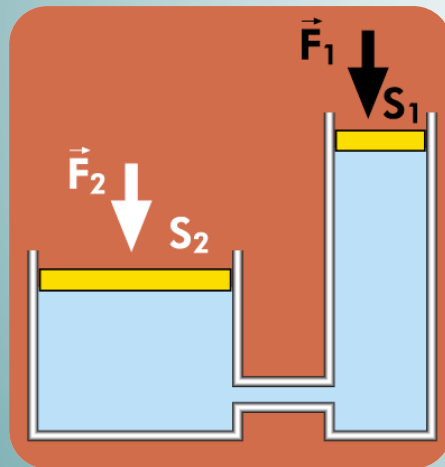


Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas

Tema 09. Máquinas Hidráulicas (2)



Severiano F. Pérez Remesal

Carlos Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

Las **Turbinas Pelton** son:

- de presión, por ser ésta cte en el rodete
- de chorro libre, este está a la presión atmosférica
- de impulsión
- 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

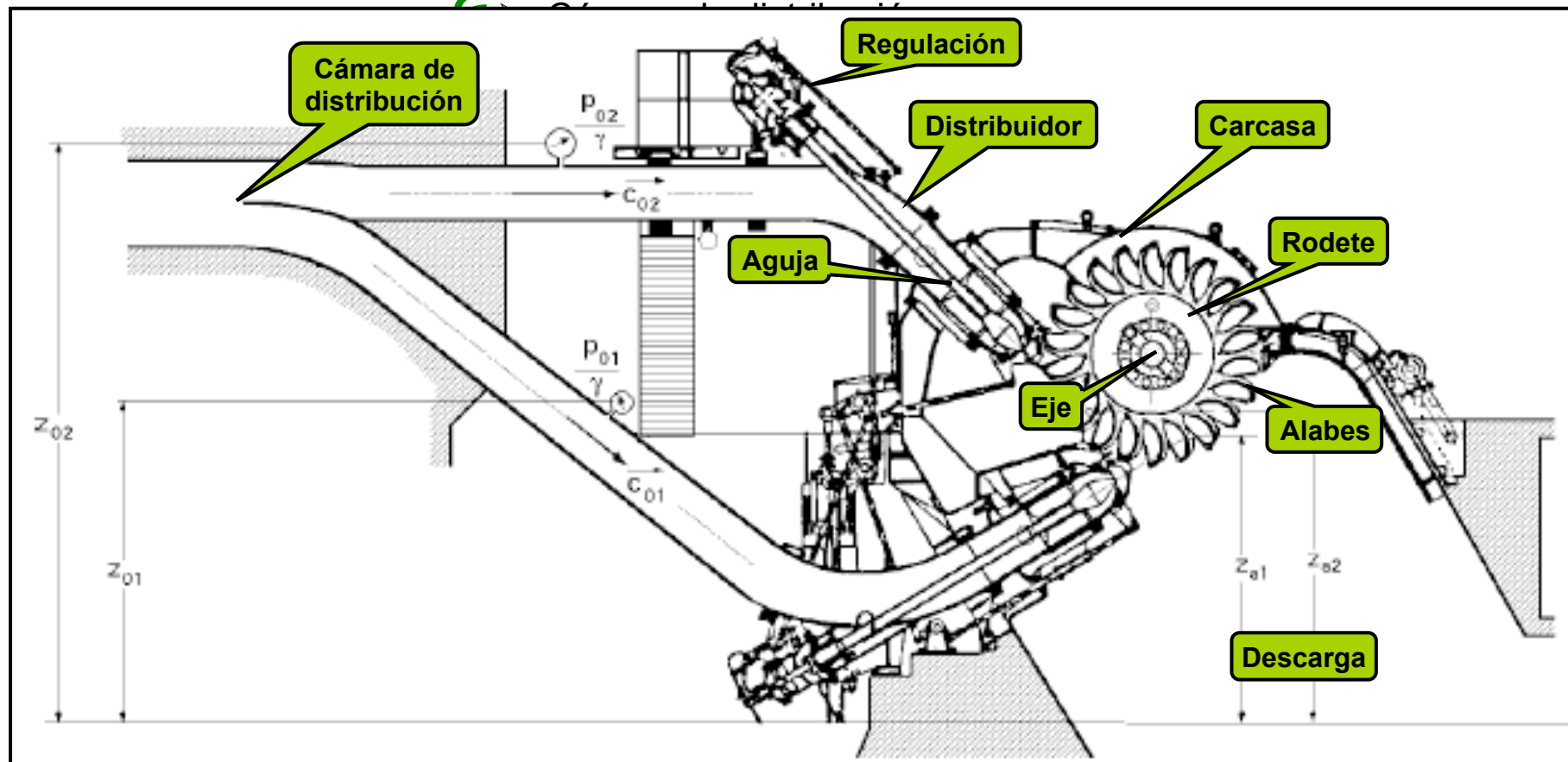
Componentes:

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:



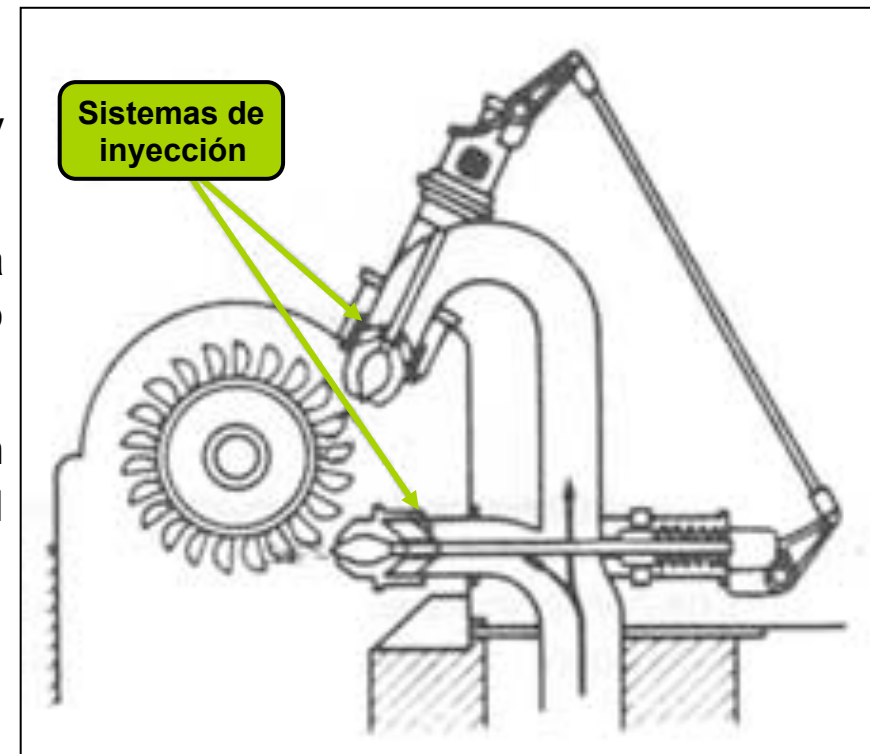
Destrucción de Energía

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

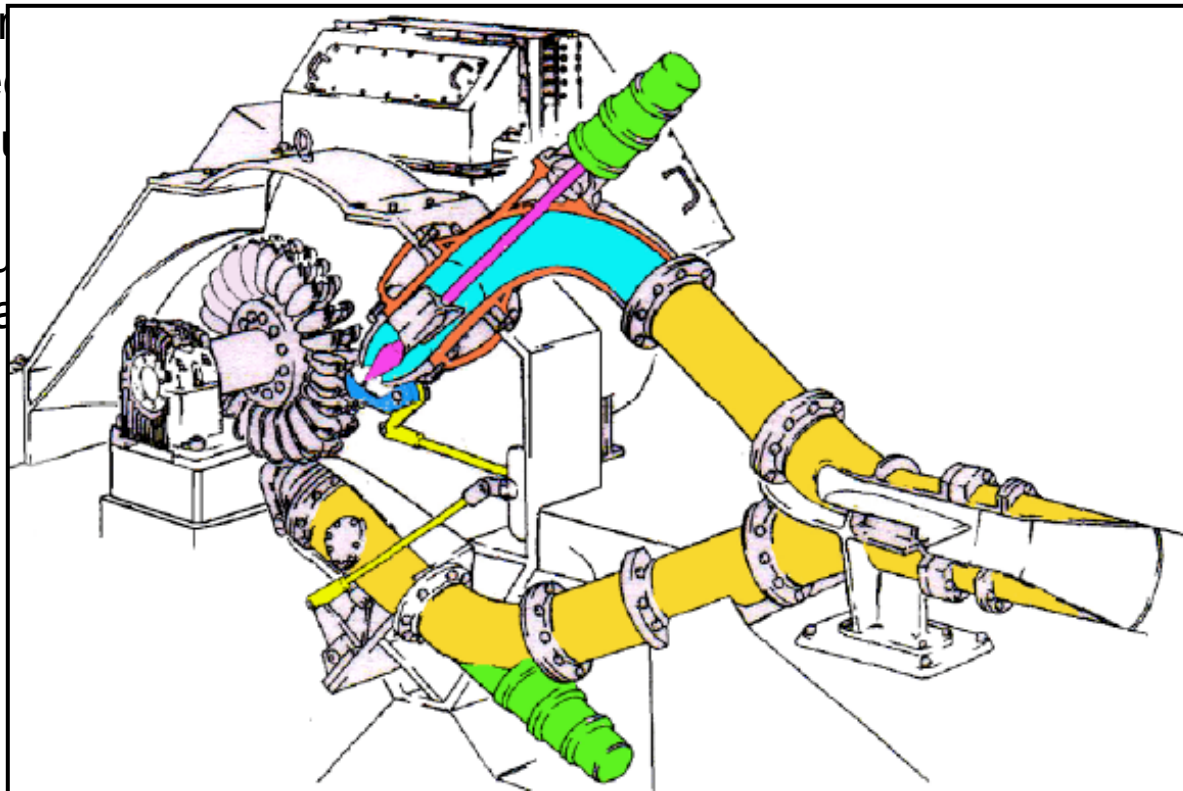
En turbinas Pelton con eje horizontal los inyectoros instalados son normalmente uno o dos

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 tur
proye
cada

En tu
norma

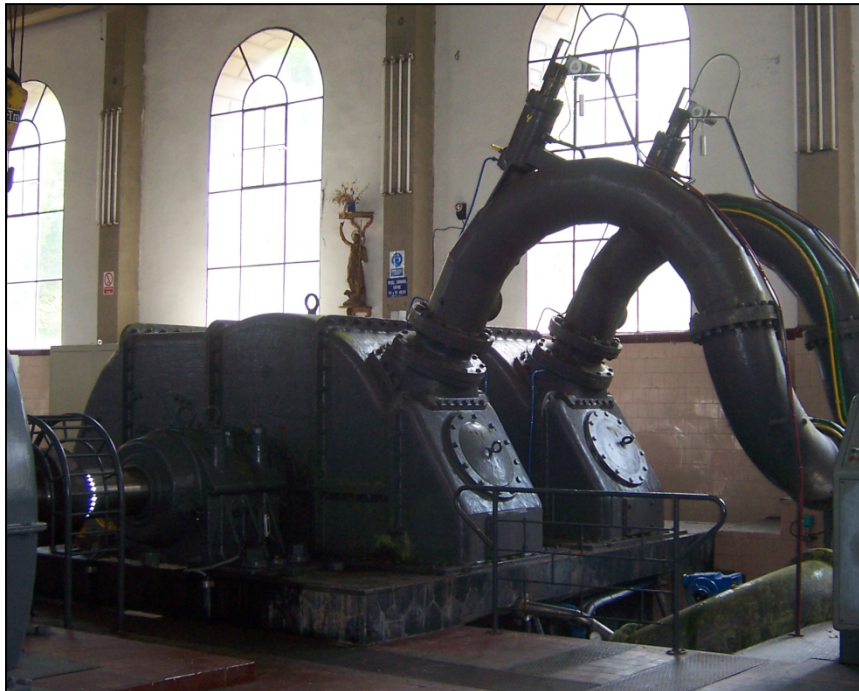


equipos que
ndo todos y

talados son

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

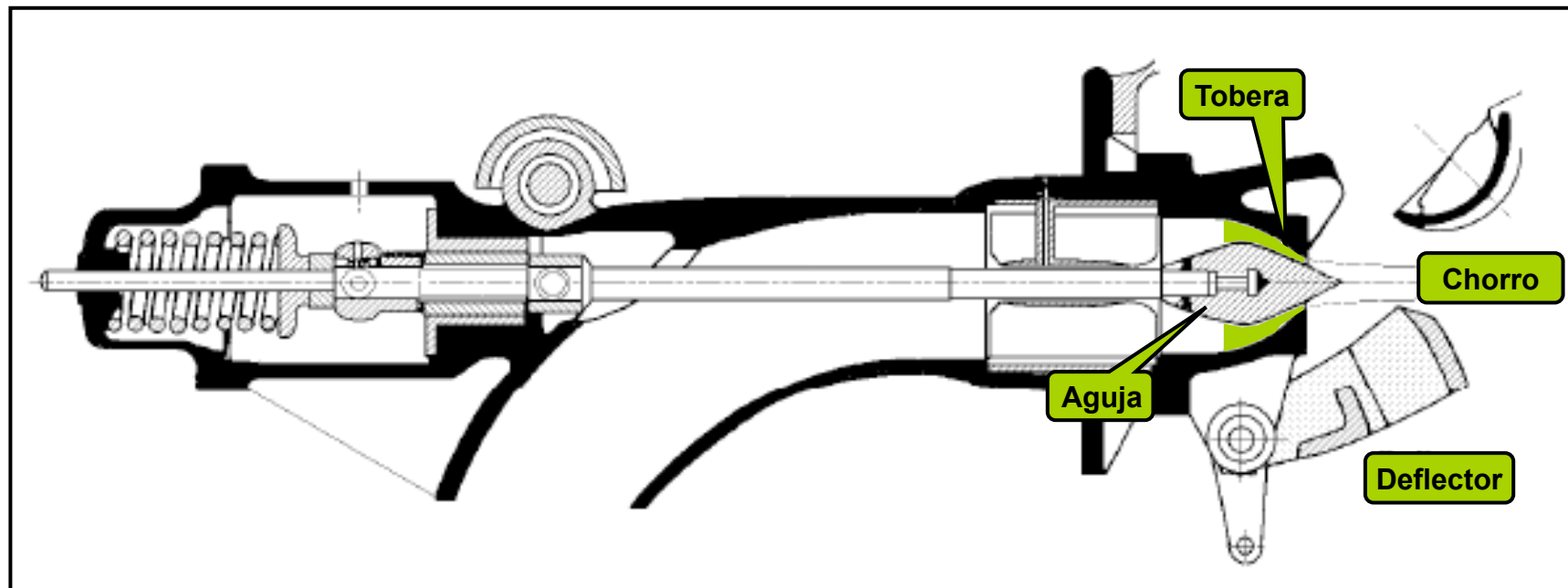
- ***Inyector:***

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):



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



<http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/T-3.1.1.htm>

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

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 porriente generada tenga, en todas las circunstancias de carga, 50 HZ

Deflector

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)

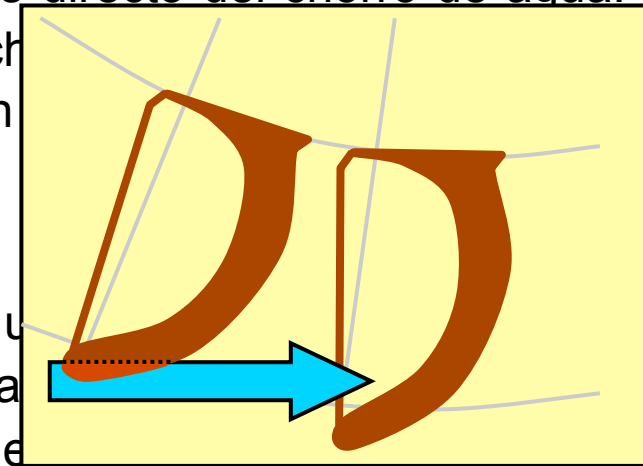
- La **rueda motriz** está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados
- Los **álabes**, pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble 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)

