comporta como un controlador PID con los algoritmos adecuados, acepta puntos de consigna remotos, tiene varios niveles de seguridad de protección de datos, acepta entradas universales (termopares, sondas de resistencia, mA, mV y voltios) y transmite la necesaria información del proceso con varias opciones de comunicaciones (RS 422/RS 485).

En la búsqueda de la solución al control de procesos no lineales que el controlador clásico PID no resuelve satisfactoriamente, aparece a partir de 1970 el control adaptativo. Emplea un bloque controlador PID que incorpora un algoritmo de autoajuste de las acciones. Éste excita el proceso y la respuesta temporal obtenida es convertida a frecuencial gracias a una integral transformada de Fourier. La respuesta es analizada e introducidos los valores adecuados de las acciones PID, los que son actualizados periódicamente. El instrumento es adecuado para los procesos de control difícil y cuyas características cambian con el tiempo y las condiciones de operación.

En 1983 aparece el transmisor digital inteligente con señal de salida analógica de 4-20 mA c.c. y se inicia el desarrollo de las comunicaciones (field bus) en-

tre los instrumentos del lazo de control. Se eliminan las incómodas y caras calibraciones necesarias en los instrumentos convencionales y se facilita el cambio del campo de medida y el autodiagnóstico. En 1986 aparece el primer transmisor enteramente digital con lo que aumentan todavía más las prestaciones, con la única limitación importante en la normalización de las comunicaciones donde todavía no es posible el intercambio de instrumentos de diferentes marcas.

Otros métodos para controlar procesos no lineales aparecieron en el año 1970. Se basan en el conocimiento y en el aprendizaje y en el desarrollo de controladores especiales con señal de salida basada en la experiencia del proceso, más que en un modelo de controlador. Constituyen el llamado control inteligente del que forman parte los sistemas expertos, las redes neuronales y la lógica difusa. Poco a poco han ido ganando aceptación, en especial los controladores neuronales predictivos, por su autoaprendizaje del proceso real, habiéndose realizado importantes avances en los últimos años.

El control predictivo aparece en la década de los años ochenta, y el controlador trabaja como un inverso del modelo del proceso (modelo lineal) siendo capaz, por su robustez, de solucionar el control de la mayoría de los procesos no lineales.

Cabe también señalar que se están aplicando técnicas de análisis en la interfase hombre-máquina en la seguridad y fiabilidad de operación de sistemas complejos. Estas técnicas se iniciaron en el campo de las centrales nucleares, en aviación y en sistemas informáticos. Estos estudios, cuyo objeto es analizar los incidentes y los accidentes ocurridos (por ejemplo, la catástrofe de Chernobil en Rusia) y poner los medios oportunos para que los errores humanos y técnicos que los han causado no vuelvan a presentarse, han iniciado sus aplicaciones en las plantas de proceso. Las técnicas que utilizan son en general:

- Cadenas de Markov, que definen un proceso aleatorio en un cierto número de estados finitos probables.
- Análisis de fallos en árbol (*fault-tree analysis*) que ante un suceso (fallo de un equipo o error humano) proporciona la secuencia cronológica de accidentes que pueden tener lugar.
- Simulación de Monte-Carlo, que permite la estimación del tiempo de fallo de un sistema a partir de las funciones de densidad de probabilidad de sus componentes individuales.
- Técnica Dylam, que modeliza los componentes del sistema, define los algoritmos de control, establece los sucesos de partida (por ejemplo, búsqueda de sucesos que puedan provocar temperaturas elevadas en el proceso) y genera y analiza los sucesos.
- Redes de Petri. Es un método gráfico que describe el flujo de actividades en sistemas complejos.
- Modificación de la fiabilidad humana (razonamiento ante incertidumbre, error humano ante tiempos límite de reacción y factores humanos).
- Fiabilidad del software.

Los resultados de estos análisis permiten hacer mínimos los errores humanos en el diseño, la construcción y la operación de la planta. En este último caso, pueden diseñarse modelos hombre-máquina que permiten estudiar los diferentes

comportamientos del operador ante situaciones difíciles, en las que tras reconocer la situación, gracias a la información presentada en las pantallas de la sala de control ayudado o no por sistemas expertos, actúa sobre el proceso, y espera que su acción vuelva el proceso a la normalidad. Los fallos que pueda cometer el operador, uno de los cuales es el de «fijación», en el que ejecuta la acción errónea una y otra vez sin considerar la evidencia de las señales de alarma del proceso, dan lugar en gran parte de las plantas de proceso a un perjuicio económico (se pierden materias primas o en transformación), y en partes determinadas de la planta pueden representar un peligro de explosión o de liberación de gases o de materias peligrosas, por lo que estas consecuencias harán que dichas técnicas se apliquen con profusión para optimizar la interfase hombre-máquina (u hombre-sala de control) y prevenir dichos fallos humanos.

En el futuro, puede afirmarse que la tecnología digital evolucionará todavía más integrando totalmente la información de la planta con un flujo de información continuo entre las diversas áreas de la planta (fabricación, mantenimiento, laboratorio y gestión). La aplicación de los instrumentos neumáticos y electrónicos analógicos quedará limitada a pequeñas plantas, ya que, frente a la instrumentación digital, tienen una peor relación costo/prestaciones, no permiten el almacenamiento de volúmenes masivos de información y no disponen de la facilidad de comunicación entre instrumentos que posee la digital.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetalico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado.....	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada.....	534
9.8.3	Programadores.....	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos.....	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja ten- sión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de cali- bración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias	.....	733
Glosario	.....	741

CALIBRACION DE LOS INSTRUMENTOS

10.1 Introducción

Se ha visto que los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso.

En la realización de todas estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo: presión del proceso a lectura de presión en la escala de un manómetro; temperatura real a señal de salida neumática en un transmisor neumático de temperatura; señal eléctrica (4-20 mA c.c.) de entrada a señal neumática de salida en un convertidor I/P (intensidad a presión); señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control; nivel de un tanque a señal eléctrica estándar en un transmisor electrónico de nivel, etc.

Esta relación puede encontrarse también en las partes internas del instrumento en particular cuando éste es complejo, como en el caso de un instrumento controlador miniatura para montaje en panel que está compuesto por varios bloques: unidad de punto de consigna (valor deseado de la variable medida), unidad de mando manual, unidad de control, etc.

En la unidad de punto de consigna existirá una relación entre la posición del botón de mando y la señal estándar que va al bloque controlador.

En la unidad de mando manual, la relación existirá entre la posición del botón del mando o indicación de posición y la señal de salida a la válvula de control.

Finalmente, en la unidad de control estarán ligadas la señal de error (diferencia entre el punto de consigna y la variable) y la señal de salida a la válvula de control, relación que será función de las acciones que posea el controlador.

En el caso de un transmisor de caudal de diafragma pueden considerarse dos bloques: el elemento de presión diferencial y el transmisor. En el primero estarán relacionados la diferencia de presiones de entrada (provocada por el elemento de presión diferencial-placa-orificio) con el giro del eje de salida del cuerpo, mientras que en el segundo la entrada será el giro del eje de salida del cuerpo y la salida la señal estándar de salida del transmisor.

En la figura 10.1 pueden verse estas funciones en varios tipos de instrumentos.

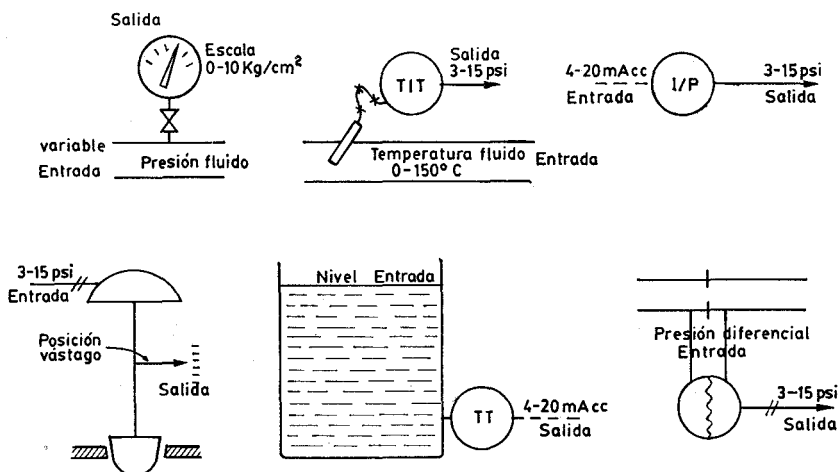


Fig. 10.1 Relación salida-entrada en varios tipos de instrumentos.

Así pues, un instrumento o una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión de señales (transductores) que pasan de una variable de entrada (presión, caudal, nivel, temperatura, posición, pH, conductividad, posición, etc.) a una o varias de las siguientes funciones en la salida: indicación de la variable de entrada, lectura de un índice o de una pluma de registro; transmisión de la variable de entrada en señal neumática o eléctrica; fijación de la posición de una palanca o de un vástago de una varilla interna del instrumento o del vástago del obturador de una válvula.

Existirá, pues, una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada el instrumento estará efectuando una medición correcta. Ahora bien, en la práctica, los instrumentos determinan en general unos valores inexactos en la salida que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada, lo cual constituye el error de la medida.

El error es universal e inevitable y acompaña a toda medida, aunque ésta sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces. Es decir, el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de calibración

Un instrumento representativo, se considera que está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado o registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento.

En un instrumento ideal (sin error), la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de lectura del aparato, es lineal. En la figura 10.2 puede verse esta relación.

En particular, si el instrumento es un transmisor neumático, cuando el índice adopta las posiciones 0, 50, 100 % de la escala, las señales de salida correspondientes son: 3, 9 y 15 psi respectivamente. Si el instrumento fuera electrónico, las señales de salida serían: 4, 12 y 20 mA c.c., respectivamente.

En condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones respecto a la relación lineal indicada, dan lugar a los errores de calibración de los instrumentos, suponiendo que estas desviaciones no superan la exactitud dada por el fabricante

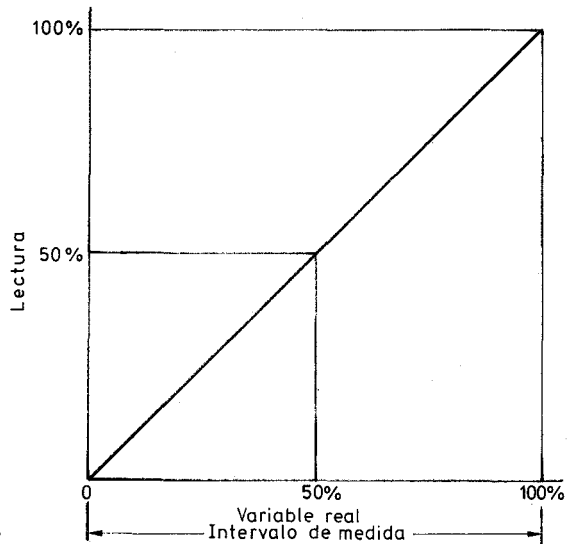


Fig. 10.2 Relación de calibración.

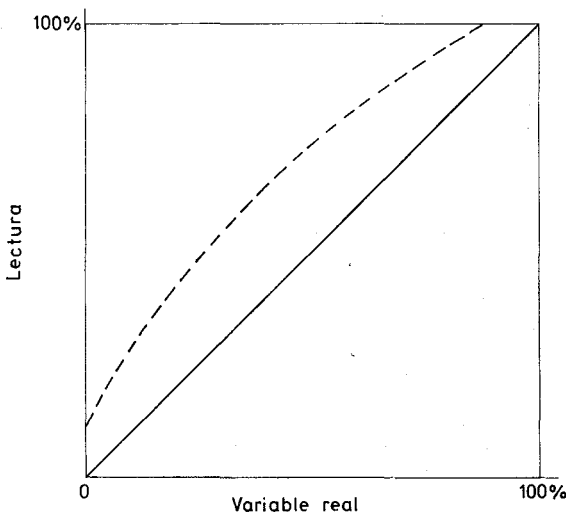


Fig. 10.3 Relación medida real-lectura en un instrumento descalibrado.

del instrumento ya que en este caso consideraríamos el instrumento calibrado aunque no coincidiera exactamente la curva variable-lectura con la recta ideal.

Las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico, tal como el de la figura 10.3, con relación a la recta ideal representan los errores de medida del aparato. Esta curva puede descomponerse en tres que representan individualmente los tres tipos de errores que pueden hallarse en forma aislada o combinada en los instrumentos:

Error de cero. — Todas las lecturas están desplazadas un mismo valor con relación a la recta representativa del instrumento. Este tipo de error puede verse en la figura 10.4, en la que se observará que el desplazamiento puede ser positivo

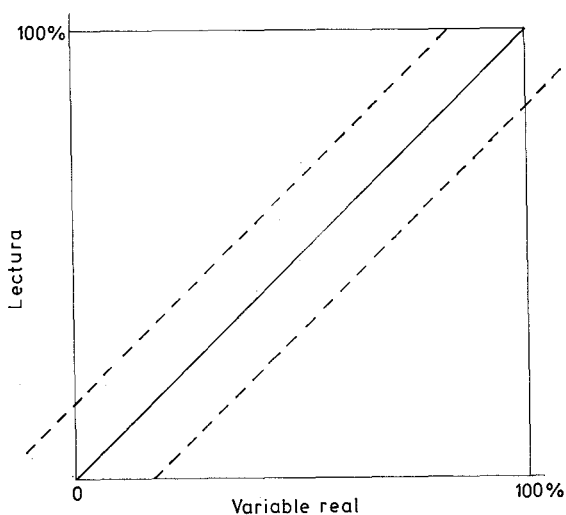


Fig. 10.4 Error de cero.

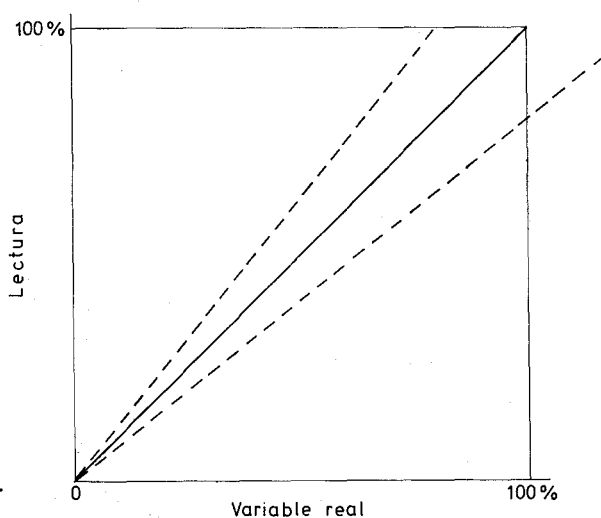


Fig. 10.5 Error de multiplicación.

o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación o la forma de la curva.

Error de multiplicación. — Todas las lecturas aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse en la figura 10.5 en la que se observará que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

Error de angularidad. — La curva real coincide con los puntos 0 y 100 % de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. En la figura 10.6 puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar hacia la mitad de la escala.

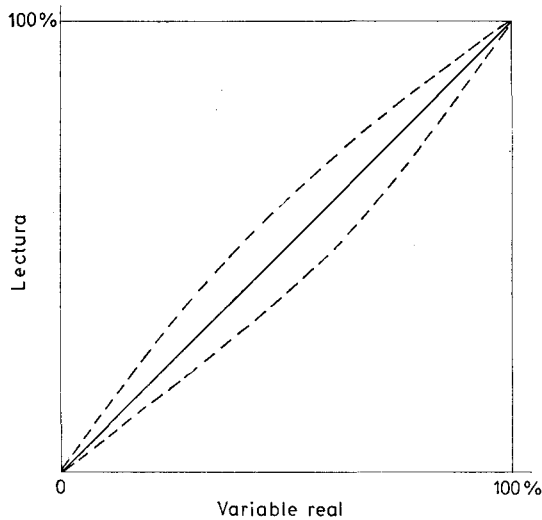


Fig. 10.6 Error de angularidad.

Los instrumentos pueden ajustarse para corregir estos errores, si bien hay que señalar que algunos instrumentos, por su tipo de construcción, no pueden tener error de angularidad. La combinación de estos tres errores da lugar a una curva de relación medida real-lectura, tal como la representada en la figura 10.3.

En general, el error de cero se corrige con el llamado tornillo de cero, que modifica directamente la posición del índice o de la pluma de registro cambiando la curva variable-lectura paralelamente a sí misma, o bien sacando el índice y fijándolo al eje de lectura en otra posición.

El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo de multiplicación (o *span*, en inglés) que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la variable al índice o a la pluma, es decir, que aumenta o disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala.

