

# Capítulo 1

## Clasificación y descripción de las máquinas hidráulicas y eólicas

### 1. Clasificación de las máquinas de fluidos 2. Bombas rotodinámicas

Se denomina máquina de fluido a todo dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en mecánica, o viceversa.

- Según la compresibilidad del fluido:
  - Hidráulicas: Flujo incompresible
  - Térmicas: Flujo compresible
- Según el sentido de intercambio de energía:
  - Motoras: La máquina absorbe energía del fluido para convertirla en energía mecánica en un eje, e.g. turbinas
  - Generadoras: La máquina aporta energía al fluido, e.g. bombas, ventiladores, compresores
- Según el principio de funcionamiento:
  - Turbomáquinas: Máquinas rotodinámicas. El intercambio de energía es debido a la variación del momento cinético del fluido al atravesar un elemento móvil denominado rodete o rotor. Según la trayectoria del flujo en el rodete:
    - Radiales: p.ej. Bomba centrífuga, ventilador centrífugo
    - Diagonales: p.ej. Turbina Francis
    - Axiales: p.ej. Turbina Kaplan
    - Tangenciales: p.ej. Turbina Pelton
  - Máquinas de desplazamiento positivo: Máquinas volumétricas, e.g. de émbolo, de membrana, de tornillo, rotativas, etc.

Las bombas y ventiladores son Turbomáquinas, Hidráulicas, Generadoras. Su funcionamiento se basa en la Ecuación de Euler de las Turbomáquinas. Estudiamos las turbobombas o bombas rotodinámicas de mayor uso:

- Bombas centrífugas: la dirección del flujo en el rodete es radial.
- Bombas axiales: la dirección del flujo en el rodete es axial.

#### 2.1. Clasificación de las bombas rotodinámicas

- Según la dirección del flujo en el rodete:
  - Radiales
  - Diagonales
  - Axiales
- Según el número de escalonamientos: denominamos escalonamiento al conjunto rodete + difusor. Estos permiten aumentar la altura suministrada con el mismo caudal y disminuir el número específico de revoluciones de la máquina.
  - Simples o de un escalonamiento
  - Compuestas o de múltiples escalonamientos
- Según la apertura del rodete:
  - Cerrado
  - Doble aspiración
  - Semiabierto
  - Abierto
- Según el tipo de difusor:

- Difusor con voluta simple
- Difusor con doble voluta
- Difusor con corona fija con álabes + voluta
- Según la posición del eje:
  - Horizontal
  - Vertical
  - Inclinado
- Según la altura o presión suministrada:
  - Baja presión: hasta 20-25 mca
  - Media presión: entre 20 y 60 mca
  - Alta presión: más de 60 mca
- Según el tipo de accionamiento: motor eléctrico, de gasolina, diésel, turbina de gas, etc.
- Otras clasificaciones: según el fluido bombeado, los materiales utilizados en su fabricación, el fin al que se destina, etc.

## 2.2. Elementos constitutivos

- Tubería de aspiración. Lleva el agua a baja presión a la bomba.
- Rodete o rotor. Elemento móvil formado por álabes, es donde se produce el intercambio de momento cinético.
- Difusor. Formado por una corona difusora de álabes fijos (opcional) y la voluta (también llamada cámara espiral o caracol). Su función es dirigir el flujo de forma ordenada hacia la salida, y recuperar parte de la energía cinética como energía de presión.
- Tubería de impulsión. Distribuye el agua a presión por el resto de la instalación.

## 2.3. Operación de una bomba rotodinámica

- Arranque y parada. En el arranque será necesario cebar la bomba, la parada debe hacerse progresivamente para evitar el golpe de ariete, los cojinetes deben estar suficientemente lubricados, la empaquetadura debe impedir que entre aire durante el funcionamiento de la bomba.
- Procedimiento de cebado. Consiste en llenar de agua la tubería de aspiración y el cuerpo de la bomba, para lo cual el aire debe poder escapar al exterior (por la válvula de purgado). Antes de su arranque, la bomba ha de estar completamente llena de líquido. Las bombas rotodinámicas necesitan ser cebadas porque no son autoaspirantes.