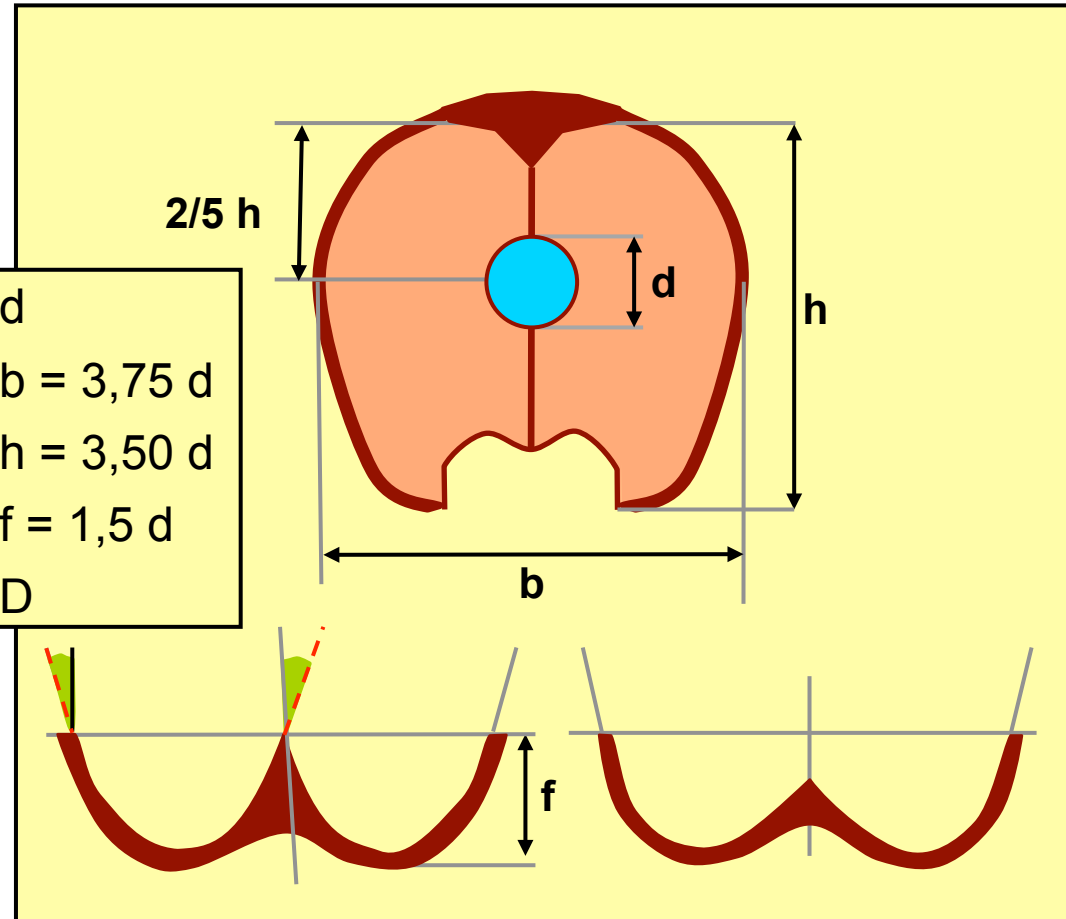
- La **rueda motriz** está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados
- Los **álaves**, pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble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

Cada álabe lleva en su extremo periférico una forma de W. Con ello se consigue que las ca de agua hasta que su arista se encuentre e 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 (III)

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

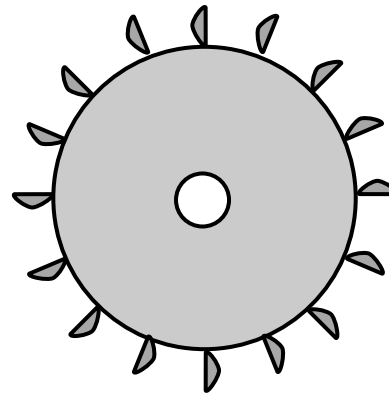
Componentes: Rodete (IV)

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

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

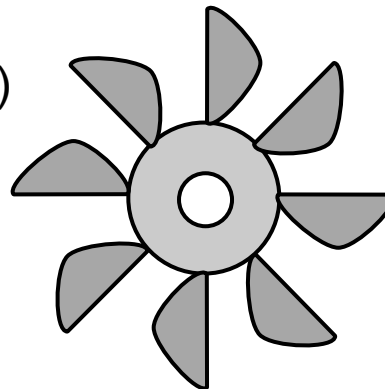
- Rodete lento, $n_s \approx 3,5$
(pequeños caudales)

$\frac{d}{D}$ es pequeño



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

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



Componentes: Eje

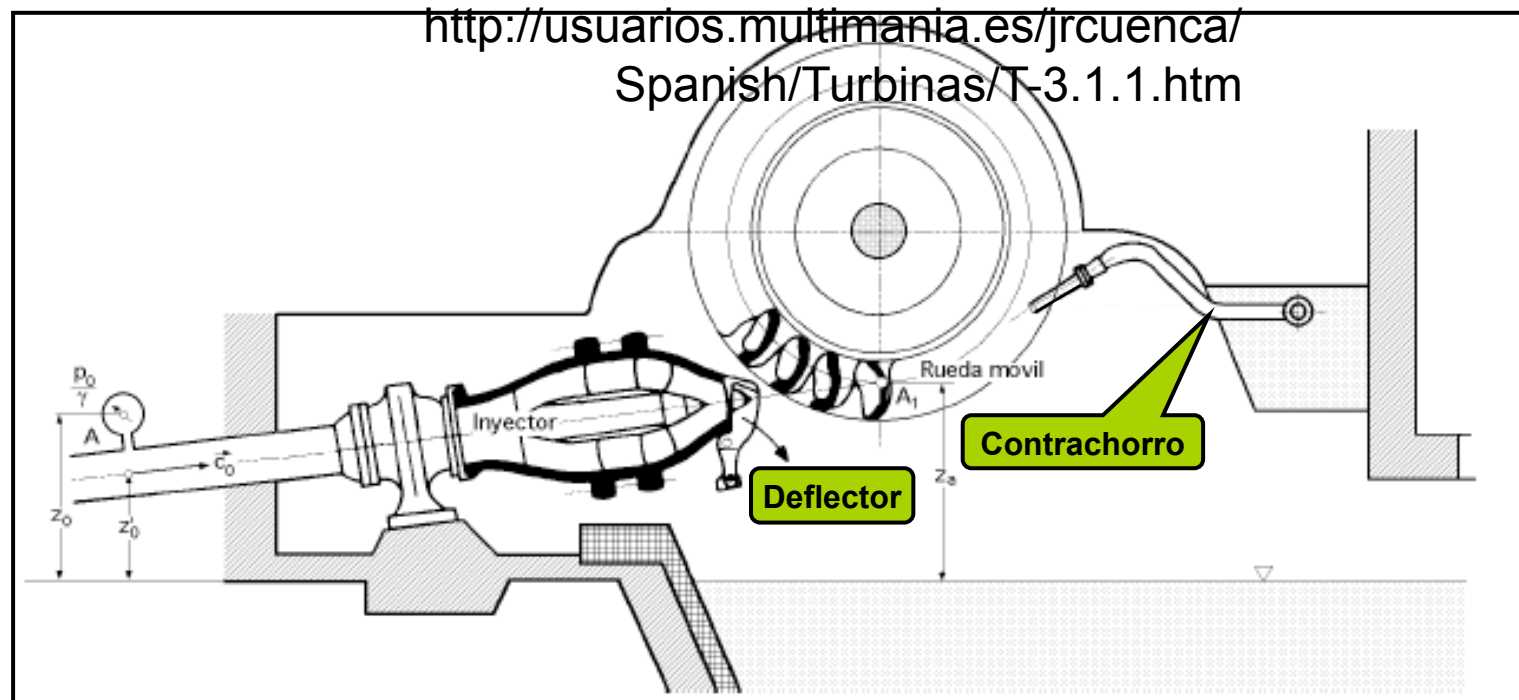
Rígidamente unido al rodete y situado adecuadamente sobre cojinetes debidamente lubricados, transmite el movimiento de rotación al eje del alternador

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

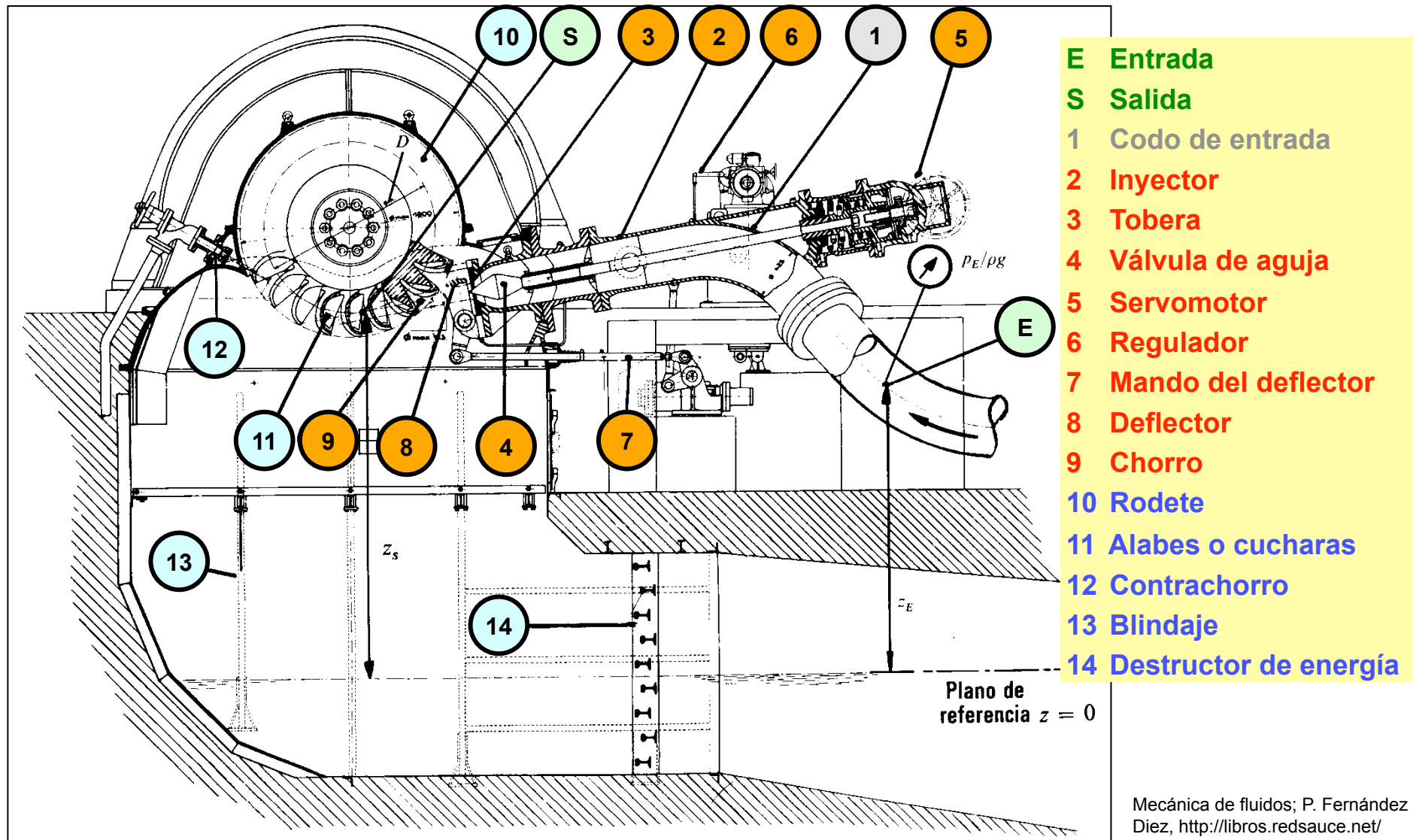
Componentes: Cámara de Descarga

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



Funcionamiento de una Turbina Pelton:

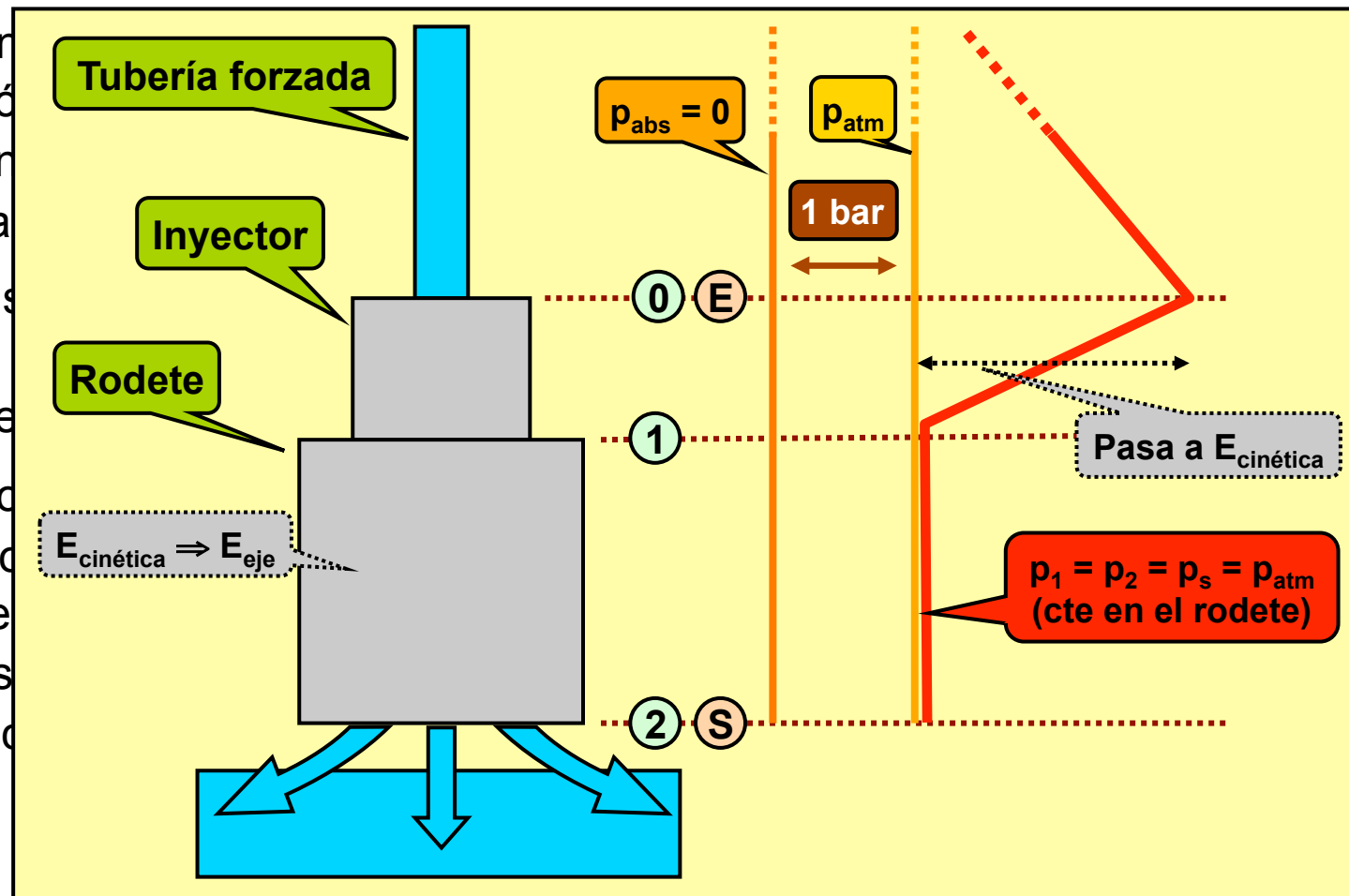
La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente:

