



Programa de la asignatura:

Máquinas eólicas e hidráulicas

U3

Máquinas hidráulicas



DCSEA



ENERGÍAS
RENOVABLES



Índice

Presentación de la unidad	3
Competencia específica.....	4
Propósitos.....	4
3.1. Introducción	5
3.1.1. Antecedentes.....	5
3.1.2. Concepto básico y clasificación	8
3.2. Bombas centrifugas y axiales.....	10
3.2.1. Componentes de una bomba centrífuga	11
3.2.2. Operaciones de las bombas centrífugas y axiales	13
3.3. Turbinas hidráulicas	19
3.3.1. Conceptos	19
3.3.2. Turbina Francis.....	24
3.3.3. Turbina Kaplan	29
3.3.4. Turbina Pelton	34
Cierre de la unidad	38
Para saber más	39
Fuentes de consulta	41



Presentación de la unidad

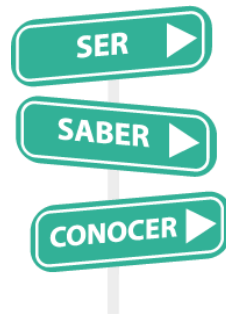


Turbina. Retomado de: <https://www.flickr.com/>

En esta unidad conocerás el desarrollo histórico de las máquinas hidráulicas, así como las principales características de las turbinas y bombas, las cuales son las principales aplicaciones de las máquinas hidráulicas desde el punto de vista energético.



Competencia específica



Unidad 3

Analizar las máquinas hidráulicas para determinar sus parámetros de funcionamiento y operación, identificando sus tipos y sus aplicaciones.

Propósitos

1 **Identificar** las características de una turbina hidráulica y sus aplicaciones.

2 **Identificar** las características de una bomba centrífuga.

3 **Analizar** la diferencia entre una máquina de desplazamiento y una turbomáquina.



3.1. Introducción

Las máquinas hidráulicas utilizan como medio intercambiador de energía un fluido que se comporta como incomprensible; pueden ser bomba hidráulica, ventilador, turbina hidráulica, así como el aerogenerador. Se utilizan principalmente para trabajos pesados, que el humano no puede realizar fácilmente.

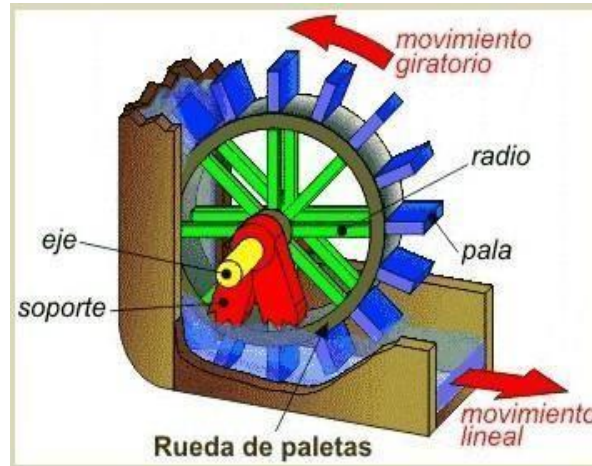
Las máquinas hidráulicas pueden ser generatrices (bombas hidráulicas) o motrices (turbina hidráulica). Las turbinas hidráulicas disponen de un elemento fundamental, que gira su propio eje, donde se produce el intercambio de energía; tal elemento recibe el nombre de rodete o impulsor. Las máquinas de este tipo también se denominan máquinas rotodinámicas.

Las bombas hidráulicas de desplazamiento positivo son máquinas reversibles; es decir, si se aplica una presión en una parte de la máquina, se pueden desplazar los componentes de ésta, y así formar un motor hidráulico.

Las máquinas hidráulicas se utilizan en distintas aplicaciones, tales como extracción de agua de los pozos, para subir agua de una cisterna a un tinaco, generar energía eléctrica, etc. La selección del tipo de máquina hidráulica a utilizar depende de la aplicación que se le va a dar. Se tienen máquinas para saltos pequeños, saltos medianos, saltos grandes; y éstas a su vez pueden ser para caudales pequeños, medianos o grandes. Por lo que en esta unidad se abordará el estudio de las características de las turbinas hidráulicas y bombas centrífugas.

3.1.1. Antecedentes

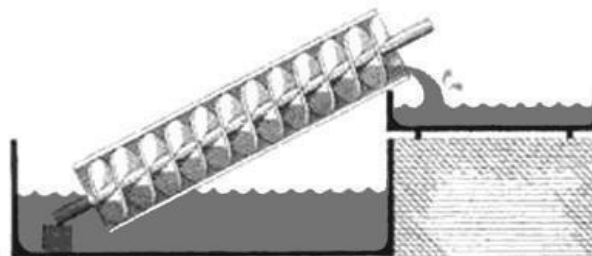
Las primeras máquinas hidráulicas fueron las ruedas hidráulicas comunes, que obran, principalmente, por el peso del agua, por ser las más elementales. El funcionamiento de la rueda hidráulica se basa en que el agua que llega a las palas tiene cierta velocidad, que ejerce una fuerza sobre las palas que permite el movimiento continuo de la rueda. Las primeras ruedas hidráulicas se construyeron posiblemente en Asia, China y la India, hace unos 2200 años; de Asia pasaron a Egipto y desde allí a Europa (unos 600 años después que en Asia) y América. En la siguiente imagen se puede ver la estructura de una rueda hidráulica.



Rueda hidráulica. Tomada de Eudotec, 2012.

Leonardo da Vinci, Galileo y Descartes, entre otros, realizaron estudios teóricos y matemáticos sobre las ruedas hidráulicas. Así, desde la más remota antigüedad el ser humano ha utilizado el agua para facilitar sus tareas. Como primeros ejemplos de ello se tiene la rueda persa o saquia, que era una rueda grande montada en un eje horizontal con cangilones en su periferia, de modo que se podía elevar el agua de los ríos a una altura mayor que la de sus márgenes, de donde correría por canales y zanjas hacia los campos.

Otra máquina muy antigua para elevar el agua fue la cloquea o tornillo de Arquímedes, basada en el principio del plano inclinado desarrollado alrededor de un cilindro; al girar éste el agua asciende.

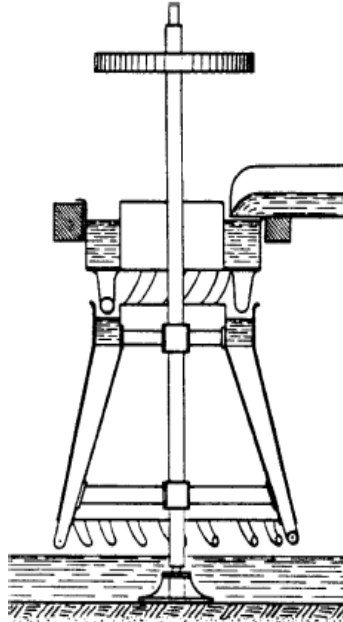


Cloquea o espiral de Arquímedes. Tomada de Sánchez, 2012.

Las mejoras que se realizaron a la rueda hidráulica dieron como resultado la construcción de las ruedas de impulso y de reacción. La rueda hidráulica es la precursora de las turbinas hidráulicas modernas, ya que con el desarrollo de las plantas hidroeléctricas la rueda hidráulica presenta dos desventajas fundamentales: tienen un rendimiento bajo y la velocidad de rotación es muy lenta (4 a 10 rpm). Las turbinas hidráulicas surgen para solucionar estas desventajas.



El estudio de las turbomáquinas hidráulicas como ciencia se realiza en 1754, cuando Euler publica su teoría de las máquinas de reacción *Théorie plus complète des machines qui sont mises en mouvement par la reaction de l'eau*. En la siguiente imagen se muestra el diseño de la turbina hidráulica propuesta por Euler:



Turbina hidráulica propuesta por Euler. Tomada de Córdoba, 1999.

Años después el ingeniero francés Claude Burdin desarrolla la teoría *Des turbines hydrauliques ou machines rotatoire á grande vitesse*, en la que se utilizó por primera vez el termino *turbina*. En 1827 el ingeniero Fourneyron construyó la primera turbina hidráulica, que tuvo gran éxito porque era capaz de realizar saltos mayores que la rueda hidráulica. La firma Escher Wyss construyó en 1840 la turbina tangencial centrípeta con inyección parcial, diseñada por Zuppinger, muy parecida a la turbina Pelton. En 1841 Henschel y Jonval desarrollaron la primera turbina axial de reacción con tubo de aspiración, que tenía la ventaja de controlar el caudal para saltos variables. En 1842 Zuppinger desarrolló la turbina tangencial para grandes saltos y caudales reducidos. En 1849, el ingeniero James Bichano Francis realiza mejoras a la turbina hecha por Samuel Dowd en 1843, y hoy en día se le conoce como turbina Francis (Gutiérrez, 2009).

En el año de 1886, se construyó la primera central hidroeléctrica en Estados Unidos, en las cataratas del Niágara. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía cinética contenida en los caudales de agua, por ello se construyen represas que tienen la función de retener el agua a una altura considerable para que gane energía potencial y al dejar salir el agua, ésta se convierte en energía cinética y así hacer funcionar las turbinas, las



cuales mediante un generador eléctrico se transforma el movimiento de la turbina en electricidad.

A grandes rasgos, a principios del siglo pasado nacieron las turbinas hidráulicas de gran velocidad.

