

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

- Generalidades
- Componentes Constructivos
- Funcionamiento
- Triángulo de Velocidades
- Pérdidas en el Inyector

Generalidades

Las **Turbinas Pelton** son:

- de presión, por ser ésta cte en el rodete (= a la atmosférica)
- de chorro libre, este está a la presión atmosférica
- de admisión parcial, el líquido ataca sólo una parte del rodete
- tangenciales, el líquido ataca tangencialmente al rodete
- de acción, el agua y el rodete tienen el mismo sentido

Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta 10 m³/s)

Lo más característico son sus álabes en forma de cazoleta

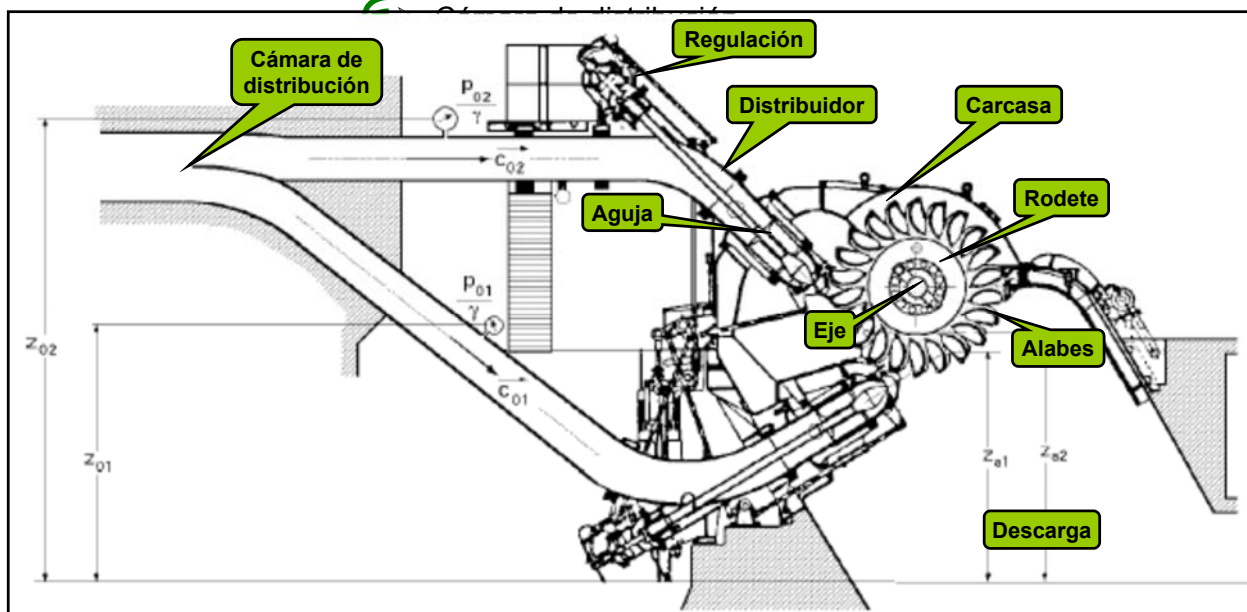
Componentes:

Son esencialmente los siguientes:

- Distribuidor
 - Cámara de distribución
 - Sistema de regulación
 - Inyector
 - Tobera
 - Aguja
 - Deflector
- Rodete
 - Rueda
 - Alabes
- Eje
- Sistema de Frenado
- Carcasa
- Cámara de Descarga
- Blindaje
- Destructor de Energía

Componentes:

Son esencialmente los siguientes:



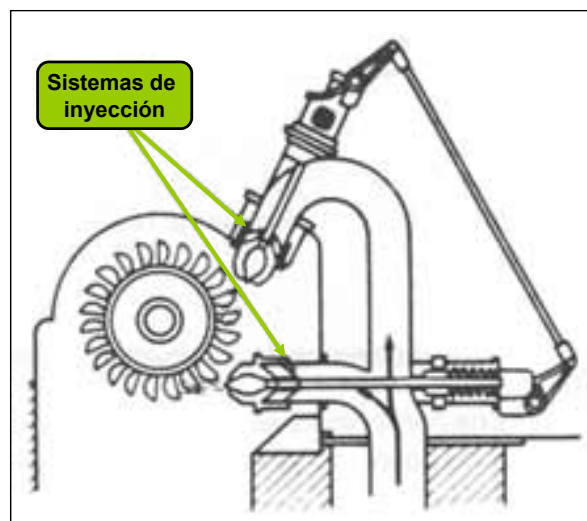
Componentes:

Distribuidor (I)

Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, cada uno formado por varios elementos mecánicos

Tiene como misiones:

- Dirigir un chorro de agua (cilíndrico y de sección uniforme) hacia el rodete
- Regular el caudal que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda
- Para paradas rápidas debe contar con una pantalla deflectora que desvíe el chorro a la salida



Componentes:

Distribuidor (II)

El número de equipos de inyección, colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones del salto de agua

En turbinas Pelton con eje vertical pueden ser hasta seis los equipos que proyectan chorros de agua sobre un mismo rodete, derivando todos y cada uno de ellos de la tubería forzada

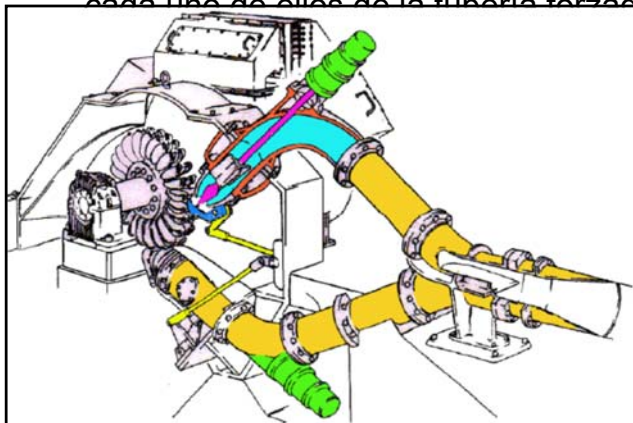
En turbinas Pelton con eje horizontal los inyectores instalados son normalmente uno o dos