Para calibrar un instrumento conviene, en primer lugar, eliminar o reducir al mínimo el error de angularidad. Este error es debido fundamentalmente a la

transmisión por palancas del movimiento del elemento primario o de la variable medida al índice de lectura o de registro (fig. 10.7).

El error de angularidad será nulo cuando las palancas queden exactamente a escuadra con la variable al 50 % de su valor. Es fácil ver en la figura que, en esta posición, cualquier cambio angular en la posición del brazo del elemento primario se reproduce en forma lineal en el brazo del índice o de la pluma, y no existe error de angularidad. La operación inicial de situar las palancas perpendiculares entre sí, recibe el nombre de «escuadrado previo de las palancas».

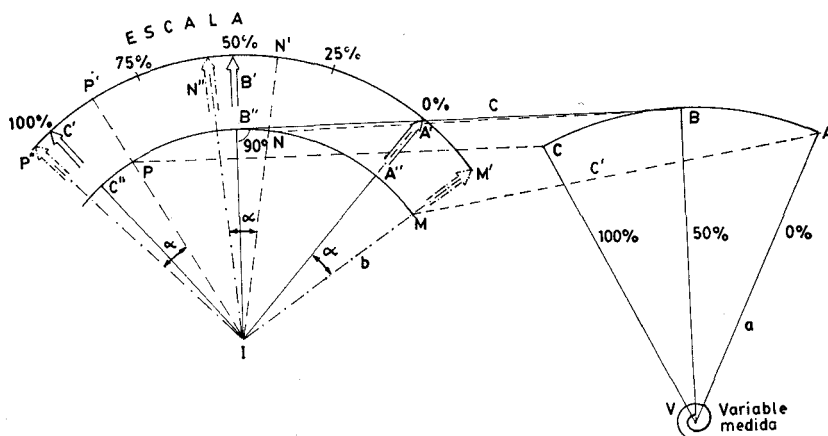


Fig. 10.7 Corrección de angularidad.

Si ahora, con la variable a 0 % se acorta intencionalmente a la longitud c' la varilla c de unión de las palancas, ocurrirá que la posición del brazo de la variable será la VA , y la del índice será IM' , de modo que será necesario ajustar el cero para que el índice pase de IM' a la posición IA' correspondiente a 0 % de la escala. Con este ajuste, el índice ha quedado desplazado un ángulo $M'IA' = \alpha$ con respecto al brazo b . En la figura puede verse que para los valores de la variable de 50 y de 100 %, las posiciones del índice son N'' y P'' , y las de su brazo N y P respectivamente, para las cuales el movimiento de la varilla de unión es mayor entre 0 y 50 %, que entre 50 y 100 %. Por este motivo, la pluma señalará un valor alto para el valor medio de la variable; este valor es el N'' con la condición de que el ángulo $N'IN'' = \alpha$.

El error de angularidad anterior se ha obtenido acortando la varilla de conexión, de modo que para eliminarlo hay que aumentar la longitud de ésta. Pero, con el ajuste de cero efectuado, este alargamiento da lugar a que la pluma señale un valor todavía más alto para el valor medio de la variable.

Por consiguiente, para corregir el error de angularidad es necesario realizarlo en la dirección contraria a la lógica, es decir, en la misma dirección del error.

De lo expuesto se desprende que el error de angularidad puede eliminarse procediendo al escuadrado previo de las palancas para el valor de 50 % de la variable, o bien, actuando sobre el tornillo de angularidad para aumentar el valor

del error en la dirección del mismo. En la práctica se suele considerar que este aumento es de unas cinco veces el error encontrado. Hay que hacer notar que la acción del tornillo de angularidad consiste en realidad en alargar o acortar la longitud de la varilla de unión entre el brazo de la variable y el del índice o pluma. También puede ajustarse la angularidad deslizando la palanca de la variable sobre su eje de tal modo que el ángulo que forma con la palanca de interconexión sea recto para el valor de 50 % de la variable.

Sentadas estas bases, el procedimiento general para calibrar un instrumento será el siguiente:

1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de cero del instrumento hasta que el índice señale el punto de base (fig. 10.8 b).
2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de multiplicación hasta que el índice señale el valor máximo de la variable (fig. 10.8 c).

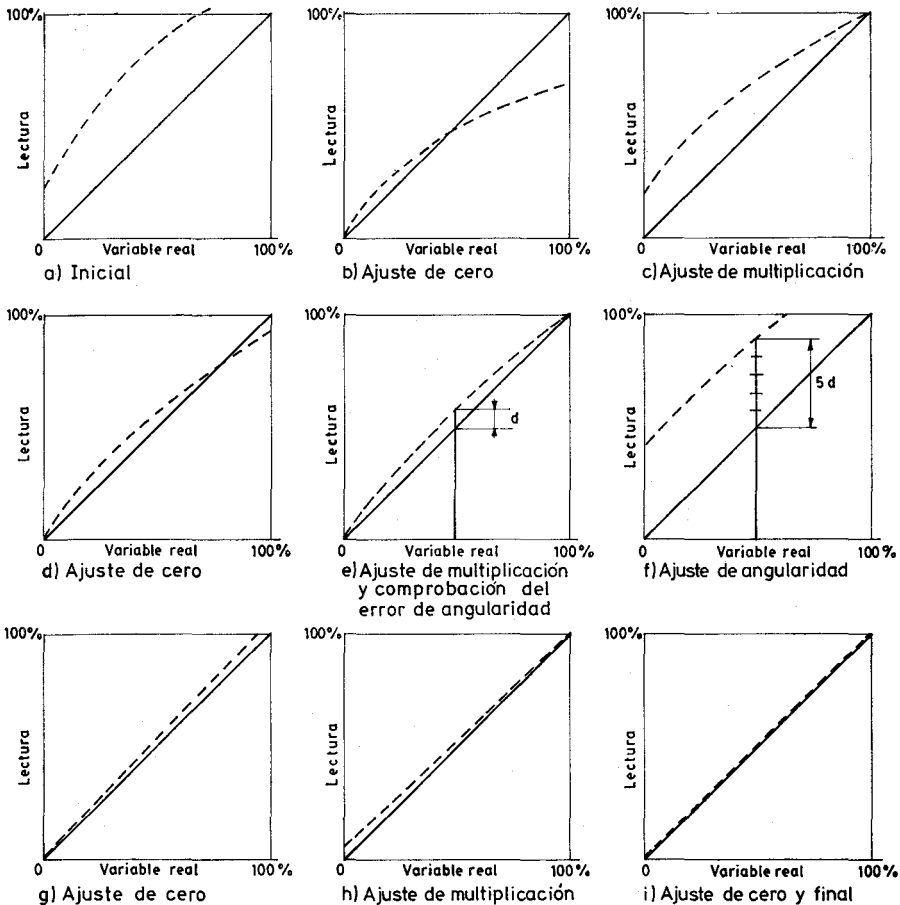


Fig. 10.8 Método general de calibración.

3. Repetir los puntos anteriores 1 y 2 sucesivamente, hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo (figs. 10.8 *d* y *e*).
4. Colocar la variable en el cincuenta por ciento del intervalo de medida, y en este punto ajustar el tornillo de angularidad hasta mover el índice cinco veces el valor del error en la dirección del mismo (la curva real se aplanan). Es de interés señalar que puede prescindirse de este paso procediendo previamente al escuadrado de las palancas para el 50 % de la variable (fig. 10.8 *f*).
5. Reajustar sucesivamente el tornillo de cero y el de multiplicación, hasta conseguir la exactitud deseada o requerida (figs. 10.8 *g*, *h*, *i*). Si fuera necesario, efectuar una nueva corrección de angularidad.

Este procedimiento es general, con la salvedad de sustituir la palabra «índice» por «pluma» y «señal de salida» en los casos de instrumentos registradores y transmisores neumáticos (señal de salida, 3-15 psi) o electrónicos (4-20 mA c.c.) respectivamente. La posición de los tornillos de ajuste de cero, de multiplicación y de angularidad, varía según el instrumento; algunos tipos carecen de alguno de ellos. En particular debe señalarse que los termómetros bimetálicos tienen usualmente tornillo de cero; los manómetros poseen tornillo de cero (o en su lugar es posible desmontar el índice y ajustarlo al eje en otra posición), de multiplicación y de angularidad, y los instrumentos electrónicos no suelen tener error de angularidad (figura 10.9).

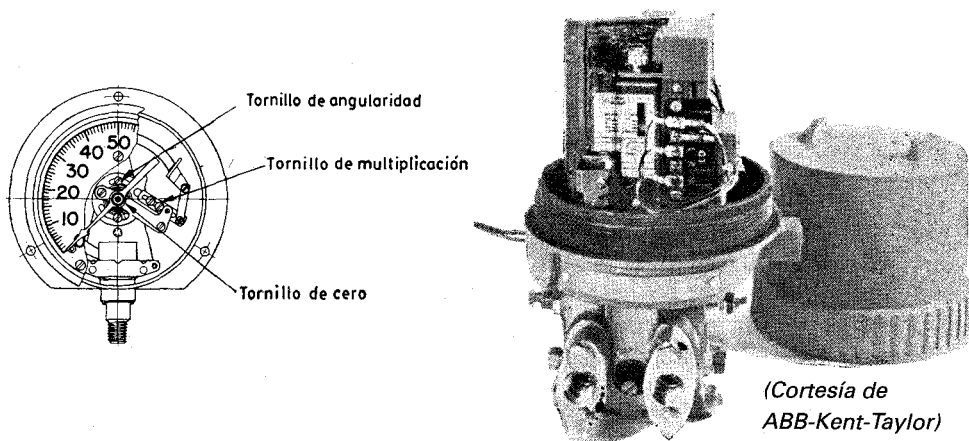


Fig. 10.9 Tornillos de ajuste de cero, multiplicación y angularidad.

Lo dicho hasta ahora se refiere a los instrumentos convencionales neumáticos y electrónicos. En los instrumentos digitales «inteligentes», en particular en los transmisores, la calibración se ve facilitada por la «inteligencia» proporcionada por el microprocesador incorporado en el instrumento. Éste guarda digitalmente en una EPROM los datos que proporcionan correcciones precisas de las no linealidades de los sensores ante variaciones en la temperatura y en la presión am-

biente, para toda la vida útil del instrumento. Se encuentran grabados unos 126 puntos o más en lugar de los cinco típicos (0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %) con los que se calibra un instrumento convencional. Un comunicador portátil dotado de visualizador de cristal líquido y teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor, o bien desde el controlador, o desde cualquier punto de la línea de conexión (dos hilos), el estado y calibración del transmisor. Estos instrumentos presentan pues la ventaja de que no es necesaria su calibración. En todo caso, puede ajustarse el aparato enviando a través del teclado alfanumérico del comunicador el número de identificación del instrumento y los valores inferior y superior del campo de medida con los que se desea reajustar el aparato.

Si se presenta una avería directa en el elemento en contacto con el proceso (por ejemplo, una perforación en la membrana de un transmisor de nivel) precisará el cambio del aparato o el del módulo en contacto con el proceso, pero tampoco será necesaria la calibración en el taller con aparatos patrón. A señalar que la utilización de los instrumentos «inteligentes» representa un ahorro del 95 % con relación a los costos de recalibración de los instrumentos convencionales.

La exposición precedente se ha referido a los instrumentos representativos. Es evidente que el sistema de calibración es general, si bien, en algunos instrumentos particulares existen otros procedimientos más rápidos que están incluidos en el manual de instrucciones del fabricante.

Otros tipos de errores provienen de la lectura del instrumento por el observador, y son:

Error de paralaje, que se produce cuando el observador efectúa la lectura de modo que su línea de observación al índice no es perpendicular a la escala del instrumento. La importancia de este error depende de la separación entre el índice y la escala y del ángulo de inclinación de la línea de observación. Para disminuirlo, algunos instrumentos tienen el sector graduado separado de la escala y a muy poca distancia del índice, y otros poseen un sector especular, con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.

Error de interpolación, que se presenta cuando el índice no coincide exactamente con la graduación de la escala, y el observador redondea sus lecturas por exceso o por defecto.

Evidentemente, estos errores de paralaje y de interpolación no existen en los instrumentos de salida digital.

La calibración de los instrumentos requiere disponer de aparatos patrones y de dispositivos de comprobación colocados usualmente en el taller de instrumentos.

La precisión de estos instrumentos patrón debe ser como mínimo 1/4 de la precisión de los instrumentos a comprobar (Normas DIN 16-005, Mil-std-45662A). Es decir, si el instrumento a comprobar tiene una precisión de $\pm 0,5 \%$, el instrumento patrón debe tener un mínimo de precisión de $\pm 0,125 \%$. Si los aparatos patrón tienen una precisión de 1/10 de los instrumentos a comprobar, su efecto sobre la medida puede ignorarse.

10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal

Para calibrar los *instrumentos de presión* pueden emplearse varios dispositivos que figuran a continuación, y que utilizan en general manómetros patrón.

Los manómetros patrón (fig. 10.10) se emplean como testigos de la correcta calibración de los instrumentos de presión. Son manómetros de alta precisión con

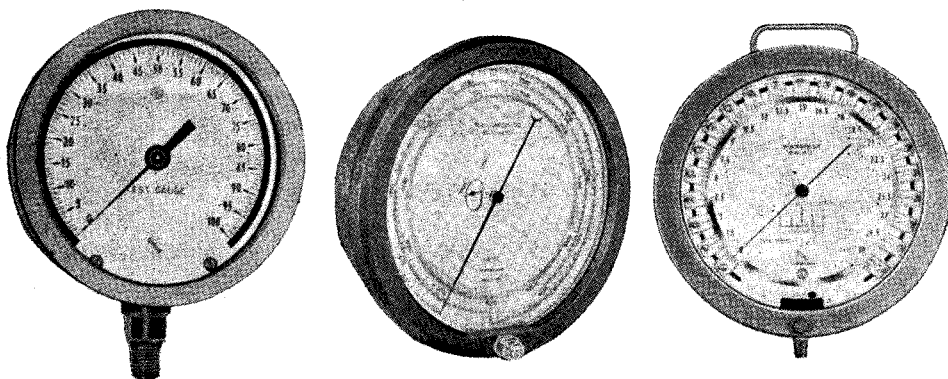


Fig. 10.10 Manómetros patrón.

un valor mínimo de 0,2 % de toda la escala. Esta precisión se consigue de varias formas:

1. Dial con una superficie especular, de modo que la lectura se efectúa por coincidencia exacta del índice y de su imagen, eliminando así el error de paralaje.
2. Dial con graduación lineal, lo que permite su fácil y rápida calibración.
3. Finura del índice y de las graduaciones de la escala.
4. Compensación de temperatura con un bimetálico.
5. Tubo Bourdon de varias espiras.
6. Se consigue una mayor precisión (de 0,1 %) situando marcas móviles para cada incremento de lectura del instrumento.

También pueden utilizarse como aparatos patrón de presión, los transmisores digitales inteligentes, por la precisión elevada que poseen, del orden del $\pm 0,2$ %.

La calibración periódica de los manómetros patrón se consigue con el *comprobador de manómetros de peso muerto*, o con el *digital*.

Puede verse en la figura 10.11, y consiste en una bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón que se está comprobando, y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas.

La calibración se lleva a cabo accionando la bomba hasta levantar el pistón con las pesas y haciendo girar éstas con la mano; su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas está flotando sin roces. Una

pequeña válvula de alivio de paso fino y una válvula de desplazamiento, permiten fijar exactamente la presión deseada cuando se cambian las pesas en la misma prueba para obtener distintas presiones, o cuando se da inadvertidamente una presión excesiva.

Existen dos tipos de pistones, de baja y de alta presión, con juegos de pesas que permiten obtener márgenes muy variados (por ejemplo: 0-20, 2-100, 30-150, 70-350, 140-700 bar).

La precisión de la medida llega a ser del orden de 0,1 %. Un comprobador de manómetros de peso muerto puede alcanzar una precisión de $\pm 0,06$ %, y los pistones y las pesas utilizados pueden certificarse a $\pm 0,008$ %. El uso frecuente del comprobador puede degradar la precisión en $\pm 0,015$ % por año, por lo que puede ser necesaria una recertificación periódica.

El *comprobador de manómetros portátil* utiliza la misma bomba empleada en el comprobador anterior (fig. 10.11 b) y se utiliza para comprobar manómetros e instrumentos de presión, utilizando un manómetro patrón. Su funcionamiento es parecido al del comprobador anterior, excepto que las dos conexiones de salida se destinan una al manómetro patrón y la otra al instrumento de presión a comprobar.

El *comprobador de manómetros digital* (fig. 10.11 d) consiste en un tubo Bourdon con un espejo soldado que refleja una fuente luminosa sobre un par de fotodiodos equilibrados. Se genera así una señal de corriente que crea un par igual y opuesto al de la presión que actúa sobre el tubo Bourdon. Una resistencia de precisión crea una señal de tensión directamente proporcional a la presión del sistema.