- 1905 Turbina Francis gemelas instaladas en Estados Unidos con una capacidad de 7360 kW girando a 250 rpm
- 1914 Turbina Turgo
- 1915 Creación de la turbina Kaplan
- 1918 Turbina Banki
- 1950 Turbina Deriaz
- 1970 Turbina Bulbo

Se puede resumir el desarrollo de las máquinas hidráulicas de la siguiente manera (Córdova, 1999):

- El siglo XVIII es el siglo de su gestación.
- El siglo XIX, el de su nacimiento (en este siglo nacieron en América las Turbinas Pelton y las Turbinas Francis).
- El siglo XX, el de su desarrollo.

El presente tema se adentra en los principios básicos de las máquinas hidráulicas, así como en su aprovechamiento para generar trabajo útil.

3.1.2. Concepto básico y clasificación

Una máquina hidráulica es todo aquel dispositivo capaz de convertir la energía hidráulica en energía mecánica y viceversa; es decir, son equipos diseñados para obtener un intercambio energético entre un fluido (que circula a través de la máquina) y un eje de rotación, por el efecto dinámico de una o varias coronas de álabes, ya sean fijas o móviles (Berrondo, Oquiñena y Salaberria, 2007).

Las máquinas hidráulicas se clasifican según su funcionamiento: pueden ser motrices (turbomáquinas) y máquinas de desplazamiento positivo (generadoras).



Las turbomáquinas o máquinas de corriente

Son máquinas hidráulicas en las que los cambios en la dirección y la magnitud de la velocidad del fluido juegan un papel esencial. Estas máquinas absorben energía del fluido y restituyen energía mecánica.

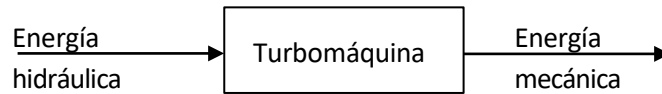


Diagrama de transformación de energía en una máquina hidráulica motriz.

Las turbomáquinas basan su funcionamiento en el teorema de conservación del momento cinético o ecuación de Euler (Paz, Suárez e Eiris, 2012).

Las máquinas de desplazamiento positivo

Son también llamadas máquinas volumétricas (bombas). En estos dispositivos el órgano intercambiador de energía cede energía al fluido o el fluido a él en forma de energía de presión, creada por la variación de volumen. Los cambios en la dirección y magnitud de la velocidad del fluido no juegan papel esencial alguno. Las máquinas de desplazamiento positivo absorben energía mecánica y restituyen energía al fluido (Mataix, 1986).

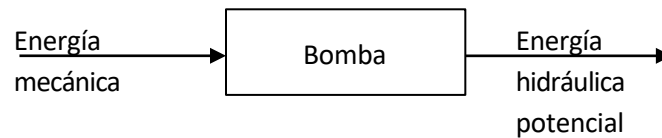


Diagrama de transformación de energía de una máquina hidráulica generatriz.

Estas máquinas se fundamentan en el teorema de Pascal; es decir, la máquina consigue incrementar la presión en un punto, transmitiéndole la presión hidrostática íntegramente a todo el fluido que se encuentra aguas abajo.



3.2. Bombas centrífugas y axiales

Las bombas hidráulicas son dispositivos que tienen la función de transferir energía a la corriente del fluido, impulsándolo desde un estado de baja presión estática a otro de mayor presión. En este apartado se estudian a las bombas axiales, que son la principal aplicación de las bombas centrífugas.

Una bomba centrífuga es un dispositivo que está formado por un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una cubierta, y su función es mover una cierta cantidad de fluido desde un punto de baja presión estática hasta otro de mayor presión. Es una máquina hidráulica que transforma energía mecánica en energía hidráulica (s. a., 2012)

Las bombas centrífugas se pueden clasificar en bombas de flujo radial, flujo mixto y axial.

Bomba centrífuga de flujo radial

En este tipo de bombas el flujo permanece radial, y la presión desarrollada se debe principalmente a la fuerza centrífuga. Las bombas de flujo radial se utilizan, generalmente, para cargas altas y caudales pequeños; sus impulsores son angostos y manejan líquidos limpios, sin sólidos en suspensión (Rivero, 2008).

Bomba centrífuga de flujo mixto

En este tipo de bombas el impulso es más ancho que los de flujo radial, sus álabes adquieren una doble curvatura, torciéndose en el extremo de la succión. Son utilizadas donde la carga y el caudal son intermedios.

Bomba centrífuga de flujo axial

Las bombas de flujo axial son utilizadas para cargas pequeñas y caudales grandes, especialmente adecuadas para drenajes en las ciudades, sus impulsores son tipo propela.

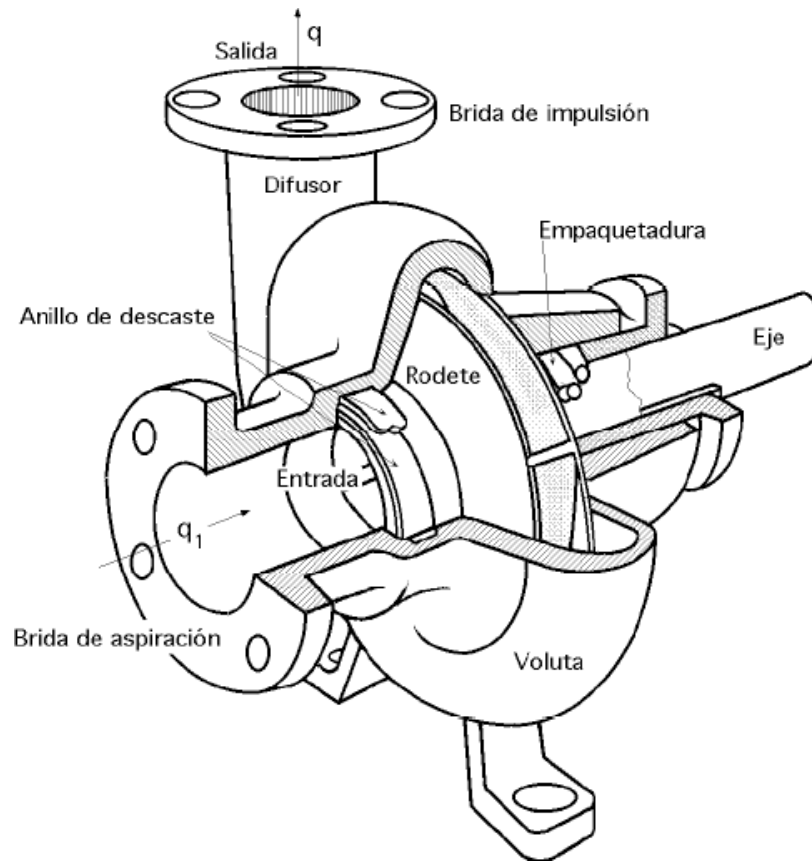


3.2.1. Componentes de una bomba centrífuga

Los principales componentes de una bomba centrífuga son los siguientes (Fernández, 2008).

- Tubería de aspiración. Es la tubería que termina prácticamente en la brida de aspiración.
- Impulsor o rodete. Está formado por una serie de álabes que pueden adoptar diferentes formas, dependiendo del uso final de la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa. El rodete está unido al eje y es la parte móvil de la bomba.
- Tubería de impulsión. Se encuentra a la salida de la voluta, y es por donde el líquido sale a la presión y velocidad generadas en la bomba.
- Voluta. Es una pieza que se encuentra alrededor del rodete y tiene forma de caracol; su función es recoger el líquido que deja el rodete a gran velocidad, cambiar la velocidad de su movimiento y es llevada hacia la tubería de impulsión.
- Anillos de desgaste. Proporcionan un sello para evitar fugas, entre el impulsor y la carcasa.
- Difusor. Es el mecanismo que se encarga de disminuir la velocidad de salida del rodete, y la transforma en energía de presión.
- Eje. Es la pieza sobre la cual se sujetan las partes rotatorias de la bomba centrífuga, el eje tiene una forma tubular. Su función es mantener alineadas las partes giratorias y transmitir el torque de giro.
- Empaquetaduras. Este dispositivo tiene como propósito proporcionar un cierre que disminuya la cantidad de líquido que se pierde por fugas entre una parte en movimiento y otra fija de una bomba.
- Entrada. Es por donde la bomba aspira el agua cuando se pone en funcionamiento.
- Salida. Es por donde sale el trabajo producido por la bomba (un flujo de agua a cierta presión).

Es seguida se presenta un esquema de una bomba centrífuga y sus diferentes componentes:



Esquema de una bomba centrífuga. Tomado de <http://hidraulicaucentral.blogspot.mx/2012/05/bombas-y-estaciones-de-bombeo.html>



Este tipo de bombas son normalmente utilizadas para el transporte de líquidos poco viscosos (por ejemplo, agua, petróleo, aceite de oliva, etc.). Su caudal se mantiene constante y es elevado; son de bajo mantenimiento. Se pueden encontrar bombas centrífugas de una etapa que alcanzan presiones de hasta 5 atmósferas, y bombas de varias etapas que alcanzan 25 atmósferas de presión.

3.2.2. Operaciones de las bombas centrífugas y axiales

En las bombas centrífugas el fluido entra paralelo al eje del rotor y es dirigido por las palas o hacia la periferia de éste.

La voluta es un transformador de energía, ya que transforma parte de la energía dinámica creada por el rodete en energía de presión; aumenta de esta manera la presión del líquido a medida que crece el espacio entre la carcasa y el rodete.