## 2.4. Bombas centrífugas

Bombas rotodinámicas en donde la dirección del flujo en el rodete es radial. Uso recomendado para grandes saltos de presión y caudales pequeños ( $\Delta P$  grande,  $\dot{V}$  pequeño).

## 2.5. Bombas axiales

Bombas rotodinámicas en donde la dirección del flujo en el rodete es axial. Utilizadas para grandes caudales y pequeños saltos de presión.

# 3. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son Turbomáquinas, Hidráulicas, Motoras. Su funcionamiento se basa en la Ecuación de Euler de las Turbomáquinas. Estudiamos las turbinas de mayor uso:

- Turbinas radiales: Francis lentas
- Turbinas diagonales: Francis mixtas, Dériaz
- Turbinas axiales: Kaplan, hélice, tubulares
- Turbinas tangenciales: Pelton, Michell-Banki

## 3.1. Clasificación de las turbinas hidráulicas

- Según la transformación de la energía en el rodete:
  - Turbinas de acción: El intercambio de energía en el rodete es en forma de energía cinética, de modo que no existe cambio de presión entre la entrada y salida. E.g., turbina Pelton.
  - Turbinas de reacción: Existe un cambio de presión en el fluido al atravesar el rodete. E.g., turbinas Francias y Kaplan.

- Grado de reacción: Relaciona la energía de presión respecto a la energía total intercambiada en el rodete.

$$\sigma_R = \left( \frac{p}{\rho} \right)_1^2 / \left( \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right)_1^2$$

- Las turbinas de acción tienen  $\sigma_R = 0$  (Pelton, Turgo, Michell-Banki), mientras que las turbinas de reacción tienen  $\sigma \neq 0$ .

## 3.2. Turbinas de acción

El chorro entra y sale de los álabes del rodete (cucharas) a la presión atmosférica, cediendo

prácticamente toda su energía y sale del rodete cayendo por su propio peso aguas abajo. Son turbinas de admisión parcial: sólo unos pocos álabes están activos simultáneamente. Regulación de caudal por control del inyector. Cuando existen más de dos inyectores, el eje se sitúa en vertical. La más extendida es la turbina Pelton. Saltos de gran altura (50 - 1800 m), con caudales relativamente reducidos. Potencias desde 100 kW hasta 420 MW. Otras turbinas de acción: Turgo, Michell-Banki.

### Turbina Pelton

#### Elementos característicos:

- Tobera de inyección: transforma la altura neta de la turbina en altura cinética del chorro.
- Válvula de aguja: regula la potencia de la turbina variando el caudal.
- Sistema de regulación de la turbina: pretende mantener la igualdad de los pares motor y resistente (del generador) a fin de mantener un número constante de revoluciones, aunque varía la carga o la altura neta de la turbina.
- Caja o carcasa del rodete: para evitar salpicaduras, el rodete se aloja en la carcasa a presión atmosférica.

El rodete está formado por álabes en forma de cuchara. Configuración en eje horizontal (1, 2 ó 3 rodetes en el mismo eje y 1 ó 2 chorros por rodete) y eje vertical (1 rodete con 4 a 6 chorros).

### Otras turbinas de acción

- Turbina Turgo: el chorro incide de forma lateral (9 - 20°) en vez de tangencial como en la Pelton. Sus álabes son cucharas simples, de forma elipsoidal.
- Turbina Michell-Banki: de flujo transversal o cruzado, rodete en forma de jaula de ardilla.

### Comparativa turbinas de acción

- Turgo: más difícil de construir que la Pelton. Sus álabes son más frágiles. A igualdad de potencia, el diámetro es la mitad que el de la Pelton.
- Michell-Banki: buenas perspectivas de utilización en mini y micro centrales. Buen rendimiento a cargas parciales.

