

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
- Parámetros de Diseño

Generalidades

Las **Turbinas Francis** se conocen como turbinas de sobrepresión por ser ésta variable en el rodete, o también como turbinas de admisión centrípeta o 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 (I):

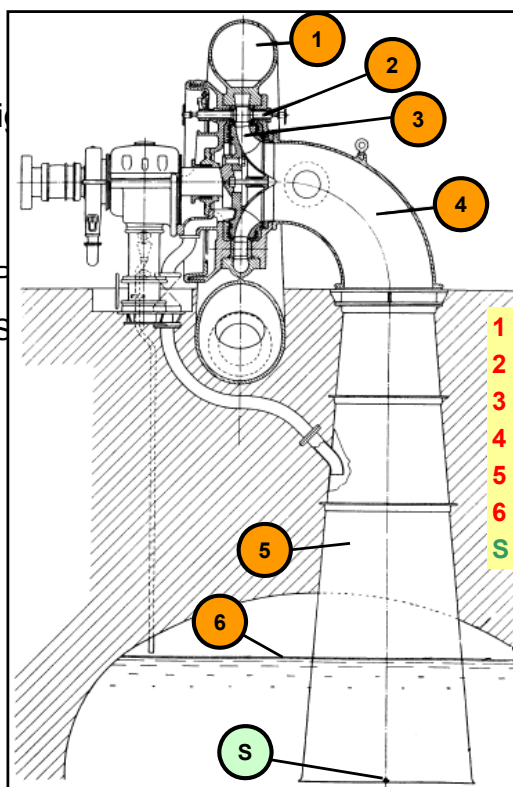
Son esencialmente los siguientes:

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

Componentes (I):

Son esencialmente los siguientes:

- Cámara espiral
- Distribuidor {
 - F
 - S
- Rodete
- Tubo de aspiración
- Eje



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

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



Componentes (II):

Cámara Espiral (I)

La cámara espiral más habitual está formada por la unión sucesiva de una serie de **virolas tr**

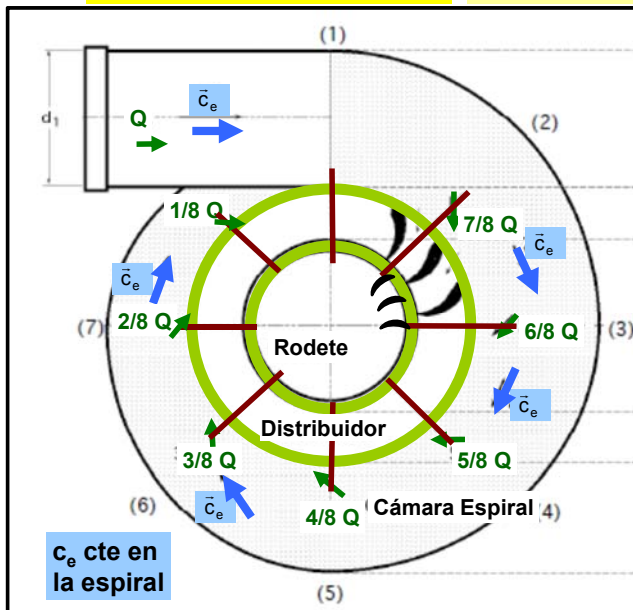
Esta disposición a **velocidad** sensiblemente **constante**, evitándose la formación de torbellinos que darían lugar a

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 (II):

Cámara Espiral (II)



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:

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

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

...

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

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

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

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

Componentes (III):

Distribuidor (I)

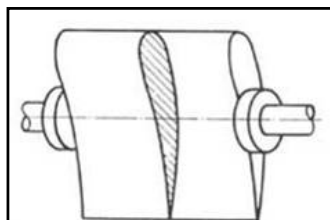
El distribuidor está formado por un determinado número de **palas móviles** cuya función es la de distribuir, **regular** o cortar totalmente el **caudal** de agua que fluye hacia el rodete

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 (III):

Distribuidor (II)

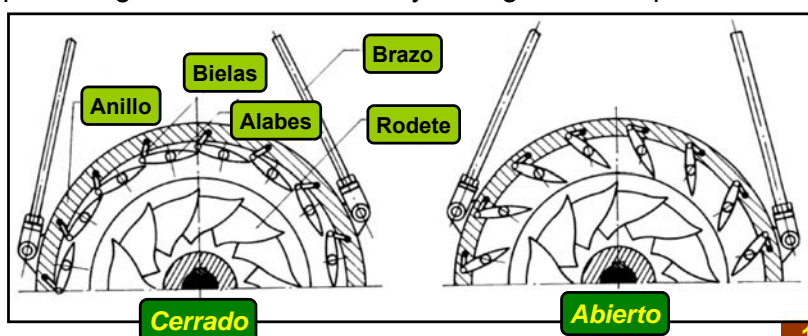
El distribuidor está formado por un determinado número de **palas móviles** cuya función es la de distribuir, **regular** o cortar totalmente el **caudal** de agua que fluye hacia el rodete

