



Programa de la asignatura:

Operaciones unitarias I

U3 | Operaciones unitarias de transferencia de masa



DCSBA



BIOTECNOLOGÍA



Índice

Presentación de la Unidad.....	2
Propósitos de la unidad.....	2
Competencia específica.....	3
3.1. Fundamentos.....	3
3.1.1. Definición de Absorción y desorción.....	5
3.1.2. Equilibrio liquido – gas.....	7
3.1.3. Ecuaciones básicas de transferencia de materia.....	9
3.2. Columna de platos.....	11
3.2.1. Contacto discontinuo.....	14
3.2.2. Línea de operación.....	15
3.2.3 Numero de etapas teóricas.....	16
3.2.4 Relación mínima liquido- gas para absorbedores.....	21
3.2.5. Relación mínima liquido- gas para desorbedores.....	22
3.3. Columnas Empacadas.....	25
3.3.1. Contacto continuo.....	25
3.3.2. Selección del empaque.....	27
3.3.3. Cálculo de la altura de la columna.....	30
3.3.4. Problemas resueltos.....	35
Actividades.....	41
Autorreflexiones.....	41
Cierre de la unidad.....	42
Fuentes de consulta.....	43



Presentación de la Unidad

En esta unidad se aborda a las operaciones de transferencia de materia conocidas como absorción o desorción de gases, en las que se lleva a cabo un contacto de dos fluidos en contracorrientes dentro de una columna de acrílico, rellena de anillos *rashing* u otro tipo de material; el componente que nos interesa conocer es la fase gaseosa la cual se transfiere a la fase líquida.

Conoceremos el diseño y manejo de las columnas de absorción, así como es necesario dominar las características del flujo y la transferencia de masa dentro de la columna. El objetivo de la operación de transferencia de materia es separar uno o más componentes (el soluto) de una fase gaseosa por medio de una fase líquida en la que los componentes a eliminar son solubles; el resto son componentes insolubles.

Utilizaremos el método matemático para calcular la altura, el número de etapas teóricas y la selección de empaques. Durante el desarrollo te darás cuenta que se involucra la acumulación o concentración de sustancias en una superficie o interface. La transferencia de masa más conocida es aquella en la que el proceso ocurre en la interface de un sistema bifásico como el líquido-líquido o líquido-sólido.

Una de las aplicaciones más comunes de la adsorción es la que se desarrolla mediante carbón activado en el tratamiento de aguas residuales municipales, ya que es la reducción de la concentración de aquellos compuestos que contienen olor, fundamentalmente cuando se absorbe una vez que ha sido sometida a diferentes procesos.

Propósitos de la unidad



Al término de la unidad tres podrás:

- Distinguir la importancia de la evaporación en los procesos industriales de alimentación



- y generación de productos químicos.
- Identificar las clases y características de evaporación.
 - Aplicar en el desarrollo de ejercicios, las ecuaciones referentes a los balances de energía en la evaporación.
 - Reconocer los equipos de evaporación más utilizados en la industria.

Esta unidad te permitirá conocer la relación de los conocimientos previos adquiridos en la termodinámica y en los balances de materia y energía para entender los procesos de intercambio de calor que ocurren en un evaporador o en el proceso de cristalización.

Competencia específica



Resuelve ecuaciones de los fenómenos y procesos involucrados en la transferencia o transporte de masa a través del análisis de los modelos matemáticos, sus parámetros y variables para determinar resultados aplicables a situaciones reales de operaciones unitarias.

3.1. Fundamentos

El proceso de absorción se emplea para retirar contaminantes de una corriente que puede afectar la especificación el grado de pureza de nuestro producto. Además para disminuir la presencia de ciertas sustancias que son contaminantes en proporciones muy pequeñas, tales como el monóxido de carbono o el dióxido de carbono por mencionar algunos que pueden afectar las propiedades globales de un producto.

La absorción se emplea para retirar los contaminantes gaseosos de una corriente de gas saliente de un proceso como resultado de una combustión; por ejemplo, se emplea para la



eliminación de olores, humos, y otros componentes tóxicos. Es muy utilizado para eliminar contaminantes como el dióxido de azufre, sulfuro de hidrogeno, ácido clorhídrico, óxidos de nitrógeno, cloro, amoniaco, dióxido de azufre, por mencionar algunos ejemplos.

**¿En la naturaleza conoces algún fenómeno dónde se lleve a cabo la absorción?
¿Sabes qué equipos industriales son utilizados para la absorción? y ¿en qué procesos son utilizados?**

Observa la **figura 1**, imagina la ventana de tu cuarto que recibe el sol cada mañana, donde emite energía calorífica y el cristal recibe energía y la absorbe. Este es un ejemplo común en la naturaleza. En la ingeniería ocurre un fenómeno similar en las torres empacadas de absorción, así como en las columnas de absorción de platos, este proceso se emplea para retirar contaminantes de una corriente de un producto que pueden afectar a la especificaciones finales o grado de pureza. Además, la presencia de ciertas sustancias (aunque sea en proporciones muy pequeñas) puede afectar a las propiedades globales de un producto y puede ser que esto no tenga interés en ningún sentido.



Figura 1. Transferencia de calor (Manteca, F. 2012) Recuperado de <http://www.conectapyme.com/gabinete/emergemap/guia/nivel2apartado3.html3>

Los procesos de purificación de gases se refieren a la eliminación de contaminantes contenidos en una corriente de éteres. Para la purificación de estos gases se utilizan métodos químicos y físicos con los que es posible la eliminación de contaminantes según lo que se necesite, entre los que podemos mencionar:

- Absorción
- Permeabilidad
- Condensadores
- Adsorción



3.1.1. Definición de Absorción y desorción

Ya tenemos conocimiento de algunos procesos industriales en los que se utilizan estas operaciones unitarias, pero ¿qué es la absorción? y ¿qué es la desorción? Para qué nos sirve saber este concepto.

El proceso de absorción es una operación de transferencia de materia donde se mezcla un gas que se pone en contacto con un líquido, para disolver de manera selectiva uno o más componentes de este el líquido.

La absorción de gases es una operación unitaria en la cual se disuelve en un líquido uno o más componentes solubles de una mezcla gaseosa y se emplea cuando se desea transferir un componentes volátil de una mezcla líquida a un gas (Valiente, 2010).

Esta operación se lleva a cabo de manera continua en equipos llamados torres o columnas, son equipos cilíndricos y suelen ser de gran altura, dichas torres pueden ser empacadas o de platos los flujos de contracorriente entre el gas y el líquido se realiza dentro en contracorriente dentro de la torre. La corriente gaseosa se introduce por la base de la columna y sale por el domo, la corriente líquida se alienta por el domo y se descarga por la base.



Para profundizar en el tema, te sugiero que revises el texto relacionado con las torres o columnas de absorción y sus principales características de los equipos de absorción del libro *Absorción* de Valiente (2010).

Se denomina **desorción, desabsorción o stripping** a la operación unitaria inversa cuya finalidad es eliminar o recuperar uno o varios componentes minoritarios de una corriente líquida por transferencia a una corriente gaseosa (Franco, C. A., Ojeda, E. D. (2008).

Observa la **figura 2**, el gas contenido en esta columna entra por la parte inferior, la cual puede ser dióxido de azufre y atraviesa el relleno, la cual está compuesta de un lecho de partículas de un tamaño, forma y material determinado. Al mismo tiempo se introduce la corriente del disolvente que puede ser agua por la parte superior y cae por la gravedad cubriendo la superficie externa de la partícula de relleno. Esto provoca una amplia superficie de interface (mayor contacto entre el relleno, el absorbente y disolvente, así como flujo turbulento entre ambas fases).



Esta columna de relleno se compone de otros elementos que son de ayuda al absorbedor como son los sistemas de gas y líquido; contiene una parrilla para soportar el relleno y un separador de nieblas para captar las gotas que pudieran arrastrar el gas a la salida del lecho. Es importante mencionar que si se utiliza una torre de aspersion cuando el gas es altamente soluble, o una torre de burbujeo cuando el sistema es utilizado en una fase líquida, se controla la velocidad de transferencia de masa.

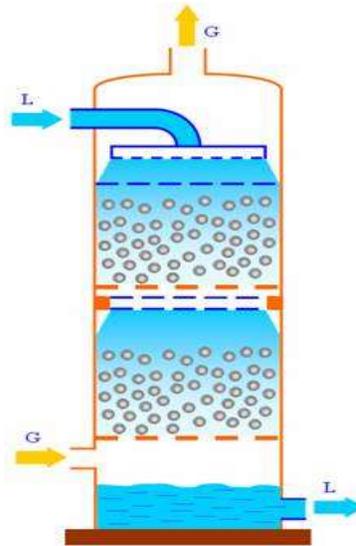


Figura 2. Torre de relleno y diversos tipos de cuerpos de relleno (Franco, et al 2008)



Para profundizar en el tema, te invito a que revises el capítulo 21 sobre *Columnas de relleno en sistemas de gas y líquido* del libro *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* de Mc Cabe, W. L. (2002)

Uno de los equipos más utilizados en la absorción de gases y también en otras operaciones, es la torre de relleno, el cual consta de esencialmente de una columna cilíndrica, o torre, provista de una entrada y una cámara de distribución de líquido en la parte superior; una entrada y sistema de distribución del líquidos en la parte superior; salida para el gas y el líquidos en la cima y en el fondo, respectivamente; y un lecho de partículas sólidas inertes que rellenan la columna y que reciben el nombre de relleno.



3.1.2. Equilibrio líquido - gas

¿Qué es el equilibrio líquido gas? ¿Qué relación existe entre el equilibrio líquido gas y la absorción? ¿Cuál es el contacto entre líquido y gas?

Para entender el equilibrio gas-líquido debemos conocer primeramente la solubilidad porque, como recordarás, la absorción es una operación en la que se realiza un contacto entre un gas con un líquido, pero es necesario conocer una propiedad entre ellos denominada **solubilidad** que tan solubles son nuestros componentes entre ellos.

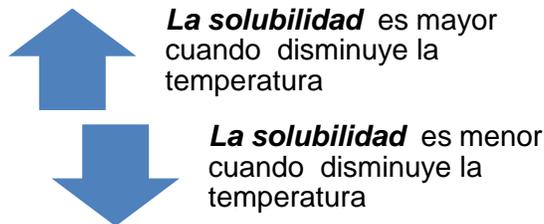


Para profundizar te invito a leer el artículo de *Gibrán Santa-Cruz, W., et al* (2006) Optimización de una torre de absorción en una planta de endulza miento de gas natural, donde se presenta una aplicación industrial del uso de absorción para la purificación de gas natural en Campeche que posee impurezas, como lo es el sulfuro de hidrogeno que, como sabemos, es un gas corrosivo.