	Pelton	Turgo	Michell-Banki
Salto [m]	100 - 1900	40 - 200	5 - 100
Potencia [MW]	0,1 - 300	0,5 - 10	0,75 - 1
Rendimiento [%]	89 - 92	80 - 85	80 - 81

### 3.3. Turbinas de reacción

Son aquellas en las que se da un intercambio de presión en el rodete. Componentes característicos:

- Tubería forzada: Lleva el agua a alta presión hasta la turbina, debe estar diseñada para minimizar las pérdidas de carga.
- Voluta, cámara espiral o caracol: conduce el fluido hacia el perímetro del distribuidor ganando algo de potencia cinética.
- Predistribuidor de álabes fijos: guía el agua de forma eficiente hacia el rodete.
- Distribuidor "Fink" de álabes móviles: continúa el guiado además de permitir regular el caudal turbinado.
- Rodete o rotor: formado por álabes, donde se produce el intercambio de energía cinética.
- Tubo difusor: lleva el agua a remanso, permitiendo recuperar algo de energía.

### Turbina Francis (J.B. Francis, s. XIX)

**Operación y características:** Es la turbina hidráulica más empleada en centrales hidroeléctricas debido a su versatilidad, buen rendimiento y funcionamiento probado durante décadas. Cubre alturas de salto entre 30 y 750 metros (e.g. central de Rosshag en Austria con  $H = 672$  m), y potencias de hasta 800 MW. Según su aplicación, el diseño de la turbina Francis varía:

- TF radial (lentas): entrada radial al rodete, grandes saltos, pequeña potencia y rendimiento bajo, pero muy económica. Invade el campo de las turbinas Pelton cuando puede competir en costes.
- TF diagonal (medias): entrada diagonal al rodete, saltos intermedios, potencia media y buen rendimiento, costes razonables. Es el tipo de turbina Francis más ampliamente utilizada.
- TF axial (rápidas): salida axial del rodete, pequeños saltos, elevada potencia y muy buen rendimiento, costes elevados. Invade el campo de las turbinas Kaplan cuando puede competir en costes.

### Clasificación:

- Por tipo de instalación:
  - Cerrada: tubería forzada ¿cámara espiral ¿predistribuidor ¿distribuidor Fink ¿rodete ¿tubo de aspiración ¿canal de descarga.

- Abierta o en cámara de agua: cámara de agua (con o sin techo) ¿rodete ¿tubo de aspiración ¿canal de descarga. Para saltos muy pequeños (6 - 10 m) y turbina Francis de muy pequeña potencia (¡1 MW).
- Por número de flujos:
  - Simples o de un solo flujo: una única admisión de agua al rodete.
  - Gemelas o de dos flujos: rodete con doble admisión, absorbiendo doble caudal, lo que aumenta la velocidad de giro pudiendo utilizar un alternador más barato (menor número de polos).
- Por disposición del eje: Eje horizontal o Eje vertical
- Por la altura del salto:
  - Alta presión: saltos de más de 80 m.
  - Baja presión: saltos de menos de 80 m (necesita una caja espiral de grandes dimensiones)
  - Para una misma potencia, al aumentar la altura, deberá disminuir el caudal de diseño y aumentar la velocidad de giro resultando en una turbina más pequeña.

### Turbina Kaplan (Víctor Kaplan, s.XX)

La turbina Kaplan es una turbina de reacción axial, evolución de la turbina hélice, que presenta álabes orientables. Se emplean para pequeños saltos (10 - 80 m), en un amplio rango de caudales. Buenos rendimientos (95%), se suelen emplear en centrales de agua fluyente, ya que mantienen mejor rendimiento frente a cargas parciales que las turbinas Francis. Además, a igualdad de potencia, son menos voluminosas.