Complementando el instrumento anterior con potenciómetros de ajuste y una servoválvula se obtiene un *comprobador de presión de precisión* (fig. 10.11 e). La precisión del comprobador de manómetros digital alcanza $\pm 0,003$ % de toda la escala, con una estabilidad de $\pm 0,005$ % de la lectura.

Añadiendo un ordenador y el software adecuado se consigue una automatización de la calibración con salida gráfica y por impresora, lo que permite satisfacer los requerimientos de la norma de calidad ISO 9000.

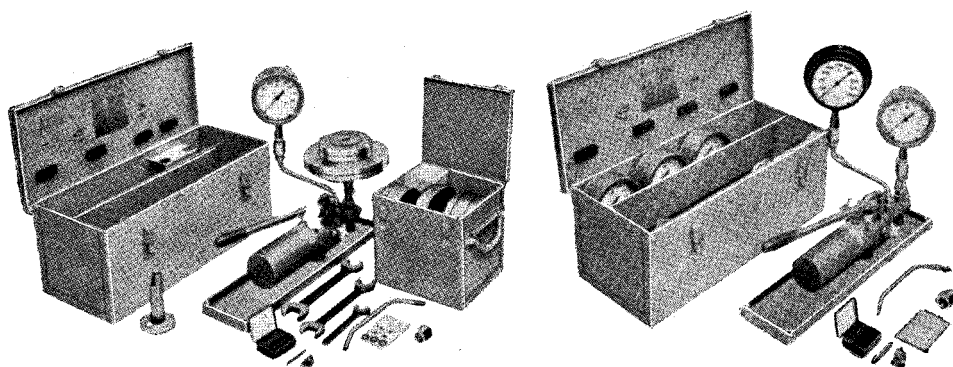
Para presiones bajas, del orden de 1 bar, se emplean *columnas de mercurio* portátiles para pruebas en campo, o de fijación mural en el taller de instrumentos. Según el modelo disponen de tres tipos de graduaciones: 0-1000 mm columna de mercurio (c. de Hg.), 0-1,4 bar o de 0-20 psi. Estas columnas de mercurio tienen conexiones en la parte inferior y superior aptas para la medida de presión y de vacío, respectivamente.

Para la medida de presiones más bajas se utilizan *columnas de agua* hasta 1,5 m de longitud, que tienen asimismo conexiones en la parte inferior y superior para medir presión o vacío, respectivamente.

Las columnas de mercurio y de agua descritas y un juego de manómetros patrón, se disponen generalmente en un panel o banco de pruebas de instrumentos que incorpora una bomba de vacío y filtros manorreductores de aire de precisión conectados al aire de instrumentos de la planta.

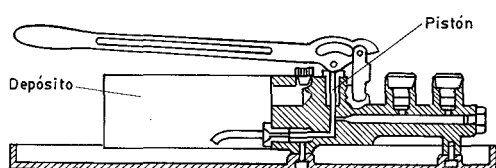
En la figura 10.12 puede verse un esquema del banco de pruebas de instrumentos.

Los *calibradores de presión portátiles de precisión* son un buen sustituto del banco

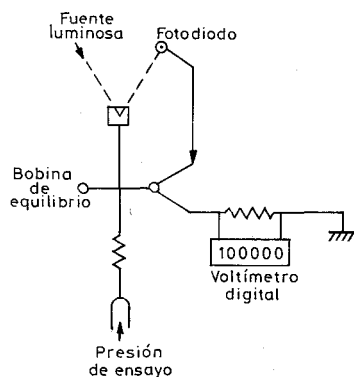
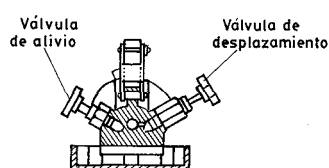


a) Comprobador de manómetros de peso muerto

b) Comprobador de manómetros portátil



c) Sección del comprobador



d) Comprobador de medida digital

e) Comprobador de control de presión

Fig. 10.11 Comprobador de manómetros de peso muerto, portátil y digital.

de pruebas de instrumentos descrito para presiones hasta 20 bar. Mediante una bomba manual pueden generar vacíos hasta -800 mbar y presiones hasta 20 bar. En la figura 10.12 c puede verse un esquema del calibrador. Los resultados de la calibración pueden almacenarse en la memoria del instrumento y analizarse más adelante o transferirse a un ordenador vía la interfaz RS232. El sistema de calibración integrado permite el uso de la norma de calidad ISO 9000. El calibrador alcanza una precisión de $\pm 0,05\%$ de la lectura de presión efectuada.

Un instrumento de nivel de presión diferencial se calibra disponiéndolo en el banco de pruebas con la conexión de alta conectada a un manorreductor y a

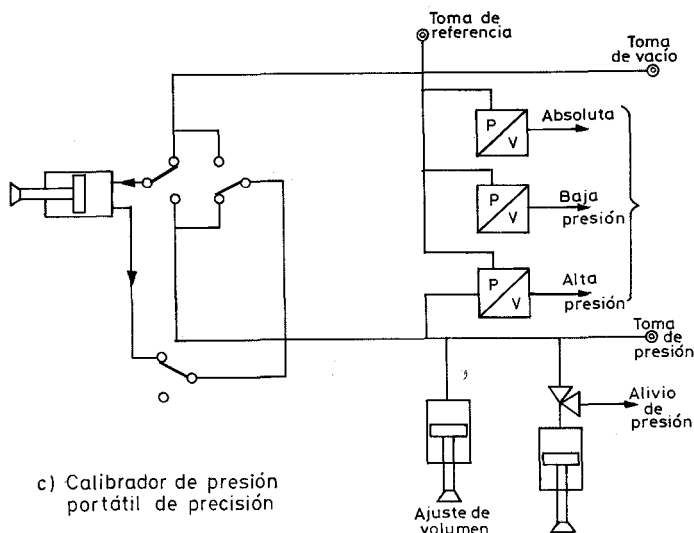
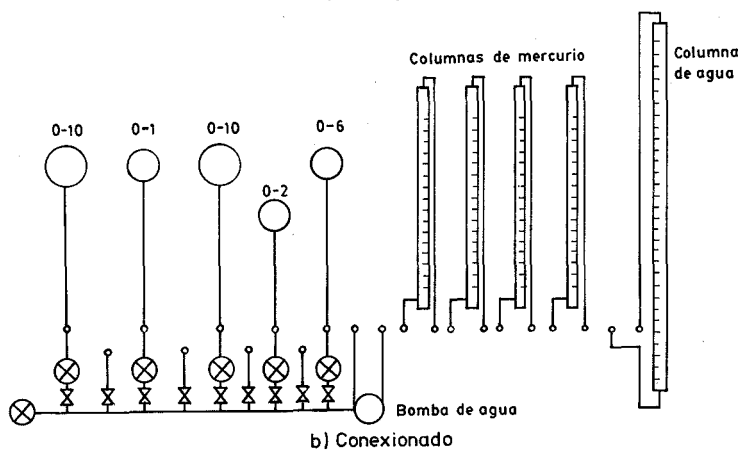
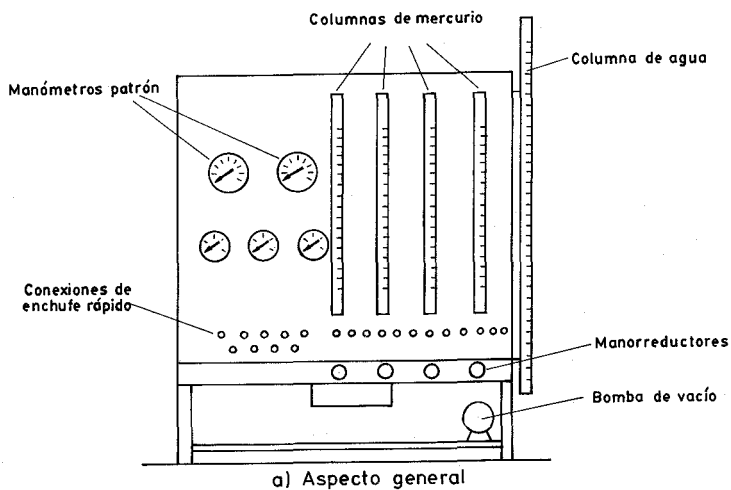


Fig. 10.12 Banco de pruebas de instrumentos.

una columna de agua o de mercurio para simular el campo de medida y la conexión de baja abierta a la atmósfera; la parte transmisora neumática o electrónica se alimenta aparte y su señal de salida va a una columna de mercurio del banco, en caso de señal neumática, o a una maleta comprobadora de instrumentos electrónicos en caso de señal eléctrica. La simulación del campo de medida se consigue transformando a presión la altura del líquido en el tanque del proceso y reproduciendo esta presión con el manorreductor del banco de pruebas.

Un instrumento de nivel de desplazamiento se calibra conectándolo a un tubo en U transparente que permite ver la altura de agua. La variación de la altura de agua en el tubo simula los puntos de nivel en todo el campo de medida y en el ensayo se sitúa el ajuste de densidad del instrumento en el valor 1. Una vez calibrado el instrumento bastará cambiar el ajuste de densidad al valor que tenga el líquido del proceso. En algunos instrumentos, el fabricante proporciona pesos calibrados para simular el nivel; en este caso no hay necesidad de sumergir el flotador en agua.

Los rotámetros no pueden calibrarse, exceptuando la parte transmisora cuando la llevan incorporada.

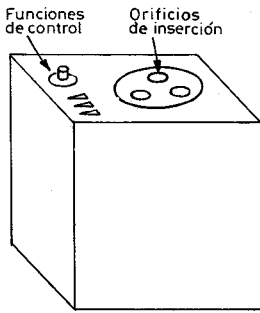
Los rotámetros para líquidos se comprueban haciendo pasar agua, de modo tal que la indicación del rotámetro se mantenga en un valor constante y recogiendo el agua en un tanque de capacidad conocida o en un depósito colocado sobre una báscula. Esta capacidad dividida por el tiempo transcurrido en la experiencia dará el caudal, que deberá coincidir con la indicación del rotámetro, teniendo en cuenta naturalmente las correcciones de peso específico, temperatura y viscosidad del fluido real comparado con el agua (fluido de ensayo). La comprobación del rotámetro puede realizarse también intercalando otro rotámetro de precisión en serie y comparando las dos indicaciones.

Los rotámetros para gases se calibran con un rotámetro de precisión en serie haciendo pasar aire. Se comparan las dos indicaciones afectadas de los correspondientes factores de corrección de peso específico, temperatura y presión. Otro sistema de calibración, utilizado en rotámetros de pequeño tamaño, emplea un tubo cilíndrico graduado con un pistón sellado mediante mercurio para evitar fugas. Al bajar el pistón con regularidad hace pasar aire a través del rotámetro bajo observación. El volumen de aire gastado dividido por la duración del ensayo, medida mediante un cronómetro, da el caudal que debe corresponderse con la posición del flotador afectada lógicamente de los coeficientes de corrección correspondientes.

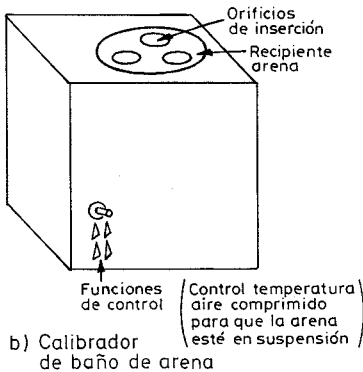
10.4 Calibración de instrumentos de temperatura

Para la calibración de instrumentos de temperatura se emplean *baños de temperatura* (calibradores de bloque metálico, de baño de arena y de baño de líquido), hornos y comprobadores potenciométricos.

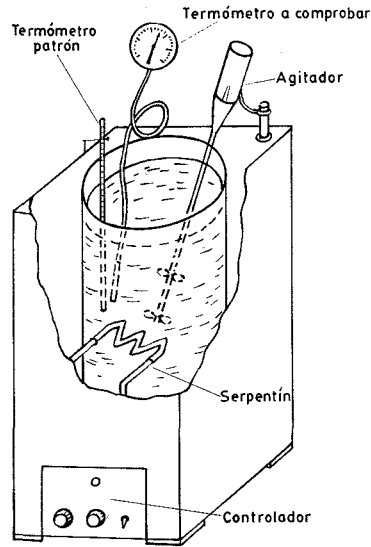
El *calibrador de bloque metálico* (figura 10.13 a) consiste en un bloque metálico calentado por resistencias con un controlador de temperatura de precisión ($\pm 2^\circ \text{C}$) adecuado para aplicaciones de alta temperatura (-25 a 1200°C). El control de tem-



a) Calibrador de bloque metálico



b) Calibrador de baño de arena



c) Calibrador de baño de líquido

Fig. 10.13 Baño de temperaturas.

peratura se realiza con aire comprimido, lo que permite reducir la temperatura desde 1200°C a la ambiente en unos 10-15 minutos. En el calibrador hay orificios de inserción para introducir un termopar patrón y la sonda de temperatura a comprobar. Pueden programarse las temperaturas y la pendiente de subida o bajada y comunicarse a un ordenador.

El *calibrador de baño de arena* (figura 10.13 b) consiste en un depósito de arena muy fina que contiene tubos de inserción para la sonda de resistencia o el termopar patrón y para las sondas de temperatura a comprobar. La arena caliente es mantenida en suspensión por medio de una corriente de aire, asegurando así la distribución uniforme de temperaturas a lo largo de los tubos de inserción.

El *calibrador de baño de líquido* (figura 10.13 c), consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido, con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un juego de resistencias calefactoras y sobre un refrigerador mecánico dotado de una bobina de refrigeración. En algunos modelos no existe el refrigerador.

El agitador mueve totalmente el líquido, disminuye los gradientes de temperatura en el seno del líquido y facilita una transferencia rápida de calor; el termómetro patrón es de tipo laboratorio, con una gran precisión; el controlador de temperatura puede ser todo-nada, proporcional o proporcional más integral.

TABLA 10.1 Fluidos empleados en el baño de temperaturas

<i>Campo de temperaturas</i>	<i>Fluido</i>	<i>Precisión</i>
-80° C a ambiente	Tricloroetileno	0,005° C máx.
-20° C a ambiente	Mezcla de etilenglicol y agua enfriada por una unidad de refrigeración automática	$\pm 0,1$ a $\pm 0,02^{\circ}$ C
ambiente a 95° C	Agua	$\pm 0,002$ a $\pm 0,005^{\circ}$ C
ambiente a 250° C	Aceite fluido de baja viscosidad, con punto de inflamación superior a 150° C o bien aceite de silicona	$\pm 0,002$ a $\pm 0,03^{\circ}$ C
ambiente a 260° C	Aceite de silicona	$\pm 0,002$ a $0,03^{\circ}$ C
220 a 600° C	Sales especiales que están en estado sólido a temperatura ambiente y en estado de fusión a la temperatura de trabajo	$\pm 0,05$ a 1° C

Los fluidos empleados en el baño son varios, dependiendo del campo de temperatura de trabajo según puede verse en la tabla 10.1.

Los *hornos de temperatura* (fig. 10.14) son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios (termopar...) del instrumento a comprobar.

Si bien estos hornos son de temperatura controlada disponiendo de indicador-controlador, un termopar de precisión y de un juego de resistencias de calentamiento, una calibración muy precisa se conseguirá disponiendo en el interior del horno crisoles con materiales específicos que funden a temperaturas determinadas. En la tabla 10.2 puede verse la Escala Internacional de Temperaturas de 1990, basada en 17 puntos fijos que cubren un intervalo de temperaturas desde -270,15 hasta 1084,62° C.

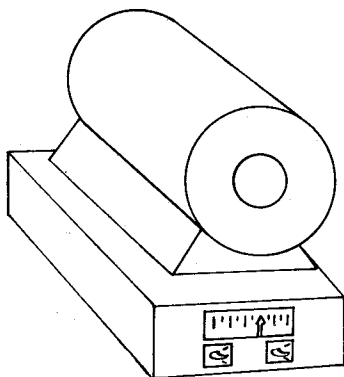


Fig. 10.14 Hornos de temperatura.

Los *comprobadores potenciométricos* se emplean para comprobar las características f.e.m.-temperatura de los termopares, para medir la temperatura con un termopar y para calibrar los instrumentos galvanométricos y potenciométricos. Constan de un galvanómetro, un elemento de estandarización de tensión y un reóstato de selección de f.e.m., combinado con un selector. Esencialmente, el aparato puede medir y generar f.e.m. en corriente continua con varios márgenes que van de 0-0,182 a 0-182 mV, y con tensiones por división de 0,0001 V a 0,1 mV respectivamente. La precisión es elevada, del orden del 0,2 %.