La solubilidad del gas en un líquido es la concentración del gas disuelto en el líquido cuando al ponerse ambos en contacto alcanzan el equilibrio.

Para una concentración de soluto dada en el líquido:

- El gas es **poco soluble** si su presión parcial es alta en la fase gaseosa.
- El gas es **soluble** si su presión parcial es baja en la fase gaseosa.



Es importante que recuerdes que si una mezcla de gases está en contacto con un líquido, la solubilidad en el equilibrio de cada gas es independiente de la de los demás y se debe describir en función de las presiones parciales en la mezcla gaseosa.

Un ejemplo que podemos mencionar es el siguiente: imagínate un gas puro que se pone en contacto con el líquido relativamente no volátil hasta alcanzar el equilibrio, la concentración resultante de gas disuelto en el líquido, se le denomina solubilidad.

Para **disoluciones ideales y gases perfectos**: Ley de Raoult: $P_A = P_{VA} \cdot x$



Para **disoluciones no ideales**: Ley de Henry, $P_A = H \cdot x_A$.

Esta ley se aplica en aquellos casos en los que el gas posee la misma forma molecular en ambas fases. Si esto no ocurre, por presentarse fenómenos de asociación o disociación, las desviaciones suelen ser muy grandes. Puede esperarse que muchos gases sigan la Ley de Henry hasta presiones en el equilibrio de aproximadamente 5 atm.



Para complementar esta información te invito a que consultes el documento de Arnaiz Franco, C. et al (2012). *Operaciones Básicas, Ingeniería Química* de la Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de Sevilla, con el propósito de profundizar sobre el tema de las disoluciones ideales y gases perfectos.

Otra forma de expresar el equilibrio gas-líquido es representando la inversa de la constante de la Ley de Henry en función de la temperatura, como se muestra en la siguiente **figura 3** para distintos gases disueltos en agua.

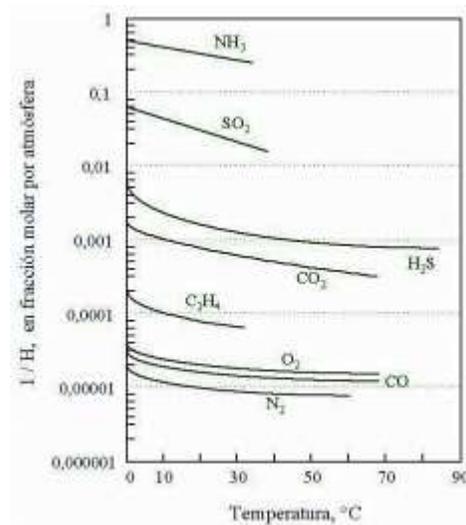


Figura 3. Constante de la Ley de Henry (Sánchez J.A. 2012)

Los balances de materia de una torre dependen de la cantidad de gas y líquido, así como de sus propiedades químicas y de la forma en que se relaciona una corriente con otra. Es relevante señalar que la altura de la columna y el volumen total de la misma dependen directamente de las variaciones de la concentración que se deseen tener del producto y por lo tanto de la velocidad de transferencia de materia por unidad de volumen de relleno **figura 4**.



3.1.3. Ecuaciones básicas de transferencia de materia

Para determinar las ecuaciones básicas de transferencia de masa de una columna de absorción es necesario realizar las siguientes determinaciones:

- El balance de cálculo de la altura de la columna.
- Balances de entalpía.
- Balance del coeficiente de transferencia de materia.

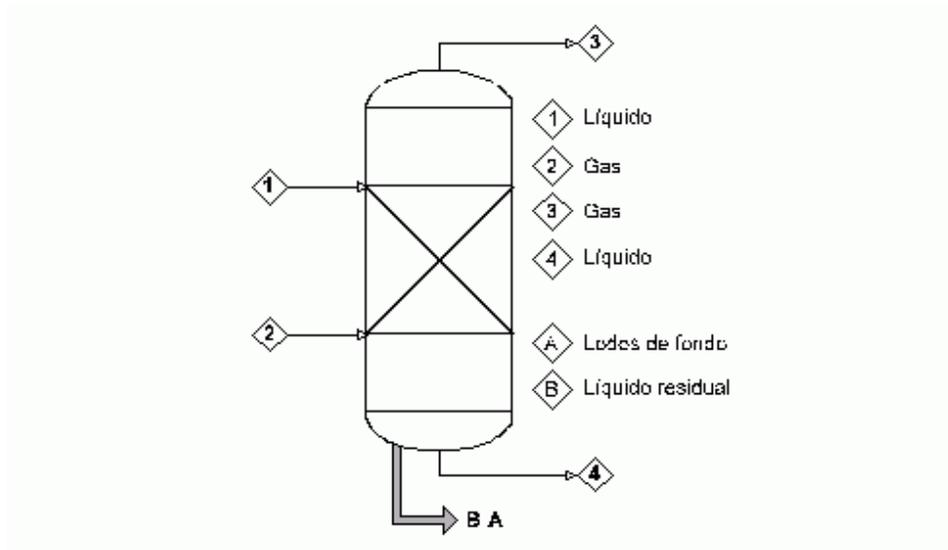


Figura 4. Columna de absorción
(<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/283/cap1.html>)

Donde:

1 = L_2 = Velocidad de flujo de líquido moles/hr

4 = L_S = Velocidad de flujo de líquido insoluble moles/hr

2 = x = Fracción mol del gas soluble en el seno del líquido

3 = X = Relación mol entre gas soluble y el líquido insoluble

$$L_2 = L_S + X_2 ; \quad (\text{Materia total})$$

L_1 = Cantidad del líquido de salida

$$L_1 = L_S + L_1 x_A$$

L_S = Cantidad del líquido insoluble

$$L_S = L_1 - L_1 x_A = L_1 (1 - x_A)$$

Donde



$$X_i = \frac{x_i}{1 - x_i}$$

$x_s =$ Fracción mol del líquido insoluble

$$x_s = \frac{L_s}{L_2}$$

$$x_s = \frac{L_s}{L_2} = \frac{L_1(1 - x_1)}{L_1} = (1 - x_1)$$

$X_s =$ Relación entre gas insoluble y el líquido

$$X_s = V$$

$G_2 =$ Velocidad de flujo del gas

$$G_2 = G_s + G_2 Y_2$$

$$G_s = G_2 - G_2 Y_2$$

O quedará así:

$$G_s = G_2(1 - Y_2)$$

Para la parte de entrada de gas

$$G_1 = G_s + G_1 Y_1$$

$$G_s = G_1 - G_1 Y_1$$

$$G_s = G_1(1 - Y_1)$$

$Y_1 =$ fracción mol del gas soluble

$Y_s =$ fracción del gas insoluble

$$Y_2 = 1 - Y_s$$

$$Y_2 = 1 - Y_2$$

$$Y_1 = 1 - Y_s$$

$$Y_s = 1 - Y_1$$

$Y_1 =$ Relación mol entre el gas soluble entre el gas insoluble

$$Y_2 = \frac{Y_2}{(1 - Y_2)} \quad Y_1 = \frac{Y_1}{(1 - Y_1)}$$



Para concluir este tema es necesario que recuerdes y tengas muy presente qué son las operaciones unitarias e identifiques algunos ejemplos que se utilizan en la industria para el uso de absorbedores o desorbedores.

Recordemos que el objetivo principal de estas operaciones unitarias es recuperar un soluto que forma parte de una corriente gaseosa, entre los que podemos mencionar al amoníaco, al ácido clorhídrico, al trióxido de azufre, y para uso de procesos de transformación de energía renovables están los contaminantes atmosféricos, tales como el bióxido de azufre.

En esta operación, lo más deseable sería obtener una separación perfecta de la mezcla gaseosa, ya sea para obtener un gas puro o para concentrar posteriormente el gas soluble. Pero como se puede observar, a partir de las leyes físicas, esto no es posible, ya que el potencial químico no lo permite. Esto se hace evidente al efectuar los cálculos para el diseño, puesto que si se deseara obtener una separación perfecta se requeriría un equipo de proporciones gigantescas. Debido a las limitaciones de costo, tiempo y espacio, con esta operación lo que se pretende es lograr la máxima separación posible dentro de límites específicos.

Hoy en día, la absorción se emplea para la obtención industrial del bióxido de carbono, en la producción del hidróxido de amonio y en la industria petrolera para la recuperación de las porciones ligeras de los hidrocarburos; también se emplea ampliamente para reducir la emisión de gases contaminantes.

Para aplicar los conocimientos hasta ahora adquiridos te pido resuelvas la **actividad 1**, donde leerás un artículo y realizarás una comparación de las diferencias de absorción; un esquema descriptivo donde deducirás el comportamiento energético de absorción. Te invito a que leas y reflexiones sobre el tema.

3.2. Columna de platos

En el balance de materia para absorbedores se utilizan con frecuencia métodos gráficos para sistemas de dos componentes porque nos permite resolver muchos problemas de transferencia de materia. Estos métodos se basan fundamentalmente en balances de materia y relaciones de equilibrio.

Recuerda que para un sistema binario, los componentes de dos fases de una cascada pueden representarse en una gráfica para procesos, tales como destilación, desorción y absorción, como se representa en la **figura 5**.

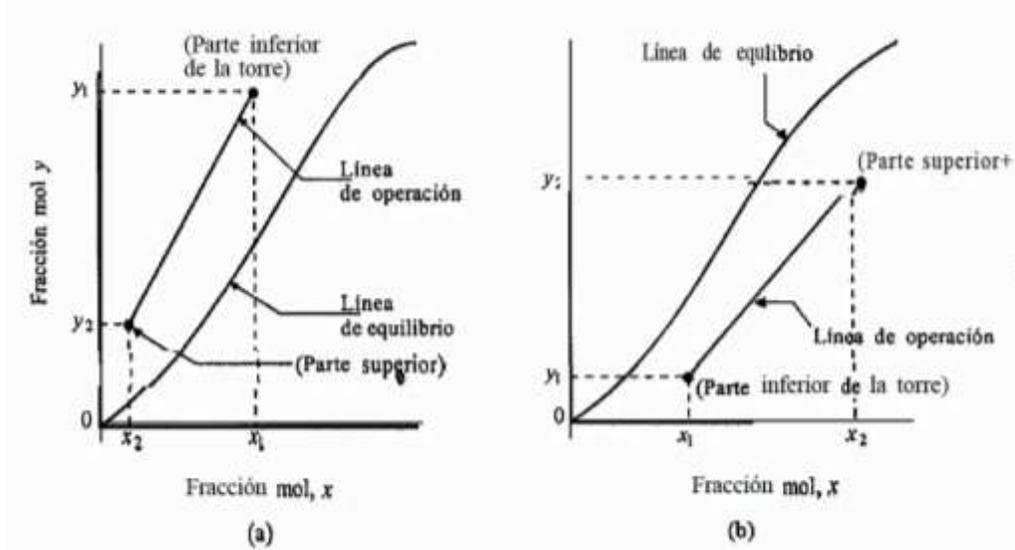


Figura 5. Líneas de operación: a) Para la absorción de A de la corriente V a la L, b) para el empobrecimiento de A de la corriente (Mc Cabe, et al 2003).