Componentes:

Distribuidor (II)

El número de equipos de inyección, colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones del salto de agua

En turbinas Pelton con eje vertical pueden ser hasta seis los equipos que proyectan chorros de agua sobre un mismo rodete, derivando todos y cada uno de ellos de la tubería forzada



Componentes:

Distribuidor (III)

Se puede disponer de más de un rodete en el mismo eje, cada uno de ellos dotado de el/los distribuidor/es apropiado/s



Componentes:

Distribuidor (IV)

Cada equipo de inyección está formado por los siguientes elementos (I):

• **Cámara de distribución**

Consiste en la prolongación de la tubería forzada, acoplada a ésta mediante brida de unión, posteriormente a la situación de la válvula de entrada a turbina, según la trayectoria normal del agua

Tiene como misión fundamental conducir el caudal de agua. Igualmente, sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor

• **Inyector:**

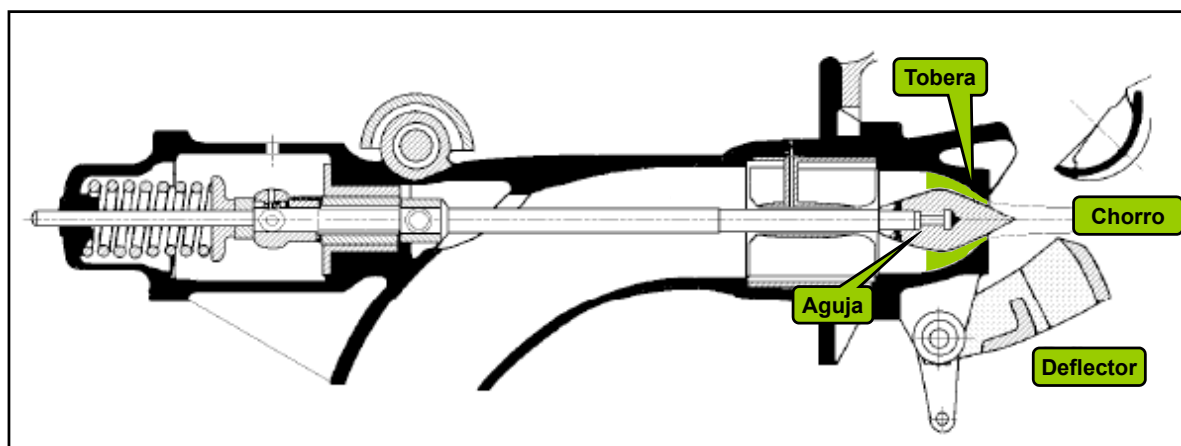
Es el elemento mecánico destinado a dirigir y regular el chorro de agua. Transforma la energía de presión en cinética (la velocidad del agua puede ser superior a 150 m/s). Está compuesto por:

- una tobera
- una aguja
- un deflector
- un regulador de velocidad

Componentes:

Distribuidor (IV)

Cada equipo de inyección está formado por los siguientes elementos (I):



ser superior a 150 m/s). Esta compuesto por.

- una tobera
- una aguja
- un deflector
- un regulador de velocidad

Componentes:

Distribuidor (V)

Cada equipo de inyección está formado por los siguientes elementos (II):

• **Inyector:**

➤ **Aguja**

Es un vástago de acero muy duro situado concéntricamente en el interior del cuerpo de la tobera, guiado mediante cojinetes sobre los cuales tiene movimiento de desplazamiento longitudinal en dos sentidos



➤ **Tobera**

Se trata de una boquilla, normalmente con orificio de sección circular (puede tratarse de otra sección), de un diámetro aproximado entre 5 y 30 cm, instalada en la terminación de la cámara de distribución



3

Componentes:

Distribuidor (V)

Cada equipo de inyección está formado por los siguientes elementos (II):

• **Inyector:**

➤ **Aguja**

➤ **Tobera**

➤ **Deflector**

Es un dispositivo mecánico que, a modo de pala o pantalla, puede ser intercalado con mayor o menor incidencia en la trayectoria del chorro de agua, entre la tobera y el rodete

Sirve para evitar el embalamiento y el golpe de ariete (cierres bruscos)

➤ **Regulador de velocidad**

Conjunto de dispositivos electro-mecánicos, (servomecanismos, palancas, bielas, ...) diseñados para mantener constante la velocidad del grupo, a fin de que la frecuencia de la corriente generada tenga, en todas las circunstancias de carga, 50 Hz

14

Componentes:

Cada equipo de inyector

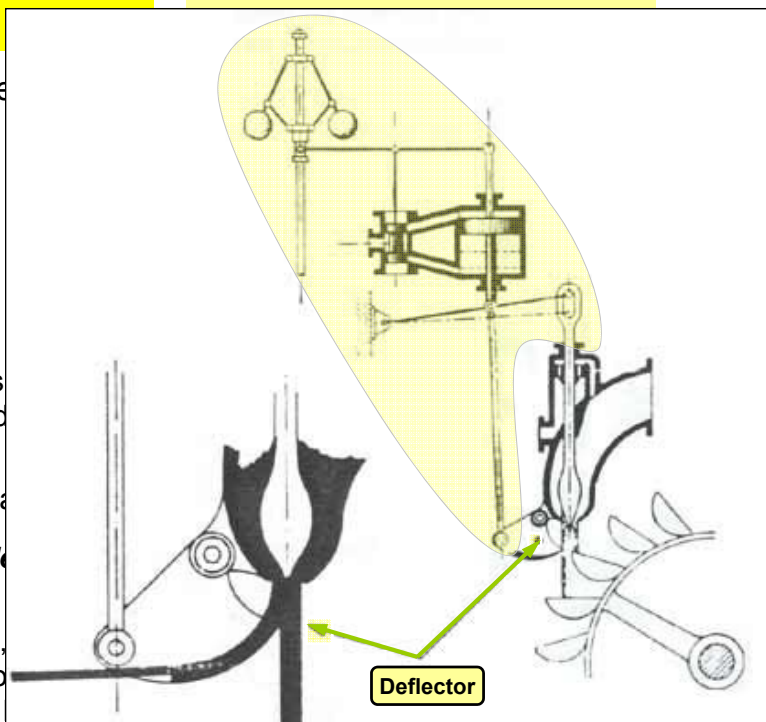
• **Inyector:**

- **Aguja**
- **Tobera**
- **Deflector**

Es un dispositivo intercalado de agua, Sirve para

➤ **Regulador de**

Conjunto de palancas, del grupo en todas

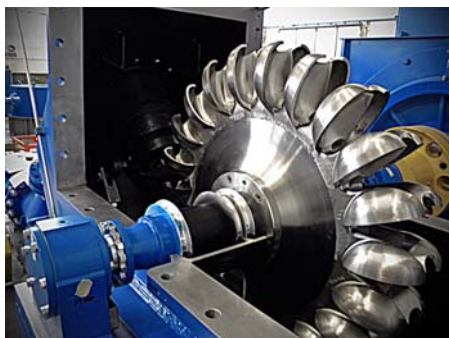


er
ro
s)
s,
ad
a,

Componentes:

Rodete (I)

Es la pieza clave donde se transforma la componente cinética de la energía del líquido en energía mecánica o, dicho de otra manera, en trabajo según la forma de movimiento de rotación



Está compuesto por:

- Rueda motriz
- Alabes, cucharas o cazoletas

Componentes:

Rodete (II)

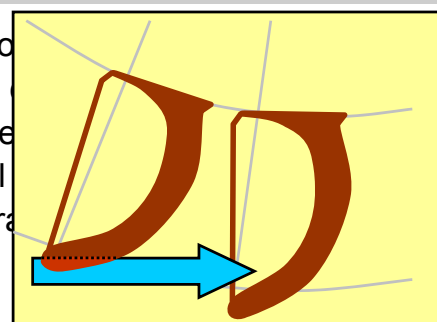
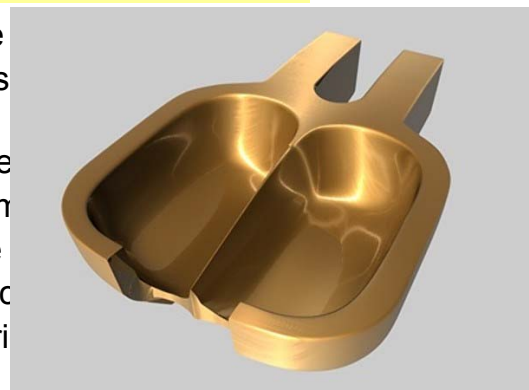
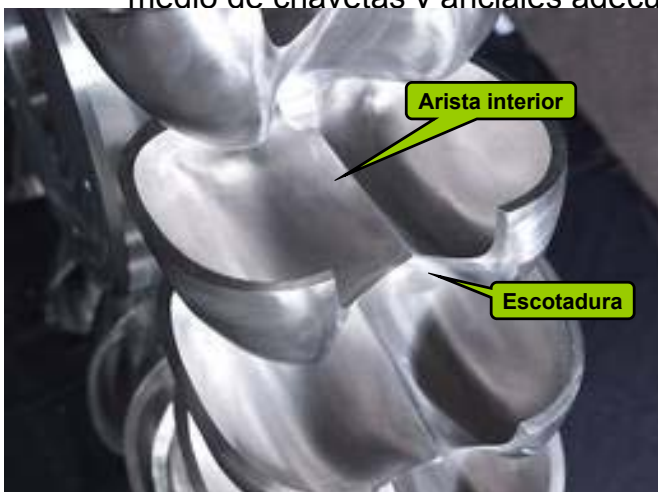
- La **rueda motriz** está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados
- Los **álabes**, pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior afilada y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje (divide al álabe en dos partes simétricas de gran concavidad). Esto permite compensar los empujes axiales

Cada álabe lleva en su extremo periférico una **escotadura** centrada en forma de W. Con ello se consigue que las cazoletas no reciban el chorro de agua hasta que su arista se encuentre en la posición perpendicular respecto al eje del chorro, aprovechando al máximo el caudal y el impulso que éste le proporciona al acompañarle durante un corto trayecto

Componentes:

Rodete (II)