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

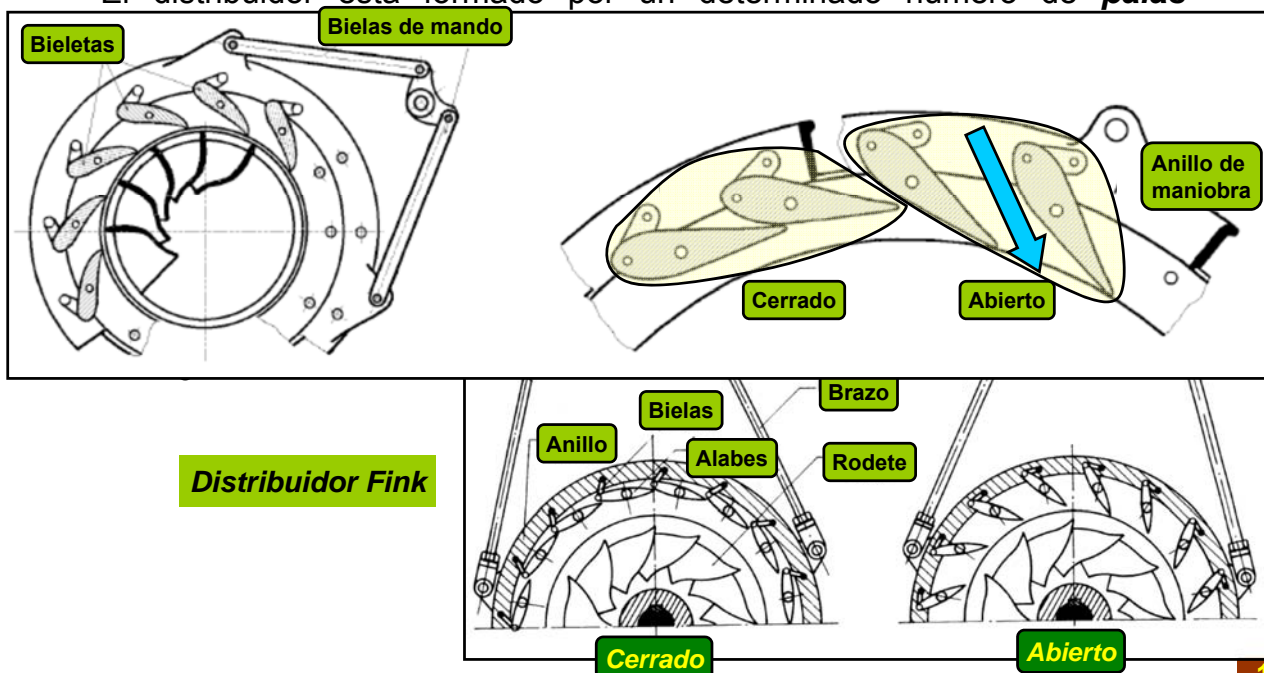
Distribuidor Fink



Componentes (III):

Distribuidor (II)

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



Distribuidor Fink

Componentes (III):

Distribuidor (II)

El distribuidor está formado por un determinado



Abierto

Componentes (IV):

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



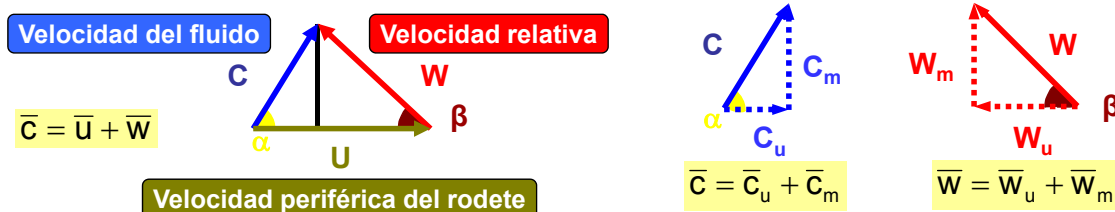
α	β
$[\overline{C_{\Lambda U}}]$	$[\overline{W_{\Lambda - U}}]$