Hay que señalar que debe tenerse en cuenta el efecto de autocompensación de temperatura del instrumento que se está verificando. Para ello se coloca un termómetro de vidrio en la caja del instrumento y se procede del modo siguiente:

1. Se determina la temperatura de la unión fría del instrumento por lectura del termómetro de vidrio.
2. En las tablas de f.e.m. (referidas a 0° C) se determinan los mV correspondientes a la temperatura de la unión fría y los correspondientes a la temperatura a verificar del instrumento.
3. La diferencia algebraica entre los dos valores anteriores se sitúa en el comprobador debiendo el instrumento leer la temperatura a verificar.

Si se desea comprobar el estado de un termopar los pasos a seguir son los anteriores, pero sumando los valores en mV de la temperatura ambiente y de la generada por el termopar. Los mV resultantes se pasan a temperatura mediante la tabla de f.e.m.

TABLA 10.2 Escala Internacional de Temperaturas (año 1990)

Punto fijo N°	Cuerpo	Estado	Temperatura °C
1	He	Vapor	-270,15 a -268,15
2	e-H ₂	Punto triple	-259,3467
3	e-H ₂	Vapor	~ -256,16
4	e-H ₂	Vapor	~ -252,85
5	En	Punto triple	-248,5939
6	O ₂	Punto triple	-218,7916
7	Ar	Punto triple	-189,3442
8	Hg	Punto triple	-38,8344
9	H ₂ O	Punto triple	0,01
10	Ga	Fusión	27,7646
11	In	Solidificación	156,5985
12	Sn	Solidificación	231,928
13	Zn	Solidificación	419,527
14	Al	Solidificación	660,323
15	Ag	Solidificación	961,78
16	Au	Solidificación	1064,18
17	Cu	Solidificación	1084,62

Los comprobadores potenciométricos con microprocesador ahorran muchos de los pasos de calibración anteriores al disponer de compensación automática de la unión fría, y al tener incorporadas en memoria las tablas mV-temperatura de los diferentes tipos de termopares utilizados o bien los polinomios que definen la f.e.m. en función de la temperatura (ver tabla 6.5). De modo análogo ocurre en el comprobador de puente de Wheatstone.

El comprobador de puente de Wheatstone puede verse en la figura 10.15.

Se emplea para comprobar las características de resistencia-temperatura de las sondas de resistencia. La resistencia desconocida X equivale a:

$$X = R_1 \frac{R_2}{R_3}$$

en la que R_1 es una resistencia que se hace variar en múltiplos de 10 (9×1 , 9×10 , 9×100 , 9×1000) y la relación $\frac{R_2}{R_3}$ varía desde 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000. Aquí la temperatura ambiente no tiene influencia y la única precaución a adoptar es hacer las conexiones con cable de sección suficiente que no presente resistencia.

La comprobación de los instrumentos de puente de Wheatstone se lleva a cabo conectándoles cajas de resistencias patrones que, de acuerdo con las tablas correspondientes, equivalgan a las temperaturas deseadas.

La precisión es elevada, del orden de 0,01 a 0,2 %, según sea el campo de medida.

Los calibradores universales de temperatura reúnen en un solo aparato las características de los comprobadores potenciométricos y de puente de Wheatstone descritos, midiendo y generando señales de termopar, termorresistencia, ohm, milivolt, volt y miliampère. Son muy precisos ($\pm 0,02$ %) y pueden estar dotados de capacidad de comunicación RS232 con un ordenador. Un programa de calibración guía directamente al operador proporcionándole las instrucciones de calibración necesarias. Los resultados documentados cumplen los requisitos de la norma de calidad ISO 9000.

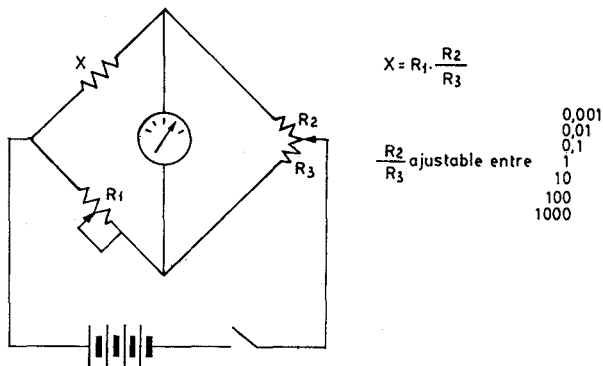


Fig. 10.15 Comprobador de puente de Wheatstone.

10.5 Comprobación de válvulas de control

El banco de prueba de válvulas de control consiste en un juego de bridas, una móvil y la otra fija, con una bomba manual para fijar la válvula, una bomba de agua con circuito intensificador de presión, reguladores de presión y un juego de manómetros patrón. En la figura 10.16 puede verse un esquema simplificado del circuito oleohidráulico y neumático del banco. Las pruebas que se pueden efectuar en las válvulas de control son:

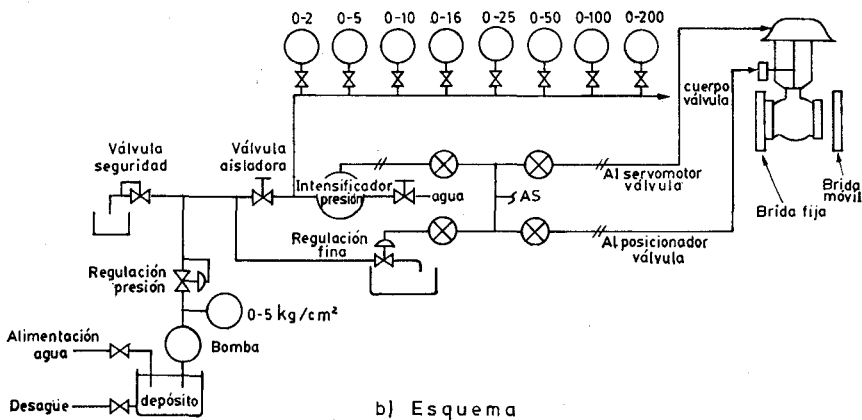
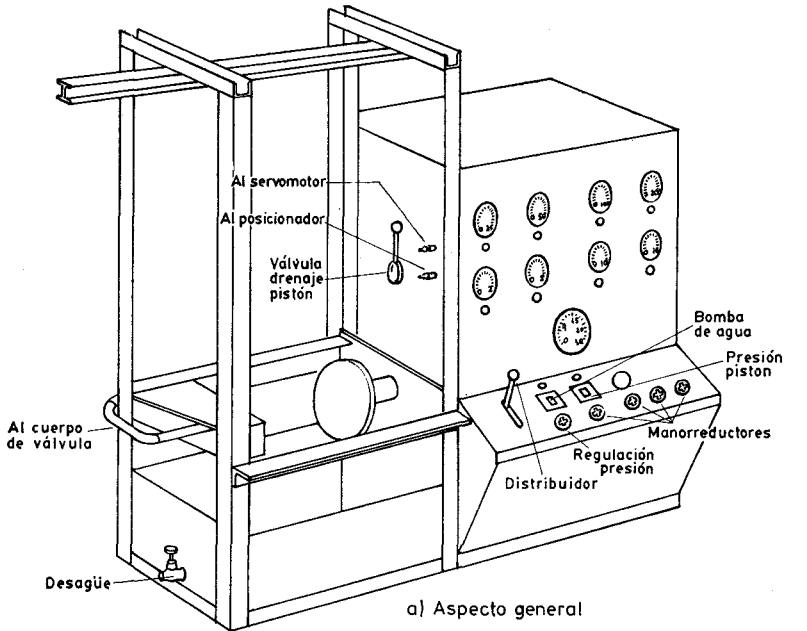


Fig. 10.16 Banco de prueba de válvulas de control.

- Prueba hidrostática del cuerpo de la válvula bombeando el agua a presión a través de la brida fija.
- Prueba de estanqueidad de la estopada.
- Prueba de estanqueidad de la válvula con el obturador en posición de cierre, midiendo la cantidad de agua de fuga en un tiempo dado y comparándola con la dada por el fabricante de la válvula; una cantidad excesiva indicará un desgaste anormal en el cierre obturador-asiento.
- Prueba de funcionamiento de la válvula, medida de su histéresis y, calibración de la misma y prueba del posicionador.

Como es natural, las restantes características de la válvula (determinación del C_v o K_v , determinación de la máxima presión diferencial admisible con la válvula en posición de cierre, etc.) son más bien de interés para el fabricante que determina y garantiza dichos datos que para el usuario. Su determinación obliga a la construcción de bancos de prueba costosos con instrumentos de medida de caudal, bombas de gran capacidad y tuberías de gran longitud, según sea el tamaño de la válvula.

Sin embargo, los datos de fabricación pueden ser facilitados por los fabricantes mediante posicionadores inteligentes montados en la válvula (de acceso local por teclado, o mediante un protocolo de comunicaciones y un ordenador personal) que aportan las siguientes funciones:

- Lazo local de control PID, de ajuste manual o autosintonizable.
- Calibración automática de la válvula.
- Funciones de diagnóstico para el servicio de mantenimiento:
 - Caracterización de la curva característica de la válvula.
 - Rozamiento e histéresis de la válvula.
 - Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).
 - Velocidad del vástago.
 - Análisis dinámico (respuesta ante una entrada en escalón).
 - Histórico de configuración y calibraciones de la válvula.
 - Datos de fábrica y funcionamiento (firmas).

10.6 Aparatos electrónicos de comprobación

Los diversos aparatos utilizados en la detección de averías de los instrumentos electrónicos permiten efectuar todas las operaciones de calibración y prueba de los instrumentos electrónicos, tales como: alimentación del instrumento, suministro de una tensión o corriente de entrada que simule la señal del proceso, indicación de la señal de entrada o salida, comprobación de la sensibilidad, tiempo de respuesta, linealidad e histéresis de los instrumentos y localización rápida de las averías en los bucles de control.

Medidor Geiger para verificación y calibración de instrumentos de radiación que emplean isótopos radiactivos.

Ordenador personal que puede utilizarse como procesamiento de textos, bases de datos, calibración automática y como registro general de variables de proceso mediante placas de entrada y salida de datos.

Osciloscopio, que permite comprobar partes del circuito de un instrumento electrónico por comparación de las curvas de salida con las dadas por el fabricante, aparte del uso normal del mismo en la detección general de averías en los circuitos electrónicos y en la medida de tensiones. Su precisión típica es de 3 a 5 % para frecuencias hasta 100 Hz. A señalar que en algunas aplicaciones es sustituido por el ordenador personal.

Estabilizador de tensión, para la alimentación general de los aparatos electrónicos del taller.

Polímetro general, para medidas generales de tensión, intensidad, resistencia y capacidad.

Voltímetro digital de c.c., que permite medir tensiones con una precisión de $\pm 0,1$ % e incluso de $\pm 0,01$ %.

Generador de funciones.

Estroboscopio.

Tacómetros.

Otros accesorios forman parte del taller de instrumentos, y entre ellos se encuentran:

Tornos de pequeñas dimensiones, máquinas para limpieza de piezas grandes y medianas, máquinas de taladrar, fijas y portátiles, pulidora, herramientas varias de taller (equipo para soldadura de plata, soldador eléctrico, soldador a la autógena, juego de llaves inglesas y fijas, cortador de juntas, cortatubos, machos y terrajas de roscar, etc.), equipo especial de soldadura para la fabricación de termopares, etc.

Herramientas manuales (destornilladores de relojero, pinzas, llaves inglesas y de tubo, limpiadores de plumilla para aparatos registradores, martillos, alicates, mordazas, sierras de mano, etc.).

Conjuntos de emisor-receptor portátil para intercomunicación en la calibración de instrumentos y detección de averías en la planta.

10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002

La norma ISO 9000 (ISO es International Organization for Standardization) fue publicada en 1987 y consta de cinco partes:

- ISO 9000. Generalidades.
- ISO 9001. Proyecto, fabricación, instalación y servicios.

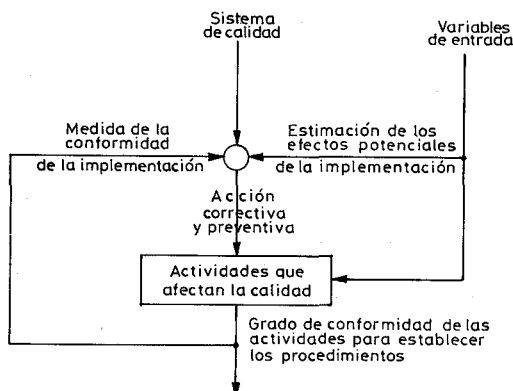


Fig. 10.17 Lazo de control ISO 9000.

- ISO 9002. Producción e instalación.
- ISO 9003. Inspección y ensayo final del producto.
- ISO 9004. Sistemas de dirección de la calidad.

La norma ISO 9002 abarca específicamente la dirección de la calidad en el proceso de producción del producto y define, en forma de instrucciones y procedimientos, la forma específica en que debe operar una empresa. Todo el conjunto de la información generada constituye el Sistema de Calidad, el cual asegura a los clientes de la empresa que los productos que ellos compran están perfectamente controlados. La calidad queda mejor asegurada a través del control de la fabricación y de los procesos, que después de la inspección de los productos terminados.

En la figura 10.17 puede verse una representación en forma de lazo de control de realimentación y anticipativo de la Norma ISO 9000.

Desde el punto de vista de la aplicación de la norma ISO 9002, el término *verificación* de los instrumentos significa «la comprobación de que cada instrumento incluido dentro de la norma ISO 9002 está dentro de la tolerancia en la medida aceptada por el Departamento de fabricación de la empresa». Esta definición se aparta de la clásica de calibración «realización de las operaciones necesarias para que el instrumento tenga los mínimos errores posibles como si hubiera salido de inspección de la fábrica del suministrador».

Con relación al apartado de «Equipos de inspección, medida y ensayo», el sistema de calidad ISO 9002 establece que el suministrador de un producto debe:

- Identificar, calibrar y ajustar todo el equipo de inspección, medida y ensayo que puede afectar la calidad del producto, a intervalos definidos con relación a equipos de calibración certificados por un organismo reconocido.
- Establecer, documentar y mantener los procedimientos de calibración de los instrumentos y de los equipos de calibración.
- Asegurar que las condiciones ambientales son adecuadas para las operaciones de calibración, inspección, medida y ensayos que se efectúen en los instrumentos.

La implantación de la norma ISO 9002 presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados (clave en la obtención de la calidad esperada del producto fabricado por la empresa), la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no conformidad de los instrumentos y equipos de calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9002, y la creación de un área separada dentro del taller de instrumentos donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que posea sobre el trabajo en la planta. Normalmente suele ser de un año para los aparatos normales.

A señalar que existen en el mercado calibradores compactos controlados por microprocesador para la calibración de presión, temperatura, frecuencia y otras variables de proceso, que, ligados con un PC, automatizan el proceso de calibración permitiendo almacenar en disquete y registrar en impresora los datos de los instrumentos calibrados. Las compañías que suministran estas herramientas indican que constituyen el sistema ideal de calibración para cumplir con la norma ISO 9000, y de hecho lo son, puesto que alcanzan una precisión del orden de $\pm 0,05\%$.

Aparentemente, la implantación de la norma ISO 9002 parece sencilla, pero no es una tarea fácil. Es necesario que el equipo de calibración esté certificado por un organismo reconocido, que dicho equipo se calibre periódicamente así como los instrumentos de medición y control afectados, que se identifiquen perfectamente los instrumentos, se entrene al personal y que todo ello esté perfectamente documentado. Supone una mentalidad totalmente nueva dentro de la empresa englobando a todos sus departamentos y personal y contando con su convencimiento y con su aportación individual. Si no es así, será difícil conseguir una implantación adecuada.