Las columnas de platos permiten e menudo el manejo de sólidos más fácilmente que los rellenos tanto las velocidades del gas y del líquido en los platos son a menudo un orden de magnitud superior de las que existen a través de los rellenos, proporcionando una acción de barrido que mantiene limpias las aperturas de los platos.

Los sólidos tienden a acumularse en los huecos del relleno, hay muchas ubicaciones en los platos donde los sólidos se pueden depositar, el taponamiento de los distribuidores líquidos es un problema común. La limpieza de los platos es más fácil que la limpieza de los rellenos. No todos los platos tienen agujeros más grandes o válvulas fijas grandes y deban ser usados cuando el taponamiento o el ensuciamiento son importantes.

La absorción de gases en la absorción de columnas de platos se realiza en columnas equipadas con platos perforados u otros tipos de platos que normalmente utilizados en destilación con frecuencia se elige una columna de platos perforados en vez de la de relleno, con esta elección se evita la mala distribución del líquido en una torre de gran diámetro y disminuir la incertidumbre en el cambio de escala. En el número de etapas teóricas se determina trazando escalones para los platos en un diagrama de Y-x y el número de etapas reales se calcula después de calcular la eficiencia de la misma. En la siguiente imagen puedes observar algunos tipos de platos perforados como son el Plato perforado, el plato de válvulas y el plato de capuchones.

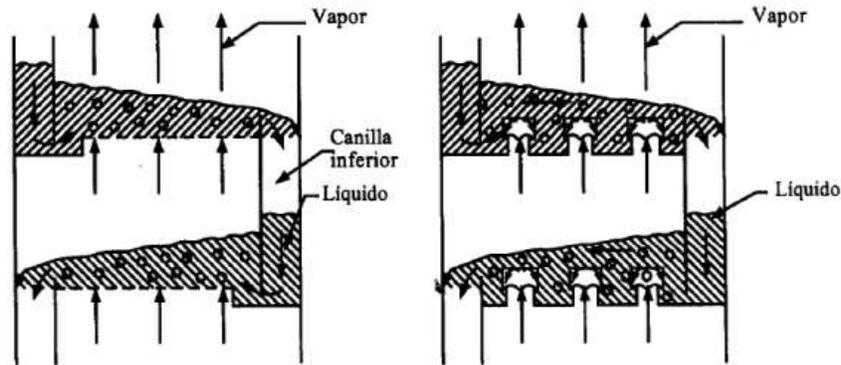


Figura 6. Tipos de platos perforados (McCabe W. L et al 1991).

Las columnas de platos la operación se realiza en etapas cada plato proporciona una mezcla íntima entre las corrientes de líquido y vapor. El líquido pasa de un plato a otro por la fuerza de la gravedad en sentido descendente, mientras que el vapor fluye en sentido ascendente a través de las ranuras de cada plato, burbujeando a través del líquido.

A cada plato se le exige que sea capaz de tratar las cantidades adecuadas de líquido y vapor sin una inundación o un arrastre excesivos que se estable en su funcionamiento y resulta relativamente simple en cuanto a instalación y mantenimiento, recuerda que es importante conseguir que la caída de presión en el plato sea mínima.

El número de platos necesarios para efectuar una separación dada vendrá determinado por distintos factores, que se analizarán a continuación. Por lo general cuanto mayor sea el número de platos de la torre, mayor será la separación conseguida.



3.2.1. Contacto discontinuo

En los absorbedores se realiza una operación básica de separación de los componentes de una mezcla mediante vaporización y condensación sucesivas de los mismos a lo largo de una columna.

Existen dos tipos de operaciones que se realizan en los absorbedores pero la de mayor interés para este tema es la discontinua como se observa en la siguiente imagen

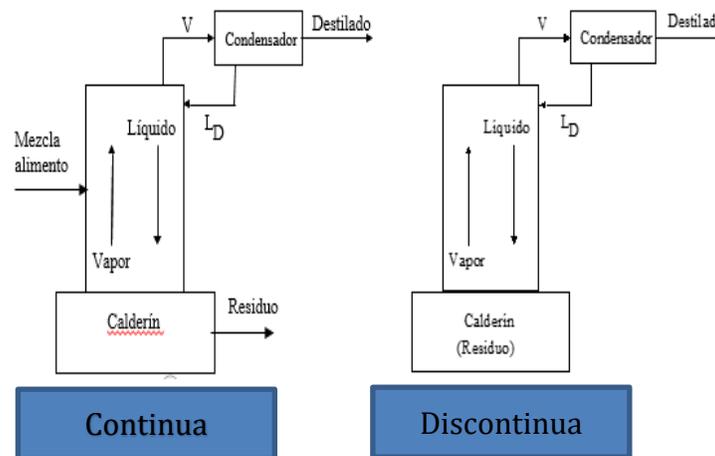


Figura 7. Tipos de operaciones (Zavaleta, O. 2007)

Las operaciones de tipo continuas, donde las corrientes de entrada fluyen permanentemente al equipo y las corrientes de salida fluyen de la misma forma; el tamaño del equipo viene determinado directamente por el caudal y la velocidad de la operación; el tiempo no influye y se opera en régimen estacionario.

Si se habla de una operación discontinua donde el producto se carga en el equipo, se procesa y finalmente se descarga; el tamaño del equipo viene determinado por el tiempo necesario para alcanzar las características deseadas; el funcionamiento es en régimen no estacionario.

Las características de un sistema que opera en forma discontinua:

- El alimento se introduce una sola vez en el calderón.
- El vapor se enriquece en el componente volátil que asciende en la columna.
- Solo hay sector de enriquecimiento
- La mezcla cambia de composición durante la operación.
- El vapor se empobrece en componente volátil a lo largo de la operación.



El absorbedor que trabaja en forma discontinua siempre en régimen no estacionario, varia a lo largo del proceso sus propiedades de reacción, los flujos de entrada y de salida del reactor no se tienen en cuenta dado que el tiempo cero del proceso es el momento de iniciarse la reacción, la cual transcurre hasta el momento en que se descarga el sistema, momento que suele aprovecharse para el acondicionamiento del sistema ya sea de limpieza, modificaciones reparaciones, mantenimiento, etc.

3.2.2. Línea de operación

Las líneas de operación de los absorbedores son curvas al construir los gráficos en unidades tales como la fracción molar y la presión parcial, observa la figura anterior donde la línea de operación pasa por el origen y termina en la ordenada en y_1 , si se le emplea una cantidad de líquido tal que de la línea de la composición de salida es representada por x_1 . Si se utiliza menos líquido, esta composición de salida será mayor tal que el punto de alimentación disminuye la fuerza directriz, en la absorción es más difícil. El tiempo de contacto entre gas y líquido tiene que ser mayor por lo tanto el absorbedor será de mayor altura. La cantidad mínima de líquido a utilizar corresponde a la línea de operación de la parte inferior a la parte superior de la torre. La pendiente de la línea que se observa más definida es la relación entre el flujo de la corriente de líquidos y el de la corriente de vapor. Para un posterior análisis es conveniente

En la línea de operación existen dos secciones en la columna, hay también dos líneas de operación una para la sección de enriquecimiento y otra denominada sección de agotamiento, es importante recordar que la sección de enriquecimiento es la línea de mayor importancia.

La siguiente ecuación representa la línea de operación para una columna donde x_n fracción molar es un punto intermedio de la columna que incluye la concentración de la fase I que sale de la etapa y_{n+1} y la concentración de la fase v que entra en dicha etapa.

$$y = \frac{L}{V_{n+1}} X_n + \frac{V_a y_a - L_a X_a}{V_{n+1}}$$

Esta ecuación representa la línea de operación para una columna donde se presenta los puntos de x , y y_{n+1} para todas las etapas, las líneas que pasan por todos estos puntos reciben el nombre de operación.

Recordemos que cuando los caudales molares no son constantes en la columna, la línea de operación no es recta en una representación gráfica sencilla.



3.2.3 Numero de etapas teóricas

Las etapas teóricas son de gran importancia que sean N etapas adiabáticas, dispuestas para absorber las especies presentes en la muestra de alimentación del vapor que entra por la base de la columna. Supóngase que estas especies están ausentes en el líquido que entra al observador. Las etapas se numeran de la parte superior a la inferior. El balance de materia incluyendo las etapas 1 a N-1, para una especie cualquiera que se absorbe, se representan matemáticamente de la siguiente forma.

$$V_{iN} = V_{I1} + l_{iN-1}$$

$$V_{iN} = Y_{iN}V_N$$

$$l_{i,N-1} = X_{i,N-1}L_{N-1}$$

Y el valor de $l_{i,o} = 0$ Ya que se ha considerado que el líquido que se calienta por la cabeza no contiene ninguna de las especies presentes en el gas de entrada a la columna a partir de consideraciones de equilibrio para la N etapa.

$$Y_{in} = K_{iN}X_{iN}$$

Combinando las ecuaciones anteriores se obtiene el modelo matemático para calcular el número de etapas teóricas del absorbedor.

$$V_{iN} = \frac{l_{iN}}{\left(\frac{L_N}{K_{iN}V_N}\right)}$$

Se define el factor de absorción, A_{ij} , para una etapa j y un componente i dados, por:

$$A_{ij} = \frac{L_j}{K_{ij}V_j}$$

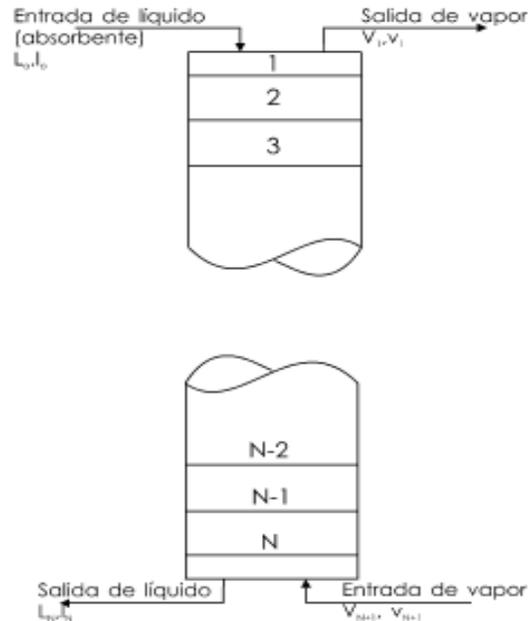


Figura 8. Esquema de absorbedor (Gómez, A S. et al 2014).