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

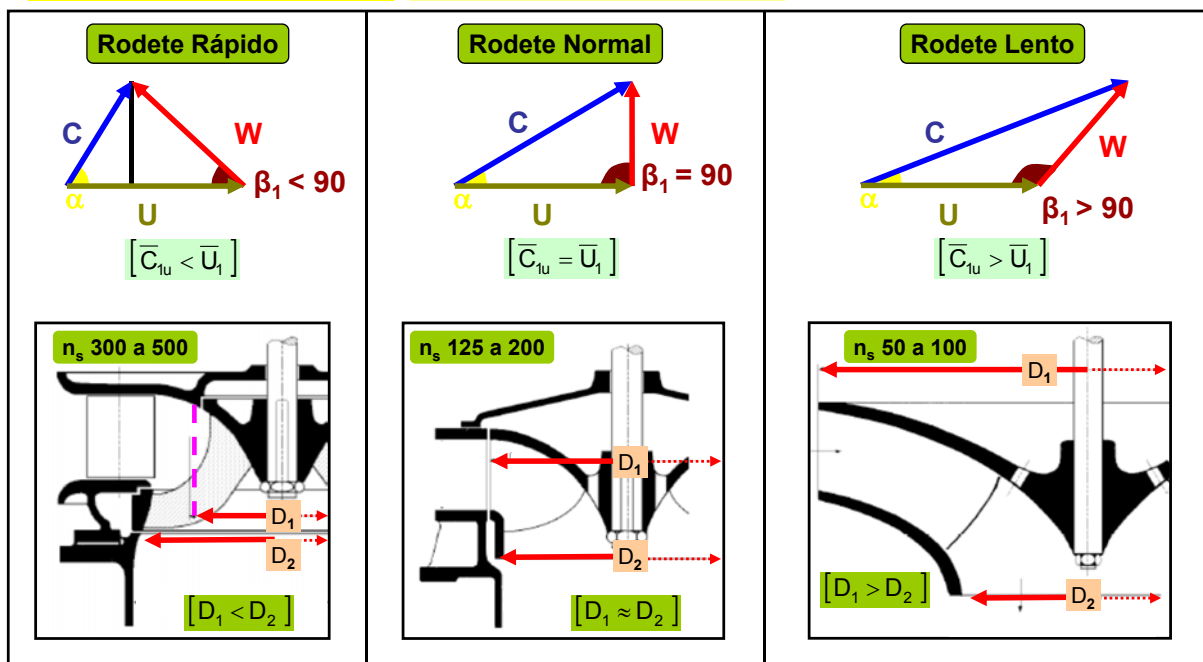
¡¡Cuidado con la definición de los ángulos!!

15

α	β
$[\overline{C_{\Lambda U}}]$	$[\overline{W_{\Lambda - U}}]$

Componentes (IV):

Rodete (III)



16

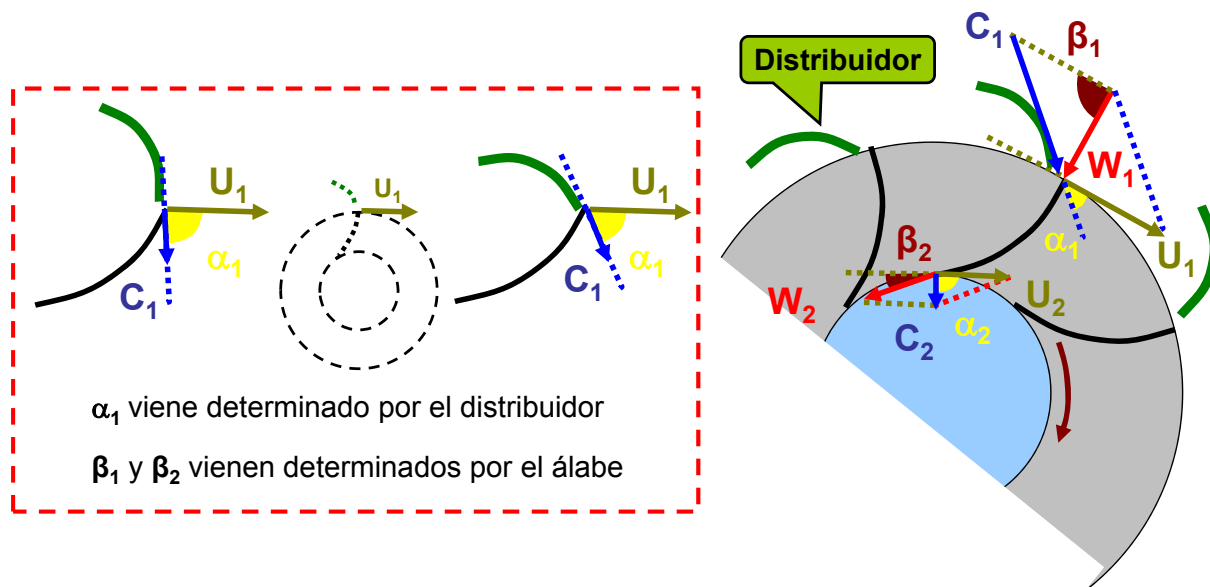
α	β
$[\bar{c} \wedge \bar{u}]$	$[\bar{w} \wedge -\bar{u}]$

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

Componentes (IV):

Rodete (IV)

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



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

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

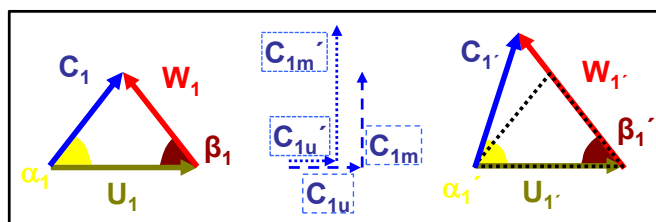
Componentes (IV):