ÍNDICE

Prólogo	XV
Prólogo a la sexta edición.....	XVII
 Capítulo 1 Generalidades	 1
1.1 Introducción	1
1.2 Definiciones en control	2
1.2.1 Campo de medida (<i>range</i>)	3
1.2.2 Alcance (<i>span</i>)	4
1.2.3 Error	4
1.2.4 Incertidumbre de la medida (<i>uncertainty</i>)	5
1.2.5 Exactitud	7
1.2.6 Precisión (<i>accuracy</i>)	7
1.2.7 Zona muerta (<i>dead zone</i> o <i>dead band</i>)	8
1.2.8 Sensibilidad (<i>sensitivity</i>)	8
1.2.9 Repetibilidad (<i>repeatability</i>)	9
1.2.10 Histéresis (<i>hysteresis</i>)	9
1.2.11 Otros términos	10
1.3 Clases de instrumentos	12
1.3.1 En función del instrumento	12
1.3.2 En función de la variable de proceso	20
1.3.3 Código de identificación de instrumentos	22
 Capítulo 2 Transmisores	 51
2.1 Generalidades	51
2.2 Transmisores neumáticos	53
2.2.1 Bloque amplificador de dos etapas	53
2.2.2 Transmisor de equilibrio de movimientos	56
2.2.3 Transmisor de equilibrio de fuerzas	57
2.2.4 Transmisor de equilibrio de momentos	58
2.3 Transmisores electrónicos	58
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	58
2.3.1.1 Detector de posición de inductancia	58
2.3.1.2 Transformador diferencial	60
2.3.2 Transmisores digitales	60
2.4 Comunicaciones	65
2.5 Comparación de transmisores	69

Capítulo 3	Medidas de presión.....	71
3.1	Unidades y clases de presión.....	71
3.2	Elementos mecánicos.....	73
3.3	Elementos neumáticos.....	75
3.4	Elementos electromecánicos.....	76
3.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas....	76
3.4.2	Transductores resistivos.....	78
3.4.3	Transductores magnéticos.....	79
3.4.4	Transductores capacitivos.....	80
3.4.5	Galgas extensométricas (<i>strain gage</i>).....	81
3.4.6	Transductores piezoeléctricos.....	83
3.5	Elementos electrónicos de vacío.....	84
3.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y de diafragma....	84
3.5.2	Medidor McLeod.....	84
3.5.3	Transductores térmicos.....	86
3.5.4	Transductores de ionización.....	87
Capítulo 4	Medidas de caudal.....	91
4.1	Medidores volumétricos.....	92
4.1.1	Instrumentos de presión diferencial.....	92
4.1.1.1	Fórmula general.....	92
4.1.1.2	Elementos de presión diferencial.....	105
4.1.1.3	Resumen de las normas ISO 5167-1980.....	107
4.1.1.4	Tubo Pitot.....	128
4.1.1.5	Tubo Annubar.....	129
4.1.1.6	Transmisores de fuelle y de diafragma.....	130
4.1.1.7	Integradores.....	134
4.1.2	Área variable (rotámetros).....	136
4.1.3	Velocidad.....	146
4.1.3.1	Vertederos y Venturi.....	146
4.1.3.2	Turbinas.....	150
4.1.3.3	Transductores ultrasónicos.....	151
4.1.4	Fuerza (medidor de placa).....	153
4.1.5	Tensión inducida (medidor magnético).....	154
4.1.5.1	Medidor magnético de caudal.....	154
4.1.6	Desplazamiento positivo.....	171
4.1.6.1	Medidor de disco oscilante.....	171
4.1.6.2	Medidor de pistón oscilante.....	172
4.1.6.3	Medidor de pistón alternativo.....	173
4.1.6.4	Medidor rotativo.....	173
4.1.6.5	Medidor de paredes deformables.....	175
4.1.6.6	Accesorios.....	176
4.1.7	Torbellino y Vórtex.....	177
4.1.8	Oscilante.....	179
4.2	Medidores de caudal masa.....	179
4.2.1	Compensación de variaciones de densidad del fluido en medidores volumétricos.....	180

	4.2.2	Medición directa del caudal-masa	185
	4.2.2.1	Medidores térmicos de caudal.....	186
	4.2.2.2	Medidores de momento angular.....	187
	4.2.2.3	Medidor de Coriolis.....	189
	4.3	Comparación de características de los medidores de caudal.....	192
Capítulo	5	Medición de nivel.....	193
	5.1	Medidores de nivel de líquidos	193
	5.1.1	Instrumentos de medida directa.....	194
	5.1.2	Instrumentos basados en la presión hidrostática. Medidor manométrico. Membrana. Burbujeo. Presión diferencial.....	197
	5.1.3	Instrumento basado en el desplazamiento.....	205
	5.1.4	Instrumentos basados en características eléctricas del líquido	207
	5.2	Medidores de nivel de sólidos.....	213
	5.2.1	Detectores de nivel de punto fijo	214
	5.2.2	Detectores de nivel continuos.....	218
Capítulo	6	Medida de temperatura.....	223
	6.1	Introducción.....	223
	6.2	Termómetro de vidrio.....	224
	6.3	Termómetro bimetálico.....	225
	6.4	Termómetro de bulbo y capilar.....	225
	6.5	Termómetros de resistencia	227
	6.6	Termistores.....	236
	6.7	Termopares	237
	6.7.1	Leyes, curvas y tablas características, tubos de protección y su selección	237
	6.7.2	Circuito galvanométrico	268
	6.7.3	Circuito potenciométrico.....	270
	6.7.4	Comparación entre circuitos galvanométricos y potenciométricos	276
	6.7.5	Verificación de un instrumento y de un termopar.....	276
	6.8	Pirómetros de radiación.....	277
	6.8.1	Pirómetros ópticos.....	278
	6.8.2	Pirómetro de infrarrojos.....	279
	6.8.3	Pirómetro fotoeléctrico.....	281
	6.8.4	Pirómetros de radiación total.....	282
	6.9	Velocidad de respuesta de los instrumentos de temperatura	296
	6.10	Tabla comparativa de características	300
Capítulo	7	Otras variables.....	301
	7.1	Variables físicas.....	301
	7.1.1	Peso.....	301
	7.1.2	Velocidad	307

	7.1.2.1	Tacómetros mecánicos.....	308
	7.1.2.2	Tacómetros eléctricos.....	308
7.1.3		Densidad y peso específico.....	310
	7.1.3.1	Introducción.....	310
	7.1.3.2	Areómetros.....	311
	7.1.3.3	Métodos de presión diferencial.....	312
	7.1.3.4	Método de desplazamiento.....	314
	7.1.3.5	Refractómetro.....	315
	7.1.3.6	Método de radiación.....	316
	7.1.3.7	Método de punto de ebullición.....	317
	7.1.3.8	Medidor de ultrasonidos.....	317
	7.1.3.9	Medidores inerciales.....	319
	7.1.3.10	Medidor de Coriolis.....	321
	7.1.3.11	Medidores de balanza.....	322
7.1.4		Humedad y punto de rocío.....	323
	7.1.4.1	Humedad en aire y gases.....	324
	7.1.4.2	Humedad en sólidos.....	327
	7.1.4.3	Punto de rocío.....	329
7.1.5		Viscosidad y consistencia.....	334
	7.1.5.1	Introducción.....	334
	7.1.5.2	Viscosímetros.....	336
	7.1.5.3	Medidores de consistencia.....	337
	7.1.5.4	Tabla comparativa.....	339
7.1.6		Llama.....	339
	7.1.6.1	Detector de calor.....	340
	7.1.6.2	Detectores de ionización-rectificación.....	340
	7.1.6.3	Detectores de radiación.....	341
	7.1.6.4	Tabla comparativa de detectores.....	343
	7.1.6.5	Programadores.....	343
7.1.7		Oxígeno disuelto.....	346
7.1.8		Turbidez.....	347
7.1.9		Intensidad de radiación solar.....	348
7.2		Variables químicas.....	349
	7.2.1	Conductividad.....	349
	7.2.2	pH.....	353
	7.2.3	Redox (potencial de oxidación-reducción).....	357
	7.2.4	Concentración de gases.....	358
	7.2.4.1	Conductividad térmica.....	358
	7.2.4.2	Paramagnetismo del oxígeno.....	360
	7.2.4.3	Analizador de infrarrojos.....	362
Capítulo	8	Elementos finales de control.....	365
8.1		Válvulas de control.....	365
	8.1.1	Generalidades.....	365
	8.1.2	Tipos de válvulas.....	366
	8.1.2.1	Válvula de globo.....	366

8.1.2.2	Válvula en ángulo	366
8.1.2.3	Válvula de tres vías.....	368
8.1.2.4	Válvula de jaula.....	368
8.1.2.5	Válvula de compuerta.....	368
8.1.2.6	Válvula en Y	368
8.1.2.7	Válvula de cuerpo partido	368
8.1.2.8	Válvula Saunders.....	368
8.1.2.9	Válvula de compresión	369
8.1.2.10	Válvula de obturador excéntrico rotativo	369
8.1.2.11	Válvula de obturador cilíndrico excéntrico...	369
8.1.2.12	Válvula de mariposa	369
8.1.2.13	Válvula de bola.....	370
8.1.2.14	Válvula de orificio ajustable.....	370
8.1.2.15	Válvula de flujo axial.....	370
8.1.3	Cuerpo de la válvula.....	371
8.1.4	Tapa de la válvula	374
8.1.5	Partes internas de la válvula. Obturador y asientos...	377
8.1.5.1	Generalidades.....	377
8.1.5.2	Materiales	378
8.1.5.3	Características de caudal inherente.....	379
8.1.5.4	Características de caudal efectivas	382
8.1.5.5	Selección de la característica de la válvula ...	385
8.1.6	Corrosión y erosión en las válvulas. Materiales.....	391
8.1.7	Servomotores.....	400
8.1.7.1	Servomotor neumático.....	400
8.1.7.2	Servomotor eléctrico.....	412
8.1.7.3	Tipos de acciones en las válvulas de control	416
8.1.8	Accesorios.....	418
8.1.8.1	Camisa de calefacción.....	418
8.1.8.2	Posicionador.....	419
8.1.8.3	Volante de accionamiento manual	424
8.1.8.4	Repetidor.....	424
8.1.8.5	Transmisores de posición y microrruptores de final de carrera.....	425
8.1.8.6	Válvula de solenoide de tres vías	425
8.1.8.7	Válvula de enclavamiento	425
8.1.8.8	Válvula de K_v o C_v o carrera ajustables.....	427
8.1.9	Dimensionamiento de la válvula. Coeficientes K_v y C_v	428
8.1.9.1	Definiciones.....	428
8.1.9.2	Fórmula general.....	429
8.1.9.3	Líquidos.....	439
8.1.9.4	Gases	450
8.1.9.5	Vapores	457
8.1.9.6	Régimen bifásico	460
8.1.9.7	Resumen de cálculo de coeficientes de válvulas	463

8.1.10	Ruido en las válvulas de control.....	466
8.1.10.1	Generalidades.....	466
8.1.10.2	Causas del ruido en las válvulas	468
8.1.10.3	Reducción del ruido.....	470
8.2	Elementos finales electrónicos.....	472
8.2.1	Amplificador magnético saturable.....	472
8.2.2	Rectificadores controlados de silicio.....	474
8.2.3	Válvula inteligente.....	478
8.3	Otros elementos finales de control.....	478
Capítulo 9	Regulación automática.....	481
9.1	Introducción.....	481
9.2	Características del proceso	481
9.3	Sistemas de control neumáticos y eléctricos	487
9.3.1	Control todo-nada	487
9.3.2	Control flotante	488
9.3.3	Control proporcional de tiempo variable.....	489
9.3.4	Control proporcional.....	490
9.3.5	Control proporcional + integral.....	494
9.3.6	Control proporcional + derivado	498
9.3.7	Control proporcional + integral + derivado	502
9.3.8	Cambio automático-manual-automático	504
9.3.9	Tendencias en los instrumentos neumáticos	505
9.4	Sistemas de control electrónicos y digitales	506
9.4.1	Generalidades.....	506
9.4.2	Control todo-nada	507
9.4.3	Control proporcional de tiempo variable.....	508
9.4.4	Control proporcional.....	509
9.4.5	Control integral.....	512
9.4.6	Control derivativo	513
9.4.7	Control proporcional + integral + derivativo	515
9.4.8	Cambio automático-manual-automático	515
9.4.9	Controladores digitales.....	515
9.5	Selección del sistema de control	521
9.6	Criterios de estabilidad en el control	523
9.7	Métodos de ajuste de controladores.....	525
9.8	Otros tipos de control.....	533
9.8.1	Generalidades.....	533
9.8.2	Control en cascada	534
9.8.3	Programadores	537
9.8.4	Control de relación	541
9.8.5	Control anticipativo.....	543
9.8.6	Control de gama partida	547
9.8.7	Control selectivo.....	548
9.8.8	Control de procesos discontinuos	549
9.8.9	Controladores no lineales	551

	9.8.10 Instrumentos auxiliares.....	552
9.9	Seguridad intrínseca.....	554
	9.9.1 Introducción.....	554
	9.9.2 Nivel de energía de seguridad.....	555
	9.9.3 Mecanismos de la ignición en circuitos de baja ten- sión.....	556
	9.9.4 Clasificaciones de áreas peligrosas	558
	9.9.5 Normas	560
	9.9.6 Barreras Zener.....	560
	9.9.7 Barreras galvánicas.....	562
	9.9.8 Factores de seguridad	562
9.10	Control por computador	563
	9.10.1 Generalidades.....	563
	9.10.2 Control DDC	565
	9.10.3 Control supervisor	568
	9.10.4 Control distribuido	570
	9.10.5 Sistemas de control avanzado.....	574
	9.10.6 Sistemas expertos.....	580
	9.10.7 Control por redes neuronales.....	583
	9.10.8 Control por lógica difusa (<i>fuzzy</i>)	585
9.11	Evolución de la instrumentación.....	587
Capítulo 10	Calibración de los instrumentos	601
	10.1 Introducción	601
	10.2 Errores de los instrumentos. Procedimiento general de cali- bración	602
	10.3 Calibración de instrumentos de presión, nivel y caudal.....	610
	10.4 Calibración de instrumentos de temperatura	614
	10.5 Comprobación de válvulas de control	619
	10.6 Aparatos electrónicos de comprobación	620
	10.7 Calidad de calibración según Norma ISO 9002.....	621
Capítulo 11	Aplicaciones en la industria. Esquemas típicos de control....	625
	11.1 Generalidades.....	625
	11.2 Calderas de vapor	625
	11.2.1 Control de combustión	626
	11.2.2 Control de nivel.....	629
	11.2.3 Seguridad de llama.....	632
	11.3 Secaderos y evaporadores.....	632
	11.4 Horno túnel.....	635
	11.5 Columnas de destilación	637
	11.6 Intercambiadores de calor	638
	11.7 Control del reactor en una central nuclear	641
Apéndice. Análisis dinámico de los instrumentos		645
	A.1 Generalidades.....	645
	A.2 Análisis dinámico de los transmisores.....	658

A.2.1	Elementos fundamentales	658
A.2.2	Diagrama de bloques, diagrama de Bode y función de transferencia de un transmisor	662
A.2.2.1	Transmisor neumático	662
A.2.2.2	Transmisor electrónico	666
A.2.2.3	Transmisor digital	667
A.2.3	Velocidad de respuesta de los transmisores	667
A.2.3.1	Transmisores neumáticos	667
A.2.3.2	Transmisores electrónicos o digitales	670
A.3	Análisis dinámico de los controladores	671
A.3.1	Introducción	671
A.3.2	Acción proporcional	671
A.3.3	Acción proporcional + integral	675
A.3.4	Acción proporcional + derivada	677
A.3.5	Acción proporcional + integral + derivada	686
A.3.6	Ensayo de controladores	689
A.4	Iniciación a la optimización de procesos	692
A.4.1	Generalidades	692
A.4.2	Análisis experimental del proceso	693
A.4.3	Estabilidad	695
A.5	Control avanzado	715
A.5.1	Correctores	715
A.5.2	Control multivariable	717
A.5.3	Control óptimo	718
A.5.4	Control adaptativo	720
A.5.5	Control predictivo	723
A.5.6	Control por redes neuronales	726
A.5.7	Control por lógica difusa	727
A.5.8	Estructuras del control avanzado	730
Referencias		733
Glosario		741

APLICACIONES EN LA INDUSTRIA. ESQUEMAS TIPICOS DE CONTROL

11.1 Generalidades

Este capítulo tiene por objeto presentar al lector varias aplicaciones típicas en la industria. El hacer este estudio de forma exhaustiva requeriría una obra aparte ya que no existe prácticamente límite en las aplicaciones de los instrumentos en los procesos industriales.

Este capítulo se ha limitado, pues, a estudiar algunas de las operaciones de proceso que se utilizan con mayor frecuencia:

- Calderas de vapor.
- Secaderos y evaporadores.
- Hornos de empuje.
- Columnas de destilación.
- Intercambiadores de calor.

11.2 Calderas de vapor

Las calderas de vapor se utilizan en la mayoría de industrias debido a que muchos procesos emplean grandes cantidades de vapor. La caldera se caracteriza por una capacidad nominal de producción de vapor en t/h a una presión especificada y con una capacidad adicional de caudal en puntas de consumo de la fábrica.

A la caldera se le exige, pues, mantener una presión de trabajo constante para la gran diversidad de caudales de consumo en la factoría, por lo cual debe ser capaz de:

- a) aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del fuel-oil o del gas con el aire;
- b) desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado y mantenido dentro de unos límites;
- c) es necesario garantizar una llama segura en la combustión.

d) el sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro de la caldera.

e) el funcionamiento de la caldera debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuadas, lo cual es posible con un control digital y/o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros de 2 a 10 % en combustible) y ganar en seguridad.