- 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

Funcionamiento de una Turbina Pelton:

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

- La energía se transforma en energía cinética
- Se dirige el agua y obtiene energía cinética
- Las fuerzas de choque en el borde del rodete transforman la energía cinética en energía mecánica



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

Triángulos de velocidades (I):

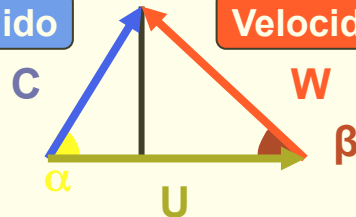
Genérico para Máquinas Hidráulicas:

Triángulo en la entrada y otro Triángulo en la salida

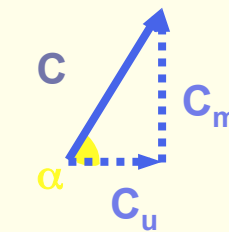
Velocidad del fluido

Velocidad relativa

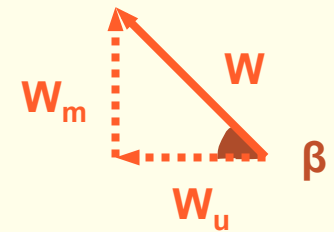
$$\bar{C} = \bar{U} + \bar{W}$$



Velocidad periférica del rodete

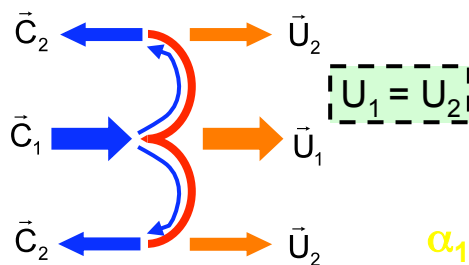


$$\bar{C} = \bar{C}_u + \bar{C}_m$$

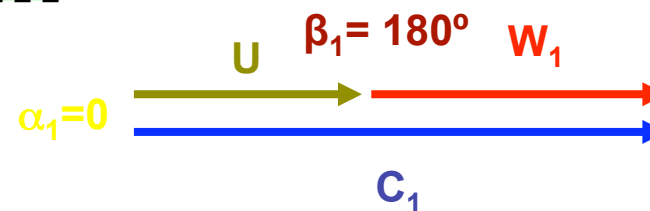


$$\bar{W} = \bar{W}_u + \bar{W}_m$$

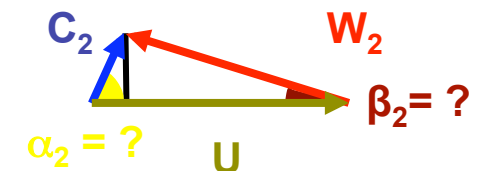
Para Turbinas Pelton:



Triángulo en la entrada

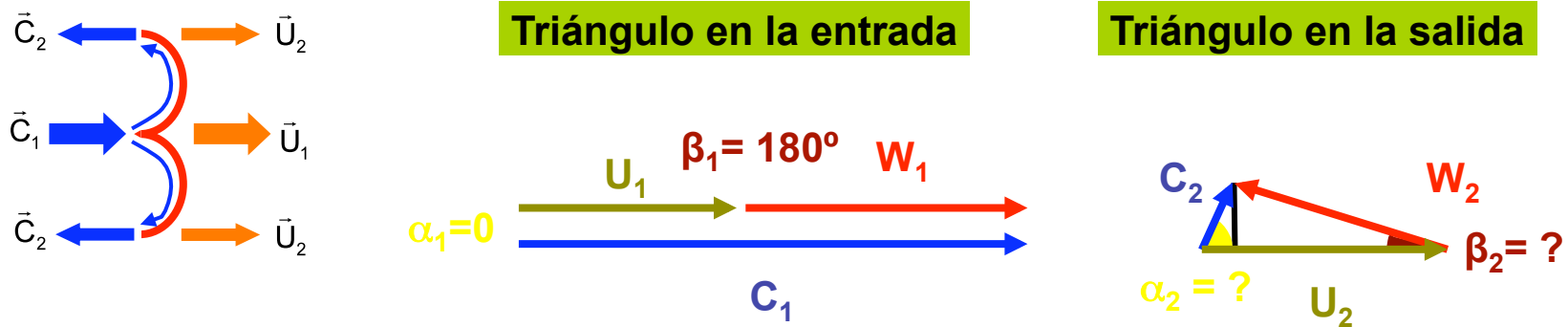


Triángulo en la salida



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:

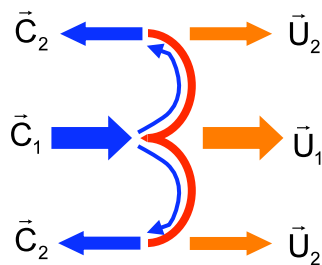
$$c_1 = \varphi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \quad \varphi_1 \approx 0,97$$

- Idealmente una T. Pelton alcanza su $\eta_{\text{máx}}$ cuando:

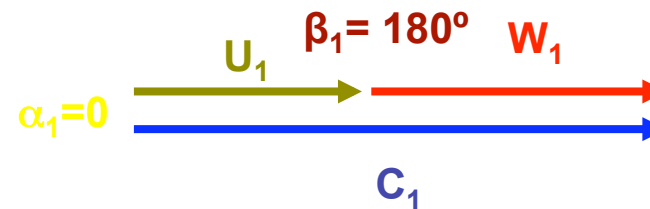
$$u_1 \approx \frac{1}{2} \cdot c_1 = 0,45 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

Triángulos de velocidades (III):

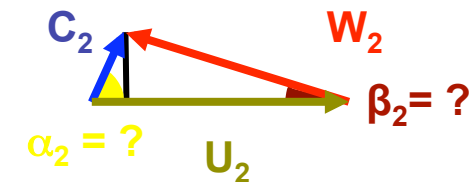
Para Turbinas Pelton:



Triángulo en la entrada



Triángulo en la salida



- Interesa que $c_2 = 0$ (que toda la energía cinética se aproveche), ya que la energía cinética no aprovechada en la turbina es:
- Debido al rozamiento con el álabe, se cumple que:
- Idealmente $\alpha_1 = 0^\circ$ y $\beta_1 = 180^\circ$; en la práctica $\alpha_1 \approx 17^\circ$

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

$$w_2 = \psi \cdot w_1 \Big|_{0 < \psi < 1}$$

$$\alpha_1 \approx 17^\circ; \beta_1 \approx 180^\circ$$

Fuerza de una corriente:

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

Fuerza sobre los álabes:

C es la velocidad del fluido

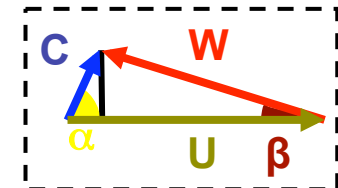
$$F = \rho \cdot Q \cdot (\bar{c}_1 - \bar{c}_2) = \rho \cdot Q \cdot (\bar{u}_1 + \bar{w}_1 - \bar{u}_2 - \bar{w}_2)$$

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

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

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

$$F_x = \rho \cdot Q \cdot (w_1 \cdot \cos(\pi - \beta_1) - w_2 \cdot \cos(\pi - \beta_2))$$



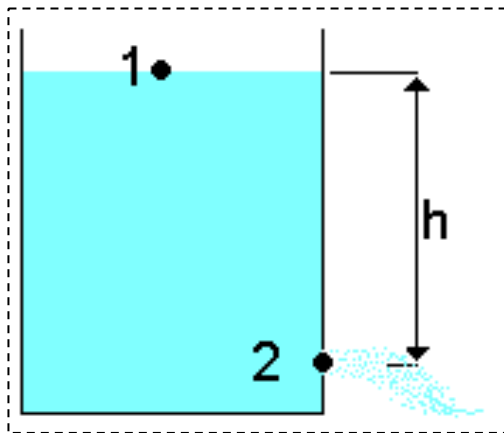
¡¡Cuidado con la definición de los ángulos!!

$$F_x = \rho \cdot Q \cdot (w_1 - w_2 \cdot \cos(\pi - \beta_2))$$

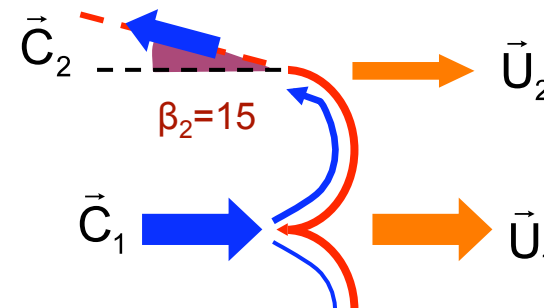
Una turbina Pelton trabaja en un salto de 240 m. Los diámetros del chorro y rodete son 150 mm y 1.800 mm. Si: $c_1 = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$; $\alpha_1 = 0^\circ$; $\beta_2 = 15^\circ$; $w_2 = 0,7 \cdot w_1$; y $u_1 = 0,45 \cdot c_1$

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 $= \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$



Las **Turbinas Francis** se conocen como turbinas de sobrepresión por ser ésta variable en el rodete, o también como turbinas de admisión centrípeta ó total por encontrarse el rodete sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia

Entran en la clasificación de turbinas ***radiales-axiales*** y de ***reacción***

El campo de aplicación es muy extenso, dado el avance tecnológico conseguido en la construcción de este tipo de turbinas. Se pueden emplear en saltos de distintas alturas dentro de una amplia gama de caudales (entre 2 y 200 m³/s aproximadamente)

Las turbinas Dériaz son, esencialmente, turbinas Francis de álabes orientables

Componentes:

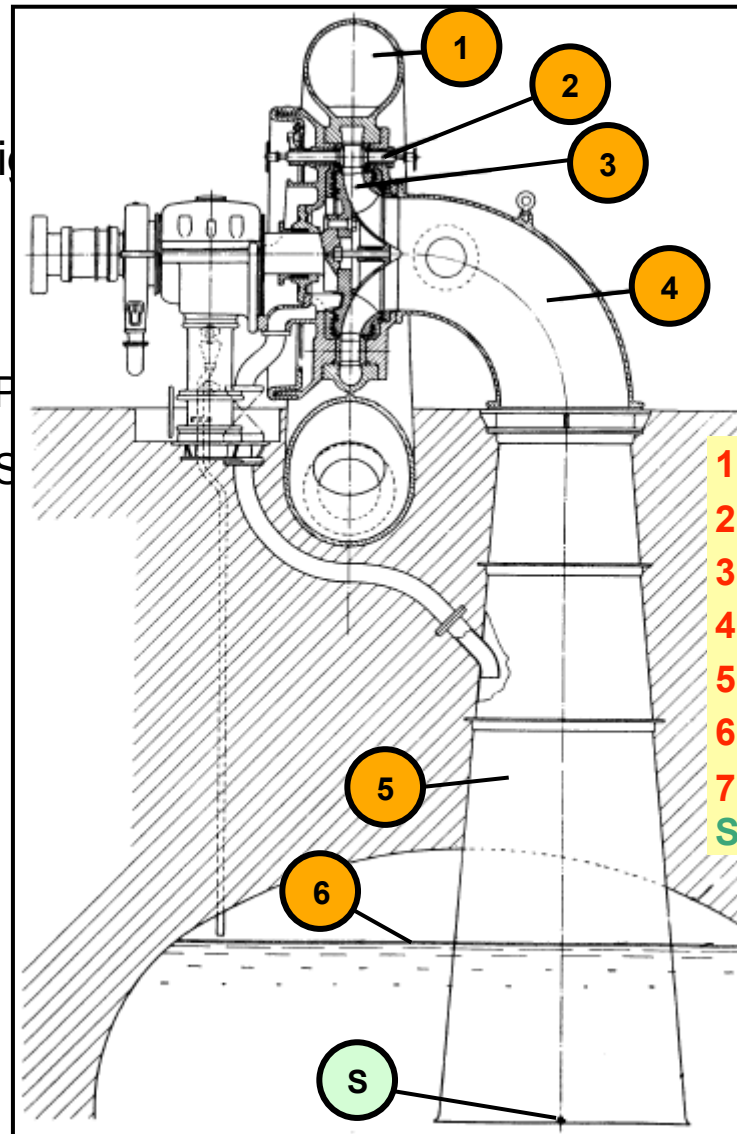
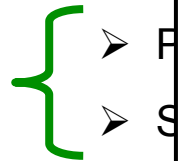
Son esencialmente los siguientes:

- Cámara espiral
- Distribuidor 
 - Palas directrices
 - Sistema de accionamiento
- Rodete
- Tubo de aspiración
- Eje

Componentes:

Son esencialmente los siguientes:

- Cámara espiral
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo de aspiración
- Eje



- 1 Caja espiral
- 2 Distribuidor
- 3 Rodete
- 4 Codo de salida
- 5 Tubo de Aspiración
- 6 Nivel Inferior
- 7 Mando del deflector
- S Salida

Componentes: Cámara Espiral

La cámara espiral más habitual está formada por la unión sucesiva de una serie de **virolas tronco-cónicas**, cuyos ejes respectivos forman una espiral

Esta disposición constructiva permite que el **agua** atraviese la cámara a **velocidad** sensiblemente **constante**, evitándose la formación de torbellinos que darían lugar a pérdidas de carga

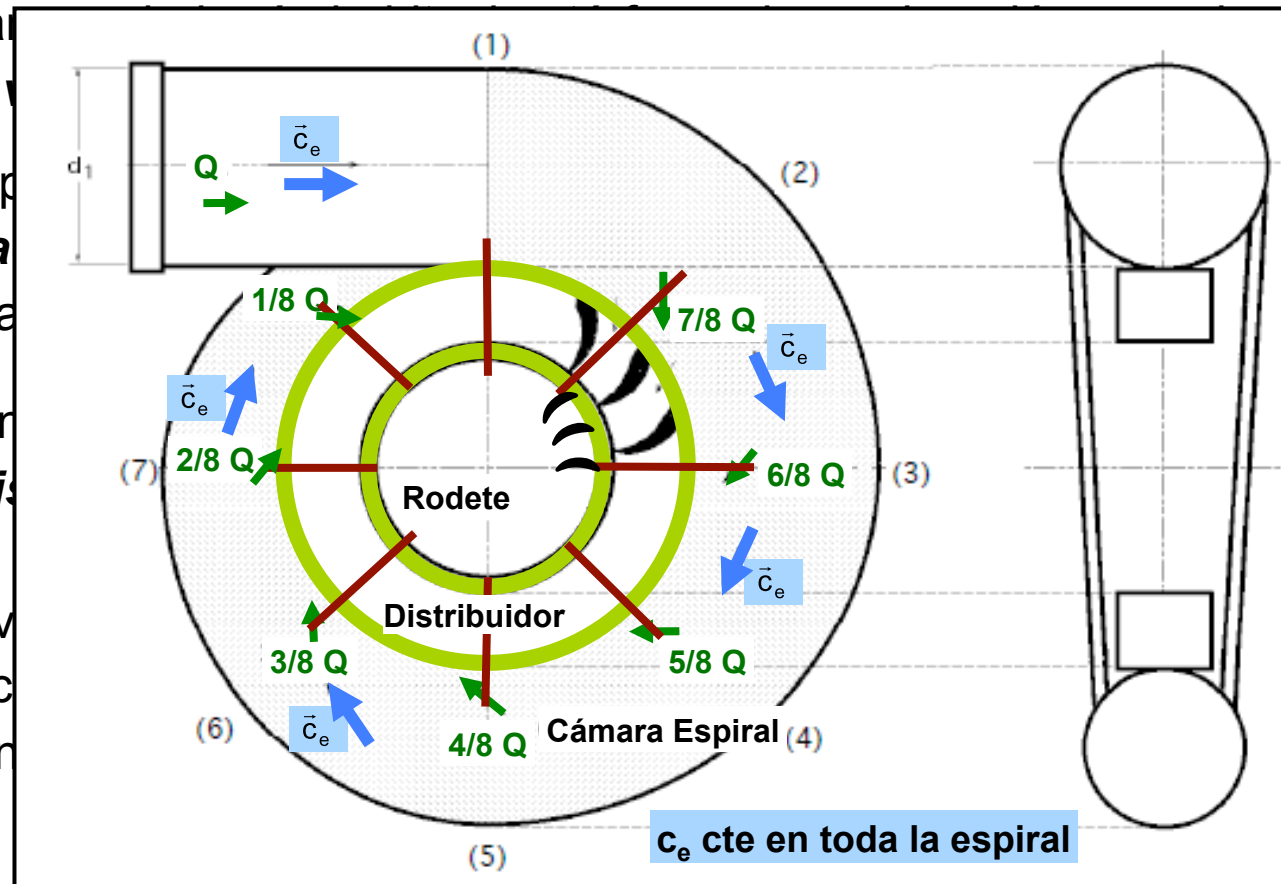
En la zona periférica interna se encuentra el **antedistribuidor**, formado por una serie de palas fijas equidistantes unas de otras cuya curvatura y orientación consiguen que la proyección del agua salga dirigida casi radialmente