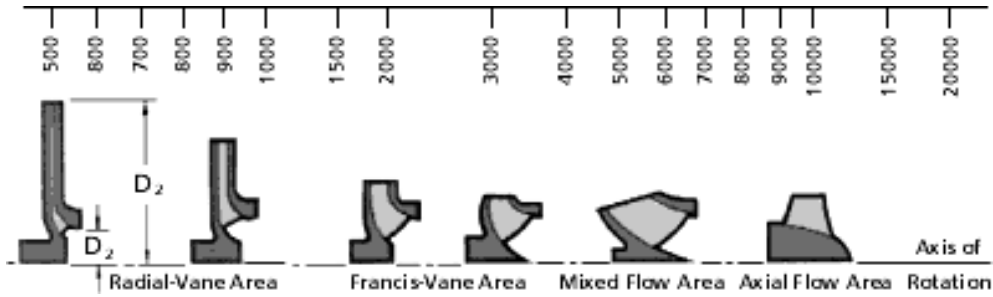
Para tener una idea del tipo de bomba que se debe seleccionar para un sistema de bombeo en forma general, se puede utilizar un indicador llamado velocidad específica, que es un número adimensional cuyo valor está en función de la velocidad de rotación (rpm), del caudal y la altura de bombeo. Esta velocidad se expresa así:

$$N_s = \frac{n_e \sqrt{Q}}{(H)^{3/4}}$$

Donde N_s es la velocidad específica; Q es el caudal (gpm, l/s); H es la altura o carga estática de bombeo, y n_e es la velocidad de rotación.

En la siguiente imagen se presentan algunos impulsores típicos de bombas centrífugas y sus correspondientes velocidades específicas.

Velocidad específica



Gráfica de diferentes tipos de impulsores según la velocidad específica. Tomada de Rivero, 2008.

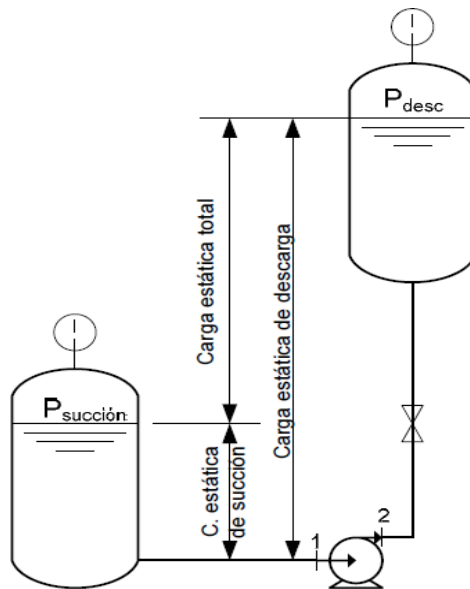
Terminología en el estudio de las bombas centrífugas

Caudal. Es el volumen de líquido impulsado por una bomba, el cual pasa a través de una sección determinada en una unidad de tiempo, y está expresado así:

$$Q = v(A) = V(t)$$

Donde **Q** es el caudal (l/s); **v** es la velocidad del fluido a través de la sección (m/s); **A** es el área de la sección perpendicular a la dirección del fluido (m²); **V** es el volumen (m³), y **t** es el tiempo (s).

En la imagen siguiente se muestra las diferentes cargas o alturas que intervienen en un sistema de bombeo.



Esquema de un sistema de bombeo y los elementos que lo conforman. Tomada de Rivero, 2008.



Altura o carga estática total (H). Es la distancia vertical que existe entre el punto de succión y el de descarga.

Carga estática de descarga o altura de descarga (h_D). Es la distancia vertical desde el nivel de líquido de descarga y la línea central de la bomba, expresada en metros de columna de agua (m).

Carga estática de succión o altura de succión (h_s). Es la distancia del líquido bombeado desde la boca de succión hasta la línea central de la bomba; es medida en metros.

Altura total de descarga (H_D). Es la energía que resulta de la suma de la energía potencial y cinética, en la sección de descarga medida en metros.

$$H_D = h_D + \frac{V_D^2}{2 * g}$$

Donde V_D es la velocidad de descarga (m/s); y g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Altura total de succión (HS). Es la energía total, como resultado de la suma de la energía cinética y potencial, en la succión.

$$H_S = h_s + \frac{V_s^2}{2 * g}$$

Donde H_S es la altura total de succión; V_s es la velocidad de succión; g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), y h_s es la altura de succión.

Área de descarga (A). Es el área neta de la sección de descarga, tomando como diámetro el medido en la sección donde se encuentra el punto de toma de presión de descarga (m²). Esta altura se puede determinar de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Donde A es el área de la sección circular perpendicular a la dirección del fluido y D el diámetro de la tubería.



Cavitación. Es la evaporación de un líquido que se encuentra en una tubería cuando su presión disminuye por debajo de la presión de vapor. Este fenómeno se debe evitar para que la bomba funcione adecuadamente.

Carga neta de succión positiva (NPSH/Net Positive Suction Head). Es la diferencia que existe entre la presión absoluta de succión y la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo, y viene dada por esta expresión (Rivero, 2008):

$$\text{NPSH} = \frac{p_s - p^\circ}{\rho g}$$

Donde p_s es la presión absoluta de succión; p° es la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo; g es la aceleración, y ρ la densidad del fluido.

Se definen dos cargas de succión positiva, NPSH disponible, que depende del sistema, y NPSH requerida, la cual es suministrada por el fabricante.

NPSH disponible. Es la carga neta de succión positiva que está en función del sistema en el que trabaja la bomba, y depende de la carga estática de succión, la carga de fricción de la succión y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo. Ésta se reduce cuando el caudal aumenta, debido a las pérdidas por fricción en la tubería de succión.

$$(\text{NPSH})_d = \frac{(p_1 - p^\circ)}{\rho g} - (Z_s - Z_1) - \Delta h_{1-s}$$

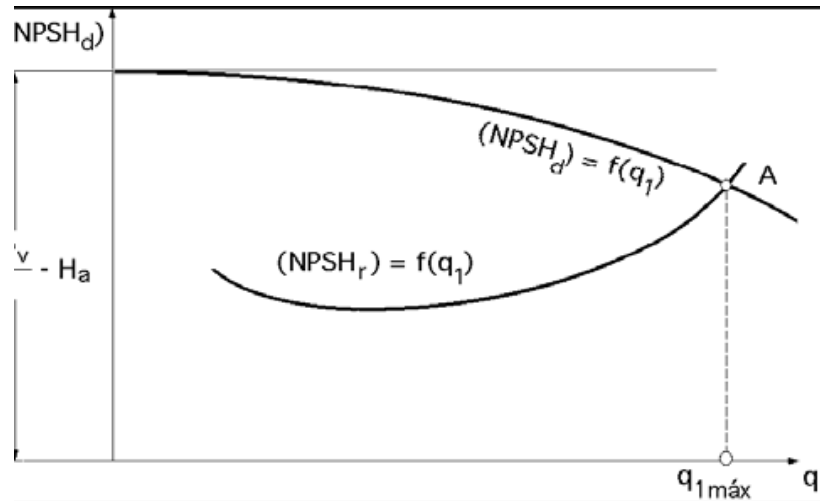
Expresada de otra forma:

$$(\text{NPSH})_d = h_A - h_{VP} - h_s - h_f$$

Donde h_A es la presión absoluta; h_{VP} es la presión de vapor del líquido; h_s es la carga estática del líquido sobre el eje de la bomba, y h_f es la pérdida por fricción dentro del sistema de succión.

NPSH requerida. La altura de succión positiva requerida depende únicamente del diseño de la bomba y es una característica que el fabricante proporciona junto con otras curvas. Esta altura aumenta en función de la velocidad en la tubería de succión y aumenta con el cuadrado de su capacidad.

Tanto la altura de succión positiva requerida como la disponible están en función del caudal y, por lo tanto, varían conforme a éste, tal como se muestra en la siguiente gráfica:



Curva de NPSH disponible y requerido. Tomada de Rivero, 2008.

Si $NPSH_d$ es mayor que $NPSH_r$, no existe cavitación en la bomba; sin embargo, si $NPSH_d$ es igual a $NPSH_r$, entonces se inicia la cavitación.

Trabajo de una bomba. El trabajo que entrega una bomba a un fluido viene dado por la ecuación siguiente:

$$W = mgH$$

Potencia suministrada al fluido. La potencia que la bomba suministra a un fluido está dada por esta fórmula:

$$P = \rho gQH$$

Rendimiento de una bomba centrífuga. El rendimiento o eficiencia de una bomba centrífuga está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\rho gQH}{N} = \frac{\text{potencia suministrada al fluido}}{\text{potencia en el eje (al freno)}}$$

Ejemplo

Un depósito que está situado a una altura de 25 metros sobre una bomba, con una velocidad de 740 rpm, es alimentado con un líquido cuya densidad es 850 kg/m^3 . El depósito es un cilindro y se encuentra presurizado a 1.26 kg/cm^2 ; sus dimensiones son 16 m de diámetro y 5 m de altura. La alimentación del depósito se efectúa por la parte



superior, de forma que la altura de salida del líquido es constante. Se desea llenar el depósito en dos horas. Calcúlese el caudal que debe entregar la bomba.

