

Tema 5. Introducción a las Turbinas Hidráulicas.

5.1. Introducción

El propósito de las turbinas, como ya se ha comentado, es la obtención de energía mecánica a partir de energía de fluido. Para aplicaciones a pequeña escala, se puede emplear esta energía mecánica en infinidad de aplicaciones, tanto con turbinas turbomáquinas (un torno de dentista, donde aire a presión hace girar un rodete, a cuyo eje está acoplado el torno), como con turbinas de desplazamiento positivo (en un motor diésel). Dado que las máquinas de desplazamiento positivo son, en general, reversibles, se hablará de ellas en un tema posterior.

En aplicaciones a gran escala, el objetivo general de las turbinas es la producción de energía eléctrica, para acoplarla a la red de suministro. En estas situaciones, suelen emplearse turbomáquinas. Para ello, la energía mecánica generada en el eje se utiliza para mover una máquina eléctrica generadora (generador eléctrico o alternador).

5.2. Velocidad Sincrónica

El objetivo de esta asignatura no es diseñar máquinas eléctricas, pero es importante considerar que, cuando una turbina se emplea para generar energía eléctrica, el rodete no puede girar a cualquier velocidad, sino que, dado que el eje del rodete es común al eje del alternador, tiene que girar a una velocidad sincrónica (o síncrona), para que pueda producir corriente alterna compatible con los 50 Hz de la red europea, o los 60 Hz de la red americana, dependiendo de dónde se encuentre situada la turbina. Los Hz (hercios) son unidades de frecuencia correspondientes a un ciclo por segundo, lo que corresponde a unidades de $1/s$ (o, lo que es lo mismo, s^{-1}).

La velocidad sincrónica a la que debe girar la turbina depende del número de pares de polos del alternador al que se acople. El número de pares de polos del alternador debe ser entero, y la relación que se establece es:

$$n = \frac{\text{Frecuencia de la red} \cdot 60}{\text{Número de pares de polos}} \quad [\text{Hz} \cdot \text{s}/\text{min} = \text{rpm}] \quad (5.1)$$

de modo que n no puede tomar un valor cualquiera, sino sólo aquél que corresponda a un número entero de pares de polos en el alternador. Si el número de pares de polos del alternador está fijado, entonces el valor de n está también fijado.

5.3. Producción de Energía Eléctrica

En la generación de energía eléctrica para la red, las turbinas están casi omnipresentes. Las instalaciones donde se genera energía eléctrica a gran escala se llaman de forma general centrales eléctricas. Aunque la participación de diferentes tipos de centrales eléctricas en la generación global de electricidad depende del país, y el panorama va evolucionando con el tiempo (en este sentido, puede ser interesante

consultar el recibo de la electricidad que llega al domicilio), tradicionalmente se han venido clasificando las centrales eléctricas como básicas y complementarias. Las básicas son las que contribuyen con el mayor volumen de energía producida, y corresponden a: las centrales térmicas, las centrales nucleares y las centrales hidráulicas o hidroeléctricas; mientras que las complementarias son el resto: las centrales mareomotrices, las centrales eólicas y las centrales solares o heliotérmicas. Dentro de las complementarias podrían incluirse también las geotérmicas, aunque su explotación actual es escasa, salvo en zonas muy específicas (Finlandia, por ejemplo).

Entre ellas, las únicas que no emplean turbinas son las centrales solares fotovoltaicas, donde los paneles fotovoltaicos constituidos por semiconductores tipo diodo generan una corriente continua por acción de los rayos solares, que debe ser posteriormente transformada en corriente alterna para conectar a la red eléctrica.

Las centrales térmicas, las nucleares, las solares con helióstatos (espejos diseñados para concentrar la luz solar en punto o pequeña superficie inmóvil, compensando el movimiento diurno terrestre) y las geotérmicas operan, de forma general, generando vapor de agua, que mueve una turbina de vapor. El calor para generar este vapor procede de la combustión de combustibles sólidos (carbón, básicamente), líquidos o gases (gas natural, principalmente, en cuyo caso los gases de combustión se aprovechan para mover una turbina de gas, en un ciclo combinado) en las centrales térmicas, de la energía de fisión en las centrales nucleares, del reflejo de los rayos solares en las centrales solares con helióstatos, y de las capas profundas de la tierra en las geotérmicas. Tanto las turbinas de vapor como las turbinas de gas son turbinas térmicas.

Por otro lado, las centrales hidroeléctricas, mareomotrices y eólicas emplean turbinas hidráulicas, ya que las dos primeras operan con agua (de un embalse o de un pantano de marea) como fluido que mueve la turbina, y por tanto incompresible, y la eólica con aire, en un aerogenerador que se encuentra abierto a la atmósfera. En éstas, el agua o el aire mueven directamente la turbina.