### Turbina Dériaz

Turbina semiaxial o de flujo mixto, de reacción. Saltos de mediana altura (20 - 400 m). Potencia unitaria de hasta 300 MW. Se sitúa entre las Francis y las Kaplan, se emplea como grupo reversible bomba-turbina.

### Grupos tubulares

Son turbinas axiales que carecen de voluta, el rodete es tipo hélice o Kaplan, el distribuidor es de forma cónica y tienen forma hidrodinámica. Saltos de pequeña altura (1 - 20 m). Potencias relativamente bajas (100 kW a 40 MW). Subtipos:

- Turbina Bulbo: forma hidrodinámica, todo el conjunto está sumergido.
- Turbina tipo S: eje del generador se extrae del conjunto, flujo en forma de "S".
- Turbina Straflo (Straight Flow): polos del generador integrados en el anillo exterior del rodete, eliminando la necesidad de un eje central y permitiendo una construcción más sencilla y económica.

### Comparativa turbinas de reacción

- Kaplan: mejor que las Francis ante variaciones de carga. Fácil de transportar:
- Dériaz: menor volumen de excavación que las Francis. Menor diámetro que las Kaplan.
- Bulbo: mejores rendimientos, menor riesgo de cavitación y menor obra civil. Difícil refrigeración del alternador.

	Francis	Kaplan	Dériaz	Bulbo	Tipo S
Salto [m]	30 - 700	6 - 70	20 - 400	5 - 20	3 - 20
Potencia [MW]	1 - 250	20 - 100	¡300	0.1 - 50	0.1 - 10
Rendimiento [%]	88 - 93	80 - 85		91 - 94	91 - 94

- Tubulares (Bulbo) vs Kaplan: se consigue mayor caudal con Bulbo que además tiene menores dimensiones para la misma potencia.
- Francis (rápidas) vs Kaplan: Kaplan rinde mejor a cargas parciales. Para alturas superiores a 50 m, a mayor potencia, Kaplan tendrá mayor diámetro.
- Dériaz vs Kaplan: mayor rendimiento de Dériaz a iguales condiciones de funcionamiento.
- Francis vs Dériaz: Dériaz admite más sobrecarga y variaciones de carga, además de tener menor tamaño que Francis.

Francis	Pelton
Menores dimensiones globales	Menor volumen excavación. Infraestructura más sencilla.
Menor peso	Más robustas
Mayor rendimiento máximo	Mejor rendimiento a carga parcial
Aprovecha mayor desnivel	No cavitación

## 4. Aeroturbinas

### 4.1. Clasificación de las turbinas eólicas

- Eje vertical (VAWT) o de arrastre:

- Savonius, Darrieus
- Menos extendidas, menor potencia, menor eficiencia
- Eje horizontal (HAWT) o de elevación:
  - 1, 2 ó 3 palas orientables, con góndola orientable (a sotavento o a barlovento)
  - El más utilizado es el diseño noruego: 3 palas, eje horizontal, por sustentación, a barlovento. Mayor potencia, mayor eficiencia.
- Sistemas de regulación y control de potencia
- Torre
- Cimientos
- Sistemas eléctricos

## 4.2. Operación de las turbinas eólicas

- Velocidad de arranque: la turbina empieza a generar electricidad,  $\approx 3 - 5$  m/s.
- Velocidad nominal: mínima velocidad del viento que produce potencia nominal
- Velocidad de corte: la turbina se para por motivos de seguridad
- Área de barrido: área circular que barren las palas de una turbina de eje horizontal o superficie cilíndrica por las palas de una turbina de eje vertical.
- Potencia disponible del viento:

$$\dot{W}_{disponible} = \frac{1}{2} \rho v^3 A$$

- Densidad disponible del viento:

$$\frac{\dot{W}_{disponible}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

- Eficiencia aerodinámica o factor de potencia  $C_p$ : es la parte de energía que la turbina puede extraer de toda la disponible

$$C_p = \frac{\dot{W}_{util}}{\dot{W}_{disponible}} = \frac{\dot{W}_{util}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A}$$