Componentes: Cámara Espiral

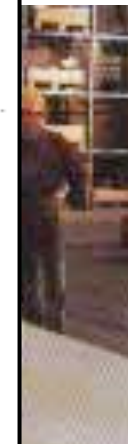
La cámara
serie de v

Esta disp
velocida
que daría

En la zon
el **antedi**
de palas
cuya curv
la proyec
radialmen



de una
espiral
nara a
bellinos



Componentes: Distribuidor

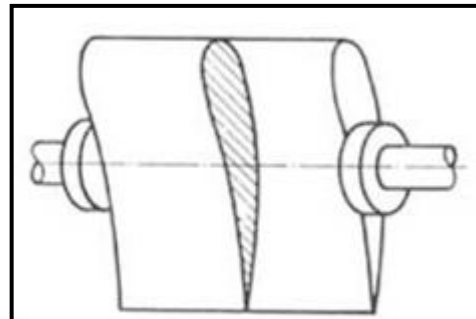
El distribuidor está formado por un determinado número de ***palas móviles*** cuya función es la de distribuir, ***regular*** o cortar totalmente el ***caudal*** de agua que fluye hacia el rodete

El distribuidor lo componen principalmente los siguientes elementos:

- ***Palas o álabes directrices orientables***

Dirigen el líquido al rodete con un mínimo de pérdidas y transforman parte de la energía de presión en energía cinética

El hecho de que los álabes se puedan orientar permite la regulación de la turbina, al poder variar el caudal que llega al rodete



Componentes: Distribuidor

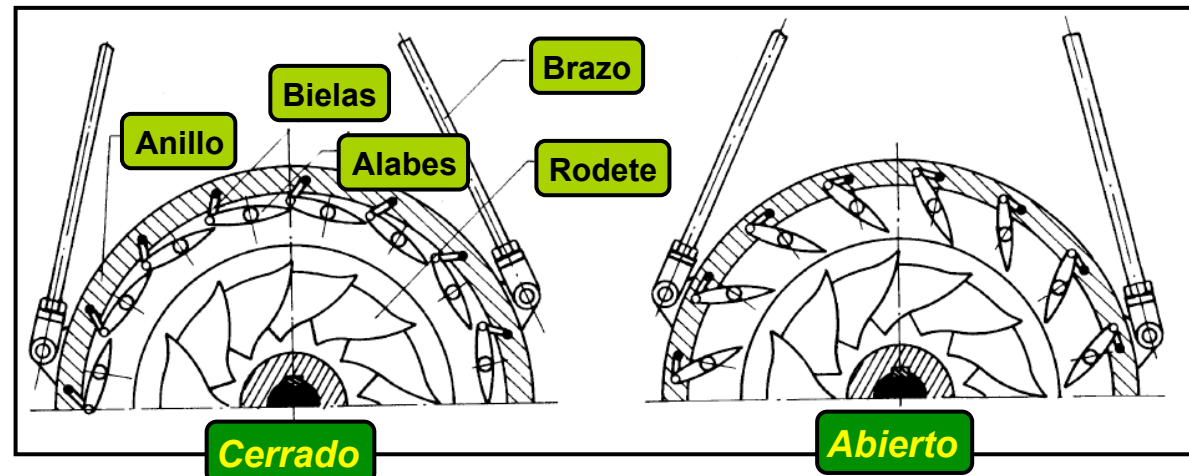
El distribuidor está formado por un determinado número de **palas móviles** cuya función es la de distribuir, **regular** o cortar totalmente el **caudal** de agua que fluye hacia el rodete

El distribuidor lo componen principalmente los siguientes elementos:

- **Palas o álabes directrices orientables**
- **El sistema de accionamiento de los álabes**

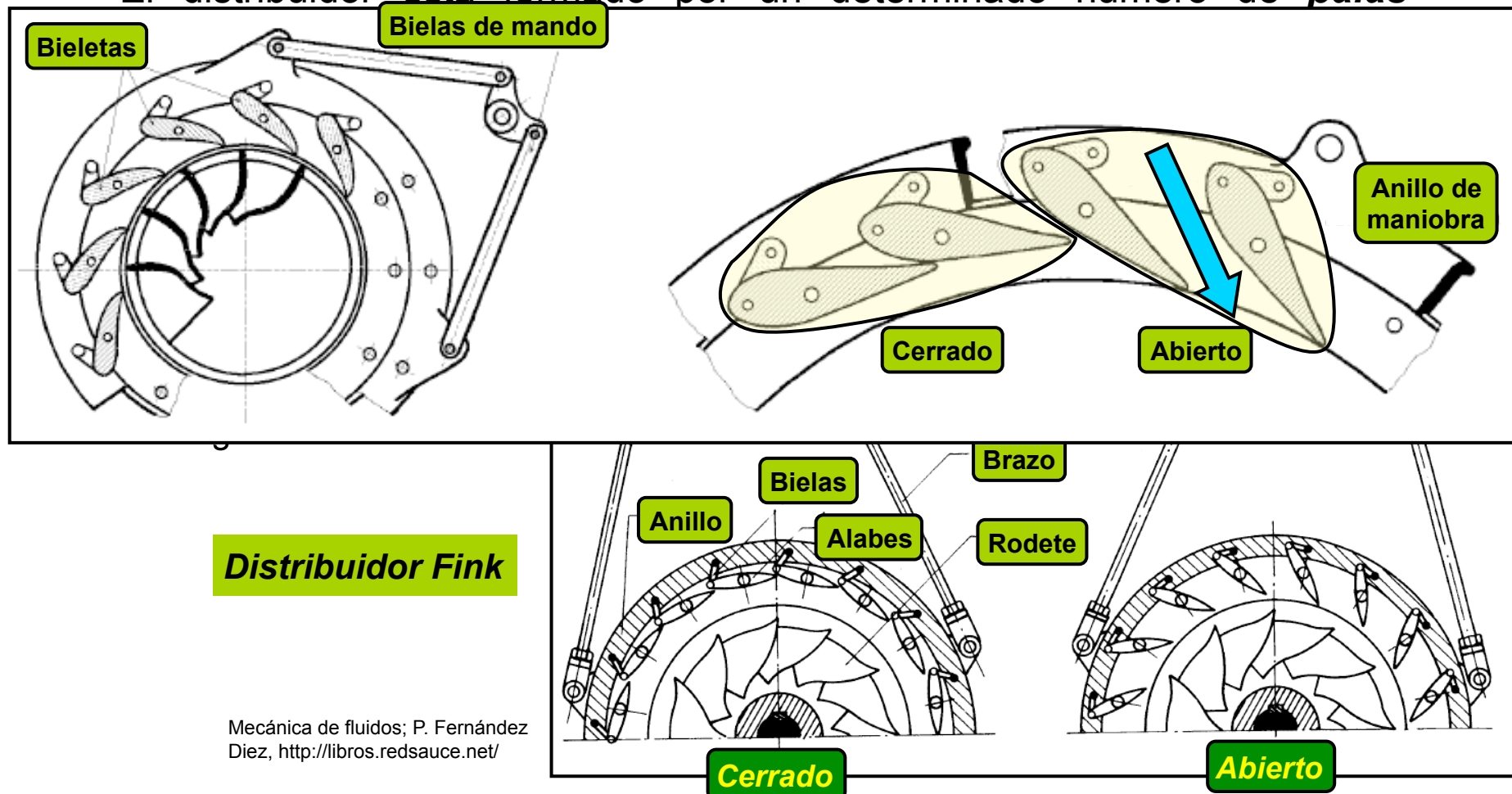
Son los elementos mecánicos a base de servomecanismos, palancas y bielas que constituyen el equipo de regulación de la turbina y está gobernado por el regulador de velocidad

Distribuidor Fink



Componentes: Distribuidor

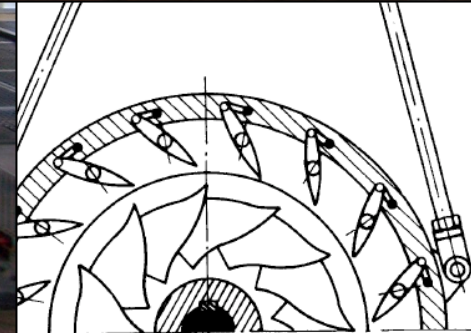
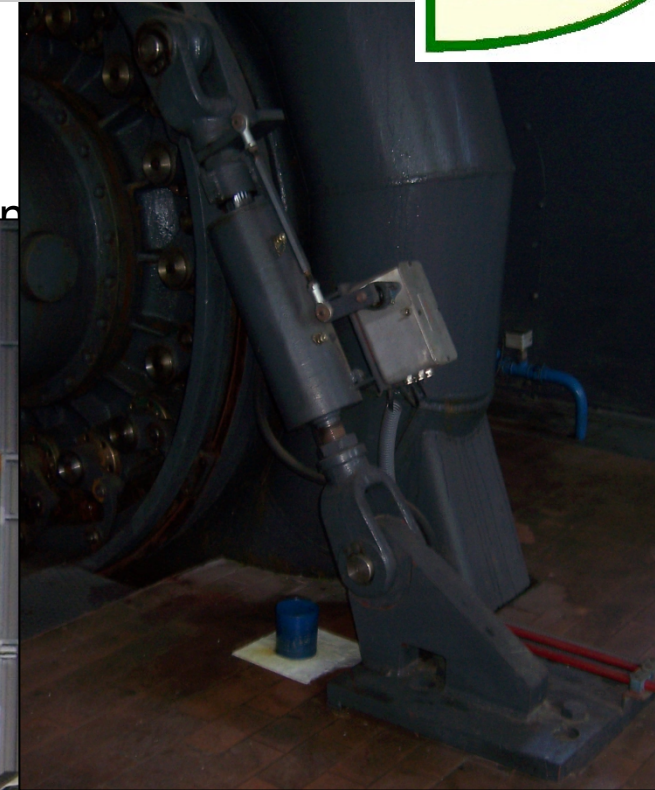
El distribuidor está formado por un determinado número de *palas*



Distribuidor Fink

Componentes: Distribuidor

El distribuidor está formado por un determinado



Abierto

Componentes: Rodete (I)

Se trata de la pieza fundamental de la turbina, donde se obtiene la energía mecánica deseada

Consta de un **núcleo central**, alrededor del cual se encuentra dispuesto un número determinado de **álabes**, aproximadamente entre 12 y 21, equidistantemente repartidos y solidarios al mismo, formando pieza única en bloque por fundición o soldadura, es decir, sin uniones ni fijaciones accesorias

La longitud de los álabes y su mayor o menor inclinación respecto al eje de la turbina, depende del caudal, de la altura del salto y, en consecuencia, de la velocidad específica

Componentes: Rodete (II)

α	β
$[\bar{c} \wedge \bar{u}]$	$[\bar{w} \wedge -\bar{u}]$

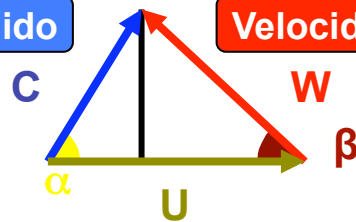
El *Triángulo de Velocidades* es como el genérico para M. H.:

Triángulo en la entrada y otro Triángulo en la salida

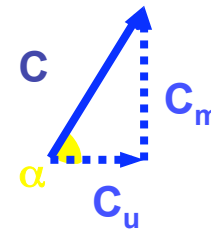
Velocidad del fluido

Velocidad relativa

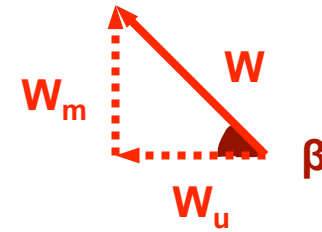
$$\bar{c} = \bar{u} + \bar{w}$$



Velocidad periférica del rodete



$$\bar{c} = \bar{c}_u + \bar{c}_m$$



$$\bar{w} = \bar{w}_u + \bar{w}_m$$

$$\beta_1 < 90^\circ \Rightarrow c_{1n} < u_1 \Rightarrow \text{Rodetes rápidos}$$

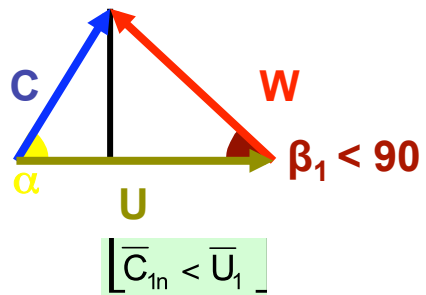
$$\beta_1 = 90^\circ \Rightarrow c_{1n} = u_1 \Rightarrow \text{Rodetes normales}$$

$$\beta_1 > 90^\circ \Rightarrow c_{1n} > u_1 \Rightarrow \text{Rodetes lentos}$$

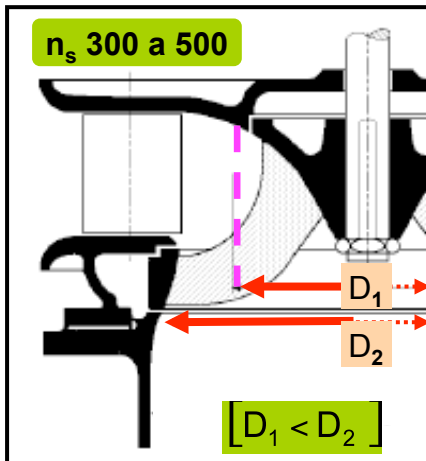
Componentes: Rodete (III)