Rodete (IV)

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

Si se **abre el distribuidor**, α_1 aumenta (α_1')

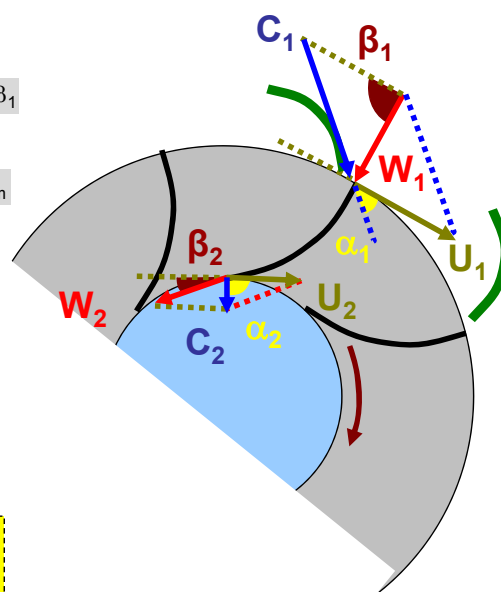
- la velocidad de giro se debe mantener $u_1' = u_1$
- β_1 se mantiene (tangente al álabe del rodete) $\beta_1' = \beta_1$
- se abre el paso del caudal $Q' > Q$
- la velocidad de entrada del agua aumenta $c_{1m}' > c_{1m}$
- la altura disminuye $H_1' < H_1$



Al abrir el distribuidor

α_1 aumenta
 β_1 se mantiene
 c_{1u} disminuye
 c_{1m} aumenta

C_{1u} da presión
 C_{1m} da caudal

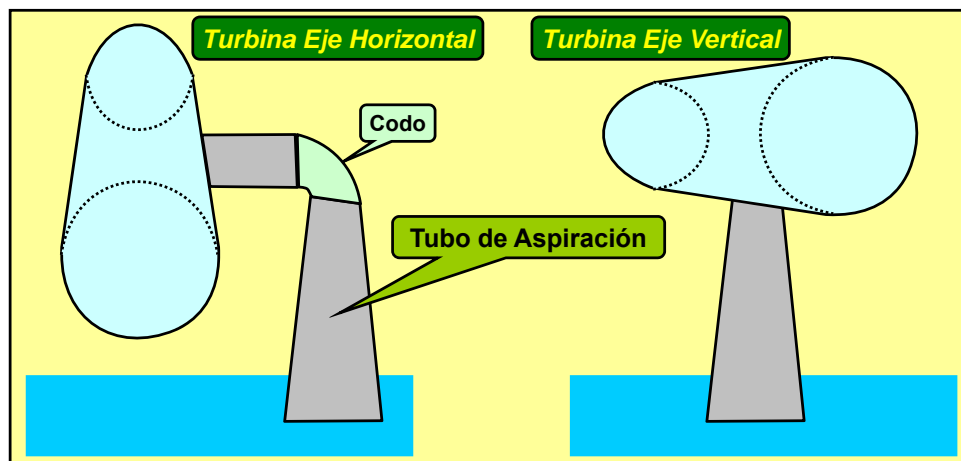


Componentes (V):

Tubo de Aspiración (I)