Solución

Se determina el valor del volumen total del depósito:

$$\text{Volumen} = \pi \cdot D^2 \cdot h / 4 = \pi \cdot 16^2 \cdot 6 / 4 = 1206,37 \text{ m}^3$$

Determinando el caudal:

$$Q = 1206,37 / (3600 \cdot 2) = 0,1676 \text{ m}^3/\text{s}$$

Es decir, para que la bomba pueda llenar el depósito en dos horas, es necesario que el fluido viaje con un caudal de $0,1676 \text{ m}^3/\text{s}$.

Hasta ahora se han estudiado las principales características de las bombas centrífugas, haciendo hincapié en sus componentes y relaciones que las rigen. En el siguiente tema se presentan las características de otro tipo de máquinas hidráulicas: las turbinas.



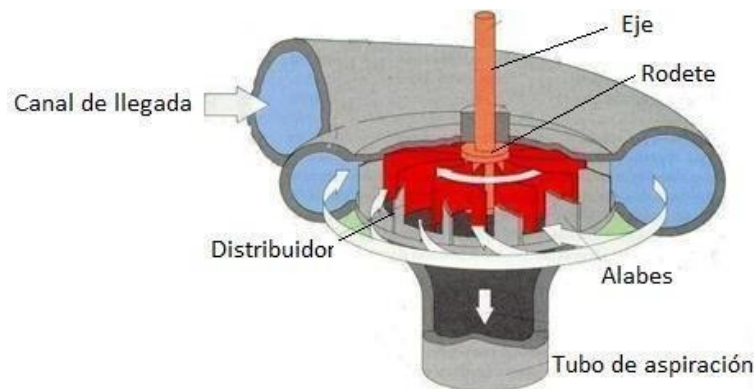
3.3. Turbinas hidráulicas

En este apartado se estudiará el origen de las turbinas hidráulicas, así como las diferencias que existen entre cada una de ellas y sus principales aplicaciones.

3.3.1. Conceptos

Una turbina hidráulica es una máquina capaz de transformar la energía hidráulica que proporciona un fluido incompresible (normalmente agua) en energía mecánica; esto se realiza mediante la variación del momento de la cantidad de movimiento (Berrondo, Oquiñena y Salaberria, 2007).

En la siguiente imagen se muestran los componentes principales de una turbina hidráulica. Es importante aclarar que no en todos los casos se tienen todos los elementos que a continuación se mencionan:



Componentes de una turbina hidráulica. Tomada de
<http://picasaweb.google.com/lh/photo/NUd7sJyuVtJSfzFXtmC61aIn-HOwgnnvSaV7ov4KArI>

- Canal de llegada o tubería forzada. Corresponde a la tubería de impulsión en una bomba. Al final de esta tubería se instala una válvula.
- Caja espiral. Este dispositivo transforma la presión en velocidad.
- Distribuidor. Transforma presión en velocidad y actúa como tobera; en una bomba, por el contrario, actúa como un difusor.
- Rodete. Es el elemento principal de una turbina, ya que es donde se lleva a cabo la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica o a la inversa. Existen diferentes tipos de rodetes; por ejemplo, un rodete puede estar formado por un cubo que va unido al eje de la máquina, por la llanta que lo perimetra y por varios álabes colocados entre ambos. Entre cubo, llanta y dos álabes consecutivos



se forman los conductos por donde discurre el fluido. En la imagen de arriba se muestra el rodete de una turbina.

- Tubo de aspiración. Es la tubería de desagüe, crea una aspiración o depresión de salida del rodete.

Terminología de turbinas

Altura. Es una energía por unidad de peso, su unidad es el J/kg y se representa con la letra **E**. La altura viene dada por la siguiente expresión (Berrondo, Oquiñena y Salaberria, 2007):

$$E = gH$$

Donde **g** es la aceleración y **H** es la altura de descarga.

Para el estudio de las turbinas que se enlistan, primeramente, se consideran algunas energías o alturas, como son:

- Altura o energía neta (H_n o E_n). Es la energía hidráulica, puesta a disposición de la turbina. Comúnmente se le conoce como *salto*.
- Altura o energía efectiva (H_e o E_e). Es la energía mecánica obtenida por la turbina, se le denomina *altura* o *energía útil* (H_u o E_u).
- Altura o energía real (H_r o E_r). Es la energía mecánica recibida por el generador eléctrico.

Caudal. Para las turbinas hidráulicas se pueden definir los siguientes tipos de caudales:

- Caudal total (Q_t). Es la cantidad de agua que recibe la turbina.
- Caudal útil (Q_u). Es el caudal que atraviesa el rodete.
- Caudal perdido (Q_p). Es la parte del caudal que no atraviesa el rodete y, por lo tanto, no sirve para producir energía mecánica $Q_t = Q_u + Q_p$

Potencias

- Potencia neta (P_n). Es la potencia hidráulica que está a disposición de la turbina; viene dada por esta ecuación:

$$P_n = \rho g Q_t H_n$$

- Potencia efectiva o potencia útil (P_e). Es la potencia mecánica producida por la turbina, y se expresa mediante esta fórmula:

$$P_e = \rho g Q_u H_e$$



- Potencia real (P_r). Es la potencia mecánica recibida por el generador, y está expresada así:

$$P_r = \rho g Q_u H_r$$

Ecuación fundamental de las turbinas o ecuación de Euler. La potencia mecánica en el rodete de la turbina viene dada por esta expresión:

$$P_e = \rho Q (C_{u1} U_1 - C_{u2} U_2)$$

Pérdidas

- Pérdidas hidráulicas (h_{fn}). Estas pérdidas de energía se generan al atravesar la turbina por rozamiento, cambios de sección y dirección en los conductores que forman la máquina.
- Pérdidas mecánicas (h_{fo}). Son las pérdidas que existen en los elementos mecánicos de la turbina.
- Pérdidas volumétricas (Q_p). Es el caudal que se perdió y no fue aprovechado.

Rendimientos

- Rendimiento hidráulico (η_h). Es el cociente de la relación entre la energía efectiva y la energía neta viene dada por esta expresión:

$$\eta_h = H_e / H_n$$

- Rendimiento mecánico (η_m). Es la relación que evalúa el comportamiento mecánico de la turbina.

$$\eta_m = H_r / H_e$$

- Rendimiento volumétrico (η_v). Este término contempla únicamente las pérdidas volumétricas del sistema:

$$\eta_v = Q_u / Q_t$$

- Rendimiento total (η_t). Es resultado de la relación entre la potencia real y neta, además considera las pérdidas totales. Este rendimiento se puede obtener de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta_t = \eta_h \eta_m \eta_v$$

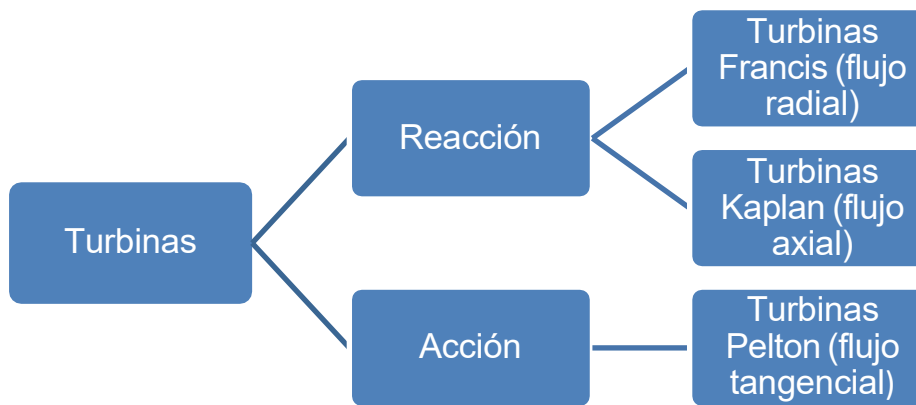


Clasificación de las turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar de diferentes formas. Según grado de reacción, las turbinas hidráulicas se clasifican en

- Turbina de acción (grado de acción = 0)
- Turbina de reacción (grado de acción $\neq 0$)

En el diagrama siguiente se muestra la clasificación de las turbinas hidráulicas.



Clasificación de las turbinas hidráulicas según el grado de reacción.

Ahora bien, el grado de reacción de una turbina hidráulica se define de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$G_R = \frac{H}{H_T}$$

Donde G_R es el grado de reacción de la turbina; H es la altura de presión absorbida por el rodete, y H_T es la altura total absorbida por el rodete.

Turbinas de acción o de impulso

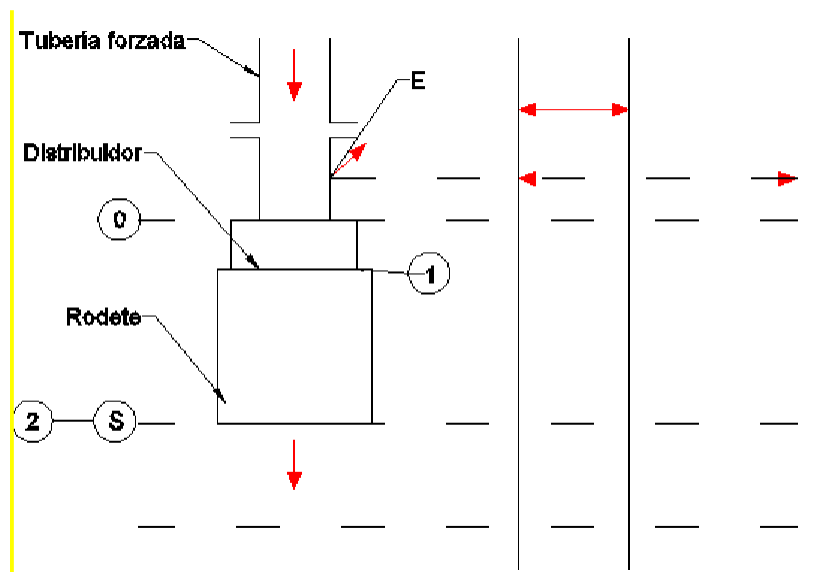
Las turbinas de acción son aquellas máquinas en las que el rodete se mueve con la energía cinética del agua. En este tipo de turbinas el rodete no está inundado y no tiene tubo de aspiración. El grado de reacción es cero debido a que la presión relativa en el distribuidor es cero, mientras que la presión en la entrada y salida del rodete es igual (Renedo, 2012).



