

Turbinas Hidráulicas

Turbomáquinas Hidráulicas CT-3411

Prof. Jesús De Andrade

Prof. Miguel Asuaje



Turbina Pelton

Descripción,
Clasificación, Dimensionamiento y
Curvas Características



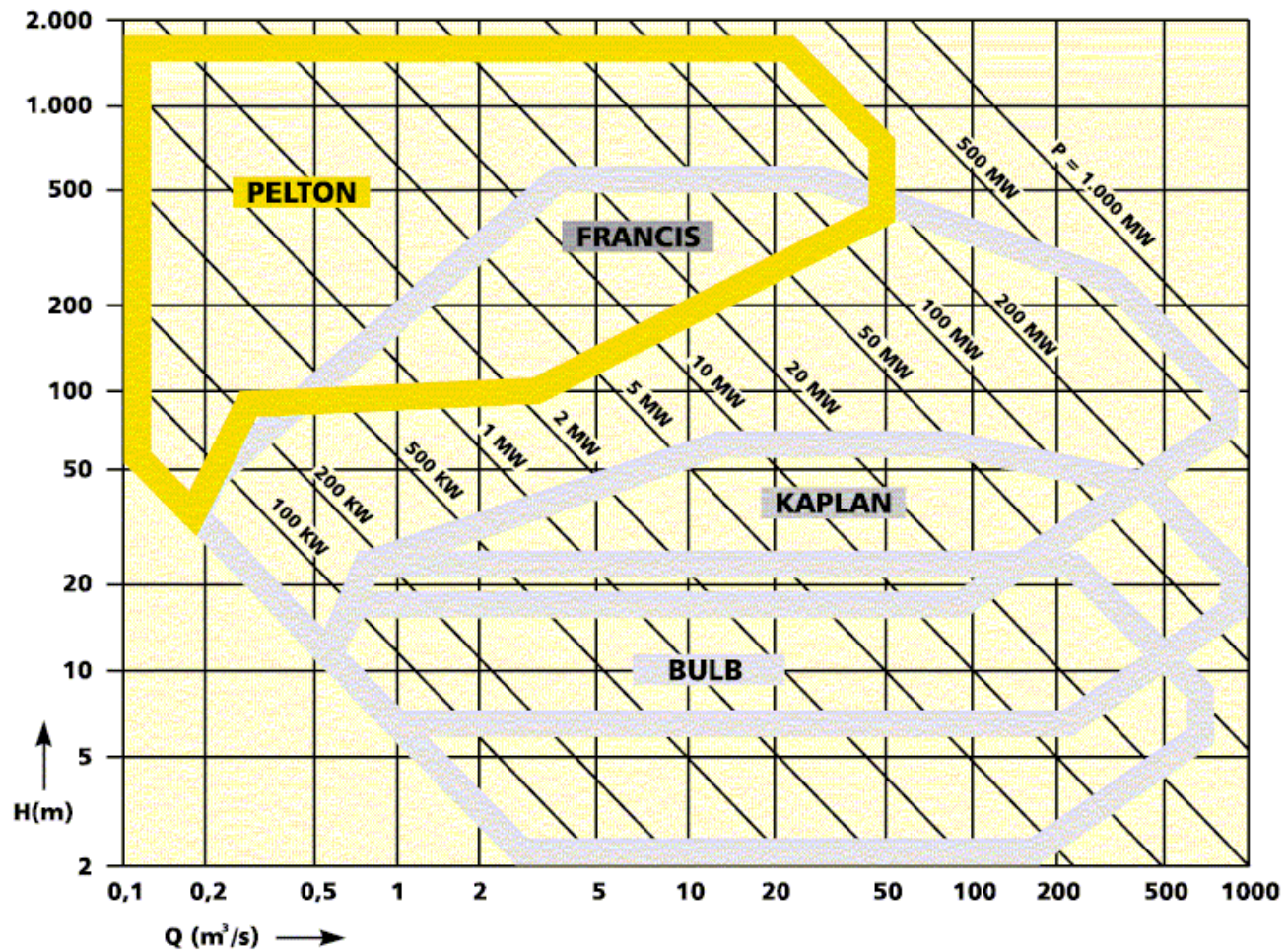
Turbina Pelton

Características Generales

- Turbina de acción.
- Flujo Tangencial (turbina de chorro)
- Saltos netos entre 50 y 2000 m
- Rango de n_s : 8 a 66
- Sobre los 800 m es la única turbina aplicable
- $P_{\text{máx.}} = 423 \text{ Mw.}$ (Cleuson Dixence 1995) Suiza.
- Puede utilizar múltiples chorros (6) lo que permite aumentar la potencia.
- No existe peligro de cavitación
- Problema de erosión (erosión por las gotas de agua y sólidos en suspensión)

Turbina Pelton

Campo de Aplicación

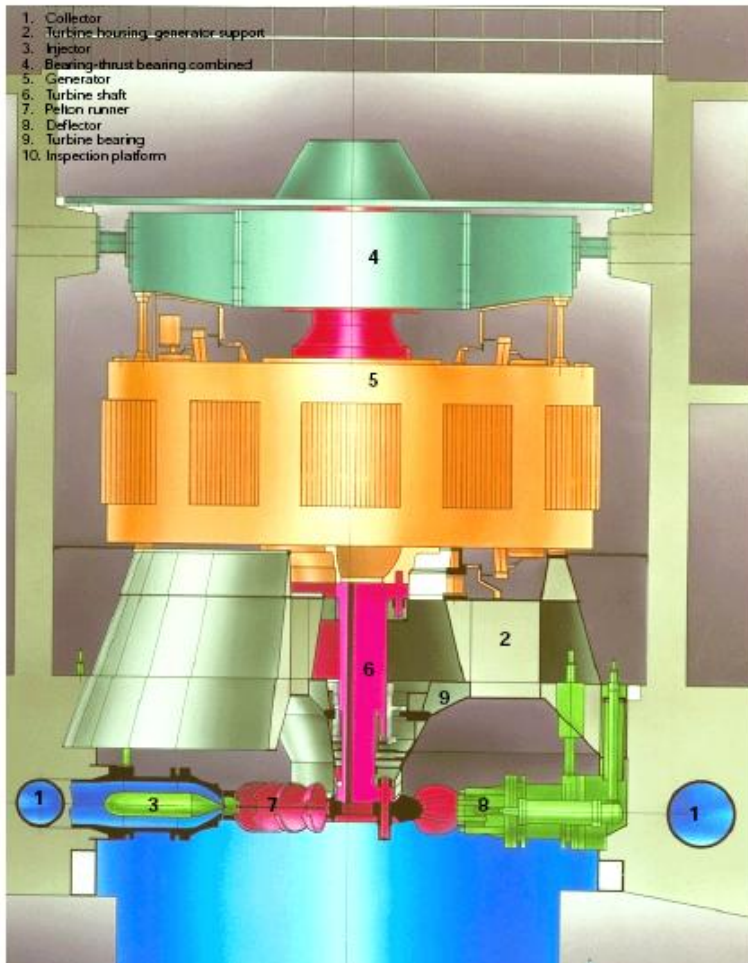




Descripción TP

Turbina Pelton

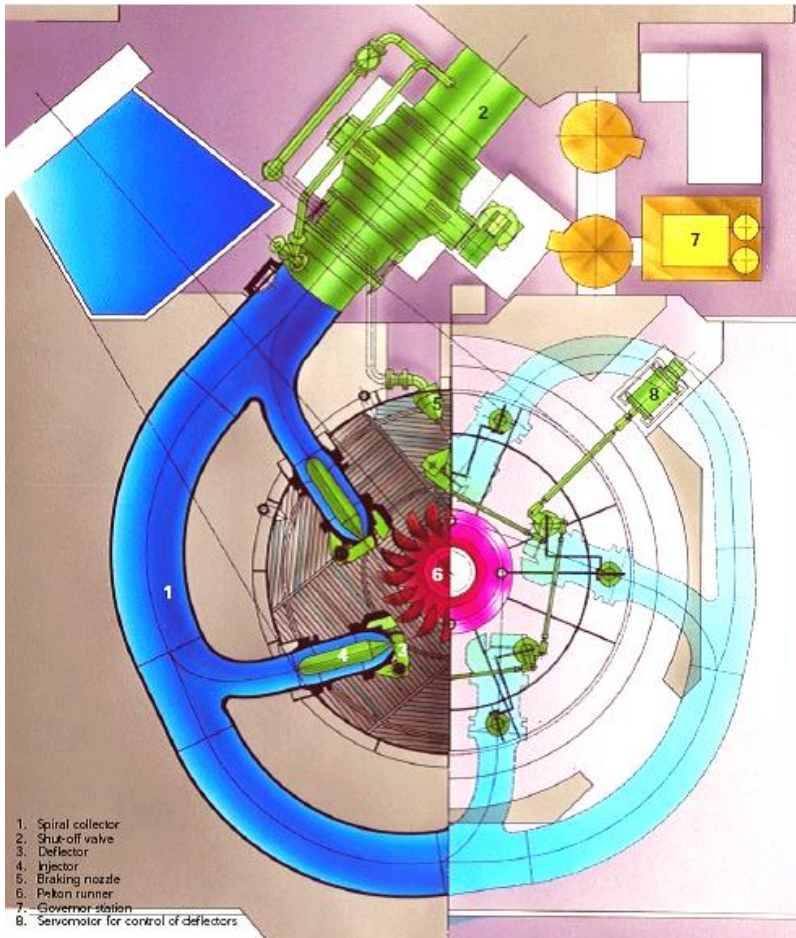
Principales partes:



1. Colector espiral
2. Carcasa y soporte del generador.
3. Inyector (Tobera + Válvula aguja)
4. Cojinete radial y de empuje axial
5. Generador
6. Eje
7. Rodete
8. Deflector
9. Cojinete turbina

Turbina Pelton

Principales partes:

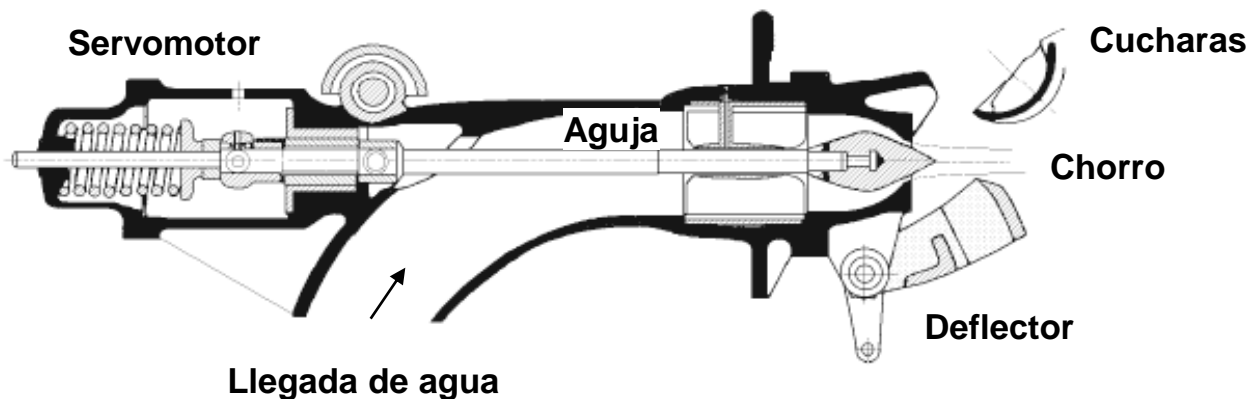


1. Colector espiral
2. Válvula de admisión.
3. Deflector
4. Inyector (Tobera +Válvula aguja)
5. Chorro de freno
6. Rodete
7. Sistema gobernador
8. Servomotor de los deflectores

Turbina Pelton

Inyector

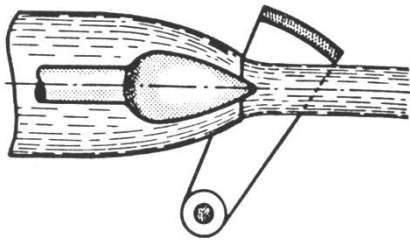
Elemento que transforma la energía de presión en energía cinética. Regula el caudal de la máquina. Consta de una tobera y una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo. Para poder asegurar el cierre, el diámetro máximo de la aguja tiene que ser superior al de salida del chorro, cuyo diámetro **do** se mide en la sección contraída, situada aguas abajo de la salida del inyector y en donde se la presión exterior es igual a la atmosférica.



