

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



- **Generalidades**
- **Componentes Constructivos**
- **Funcionamiento**
- **Parámetros de Diseño**



Componentes (I):

Son esencialmente los siguientes:

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

Componentes (II):

Cámara Espiral (I)

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

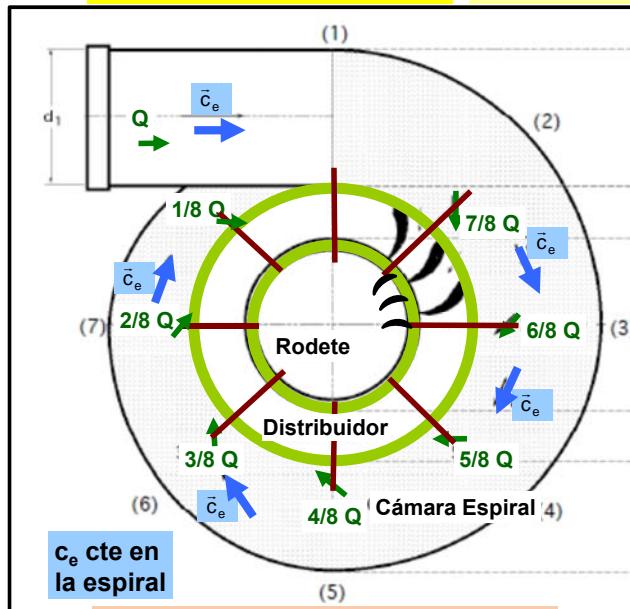
En la zona periférica interna se encuentra el **antedistribuidor**, formado por una serie de palas fijas equidistantes unas de otras cuya curvatura y orientación consiguen que la proyección del agua salga dirigida casi radialmente



<http://www.arquitectura21.com/2010/12/componentes-y-camara-espiral-de-una-turbina-francis.html>

Componentes (II):

Cámara Espiral (II)



c_e cte en la espiral

«Turbinas Hidráulicas» P. Fernández Díez

Se debe limitar la velocidad de entrada del agua en la cámara para reducir las pérdidas por fricción

- Metálicas: $c_e = 0,18 + 0,28 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$
- Hormigón: $c_e \leq 0,13 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$

$$Q = A_1 \cdot c_e = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot c_e$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot c_e}}$$

Si se consideran 8 secciones:

$$Q_{7/8} = \frac{7}{8} \cdot Q_{8/8} = \frac{7}{8} \cdot Q$$

$$Q_{6/8} = \frac{6}{8} \cdot Q$$

...

$$Q_{1/8} = \frac{1}{8} \cdot Q$$

$$Q_{7/8} = A_{7/8} \cdot c_e = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot c_e$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{7/8}}{\pi \cdot c_e}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7/8 \cdot Q}{\pi \cdot c_e}} = \sqrt{\frac{7}{8}} \cdot d_1$$

...

$$d_8 = \sqrt{1/8} \cdot d_1$$

Componentes (III):

Distribuidor (II)

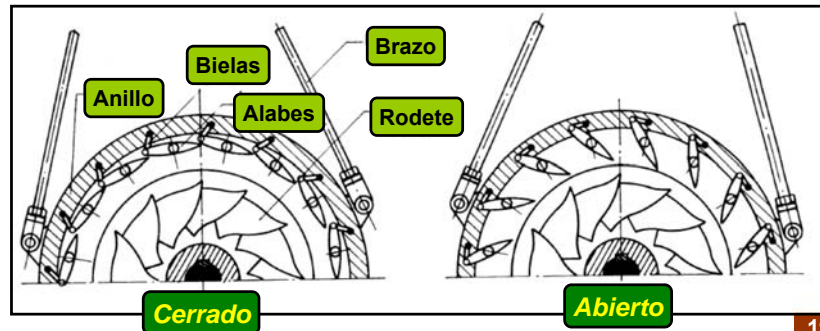
El distribuidor está formado por un determinado número de **palas móviles** cuya función es la de distribuir, **regular** o cortar totalmente el **caudal** de agua que fluye hacia el rodete

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

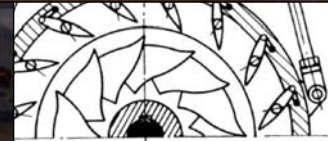
Distribuidor Fink



Componentes (III):

Distribuidor (II)

El distribuidor está formado por un determinado



Abierto

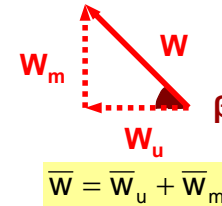
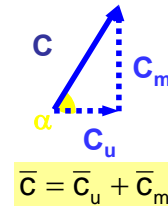
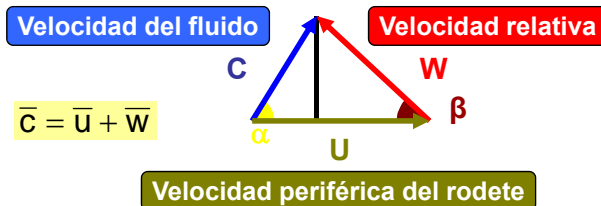
α	β
$[\overline{C}_\Lambda \overline{U}]$	$[\overline{W}_\Lambda - \overline{U}]$

Componentes (IV):

Rodete (II)

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

Triángulo en la entrada y otro Triángulo en la salida



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

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

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

¡¡Cuidado con la definición de los ángulos!!