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

Adquiere más importancia con n_s altos



19

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%

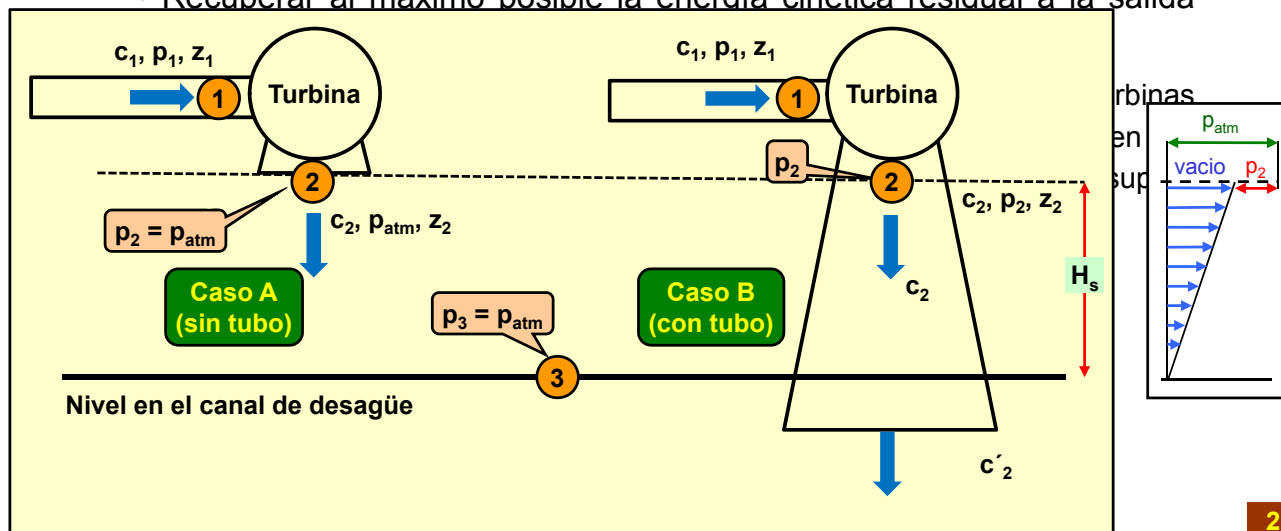
20

Componentes (V):

Tubo de Aspiración (II)

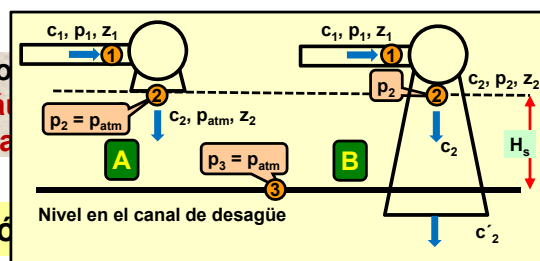
Sus funciones son:

- 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



Componentes (V):

Tubo de Aspiración (II)



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

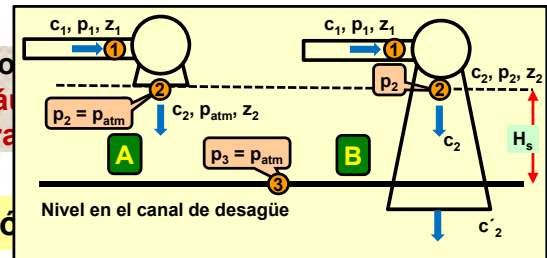
$$\left(\frac{c_{ent}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{ent}}{\rho \cdot g} + z_{ent} \right) - H_{Turbina} - h_{Loss} = \left(\frac{c_{sal}^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{sal}}{\rho \cdot g} + z_{sal} \right)$$

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

energía perdida en el tubo de aspiración



Componentes (V):

Tubo de Aspiración

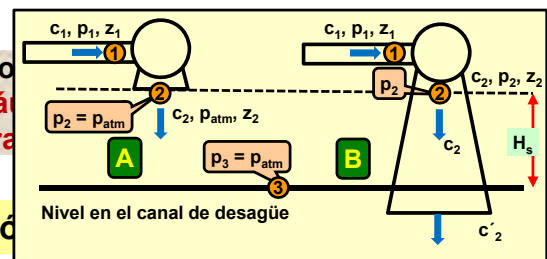
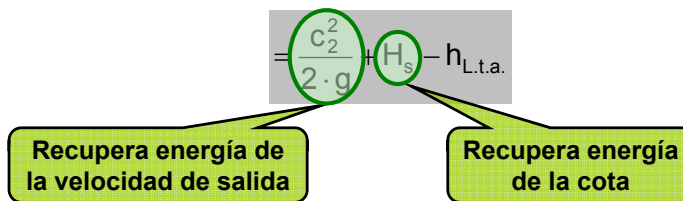
La ganancia de energía al instalar el tubo de aspiración es:

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

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

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

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



Componentes (V):

Tubo de Aspiración

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

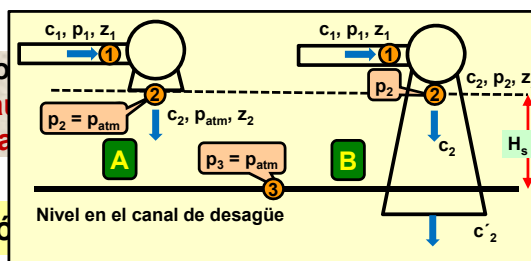
- Por fricción en tubo
El tubo se diseña de modo que sean lo más reducidas posibles $h_{L.F.t.a.}$

- 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

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

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

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

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

Expresado en presión relativa

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

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

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

p2 es negativa vacio

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



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)

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:

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

$$f_2(n_s) = \frac{c_2^2}{2 \cdot g \cdot H_n} = \phi_2^2$$

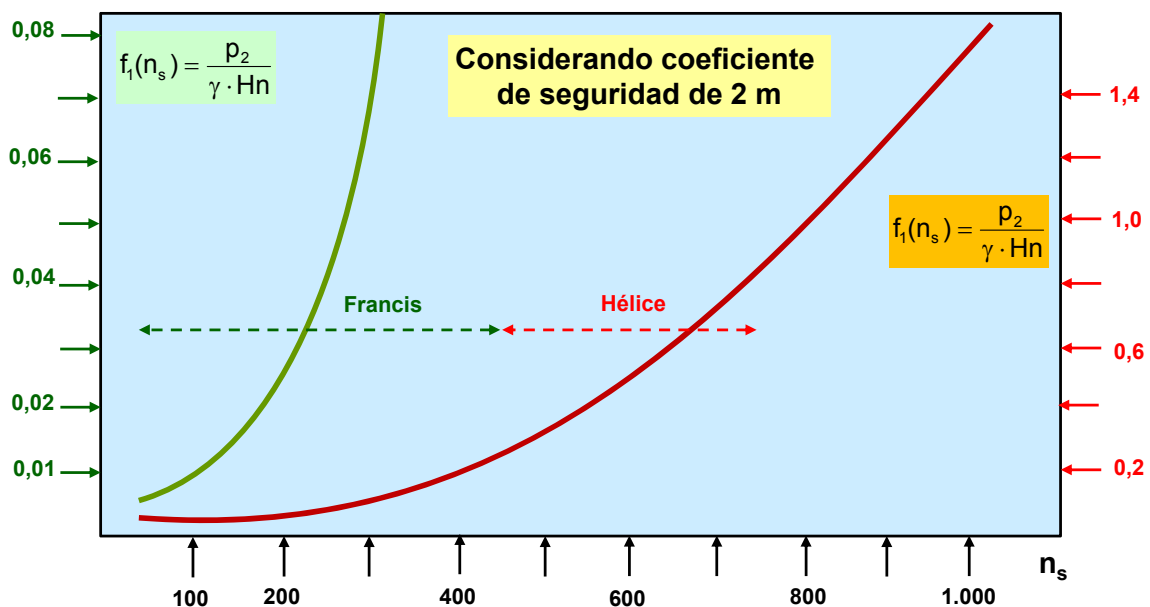
Componentes (V):

Tubo de Aspiración (VIII)

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

Consideraciones Prácticas (II)

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



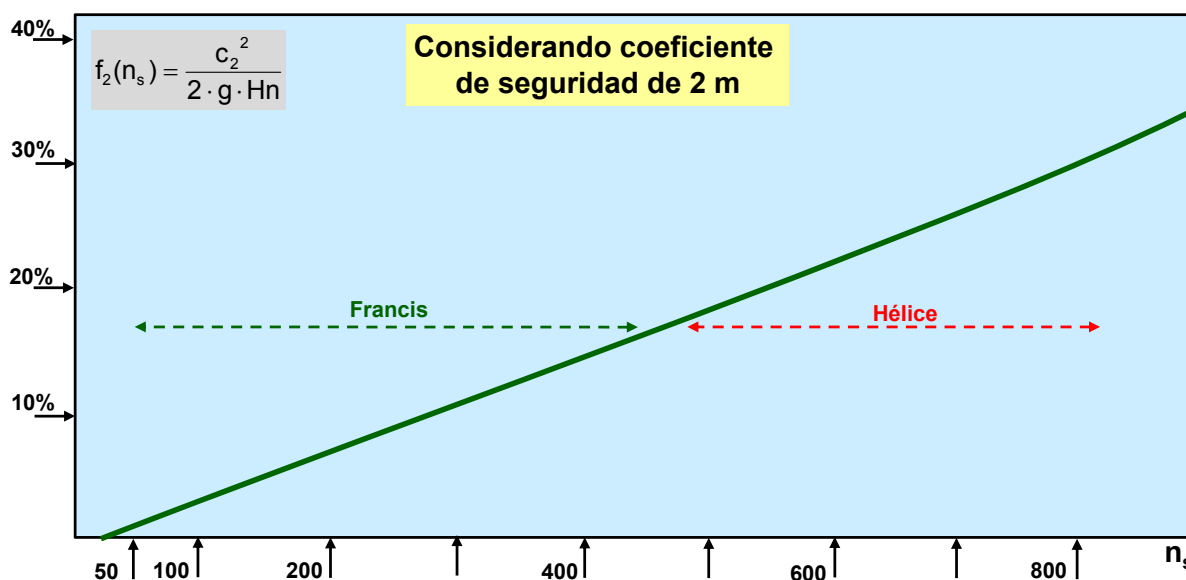
Componentes (V):

Tubo de Aspiración (VIII)

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

Consideraciones Prácticas (III)