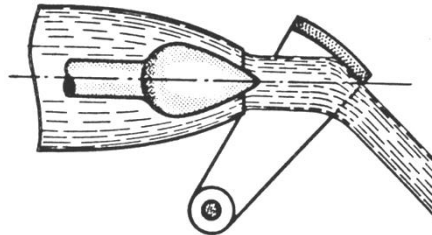
Turbina Pelton

Deflector:

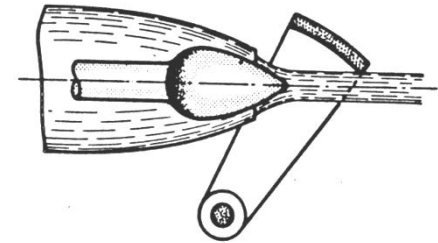
Cuando la carga disminuye bruscamente debe cerrarse el chorro para que no se embale la TP. Para ello se introduce un deflector en medio del chorro, dividiéndolo y desviando una parte del mismo, de forma que en vez de dirigirse contra las cucharas, sale lateralmente sin producir ningún efecto útil. De esta manera se evita un golpe de ariete y se cierra lentamente la válvula aguja.



En carga normal



En carga alterada

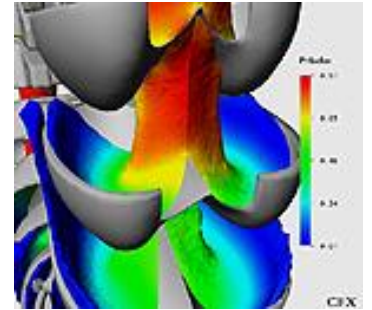


En carga reducida

Turbina Pelton

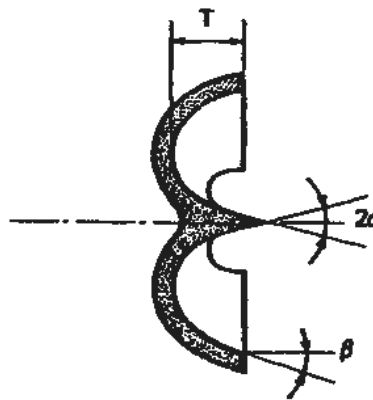
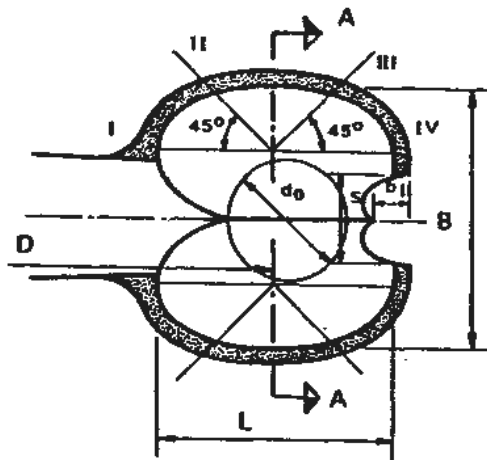
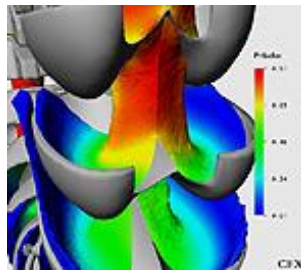
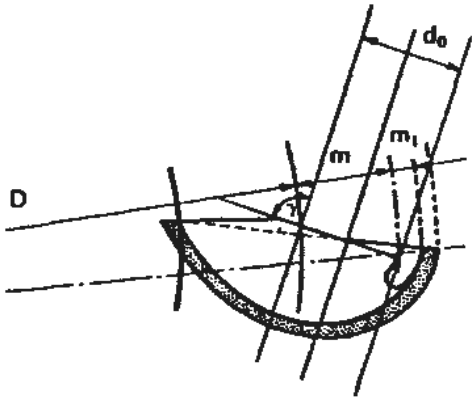
Rodete:

Sitio donde se realiza la Transferencia de energía.



Turbina Pelton

Cucharas:



Sección A-A

Relaciones empíricas y valores regulares para una TP:

S:	(1.10 - 1.20)d ₀
B:	(2.80 - 3.20)d ₀
L:	(2.30 - 2.80)d ₀
T:	(0.60 - 0.90)d ₀
m:	(0.95 - 1.05)d ₀
m ₁ :	(0.18 - 0.20)d ₀
γ:	(96° - 105°)
β ₁ :	(5° - 7°)
β ₂ :	(1° - 40°)





Clasificación TP

Según posición del eje y
número de chorros



Turbina Pelton

Clasificación

Según posición del eje:

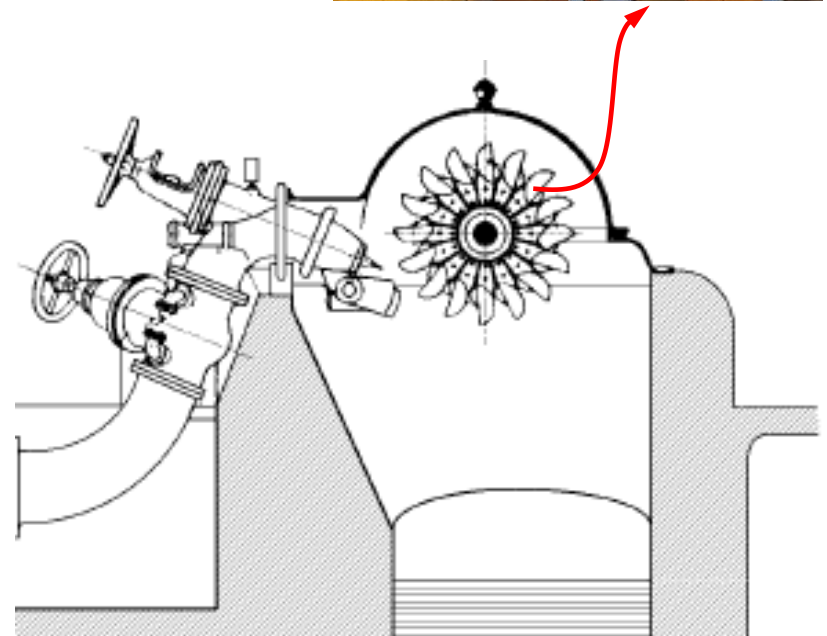
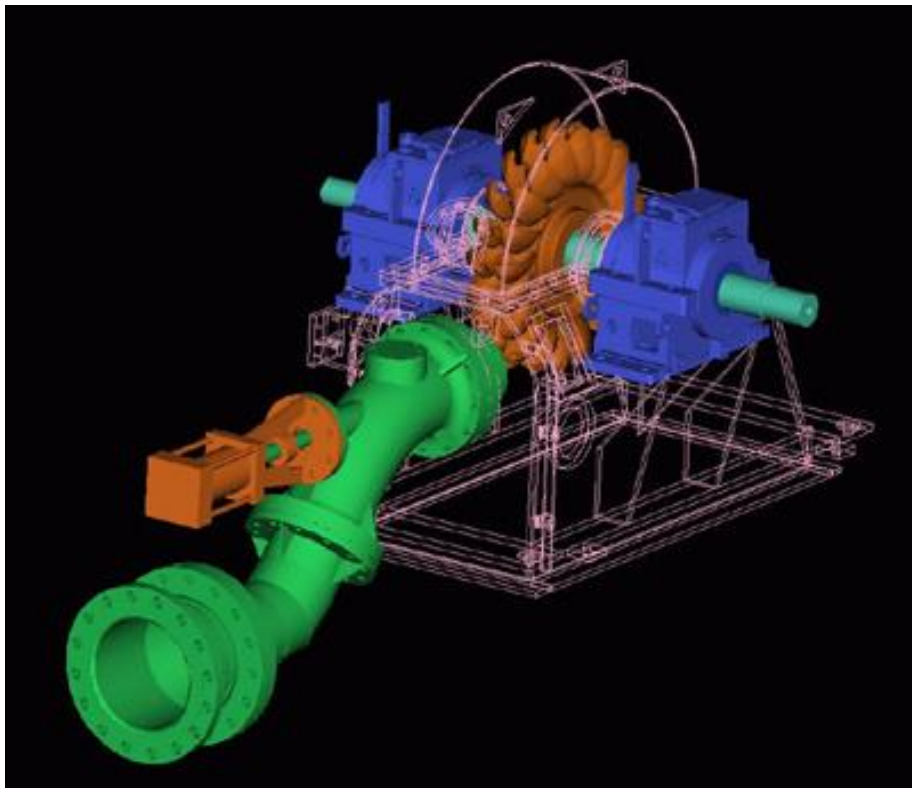
- Vertical: puede alojar mayor número de chorros.
- Horizontal: sólo puede tener dos chorros por la forma de la carcasa.

Según número de chorros y de rodetes:

Denominación	# Rodetes	# Chorros
Doble	1	2
	2	1 c/u
Triple	1	3
Cuádruple	1	4
	2	2 c/u
Quíntuple	1	5
Séxtuple	1	6
	3	2 c/u

Turbina Pelton

Simple de eje Horizontal

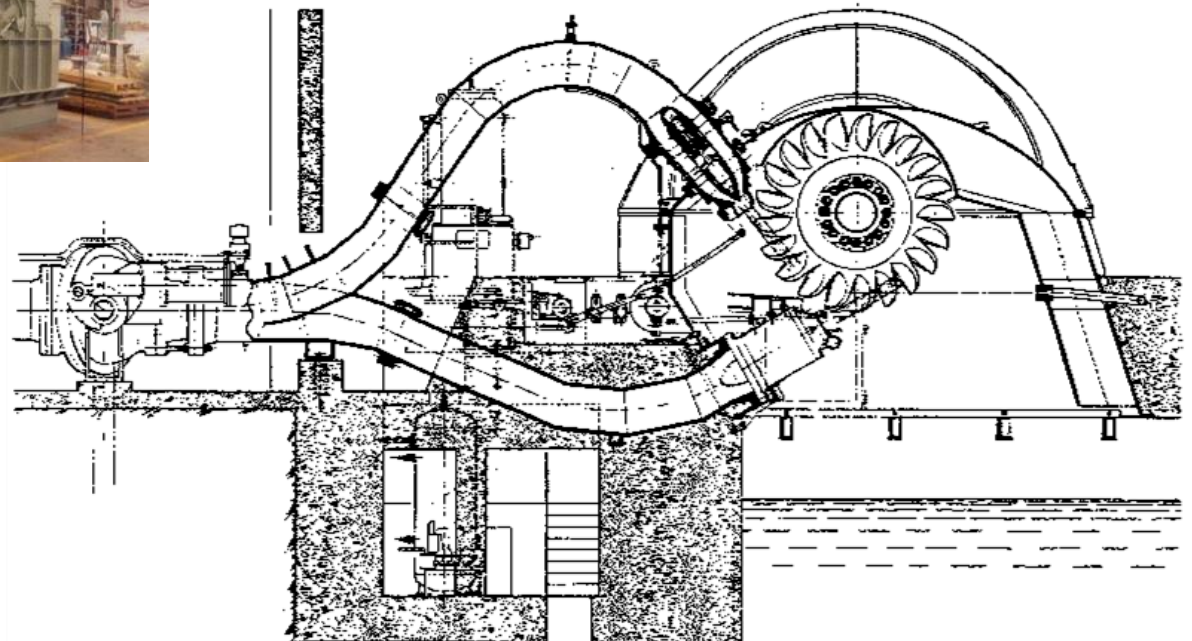


Turbina Pelton

Doble de eje Horizontal



$H_n =$	795	785	765	m
$Q =$	9,18	9,0	9,00	m^3/s
$P =$	64.400	62.700	60.800	Kw.
$n =$	428rpm			