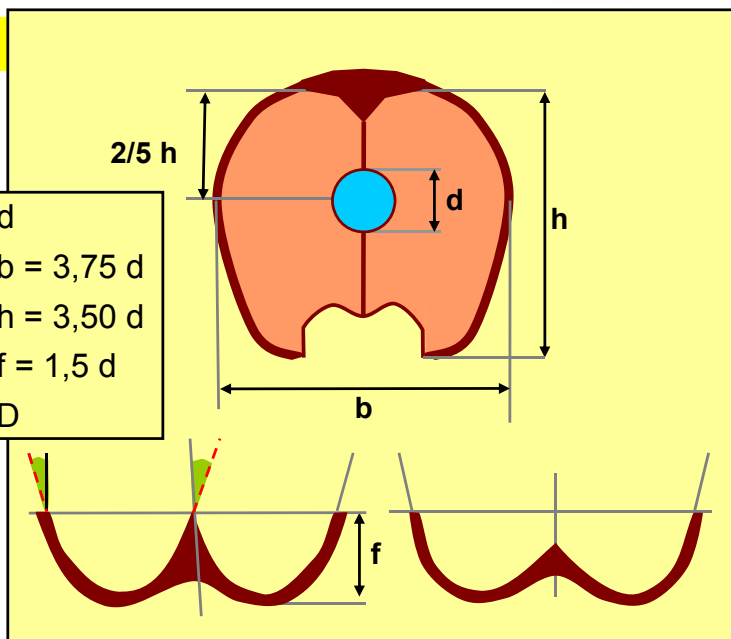
- La **rueda motriz** está unida rígidamente al eje por medio de chavetas y anclajes adecuados



que éste le proporciona al acompañarle duran

Componentes:

Diámetro del chorro:	d
Anchura de la cazoleta:	$b = 3,75 d$
Altura de la cazoleta:	$h = 3,50 d$
Profundidad de la cazoleta:	$f = 1,5 d$
Diámetro del rodete:	D



$$n^{\circ} \text{ cazoletas} = 15 + \frac{D}{2 \cdot d} \quad \text{si: } 5 < \frac{d}{D} < 6,5$$

n_s	4	6	8	10	12	14	18	22	26	32
Nº caz.	40	37	34	30	28	26	22	20	17	15

Componentes:

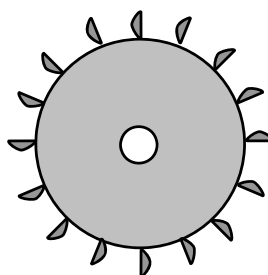
Rodete (IV)

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

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

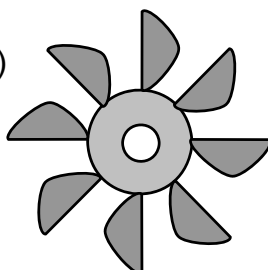
- Rodete lento, $n_s \approx 3,5$
(pequeños caudales)

$\frac{d}{D}$ es pequeño



- Rodete rápido, $n_s \approx 35$
(grandes caudales relativos)

$\frac{d}{D}$ es grande

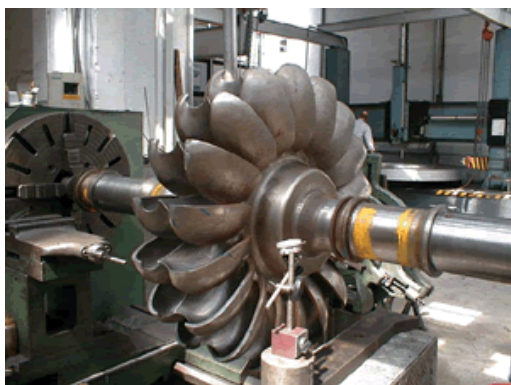


Componentes:

Eje

Rígidamente unido al rodete y situado adecuadamente sobre cojinetes debidamente lubricados, transmite el movimiento de rotación al eje del alternador

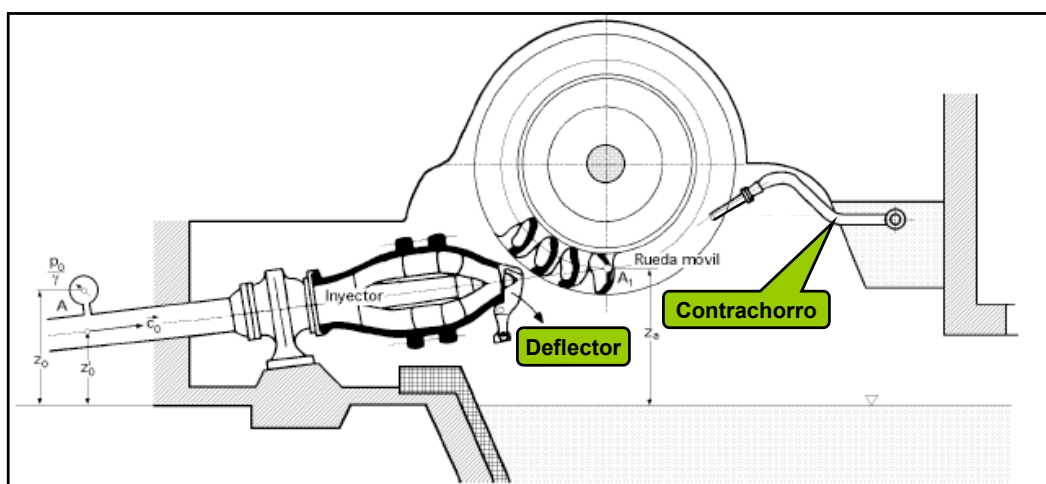
En el mismo eje pueden estar unidas varias turbinas y un generador



Componentes:

Sistema de Frenado

Además de intercalar totalmente el deflector, se puede disponer de un circuito derivado de la cámara de distribución que permite proyectar agua uno o varios contrachorros incidente sobre la zona convexa de los álabes, favoreciendo el rápido frenado del rodete



Componentes:

Carcasa

Es la envoltura metálica que cubre los inyectores, rodete y otros elementos mecánicos de la turbina

Su misión consiste en evitar que el agua salpique al exterior cuando después de incidir sobre los álabes los abandona



23

Componentes:

Cámara de Descarga

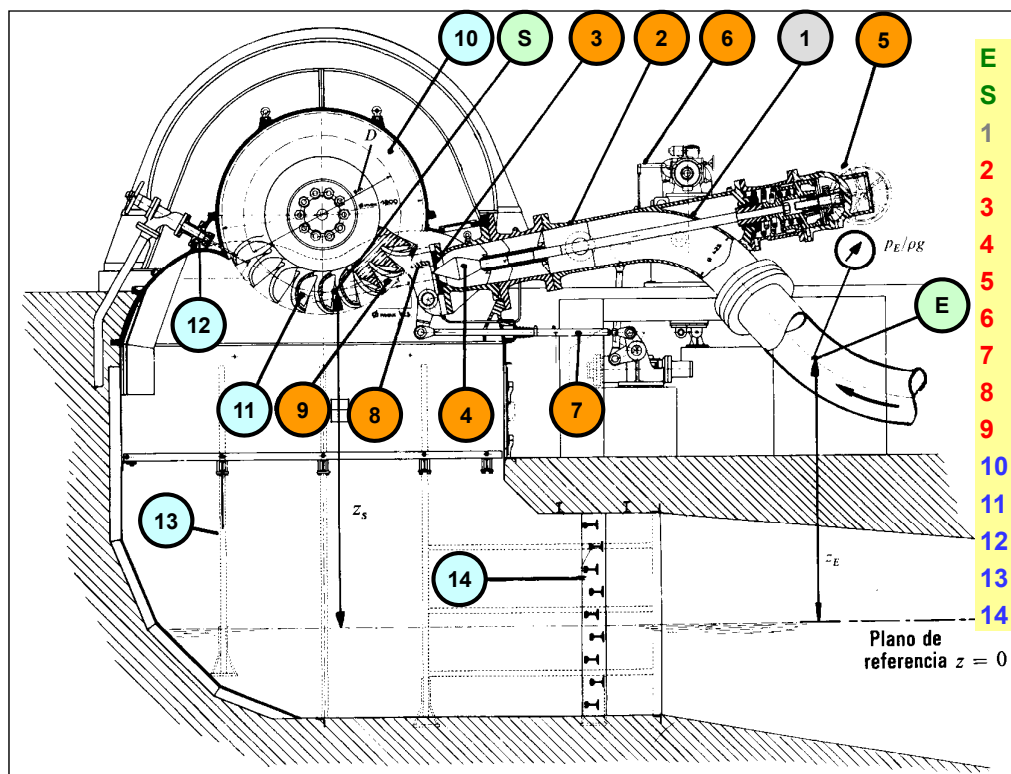
Es la zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüe, después de haber movido al rodete. También se conoce como **tubería de descarga**

Para evitar deterioros debidos a la acción de los chorros de agua, especialmente de los originados por la intervención del deflector, se suele disponer en el fondo de la cámara de descarga de un colchón de agua de 2 a 3 m de espesor. Con el mismo fin, se instalan blindajes, bloques de granito o placas, situadas adecuadamente, que protegen la obra de hormigón

Componentes: Blindaje y Destructor de Energía

Protegen la infraestructura contra el efecto destructor del chorro desviado

24



E	Entrada
S	Salida
1	Codo de entrada
2	Inyector
3	Tobera
4	Válvula de aguja
5	Servomotor
6	Regulador
7	Mando del deflector
8	Deflector
9	Chorro
10	Rodete
11	Alabes o cucharas
12	Contrachorro
13	Blindaje
14	Destructor de energía

25

Funcionamiento de una T. Pelton:

La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente:

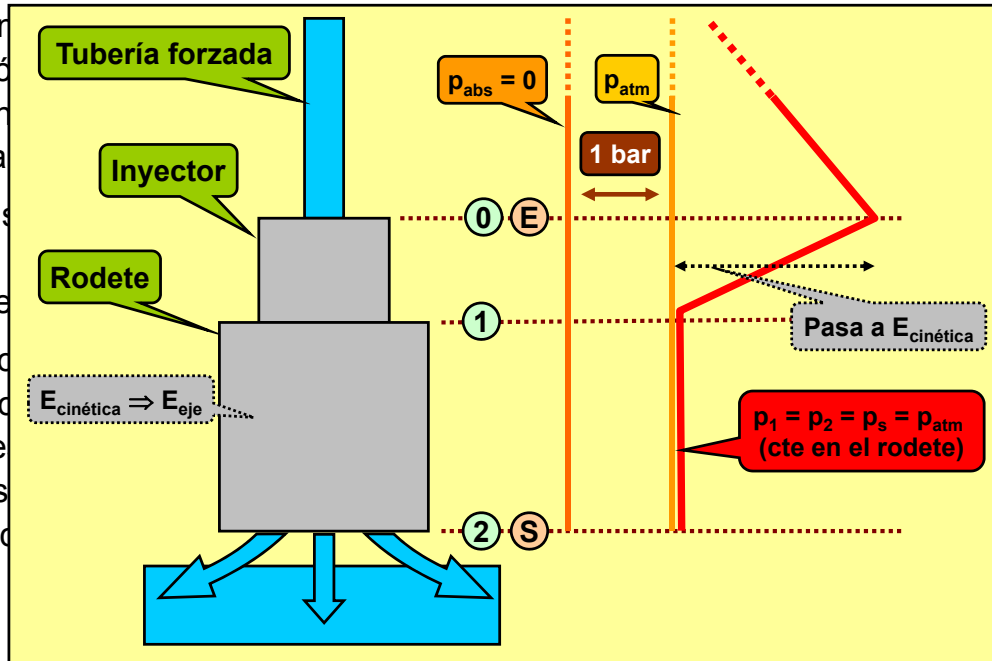
- La energía potencial gravitatoria del agua embalsada (energía de presión hasta los orificios de las toberas) se convierte, salvo pérdidas, en energía cinética al salir el agua a través de dichos orificios en forma de chorros libres (Ecuación de Bernoulli)
- Se dispone de la máxima energía cinética en el momento en que el agua incide tangencialmente sobre el rodete, empujando a los álabes y obteniéndose el trabajo mecánico deseado
- Las formas cóncavas de las cucharas hacen cambiar la dirección del chorro de agua, saliendo éste, ya sin energía apreciable, por los bordes laterales sin ninguna incidencia posterior sobre los álabes sucesivos. De este modo, el chorro de agua transmite su energía cinética al rodete, donde queda transformada en energía mecánica

