

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

En esta presentación se incluye un listado de problemas en el orden en el que se pueden resolver siguiendo el desarrollo de la teoría. Es trabajo del alumno resolverlos y comprobar la solución

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
INMACULADA FERNANDEZ DIEGO fernandei@unican.es
JUAN CARCEDO HAYA juan.carcedo@unican.es
FELIX ORTIZ FERNANDEZ felix.ortiz@unican.es

1.1.- Introducción a las Máquinas Hidráulicas

1.2.- Bombas Hidráulicas

1.3.- Turbinas Hidráulicas

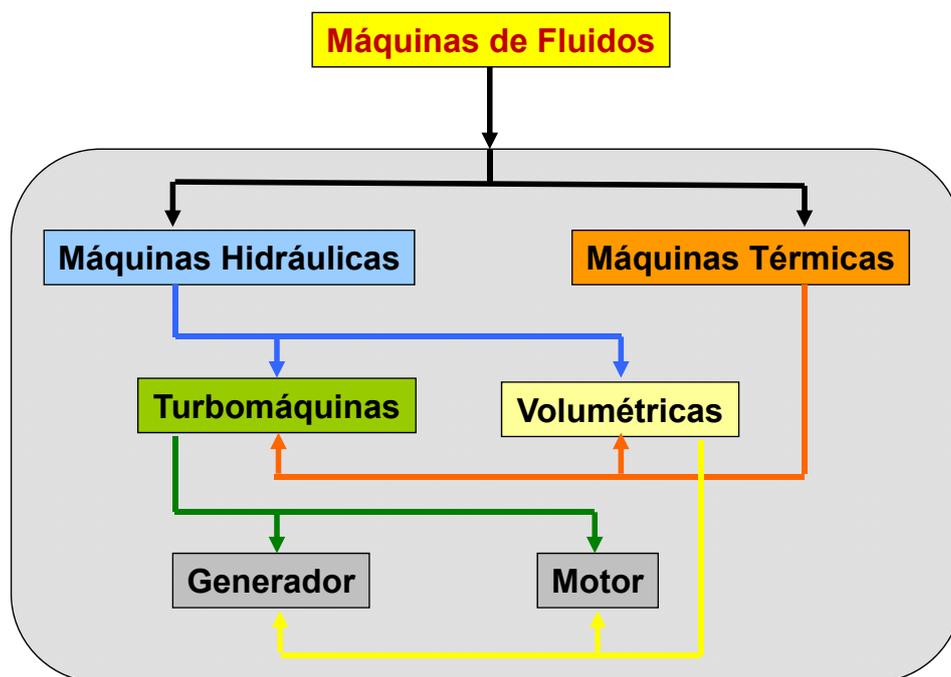
1.3.1.- Generalidades de las Turbinas Hidráulicas

1.3.2.- Turbinas Pelton

1.3.3.- Turbinas Francis

1.3.4.- Turbinas Kaplan

1.3.5.- Estudio de Turbinas Hidráulicas



- Introducción
- Elementos Constructivos
- Clasificación
- Ec. De Euler
- Coeficientes de Velocidad

Introducción

Una **Turbina** es un dispositivo mecánico capaz de convertir en trabajo (en forma de movimiento de rotación) la energía presente en una masa de fluido

Una **Turbina Hidráulica** es una turbomáquina motora, que absorbe energía de una corriente fluida (agua) y restituye energía mecánica

Por lo tanto, realiza la función inversa a las bombas; de hecho, existen turbomáquinas hidráulicas diseñadas para llevar a cabo las dos funciones (en algunas centrales hidroeléctricas de bombeo)

Puesto que se trata de una turbomáquina, su principio de funcionamiento se basa en la **Ecuación de Euler**

La aplicación más extendida de las turbinas hidráulicas es la generación de energía eléctrica

En **Hidráulica Industrial** también se emplean motores hidráulicos u oleohidráulicos

5

Elementos Constructivos (I)

El paso de una corriente fluida a través de una turbina provoca cambios en la magnitud y dirección de la velocidad del fluido, lo cual da lugar a la aparición de un par en el eje (Teorema del momento cinético)

Los elementos necesarios para que esto suceda son análogos a los de una bomba, pero dispuestos en orden inverso:

- Canal de llegada o tubería forzada
- Caja espiral
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo de aspiración

No en todos los casos existen todos los elementos citados, depende del tipo de turbina