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



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

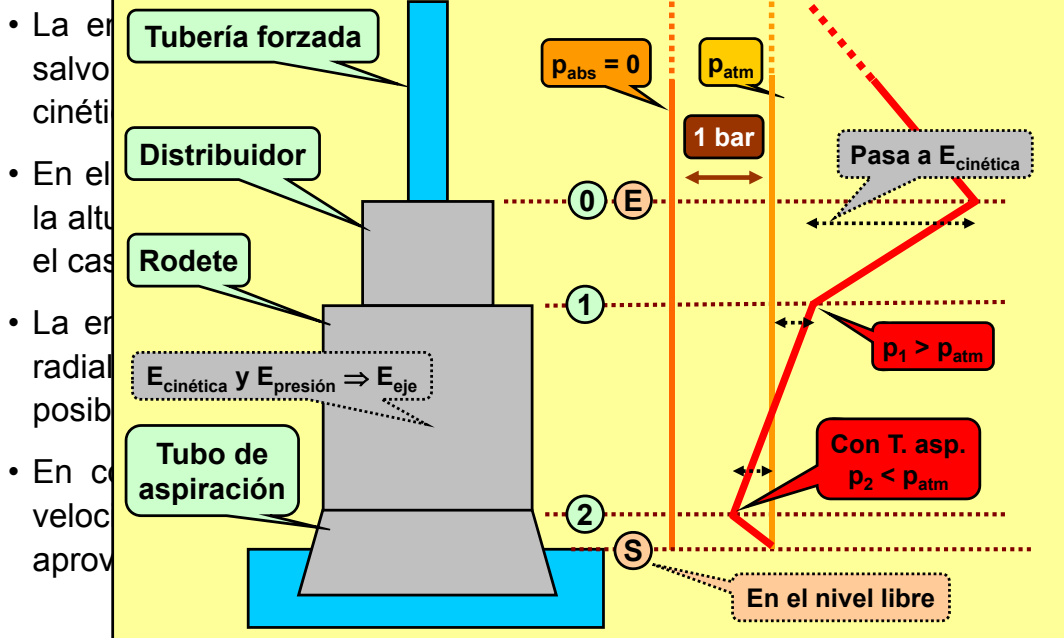
Funcionamiento de una T. Francis

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

- La energía 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 T. Francis

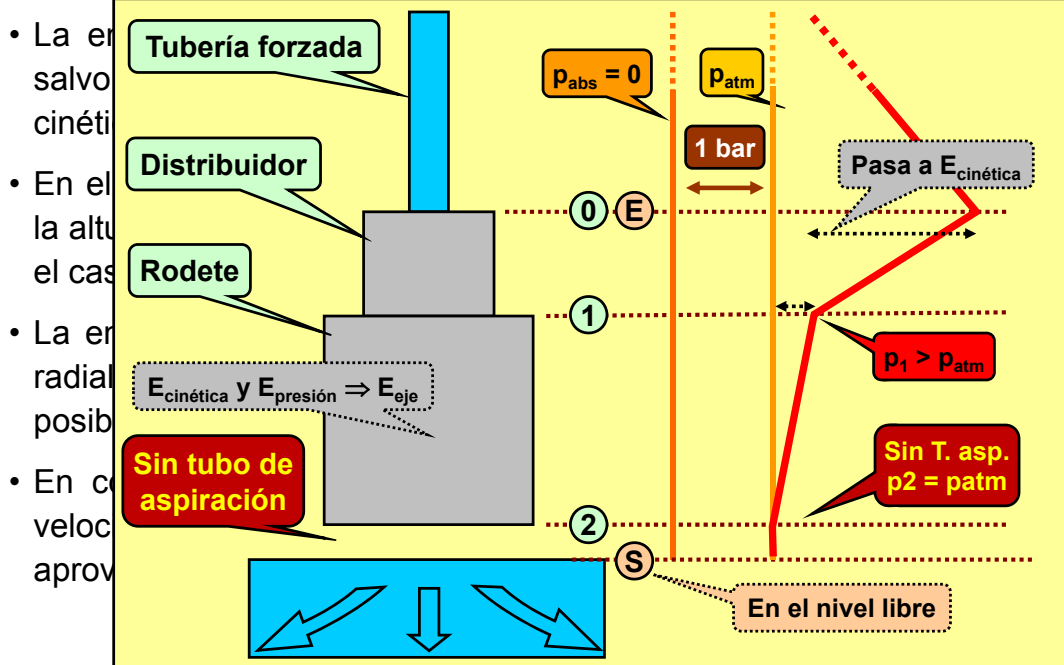
La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente:



- 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 T. Francis

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



Parámetros de Diseño (I)

Teniendo en cuenta los coeficiente óptimos de velocidad, se obtiene una expresión del número específico de revoluciones en función de las características de la turbina

$$Q = c_{1m} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot b_1 = k_{1m} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot b_1$$

$$Q = 13,91 \cdot k_{1m} \cdot \sqrt{H_n} \cdot D_1 \cdot b_1$$

$$Pot = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta}{735} = 0,1855 \cdot \rho \cdot k_{1m} \cdot \sqrt{H_n^3} \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \eta$$

$$Pot = 185,5 \cdot k_{1m} \cdot \sqrt{H_n^3} \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \eta$$