En este tipo de turbinas dentro de la tubería forzada, la altura de presión aumenta y la altura geodésica disminuye. La altura de velocidad es constante, siempre que la sección de la tubería no cambie. En el distribuidor la altura de presión baja a cero (presión relativa), es decir, a la altura de presión ambiente (presión absoluta). Como el distribuidor es el que transforma la energía de presión en energía cinética, la altura de velocidad aumenta.

En el rodete la altura de presión permanece constante. Todo el rodete se encuentra a la presión atmosférica. La altura de velocidad disminuye, porque la energía cinética del caudal se va transformando en energía útil en el eje (Renedo, 2012).

En la siguiente imagen se muestran las secciones características de una turbina. E representa la entrada de la turbina; 0 es la entrada del distribuidor; 1 y 2 son la entrada y salida del rodete, respectivamente, y S es la salida de la turbina. Como se puede ver en este tipo de turbinas, la salida del rodete coincide con la salida de la turbina.



Corte esquemático de los componentes de una turbina hidráulica. Datos tomados de Mataix, 1986.

Dentro de las turbinas de acción se tiene la turbina Pelton, que fue diseñada por Lester A. Pelton en 1869 y obtuvo su patente en 1889. Actualmente se pueden encontrar turbinas tipo Pelton de eje horizontal o de eje vertical.



3.3.2. Turbina Francis

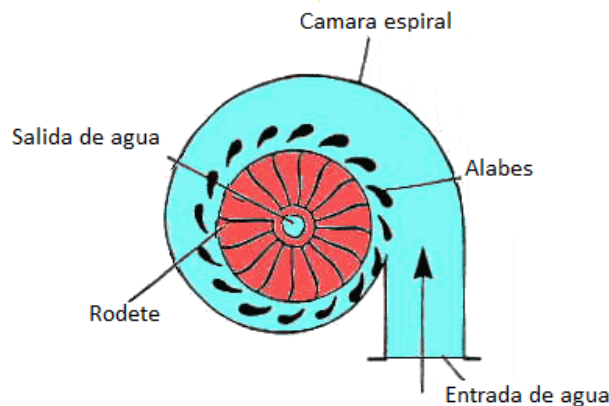
Las turbinas de reacción son aquellas que utilizan energía cinética y de presión para mover el rodete; es decir, actúan por el agua que se mueve a una velocidad relativamente baja, pero con presión. En este tipo de turbinas el sentido del movimiento del agua y el rodete son distintos.

En las turbinas de reacción se utilizan aplicaciones donde la relación caudal-altura es mayor que en las turbinas de acción.

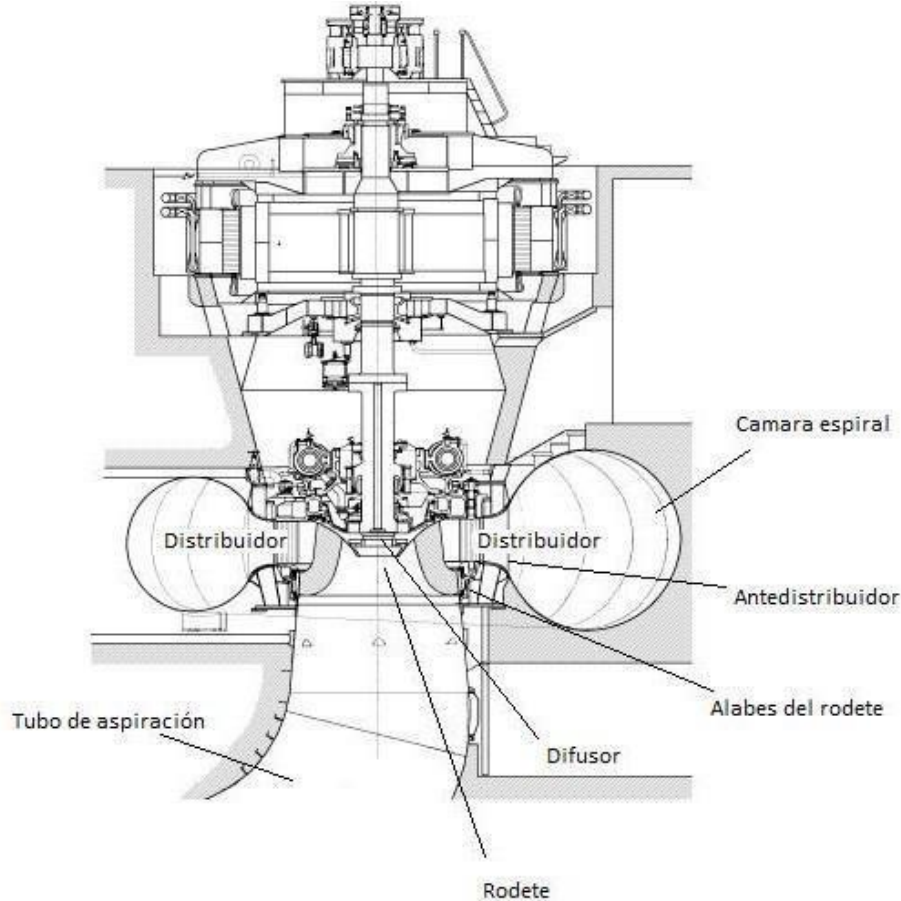
Las turbinas de reacción se clasifican en turbinas de flujo diagonal (radial), que pueden ser de álabes fijos, tipo Francis, o de álabes orientables, tipo *Deriaz*. Otra clasificación son las de flujo axial, que pueden ser de álabes fijos, tipo hélice, o de álabes orientables, tipo Kaplan.

La turbina Francis fue inventada por James B. Francis en 1848, con una eficiencia de 90%. Es una turbina de flujo radial axial. Son de rendimiento óptimo, pero sólo dentro de un determinado margen (para 60% y 100% del caudal máximo). Su instalación puede ser con el eje en posición horizontal o vertical. La turbina Francis de eje vertical es la más utilizada cuando se requiere de gran potencia.

En la siguiente figura se muestran los dispositivos que conforman una tubería Francis (Suescún, 2012):



Componentes de una turbina Francis. Tomada de <http://auladitecnica.blogspot.mx/2011/12/energia-idraulica.html>



Esquema general de una turbina Francis. Tomada de <http://www.entradas.zonaingenieria.com/2009/05/turbinas-francis.html>

- Cámara espiral o caracol. Es el tubo que transporta el agua hacia el rodete, tiene una sección circular y diámetro decreciente. Su función principal es repartir el agua de manera uniforme del antedistribuidor de la máquina. Como función secundaria la cámara espiral debe proporcionar una determinada dirección al agua.
- Distribuidor. Está formado por un determinado número de álabes móviles, cuyo conjunto constituye un anillo, que está situado concéntricamente y entre las mismas cotas en altura que el antedistribuidor. Su función es la de distribuir, y regular o cortar totalmente, el flujo de agua que corre hacia el rodete.
- Rodete. Es el dispositivo donde se produce la transformación de energía hidráulica en mecánica. Está formado por álabes dispuestos en círculo alrededor de un cubo y perimetrados por una llanta.
- Tubo difusor. Es la tubería que une la turbina con el canal de desagüe. Su función es recuperar al máximo la energía cinética del agua a la salida del rodete.
- Antedistribuidor. Está formado por una serie de álabes curvados, colocados en la periferia de un círculo envolviendo el distribuidor. No tiene movimiento. El



antedistribuidor tiene una doble función, la primera es proporcionar al agua una cierta dirección, y la segunda es dar rigidez estructural a la cámara espiral.

Las turbinas Francis se clasifican de acuerdo a la velocidad específica del rodete y de las características del salto (recuérdese que el *salto* es la energía hidráulica puesta a disposición de la turbina).

- Turbina Francis lenta. Son máquinas que se utilizan cuando se requieren saltos de gran altura, entre 200 m o más.
- Turbina Francis normal. Son útiles cuando los saltos de altura que se requieren son medios, alrededor de 20 m y 200 m.
- Turbinas Francis rápidas y extra rápidas. Estas turbinas son apropiadas para saltos de pequeña altura, menores a 20 m.

Grado de reacción para una turbina Francis

El grado de reacción cuantifica la proporción de carga estática aprovechada sobre la carga efectiva total; es decir, el grado de reacción se define como el cociente entre las energías que recibe el rodete en forma de presión y la total; viene dado por esta expresión (Vargas, 2013):

$$G = \frac{\frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2g}}{\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2g}}$$

El grado de reacción de la turbina siempre está dentro de un rango de cero y uno. La velocidad específica es baja y el grado de reacción es relativamente bajo.