En forma general las torres de platos consisten en cilindros donde suponen en contacto íntimo los platos una fase gaseosa y una líquida para que se verifique una transferencia de masa de una fase a la otra y en forma recíproca.

El funcionamiento primordial de los platos es que se introduce un líquido en la parte superior y se introduce a otra en la inferior, el líquido baña la parte superior de los platos y desciende el vapor vertiéndose al siguiente y así sucesivamente hasta llegar al pie de la torre. El gas sube desde la parte inferior pasando a través de aberturas que posee los platos para producir espuma en el líquido, de modo que se verifique, la transferencia de masa hasta que llega a la cabeza de la torre de platos.



Para complementar te pido para conocer más sobre la línea de operación de una columna de absorción que revises el artículo de Garfias, F. y Barnés F. (1992). *Diseño de columnas de Absorción Adiabática*. México: Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Recuerda que en una línea de operación como la que pudiste observar en la **figura 5** se representan las concentraciones del líquido y el gas a cualquier altura de la torre. Cada punto sobre la curva de equilibrio representa la composición del gas en equilibrio con el



líquido correspondiente, a la concentración y temperaturas locales. La distancia de la línea operativa a la curva de equilibrio representa la fuerza impulsora para la transferencia de materia.

En general las torres de platos consisten en cilindros se ponen en contacto íntimo sobre charolas o platos en una fase gaseosa y una líquida para que se verifique una transferencia de masa a la otra y viceversa.

Los tipos más comunes de columnas de platos son los de tapa circular, los de plato de válvula y los de plato de orificios o malla. Las columnas más estudiadas son las etapas circulares, disponiendo para ellas de un número mayor de tablas y ecuaciones empíricas para su diseño.

Es importante determinar:

- ¿Qué variables se toman en cuenta para cada tipo de columnas de absorción?
- ¿En qué procesos industriales se utilizan?

Los equipos más utilizados en las operaciones de absorción son las torres empacadas y la columna de platos. Es importante señalar que esta última presenta una menor caída de presión. Son equipos que permiten el contacto discontinuo entre el líquido y el gas; están compuesto por una serie de platos o etapas y en cada uno de ellos se ponen en contacto las fases, separándose después para entrar en una etapa nueva.

El funcionamiento del siguiente tipo de columnas (**figura 9**) consiste en hacer pasar una corriente (que, generalmente, es un líquido) por la parte superior y por la parte inferior; dicho líquido baña la parte superior de los platos y desciende por los vertederos hacia el siguiente plato y así sucesivamente hasta llegar al pie de la torre. El gas sube desde la parte inferior pasando a través de las aberturas que poseen los platos para producir espuma en el líquido, de modo que se verifique la transferencia de masa, hasta llegar a la cabeza de la torre.

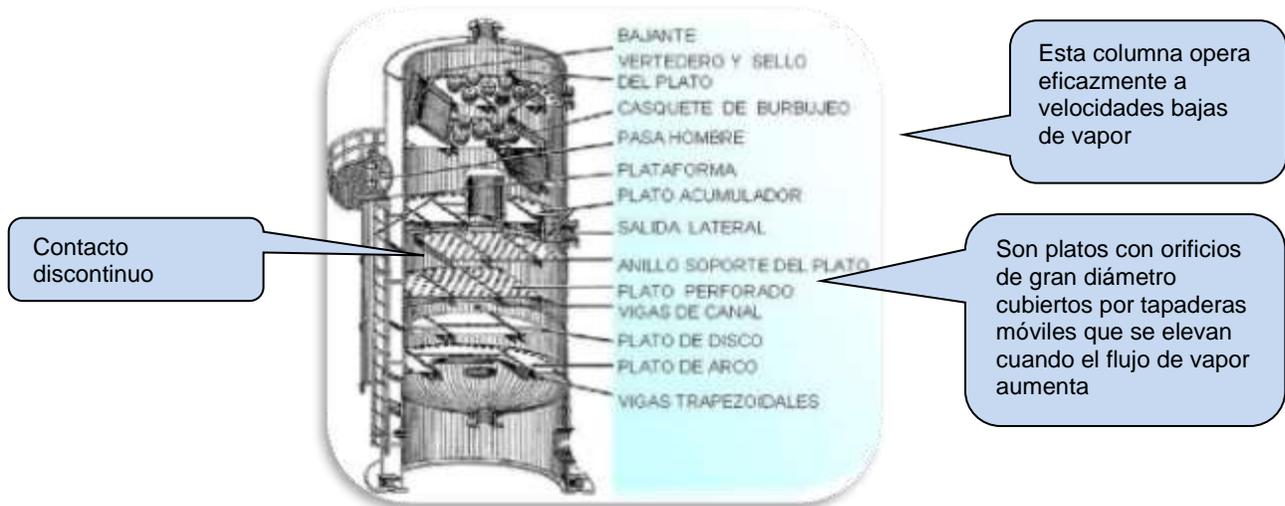


Figura 9. Columna de platos (Hamburg G. 2012).

Para aumentar el tiempo de contacto, la altura del líquido sobre el plato debe ser grande, para aumentar el área de contacto, el flujo debe de ser rápido. Una gran desventaja es el flujo lento de gas, dado que fluye como un pequeño lloriqueo o goteo. Cuando el líquido escurre por los orificios del plato el gas no tiene suficiente empuje para evitarlo.

Los factores críticos necesarios a considerar para el diseño de las columnas de platos en una operación unitaria deben ser determinados por el número de etapas teóricas. Las cuales son los siguientes:



Las columnas de platos son de flujo cruzado, denominado también *Cross Flow*; si existen platos con orificios y si éstos son grandes permitirán la caída del líquido sin la necesidad de vertederos, también existen flujos en contracorrientes *counterflow plate contactor*.

Para recordar, una columna de platos está compuesta por dispositivos discontinuos entre el líquido y el gas, los cuales constan de una serie de platos y en cada una de ellas se ponen en contacto las fases separándose después para entrar a una etapa nueva. El número de etapas teóricas se determina trazando escalones para los platos en un diagrama $y-x$ y el número de etapas reales se calcula después utilizando una eficiencia media de los platos.

Recordemos que una etapa ideal de contacto es un modelo con el que se puede comparar una etapa real. Un problema importante consiste en determinar el número de etapas ideales que se requiere en una cascada real para cubrir un deseado intervalo de concentración desde X_a hasta X_b o su equivalente desde Y_a hasta Y_b , si este número se puede determinar y se dispone de información acerca de la eficiencia de las etapas, se puede calcular el número de etapas reales. Este método habitualmente es utilizado para el diseño de cascadas.

Para determinar el cálculo del número de platos teóricos se realiza mediante una gráfica (**figura 10**), como se muestra en la figura que desarrolló McCabe-Thiele, en la que podemos observar coordenadas de Y v/s X o v/S x , la línea de operación y la curva de equilibrio. El número de escalones que resulta es el número de platos teóricos, como se observa en la figura del absorbedor de platos.

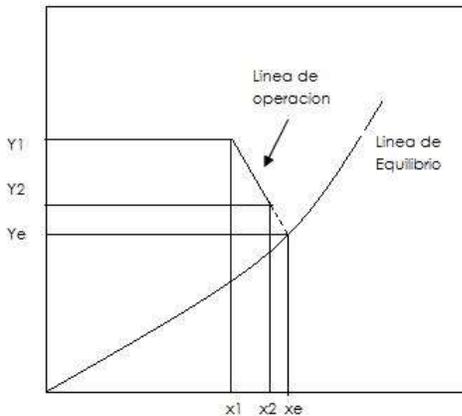


Figura 10. Absorbedor de platos (Nuñez M.A. 2014).

Para el diseño de absorbedores, la cantidad del gas que se tratará, las concentraciones finales y la composición de entrada del líquido, generalmente se fijan por las necesidades del proceso a realizar, pero la cantidad de líquido dependerá del proceso que se decida utilizar o ejecutar.

3.2.4 Relación mínima líquido- gas para absorbedores

Observa la **figura 11** en la que muestra una línea de operación, la cual debe pasar a través del punto D y terminar en la ordenada al origen. Si se usa tal cantidad de líquido para obtener la línea de operación D, el líquido que sale tendrá mayor concentración del producto. Si se utiliza una cantidad menor de líquidos, la composición de líquidos saliente será mayor como el punto F debido a las fuerzas motrices para la difusión, las cuales son menores y la absorción es más difícil.

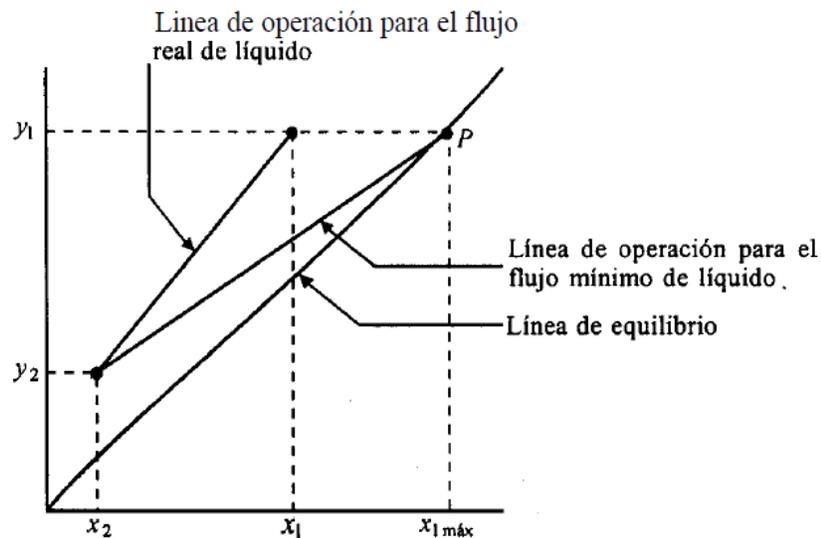


Figura 11. Relación mínima líquidos/ gas (Valiente B.A, 2012)

Observa nuevamente la **figura 11** la relación mínima líquido-gas corresponde a una concentración del líquido saliente en equilibrio con el gas que entra. Este principio también es aplicable a los desorbedores en donde una línea de operación que toque, en cualquier punto, a la curva en equilibrio, representa una relación máxima de líquidos a gas y una concentración máxima de gas saliente.

3.2.5. Relación mínima líquido- gas para desorbedores

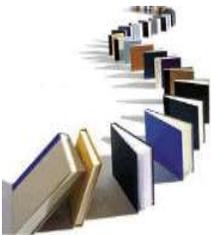
El requisito de un buen contacto entre el líquido y el gas es la condición más difícil de cumplir, especialmente en torres grandes. Idealmente, el líquido, una vez distribuido en la parte superior del relleno, fluye en forma de una película sobre la superficie del relleno durante todo el recorrido de descenso a través de la torre. En la realidad las películas tienden a crecer de espesor en algunos lugares y a disminuir en otros, de forma que el líquido se agrupa en pequeñas corrientes y desciende a través de caminos preferentes localizados en el relleno. En el diseño de los absorbedores, la cantidad de gas a ser tratado G o G_s , las concentraciones terminadas de Y_1 y Y_2 y la composición del líquido de entrada X_2 normalmente son ajustados de acuerdo con los requerimientos del proceso; sin embargo, la cantidad de líquido que se utiliza está sujeto a elección.