26

Funcionamiento de una T. Pelton:

La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente:

- La energía se transforma en energía de forma...
- Se disipa agua y obtiene...
- Las fuerzas de choque en el borde sucesivo de energía cinética...

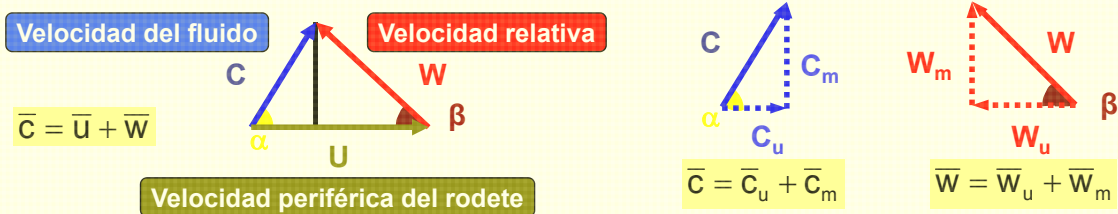


α	β
$[\bar{C}_\Lambda \bar{U}]$	$[\bar{W}_\Lambda - \bar{U}]$

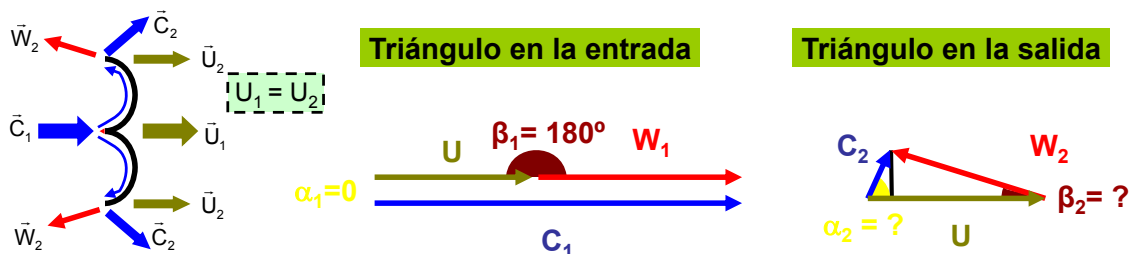
Triángulos de Velocidades (I)

Genérico para Máquinas Hidráulicas:

Triángulo en la entrada y otro Triángulo en la salida

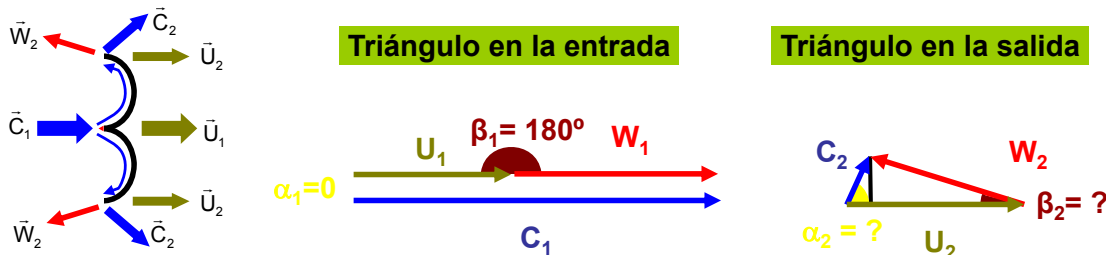


Para Turbinas Pelton:



Triángulos de Velocidades (II)

Para Turbinas Pelton:



- Al ser la trayectoria del líquido tangencial a los álabes, el diámetro a la entrada y a la salida de la rueda es el mismo, y por tanto $\Rightarrow U_1 = U_2$

- Si no hubiese pérdidas en el inyector, el chorro de agua saldría con una velocidad teórica c_1 dada por la ecuación de Torricelli:

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

- Sin embargo, debido a las pérdidas la velocidad real es:

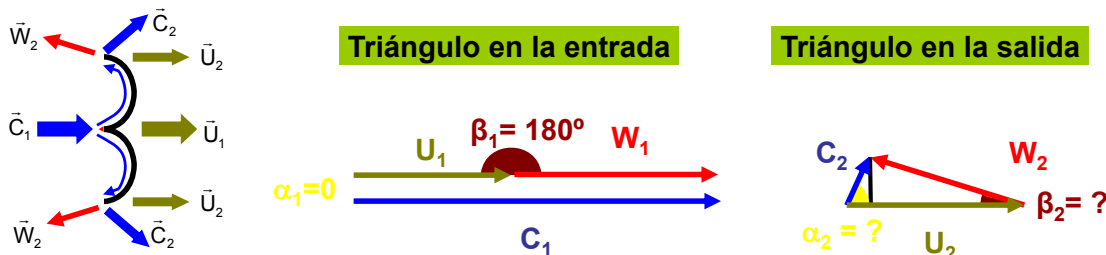
$$c_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \quad \varphi_1 \approx 0,97$$