Funcionamiento

La energía potencial del agua embalsada se convierte en energía de presión y cinética a su llegada en la turbina, salvo las pérdidas que se tengan. En el distribuidor disminuye la altura de presión, mientras que la altura cinética aumenta.

El agua entra al rodete de forma radial, incidiendo sobre los álabes y cediendo a éstos la mayor parte posible de su energía. En consecuencia, la presión disminuye y también la velocidad del agua a la salida del rodete. El tubo de aspiración permite aprovechar la energía disponible en el flujo de salida (Renedo, 2012).



Diagrama de velocidades para una turbina Francis

A continuación, se muestra el esquema del rotor de la turbina Francis con los diagramas de velocidades de entrada y salida del mismo rotor. El agua ataca a los álabes con una velocidad V_1 que tiene su origen en los órganos que anteceden al rotor. Esta incidencia sobre los álabes se produce bajo un ángulo condicionado por la posición del distribuidor, siempre que se tenga una componente tangencial de la velocidad absoluta del fluido (V_{u1}) positiva, esto es, en el sentido de U_1 , o de giro del rotor; por lo tanto, el producto U_1V_{u1} será positivo como conviene a la ecuación de Euler de la transferencia de energía.

La ecuación de transferencia viene dada por esta fórmula:

$$H = \frac{1}{g} (U_1V_{u1} - U_2V_{u2})$$

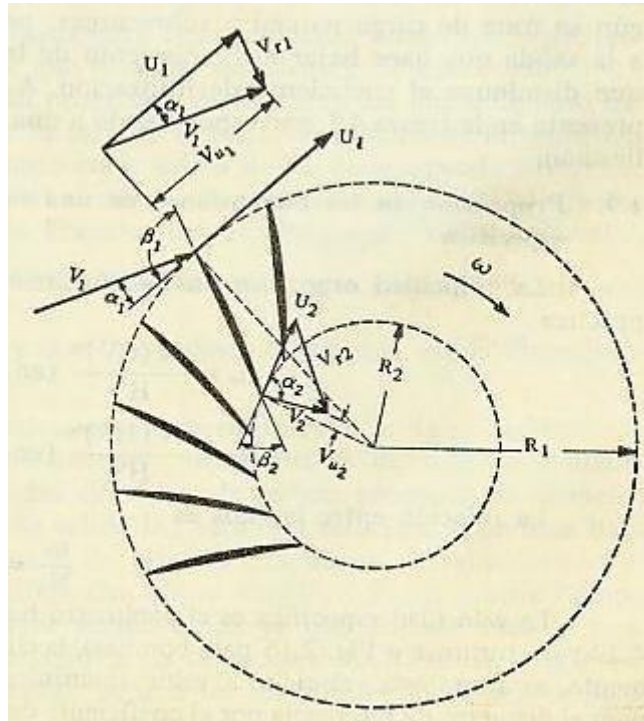


Diagrama de velocidades a la entrada y salida del rotor de una turbina Francis. Tomado de Encinas, 1975.

La velocidad relativa (V_{r1}) está definida por el vector de velocidad absoluta V_1 y el vector U_1 de la velocidad de arrastre, de acuerdo con la ecuación vectorial:



$$V_{r1} = U_1 + V_{r1}$$

La velocidad a la salida del rotor V_s conviene que sea radial o casi radial, para evitar circulación del fluido innecesaria y pérdidas de energía. La velocidad de salida viene dada por esta fórmula:

$$V_{r2} = U_2 + V_{r2}$$

Velocidad específica

La velocidad específica es el parámetro base para fijar la velocidad de giro de la máquina, la cual se determina por la carga o el rendimiento respectivamente. La velocidad específica se expresa con esta ecuación:

$$N_s = \frac{N(P)^{1/2}}{H^{3/4}}$$

Donde N_s es la velocidad específica; H es la altura total medida en metros; N es el número de revoluciones del rotor por unidad de tiempo (rpm), y P es la potencia transferida medida en HP .

El número de revoluciones del rotor por unidad de tiempo se expresa así:

$$N = \frac{60f}{p}$$

Donde f es la frecuencia de ciclos por segundo y p es el número de polos.

Ejemplo

Una turbina Francis trabaja bajo una carga neta de 200 ft con un caudal de 2500 ft³/s. Está rígidamente acoplada a un generador de 22 pares de polos y una frecuencia de 60 ciclos/s. Calcular la velocidad específica de la turbina considerando un rendimiento de 90% de ésta.

*Solución*

La potencia de la turbina es

$$P = \frac{\eta \gamma Q H}{550} = \frac{(.90)(62.4)(2500)(200)}{550} = 51000 Hp$$

Hallando la velocidad de rotación:

$$N = \frac{60f}{p} = \frac{(60)(60)}{22} = 163.33 \text{ R. P. M.}$$

Sustituyendo los resultados anteriores en la ecuación de la velocidad específica se tiene que

$$N_s = \frac{N(P)^{1/2}}{H^{5/4}} = \frac{163.33(5100)^{1/2}}{(200)^{5/4}} = 49.2 \text{ R. P. M}$$

3.3.3. Turbina Kaplan

La turbina Kaplan fue diseñada en 1922 por el ingeniero checoslovaco Víctor Kaplan. Es una turbina de hélice de álabes ajustables y caen dentro de las turbinas de admisión total y son de flujo axial, de tal forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe pueda producirse en las condiciones de máxima acción, independientemente del caudal y la carga requerida.

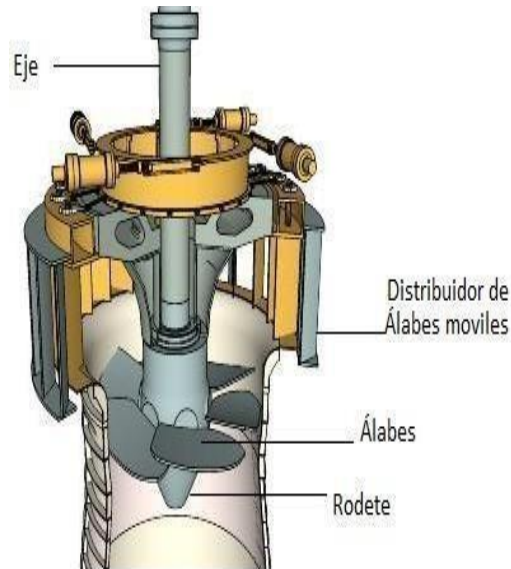
Existen tres configuraciones diferentes para la turbina Kaplan: horizontal, inclinado o vertical.

La principal ventaja de este tipo de turbinas es que permiten ajustar su geometría, dependiendo de la carga demandada, a las condiciones de óptimo rendimiento. Su funcionamiento es adecuado para saltos pequeños de hasta 50 m, caudales grandes y medios, 15 m³/s; son idóneas para su uso en centrales de bombeo (Renedo, 2012). Permiten desarrollar elevadas velocidades específicas, obteniendo así buenos rendimientos, incluso dentro de extensos límites de variación de caudal.

La turbina Kaplan es muy parecida a la turbina Francis. Ambas cuentan con una cámara espiral, un distribuidor, rodete, tubo de aspiración, eje, cojinete de empuje, cojinete guía de turbina, etc. A continuación, se muestra una imagen y un esquema de la turbina Kaplan. Sin embargo, el elemento que hace la diferencia entre una turbina Kaplan y una



Francis es su rodete, el cual permite obtener rendimientos óptimos, hasta con valores de 30% del caudal máximo.



Componentes de una turbina Kaplan. Tomado de www.textoscientificos.com

A continuación, se describen los principales componentes de una turbina Kaplan (García, 2011):

- **Rodete.** Se puede observar en la figura anterior que la forma del rodete se asemeja a la hélice de un barco; está formado por un robusto cubo, cuyo diámetro varía entre el 40 y 50% del diámetro total al extremo de los álabes o palas. Para saltos de altura pequeña se cuentan de 2 a 4 palas y para saltos mayores entre 5 y 9 palas.
- **Distribuidor.** Es el encargado de regular el caudal e imprimir al agua el giro necesario para que al ingresar al rotor se obtenga la máxima transferencia de energía. Los álabes del distribuidor se ajustan automáticamente de acuerdo a las necesidades de la potencia.
- **Álabes.** Tienen el perfil de un ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil del ala permite obtener una acción útil del agua sobre el álabe en el movimiento que aquélla tiene respecto a éste; la forma helicoidal o alabeo se justifica, en virtud de que la velocidad relativa del flujo varía en dirección y magnitud con la distancia al eje de giro debido a que la velocidad de arrastre ($U_1 = \omega R_1$) se modifica en magnitud con el radio.
- **Tubo de aspiración.** Está construido de hormigón y blindada con acero, tiene una forma acodada. Su sección cambia gradualmente de circular a rectangular.