Desde el punto de vista de esta asignatura, nos vamos a centrar en estas últimas y, para fijar conceptos, expresamente en las turbinas empleadas en las centrales hidroeléctricas (y mareomotrices por extensión). Los aerogeneradores, con fluido compresible, se tratan con relación a estas turbinas de forma similar a los ventiladores con relación a las bombas, que se verá más adelante.

5.4. Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas

Existen varios tipos de centrales hidroeléctricas. En España, lo normal es que el agua se encuentre embalsada, y de ese embalse se tome un cierto caudal de agua para alimentar la turbina. La energía producida por la turbina depende del caudal de agua alimentado. Dado que la energía eléctrica demandada puede variar con el tiempo, el ajuste a la demanda se puede realizar de dos modos: regulando el caudal de agua, o trabajando con un caudal constante y utilizando el exceso de energía producido para bombear agua (por ejemplo, a otro embalse, y almacenar la energía como potencial, ya que no se puede almacenar como electricidad).

En el primer caso, el intervalo de caudales se debe mantener en la zona en que la turbina opere con rendimientos elevados, alrededor del caudal de diseño. En el segundo caso, la bomba puede compartir el eje con la turbina, en lo que se conoce como turbina-bomba.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar en función de la altura del salto del embalse (H), es decir, de la carga del fluido, que define la energía que el fluido puede intercambiar en la turbina. Según esto, las centrales pueden ser: de alta presión, de media presión y de baja presión, que a su vez afectan al diseño de la turbina a emplear.

Las centrales de alta presión son aquéllas en las que el salto es superior a 200 m. Como norma general, trabajan a caudal de agua bajo, en torno a unos $20 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada turbina. Las centrales de media presión son aquéllas en las que el salto está comprendido entre 200 y 20 m, y trabajan con caudales de agua bastante superiores, del orden de unos $200 \text{ m}^3/\text{s}$ por turbina. Las centrales de baja presión son aquéllas en las que el salto es inferior a 20 metros, y éstas operan con caudales de agua de unos $300 \text{ m}^3/\text{s}$ o superiores, ya que mayor caudal compensa por la menor energía de la que dispone el fluido. Analizando estos números, y comparándolos con la expresión para la velocidad específica de una turbina (ecuación (4.28)), se puede deducir fácilmente que esta clasificación está íntimamente ligada a las familias de turbinas a emplear en cada caso.

5.5. Elementos Constitutivos de las Turbinas Hidráulicas

Las turbinas hidráulicas están constituidas por los siguientes elementos:

a) Canal de llegada o tubería forzada

El canal de llegada o tubería forzada es la conducción que lleva el caudal de agua desde el embalse hasta la cámara espiral o caja espiral. No debe tener una sección demasiado estrecha para evitar que se produzca elevada pérdida de carga del fluido, ya que es energía perdida que no podrá aprovecharse en el rodete de la turbina.

En esta tubería, y debido a la regulación de caudal asociada a los cambios de energía eléctrica demandada, se pueden producir sobrepresiones periódicas asociadas a golpes de ariete, que son tanto más peligrosos cuanto mayor es la presión a la que opera la central hidroeléctrica. Para evitar que estos golpes de ariete produzcan roturas en la instalación, es habitual la colocación de chimeneas de equilibrio, que neutralizan estos cambios de presión.

b) Caja o cámara espiral

Este elemento sólo lo tienen las turbinas de reacción, que son de admisión total. En las turbinas de admisión total, el fluido entra al rodete por todo el perímetro exterior. La misión de la cámara espiral es precisamente distribuir el fluido a lo largo de todo el perímetro.

El diseño de la caja o cámara espiral difiere en función de la presión a que opere la central hidroeléctrica en que se sitúa la turbina. En centrales hidroeléctricas de presión

más elevada, la cámara espiral es metálica, relativamente pequeña y tiene sección circular. A medida que disminuye la presión, la cámara espiral se va haciendo mayor (opera con más caudal), se construye normalmente en hormigón, y la sección se va haciendo cuadrada.