- Idealmente una T. Pelton alcanza su $\eta_{m\acute{a}x}$ cuando:

$$u_1 \approx \frac{1}{2} \cdot c_1 = 0,45 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

Triángulos de Velocidades (III)

Para Turbinas Pelton:

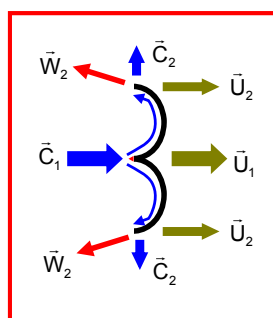


- Interesa que $c_2 = 0$ (que toda la energía cinética se aproveche), ya que la energía cinética no aprovechada en la turbina es:

$$\frac{c_2}{2 \cdot g}$$

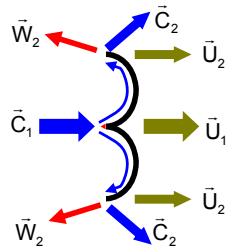
- Pero si $c_2 = 0$ implicaría que el agua caería por gravedad, entorpeciendo el giro, por lo que se procura que C_2 sea perpendicular a U_2

$$\alpha_2 \Rightarrow 90^\circ$$

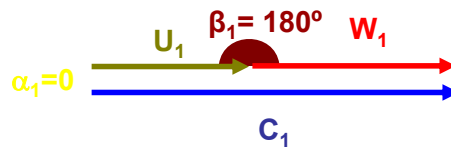


Triángulos de Velocidades (III)

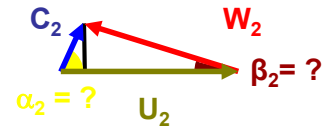
Para Turbinas Pelton:



Triángulo en la entrada



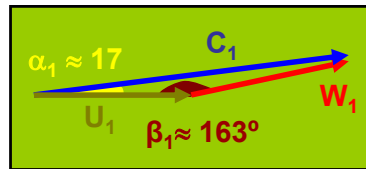
Triángulo en la salida



- Debido al rozamiento con el álabe, se cumple que: Ψ tiene valores en torno a 0,85

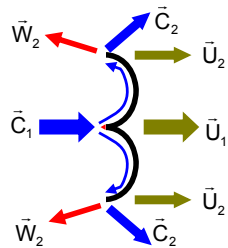
$$W_2 = \Psi \cdot W_1 \quad | \quad 0 < \Psi < 1$$

- Idealmente $\alpha_1 = 0^\circ$ y $\beta_1 = 180^\circ$; en la práctica $\alpha_1 \approx 17^\circ$ y $\beta_1 = 163^\circ$ $\alpha_1 \approx 17^\circ$; $\beta_1 \approx 163^\circ$

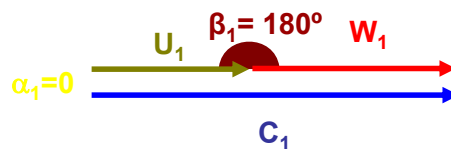


Triángulos de Velocidades (III)

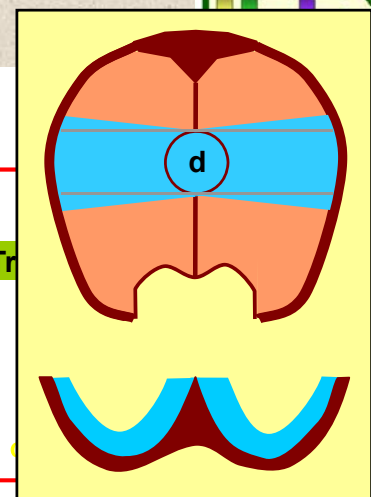
Para Turbinas Pelton:



Triángulo en la entrada



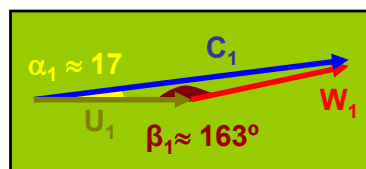
Tr



- Debido al rozamiento con el álabe, se cumple que: Ψ tiene valores en torno a 0,85

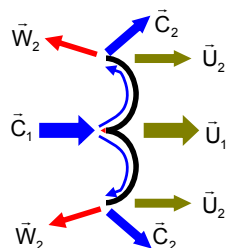
$$W_2 = \Psi \cdot W_1 \quad | \quad 0 < \Psi < 1$$

- Idealmente $\alpha_1 = 0^\circ$ y $\beta_1 = 180^\circ$; en la práctica $\alpha_1 \approx 17^\circ$ y $\beta_1 = 163^\circ$ $\alpha_1 \approx 17^\circ$; $\beta_1 \approx 163^\circ$

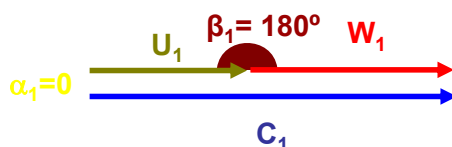


Triángulos de Velocidades (III)

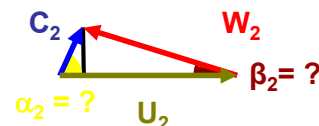
Para Turbinas Pelton:



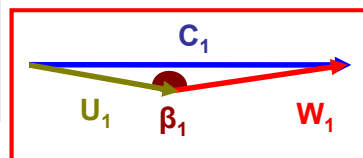
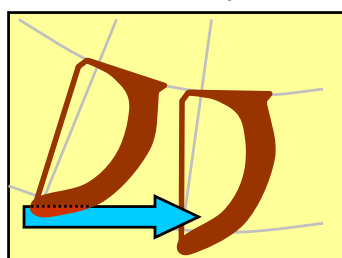
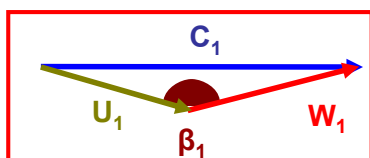
Triángulo en la entrada