Energía transferida

La energía que se transfiere del fluido hacia el rotor viene dada por esta expresión:

$$E = \frac{1}{g} U_1 V_{U1} - U_2 V_{U2}$$

Grado de reacción

El grado de reacción en las turbinas Kaplan se determina como se indica en la siguiente ecuación:

$$G_R = \frac{1}{\frac{1}{r_2} \frac{V_2^2}{V_1^2} + 1}$$

Factor de utilización

Está definido por

$$\varepsilon = \frac{E}{E + \frac{2}{2g}} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{V_2^2 - G_R V_1^2}$$

Diagrama de velocidades a la entrada y salida del rotor

El agua que proviene de la cámara de alimentación, la cual es guiada por los álabes del distribuidor, gira en vórtices libres en la zona existente entre el distribuidor y el rotor hasta alcanzar a este último, atacando el álabe con una velocidad absoluta V_1 , el cual es variable en magnitud y dirección para cada punto del borde de ataque del álabe. Si la velocidad tangencial del álabe en ese punto es U , la velocidad relativa del fluido respecto al álabe será V_{r1} , teniendo así la ecuación vectorial:

$$\vec{V}_1 = \vec{U} + \vec{V}_{r1}$$

Donde V_{r1} debe incidir sobre el álabe de forma que se logre una máxima acción del agua, evitando separación o choques, que reduzcan el rendimiento. El ángulo de incidencia α se fija por la velocidad media relativa V_{mr} y la cuerda (Vargas, 2013).



La velocidad absoluta a la salida de la turbina se expresa de acuerdo a esta ecuación:

$$\vec{V}_2 = \vec{U} + \vec{V}_{r2}$$

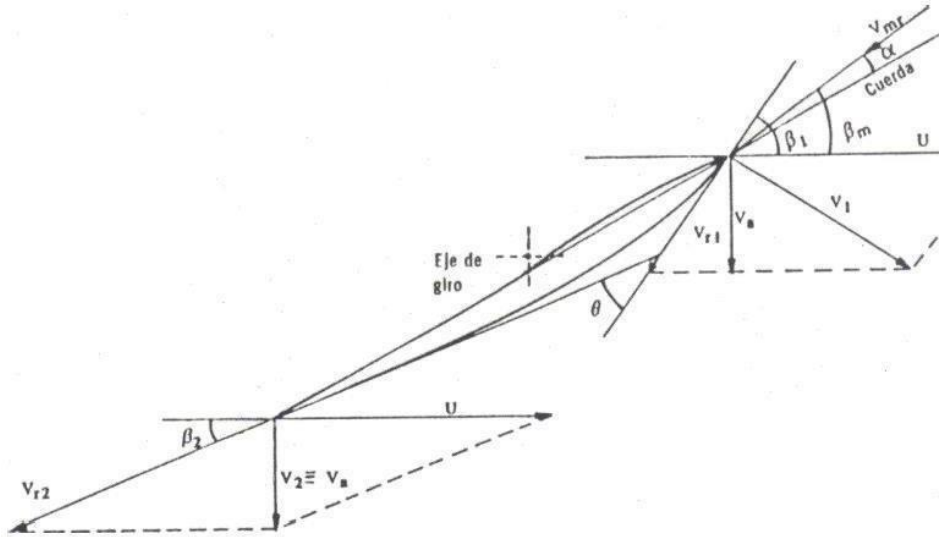


Diagrama de velocidades a la entrada y salida de un álabe de una turbina Kaplan. Tomado de Vargas, 2013.

Diámetro de la hélice

El diámetro de la turbina Kaplan es único, y su valor se fija de acuerdo a una fórmula empírica:

$$D = \sqrt{\frac{68 \cdot HP}{H}}$$

Velocidad de giro

La velocidad de giro está dada por

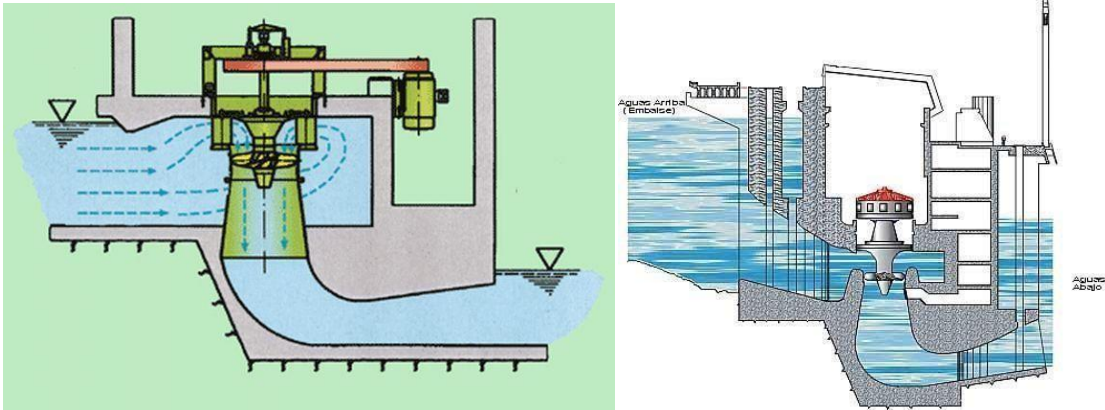
$$N = \frac{950H^{3/4}}{\sqrt{HP}}$$

Una clasificación que se le da a las turbinas Kaplan es dependiendo de la orientación de su eje.



Turbinas Kaplan de eje vertical

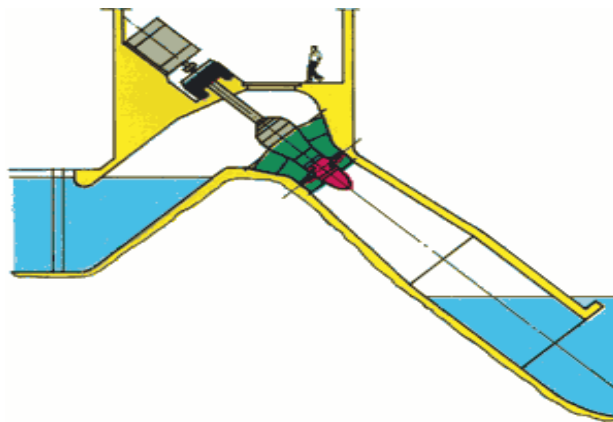
Las turbinas Kaplan de eje vertical son de regulación simple o doble. Esta disposición se utiliza para los diámetros de rodetes mayores y para cuando el nivel es elevado. La instalación de estas turbinas implica una obra civil importante, de formas elaboradas, así como una profundidad de excavación grande. En la imagen siguiente se muestra una turbina Kaplan de eje vertical.



Turbina Kaplan de eje vertical. Tomado de <http://es.scribd.com/doc/137199685/Turb-Hidraulicas8-pdf>

Turbinas Kaplan de eje inclinado

Este tipo de turbinas se emplea para un determinado diámetro de rodete. En cuanto a obra civil, es menos costosa que la de eje vertical. Permite una rehabilitación fácil de instalaciones existentes gracias a su disposición axial; sin embargo, está limitada por el diámetro del rodete. En la figura siguiente se muestra la configuración de una turbina Kaplan de eje inclinado.

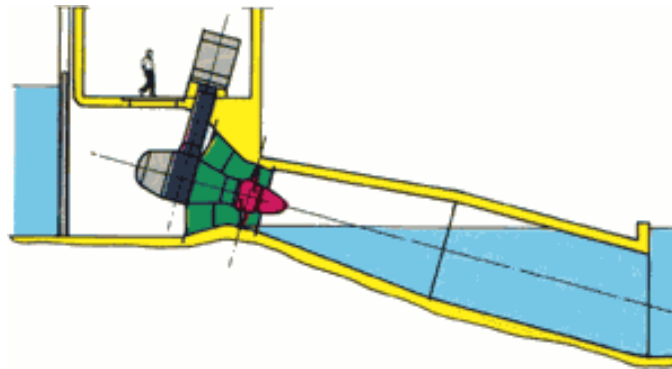


Turbina Kaplan de eje inclinado. Tomada de http://www.saltosdelpirineo.com/catalogos/cat_labarthe.pdf



Turbina Kaplan configuración reenvió de eje

Esta configuración se usa en casos específicos donde el aspecto del lugar se vuelve importante. En las instalaciones de reenvío de ángulo lateral, ninguna obra civil es superior a la cresta de la presa, lo que permite una inclusión excelente en el medio ambiente. En la siguiente figura se muestra la configuración de una turbina Kaplan reenvío de eje.

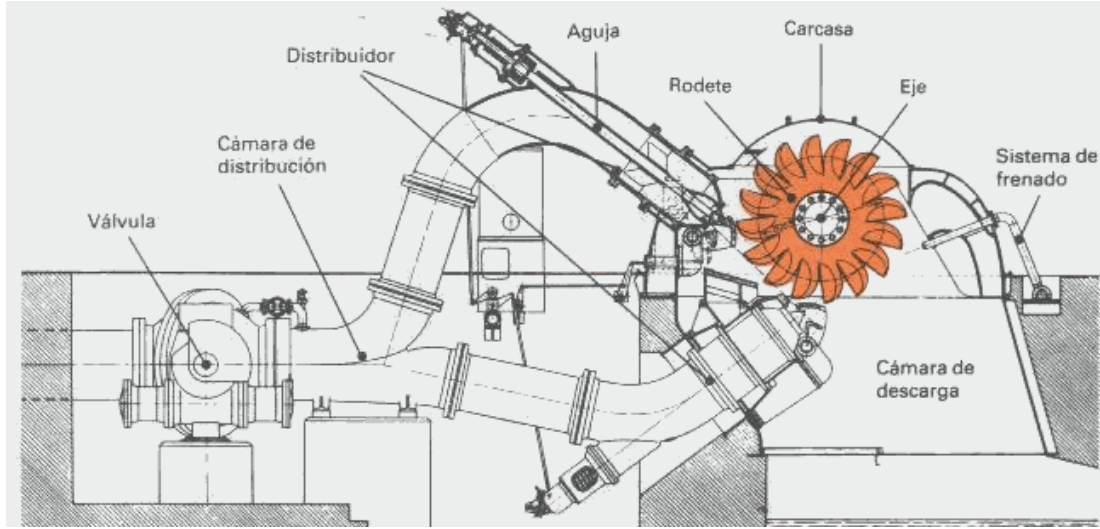


Turbina Kaplan reenvío de eje. Tomada de http://www.saltosdelpirineo.com/catalogos/cat_labarthe.pdf

3.3.4. Turbina Pelton

La turbina Pelton está constituida, principalmente, por un distribuidor (inyector) y el rodete (rueda). El distribuidor es el que se encarga de introducir el fluido incomprensible en el rodete de forma útil, el cual es una extensión de la tubería forzada, terminando en forma atoberada que reduce la sección, con salida a la atmósfera; por lo que la energía de presión que posee el fluido a su entrada se convierte en un 100% en energía cinética. La turbina puede constar de uno a seis inyectores, pero la entrada del agua en el rodete siempre es puntual (González, 2009).