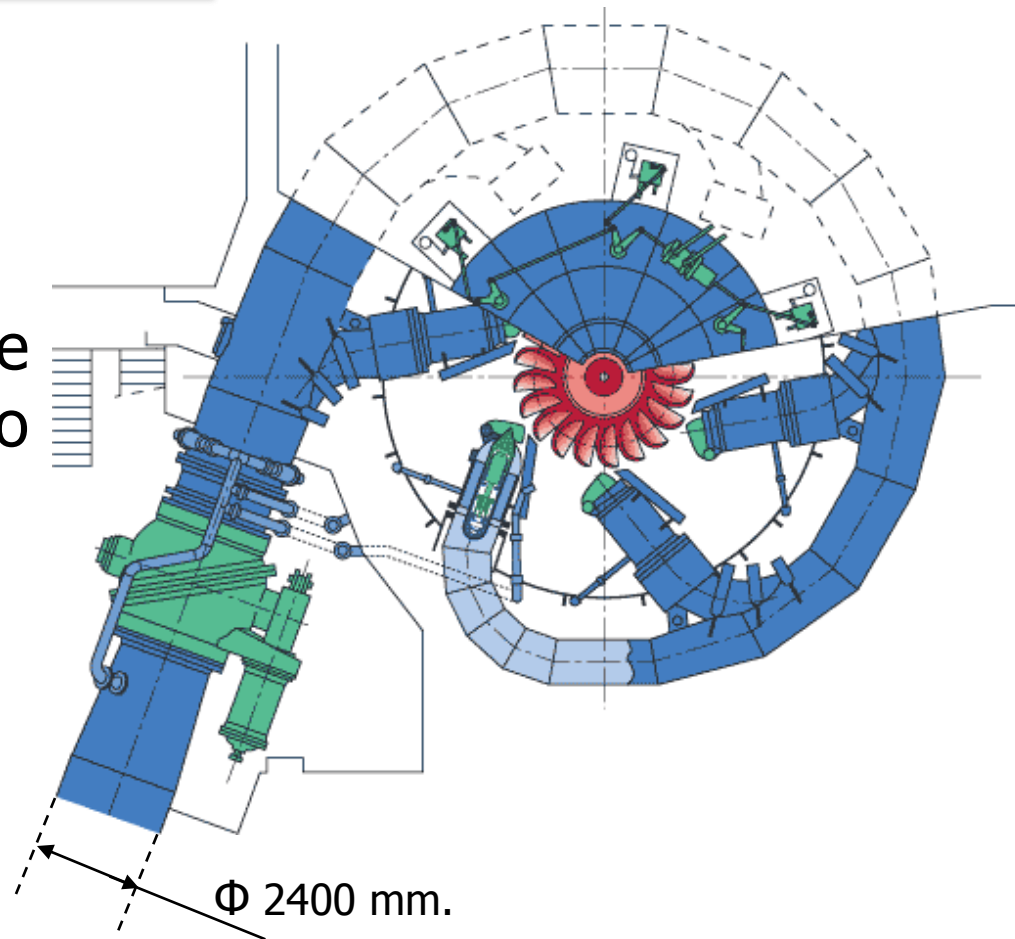
Turbina Pelton

Séxtuple de eje Vertical

Restitución

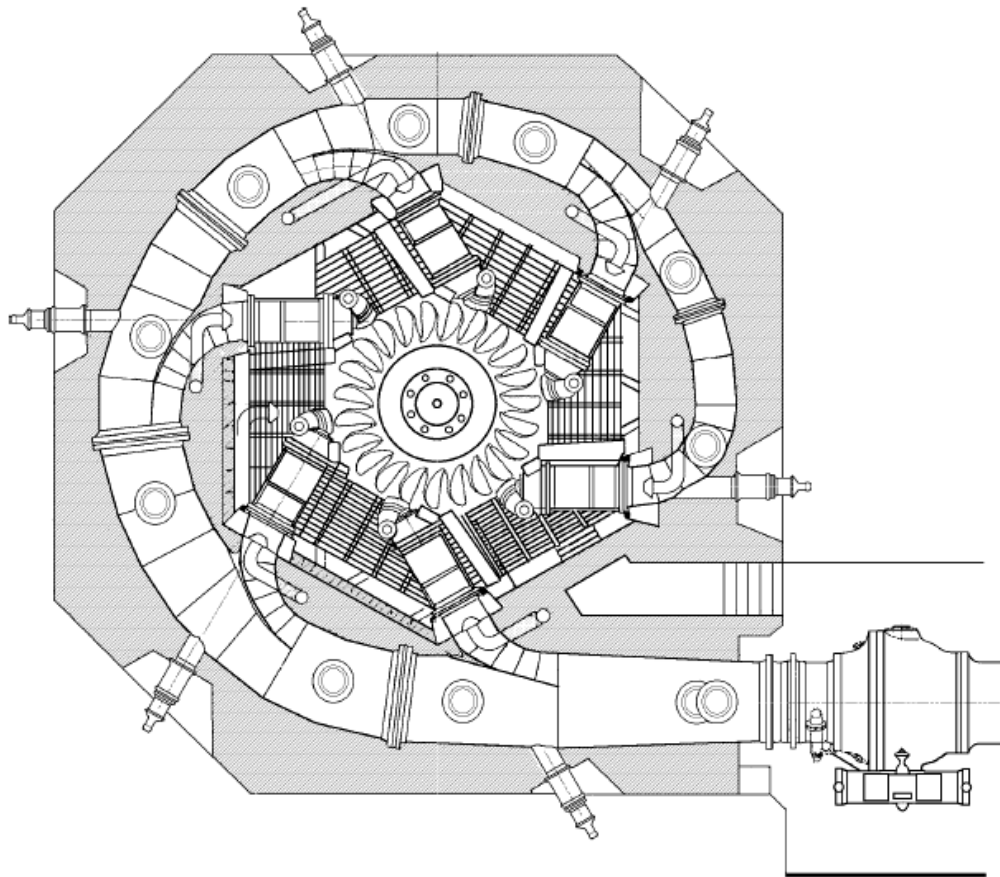
Electroperu, Lima, Perú.

Distribuidor de entrada de mayor tamaño, diámetro tubería: 2400 mm.



Turbina Pelton

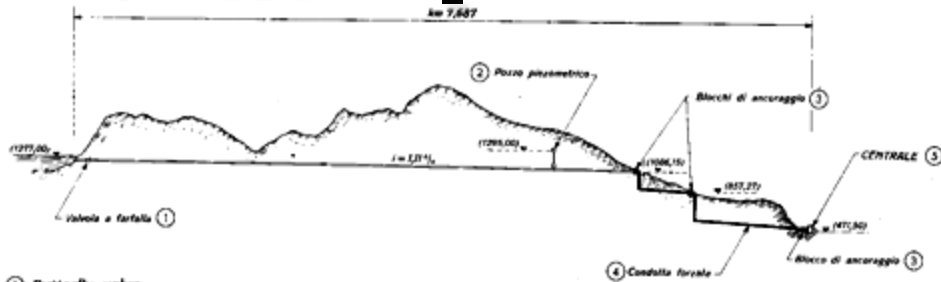
Séxtuple de eje Vertical



Turbina Pelton

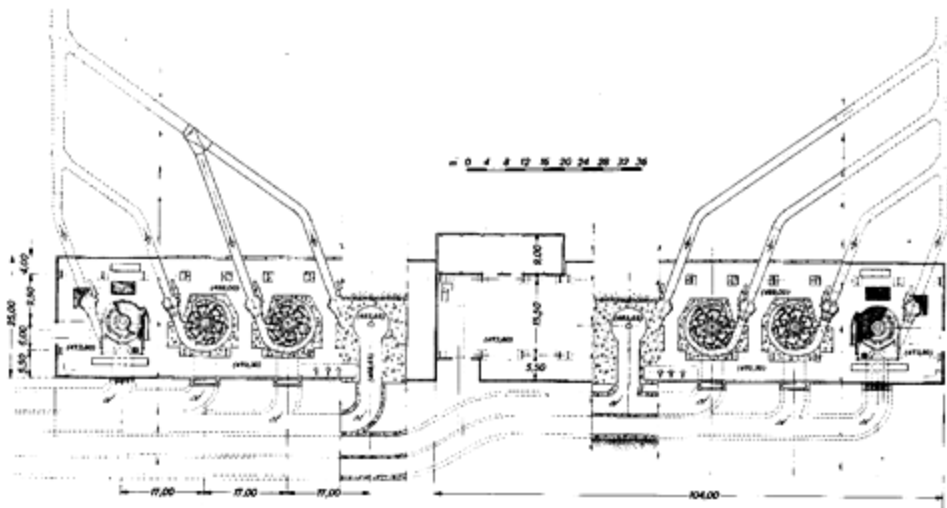
Central de Chivor (Colombia)

8 x 151 MW

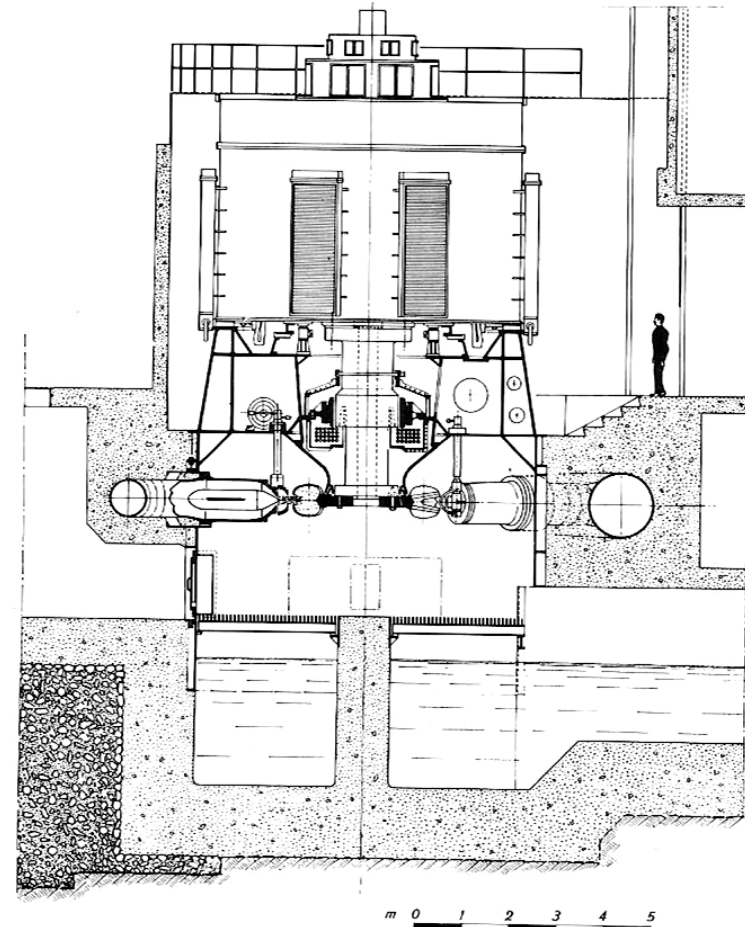


- ① Butterfly valve
- ② Surge tank
- ③ Anchoring-blocks
- ④ Penstock
- ⑤ Power house

▲ Profilo schematico
Schematic profile



Centrale - Sezione orizzontale
Power house - Horizontal section



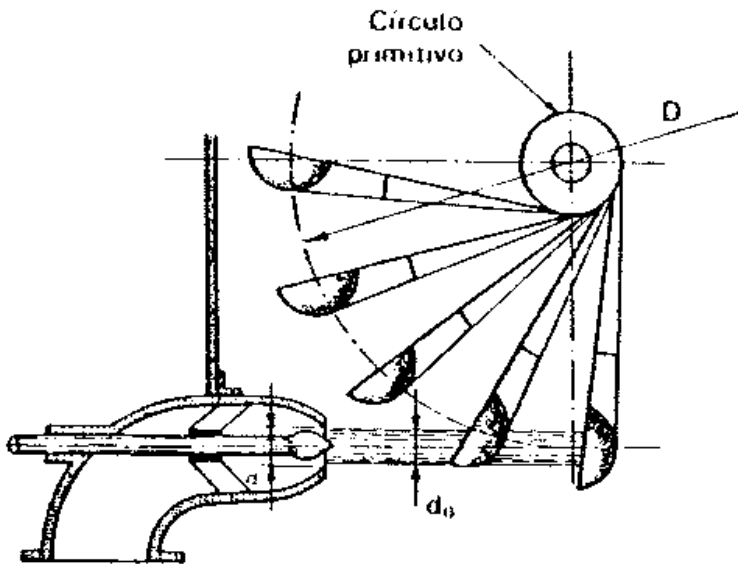


Campo de Aplicación TP

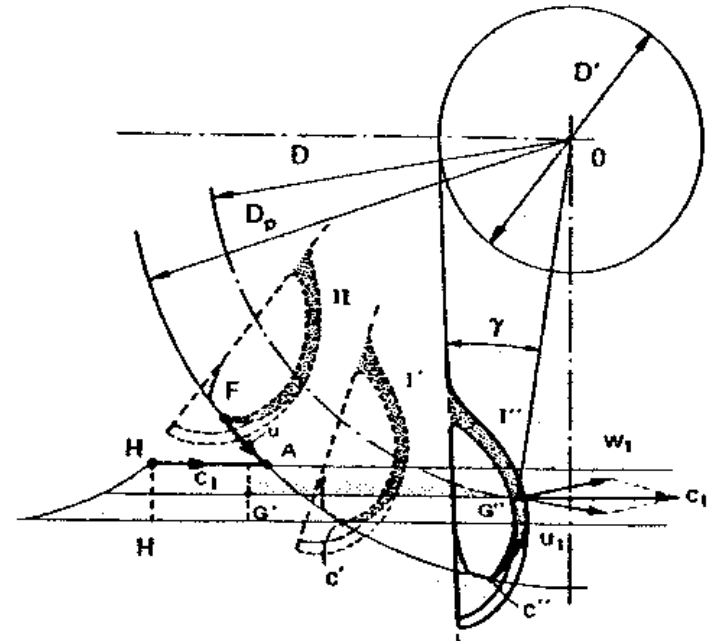
Triángulos de velocidad
Velocidad específica de giro