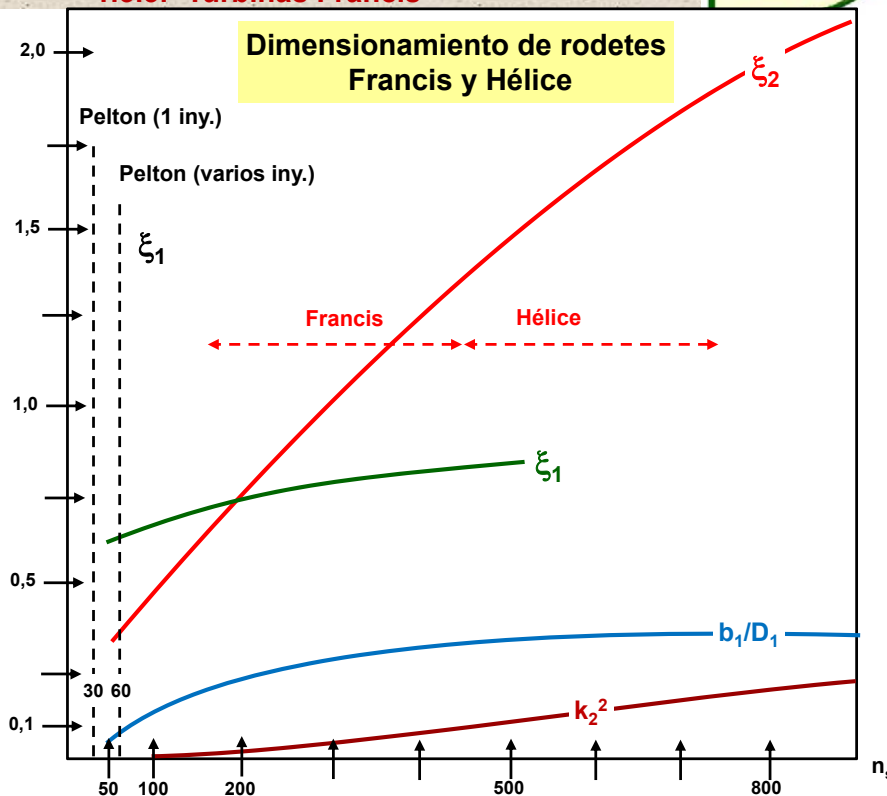
$$u_1 = \xi_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60}$$

$$n = 84,55 \cdot \frac{\xi_1}{D_1} \cdot \sqrt{H_n}$$

$$n_s = n \cdot \frac{Pot^{1/2}}{Pot^{5/4}} = \frac{84,55 \cdot \frac{\xi_1}{D_1} \cdot \sqrt{H_n} \cdot \sqrt{185,5 \cdot k_{1m} \cdot \sqrt{H_n^3} \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot \eta}}{H_n^{5/4}}$$

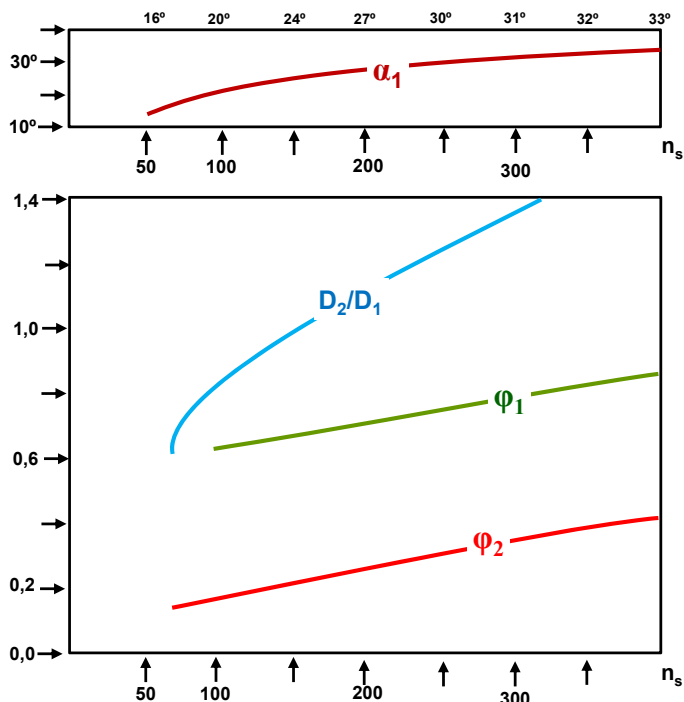
$$n_s = 1.150 \cdot \xi_1 \cdot \sqrt{k_{1m} \cdot \frac{b_1}{D_1} \cdot \eta}$$

Parámetros de Diseño (II)



Parámetros de Diseño (III)

Dimensionamiento de distribuidor para turbinas Francis



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
- Alturas neta y útil
- Rendimientos hidráulico y total
- Caudal
- Potencias interna y al freno

Una turbina Francis funciona con un caudal de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ a 500 rpm bajo un salto neto de 256 m. Si su $\eta_{\text{Vol}} = 1$, determinar:

- n_s , η_{man} , el grado de reacción, D_1 y D_2
- La altura del tubo de aspiración si su rendimiento es el 85%