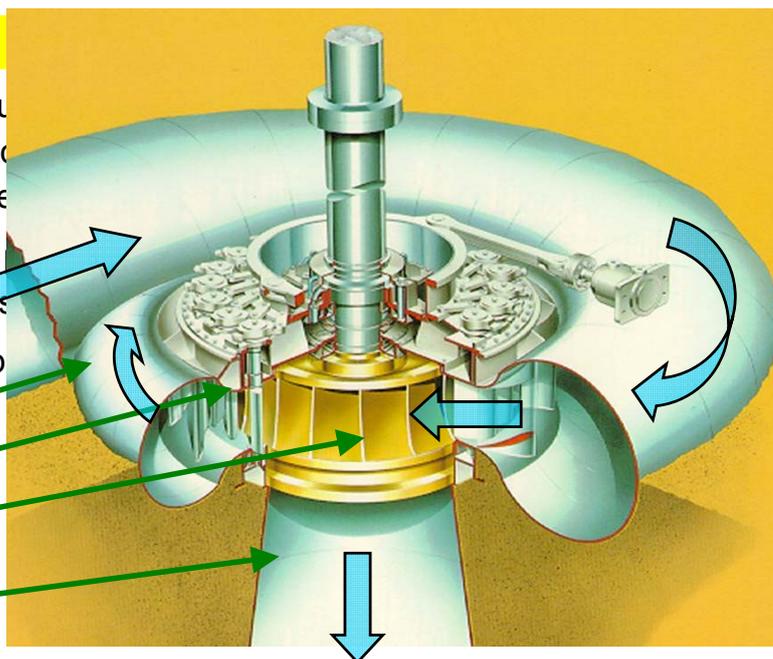
6

Elementos Constructivos (I)

El paso de una corriente flu
en la magnitud y dirección
aparición de un par en el eje

Los elementos necesarios
una bomba, pero dispuestos

- Canal de llegada o tubería
- Caja espiral
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo de aspiración



No en todos los casos existen todos los elementos citados, depende del tipo de turbina

Elementos Constructivos (II)

Analogía entre los elementos de una turbina y los de una bomba:

- **Canal de llegada o tubería forzada** debe tener una válvula de cierre lento para evitar el golpe de ariete
- **La caja espiral** de una turbina es como la voluta de una bomba centrífuga; transforma presión en velocidad (al contrario que la voluta)
- **El distribuidor** de una turbina es similar a la corona directriz de una bomba. Actúa transformando presión en velocidad (* también es un órgano de regulación)
- **El rodete** de una turbina es análogo al rodete de una bomba. Absorbe energía del fluido y la convierte en energía mecánica
- **El tubo de aspiración** de una turbina es como el tubo de aspiración de una bomba. Es el órgano de desagüe y su función es crear una succión a la salida de la turbina (depresión)

Elementos Constructivos (II)

Analogía entre los elementos de una turbina y los de una bomba:

- **Canal de llegada o tubería** lento para evitar el golpe de a
- **La caja espiral** de una tur centrífuga; transforma presión
- **El distribuidor** de una tur bomba. Actúa transformando órgano de regulación)
- **El rodete** de una turbina es análogo al rodete de una bomba. Absorbe energía del fluido y la convierte en energía mecánica
- **El tubo de aspiración** de una turbina es como el tubo de aspiración de una bomba. Es el órgano de desagüe y su función es crear una succión a la salida de la turbina (depresión)

En las turbinas Pelton (de acción) hay algún "cambio" en los elementos:

- No tiene cámara espiral
- El distribuidor es un inyector que consta de una tobera y una válvula de aguja
- Los álabes del rodete son "cucharas"

Clasificación (I)

• Según el grado de reacción (σ):

- Turbina de acción $\sigma = 0$
- Turbina de reacción $\sigma \neq 0$

$$\sigma = \frac{H_{\text{presión}}}{H_t}$$

• Según el número específico de revoluciones (n_s):

- Turbina lenta
- Turbina normal
- Turbina rápida
- Turbina extrarápida

• Según la posición del eje:

- Turbina horizontal
- Turbina vertical

Clasificación (II)

• **Según el modo de admisión del líquido:**

- Turbina de admisión parcial El líquido ataca a una parte del rodete
- Turbina de admisión total El líquido ataca a todo el rodete

• **Según la dirección del líquido a la entrada:**

- Turbina tangencial
- Turbina axial
- Turbina radial
- Turbina diagonal

• **Según el modo de operación:**

- Turbina reversible
- Turbina no reversible

Clasificación (III) Según el grado de reacción (σ) (I):

Esta clasificación depende de la variación de la presión al paso de la corriente fluida a través del rodete

$$\sigma = \frac{\text{Altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{Altura total absorbida por el rodete}} = \frac{H_p}{H_t}$$

Análogamente al caso de las bombas, se define el grado de reacción de las turbinas como la relación entre la altura de presión absorbida por el rodete y la altura total absorbida