Turbina Pelton

Instalación de la cucharas

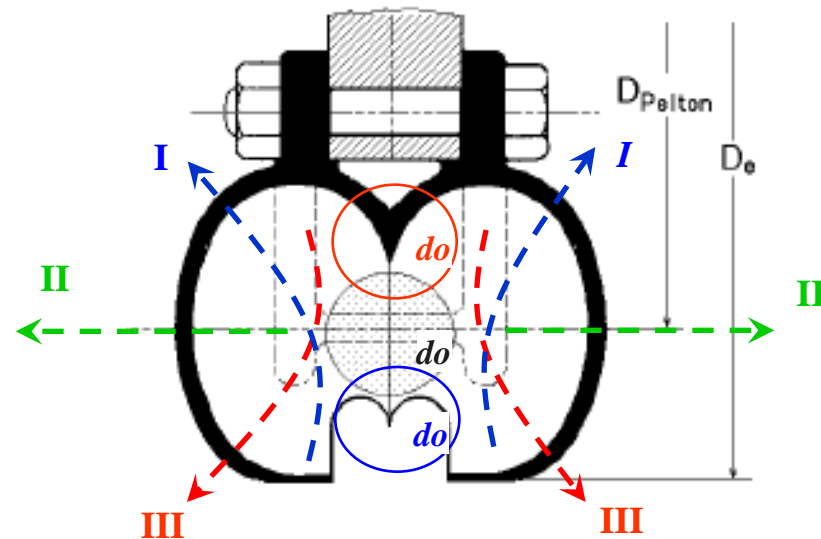
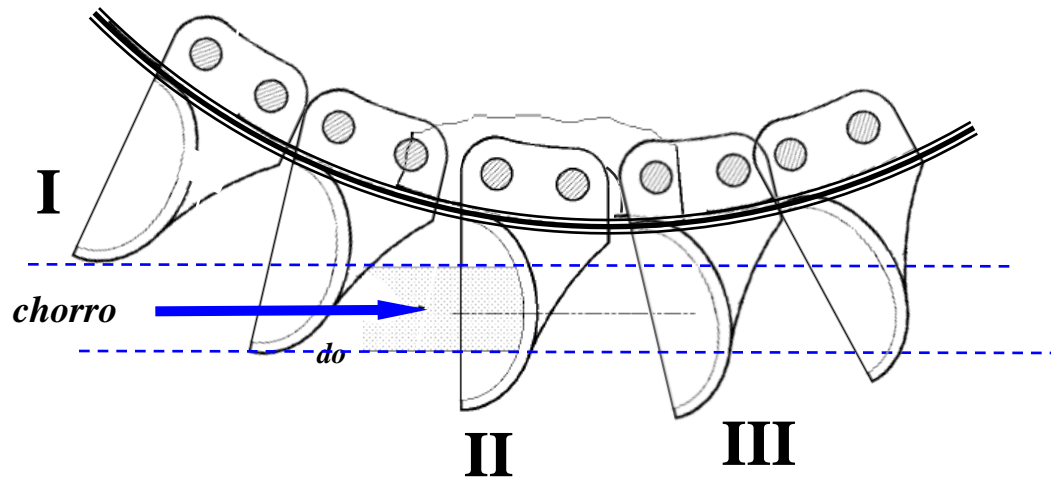


Círculo primitivo de
orientación de las
cucharas



Orientación de las cucharas

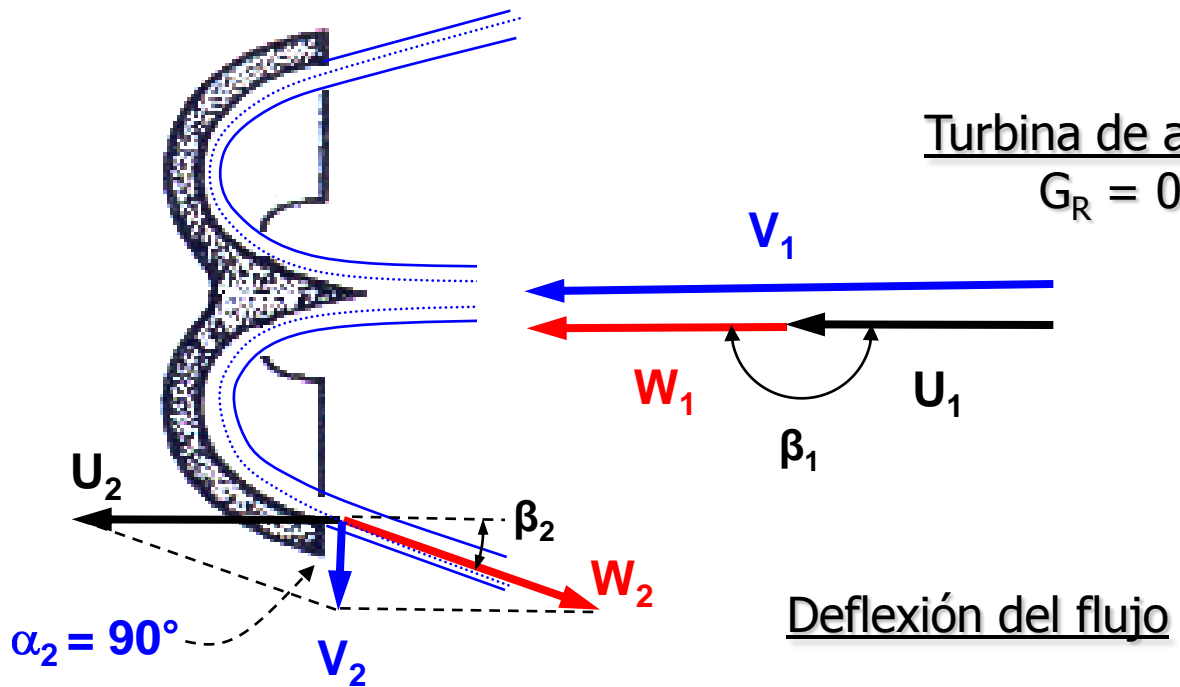
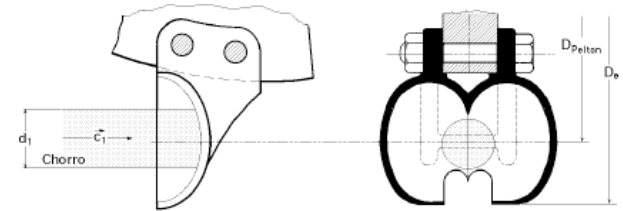
Turbina Pelton



Turbina Pelton

Triángulo de velocidades

Se asume que el chorro ataca la cuchara a un mismo diámetro constante \longrightarrow



$$U_1 = U_2 = U$$



$$W_1 = W_2$$

$$\beta_1 = 180^\circ$$

$$\beta_2 = 15^\circ$$

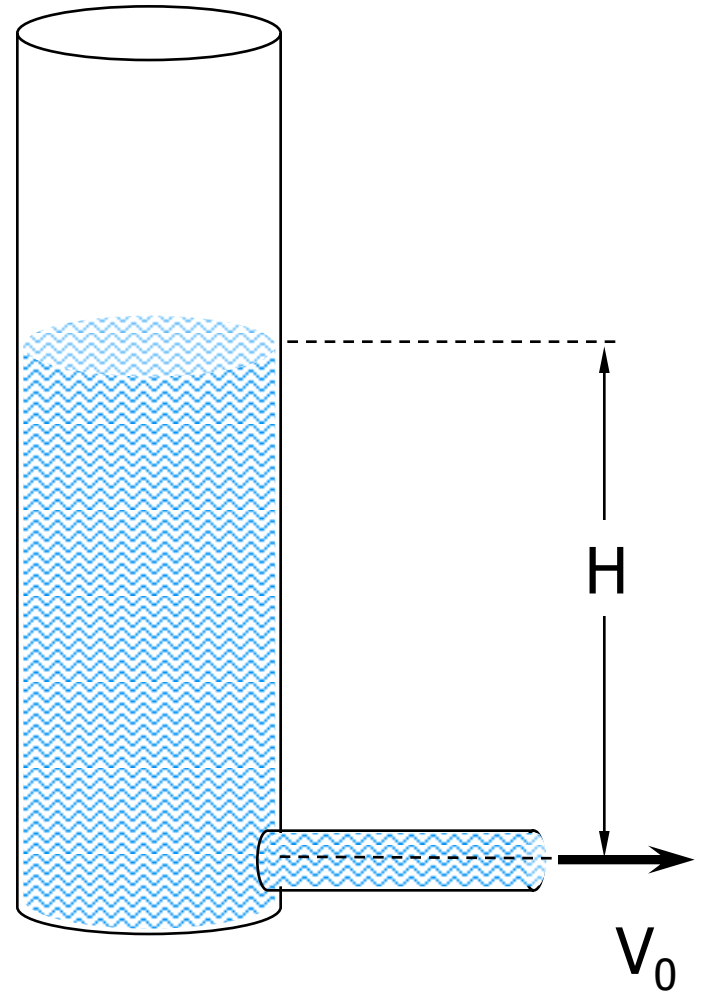
$$\theta = \beta_1 - \beta_2 = 165^\circ$$

Turbina Pelton

Rendimiento del Inyector

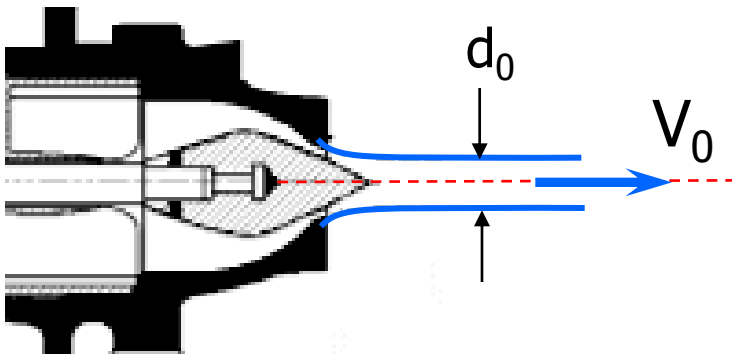
$$\eta_i = \frac{V_0^2}{2gH}$$

$$V_0 = K_{v0} \sqrt{2gH} \Rightarrow K_{v0} = \sqrt{\eta_i}$$



Turbina Pelton

Rango de aplicación de la Turbinas Pelton



$$n_s = \frac{n \sqrt{P_m}}{H^{5/4}} = \sqrt{\eta \frac{\rho g}{A}} \cdot N_{11} \cdot \sqrt{Q_{11}}$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$$

$$Q = M \cdot Q_1$$

$$Q_1 = V_0 \cdot A_0 = K_{V_0} \cdot \sqrt{2gH} \cdot \frac{\pi d_0^2}{4}$$

Donde:

Q caudal total.