Si se utiliza una cantidad menor del líquido la composición a la salida del líquido será mayor, como en el punto F, pero debido a que la fuerza motriz para la difusión es menor, la absorción es más difícil. Por lo que el tiempo de contacto entre el gas y el líquido debe ser



mayor, además de que la torre empacada debe ser más alta. Cuando el líquido mínimo que se puede utilizar corresponde a la línea de operación, que toca la curva de equilibrio y es tangente a la curva en el punto la fuerza motriz es cero y el tiempo de contacto para el cambio de concentración es infinito por lo que resulta una torre infinita por consiguiente esto representa la relación L/G mínima.

La curva de equilibrio por lo regular es cóncava, como se puede ver la relación mínima de L/G corresponde a la concentración de salida del líquido en equilibrio con la del gas de entrada. Estos principios se pueden aplicar a los desorbedores, en donde las líneas de operación que toca a la curva de equilibrio en diferentes puntos representan la relación máxima L/G y una concentración máxima de la salida del gas.



Te sugiero que revises las páginas 685-695 el libro de Geankoplis. C.J. (2010). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México. Ceca. Para conocer un poco más sobre la relación mínima entre líquidos y gas.

Especialmente para bajas velocidades del líquido, una buena parte de la superficie del relleno puede estar seca, o más frecuentemente, recubierta por una película estacionaria de líquido. Este efecto se conoce con el nombre de **canalización** y es la principal razón del mal funcionamiento de las grandes torres de relleno.

La canalización es más severa en torres con relleno ordenado, menos severa en relleno formado por sólidos triturados y todavía menos en rellenos al azar de unidades de forma regular tales como anillos 7.

En torres de tamaño moderado la canalización puede minimizarse haciendo que el diámetro de la torre sea por lo menos 8 veces el diámetro del relleno. Si la relación entre el diámetro de la torre y el diámetro del relleno es inferior a 8:1, el líquido tiende a desplazarse hacia fuera y descender por la pared de la columna.

Observa la **figura 12** donde se muestra un stripper o desorbedor en la que la línea de operación queda por debajo de la línea de equilibrio.

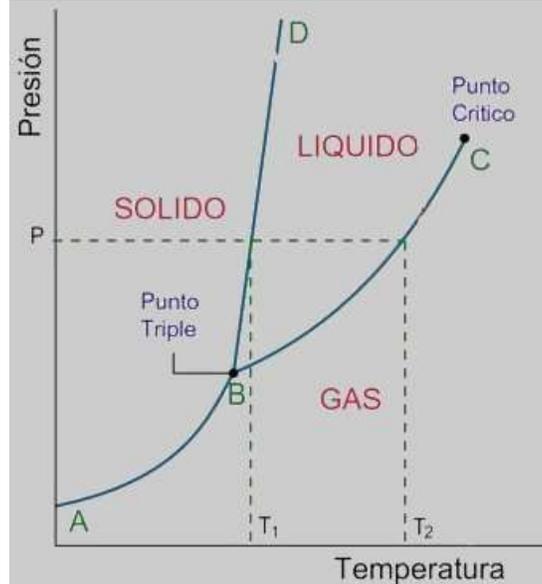


Figura 12. Relación máxima de Líquido/ Gas (Burbano S.E 2010)

Por último, recordemos que el objetivo de esta operación unitaria es la de purificar una corriente gaseosa para su procesamiento posterior o su emisión a la atmósfera, o bien, recuperar un componente valioso presente en la corriente gaseosa. Para su diseño y fabricación se deben de tomar en cuenta las propiedades físicas y químicas del gas y el líquido a utilizar. Esto ha sido un estímulo para el continuo perfeccionamiento de los equipos de absorción y desorción para la introducción de nuevos procesos de producción en la industria.

Como se ha desarrollado a lo largo de esta unidad, la absorción es una operación de separación que consiste en la transferencia de uno o más componentes minoritarios de una corriente gaseosa a una corriente líquida llamada disolvente.

“La absorción del SO_2 presente en los gases de combustión mediante soluciones alcalinas y la absorción de CO y CO_2 del gas de síntesis de amoníaco son ejemplos de purificación, mientras que la absorción de óxidos de nitrógeno en agua es la etapa final del proceso de fabricación de ácido nítrico”. (Valiente 2010).

Las operaciones de transferencia de masa son fundamentales para los ingenieros, ya que todas las plantas químicas, petroquímicas, farmacéuticas y de productos alimentarios contienen procesos y aparatos que pueden definirse como intercambiadores de masa. Por ello, los estudiantes de la carrera deben conocer operaciones de transferencia de masa, como lo es la absorción.



3.3. Columnas Empacadas

Una torre empacada consiste en una carcasa cilíndrica que contiene un material de relleno inerte, cuyo principal objetivo es establecer una interfase a fin de poner en contacto muy cercano la fase gaseosa y líquida. La cantidad de transferencia de materia depende de la superficie interfacial y de las características de los componentes.

Es importante tomar en cuenta las propiedades que debe tener el relleno, las cuales son:

- a. Baja pérdida de presión
- b. Alta capacidad
- c. Bajo peso y baja retención de líquido
- d. Gran superficie activa por unidad de volumen.
- e. Gran volumen libre por unidad de volumen
- f. Alta durabilidad, resistencia a la corrosión, bajo coste.

Las columnas de relleno o equipos empacados son equipos diseñados en forma cilíndrica que contiene en su interior un relleno cuyo objetivo es maximizar el área de contactos entre el gas y líquido. El líquido se distribuye sobre estos y escurre hacia abajo a través del lecho empacado, de tal forma que expone una gran superficie de contacto con el gas. Las torres empacadas tienen eficiencias de premonición de gases m altas que otros equipos manejando caudales de gas residual más a y menor cantidad de líquido de limpieza.

En las torres empacadas la importancia de distribución inicial de los líquidos es muy grande, pues determina, en cierta medida la eficiencia de la torre, en general se utiliza un número de distribuidores de 5 por 0.1 m² de sección transversal.

La torre puede ser elaborada de madera, metal, porcelana, vidrio, plásticos, metal cubierto de plástico según las condiciones de corrosión. Para facilitar su construcción y aumentar su resistencia, generalmente son circulares en la sección transversal.

3.3.1. Contacto continuo

Las torres empacadas se usan en contacto continuo o contracorriente, las columnas verticales son rellenadas con empaques. Dentro de las torres, el líquido se distribuye y desciende a través del empaque, las piezas se colocan dentro del equipo y se utilizan para aumentar el área interfacial.

Como podemos observar en la **figura 13** una columna de absorción es un equipo cilíndrico de gran altura empacada, donde generalmente la corriente de gas y la corriente de líquidos fluyen a contracorriente dentro de la torre.



La corriente gaseosa se alimenta por la base de la columna de absorción y sale por el domo, y la corriente líquida se alimenta por el domo y se descarga por la base, entre estas corrientes se crea una interfase muy grande por la división de la corriente líquida al mojar y salpicar el empaque. Es un fenómeno parecido a la caída de una cascada donde el líquido choca contra el relleno, las salpica y se forman pequeñas gotas.

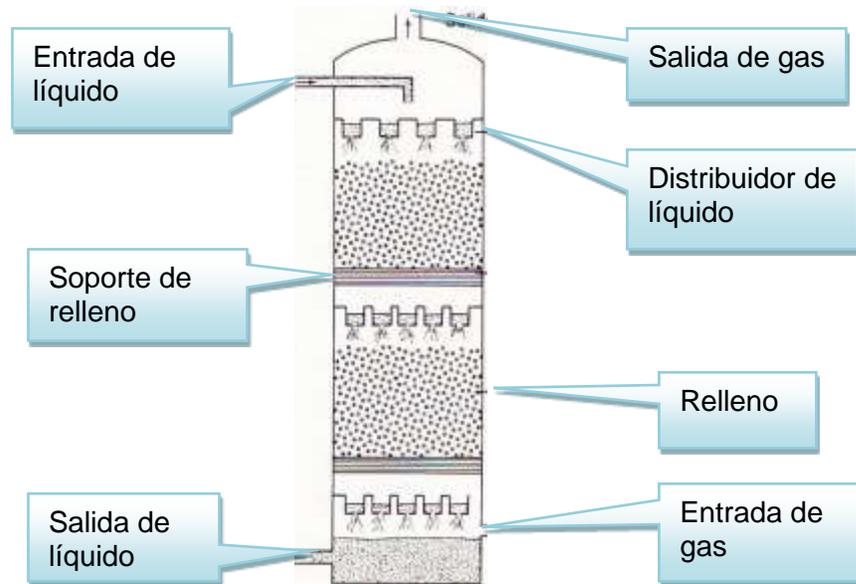


Figura 13. Columna de absorción empacada (Valiente A.B, 2010)

Además se puede observar que esta columna está rellena de anillos *Rashing* de 10 mm x10 mm, también de vidrio, los cuales son representativos del tipo de rellenos muy utilizados en la absorción de gases. El líquido que es usado para el proceso de la alimentación de una centrifuga la cual está ubicada en la cabeza de la columna, hace que descienda el líquido a través del relleno y vuelva al tanque.

En las torres empacadas en contracorrientes **de la figura 14**, los fluidos no están en contacto intermitente, como en las torres de platos, si no que se hallan en contacto continuo durante su recorrido a través de la torre, por lo que las composiciones de los líquidos cambian con la altura del empaque.