- **Turbinas de acción** ($\sigma = 0$)
El movimiento del agua y el de rodete tienen el mismo sentido
- **Turbinas de reacción** ($\sigma \neq 0$)
El movimiento del agua y el de rodete tienen distinto sentido

Clasificación (III)

Según el grado de reacción (σ) (II):

$$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$$

- **Turbinas de acción** ($\sigma = 0$): el agua sale del órgano de regulación y entra al rodete con presión manométrica nula (el rodete no está inundado) y en él no se modifica la presión. Toda la energía se transmite al rodete en forma de energía cinética. Son turbinas de admisión parcial

A lo largo de la tubería forzada, la altura de presión aumenta a costa de la altura geodésica. La altura de velocidad permanecerá cte si la sección es cte

En el sistema de regulación, la altura de presión relativa baja a cero y se convierte (salvo pérdidas) en energía cinética

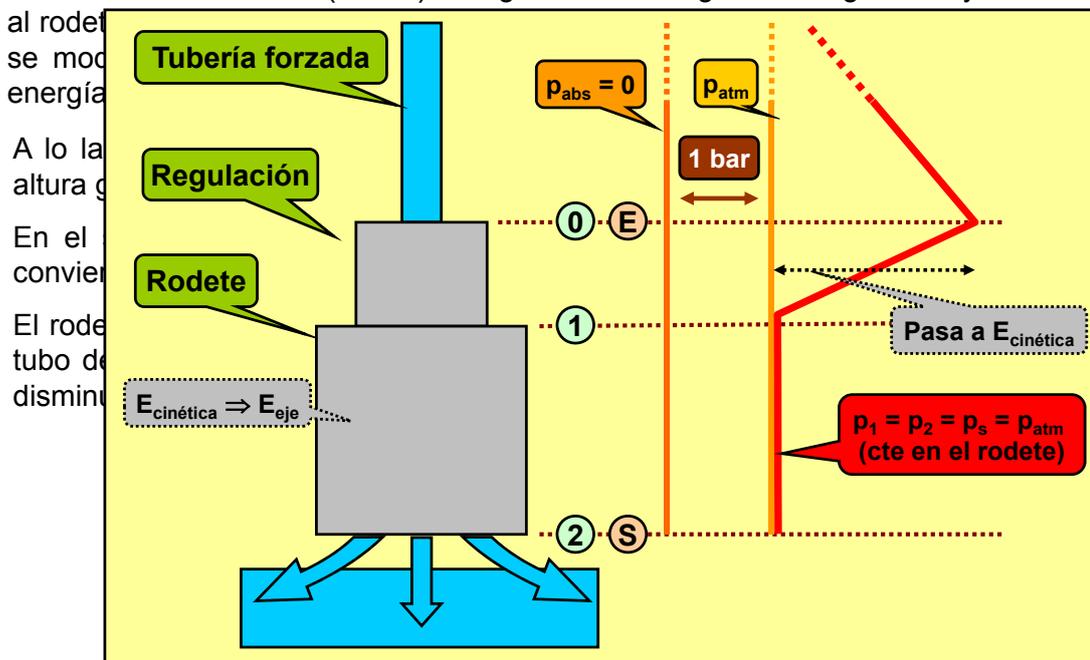
El rodete trabaja a presión constante ($p_1 = p_2$) y puesto que la turbina no tiene tubo de aspiración, se cumple que $p_1 = p_2 = p_s = p_{atm}$. La altura de velocidad disminuye ya que una gran parte se convierte en energía útil en el eje

Clasificación (III)

Según el grado de reacción (σ) (II):

$$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$$

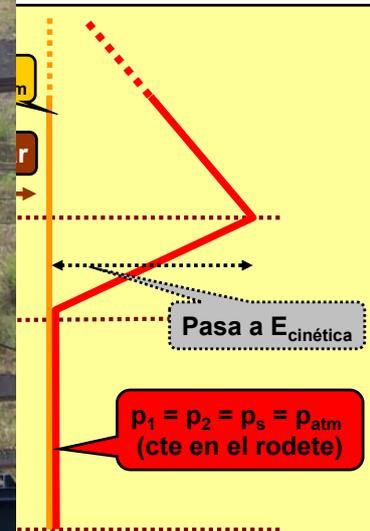
- **Turbinas de acción** ($\sigma = 0$): el agua sale del órgano de regulación y entra





(II): $\sigma = \frac{H_p}{H_t}$

modo de regulación y entrada



Clasificación (III)

Según el grado de reacción (σ) (III):

$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$

- **Turbinas de reacción** ($\sigma \neq 0$): el agua sale del distribuidor y entra al rodete con cierta presión manométrica positiva. A su paso pierde dicha presión llegando a ser nula e incluso negativa. Son turbinas de admisión total