- Límite de Betz: máximo valor del factor de potencia teórico para una turbina eólica ideal

$$C_{p,max} \approx 0,5926$$

## 4.3. Descripción de las turbinas eólicas

- Rodete: Formado por palas o álabes, solidarias al buje o “hub”.
- Tren de empuje (“Drive train”): Contiene la caja multiplicadora y los ejes del generador.
- Góndola (“Nacelle”): Está formada por una carcasa que contiene el tren de empuje, el sistema de orientación, etc.



## Capítulo 2

# Análisis dimensional aplicado a máquinas hidráulicas y eólicas

El análisis dimensional nos permite extrapolar los resultados obtenidos en modelos a escala

Teorema de Buckingham: herramienta matemática que nos permite reducir el número de variables de un problema complejo con números adimensionales.

“Si una ecuación es dimensionalmente homogénea puede reducirse a una relación entre un conjunto de productos adimensionales.”

- Número de Euler:  $Eu = \frac{V}{\sqrt{2\Delta p/\rho}}$
- Número de Reynolds:  $Re = \frac{l \times V}{\nu}$





## Capítulo 3

### Conceptos esenciales

---

# Capítulo 4

## Teorema de Euler

### 1. Teoría ideal universal

#### 1.1. Método de estudio de las turbomáquinas

- Método puramente experimental. Tanteos al azar en el banco de pruebas de laboratorio → lento, inaceptable y anticientífico.
- Método matemático rigurosamente exacto. Por resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes → inabordable en tiempo y recursos.
- Método simplificado. Es el método unidimensional, basado en una serie de hipótesis → utilizando tres herramientas básicas, podremos abordar cualquier proyecto.

#### 1.2. Hipótesis de partida para TM hidráulicas

- Fluidos no viscosos o fluido ideal:  $\mu \approx 0$
- Fluido incompresible:  $\rho = cte$ .
- Flujo permanente o estacionario:  $\frac{\delta}{\delta t} = 0$
- Flujo irrotacional:  $\nabla \times \vec{v} = 0$

#### 1.3. Método de estudio unidimensional

### 2. Triángulos de velocidades

#### 2.1. Velocidades del fluido

Una partícula de fluido que entra en un rodete que está girando con velocidad de arrastre  $u$  (velocidad tangente al mismo), recorrerá una trayectoria relativa entre los álabes del rodete (conducto) a velocidad relativa  $w$  y una trayectoria absoluta (vista por un observador fijo externo al rodete) a velocidad absoluta  $v$ . De esta manera, definimos:

- $u$ , como la velocidad de arrastre, que es la velocidad a la que se mueve un punto sólido del rodete.
- $w$ , como la velocidad relativa, que es la velocidad respecto al observador relativo, que sigue al rodete en su movimiento (como si estuviera sentado en el rodete)
- $v$ , como la velocidad absoluta, que es la velocidad del fluido con respecto al observador inmóvil o fijo exterior al rodete.

$$\vec{v} = \vec{w} + \vec{u}$$

### 3. Teorema de Euler

#### 3.1. Primera formulación de la ecuación de Euler

$$\begin{aligned}\dot{W}_B &= \omega \tau_B = \omega \dot{m}(r_2 v_{2t} - r_1 v_{1t}) = \\ &= \dot{m}(\omega r_2 v_{2t} - \omega r_1 v_{1t}) = \dot{m}(u_2 v_{2t} - u_1 v_{1t}) [W]\end{aligned}$$

Primera formulación de la ecuación de Euler, que nos indica que la energía que el fluido transmite al rodete por unidad de caudal másico es:

$$\frac{\dot{W}_B}{\dot{m}} = u_2 v_{2t} - u_1 v_{1t} \left[ \frac{J}{kg} \right]$$

Que representa la energía específica intercambiada en el rodete. En el caso de una bomba, es la energía específica absorbida por el fluido en el rodete.