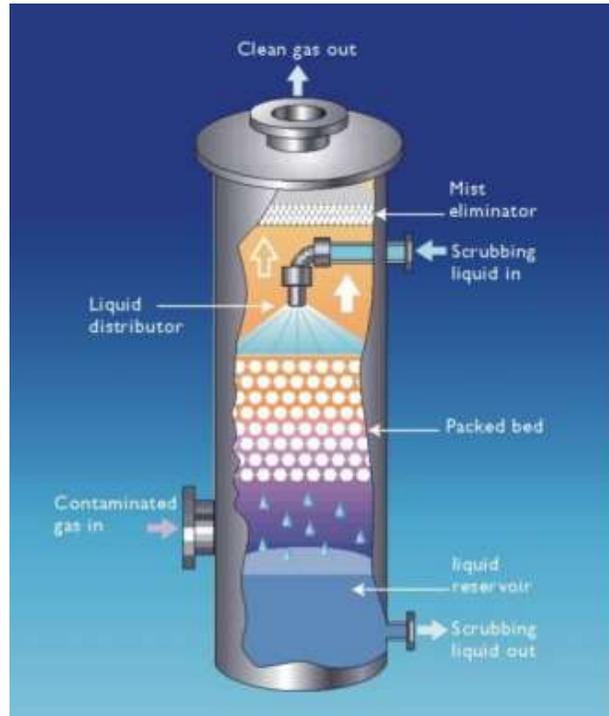


Figura 14. Torre de absorción (Arnaiz Franco, C. 2012)

3.3.2. Selección del empaque

Se ha discutido el tema de absorción de columnas, de absorción de relleno y también hemos identificado que existen empaques que son usados para este fin. Recordemos que el empaque provoca una gran área de contacto y fomenta el contacto íntimo entre fases haciendo que el soluto que viene con el gas se disuelva, esto depende de qué:

- ¿De los tipos de empaques más utilizados?
- ¿De las características que deben tener estos empaques?

Se han diseñado muchos tipos de torres y muchas de ellas son de uso frecuente, el relleno puede ser cargado al azar en la torre, o bien ser colocado ordenadamente a mano. Los rellenos de las columnas de absorción o desorción deben cubrir algunas especificaciones, tales como:

- Los empaques deben proporcionar una gran superficie interfacial entre el líquido y el gas; la superficie por unidad de volumen de espacio empacado debe ser grande en forma macroscópica. Por ejemplo, el coque tiene una gran superficie debido a su estructura porosa.
- Los empaques deben poseer buenas características de flujo, esto quiere decir que deben permitir el paso de grandes volúmenes de flujo a través de pequeñas secciones de la columna, evitando la caída de presión para la fase gas.



- Deben ser químicamente inertes a los fluidos del proceso.
- Su estructura debe permitir el manejo fácil e instalación de los empaques de absorción.

La gran mayoría de los rellenos que se construyen y diseñan son baratos, inertes y ligeros y de materiales tales como arcilla, porcelana, plásticos, aceros, aluminio, también son unidades de relleno huecas, para garantizar la porosidad del lecho y el paso de los fluidos.

Los empaques en las columnas pueden acomodarse de dos formas al azar y en forma regular. El empaque al azar, en este tipo de arreglo no tiene ninguna forma, en comparación con el regular donde se coloca siguiendo un patrón o principio particular (ver **figura 15**).



Figura 15. Empaques para columnas de absorción (Revah S.M. 2010).



Anteriormente se usaban materiales de empaque como pedazos de vidrio, grava, trozos de coque, posteriormente se emplearon los empaques geométricos, tales como anillos Rasching, Pall y Lessing o las sillas Berkl, Intalox y los tellerete.



Te invito a que revises el material del documento de Besona Hnos. (2012). *Anillos tipo Pall. Relleno para Torres*. Río tercero. Córdoba. Argentina.

Observa la siguiente tabla (**Tabla 1**) en ella podrás identificar las características de cada tipo de relleno para las columnas de absorción.

Características para torre de relleno							
Tipo	Material	Tamaño nominal, pulg	Densidad global?, lb/pie ³	Area total?, pie ² /pie ³	Porosidad, ε	Factores de relleno‡	
						F _p	f _p
Monturas Berl	Cerámica	½	54	142	0,62	240	\$1,58
		1	45	76	0,68	110	\$1,36
		1½	40	46	0,71	65	\$1,07
Monturas Intalox	Cerámica	½	46	190	0,71	200	2,27
		1	42	78	0,73	97	1,54
		1½	39	59	0,76	52	1,18
		2	38	36	0,76	40	1,0
		3	36	28	0,79	22	0,64
Anillos Raschig	Cerámica	4	55	112	0,64	580	\$1,52
		1	42	58	0,74	155	\$1,36
		1½	43	37	0,73	95	\$1,0
Anillos Pall	Acero	2	41	28	0,74	65	\$0,92
		1	30	63	0,94	48	1,54
		1½	24	39	0,95	28	1,36
	Polipropileno	2	22	31	0,96	20	1,09
		1½	5,5	63	0,90	52	1,36
		1½	4,8	39	0,91	40	1,18

Tabla 1. Tabla de relleno (Besona Hnos 2012)

Actualmente se emplean con mayor frecuencia los empaques estructurados de alta eficiencia, los cuales están tejidos en forma de espiral y pueden ser construidos en diversos materiales tales como la cerámica, el acero, el polietileno, el cobre entre otros. Los empaques son nombrados de acuerdo a los fabricantes, son de gran tamaño y ocupan



en su totalidad el área interna de la torre. Además existen, hoy en día, empaques pequeños los cuales son fabricados en arcilla, cuarzo o porcelana. Los más usados industrialmente son construidos geoméricamente, algunos se utilizan para la purificación de gases contaminantes en procesos químicos, lo más usados son los anillos Rashing.



Para conocer más sobre los empaques de las columnas de absorción te sugiero revises las páginas 663 a 666 del libro Mc Cabe, W. et al (2003). *Operaciones Básicas de ingeniería Química*. España. Reverte,

3.3.3. Cálculo de la altura de la columna

El cálculo básico de un absorbido comprende la determinación de la altura de trabajo y el diámetro de la torre. Para luego calcular la altura total del equipo, aplicando criterios empíricos para fijar los espacios necesarios por encima y por debajo del volumen efectivo de trabajo; tales espacios son necesarios para la entrada y salida de los fluidos y para separar las partículas de líquido que pudiera arrastrar el gas.

La altura de la columna está dada por la siguiente expresión en relación con el coeficiente de transmisión de materia de la fase gas y la composición del gas (no esta fase podríamos usar las presiones para el cálculo de N_{OG}).

$$Z = H_{OG}N_{OG}$$

$$H_{OG} = \frac{G_m}{K_G a P} \quad N_{OG} = \int_Y^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y_1}$$

También se puede expresar en función de los mismos parámetros de la fase líquida.

$$Z = H_{OL}N_{OL}$$

$$H_{OL} = \frac{L_M}{K_L a C_1} \quad Z_{OL} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x_1 - x}$$

Donde:

G_m y L_m = flujo molar de gas o líquido por unidad de área de sección transversal a área interfacial por unidad de volumen.

P = presión total.

C_t = concentración molar total

Y y Y_1 = Fracción molar del soluto en el gas en el fondo y en el tope de la columna respectiva

X y X_1 = Fracción molar del soluto en el líquido



en el fondo y en el tope de la columna respectivamente

Es factible diseñar un absorbedor utilizando cualquiera de las cuatro ecuaciones básicas de velocidad pero a menudo se emplean los coeficientes de la película gaseosa y aquí se enfatizará el uso del coeficiente de película gaseosa no se requiere hacer ninguna suposición acerca de la resistencia controlada. Aunque si la película gaseosa es la que controla un diseño basado en el coeficiente de película más simple y exacto que uno basado en esa constante.

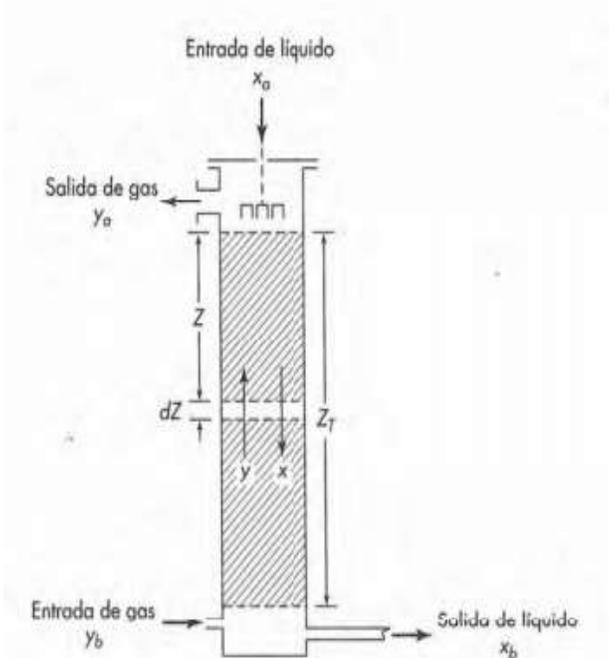


Figura 16. Diagrama de una torre empacada (Mc Cabe et al 1991).

Estas columnas de absorción de relleno deben tener determinadas características, tal y como lo señalan Barbour, Oommen y Sagun Shareef (1995): “La altura de la torre es principalmente una función de la profundidad del empaque. La profundidad requerida del empaque (H_{pack}), se determina del número teórico de unidades de transferencia de masa total (N^{tu}), necesario para alcanzar una eficiencia de remoción específica y de la altura de la transferencia de masa total (H_{tu})”.

$$N_A = Kg(Y - Y_i) = KL(X_i - X)$$

Donde

$$= Kg(Y - Y_i + H_X - H_Y)$$



Donde debemos conocer la Ley de *Henry* para gases. Recordemos esta ley que expresa que: “A una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido”.

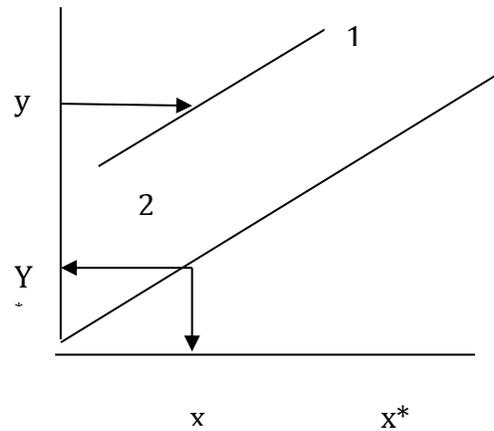


Figura 17. Diagrama de la Ley de Henry.