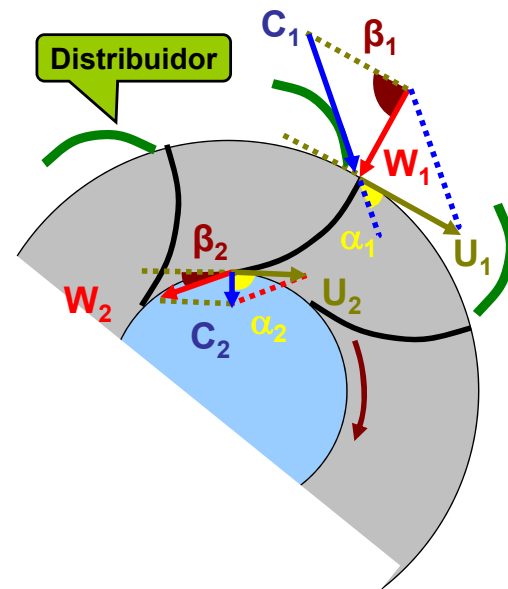
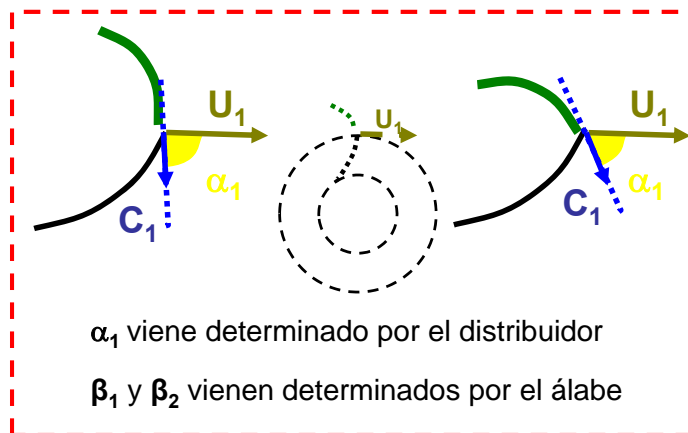
Componentes (IV):

Rodete (IV)

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

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

El *Triángulo de Velocidades* para una turbina Francis es:





Componentes (V):

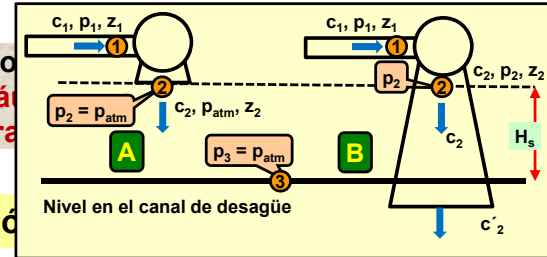
Tubo de Aspiración (II)

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%

BLOQUE 1: Máquinas de Fluido
1.3.- Turbinas Hidráulicas
1.3.3.- Turbinas Francis



Componentes (V):

Tubo de Aspiración

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

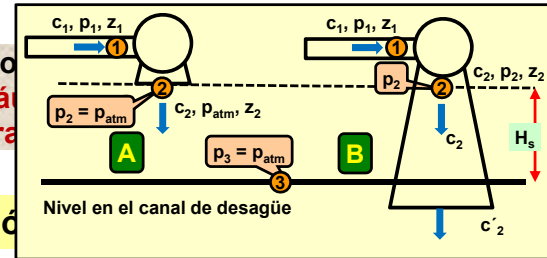
$$\left(\frac{c_{ent}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{ent}}{\rho \cdot g} + z_{ent} \right) - H_{Turbina} - h_{Loss} = \left(\frac{c_{sal}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{sal}}{\rho \cdot g} + z_{sal} \right)$$

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

energía perdida en la Turbina

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

energía perdida en el tubo de aspiración



Componentes (V):

Tubo de Aspiración

En el tubo de aspiración se producen dos tipos de pérdidas: $h_{L.t.a.}$

- Por fricción en tubo

El tubo se diseña de modo que sean lo más reducidas posibles $h_{L.F.t.a.}$

- 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:

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

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



Componentes (V):

Tubo de Aspiración (VII)

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

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

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

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)