11.2.1 Control de combustión

La regulación de la combustión se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado.

El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es modificada por un relé de relación para ajustar la relación entre el aire y el combustible, y pasa a un controlador que la compara con la señal de caudal de combustible. Si la proporción no es correcta, se emite una señal al servomotor de mando del ventilador o a la válvula de mariposa, de modo que el caudal de aire es ajustado hasta que la relación combustible-aire es correcta.

En la regulación de la combustión puede darse preferencia en el mando al combustible o al aire para que la operación de la caldera corresponda a un sistema determinado de variadas características de seguridad. Estas características de combustión son las siguientes:

- Caudal fuel — caudal aire en serie.
- Caudal aire — caudal fuel en serie.
- Presión de vapor — caudal fuel/caudal vapor — caudal aire en serie.
- Caudal aire — caudal fuel en paralelo.

Caudal fuel — caudal aire en serie

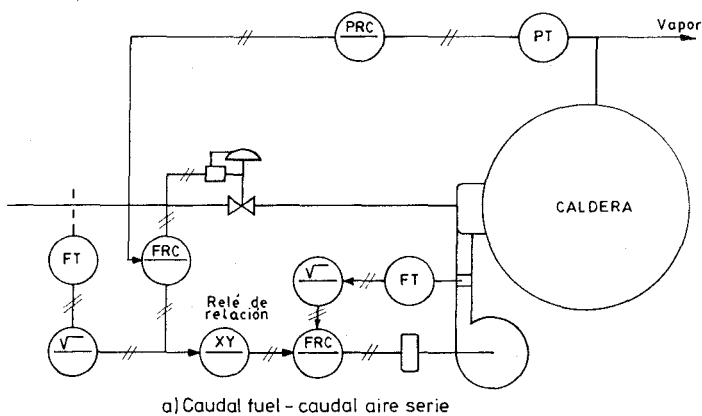
En el primer esquema de funcionamiento que puede verse en la figura 11.1 *a*, el controlador de presión ajusta el punto de consigna del controlador de caudal de fuel y esta variable actúa a través del relé de relación fuel-aire, como punto de consigna del controlador de aire. Como las variaciones del caudal de fuel influyen lentamente en la señal de presión de vapor, el controlador «maestro» se ajusta para una respuesta rápida ante cambios en la presión. En esta disposición si varía la presión del vapor, el caudal de fuel cambia antes que el del aire de combustión. Si se limita el caudal de fuel, lógicamente quedará también limitado el caudal de aire. La desventaja principal del sistema es el riesgo de explosión que se presenta ante un fallo de aire en el punto de consigna del controlador de caudal de aire; si así ocurre no hay aire de combustión pero el fuel continua circulando.

Caudal aire — caudal fuel en serie

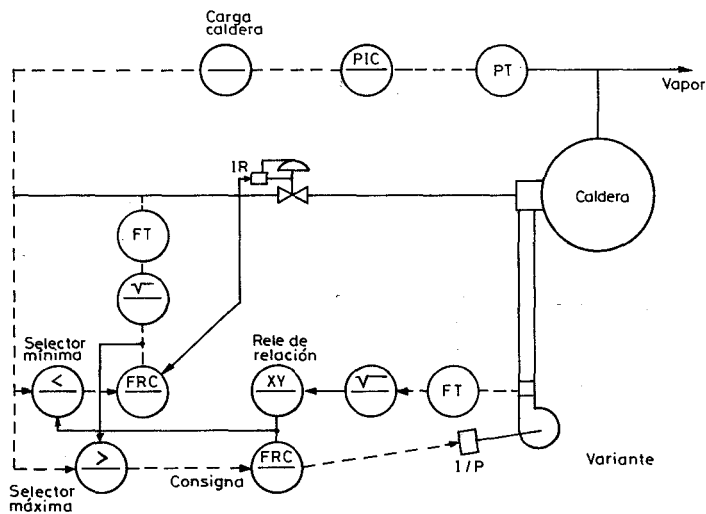
Tal como puede verse en la figura 11.1 *b*, aquí la señal de aire ajusta a través del relé de relación el controlador de fuel. El sistema es más seguro que el

anterior ya que elimina la posibilidad de formación de una mezcla explosiva cuando falla la señal de aire de combustión.

Una variante de este sistema consiste en utilizar un controlador de carga de la caldera a la salida del «maestro» de presión (común a varias calderas). La salida del controlador de carga es dirigida a dos selectores de máxima y de mínima, lo que permite: ante un aumento de la demanda de vapor la señal pasa al controlador de aire, sin que el fuel o el gas aumente hasta que no lo ha hecho el aire; si la demanda de vapor disminuye, el fuel disminuye el primero y luego lo hace el aire; y si la señal de aire falla, el caudal de fuel-oil baja a cero automáticamente.

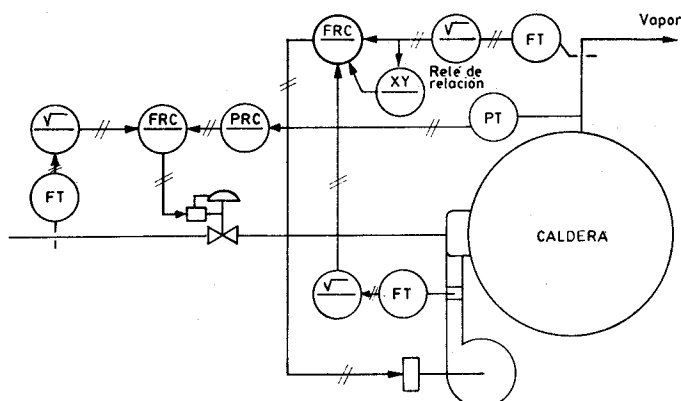


a) Caudal fuel - caudal aire serie

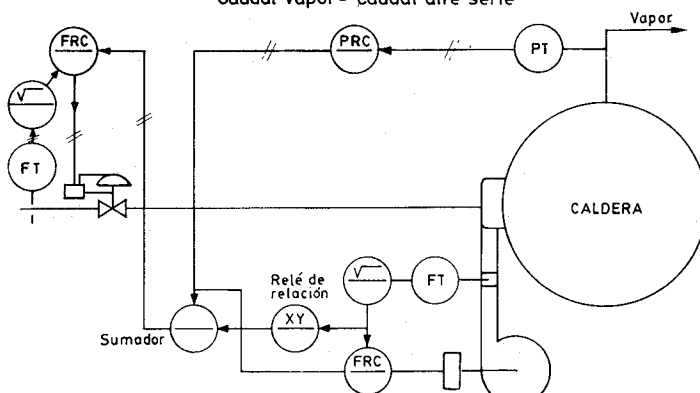


b) Caudal aire - caudal fuel serie

Fig. 11.1 Control de combustión.



c) Presión de vapor-caudal fuel serie
Caudal vapor - caudal aire serie



d) Caudal aire-caudal fuel en paralelo

Fig. 11.1 (Continuación)

Presión de vapor — caudal fuel en serie/caudal vapor — caudal aire en serie

El sistema representado en la figura 11.1 c se caracteriza por mantener con más seguridad la relación correcta aire-fuel aunque el fuel no sea medido correctamente. El controlador de presión de vapor ajusta el controlador de caudal de fuel. El transmisor de caudal de vapor ajusta el controlador de caudal de aire al sistema de control de combustión. Aunque las variaciones de caudal de vapor sean rápidas, las fluctuaciones que experimenta no lo son tanto como la presión de la línea de vapor principal. Este sistema se emplea con preferencia en calderas de carbón pulverizado.

Caudal aire — caudal fuel en paralelo

La ventaja principal de este sistema, que puede verse en la figura 11.1d, es su control directo en el fuel y en el aire. De hecho, para mantener una relación correcta fuel-aire conviene incorporar al sistema un relé de relación manual.

11.2.2 Control de nivel

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de presión del agua de alimentación.

El sistema de control del agua de alimentación puede realizarse de acuerdo con la capacidad de producción de la caldera, según la tabla 11.1 que figura a continuación y que el lector debe tomar sólo como guía de selección teniendo presente que cada caso individual debe estudiarse separadamente.

TABLA 11.1 Sistemas de control de nivel

Tipo	Variables	Capacidad de la caldera, kg/h		
		< 6000	6000-15 000	> 15 000
Un elemento	nivel	Cargas irregulares	Pequeños cambios de carga	Cargas mantenidas
Dos elementos	nivel caudal de vapor	Cargas irregulares con grandes fluctuaciones	Cambios de carga moderados	Lentos cambios de carga moderados
Tres elementos	nivel caudal de vapor caudal de agua			> 20 000

En la regulación de nivel de un elemento representada en la figura 11.2 c el único instrumento utilizado es el controlador de nivel que actúa sobre la válvula del agua de alimentación. El instrumento medidor de nivel puede ser del tipo desplazamiento o de presión diferencial de diafragma.

En calderas de pequeña capacidad, inferior a 1000 kg/h, la regulación puede ser todo-nada, con dos alarmas de nivel alto y bajo que ponen en marcha la bomba de alimentación del agua (fig. 11.2 a).

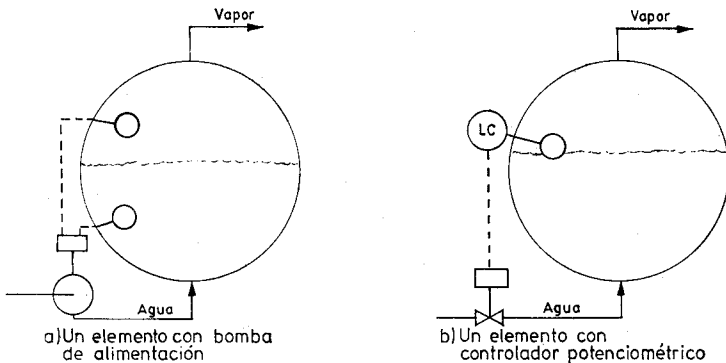


Fig. 11.2 Control de nivel.

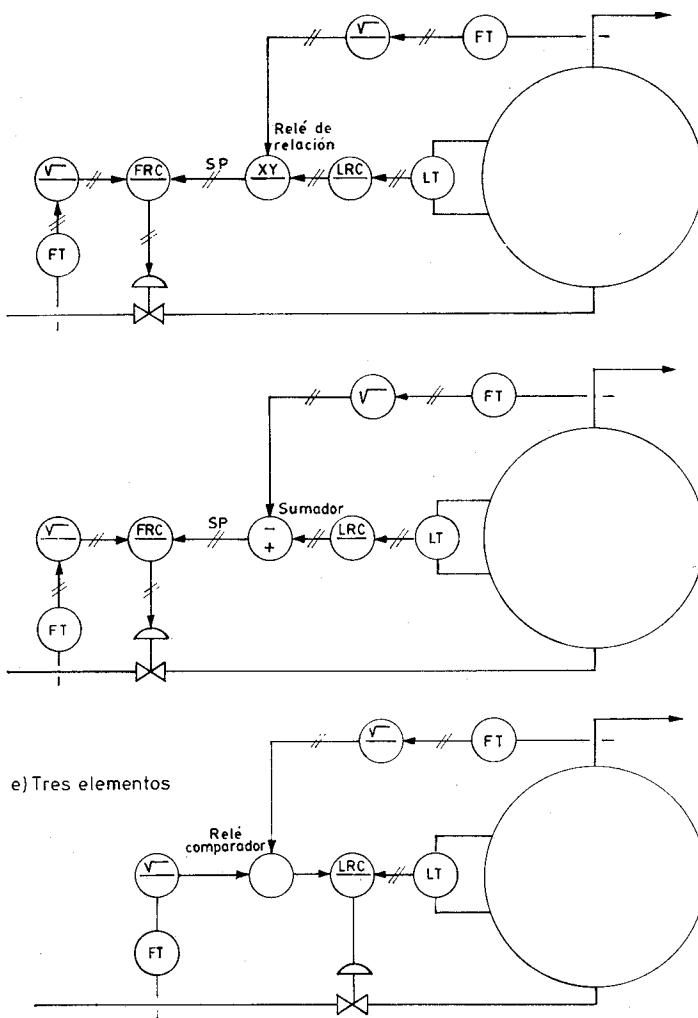
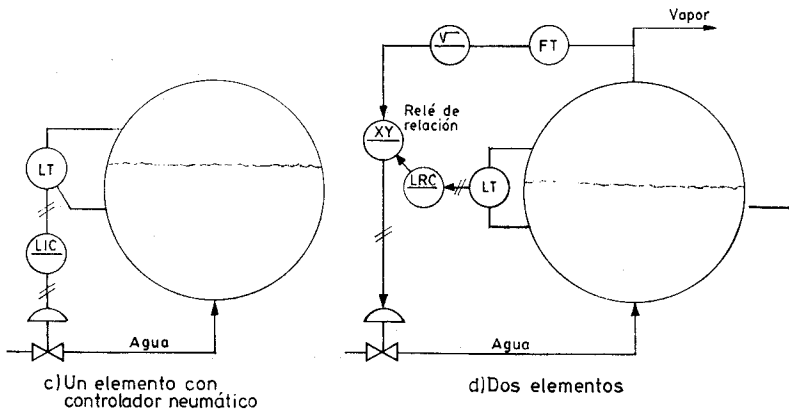


Fig. 11.2 (Continuación)

En calderas de capacidad media, del orden de 2000-4000 kg/h, puede utilizarse un controlador de flotador con un reóstato acoplado eléctricamente a una válvula motorizada eléctrica. Este conjunto (fig. 11.2 *b*) actúa como un control proporcional con punto de consigna el punto medio del campo de medida del nivel de flotador.

La regulación de nivel de dos elementos se logra con un controlador de caudal de vapor y un controlador de nivel cuyas señales de salida se comparan en un relé de relación que actúa directamente sobre la válvula de control del agua de alimentación. En la figura 11.2 *d* puede verse este sistema de control. De acuerdo con la demanda de caudal de vapor hay una aportación inmediata de agua de alimentación a través del controlador secundario de nivel. Este último es utilizado solamente como reajuste de las variaciones que pueden producirse con el tiempo en el nivel de la caldera.

La regulación de tres elementos elimina el fenómeno de oscilación del nivel de agua que se produce cuando el caudal de vapor crece o disminuye rápidamente.

Cuando el caudal de vapor aumenta bruscamente, la presión baja, con lo que se produce una vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas y agua, lo que da lugar al aumento aparente de nivel de la caldera. La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de caudal frecuentes y rápidas. La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de caudal frecuentes y rápidas.

Las tres variables que intervienen en el sistema son:

- Caudal de vapor.
- Caudal de alimentación de agua.
- Nivel de agua.

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el caudal de vapor y el de agua deben ser iguales y de forma secundaria, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son de unos 50 mm por encima y por debajo de la línea central de la caldera). Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre sí de varias formas. Las más representativas se encuentran en la figura 11.2 *e* en las que una señal anticipativa (*feedforward*) del caudal de vapor, se superpone al control de nivel, y todas tienen por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y de vapor frente a las variaciones del nivel que pueden producirse ante una demanda súbita, es decir, el sistema de control en estas condiciones actúa obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios en el nivel.

Señalemos que la medida del caudal de vapor se efectúa preferentemente con una tobera porque su forma suave evita la erosión que de otra forma se produciría en una placa-orificio por causa de las gotas de agua que inevitablemente arrastra el vapor. El caudal de agua de alimentación puede medirse a través de una placa-orificio o de una tobera.

11.2.3 Seguridad de llama

En el capítulo 7 se han descrito los distintos sistemas de seguridad de llama que se emplean en la industria.

Exceptuando las calderas de muy pequeña capacidad, el elemento detector utilizado universalmente es el ultravioleta por la gran seguridad que ofrece. El relé de llama conectado al detector puede adoptar muchas formas, desde la más sencilla alarma y paro de la caldera hasta realizar funciones de:

- prebarrido, es decir, limpieza de los gases que pueden haberse acumulado desde la última combustión;
- encendido de la llama piloto;
- encendido de la llama principal;
- paro de la instalación según un enclavamiento secuencial en el que intervienen los elementos: fallo de llama, presóstato de baja presión de fuel o gas, alarma de nivel de la caldera, etc.;
- postbarrido, fase en la que se limpian los gases quemados.

El circuito de llama (detector + relé) dispone además de una comprobación de su propio circuito en el arranque de la caldera, lo cual es suficiente en las industrias que paran una vez a la semana. Si el proceso es continuo y la caldera debe trabajar sin paros durante períodos prolongados, aumenta el riesgo de coincidencia entre el fallo del sistema de seguridad y la presencia de grandes cantidades de combustible sin quemar. Se recomienda utilizar un detector ultravioleta que permite autocomprobar cada segundo el circuito electrónico del sistema de llama. Se consigue mediante una placa que corta periódicamente la radiación de la llama hacia el detector, momento en el cual se autocomprueba el circuito. Cualquier fallo detectado hace parar la instalación.