α	β
$[\bar{C}_{1n} < \bar{U}_1]$	$[\bar{W} \wedge -\bar{U}]$

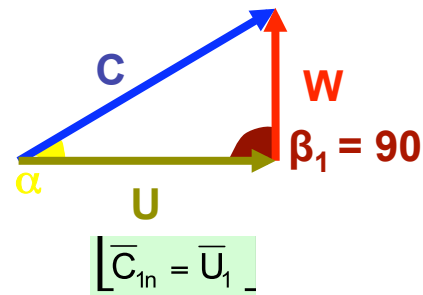
Rodete Rápido



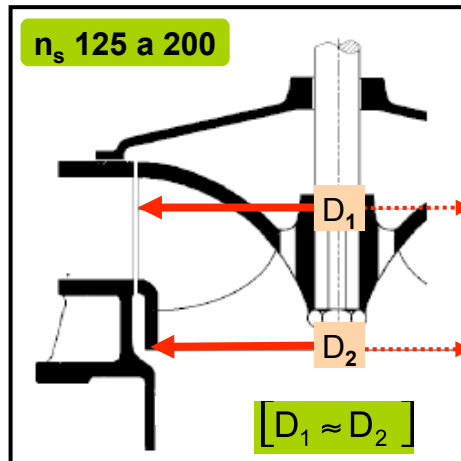
n_s 300 a 500



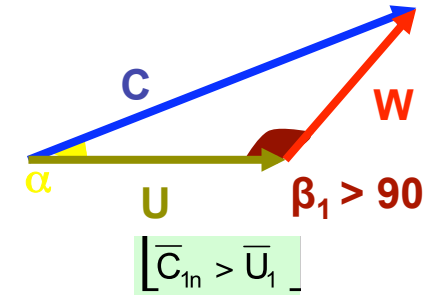
Rodete Normal



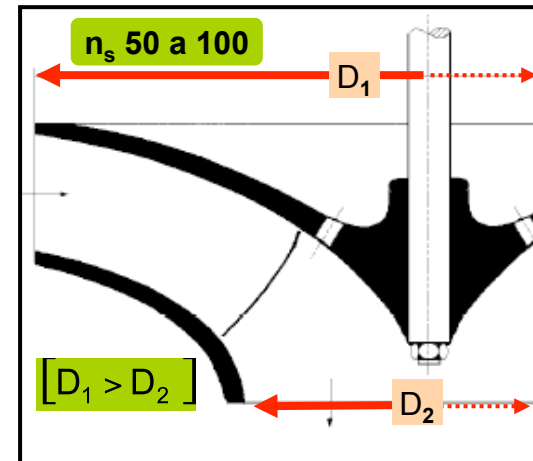
n_s 125 a 200



Rodete Lento



n_s 50 a 100

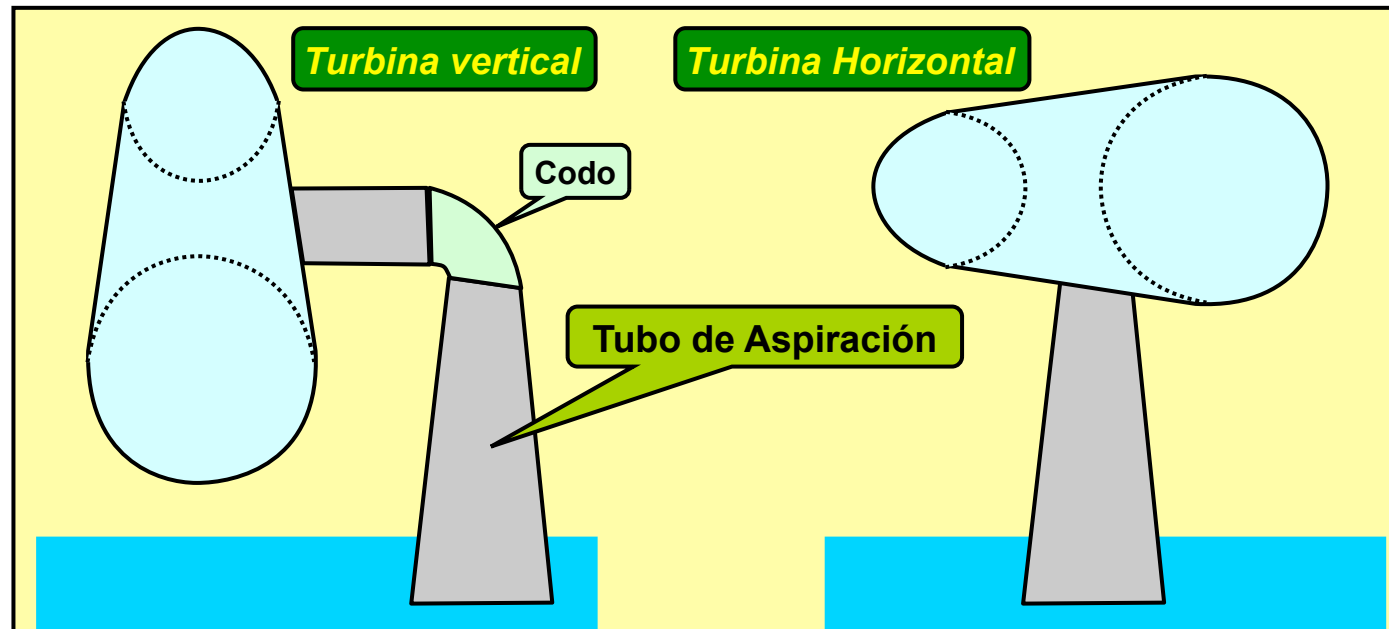


Componentes: Tubo de Aspiración (I)

Consiste en una **conducción**, recta ó acodada, troncocónica que une la turbina propiamente dicha con el canal de desagüe

Tiene como misión recuperar al máximo la energía cinética del agua a la salida del rodete o, dicho de otra forma, aprovechar el salto existente entre la superficie libre del agua y la salida del rodete

Adquiere más importancia con n_s altos



Componentes: Tubo de Aspiración (II)

Sus funciones son:

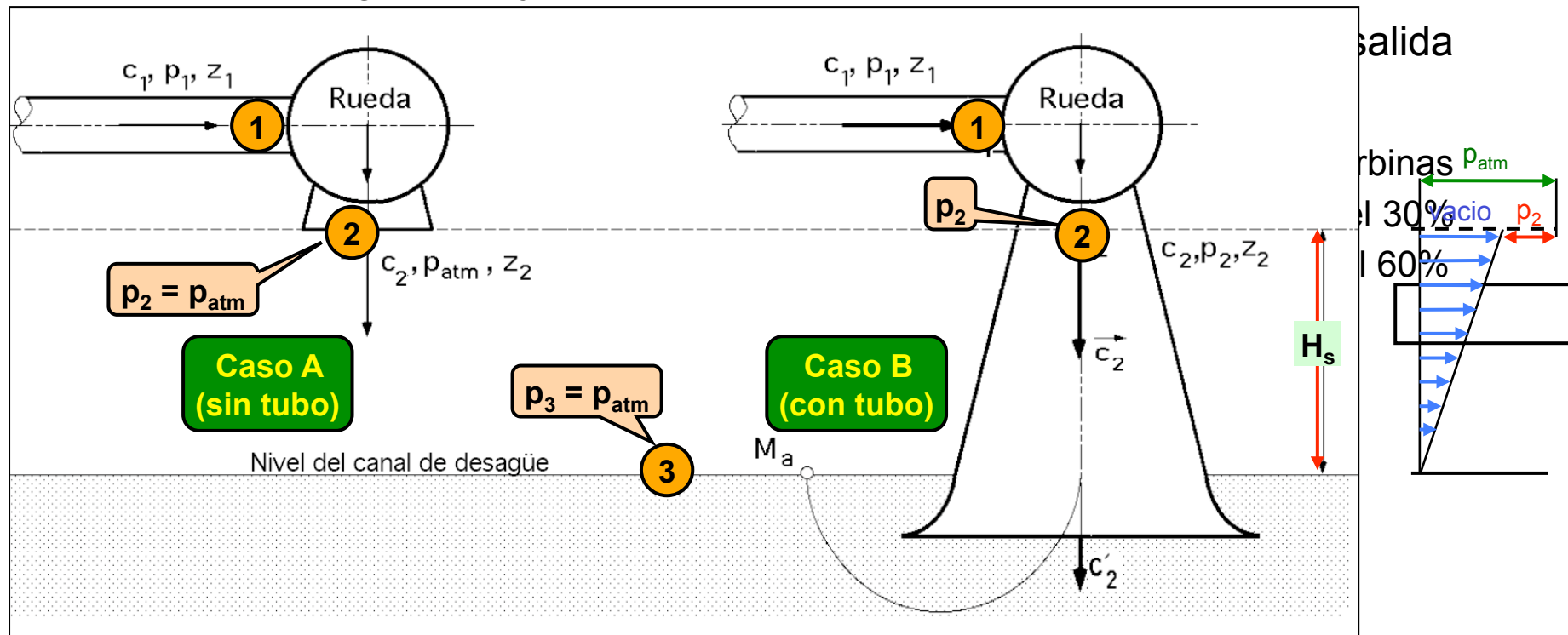
- Aprovechar la altura de salto disponible entre la salida del rodete y el nivel de aguas abajo
- Recuperar al máximo posible la energía cinética residual a la salida del rodete (c_2)

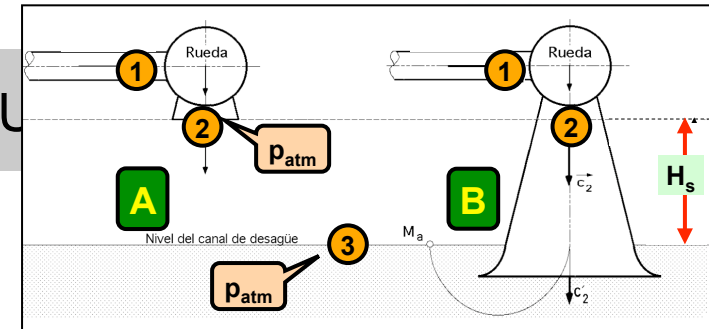
La energía cinética residual a la salida del rodete es despreciable en turbinas lentas. Sin embargo, en turbinas Francis rápidas representa del orden del 30% del salto neto mientras que en las turbinas Kaplan extrarrápidas supera el 60%

Componentes: Tubo de Aspiración (II)

Sus funciones son:

- Aprovechar la altura de salto disponible entre la salida del rodete y el nivel de aguas abajo





Componentes: Tubo de Aspiración (III)

Aplicando Bernoulli entre la entrada y la salida de ambas turbinas se obtiene la energía aprovechada en cada caso ($H_{T.A}$ y $H_{T.B}$):

$$\left(\frac{c_{ent}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{ent}}{\rho \cdot g} + z_{ent} \right) - H_{Turbina} - h_{Loss} = \left(\frac{c_{sal}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{sal}}{\rho \cdot g} + z_{sal} \right)$$

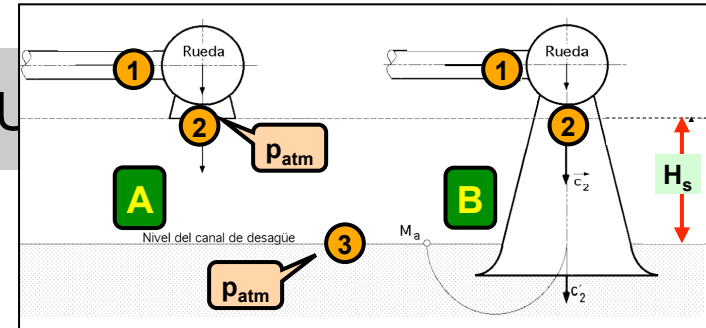
$$H_{T.A} = H_1 - H_2 = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 - \left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_2 \right) - h_{L.T}$$

energía perdida en la Turbina

$$H_{T.B} = H_1 - H_3 = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 - \left(\frac{c_3^2}{2 \cdot g} + \frac{p_3}{\rho \cdot g} + z_3 \right) - h_{L.T} - h_{L.t.a.} =$$

$$= \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 - \left(\frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_3 \right) - h_{L.T} - h_{L.t.a.}$$

energía perdida en el tubo de aspiración



Componentes: Tubo de Aspiración (IV)

La ganancia de energía al instalar el tubo de aspiración es:

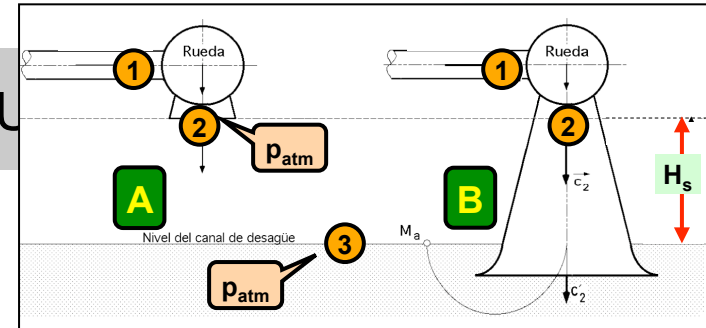
$$\Delta H = H_{T.B} - H_{T.A}$$

$$H_{T.B} = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 - \left(\frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_3 \right) - h_{L.T} - h_{L.t.a.}$$

$$H_{T.A} = \frac{c_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 - \left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_2 \right) - h_{L.T}$$

$$\Delta H = \left[\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_2 \right] - \left[\frac{p_{atm}}{\rho \cdot g} + z_3 + h_{L.t.a.} \right] = \left[\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right] - [z_3 + h_{L.t.a.}] =$$

$$= \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + H_s - h_{L.t.a.}$$



Componentes: Tubo de Aspiración (V)

En el tubo de aspiración se producen dos tipos de pérdidas:

- Por fricción en tubo

El tubo se diseña de modo que sean lo más reducidas posibles

- Por descarga del tubo en el canal

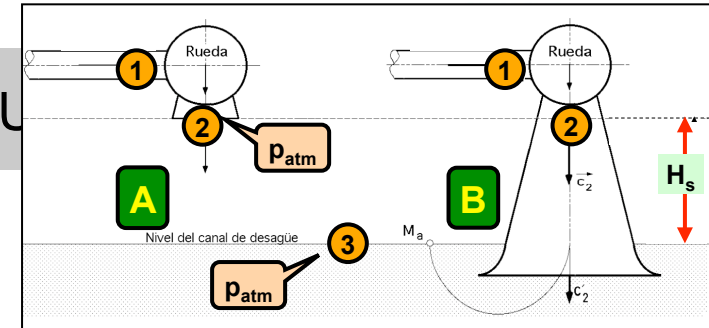
El tubo troncocónico tiene menor velocidad de salida

$$h_{L.s.t.} = \frac{c_{s.t.}^2}{2 \cdot g}$$

De este modo la energía recuperada en el tubo de aspiración es:

$$\Delta H = \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + H_s - [h_{L.t.a.} + h_{L.s.t.}]$$

$$\Delta H = \frac{c_2^2 - c_{s.t.}^2}{2 \cdot g} + H_s - h_{L.t.a.}$$



Componentes: Tubo de Aspiración (VI)

Aplicando Bernoulli entre la entrada y la salida de la T.B se puede calcular la nueva presión en pto 2:

$$\left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 \right) - h_{L.t.a.} - h_{L.s.t.} = \left(\frac{c_3^2}{2 \cdot g} + \frac{p_3}{\rho \cdot g} + z_3 \right)$$

$$h_{L.s.t.} = \frac{c_{s.t.}^2}{2 \cdot g}$$

$$\left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 \right) - [h_{L.t.a.} + h_{L.s.t.}] = (z_3)$$

**Expresado en
presión relativa**

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} = z_3 - \left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right) + [h_{L.t.a.} + h_{L.s.t.}]$$

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} = (z_3 - z_2) - \left(\frac{c_2^2}{2 \cdot g} \right) + [h_{L.t.a.} + h_{L.s.t.}]$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = - \left[H_s + \frac{c_2^2}{2 \cdot g} \right] + [h_{L.t.a.} + h_{L.s.t.}]$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = - \left[H_s + \frac{c_2^2 - c_{s.t.}^2}{2 \cdot g} \right] + h_{L.t.a.}$$

**p₂ es negativa
vacío**

Componentes: Tubo de Aspiración (VII)

$$\Delta H = \frac{c_2^2 - c_{s.t.}^2}{2 \cdot g} + H_s - h_{L.t.a.}$$

Se define el **rendimiento del difusor** como:

$$\eta_d = \frac{\frac{c_2^2 - c_{s.t.}^2}{2 \cdot g} - h_{L.t.a.}}{\frac{c_2^2 - c_{s.t.}^2}{2 \cdot g}}$$

Entonces, la ganancia de salto neto generada por el tubo se expresa como:

$$\Delta H = \frac{c_2^2 - c_{s.t.a.}^2}{2 \cdot g} \cdot \eta_d + H_s$$

Lo que pone de manifiesto la doble función del tubo de aspiración:

- Aprovechar la altura entre la salida del rodete y el nivel de aguas abajo (H_s)
- Recuperar al máximo posible la energía cinética residual a la salida del rodete (c_2)

Componentes: Tubo de Aspiración: Consideraciones Prácticas (I)

El tubo de aspiración se diseña para que $c_{s.t.a.}$ sea pequeña

Las experiencias de *Rogers* y *Moody* demuestran que para conseguir un buen funcionamiento y evitar problemas de cavitación la presión a la salida del rodete no debe ser inferior a un mínimo.