Q_1 caudal de cada inyector

M número de inyectores

K_{V_0} Coeficiente de velocidad (0,96 ... 0,98)



Turbina Pelton

Sustituyendo se tiene:

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \longrightarrow Q_{11} = M \frac{\pi \cdot K_{v0} \cdot \sqrt{2g}}{4} \delta^2$$

Donde: $\delta = \frac{d_0}{D}$

Velocidad específica de giro N_{11} :

$$N_{11} = \frac{n D}{\sqrt{H}} = \frac{60}{\pi} \sqrt{2g} \cdot K_{U1}$$



Turbina Pelton

Para máxima utilización de la energía disponible ($\varepsilon_{\text{máx}}$):

$$U_1 = \frac{1}{2} V_1 \cos \alpha_1 \Rightarrow K_{U_1} = \frac{K_{V_1}}{2} \cos \alpha_1$$

$$K_{V_1} = \frac{V_1}{\sqrt{2gH}} \quad V_1 = V_0$$

Potencia mecánica de la turbina:

$$P_m = \eta \frac{\rho g \cdot Q \cdot H}{A}$$

ρ kg/m^3

$[H]$ m

$[Q]$ m^3/s

$[P_m]$ CV

$A = 735,294$




Turbina Pelton

Velocidad específica de giro n_s

$$Q_{11} = M \frac{\pi \cdot K_{v0} \cdot \sqrt{2g}}{4} \delta^2$$

$$N_{11} = \frac{n D}{\sqrt{H}} = \frac{60}{\pi} \sqrt{2g} \cdot K_{U1}$$

$$P_m = \eta \frac{\rho g \cdot Q \cdot H}{A}$$


$$n_s = \sqrt{\eta \frac{\rho}{A}} \cdot \frac{60}{\sqrt{\pi}} \frac{g^{5/4}}{2^{1/4}} \cdot K_{U1} \cdot \sqrt{K_{v0}} \sqrt{M} \cdot \delta$$



Turbina Pelton

Para las condiciones de trabajo siguientes se tiene que:

$$K_{U1} = 0.45$$

$$K_{V1} = 0.97$$

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3$$

$$A = 735,3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\eta \geq 0.88$$

$$\longrightarrow n_s \cong 240 \cdot \sqrt{M} \cdot \delta$$

Rango óptimo de trabajo TP: $8 \leq n_s \leq 66$

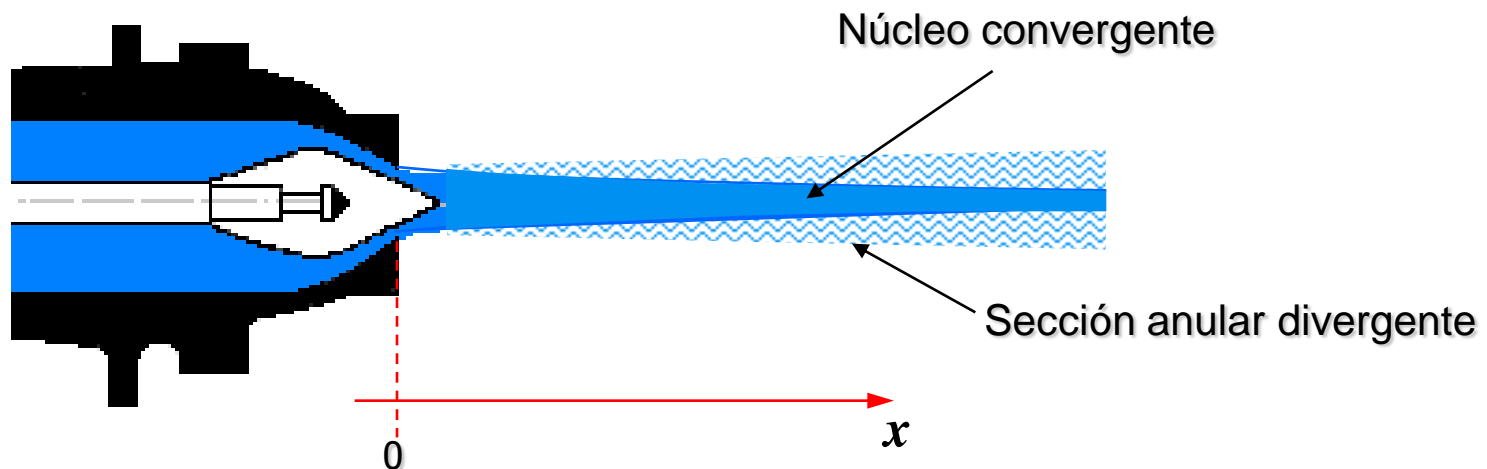
M = 1	δ	n_s
Límite mínimo mal rend. (86%)	1/100	2,4
Límite mínimo práctico (90%)	1/30	8
Límite máximo práctico (90%)	1/9	27
Límite máximo real (86%)	1/7	35

Turbina Pelton

Calidad del Chorro

$$\delta_0 \geq 1/30$$

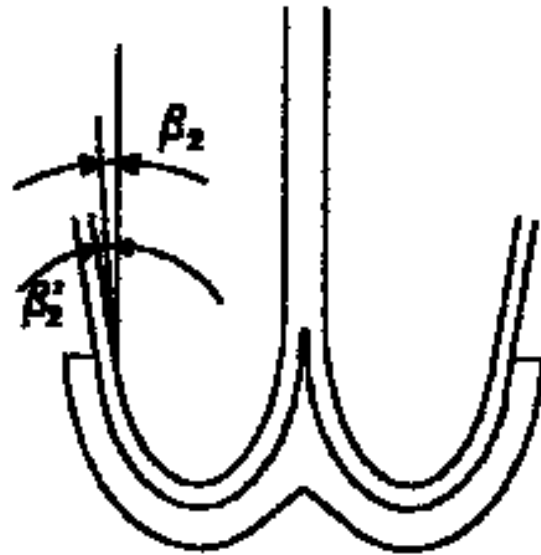
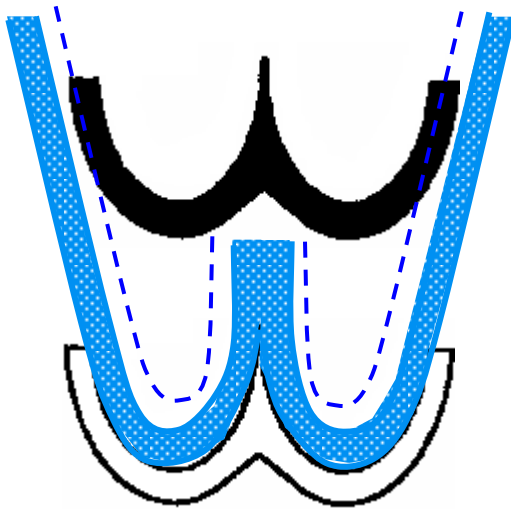
El chorro está constituido por un núcleo central convergente de agua y una sección anular creciente que contiene una emulsión de agua y aire. La calidad del chorro disminuye (mayor dispersión) al aumentar la distancia “ x ” respecto a la tobera.



Turbina Pelton

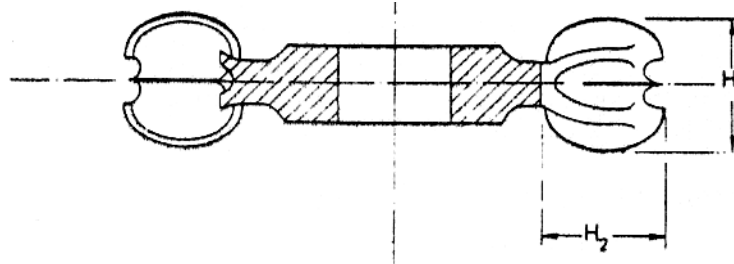
Limitación del chorro

$$\delta_0 \leq 1/7$$

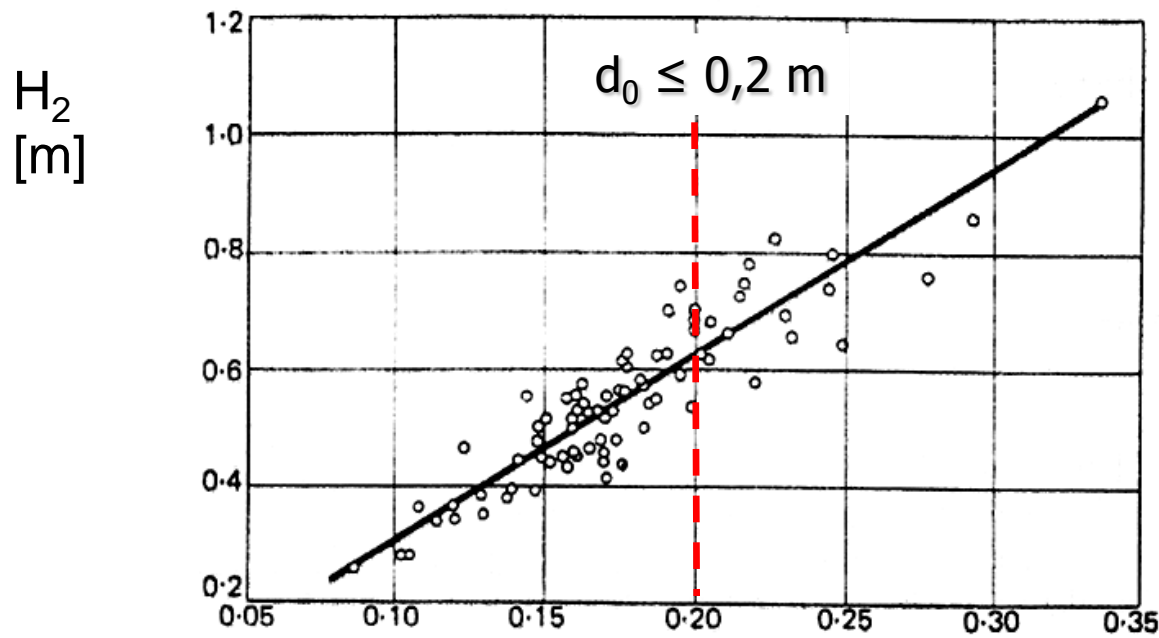


Al aumentar el espesor del chorro es necesario aumentar el ángulo β_2 para evitar el choque del agua con la parte posterior de la cuchara contigua. Por lo tanto existe un valor máximo para el diámetro del chorro, por encima del cual el rendimiento de la TP disminuye

Turbina Pelton



$d_0 \text{ máx.} = 200 \text{ mm.}$

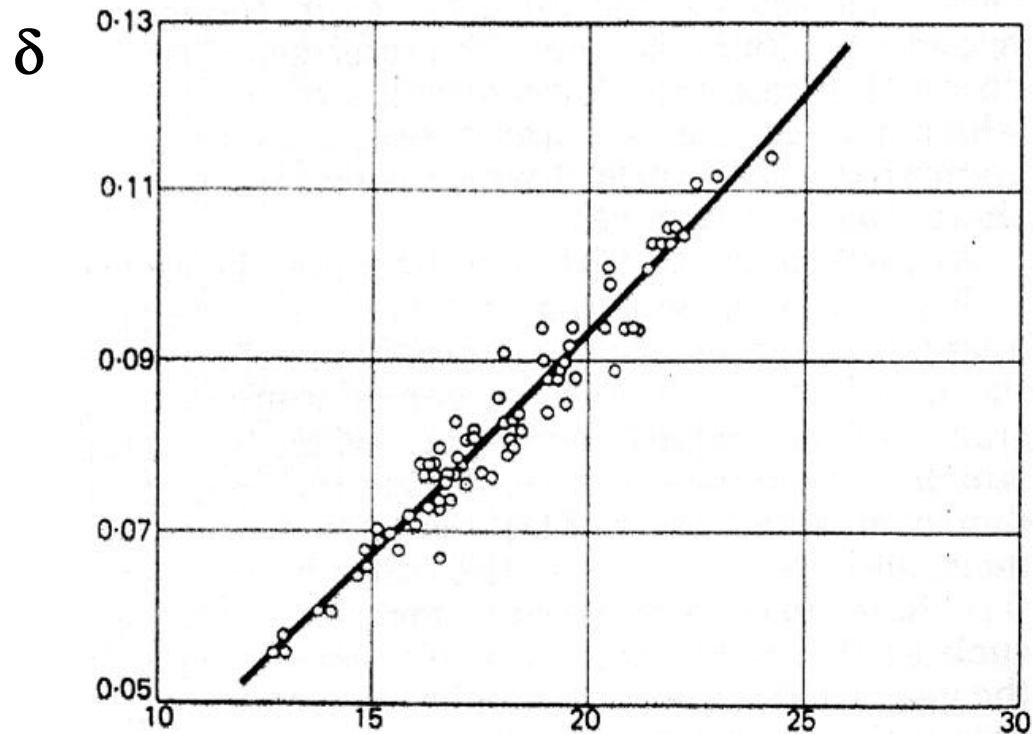


$100 \leq d_0 \leq 350 \text{ mm.}$

d_0 [m]

Turbina Pelton

Variación de δ vs. n_s



$$n_s \left[\frac{\text{rpm} \sqrt{\text{kW}}}{\text{m}^{1,25}} \right]$$



Turbinas Pelton

Dimensionamiento



Método analítico

Partiendo de los datos: P_H y H se calcula Q asumiendo una eficiencia $\eta \sim 90\%$. Con $d_{0 \text{ máx.}} = 200 \text{ mm}$ se calcula el caudal máximo por inyector

$$Q_{I \text{ máx}} = K_{V0} \frac{\pi \cdot d_{0 \text{ máx.}}^2}{4} \sqrt{2gH} \quad K_{V0} \approx 0,97$$

Número de inyectores necesarios:

$$M_{\text{calc}} = \frac{Q}{Q_{I \text{ máx}}}$$

Se aproxima por exceso $M = M_{\text{cal}} + 1$ y se recalcula d_0 :

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot M \cdot K_{V0} \sqrt{2gH}}}$$