Dividiendo por la gravedad:

$$\frac{\dot{W}_B}{g \dot{m}} = \frac{1}{g}(u_2 v_{2t} - u_1 v_{1t}) = H_{rodete} [m]$$

Que representa la altura absorbida por el fluido.

Multiplicando por la densidad:

$$\rho \frac{\dot{W}_B}{\dot{m}} = \rho(u_2 v_{2t} - u_1 v_{1t}) = \rho g H_{rodete} = \Delta p_{rodete} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

### 3.2. De la ecuación de Euler podemos deducir...

- La componente tangente de la velocidad absoluta del fluido es fundamental para el cálculo de la energía específica que el fluido intercambia en el rodete.
- La componente normal de la velocidad absoluta (normal a la SCs de entrada y salida del rodete) es necesaria para evaluar el caudal. El caudal en  $[m^3/s]$  será igual a esta componente normal de la velocidad absoluta en  $[m/s]$  multiplicada por la sección de la SC que atraviesa en  $[m^2]$ .
- Los ángulos  $\alpha$  a la entrada y salida del rodete están asociados con la forma del contorno de las tuberías directrices y órganos fijos de las TM.
- Los ángulos  $\beta$  a la entrada y salida del rodete están asociados con la forma del contorno de los álabes y en general del rodete.

a la vez) y dichos bordes están a una distancia constante del eje de rotación a fin de que la velocidad  $u$  sea la misma para todo el borde.

- Rodete radial puto con generatriz de los álabes no paralela al eje de la máquina a la entrada y a la salida: las partículas del fluido no tienen la misma  $u$  a la entrada y salida del rodete respectivamente y  $v_t$  tampoco es uniforme.
- Rodete diagonal on bordes de entrada y salida de los álabes paralelos al rotor de la máquina: las superficies normales a las líneas de corriente no coinciden con los bordes de entrada y salida de los álabes, por lo que notodos los puntos de dichas superficies entran en contacto con el álabes al mismo tiempo y por ello  $v_t$  es diferente para los puntos de dichas superficies.
- Rodete diagonal con los bordes de entrada y salida de los álabes perpendiculares al zuncho y al cubo: los bordes

## 4. Limitaciones de la teoría ideal unidimensional

Hipótesis para la aplicación de la Teoría Ideal Unidimensional de las Turbomáquinas:

- Fluido ideal: viscosidad nula y densidad constante.
- Régimen permanente: flujo estacionario, propiedades del fluido constantes en cualquier punto del mismo.
- Flujo irrotacional: todas las partículas del fluido siguen la misma trayectoria sobre líneas de corriente paralelas entre sí.
- Todo sucede como si todas las partículas de fluido entraran y salieran del rodete de la TM con la misma dirección (mismos ángulos de entrada y de salida del rodete para todas las partículas del fluido), los mismos triángulos de velocidad y la misma energía (misma ecuación de Euler).

Estas hipótesis son válidas para una máquina centrífuga pura: cuanto más alejada sea la geometría del rodete de la de una turbomáquina centrífuga pura, peor será la aproximación del método unidimensional para su estudio.

- Rodete de una máquina centrífuga pura:  $u$  y  $v_t$  es constante para todas las partículas del fluido a la entrada (en 1) y a la salida (en 2) del rodete respectivamente. Los bordes de entrada y salida de los álabes deben coincidir con superficies transversales (todo el fluido de la sección transversal interacciona con el álabe

## 5. Problemas

## Capítulo 5

# Teoría unidimensional de bombas centrífugas

---

## Capítulo 6

# Instalaciones hidráulicas

---



## Capítulo 7

# Cavitación



## Capítulo 8

# Turbina Pelton

---

## Capítulo 9

# Teoría unidimensional del disco actuador



## Capítulo 10

# Aerodinámica de aeroturbinas