Rogers y Moody proponen las siguientes funciones que relacionan dichos valores:

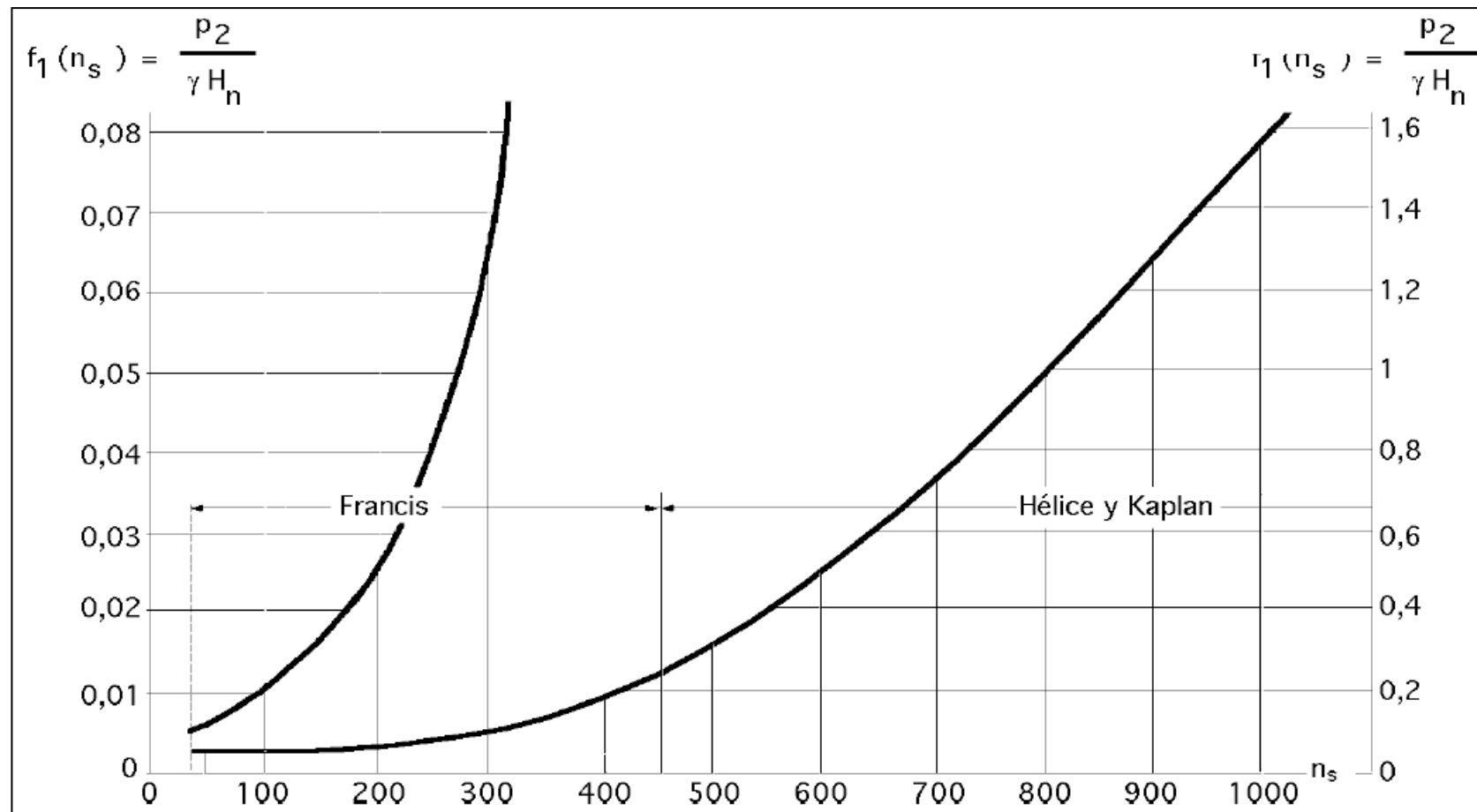
$$f_1(n_s) = \frac{p_2}{\rho \cdot g \cdot H_n} = a$$

$$f_2(n_s) = \frac{c_2^2}{2 \cdot g \cdot H_n} = \varphi_2^2$$

Componentes: Tubo de Aspiración: Consideraciones Prácticas (II)

La función $f_1(n_s)$ viene representada en las siguientes curvas:

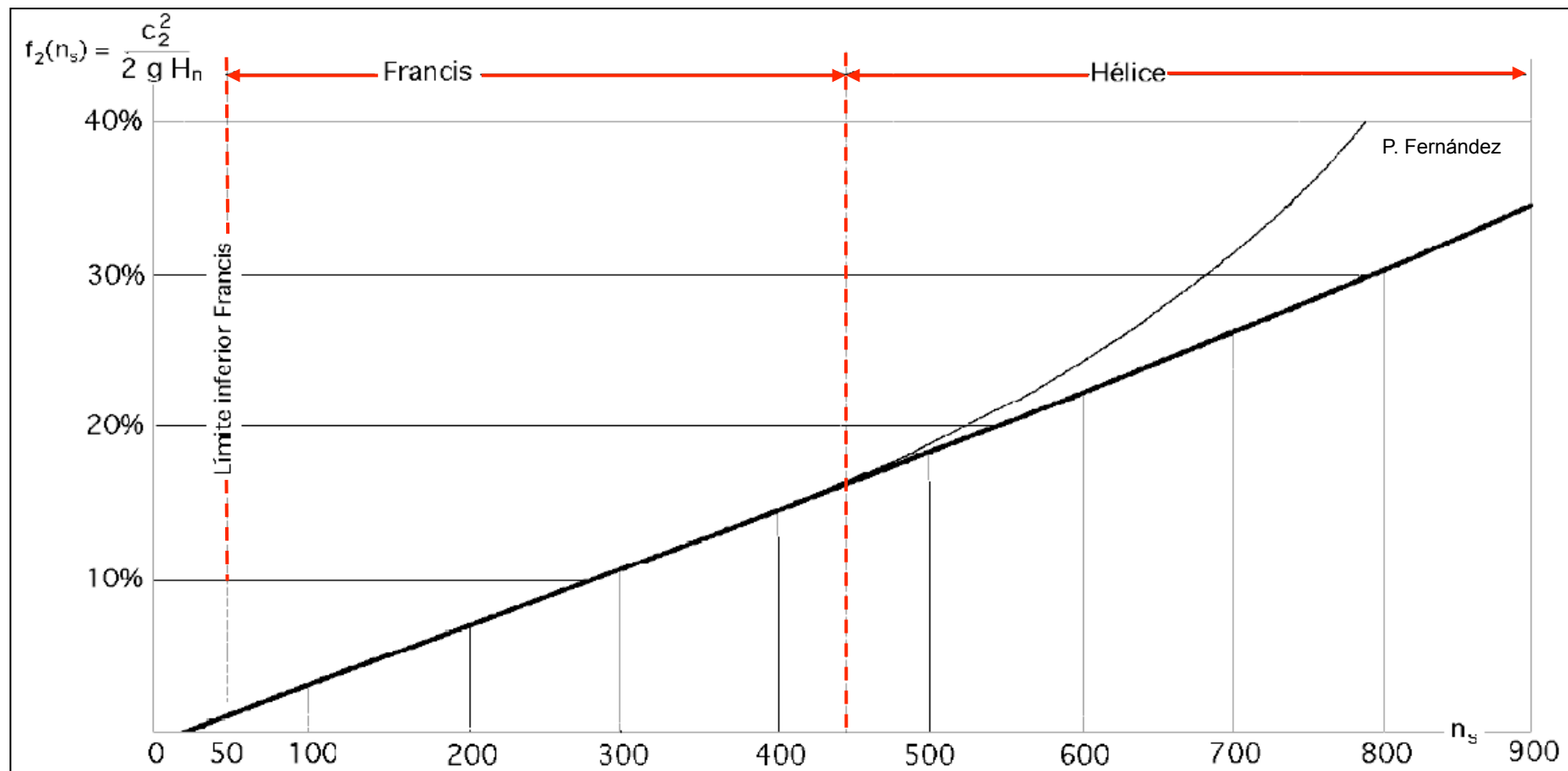
$$\gamma = \rho \cdot g$$



Componentes: Tubo de Aspiración: Consideraciones Prácticas (III)

La función $f_2(n_s)$ viene representada en la siguiente curva:

$$\gamma = \rho \cdot g$$



Componentes: Tubo de Aspiración: Cavitación

La presión a la salida del rodete puede llegar a descender de manera peligrosa, favoreciendo el fenómeno de la cavitación

Expresado en
presión absoluta

$$\frac{p_2}{\rho \cdot g} = \frac{p_{\text{atm}}}{\rho \cdot g} - \frac{c_2^2}{2 \cdot g} \cdot \eta_d - H_s$$

Puede suceder debido a: {

- Velocidad excesiva a la salida del rodete
- Altura de aspiración excesiva

La solución más económica no consiste en construir una turbina en la cual se excluya totalmente la cavitación

En la práctica se construyen turbinas en las cuales se llega a producir una cavitación “controlada”. Esto producirá un cierto desgaste en los álabes, pero sin que llegue a afectar de manera inaceptable al rendimiento de la máquina

Esto ha de tenerse presente a la hora de planificar el mantenimiento de las centrales hidroeléctricas

Funcionamiento de una Turbina Francis:

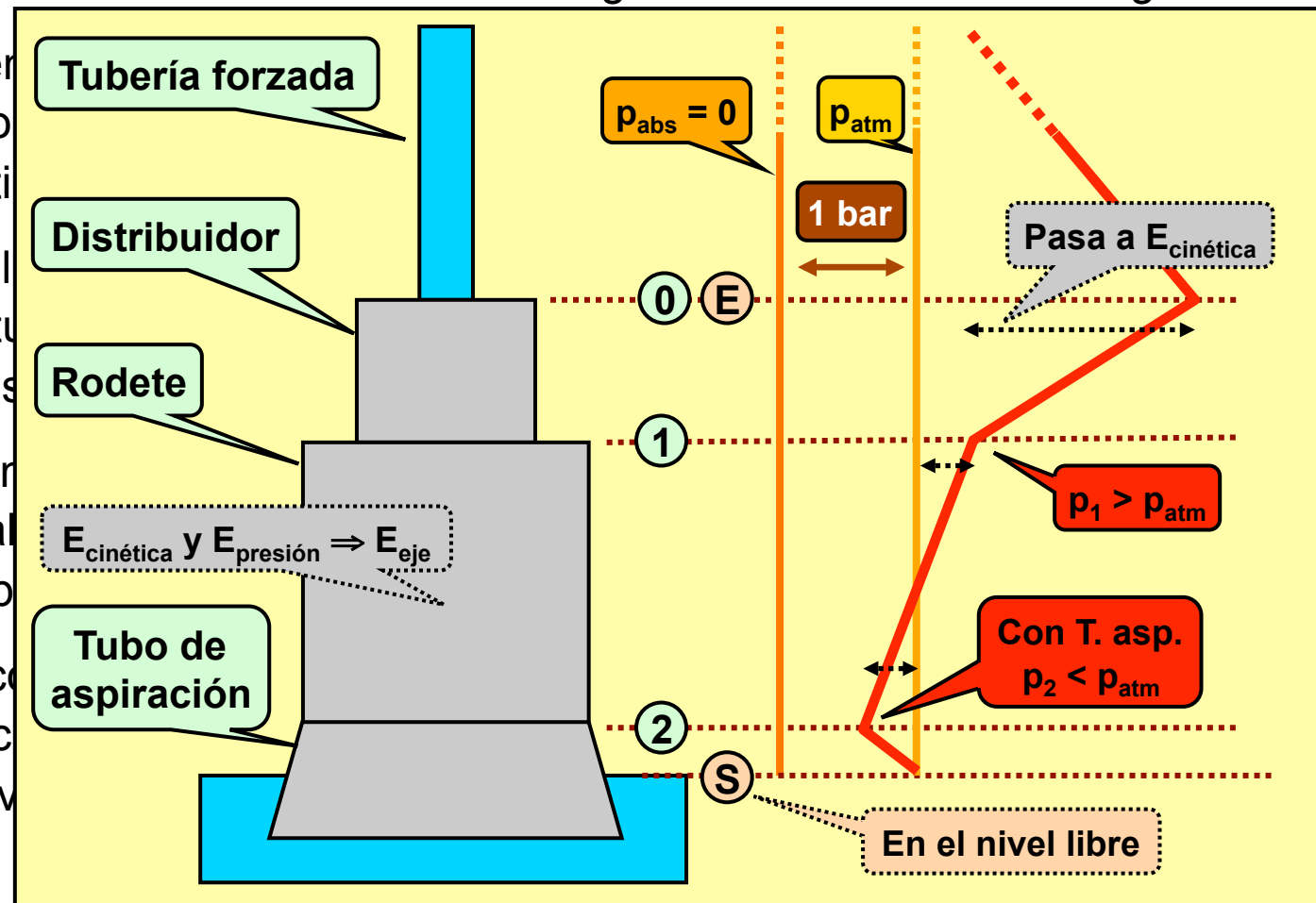
La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente:

- La energía potencial gravitatoria del agua embalsada se convierte, salvo pérdidas, una parte en energía de presión y otra parte en cinética a su llegada a la turbina
- En el distribuidor la altura de presión disminuye a costa de aumentar la altura cinética, aunque esta conversión no es tan completa como en el caso de las turbinas de acción
- La entrada de agua en el rodete se realiza de forma prácticamente radial, incidiendo sobre los álabes y cediendo a éstos la mayor parte posible de su energía
- En consecuencia, la presión disminuye notablemente 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

Funcionamiento de una Turbina Francis:

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

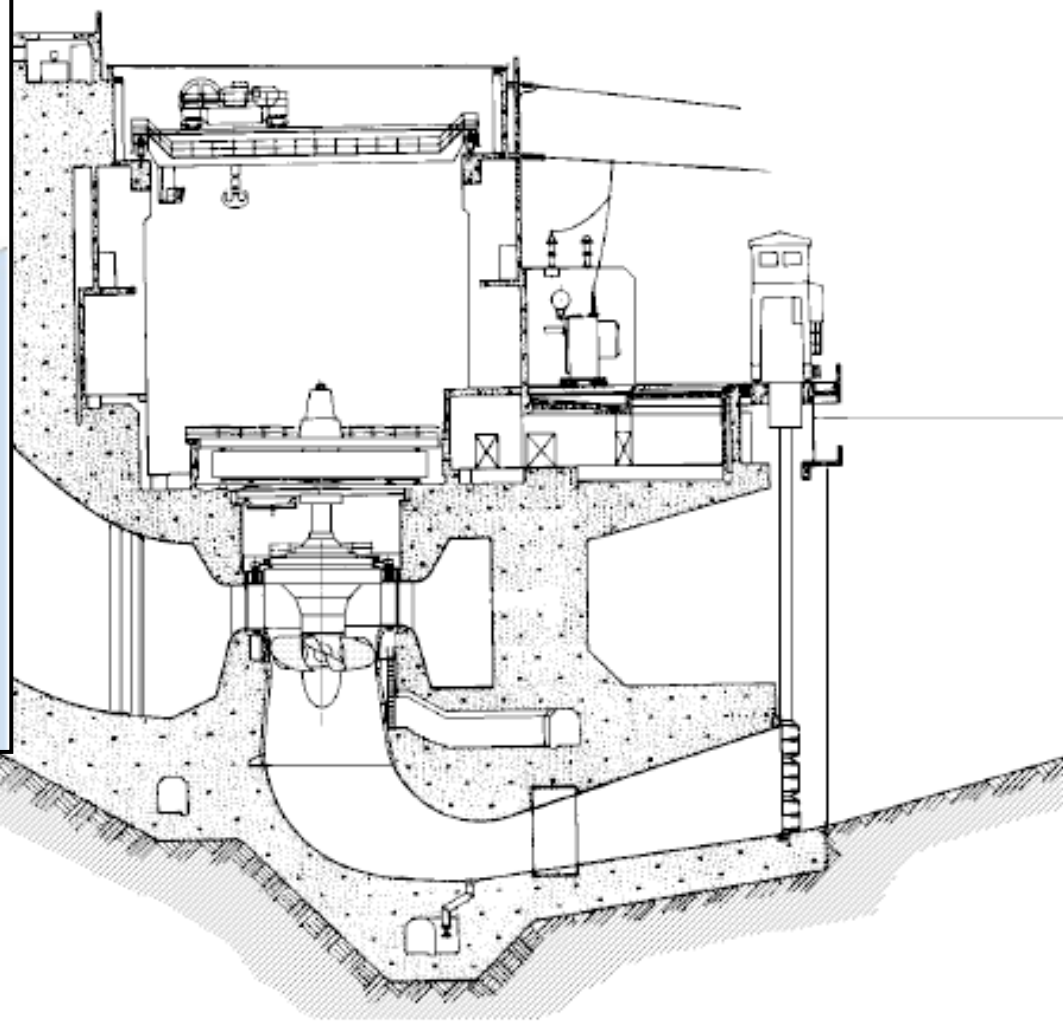
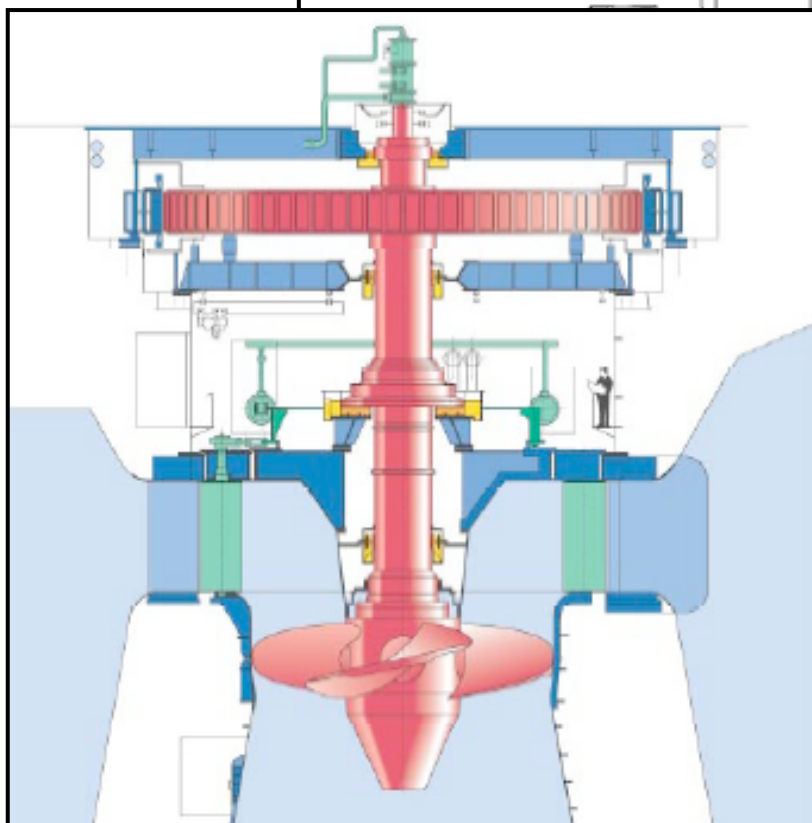
- La energía se transforma en energía cinética.
- En el distribuidor, la altura se transforma en energía cinética.
- La energía se transforma en energía radial.
- En el rodete, la energía se transforma en energía mecánica.
- En el tubo de aspiración, la energía se transforma en energía cinética.
- En el nivel libre, la energía se transforma en energía cinética.

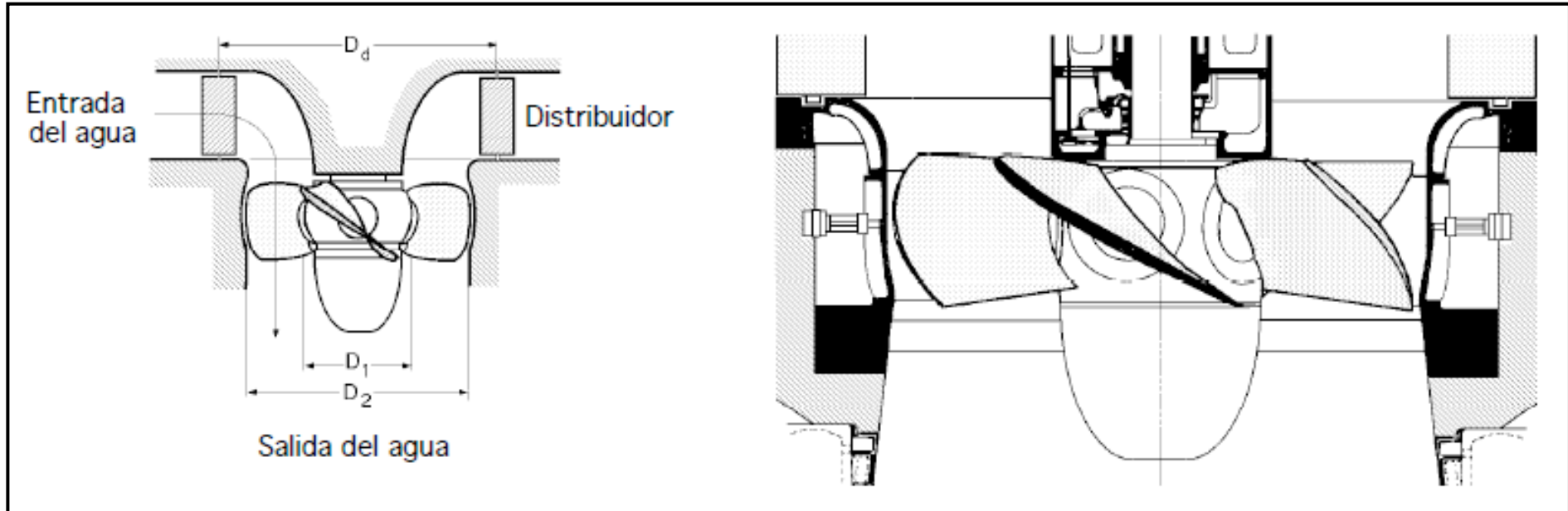


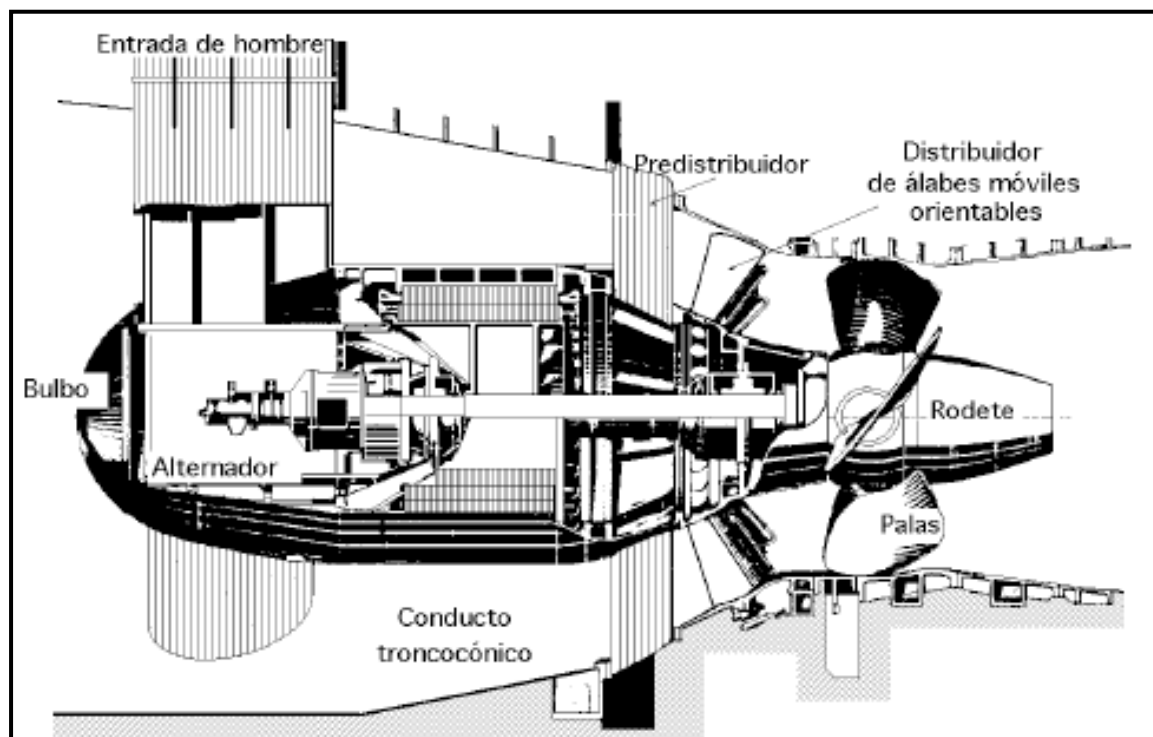
Una turbina Francis de eje vertical tiene: diámetros de entrada y salida del rodete 45 y 30 cm; ancho del rodete a la entrada y salida de 5 y 7 cm; los álabes ocupan un 8% del área a la entrada del rodete, en la salida están afilados; ángulo de salida del distribuidor 24° ; ángulo de entrada y salida a los álabes del rodete 85° y 30° ; las pérdidas hidráulicas en la turbina son de 6 m.c.a.; velocidad de entrada en la turbina 2 m/s; altura geométrica 54 m; rendimientos mecánico y volumétrico 94% y 100%; no hay tubo de aspiración

Calcular:

- r.p.m
- Altura neta
- Altura útil
- Rendimientos hidráulico y total
- Caudal
- Potencias interna y al freno







Mecánica de fluidos; P. Fernández Díez, <http://libros.redsauce.net/>

Generalidades (I):

La turbina **KAPLAN** es, en esencia, una turbina de hélice de álabes orientables

La turbina **DERIAZ** es, en esencia, una turbina Francis de álabes orientables

La principal ventaja que presentan estas turbinas es la posibilidad de **ajustar su geometría**, según la carga demandada, a las condiciones de óptimo rendimiento. ***Un rodete puede trabajar como infinitos rodetes***

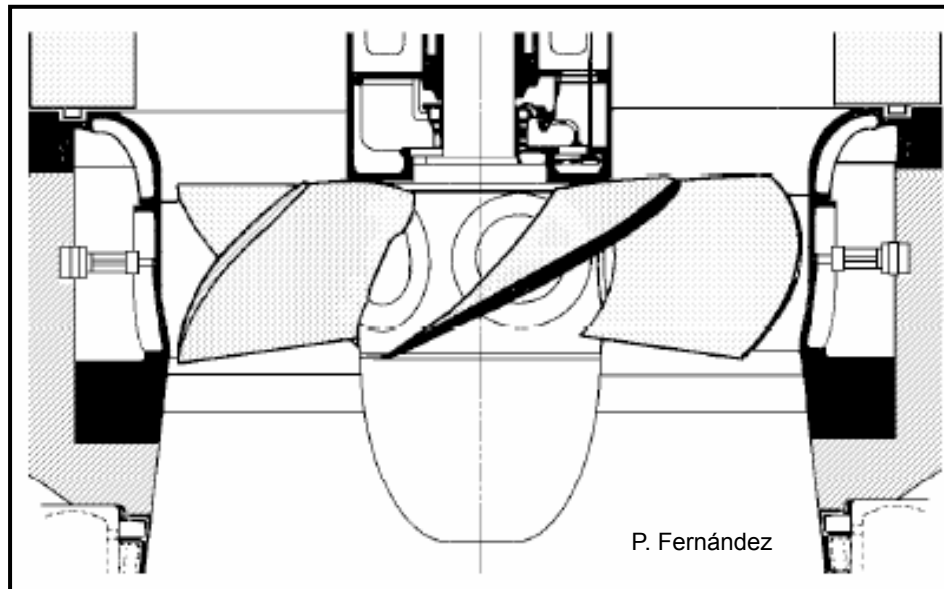
Esto produce un cambio importante en el comportamiento de la turbomáquina a cargas parciales

Dato cronológico: La turbina Kaplan fue presentada en el año 1.925, la turbina Deriaz en 1.956

La regulación de las turbinas hidráulicas se realiza mediante la variación del caudal suministrado, a igualdad de salto

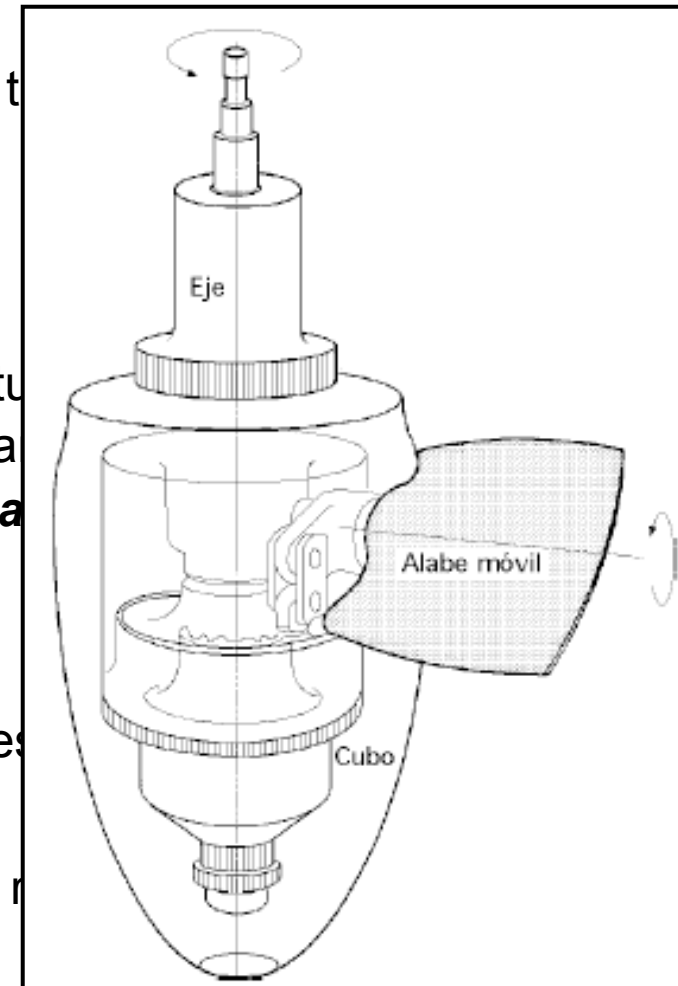
Generalidades (I):

La turbina **KAPLAN** es, en esencia, una turbina de eje vertical con paletas orientables.