El rodete es el encargado de convertir la energía cinética del agua en energía mecánica y está constituido por un cubo, que está unido al eje a través de una serie de álabes ubicados en su periferia. El eje transmite el movimiento de rotación al eje del alternador (Berrondo, Oquiñena y Salaberria, 2007). En la figura siguiente se muestra una turbina tipo Pelton de eje horizontal con dos sistemas de inyección. Como se puede ver la turbina consta de otros elementos, como son la cámara de descarga (tubo de descarga), que es la zona por donde se descarga el agua, después de haber movido el rodete.



Esquema de una turbina tipo Pelton de eje horizontal. Tomada de mecatronicaunifim.htmlplanet.com

Otro mecanismo es el sistema hidráulico de frenado, el cual es un circuito de agua derivado de la cámara de distribución. Cuando es necesario frenar la turbina, el agua proyectada a gran velocidad sobre los álabes favorece el rápido frenado de la turbina.

Principio de funcionamiento

Cuando el fluido incomprensible (agua) pasa por la rueda, entra en contacto con la atmósfera, lo que provoca que toda la energía de presión se convierta en energía cinética, actuando sobre el rodete. En el momento en que el chorro de agua incide sobre los álabes del rodete, lo hace girar sobre su eje, y transforma de esta manera la energía hidráulica en energía mecánica.

La velocidad con la que sale el caudal de agua del distribuidor es igual a la velocidad absoluta con la que entra en los álabes del rodete y viene definida por la fórmula de Torricelli:

$$C_1 = K_1 \sqrt{2gH_n}$$

Donde K_1 es el coeficiente de la velocidad absoluta que mantiene prácticamente constante, por lo que la velocidad depende del salto neto, y tiene un valor comprendido entre 0.97 y 0.98 (González, 2009).

Diagrama de transformación de energía



Triángulo de velocidades de entrada. Triángulo de entrada $\vec{C} \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow = \vec{w} \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow + u \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow$ donde u_1 es la velocidad tangencial $u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$

Donde $\vec{C} \rightarrow \vec{v}_1 \rightarrow$ es la velocidad de salida del agua del inyector. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el punto de entrada a la turbina, donde el fluido tiene una carga total H , y el punto de salida del inyector, se tiene que

$$H = \frac{C_1^2}{2g} + H_{rE-1}$$

Donde H_{rE-1} es la pérdida de carga por fricción entre ambos puntos. La tubería forzada y el inyector están diseñados de modo que la pérdida de carga se disminuye.

Triángulo de velocidades de salida

Triángulo de salida $\vec{C} \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow = \vec{w} \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow + u \rightarrow \vec{v}_2 \rightarrow$

Rendimiento hidráulico

$$\eta_h = \frac{u_1 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 - u_2 \cdot C_2 \cdot \cos \alpha_2}{g}$$

Rendimiento teórico máximo

$$\eta_h^* = \frac{1 + \cos \beta_2}{2}$$

Potencia a la entrada

$$P_E = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Par motor (momentos)

$$P = M \cdot \omega$$

Ejemplo

Una turbina Pelton trabaja con una altura neta de 240 m. El diámetro del chorro es $d = 150$ mm, $C_v = 0.98$; $\alpha_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 15^\circ$; $w_2 = 0.70w_1$; $u_1 = 0.45 C_1$. Calcular:



- 1) La fuerza tangencial ejercida por el chorro sobre los álabes.
- 2) La potencia transmitida por el agua al rodete o P_i .
- 3) El rendimiento hidráulico, si $\eta_v = 1$.
- 4) El rendimiento total si $\eta_m = 0.97$.

Solución

- 1) Si $w_1 \neq w_2$, la fuerza que ejerce el caudal del agua sobre los álabes está dado por

$$F = \rho Q(w_1 - w_2 \cos \theta), \text{ donde } \theta = (\pi - \beta_2)$$

- 2) Para determinar el caudal se tiene que

$$Q = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) C_1 = \pi \times \frac{0.150^2}{4} \times 67.24 = 1.19 \text{ m}^3/\text{s}$$

Triangulo de entrada:

$$u = u_1 = u_2 = 0.45C_1 = 0.45 \times 0.98(2gH)^{\frac{1}{2}} = 0.45 \times 0.98(2 \times 9.806 \times 240)^{\frac{1}{2}} = 30.26 \text{ m/s}$$

$$C_1 = 0.98(2 \times 9.806 \times 240)^{1/2} = 67.24 \text{ m/s}$$

$$w_1 = C_1 - u = 67.24 - 30.26 = 36.98 \text{ m/s}$$

$$w_2 = 0.70w_1 = 25.89 \text{ m/s}$$

- 3) Luego:

$$F_x = 1000 \times 1.19 \times (36.98 - 25.89 \cos 165^\circ) = 73\,756.2 \text{ N}$$

$$P_i = F_x u = 73\,756.2 \times 30.26 = 2\,231.9 \text{ kW}$$

$$\eta_h = H_u/H \text{ si } H_u = \frac{P_i}{\gamma Q} = \frac{2\,231\,000}{(9806 \times 0.19)} = 191.27 \text{ m}$$

$$\eta_h = \frac{191.27}{240} = 0.8$$

- 4) $\eta_t = \eta_v \eta_h \eta_m = 1 \times 0.8 \times 0.97 = 0.78$

Es importante apuntar que la turbina Pelton se utiliza principalmente en centrales hidroeléctricas donde se requiera de un salto grande y el caudal relativamente pequeño, por lo tanto, corresponde a velocidades específicas bajas. Por ejemplo, en centrales hidroeléctricas de cabeceras de ríos.



Cierre de la unidad

En esta unidad se presentaron tanto las bases como las características generales y particulares de los principales tipos de máquinas hidráulicas, teniendo como objetivo ampliar tu conocimiento de este tipo de tecnología y por lo tanto de la aplicación de fuentes de energía renovable en beneficio de la sociedad en su conjunto.



Para saber más



Videos relacionados a bombas centrifugas:

<http://www.youtube.com/watch?v=ycStpC16OwA>

<http://www.youtube.com/watch?v=liE8skW8btE>



Turbina Francis:

<http://ramausa.wordpress.com/2011/02/16/turbinas-francis-ii-video-explicativo-de-las-paletas-directrices/>

<http://www.youtube.com/watch?v=AcVL8KAIN10>

<http://www.youtube.com/watch?v=JD4VkzHk6rk>

<http://www.youtube.com/watch?v=Q0F-9HciA-A>



Videos sobre la turbina Kaplan:

<http://www.youtube.com/watch?v=VKK7Ya3-H80>

<http://www.entradas.zonaingenieria.com/2009/05/turbinas-kaplan.html>



Fuentes de consulta



1. Berrondo, J., Oquiñena, M. y Salaberria, I. (2007). *Apuntes de máquinas hidráulicas*. Donostia, San Sebastián: Escuela Universitaria Politécnica.
2. Córdova, R. (1999). Breve historia de las turbinas hidráulicas. *Desde la ciencia*, Número 1, Volumen 2, pág. 14-19.
<http://www.uca.edu.sv/deptos/ccnn/dlc/pdf/turbinas.pdf>
3. Encinas, M. (1975). Turbomáquinas Hidráulicas. En *Turbomáquinas Hidráulicas*. México: Limusa.
4. Fernández, P. (2008). *Bombas Centrífugas y Volumétricas*. Cantabria, Santander: Universidad de Cantabria.
5. Fernández, P. (s. f.). Turbinas hidráulicas. Cantabria, Santander: Universidad de Cantabria.
6. García, M. (2011). *Turbomáquinas – Turbinas hidráulicas*.
7. González, J. y Martínez de la C., J. (2006). *Turbomáquinas*. Oviedo: Universidad de Oviedo.



8. Gutiérrez, E. (2009). *Simulación Hidrodinámica de las Turbinas a Instalar en la Central Hidroeléctrica "Manuel Piar" en Tocomo*. Málaga. Diplomado de Estudios Avanzados, Málaga: Universidad de Málaga.
9. González, M. P. (2009). Tema 6. Turbinas Pelton. *Máquinas de Fluidos*. Universidad del País Vasco.
10. Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo.
11. Paz, C., Suárez, E. y Eirís, A. (2012). *Máquinas hidráulicas de desplazamiento positivo*. Vigo: Universidad de Vigo.
12. Sánchez, U. (2012). Máquinas hidráulicas. En *Máquinas hidráulicas*. Alicante: Club Universitario.