A lo largo de la tubería forzada, la altura de presión aumenta a costa de la altura geodésica (si el fluido llega por canal en lámina libre se mantiene cte). La altura de velocidad permanecerá cte si la sección es cte

En el distribuidor, la altura de presión disminuye (aunque no hasta la presión atmosférica). La altura cinética aumenta, salvo pérdidas, a costa de la presión

En el rodete la presión sigue disminuyendo ($p_1 > p_2$) pudiendo llegar a ser inferior a la atmosférica (en el caso de que exista tubo de aspiración). La altura cinética disminuye también. El rodete transforma energía de presión y cinética en energía útil en el eje

En el tubo de aspiración la energía de presión aumenta desde un valor negativo (relativo) hasta la presión atmosférica a costa de disminuir la energía cinética

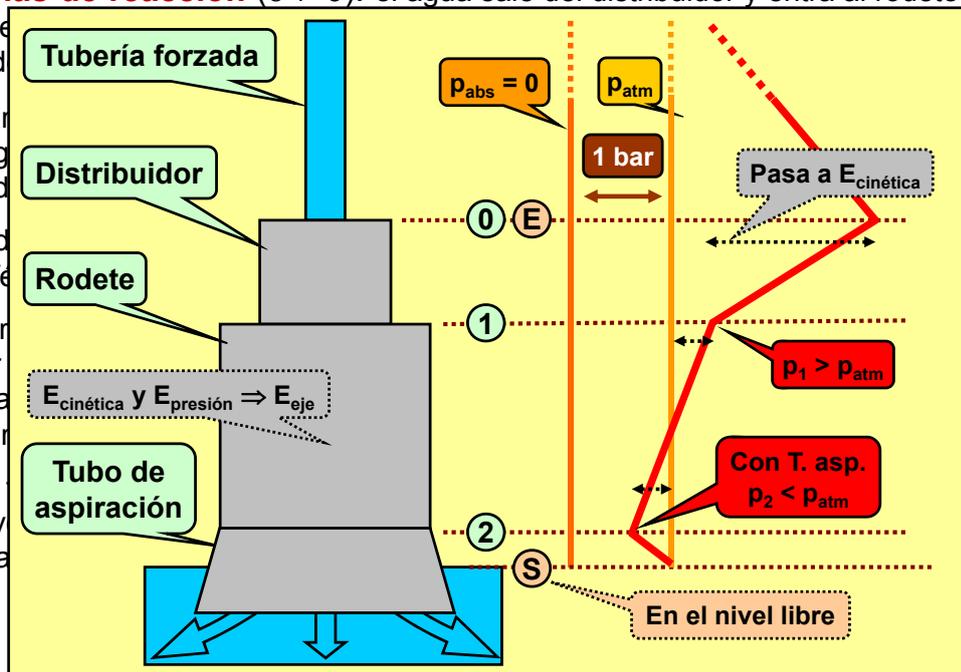
Clasificación (III)

Según el grado de reacción (σ) (III):

$$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$$

- **Turbinas de reacción** ($\sigma \neq 0$): el agua sale del distribuidor y entra al rodete

con cie
llegand
A lo lar
altura g
altura d
En el d
atmosfé
En el r
inferior
cinética
en ener
En el
negativ
cinética



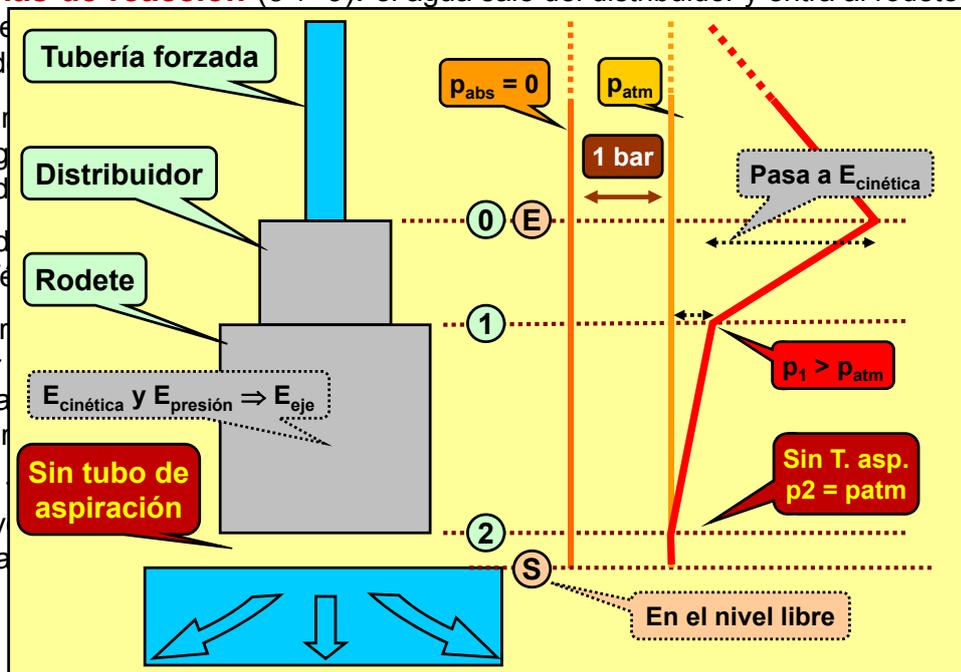
Clasificación (III)