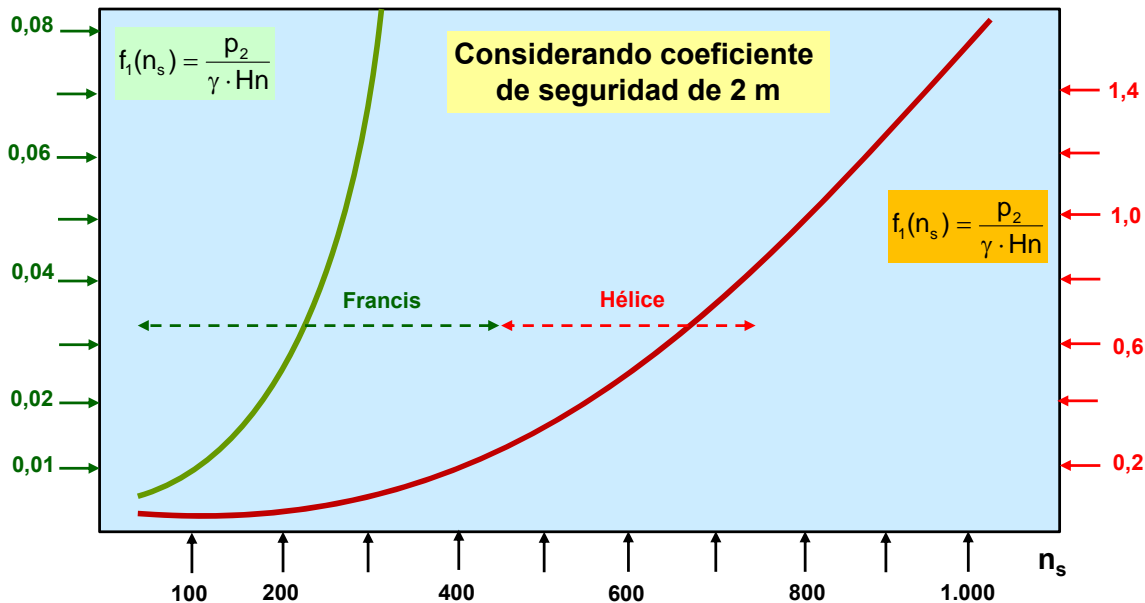
Componentes (V):

Tubo de Aspiración (VIII)

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

Consideraciones Prácticas (II)

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



Componentes (V):

Tubo de Aspiración (IX)

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

Expresado en
presión absoluta

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

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

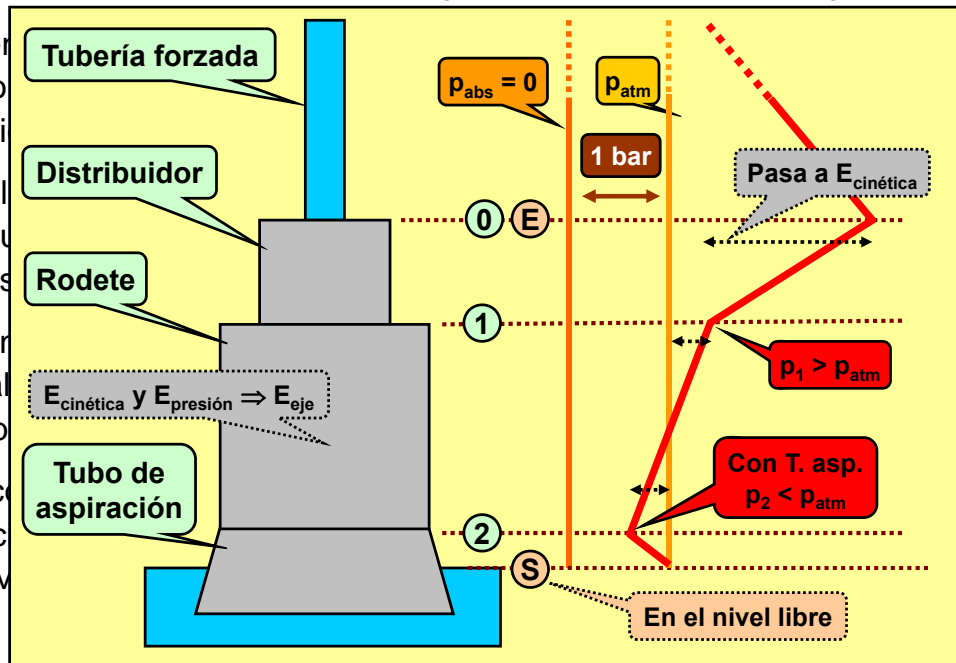
En la práctica se construyen turbinas en las cuales se llega a producir una cavitación “controlada”. Esto producirá un cierto desgaste en los álabes, pero sin que llegue a afectar de manera inaceptable al rendimiento de la máquina

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

Funcionamiento de una T. Francis

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

- La energía se conserva salvo pérdidas por fricción y cinética.
- En el distribuidor, la altura de la columna de agua es el caso de un tubo de aspiración.
- La energía se transforma en energía radial y en energía de presión.
- En el rodete, la energía de presión se transforma en energía de velocidad.
- En el tubo de aspiración, la velocidad se transforma en energía de presión.
- En el tubo de aspiración, la velocidad se transforma en energía de presión.



**Parámetros de
Diseño (II)**