11.3 Secaderos y evaporadores

Los secaderos tienen por objeto obtener el producto sólido con poca humedad, mientras que los evaporadores concentran el producto en forma líquida al evaporar el agua.

Entre los diversos modelos de secaderos se encuentra el secadero continuo de evaporación rápida (*flash*) que transporta el producto en una corriente de aire caliente y en muy poco tiempo disminuye su humedad hasta el valor final. Como es difícil medir directamente la humedad del producto en forma continua se controla en su lugar la temperatura variable que depende indirectamente de la humedad. En la figura 11.3 se encuentra un esquema de este secadero con los instrumentos de control correspondientes. El producto en forma de polvo húmedo entra en el circuito después del horno y se seca durante el recorrido por el tubo vertical.

El control suele ser en cascada, siendo la variable primaria la temperatura de salida y la variable secundaria la temperatura después del horno. El control es normalmente PID.

El quemador del horno tiene controles auxiliares, tales como vigilancia de

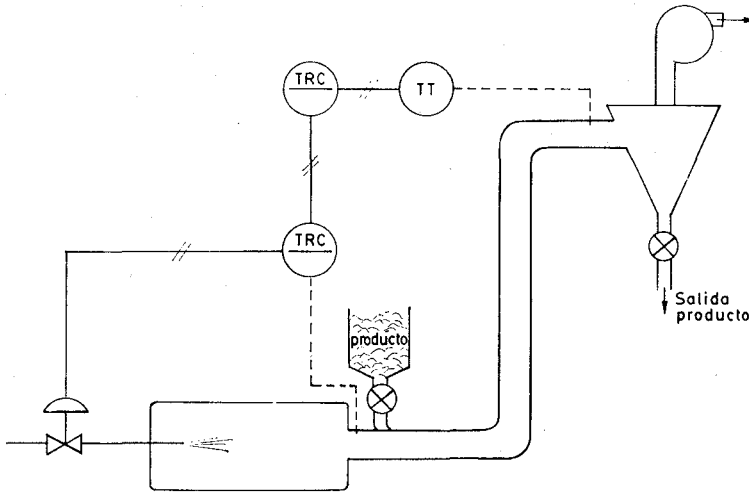


Fig. 11.3 Secadero de evaporación rápida.

llama, válvula autorreguladora de presión para inyectar vapor al fuel-oil y pulverizarlo, válvula de solenoide con rearme manual para cerrar el paso del combustible, presostatos y termostatos para alarma de máxima y mínima presión y de temperatura. El conjunto forma parte del circuito de enclavamiento de la instalación.

Otro tipo de secador es el rotativo, que consiste en un cilindro de gran longitud en cuya entrada se introduce el producto húmedo y a cuyo través circula aire caliente. En la figura 11.4 puede verse un esquema del control del proceso observándose que, análogamente al secadero de evaporación rápida, el control suele ser en cascada PID.

Otro tipo de secador es el de doble cilindro rotativo, representado en la figura 11.5, que fue uno de los primeros sistemas que se empleó para secar.

Consiste en dos cilindros rotativos calentados con vapor que giran en sentidos opuestos hacia adentro muy poco separados y arrastrando una película del producto. Los cilindros se cargan con producto que se seca en el corto espacio existente en el rodillo hasta una cuchilla que lo arranca y cae en un transportador.

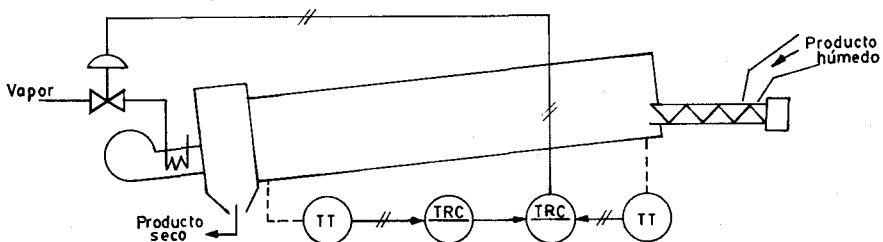


Fig. 11.4 Secadero rotativo.

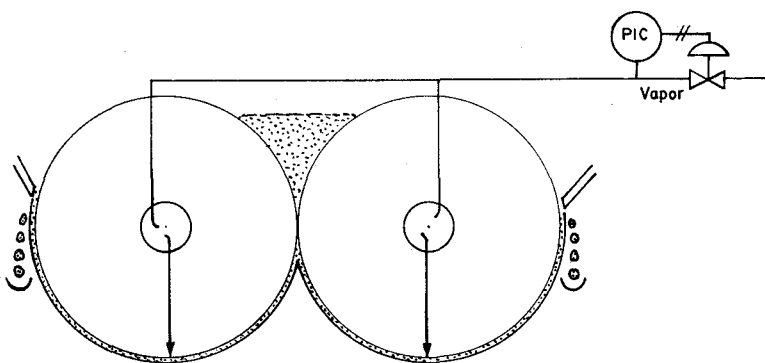


Fig. 11.5 Doble cilindro rotativo.

El único control automático que se aplica es la regulación de presión de vapor.

Los evaporadores existen en muchos tamaños, formas y tipos. El evaporador discontinuo es de producción forzosamente limitada por la necesidad de las operaciones de llenado y de vaciado.

En cambio, el evaporador continuo tiene una producción más regular. Según el número de veces que la solución es calentada por la fuente de calor se tienen varios tipos: evaporador de simple efecto, de doble efecto y de triple efecto e incluso de más efectos si bien los más comunes son los dos últimos).

En la figura 11.6 se representa un evaporador de un solo efecto. Se establece un caudal fijo de vapor a la calandria, se controla el nivel del evaporador variando la entrada del producto, y se regula la concentración midiendo la elevación del punto de ebullición, es decir, la diferencia de temperaturas entre el líquido en ebullición en el evaporador y el condensado a la misma presión absoluta, y actuando sobre la salida del producto. Otras formas de medir la concentración están ba-

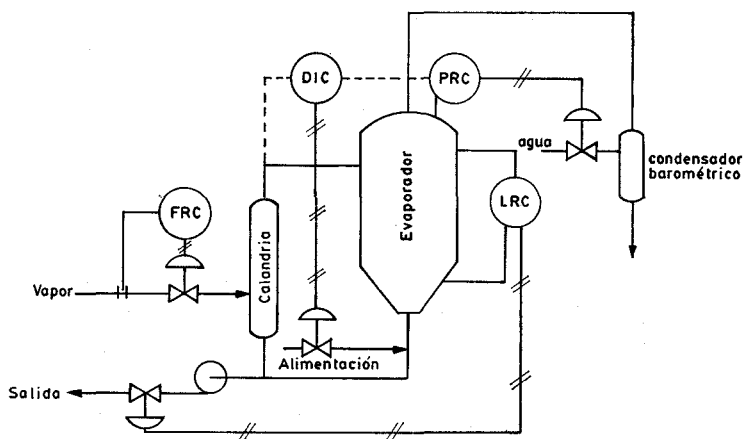


Fig. 11.6 Evaporador de simple efecto.

sadas en la conductividad, en la presión diferencial y en la radiación gamma, pero excepto este último tienen el problema de la posible obturación del elemento. Se controla asimismo la presión absoluta en el cuerpo del evaporador, actuando sobre la entrada de aire o bien sobre la entrada del agua que va al condensador barométrico caso de utilizar este sistema para generar el vacío.

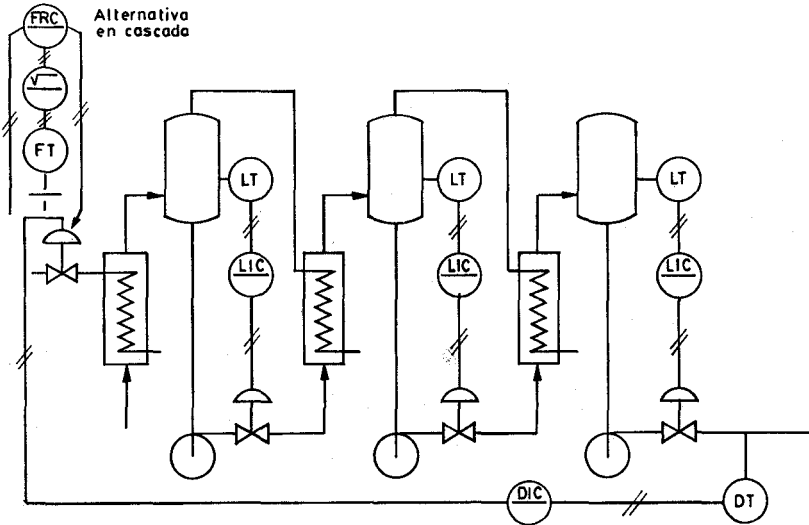


Fig. 11.7 Evaporador de triple efecto.

En la figura 11.7 puede verse la regulación de un triple efecto. Excepto el primer efecto, los otros dos se calientan con el vapor del producto generado en el efecto anterior. Debido a su gran capacidad y a la lentitud con que se establecen nuevas condiciones en el proceso, el sistema de control se escoge de modo que se mantengan condiciones fijas y se disminuyan al mínimo los efectos de cambios de carga exteriores al proceso. Los instrumentos de control son similares a los del evaporador de un solo efecto.

11.4 Horno túnel

Los instrumentos de regulación y control forman parte integral de los equipos de proceso de la industria cerámica y en particular constituyen una necesidad en el proceso de cocción de los productos cerámicos realizado en un horno túnel.

Los procesos de cocción del bizcocho y del bizcocho recubierto de esmalte se basan en el mantenimiento de una curva de cocción que establece un programa preciso de temperatura distribuida de acuerdo con las tres zonas típicas del horno: precalentamiento, cocción y enfriamiento (fig. 11.8). La carga es transportada en vagonetas a una velocidad determinada y las temperaturas se regulan básicamente en la zona de cocción donde se encuentran situados los quemadores de combusti-

ble y los valores deseados en la zona de precalentamiento se alcanzan mediante la circulación de aire caliente procedente de la zona de enfriamiento.

Estas temperaturas corresponden a las zonas del horno, ya que salvo casos muy especiales, es difícil medir directamente la temperatura de las piezas. De todos modos, debido al tiempo que las piezas pasan dentro del horno puede admitirse que en la última zona, donde no absorben prácticamente calorías, su temperatura es muy próxima a la de las paredes.

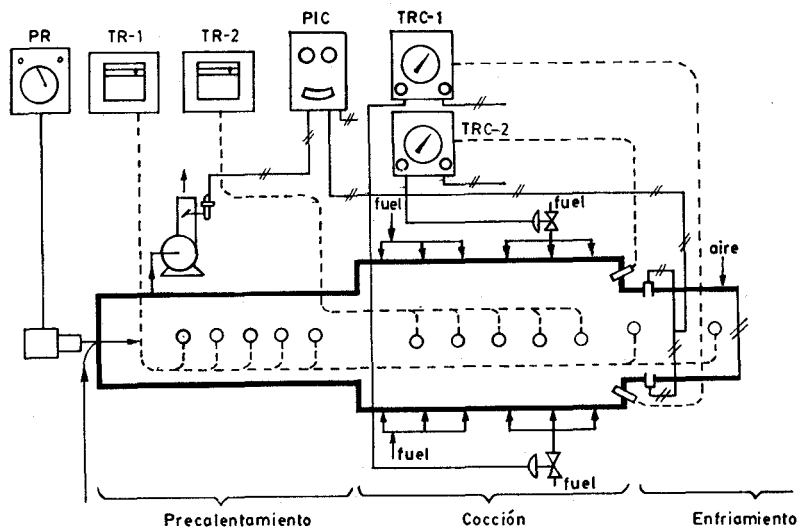


Fig. 11.8 Esquema de la regulación de un horno túnel típico.

La medida de la temperatura se efectúa con termopares de cromel-alumel o de platino platino-rodio, según sean las temperaturas alcanzadas y con fundas cerámicas de mullita sílice-alumínica o de aluminio recristalizado (nótese que las temperaturas máximas de trabajo de los termopares de cromel-alumel y platino-platino-rodio son de 950-1200° C y de 1400° C, respectivamente).

Los reguladores actúan o bien sobre una válvula de solenoide, o bien sobre válvulas neumáticas.

La zona de cocción puede dividirse en varias zonas de control y cada una suele estar regulada independientemente por un regulador todo-nada, o flotante, o bien por un regulador proporcional o proporcional + integral o proporcional + + integral + derivativo.

En el horno túnel es también importante la regulación del tiro al mantener una distribución uniforme de temperaturas en cada sección del horno. Las dos tomas del controlador de tiro se conectan en lados opuestos en la entrada o salida de la zona de encendido que es la posición que usualmente da los mejores resultados. El controlador actúa sobre el ventilador de salida del aire manteniendo así el tiro deseado.

11.5 Columnas de destilación

La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación donde por un lado asciende el vapor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y por el otro va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre las dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados.

Los problemas de la destilación son muy diversos, por lo cual los tipos de columnas lo son también. Estudiaremos una columna típica de funcionamiento continuo que está representada en la figura 11.9.

Las variables importantes que regulan el funcionamiento de la columna son la presión en la cabeza de la columna, el caudal, la composición y la temperatura de la alimentación, el calor añadido y las calorías extraídas y los caudales de destilado y de producto extraídos en la base.

La presión en la columna se regula mediante un controlador de presión en cascada con un controlador de caudal de los gases incondensables que escapan del condensador, si bien también podría efectuarse con el regulador de presión actuando directamente sobre la válvula de gases incondensables.

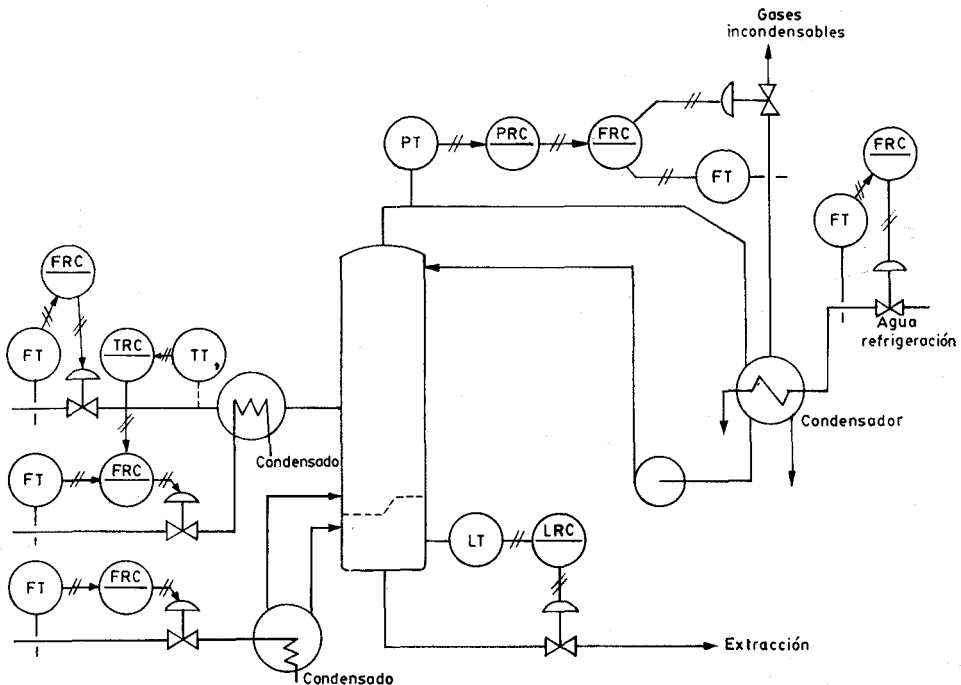


Fig. 11.9 Columna de destilación.

El caudal de la alimentación se regula con un controlador de caudal que mantiene un caudal constante, gracias a una banda proporcional bastante estrecha (alta ganancia).

La composición de la alimentación tiene una gran importancia en el funcionamiento de la columna. Sin embargo, es difícil ajustar esta composición de modo que es necesario actuar sobre la columna cuando se presentan cambios en la composición de la alimentación. Entre los analizadores, el cromatógrafo es el más utilizado.

La temperatura de la alimentación es también importante. Al objeto de controlarla se emplea un intercambiador de calor con vapor. La temperatura se regula en cascada con el caudal del vapor.

El calor añadido en la columna se efectúa a través de un intercambiador de calor instalado en la base o en un plato intermedio de la columna. Un controlador de caudal de vapor ajusta estas calorías aportadas. Como complemento se instala un controlador de nivel en la base de la columna que lo ajusta mediante una válvula de control que actúa sobre la extracción.