Según el grado de reacción (σ) (III):

$$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$$

- **Turbinas de reacción** ($\sigma \neq 0$): el agua sale del distribuidor y entra al rodete

con cie
llegand
A lo lar
altura g
altura d
En el d
atmosfé
En el r
inferior
cinética
en ener
En el
negativ
cinética



Clasificación (IV)

Según el grado de reacción (σ) (IV):

$$\sigma = \frac{H_p}{H_t}$$

Las turbinas que se construyen actualmente, según σ :

Acción: { sólo se construyen de flujo tangencial tipo Pelton

Reacción: { de flujo diagonal (excepcionalmente radial) { de álabes fijos, tipo Francis
de álabes orientables, tipo Deriaz
de flujo axial { de álabes fijos, tipo hélice
de álabes orientables, tipo Kaplan

	Kaplan	Francis	Pelton
Salto Neto (m)	2 a 50	15 a 400	hasta 800
Diámetro del rodete (m)	1 a 10	0,3 a 8	0,3 a 6
Potencia en el eje (MW)	Hasta 250	Hasta 750	Hasta 400

Clasificación (V)

Según el número específico de revoluciones (n_s) (I):

La velocidad específica es la velocidad de giro del rodete de la turbina modelo de una serie de turbinas semejantes que con un salto de 1 m es capaz de producir una potencia en el eje de 1 C.V

Para el agua

$$n_s = n \cdot \frac{\text{Pot}^{1/2}}{H^{5/4}}$$

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \cdot \sqrt{\eta}$$

Al igual que sucede con las bombas, existe una relación directa entre el valor de n_s y la forma del rodete

- Las turbinas Pelton tienen bajos n_s (< 75)
- Las turbinas Francis y Kaplan tienen n_s mayores ($60 < n_s < 1.000$)

Una turbina de un determinado n_s cualquiera **funcionará con rendimiento óptimo** cuando la potencia desarrollada, la altura neta y el número de revoluciones sean tales que sustituyendo sus valores en la ecuación anterior se obtenga n_s

Clasificación (V) Según el número específico de revoluciones (n_s) (II):

En un salto y con un determinado caudal, las turbinas lentas giran a velocidades menores que las rápidas

Para el agua

$$n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{H^{5/4}}$$

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \cdot \sqrt{\eta}$$

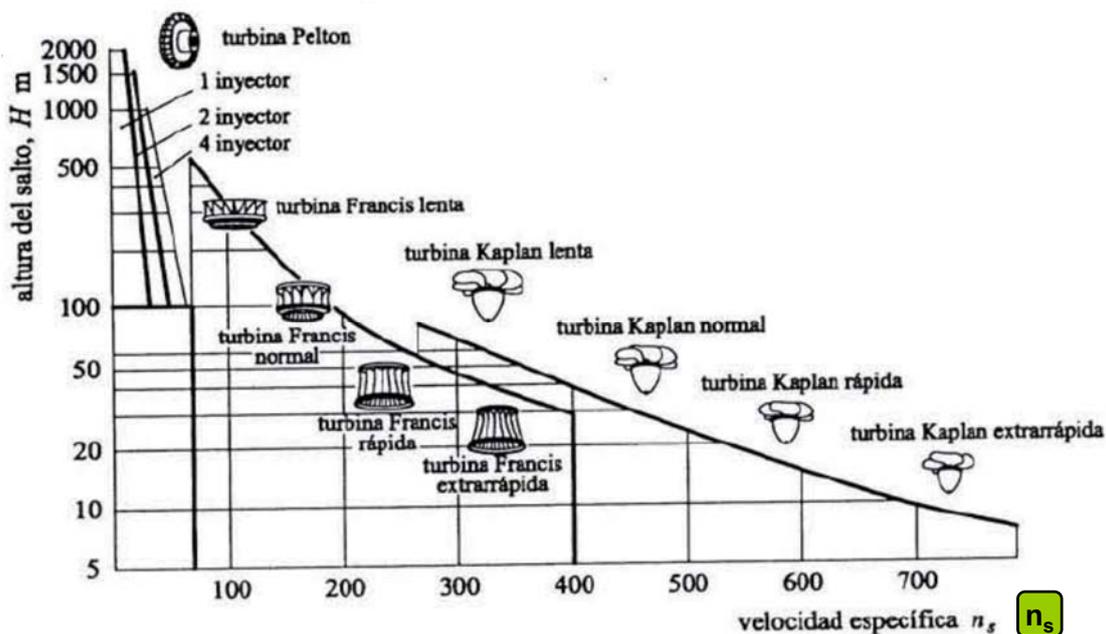
En la práctica:

- Las turbinas lentas se instalan en saltos elevados
⇒ pueden girar más rápido que las rápidas
- Si giran a la velocidad de sincronismo, las turbinas lentas absorben menos caudal que las rápidas

$$n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{H^{5/4}}$$

$$n_s = cte \cdot Q^{1/2} \Rightarrow \begin{matrix} n_s \text{ grande} \Rightarrow Q \text{ grande} \\ n_s \text{ pequeño} \Rightarrow Q \text{ pequeño} \end{matrix}$$

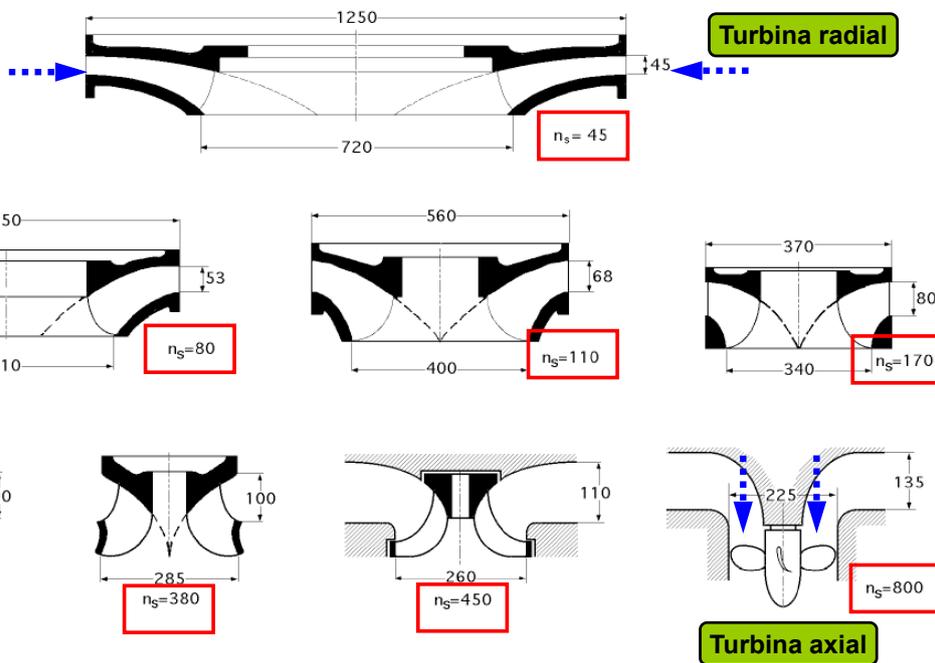
Clasificación (V) Según el número específico de revoluciones (n_s) (II):



Clasificación (V)

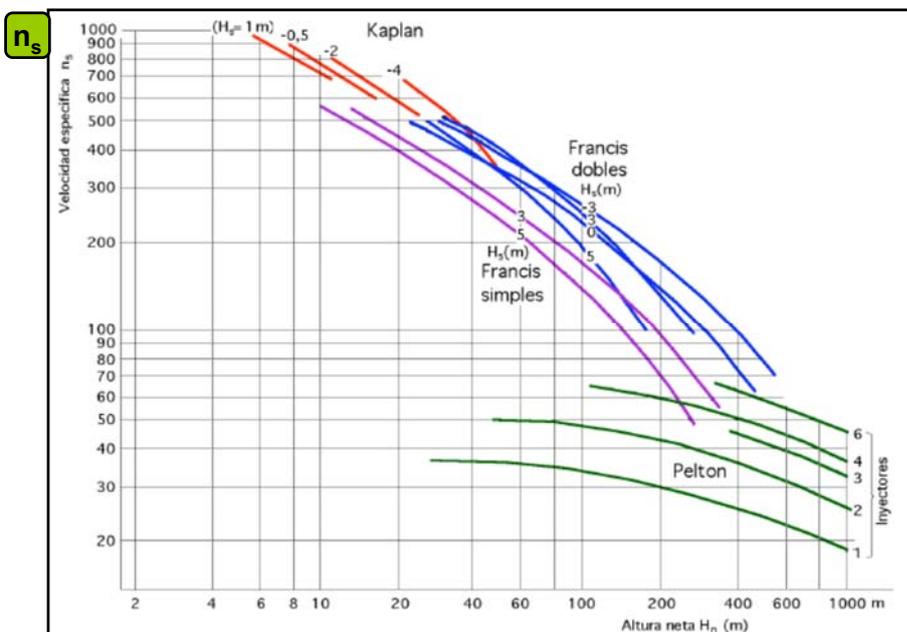
Según el número específico de revoluciones (n_s) (III):

$$n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{H^{5/4}}$$



Clasificación (V)