Esta ley fue formulada para explicar la volatilidad de las sustancias, es decir, la facilidad con que una sustancia disuelta en agua se transforma en gas y pasa a la atmósfera (Arellano 2012).

$$Y_i = Kg(Y - Hx_i + Hx_i - Hx)$$

$$= Kg(Y - Y^* - H(x_i - x))$$

De la primera ecuación

$$\frac{N_A}{KL} = (X_i - X)$$

Se sustituyen ambas ecuaciones y nos da como resultado:

$$N_A = KG \left(Y - Y^* - H \left(\frac{N_A}{KL} \right) \right)$$



$$N_A + \frac{K_g H N_A}{K_L} = K_g (Y - Y^*)$$

$$N_A = \frac{K_g (Y - Y^*)}{(1 + H \frac{K_g}{K_L})} = \frac{(Y - Y^*)}{(\frac{1}{K_g} + \frac{H}{K_L})} = K_g (Y - Y^*)$$

$$K_g = \frac{1}{\frac{1}{K_g} + \frac{H}{K_L}}$$

$$N_A = K_L (X^* - X); K_L = \frac{1}{\frac{1}{K_L} + \frac{1}{K_g H}}$$

Cantidad de gas soluble
transferencia a la fase líquida

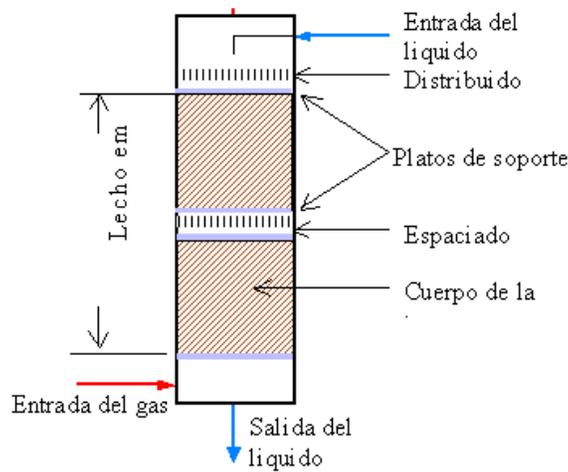
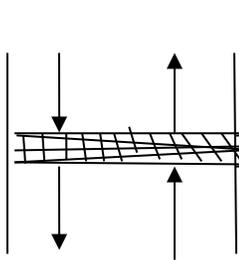


Figura 18.
Disminución de
Líquido (L) y la relación
de gas (Y-dY)



$$G_Y - G(Y - dY) = N_A \cdot av \cdot S \cdot dz \quad \text{== iguales}$$



↓
Cantidad de gas soluble
absorbido por fase líquida

L
 $X+dX$ velocidad de transferencia de masa
 $av =$ Area interfacial
 $S =$ Area de superficie transversal de la columna

G
 Y

Por último tenemos se sustituye

$$Gdy - Kg(Y - Y^*)av \cdot Sdz = 0$$

$$\int_0^z dz = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{GdY}{Kg \cdot av \cdot (Y - Y^*)} = z$$

$$z = \frac{G}{Kgav} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{dY}{(Y - Y^*)}$$

En la **figura 19** podemos observar una columna de absorción donde tenemos la entrada de gas y del líquido, así como el comportamiento de la presión durante el proceso.

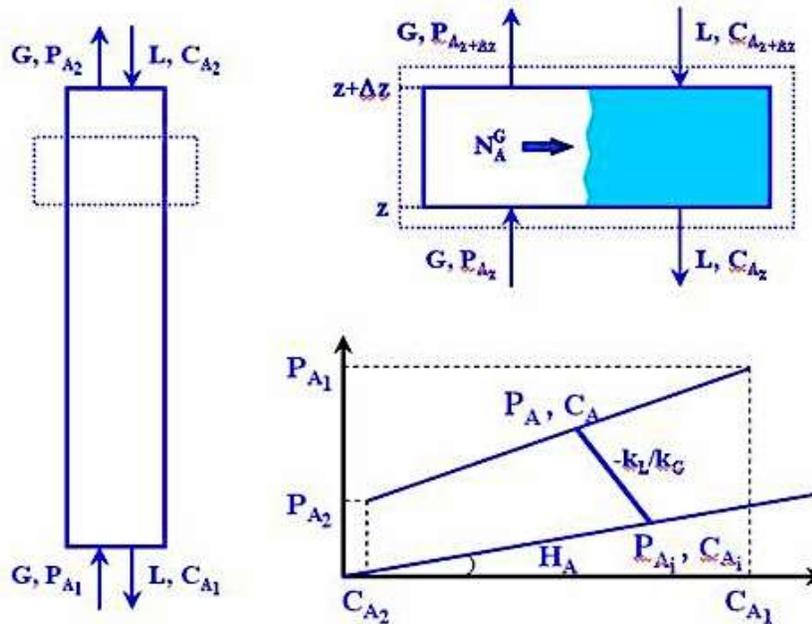


Figura 19. (Arnaiz Franco, C. et al 2012)



Para conocer más sobre las columnas de absorción tema te invito a que revise el documento de Arnaiz Franco, C. et al (2012). *Operaciones Básicas Ingeniería Química*, Escuela Universitaria Politécnica de la Universidad de Sevilla.

3.3.4. Problemas resueltos

A continuación te propongo un ejercicio para una columna de absorción de platos tomado de Valiente, 2010.

Problema 1

¿Cuál será la caída de presión esperada en una torre empacada con sillas Berl de una pulgada si por ella pasan 500 kg /h m² de aire a contracorriente con 110 000 kg /h m² de agua a 25 °C y 1 atm.?



Diagrama de flujo

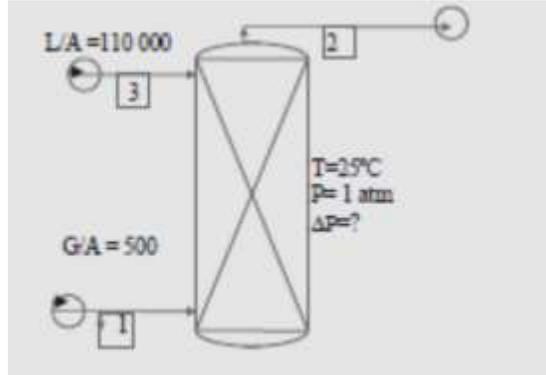


Figura 20. Columna de Absorción (Valiente B.A. 2010).

Planteamiento de problemas

Caída de presión

$$\Delta P = \alpha \frac{10^{\beta \frac{L}{A}}}{\rho_G} \left(\frac{G}{A} \right)^2$$

Cálculo

$$\rho_G = \frac{29}{0.0082(273 + 25)} = 1.19 \frac{kg}{m^3} = 0.0744 \frac{lb}{ft^3}$$

$$\frac{G}{A} = 500 \frac{kg}{hm^2} = 0.0277 \frac{lb}{ft^2 s}$$

$$\frac{L}{A} = 110\,000 \frac{kg}{hm^2} = 6.388 \frac{lb}{ft^2 s}$$

Caída de presión

$$\alpha = 0.53 \quad \beta = 0.18$$

$$\Delta P = 0.53 \times \frac{10^{0.18(6.388)}}{0.07444} (0.0277)^2 = 0.077 \frac{\text{Pulgadas de agua}}{\text{Pie de empaque}} = 6.4 \frac{\text{mm de H}_2\text{O}}{\text{m de empaque}}$$

Sigamos con los ejercicios planteados por Valiente Barbera (2010). Revisemos el Ejemplo 2 que corresponde al ejercicio 6 del mismo autor:

Se tratan 1500 m³/h de una mezcla de heptano y aire a 1 atm y 35 ° C que tiene una composición del 5% en volumen de heptano. Para ello se utilizará una columna de absorción rellena con anillos *Rasching* de cerámica. Como disolvente se



empleará un aceite que contiene 0.1 % de heptano en mol, el cual tiene una densidad de 850 kg / m³, una viscosidad de 30 cp y un peso molecular de 80. Si la concentración del heptano en el gas de salida es del 0.5 % en volumen calcule:

- La cantidad mínima de aceite.
- La concentración del heptano en el aceite saliente si se emplea un 30% más del aceite mínimo.
- El diámetro de la columna si se trabaja al 60% de la inundación.
- La altura de la columna si el proceso está controlado por la resistencia ofrecida por la fase gaseosa.

Para las condiciones de operación de este sistema la composición de equilibrio, expresada en relaciones mol, se ajusta a la ecuación:

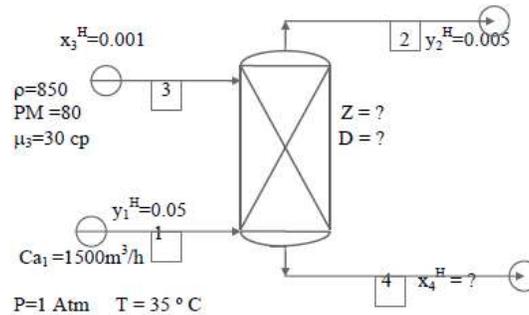


Figura 21. Columna de Absorción (Valiente B.A. 2010).

Línea de operación por tratarse de una solución diluida.

$$\frac{\widetilde{L}_1}{\widetilde{G}_1} = \frac{\Delta \widehat{Y}}{\Delta \widehat{X}}$$

$$\frac{\widetilde{L}_1}{\widetilde{G}_1} op = \frac{\widetilde{L}_1}{\widetilde{G}_1} min \times 1.3$$

Altura
En la fase gaseosa.

$$HG = \alpha \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2}{\left(\frac{L}{A}\right) \gamma} Sc^{0.5}$$



Mediante método analítico o mediante el método de Baker.

$$NOG = \frac{\tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2}{(\tilde{Y} - \tilde{Y}^*)_{In}}$$

Diámetro

El diámetro se saca mediante la inundación por medio de la gráfica, concentración y gastos.

$$\tilde{Y}_1^H = \frac{0.05}{0.95} = 0.05265 \quad \tilde{X}_3^H = \frac{0.001}{0.999} = 0.001$$

$$Y_2^H = \frac{0.00502}{0.995} = 0.00502$$

$$PM \text{ del gas} = 0.05(100) + 0.95(29) = \frac{32.55 \text{ kg}}{\text{mol}}$$

$$\rho_G = \frac{PPM}{RT} = \frac{1 * 32.55}{0.082 * 305} = 1.28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$G = 1500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \left(1.28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 1920 \text{ kg/h}$$

$$\tilde{G} = \frac{1920}{32.55} = 58.98 \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} \quad \tilde{G}_1 = 58.98(0.95) = 56.03 \frac{\text{kgmol de aire}}{\text{h}}$$

Línea de operación

$$\left(\frac{\tilde{L}_1}{\tilde{G}_1} \right) = \frac{0.05265 - 0.00502}{X_4^* - 0.001}$$

Por medio de la ecuación de la línea de equilibrio se puede obtener el valor de la concentración de líquido que estaría en equilibrio con la concentración de entrada del gas.

$$0.05265 = 2X_4^* \quad X_4^* = 0.02632$$

$$\therefore \left(\frac{\tilde{L}_1}{\tilde{G}_1} \right)_{min} = 1.88 \quad \therefore \left(\frac{\tilde{L}_1}{\tilde{G}_1} \right)_{OPE} = 1.88 * 1.3 = 2.44$$

$$\left(\frac{\tilde{L}_1}{\tilde{G}_1} \right) = 2.44 = \frac{0.05265 - 0.00502}{\tilde{X}_4^H - 0.001} \quad \therefore \tilde{X}_4^H = 0.0205 - L_{1 \text{ min}} = 1.88(56.03)(80) = 8426.9 \text{ kg/h}$$

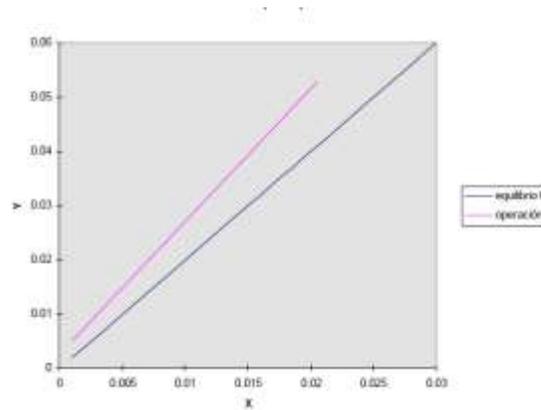


Figura 22. (Valiente B.A 2010).