Particularmente en diseños metálicos, de presión alta, la cámara espiral suele estar provista de una válvula de seguridad o de alivio, cuya misión es reducir el golpe de ariete que puede producirse por variaciones de caudal en la turbina, evitando posibles roturas en la instalación.

c) Distribuidor

Es un elemento, situado entre la cámara espiral y el rodete de la turbina, cuya finalidad es orientar adecuadamente el fluido para que entre con la dirección más adecuada en el rodete, de forma que el triángulo de velocidades de entrada permita el máximo aprovechamiento de la energía del fluido en la turbina. Su diseño es muy diferente en turbinas de acción y en turbinas de reacción, por lo que se describirá más específicamente en los temas correspondientes.

e) Rodete

Es el elemento donde se produce el intercambio de energía del fluido en la turbina. Su diseño varía mucho dependiendo del tipo de turbina, de modo que se discutirá en los temas posteriores.

f) Tubo de aspiración o de descarga

Es el tubo que conecta la salida del rodete de la turbina con el canal inferior, y sólo está presente en turbinas de reacción. Su misión es transformar carga de velocidad del fluido a la salida del rodete en carga de presión, con la mínima pérdida de carga posible. Su diseño es fundamental, sobre todo en turbinas de centrales de baja presión.

A la salida del tubo de descarga al canal inferior, la presión es la atmosférica, y se busca minimizar la carga del fluido en ese punto, maximizando la sección. Se diseña el tubo de descarga para que aumente la sección unas 8 veces, desde el punto de salida del rodete hasta el punto de salida del tubo de descarga. De este modo, de acuerdo con la ecuación de Bernouilli (ecuación (2.8)), para h_f despreciable entre los dos puntos, y dado que no hay máquinas de fluidos en el tubo de descarga:

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{c_2^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_2} \approx z_S + \frac{c_S^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_S} \quad (5.2)$$

donde 2 corresponde al punto de salida del rodete y S al de salida de la turbina. Dado que la presión en el punto de salida de la turbina es la atmosférica, y $c_S \ll c_2$, entonces se produce un vacío en el punto de salida del rodete ($p_2 < 0$, dado que las presiones en la ecuación (5.2) son relativas a la atmosférica). Por esta razón, a este tubo se le llama tubo de aspiración.

Ese vacío es beneficioso para aprovechar la energía del fluido en la turbina pero, si es excesivo y p_2 se reduce por debajo de la presión de vapor del fluido (el agua, en este caso) a la temperatura a la que sale de la turbina (ambiente, para la situación analizada aquí), el fluido entraría en ebullición, lo que produciría cavitación en la turbina por la formación de burbujas, con posible rotura y deterioro. Por esta razón, la altura a la que se encuentra el rodete de la turbina con relación al nivel de salida ($z_2 - z_s = H_a$; altura de aspiración), está limitada. En ocasiones, incluso, la salida del rodete debe estar por debajo del nivel del canal inferior, para evitar la cavitación (H_a sería negativo).

5.6. Clasificación de las Turbinas Hidráulicas

De acuerdo con el grado de reacción, como se vio en el Tema 1, las turbinas pueden clasificarse en dos grandes grupos: turbinas de acción o impulso, y turbinas de reacción.

En las turbinas de acción o impulso, toda la energía en el rodete se intercambia en forma de velocidad. Aunque hay diferentes diseños, en las aplicaciones en centrales hidroeléctricas, las turbinas de acción que se emplean son turbinas de tipo Pelton. Las turbinas Pelton tienen un diseño de rodete particular, donde los álabes tienen forma de cucharas o cangilones, que se tratará con más detalle en el siguiente tema. Las turbinas de acción o impulso carecen de caja espiral y de tubo de aspiración, y se aplican en centrales de alta presión.

En las turbinas de reacción, parte de la energía del fluido en el rodete se intercambia en forma de presión. En aplicaciones a centrales hidroeléctricas o mareomotrices, se emplean tres tipos de turbinas de reacción: las turbinas Francis, que pueden ser radiales o mixtas y se aplican en centrales de alta y media presión; las turbinas Kaplan o hélice, que son de tipo axial, y se aplican en centrales de media y baja presión; y las turbinas bulbo, que son también de tipo axial, y se aplican en centrales de baja presión y mareomotrices.

Cada una de estas turbinas trabaja en diferentes intervalos de relación H/Q (salto a caudal), por lo que cada una de ellas está relacionada con un intervalo de velocidades específicas de operación: las turbinas Pelton trabajan a valores de n_s no superiores a 75, las turbinas Francis pueden operar en un amplio intervalo de valores de n_s comprendido entre 50 y 450, y las turbinas Kaplan operan a valores de n_s superiores a 400. Esta relación con la velocidad específica de los distintos tipos de turbinas hace que a las turbinas Pelton se las conozca como turbinas lentas. Evidentemente, dado que la velocidad de giro del rodete de la turbina está fijado por el número de pares de polos del alternador al que va conectada, como se ha comentado en el punto 5.2, esta clasificación como lentas o rápidas no tiene ninguna relación con su velocidad real de giro, n , sino con el valor de velocidad específica, n_s , en el que operan.