Según el número específico de revoluciones (n_s) (IV):



$$n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{H^{5/4}}$$

Clasificación (V) Según el número específico de revoluciones (n_s) (V):

De acuerdo al valor de n_s las turbinas se pueden clasificar como:

Velocidad específica en r.p.m.	Tipo de turbina	Altura del salto en m .
Hasta 18	Pelton de un inyector	800
De 18 a 25	Pelton de un inyector	800 a 400
De 26 a 35	Pelton de un inyector	400 a 100
De 26 a 35	Pelton de dos inyectores	800 a 400
De 36 a 50	Pelton de dos inyectores	400 a 100
De 51 a 72	Pelton de cuatro inyectores	400 a 100
De 55 a 70	Francis muy lenta	400 a 200
De 70 a 120	Francis lenta	200 a 100
De 120 a 200	Francis normal	100 a 50
De 200 a 300	Francis rápida	50 a 25
De 300 a 450	Francis extrarrápida	25 a 15
De 400 a 500	Hélice extrarrápida	15
De 270 a 500	Kaplan lenta	50 a 15
De 500 a 800	Kaplan rápida	15 a 5
De 800 a 1100	Kaplan extrarrápida	Menos de 5

25

Clasificación (V) Según el número específico de revoluciones (n_s) (VI):

Aplicación práctica: seleccionar el tipo de turbina y la velocidad de giro

- Los datos de partida son las características del salto: altura (H) y caudal (Q)

- Se estima la potencia (Pot) suponiendo un rendimiento "normal" $Pot = \frac{\gamma \cdot H_n \cdot Q \cdot \eta}{735}$ [C.V.]

- A partir de la gráfica se determina el tipo de turbina y el valor de n_s

- Conocidos H, Q, Pot y n_s se determina el régimen de giro de la turbina $n_i = n_{sj} \cdot \frac{H_n^{5/4}}{Pot^{1/2}}$

- El valor final de n habrá de ser una velocidad de sincronismo

- Con dicho valor de n se recalcula el valor de n_s $n = \frac{60 \cdot f}{p}$

- Con estos datos se puede dimensionar la turbina modelo

- A partir de ésta se calcula la turbina prototipo aplicando las leyes de semejanza

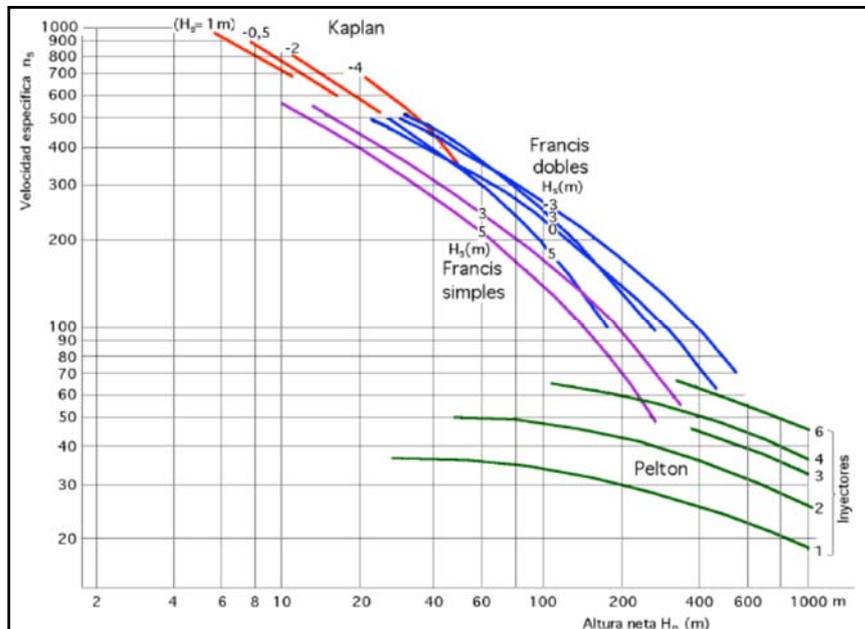
26

Clasificación (V)

Según el número específico de revoluciones (n_s) (VII):