Método analítico

El diámetro característico “D” se determina a partir de:

$$\left. \begin{aligned} K_{U_1} &= \frac{U_1}{\sqrt{2gH}} \\ U_1 &= \frac{\pi n D}{60} \end{aligned} \right\} \rightarrow D = \frac{60 \cdot K_{U_1} \cdot \sqrt{2g} \sqrt{H}}{\pi n} \quad K_{U_1} = 0,45$$

Se escoge una velocidad de giro n sincrónica: $n = \frac{3.600}{N_{PP}}$

de manera que: $\frac{1}{30} \leq \frac{d_0}{D} \leq \frac{1}{7}$

Nota: Las velocidades de giro “n” más frecuentes para 60 Hz son 600, 450, 360 y 300 rpm correspondientes a de 6, 8, 10 y 12 pares de polos (N_{PP})



Método analítico

El número de cucharas se puede estimar a partir de la tabla a continuación:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P_m}}{H^{5/4}} \left[\frac{\text{rpm} \cdot \sqrt{CV}}{m^{5/4}} \right]$$

Número específico de revoluciones n_s	Número de cucharas z
4	40
6	37
8	34
10	30
12	28
14	26
18	22
22	20
26	17
32	15



Método Estadístico

Dimensionamiento de una TP según Siervo

Notación:

D_2 :	diámetro característico	[m]
D_3 :	diámetro de punta	[m]
d_j :	diámetro del chorro	[m]
B:	altura barométrica	[m]
H_n :	altura neta nominal	[m]
K_U :	coef. de velocidad tangencial.	
n:	velocidad de giro sincrónica	[rpm]
n_S :	velocidad de giro específica	
P_m :	Potencia mecánica	[Kw.]
j	número inyectores	



Método Estadístico

Cálculo del número de inyectores:

Año de diseño	$n_{s,j}$
1960 - 1964	$78,63 \cdot H_n^{-0.243}$
1965 - 1977	$85,49 \cdot H_n^{-0.243}$

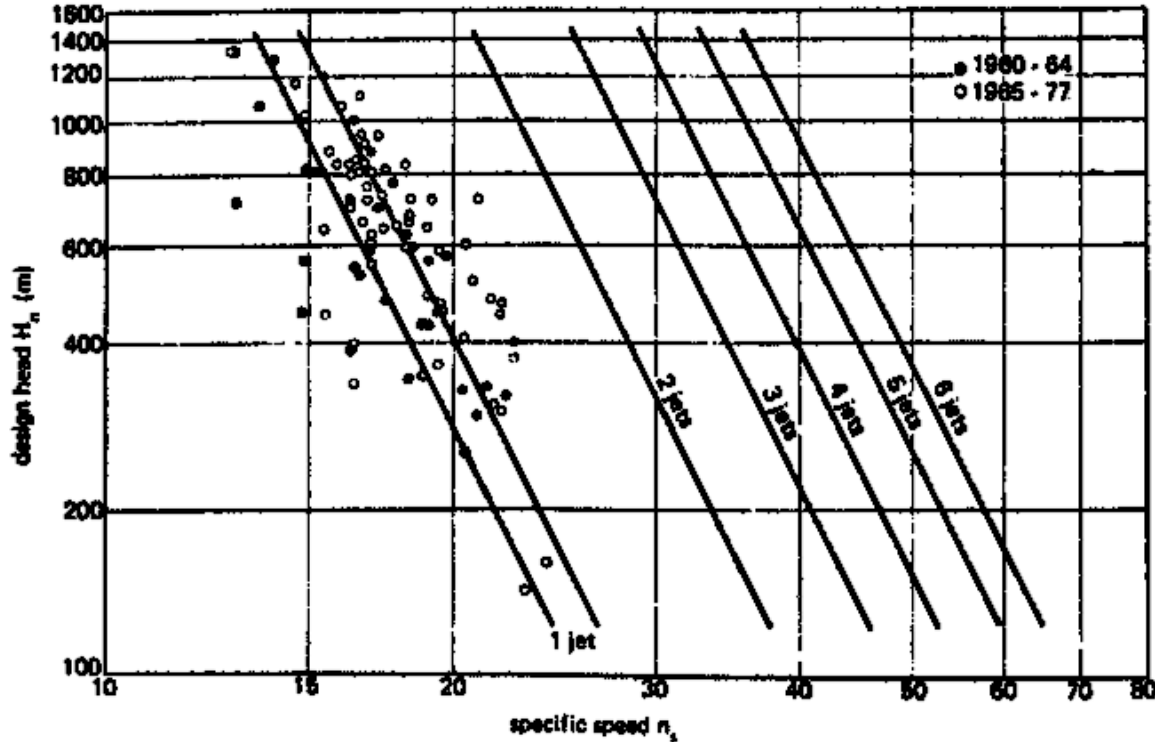
Velocidad específica de giro:

Referida a un sólo inyector:

$$n_s = \frac{n \sqrt{P_m}}{H_n^{5/4}}$$

$$n_{s,j} = \frac{n \sqrt{P_m / j}}{H_n^{5/4}}$$

Método Estadístico



$$s_{j} = \frac{\text{rpm} \cdot \sqrt{\text{kW}}}{m^{5/4}}$$

Se debe verificar que el n_s determinado coincida con una velocidad de sincronismo en el criterio general de diseño. De lo contrario, se recalcula n_s con la velocidad de giro sincronica más cercana.

Método Estadístico

Dimensiones del rodete.

$$K_U = 0,5445 - 0,0039 \cdot n_{S,j}$$

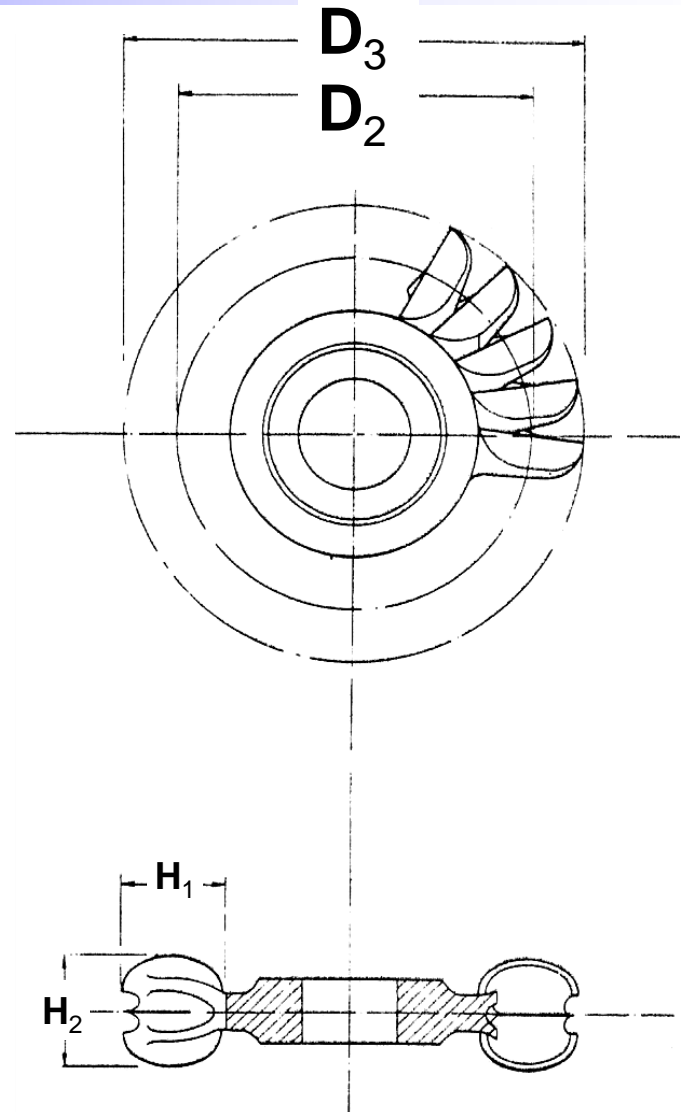
$$K_U = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60 \sqrt{2gH_n}}$$

$$\frac{d_j}{D_2} = \frac{n_{S,j}}{250,74 - 1,796 \cdot n_{S,j}}$$

$$\frac{D_3}{D_2} = 1,028 + 0,0137 \cdot n_{S,j}$$

$$H_1 = 3,20 \cdot d_j^{0,96}$$

$$H_2 = 3,23 \cdot d_j^{1,02}$$



Método Estadístico

Dimensiones del Pozo:

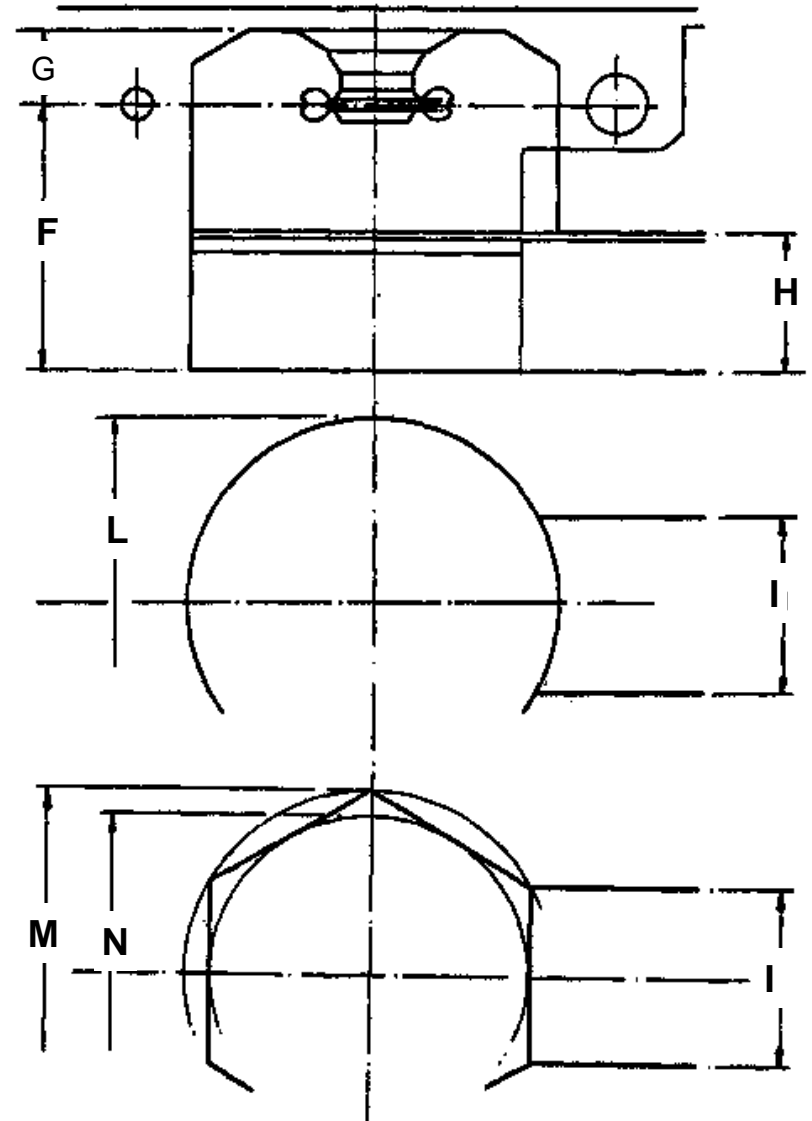
$$L = 0,78 + 2,06 \cdot D_3$$

$$G = 0,196 + 0,376 \cdot D_3$$

$$F = 1,09 + 0,71 \cdot L$$

$$H = 0,62 + 0,513 \cdot L$$

$$I = 1,28 + 0,37 \cdot L$$



Método Estadístico

Dimensiones Distribuidor Espiral:

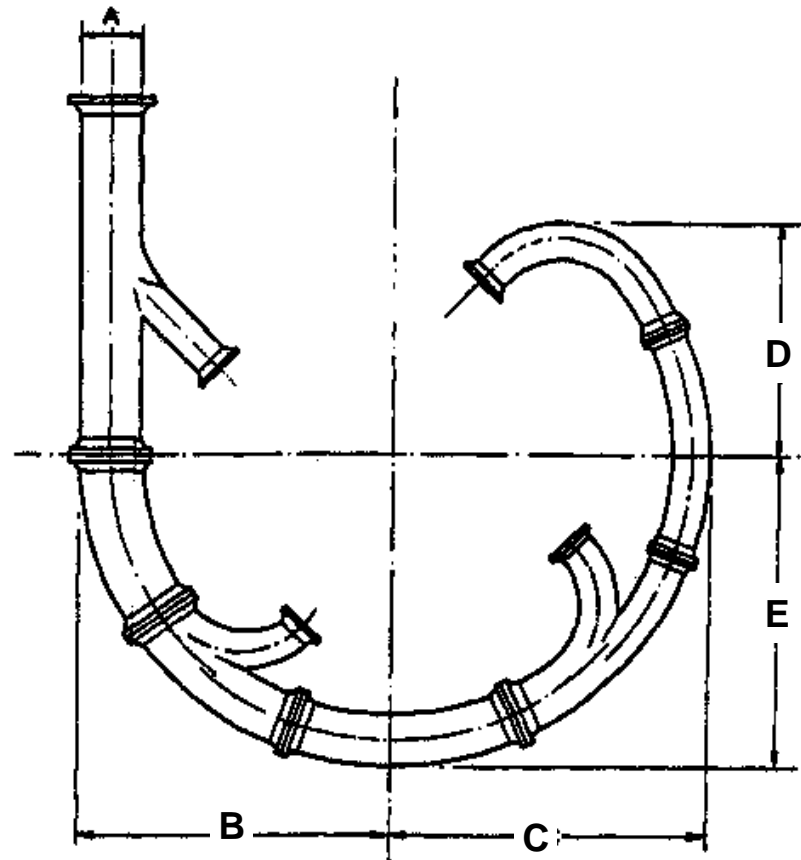
$$A = 0,82 + 0,358 \cdot \sqrt{H_n}$$

$$B = 0,595 + 0,694 \cdot L$$

$$C = 0,362 + 0,68 \cdot L$$

$$D = 0,219 + 0,70 \cdot L$$

$$E = 0,43 + 0,70 \cdot L$$





Turbina Pelton

Curvas Características

Turbina Pelton

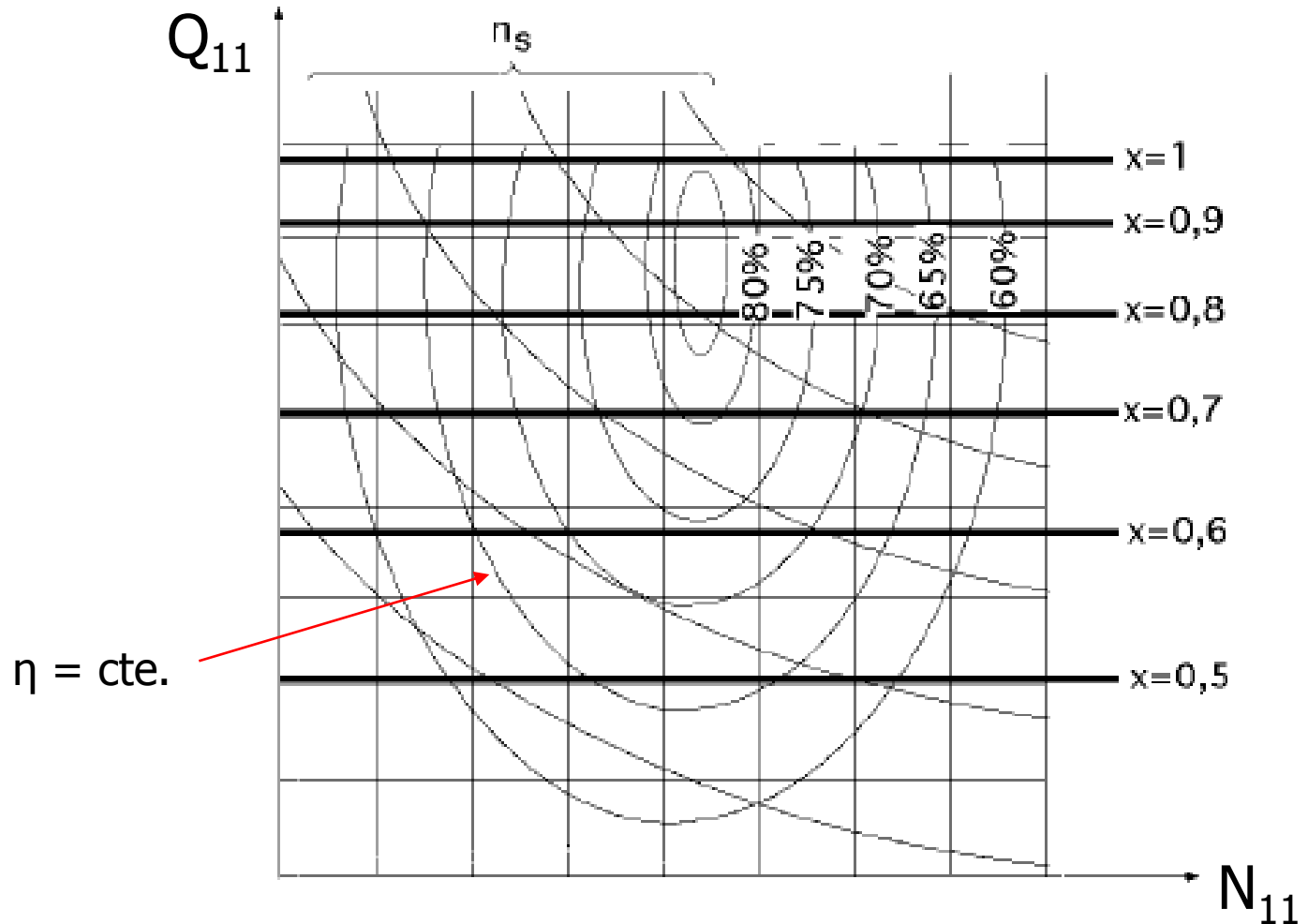
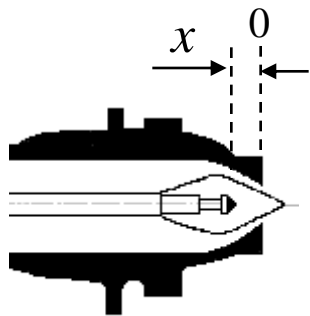
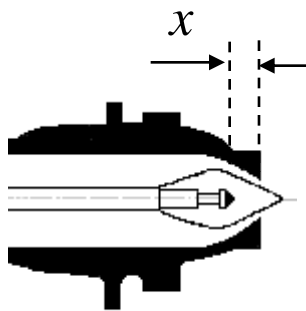