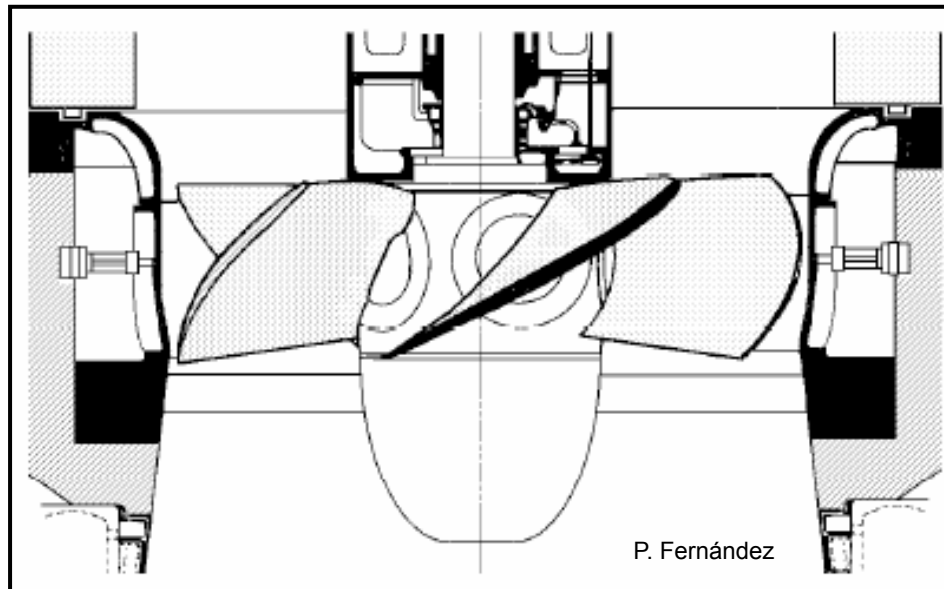
turbina Deriaz en 1.956

La regulación de las turbinas hidráulicas se realiza mediante la variación del caudal suministrado, a igualdad de salto.



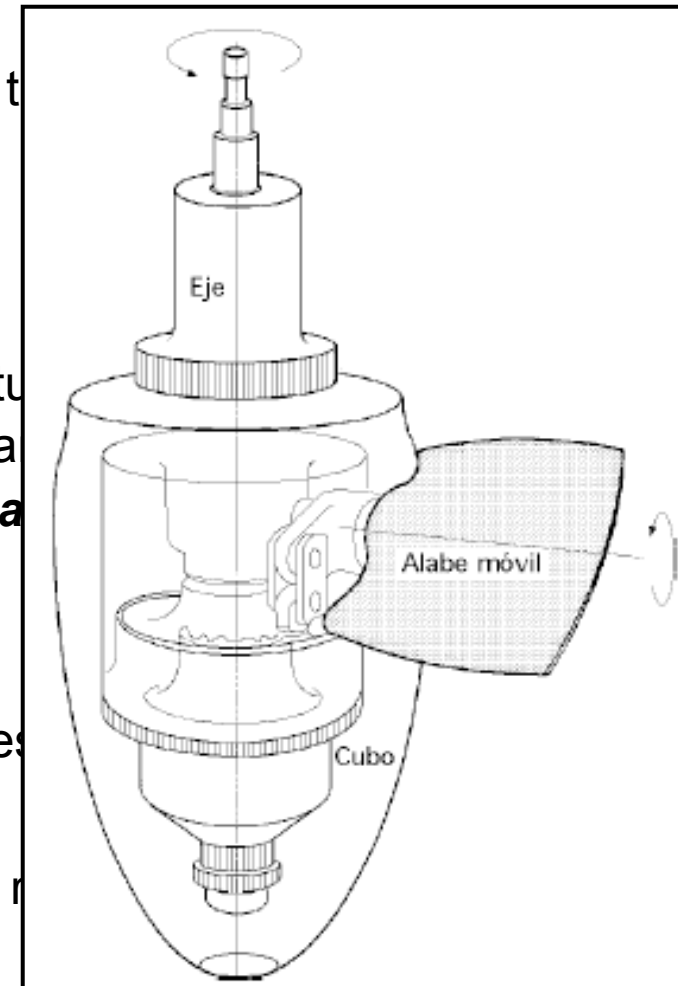
Generalidades (I):

La turbina **KAPLAN** es, en esencia, una turbina de eje vertical con paletas orientables.



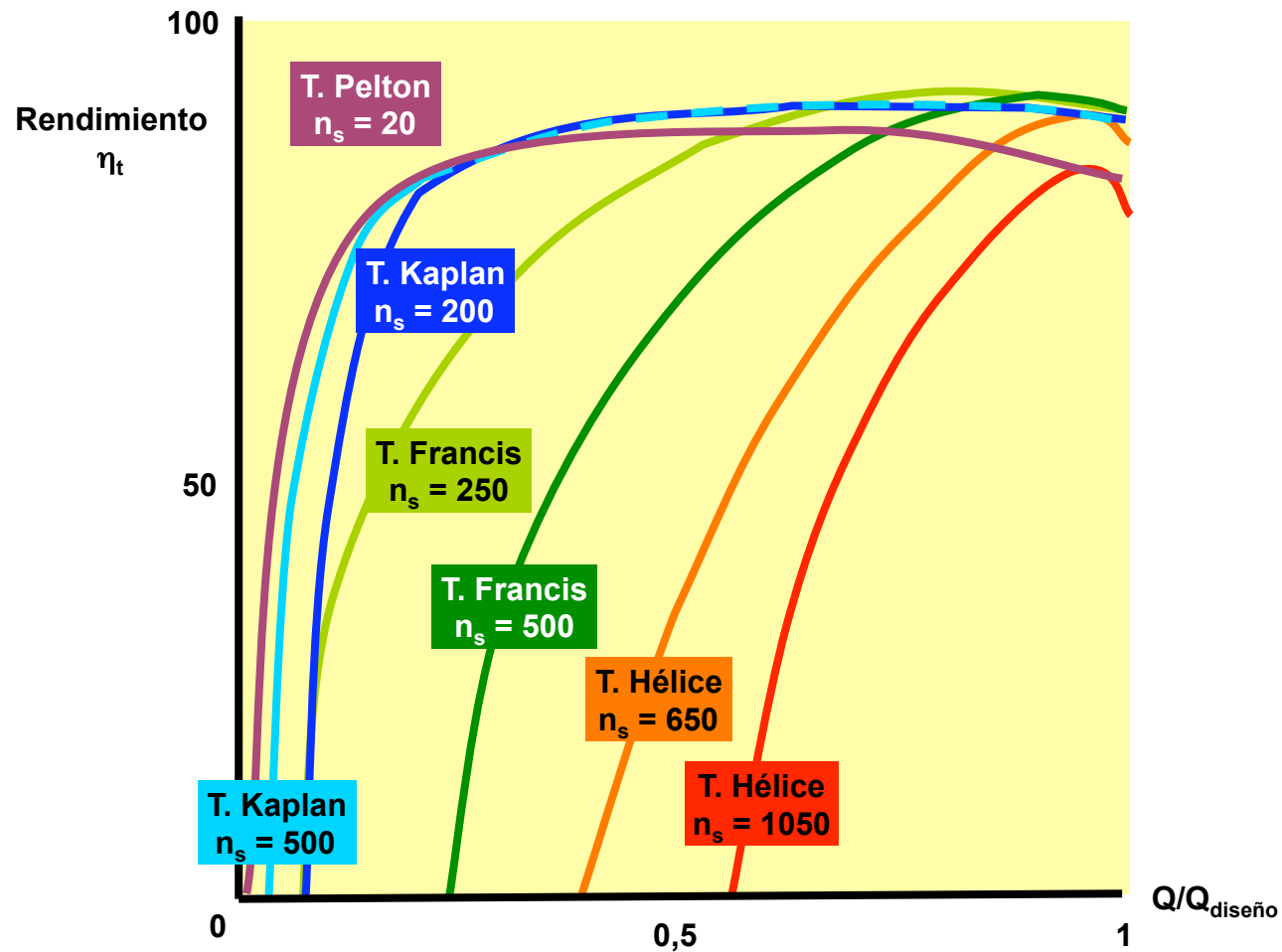
turbina Deriaz en 1.956

La regulación de las turbinas hidráulicas se realiza mediante la variación del caudal suministrado, a igualdad de salto.



Generalidades (II):

Comportamiento del rendimiento a carga parcial



Descripción (I):

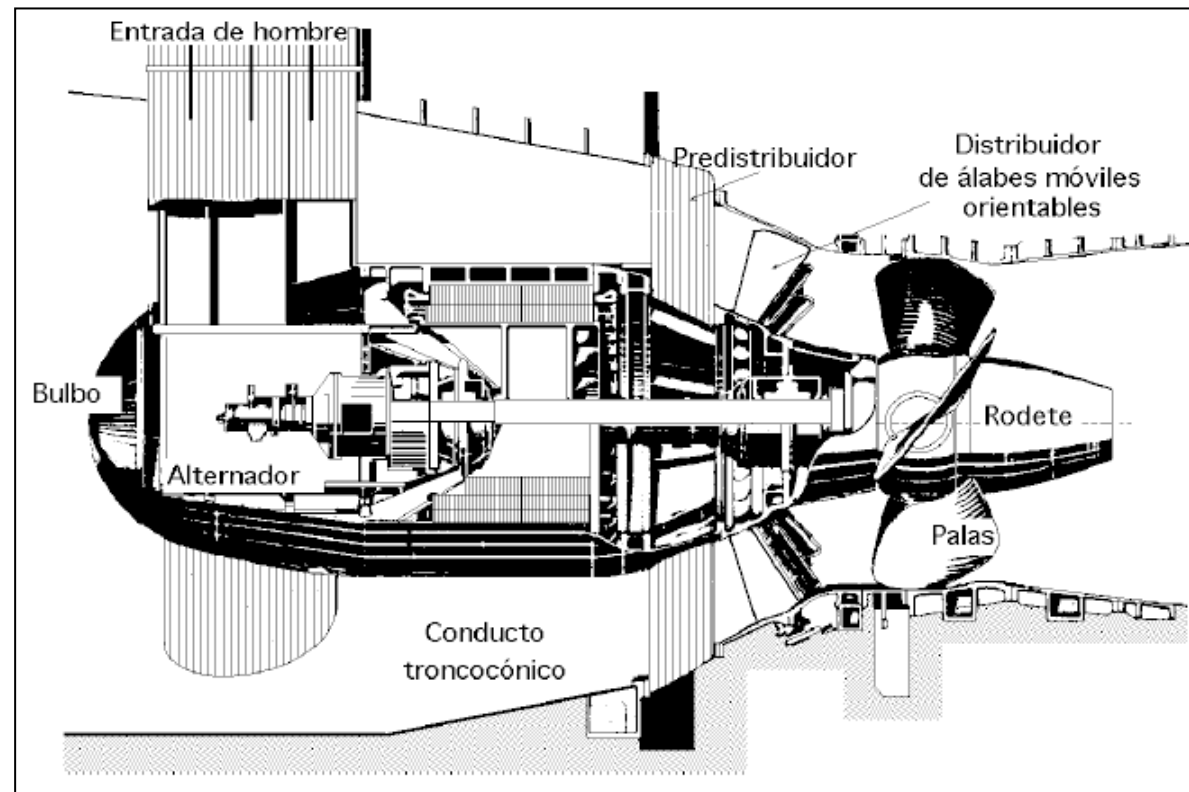
Las turbinas Kaplan son turbinas de ***reacción y de admisión total***, cuyo funcionamiento es adecuado a pequeños saltos (hasta 50 m) y caudales medios y grandes ($15 \text{ m}^3/\text{s}$). Se conocen también como turbinas de doble regulación

Las turbinas Deriaz son turbinas de ***reacción y de admisión total***, cuyo funcionamiento es adecuado a pequeños y medianos saltos (hasta 200 m) y caudales medios y grandes

Ambas turbinas se adaptan bien al funcionamiento reversible (como bombas), por lo que son adecuadas para las centrales de bombeo

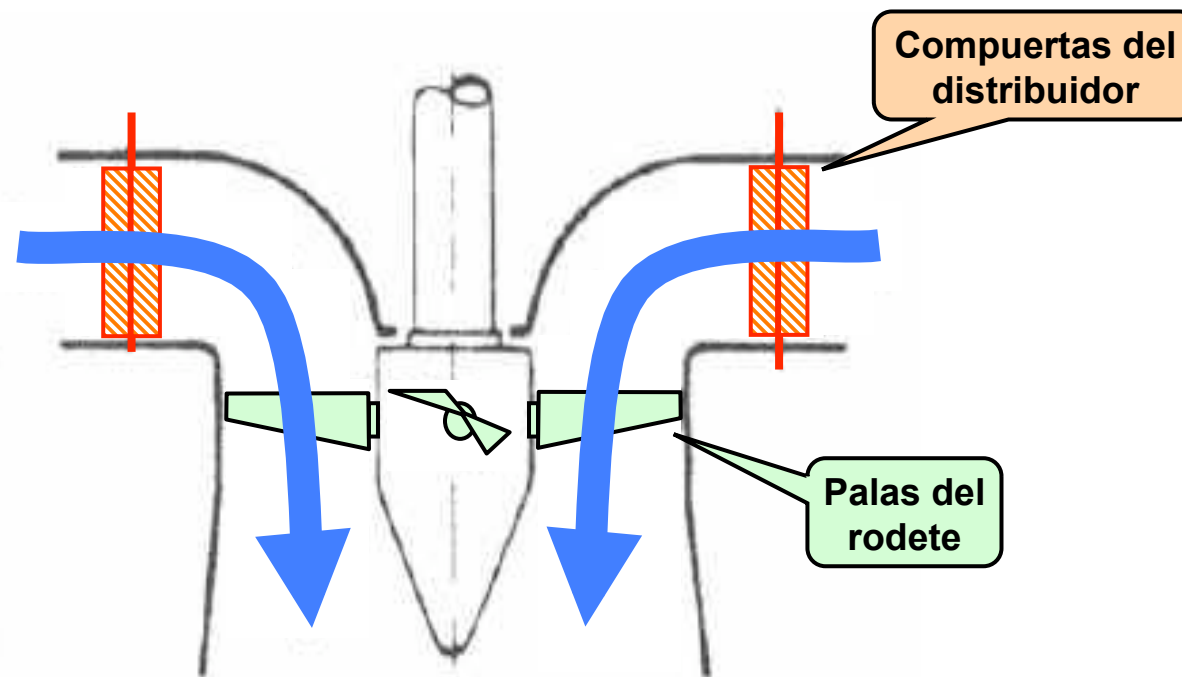
Descripción (II):

Un montaje característico de este tipo de turbinas, conjuntamente con el alternador, constituye los llamados **grupos bulbo**, propios de las centrales maremotrices



Descripción (IV):

En las turbinas Kaplan las palas del rodete están situadas a un nivel más bajo que el distribuidor, de modo que la corriente de agua que fluye por éste incide sobre dichas palas en su parte posterior, en dirección paralela al eje de la turbina



Descripción (V):

En las turbinas Kaplan