Ejemplo: Seleccionar el tipo de turbina así como la velocidad de giro.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_n = 35 \text{ m} \\ Q = 20 \text{ m}^3/\text{s} \end{array} \right.$$



Ecuación de Euler

Es la ecuación fundamental de las turbomáquinas, y por lo tanto la que rige el comportamiento de las turbinas hidráulicas

	Fluido (C)	Rotor (U)	Relativa $[\bar{C} - \bar{U}]$
Entrada	C_1	U_1	$\bar{W}_1 = [\bar{C}_1 - \bar{U}_1]$
Salida	C_2	U_2	$\bar{W}_2 = [\bar{C}_2 - \bar{U}_2]$

$$\bar{C} = \bar{U} + \bar{W}$$

Forma del álabe

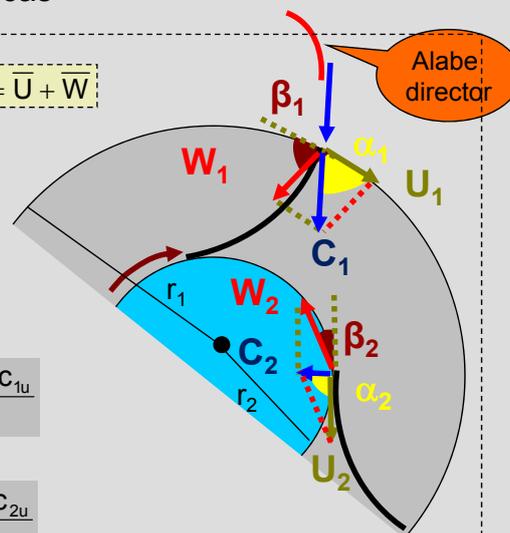
α	β
$[\bar{C} \wedge \bar{U}]$	$[\bar{W} \wedge \bar{U}]$

Generadores Hid. $\Rightarrow H_{G.H.} = \frac{u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}}{g}$

1ª Ec. EULER

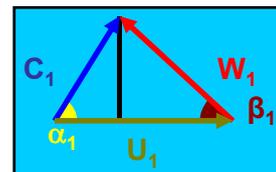


Motores Hid. $\Rightarrow H_{M.H.} = \frac{u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}}{g}$



Coefficientes de Velocidad (I)

Las velocidades no se pueden elegir al azar, deben ser aquellas que produzcan el rendimiento óptimo



La velocidad absoluta máxima disponible en la turbina será la obtenida al convertir en altura dinámica toda la altura geométrica y la altura de presión. Según la ec. de Bernoulli, esta velocidad será:

$$H_{vel} = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$c_{max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

Cualquier otra velocidad se puede expresar como una fracción de la anterior. Se denomina *coeficiente de velocidad* a la relación entre una velocidad cualquiera y la velocidad absoluta máxima disponible

$$k_{u_1} = \frac{u_1}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}}$$

$$k_{c_{1u}} = \frac{c_{1u}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}}$$

Coefficientes de Velocidad (II)

Cuando la turbina funciona en condiciones de rendimiento óptimo, estos coeficientes de velocidad son los *coeficientes óptimos de velocidad*

$\xi: \xi_i$

$$u_1 = \xi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$\phi: \phi_i$

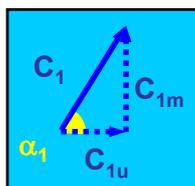
$$c_1 = \phi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$w_1 = \lambda_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$u_2 = \xi_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$c_2 = \phi_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$w_2 = \lambda_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$



$$c_{1u} = \mu_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$c_{1m} = k_{1m} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$c_{2u} = \mu_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

$$c_{2m} = k_{2m} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

Coefficientes de Velocidad (III)

Para determinar el valor de estos coeficiente óptimos, se ensaya la turbina bajo un salto de valor:

$$H_n = \frac{1}{2 \cdot g}$$

De manera que :

$$u_1 = \xi_1$$

$$c_1 = \varphi_1$$

$$w_1 = \lambda_1$$

$$u_2 = \xi_2$$

$$c_2 = \varphi_2$$

$$w_2 = \lambda_2$$

$$c_{1u} = \mu_1$$

$$c_{1m} = k_{1m}$$

$$c_{2u} = \mu_2$$

$$c_{2m} = k_{2m}$$

Sometida a ensayo una turbina bajo un salto definido, las velocidades a las cuales se consigue el rendimiento máximo coinciden con los coeficientes óptimos de velocidad

Una turbina trabaja en un salto de 190 m, un caudal de 42 l/s y una velocidad de giro de 1.450 rpm. Suponer que los $\eta_{mec} = \eta_{vol} = 1$ y $\eta_{man} = 0,85$. Determinar el tipo de turbina más conveniente