Triángulo en la salida



- Hay que tener en cuenta que el chorro no pega a la cazoleta en un único punto, si no que lo hace durante una parte de la trayectoria



Fuerza de una corriente:

$$\bar{F} = m \text{ [kg]} \cdot \bar{a} \text{ [m/s}^2\text{]} = m \text{ [kg]} \cdot \frac{\bar{v} \text{ [m/s]}}{t \text{ [s]}} = \frac{m \text{ [kg]}}{t \text{ [s]}} \cdot \bar{v} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \left(\rho \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) \cdot \bar{v} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \rho \cdot Q \cdot \bar{v}$$

Fuerza sobre los álabes:

C es la velocidad del fluido

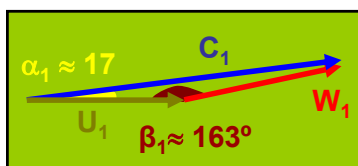
$$\bar{F} = \rho \cdot Q \cdot (\bar{c}_1 - \bar{c}_2) = \rho \cdot Q \cdot \left([\bar{u}_1 + \bar{w}_1] - [\bar{u}_2 + \bar{w}_2] \right)$$

Puesto que en una T. Pelton $u_1 = u_2$ la expresión anterior queda como:

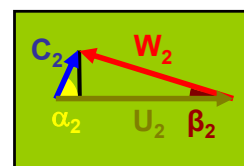
$$\bar{F} = \rho \cdot Q \cdot (\bar{w}_1 - \bar{w}_2)$$

La componente que da lugar a un par en el eje es la tangencial:

$$\bar{F}_x = \rho \cdot Q \cdot [\bar{w}_1 \cdot \cos(\pi - \beta_1) - \bar{w}_2 \cdot \cos(\pi - \beta_2)]$$



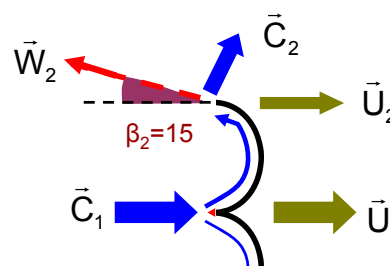
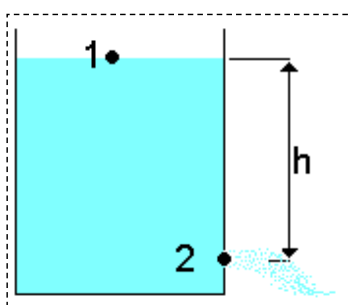
¡¡Cuidado con la definición de los ángulos!!



Una turbina Pelton trabaja en un salto de 240 m. Los diámetros del chorro y rodete son 150 mm y 1.800 mm. Si: $c_1 = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$; $\alpha_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 15^\circ$; $w_2 = 0,7 \cdot w_1$; y $u_1 = 0,45 \cdot c_1$

Calcular:

- La fuerza tangencial ejercida por el chorro en las cucharas
- La potencia transmitida por el agua al rodete
- El rendimiento hidráulico de la turbina
- El rendimiento total si el mecánico es del 0,97



Torricelli \Rightarrow Velocidad salida = $\sqrt{2 \cdot g \cdot H}$

Pérdidas en el inyector

← Es una turbina de acción

Son debidas a que el inyector no se consigue que la velocidad de salida del líquido, c_1 , alcance la máxima teórica, c_{1T}

$$H_{L-iny.} = \frac{c_{1T}^2 - c_1^2}{2 \cdot g}$$

$$H_{L-iny.} = \frac{c_{1T}^2 - c_1^2}{2 \cdot g} = \left| \begin{array}{l} \varphi: Fi \\ c_1 = \varphi \cdot c_{1T} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \end{array} \right| = \frac{(c_{1T}/\varphi)^2 - c_1^2}{2 \cdot g} = \frac{c_1^2 \cdot (1 - \varphi_1^2)}{2 \cdot g \cdot \varphi_1^2} =$$

$$= \left| \begin{array}{l} c_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \Rightarrow H = \frac{c_1^2}{2 \cdot g \cdot \varphi_1^2} \\ \Rightarrow H \cdot (1 - \varphi_1^2) = H - H \cdot \varphi_1^2 = \end{array} \right|$$

$$= \left| \begin{array}{l} H = \frac{c_1^2}{2 \cdot g \cdot \varphi_1^2} \Rightarrow H \cdot \varphi_1^2 = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} \\ \Rightarrow H - \frac{c_1^2}{2 \cdot g} \end{array} \right|$$

Siendo H la altura neta a disposición de la turbina

$$H = H_{neta} = H_{geometrica} - H_{L-Tub}$$

→ $H_n = \frac{c_{1T}^2}{2 \cdot g}$

Una turbina Pelton de 1 inyector de 90 mm de diámetro se alimenta de un embalse situado 300 m más alto por una tubería de 6 km, diámetro de 680 mm y $\lambda = 0,032$. Si la velocidad periférica de los álabes es $(0,47 \cdot c_1)$, el coeficiente de reducción de velocidad a la entrada del rodete 0,97, las cazoletas desvían el chorro 175° y en ellas la velocidad se reduce un 15%, y $\eta_{\text{mec}} = 0,8$. Calcular:

- Las pérdidas en el inyector y en la tubería
- Los triángulos de velocidades
- El rendimiento manométrico, el caudal, la altura neta de la turbina y la de Euler
- La potencia útil en el eje de la máquina