Diámetro

$$G_1 = 56.03 \text{ kg mol/h}$$

$$L_1 = 2.44(56.03) = 136.71 \text{ kgmol/h}$$

$$L_i = 136.71(80) = 10936.8 \text{ kg/h}$$

$$G_I = 56.03(29) = 1624 \frac{\text{Kkg}}{\text{h}} \text{ de aire}$$

$$\frac{L_I}{G_I} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{10936.8}{1624} \sqrt{\frac{1.28}{850}} = 0.26$$

De la gráfica se obtiene:

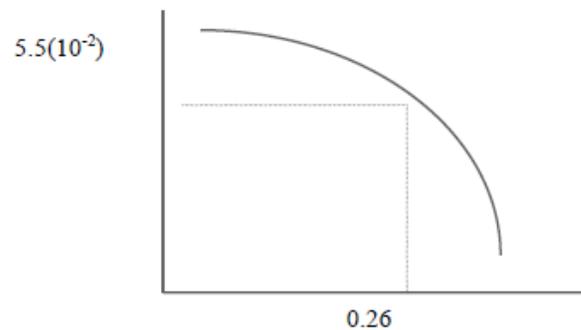


Figura 23. (Valiente Barbera, A. 2010).

$$5.5 \times 10^2 = \frac{\left(\frac{G}{A}\right)^2 \left(\frac{a}{\varepsilon^3}\right) \mu L^{0.2}}{g c \rho_G \rho_L}$$



Como se sabes, el diámetro de la torres se debe suponer el diámetro del empaque.

Suponemos:

De la tabla $a = 190 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Donde el valor de $\epsilon = 0.71$

$g_c = 1.27 \times 10^8 \text{ m/h}$

$$\frac{G}{A_{INUNDACION}} \sqrt{\frac{5.5 \times 10^{-2} * 1.27 * 10^8 * 1.28 * 850}{\left(\frac{190}{0.71^3}\right) (30^{0.2})}} = 2695 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{G}{A_{Operacion}} = 2695(0.6) = 1617 \text{ kg/m}^2$$

$$A = \frac{1920}{1617} = 1.187 \text{ m}^2 \quad D = 1.229$$

$$\frac{D_{TORRE}}{D_{EMPAQUE}} = \frac{1.229}{0.0254} = 48.4$$

La relación debe estar entre 8 y 20 según el tanteo:

$$a = 95 \quad \epsilon = 0.73 \quad \frac{a}{\epsilon^3} = 245$$

$$\frac{G}{A_{INUNDACION}} = 3963.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \frac{G}{A} = 2378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}; A = 0.807 \text{ m}^2$$

$$D = 1.014 \text{ m}$$

Relacion de diametros = 19.96

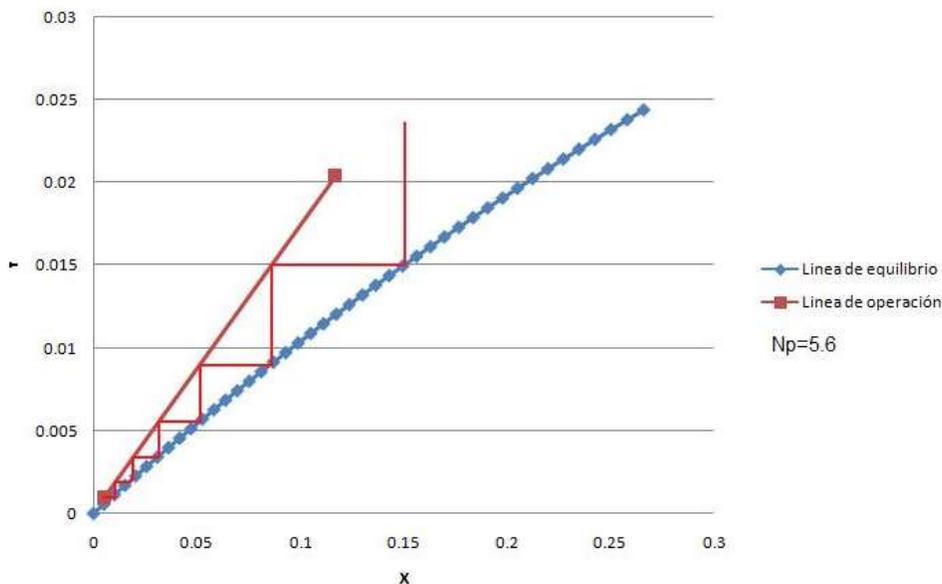


Figura 24. (Jarquin H. 2014) (<http://sgpwe.izt.uam.mx/Curso/3779.Laboratorio-de-Termodinamica.html>).



$$NOG = \frac{\tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2}{(\tilde{Y} - \tilde{Y}^*)_{In}}$$

$$(\tilde{Y} - \tilde{Y}^*)_{In} = \frac{(Y_1 - \tilde{Y}^*) - (Y_2 - \tilde{Y}^*)}{\ln \frac{Y_1 - \tilde{Y}^*}{Y_2 - \tilde{Y}^*}} = \frac{(0.05265 - 0.0445) - (0.00502 - 0.002)}{\ln \frac{0.05265 - 0.0445}{0.00502 - 0.002}} = 9.21$$

$$\alpha = 1.24 \quad \beta = 0.41 \quad \gamma = 0.45 \quad S_c = 3.21 \quad \frac{G}{A} = 3963.7 \text{ Kg}/\text{m}^2$$

$$HG = 1.24 \frac{(3963.7)^{0.41}}{(13585)^{0.45}} (3.21)^{0.5} = 0.916m$$

Altura de la torre

$$Z=0.916 \text{ m} (9.3) = 8.52 \text{ m}$$

Hasta aquí el ejercicio 2, con el cual cerramos de este tema.

Ahora te pido que desarrolles la siguiente Autoevaluación y que al final de la misma cotejes tus resultados y cheques las respuestas.

Actividades

La elaboración de las actividades estará guiada por tu docente en línea, mismo que te indicará, a través de la Planeación didáctica del docente en línea, la dinámica que tú y tus compañeros (as) llevarán a cabo, así como los envíos que tendrán que realizar.

Para el envío de tus trabajos usarás la siguiente nomenclatura: BOU1_U3_A1_XXYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U3 es la etapa de conocimiento, A1 es el número de actividad, el cual debes sustituir considerando la actividad que se realices, XX son las primeras letras de tu nombre, Y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Autorreflexiones

Para la parte de **autorreflexiones** debes responder las *Preguntas de Autorreflexión* indicadas por tu docente en línea y enviar tu archivo. Cabe recordar que esta actividad tiene una ponderación del 10% de tu evaluación.



Para el envío de tu autorreflexión utiliza la siguiente nomenclatura: BOU1_U3_ATR _XYZ, donde BOU1 corresponde a las siglas de la asignatura, U3 es la unidad de conocimiento, XX son las primeras letras de tu nombre, y la primera letra de tu apellido paterno y Z la primera letra de tu apellido materno.

Cierre de la unidad

La absorción es el proceso mediante el cual un contaminante gaseoso se disuelve en un líquido. El agua es el absorbente más usado. A medida que el flujo de gas pasa por el líquido, éste absorbe el gas de la misma manera como el azúcar es absorbido en un vaso de agua cuando se agita. La absorción se usa comúnmente para recuperar productos o purificar gases con alta concentración de compuestos orgánicos. Un problema potencial con la absorción es la generación de aguas residuales, dado que convierte un problema de contaminación del aire en un problema de contaminación del agua.

El equipo de absorción está diseñado para obtener la mayor cantidad de mezcla posible entre el gas y el líquido. Los absorbedores son frecuentemente llamados lavadores de gas y existen varios tipos de ellos. Los más usados son las torres rociadoras, columnas de relleno, cámaras rociadoras y lavadores Venturi.

Es importante que puedas diferenciar entre absorción y la operación inversa se denomina desorción, desorción o "*stripping*" y su finalidad es eliminar o recuperar uno o varios componentes minoritarios de una corriente líquida por transferencia a una corriente gaseosa.



Fuentes de consulta



Básicas

Arnaiz Franco, C. et al (2012). *Operaciones Básicas Ingeniería Química*. España: Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla.

Barrios, O., Berroterán, P., Da Silva, V y Roca, E. (2011)). *Simulación y control de una columna de absorción continua rellena con anillos Rasching a través del software simulatrol 6000*. Revista INGENIERÍA UC, vol. 18, núm. 2, mayo-agosto. Venezuela: Universidad de Carabobo.

Barbour, W., Oommen R. y Sagun Shareef, G. (1995). Controles para SO₂ y para gas ácido. Capítulo 1. Torres de Limpieza Húmeda para Gas Ácido. Estados Unidos. Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU.

Chávez R.H, Suástegui, A.O. y Guadarrama, J.J. (1999). *Evaluación de un modelo de absorción en columnas con rellenos estructurados*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Feal Veira, A. (2004). *Absorbedores de gas. Criterios de diseño*. España: Ingeniería Química. Editorial Alción.

Garfias V., F. J. et al, (1992). *Diseño de columnas de absorción adiabática*. México: Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Geankoplis C. J. (2010). *Proceso de Transporte y Operaciones Unitarias*. Universidad de Minnesota. Estados Unidos: Cecsa.

Gibrán Santa-Cruz, W., et al (2006). *Optimización de una torre de absorción en una torre de absorción en una planta de endulza miento de gas natural*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.



Mc Cabe, W. et al (2003). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. España. Reverte.

Quispe Solano, R. (2011). *Diseño de un sistema de producción de CO₂ para consumo humano a partir de las emisiones generadas en relleno sanitario*. Perú: Revista Peruana.

Valiente Barderas, A. (2010). *Absorción*. México: Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

Velázquez Limón, N. y Best y Brown, R. (2012). *Estudio de sistema de absorción avanzados para operar con gas natural y asistidos por energía solar*. Mexico: Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California, Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Complementarias

Manteca, F. (2012). *Construcción Sostenible*. Wiki EOI. Recuperado de https://web.archive.org/web/20200919125236/http://www.eoi.es/wiki/index.php/Conceptos_F%C3%ADsicos_en_Construcci%C3%B3n_sostenible_3