Las calorías extraídas tienen lugar en el condensador de los gases que salen de la cabeza de la columna. Un controlador de caudal de agua de refrigeración del condensador ajusta estas calorías.

El caudal de destilado se ajusta mediante un controlador de nivel del condensador, en cascada con un controlador de caudal en la extracción.

El caudal de producto extraído en la base está relacionado con el calor añadido en la columna y tal como se ha indicado está regulado indirectamente por el controlador de nivel de la base de la columna.

Es obvio que las variables que influyen en el funcionamiento de la columna de destilación son muy diversas y que cada una de ellas, si varía, actúa como una perturbación en todo el proceso, por lo cual existen formas variadas de control, derivadas de la estudiada, que cada vez son más complejas, siendo la última la optimización mediante computador que se aplica siempre que los estudios económicos así lo aconsejen.

11.6 Intercambiadores de calor

La gran mayoría de los procesos industriales emplean intercambiadores de calor en operaciones tales como precalentamiento, pasteurización, esterilización y refrigeración, entre otras.

Existen varios sistemas para el control de los intercambiadores de calor debido a que son muchos los factores que deben considerarse: la presión del vapor o del fluido de alimentación, las fluctuaciones en el caudal del producto, las variaciones en la temperatura del producto, en su calor específico, los retardos del proceso, etc.

En la figura 11.10 *a* puede verse un esquema de control simple con un controlador de temperatura que actúa directamente sobre la válvula de vapor.

En otro sistema (fig. 11.10 *b*) se regula la extracción de condensado, es decir, indirectamente el nivel de condensado en el serpentín de vapor, mediante un controlador de temperatura del producto que manda una válvula de control en la

línea de salida del condensado. Como ventajas, el sistema ofrece con relación al anterior la eliminación de los problemas de purga del condensado al mantenerse constante la presión de vapor dentro del serpentín y el empleo de una válvula de control más pequeña.

Sin embargo, el control óptimo de temperatura deja mucho que desear ya que si disminuye el caudal del producto, el controlador de temperatura manda cerrar la válvula y el serpentín tarda cierto tiempo en llenarse del condensado del vapor con el resultado de una considerable lentitud en la respuesta del sistema para acomodarse a las nuevas condiciones. En cambio, lo contrario, es decir, el aumento del caudal del producto tiene una respuesta rápida ya que al abrirse la válvula de control, el serpentín se vacía rápidamente.

Una variante del sistema anterior que se aplica cuando la presión del condensado es baja y existen problemas en su eliminación, es la sustitución del purgador clásico del condensado por un control de nivel del condensado (fig. 11.10 c).

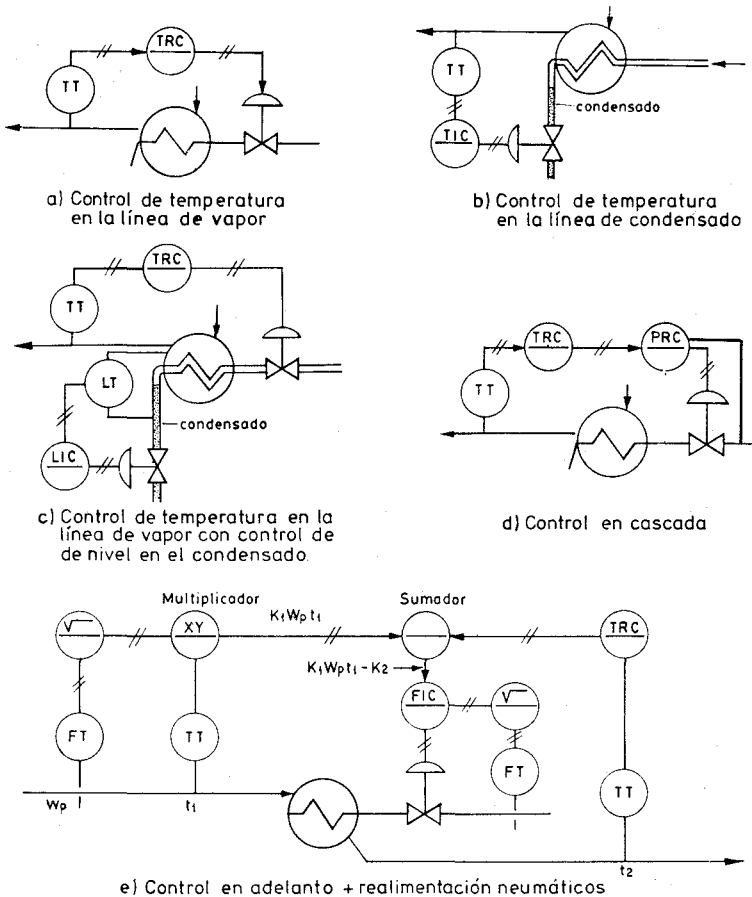
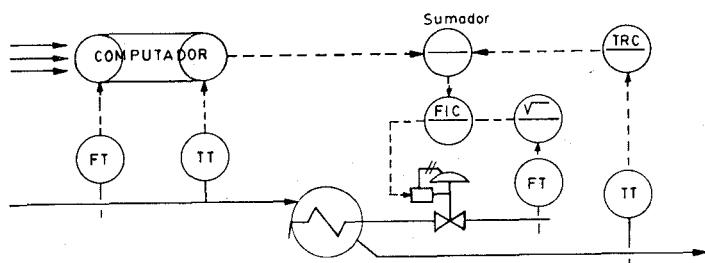
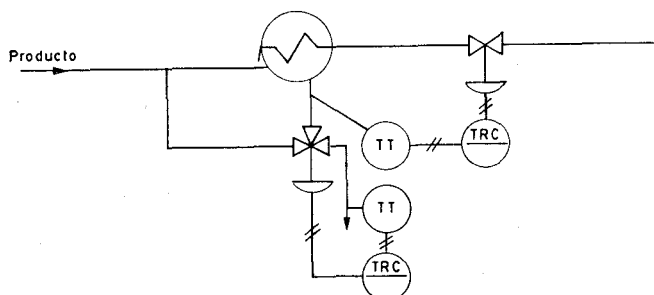


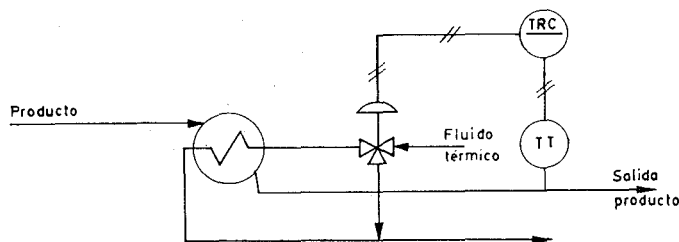
Fig. 11.10 Intercambiador de calor de vapor.



f) Control en adelanto + realimentación electrónica utilizando un pequeño computador



g) Control en derivación del producto



h) Control en derivación del fluido de calefacción o de refrigeración

Fig. 11.10 (Continuación)

La temperatura del producto continúa siendo regulada por un controlador convencional actuando sobre la válvula de vapor.

Otro sistema es el control en cascada (fig. 11.10 d) entre el controlador de temperatura como primario y un controlador de presión de vapor como secundario. De este modo, las variaciones de presión del vapor de la línea de alimentación son corregidas inmediatamente por el controlador de presión secundario y el controlador de temperatura primario se encarga de compensar las variaciones de temperatura por otras causas.

El control en adelanto (*feedforward*), combinado con el control clásico de realimentación, también puede aplicarse a un intercambiador de calor, en particular cuando su operación es crítica y se necesita un control estable con una recuperación rápida ante las perturbaciones, que compense el coste elevado de la

instrumentación implicada. Idealmente, la ecuación que debe resolver continuamente el control en adelanto es la:

$$W_v \times q_v = W_p c_e (t_2 - t_1)$$

en la que:

W_v = caudal del vapor en peso (kg/h);

q_v = calor de condensación del vapor;

W_p = caudal del producto en peso (kg/h);

c_e = calor específico del producto;

t_1, t_2 = temperaturas del producto a la entrada y a la salida, respectivamente,

prescindiendo del rendimiento del intercambiador.

Esta ecuación puede transformarse a:

$$W_v \cdot q_v = W_p c_e t_2 - W_p c_e t_1$$

es decir, en otros términos:

$$\text{Posición válvula de control} = K_1 \cdot W_p \cdot t_1 - K_2$$

ya que t_2 se mantiene constante.

De este modo, un instrumento multiplicador realiza la operación $K_1 W_p t_1$ y otro sumador le resta a esta señal la $W_p c_e t_2$ obtenida de la señal de temperatura t_2 combinándose así el control en adelanto y el de realimentación (fig. 11.10 e). En la figura 11.10 f puede verse el mismo tipo de control pero utilizando un computador.

En los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o refrigeración en un sistema separado.

Cuando el intercambiador de calor tiene una respuesta demasiado lenta, el mantenimiento de temperatura del producto se realiza con un controlador de temperatura actuando sobre una válvula de tres vías diversora que deriva el intercambiador. De este modo se logra una respuesta rápida frente al empleo de una válvula de dos vías, ya que la capacidad térmica del intercambiador es grande e introduce un retardo considerable ante cambios en la carga. El producto es derivado y se mezcla directamente con el producto caliente que sale del intercambiador. (figura 11.10 g).

Una variante del control en derivación se aplica en los casos de intercambiadores de calor entre líquidos, donde es usual estabilizar la temperatura del líquido de calefacción o de refrigeración en un sistema separado. En la figura 11.10 h puede verse el control de un intercambiador utilizando aceite térmico obtenido de un sistema separado. A este sistema podría aplicársele, si se deseara, un control en cascada con la temperatura del fluido térmico como variable secundaria.

11.7 Control del reactor en una central nuclear

En una central térmica convencional se utiliza una caldera de vapor con un quemador de fuel-oil o gas (o bien carbón). El calor generado se transfiere al agua de la caldera a través del haz de tubos dispuestos en el interior de la cámara de

combustión. El agua se transforma en vapor que, sobrecalentado, pasa a la turbina, que a su vez mueve los generadores correspondientes.

En la central nuclear, la función realizada por la caldera es sustituida por el reactor nuclear combinado con un sistema primario de refrigeración y generadores de vapor.

En los dos sistemas, el control del agua en la caldera y el de la turbina es básicamente el mismo: control de nivel de tres elementos en la caldera y posición de las válvulas de admisión de la turbina para regular el caudal de vapor, y por lo tanto, la potencia de salida. Sin embargo, señalemos que desde un punto de vista simplificado, la caldera de la central térmica es compleja — la potencia de salida gobierna el caudal de combustible y el aire de combustión combinados en la mezcla adecuada, establece el número de quemadores a utilizar y en muchas plantas fija la temperatura de sobrecalentamiento — mientras que la central nuclear es básicamente más simple — sólo se requiere el control del consumo del combustible nuclear. La producción de la energía en el reactor nuclear se logra mediante la fisión de los átomos del material combustible por el bombardeo con neutrones. El número de éstos da una medida aproximada de la potencia de salida y para ajustarlo se posicionan adecuadamente las barras de control de reactividad. El sistema de control emplea como señales de entrada, el flujo de neutrones, las temperaturas, la presión y el caudal del fluido de refrigeración, la posición de las barras de control y las calorías de salida de la planta. Un programa establece la carga a aplicar para alcanzar el nivel de potencia deseado, mediante los grupos de las barras de control. En la figura 11.11 puede verse un esquema simplificado del conjunto de los instrumentos utilizados.

El núcleo del reactor contiene termopares de cromel-alumel y detectores móviles de neutrones que proporcionan datos de la distribución de temperaturas y del flujo, lo que permite determinar la distribución de potencia dentro del reactor y calibrar los detectores de flujo externos.

Otra diferencia entre el reactor nuclear y la central térmica es el sistema de paro de la central, ya sea planificado de antemano, ya sea en una emergencia. Mientras que en la central térmica convencional el paro se realiza de modo simple — cerrando las líneas de fuel-oil o de gas — y la emergencia puede ser debida a fallos de presión en la línea o de caudal de aire de combustión, en la central nuclear el paro puede presentarse por pérdida del caudal de refrigerante primario o aumento exagerado de la potencia de salida hasta un nivel de inseguridad. El sistema de emergencia del reactor nuclear debe actuar rápidamente y debe ser de alta confiabilidad.

Los sistemas de seguridad del reactor tienen en cuenta los siguientes puntos:

- Aislamiento del sistema de contención mediante una válvula de bloqueo en cada línea que penetra en las paredes del reactor.
- Mantenimiento del sistema de barras de control y de seguridad en su posición. Si el sistema falla por manipulación incorrecta o fallos del sistema de movimiento se produce una liberación de radiactividad que causa un gran desprendimiento de calor. Para eliminarlo, sea en caso de emergencia o bien en caso de paro programado, es necesario que la instrumentación inicie una refrigeración de emergen-

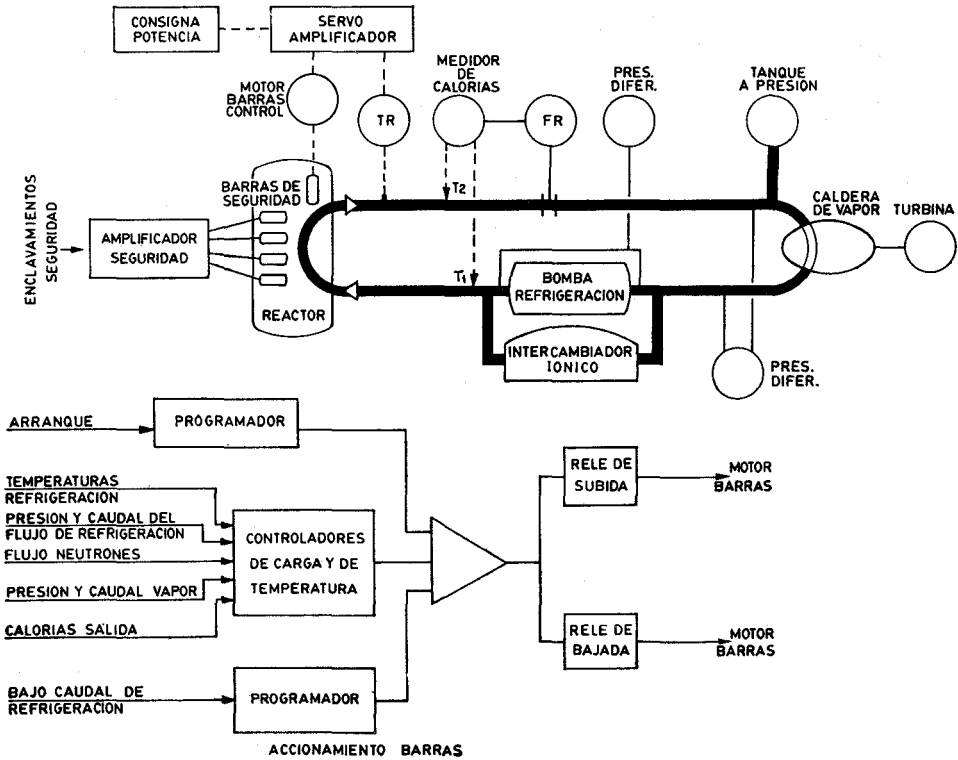


Fig. 11.11 Esquema de control del reactor nuclear.

cia, accionando rápidamente las barras de seguridad. La característica de velocidad de éstas es muy importante, y como detalle señalemos que efectúan su carrera completa en un poco más de medio segundo.

Los criterios establecidos para la seguridad de la central nuclear se basan en la confiabilidad y en la redundancia de los instrumentos. Se han redactado normas que establecen métodos para ensayar los contadores de radiactividad, los materiales eléctricos, los motores, los requerimientos de inspección, de instalación y ensayo de los instrumentos, la calificación sísmica y resistencia al calor de los mismos, en particular en el interior de la contención, los ensayos para la comprobación de fallos con el reactor en marcha mediante los sistemas redundantes de instrumentos, etc. El dispositivo de seguridad es excitado principalmente ante un fallo de alimentación de los instrumentos, una temperatura alta en la refrigeración, un nivel de potencia de salida excesivo o un flujo elevado de neutrones.

El sistema de arranque del reactor debe tener en cuenta la gama tan amplia de niveles de potencia que el reactor puede generar y debe realizar los siguientes puntos:

Impedir que el grado de aumento del flujo de neutrones sea excesivamente rápido.

Impedir que la reactividad exceda los límites máximos de proyecto dentro de la gama de potencias de trabajo.

Mantener la adecuada generación de calor en respuesta a la demanda.

La instrumentación no nuclear incluida en el bucle del agua de refrigeración primario del reactor contiene medidores de presión diferencial del núcleo del reactor y de la bomba de refrigeración, transmisores de temperatura y de presión, medidores de caudal de refrigerante, de temperatura diferencial, de calorías, etc.