Diagrama de Topográfico Q_{11} vs. N_{11}

Turbina Pelton



$\eta = \text{cte.}$

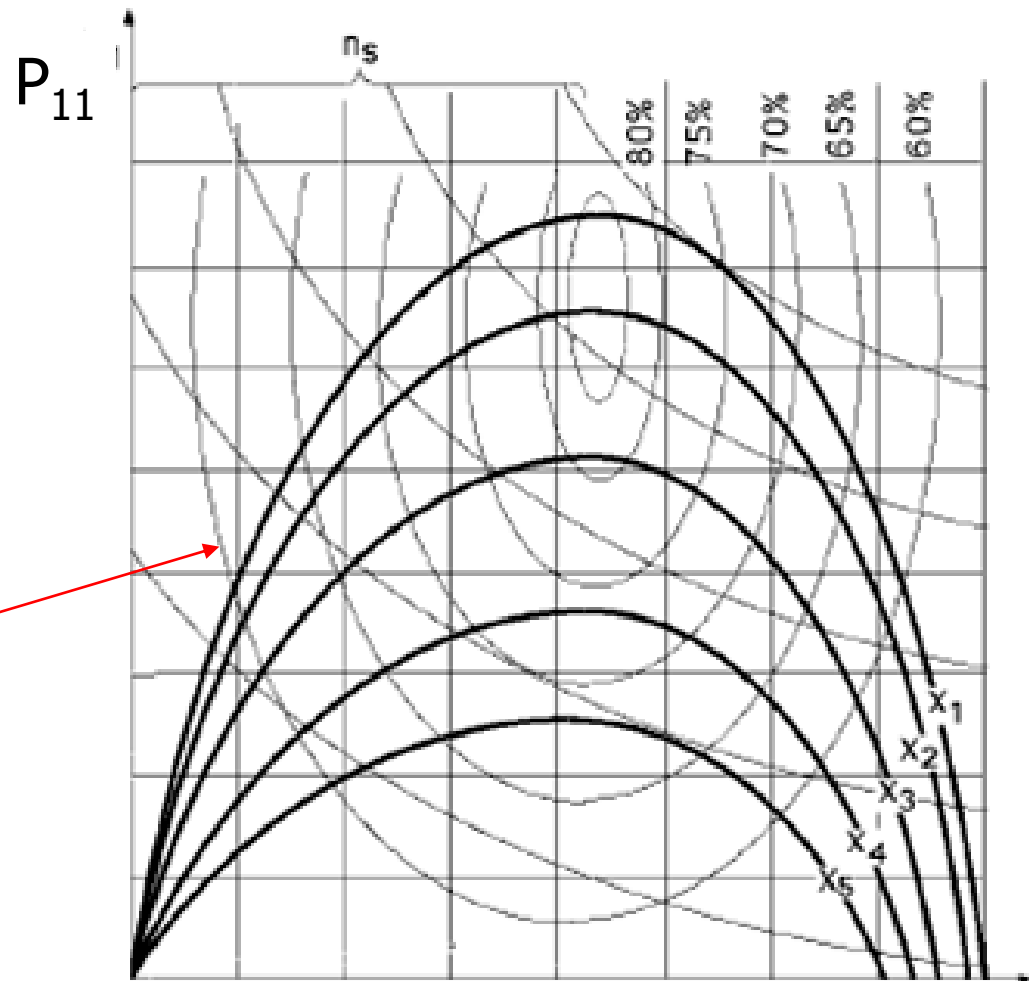


Diagrama de Topográfico P_{11} vs. N_{11}

N_{11}

Turbina Pelton

$n_s = 15$

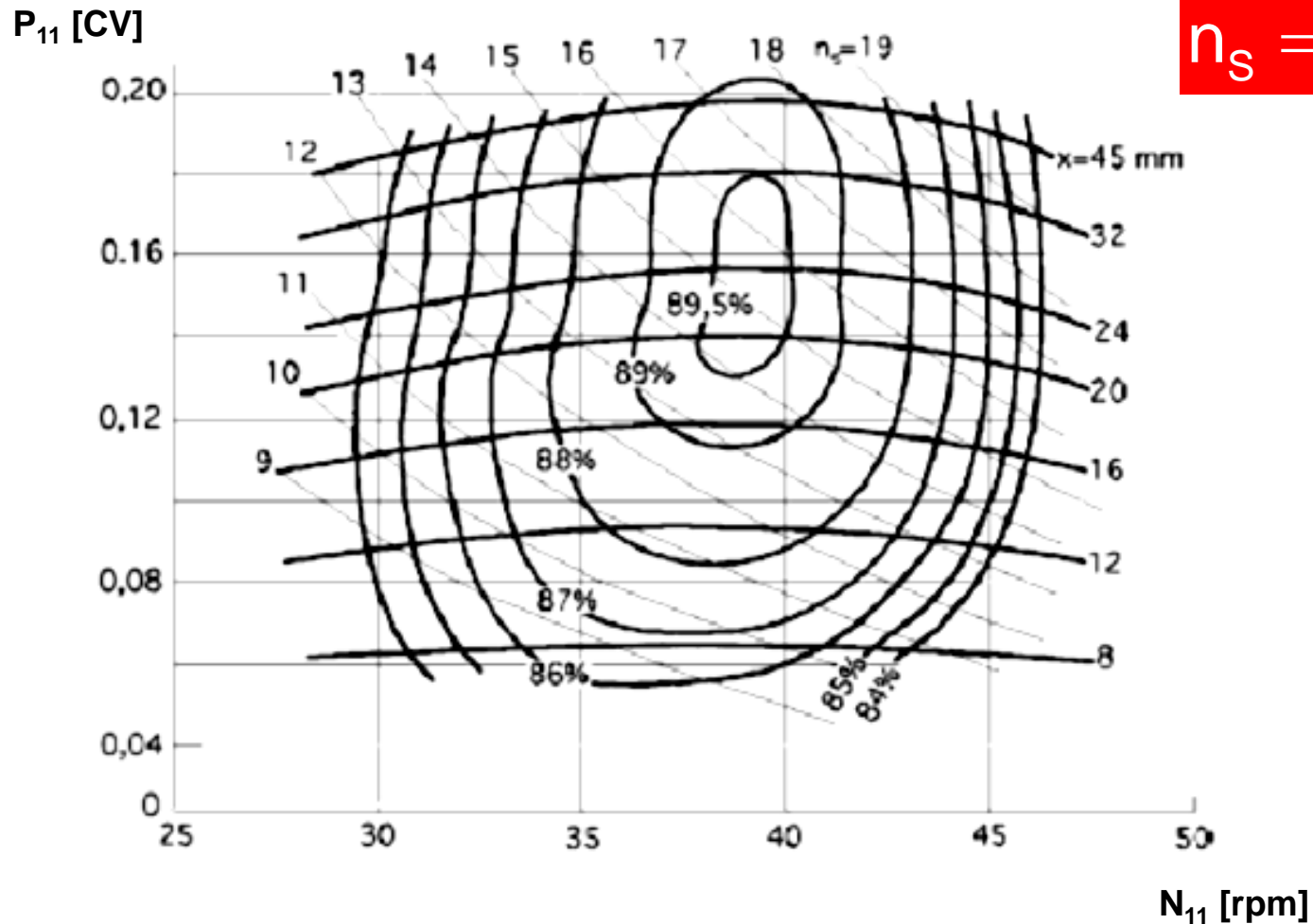
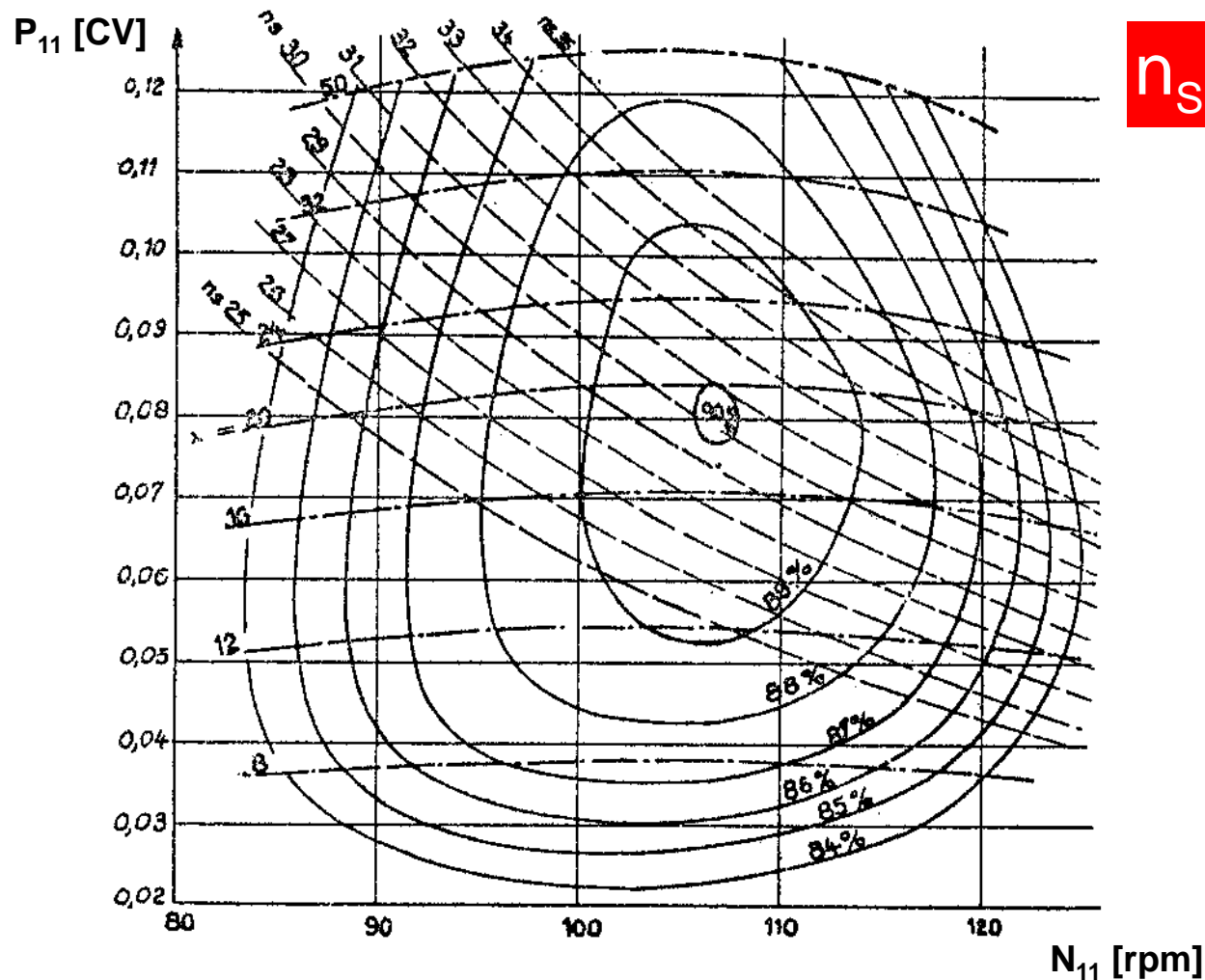


Diagrama de Topográfico P_{11} vs. N_{11}

Turbina Pelton



$n_s = 30$

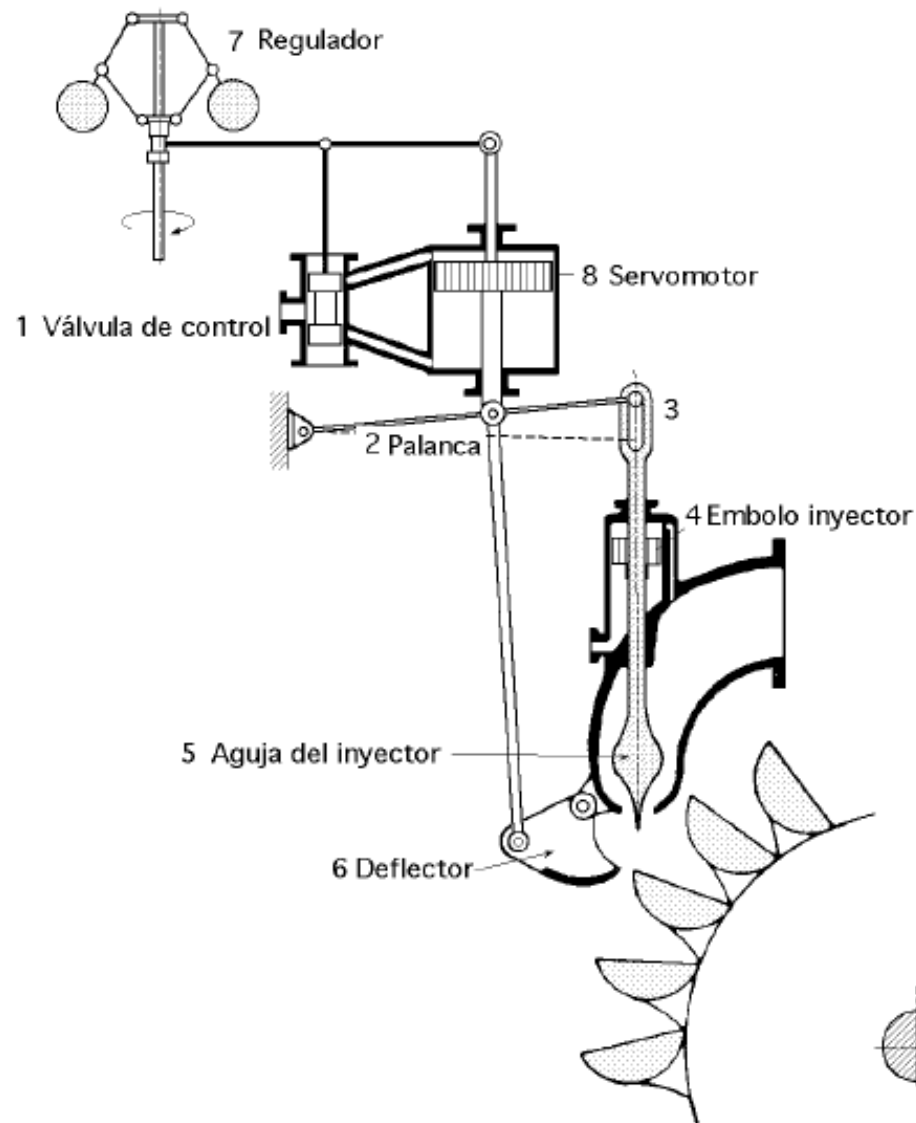
Diagrama de Topográfico P_{11} vs. N_{11}



Regulación de Potencia

- Con el fin de asegurar una buena regulación, conviene diseñar el inyector de forma que exista una proporcionalidad entre la potencia de la turbina y la carrera x de la aguja, por cuanto la potencia es proporcional al caudal y éste, a su vez, a la sección de paso normal al flujo.
- La variación del caudal del chorro para regular la potencia se consigue mediante una aguja de forma especial, con cuyo accionamiento se puede estrangular la sección de salida de la boquilla; su regulación puede ser manual o automática mediante un servomotor.

Regulación de Potencia





Turbinas Pelton

Grandes centrales

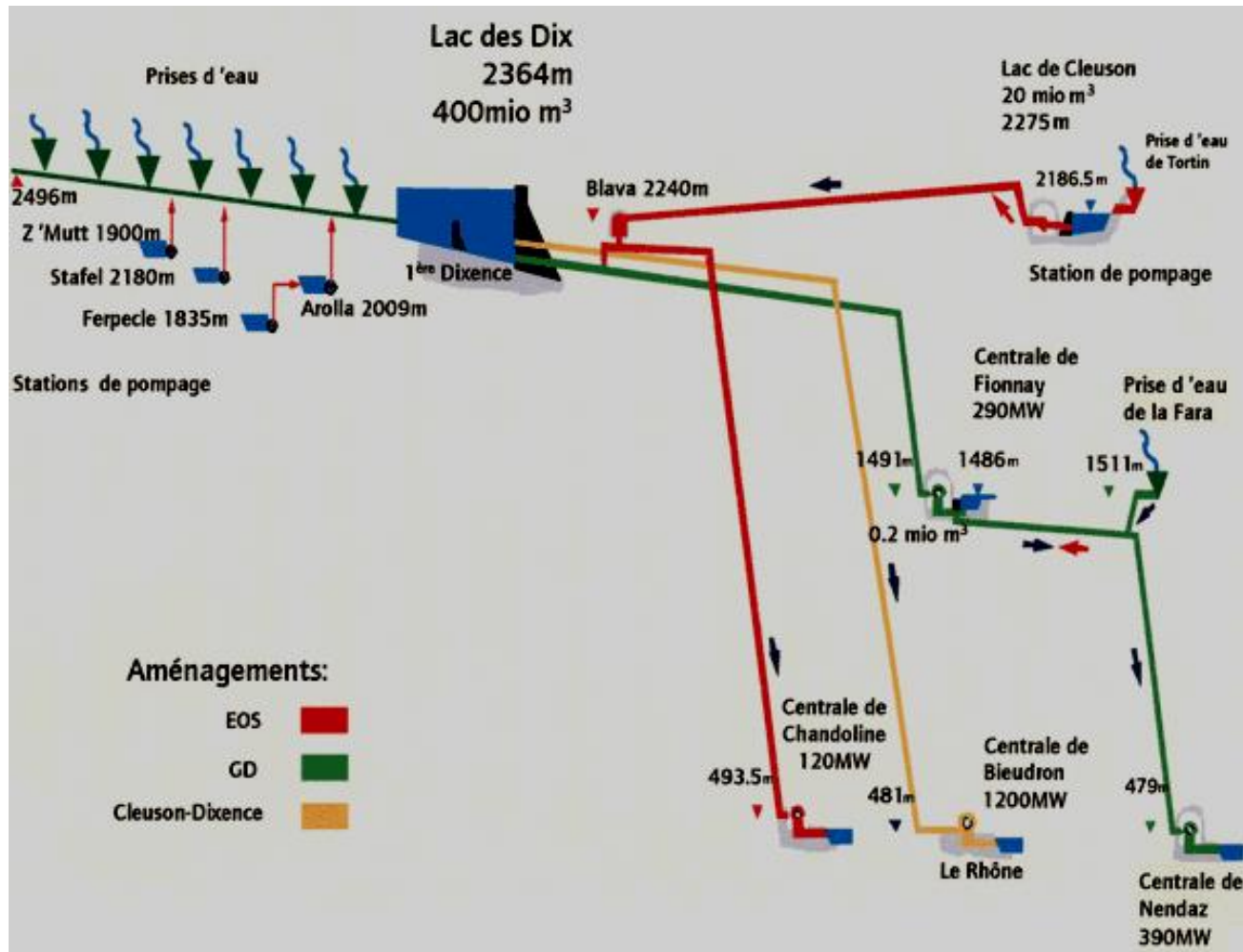
Represa La Grand Dixence



Con una altura de 285 m, la presa de Grand Dixence en los Alpes Suizos es una de las presas más altas del mundo. La central hidroeléctrica genera la mayoría de la electricidad doméstica de Suiza.

Complejo Hidroeléctrico

Cleuson-Dixence





Complejo Cleuson-Dixence

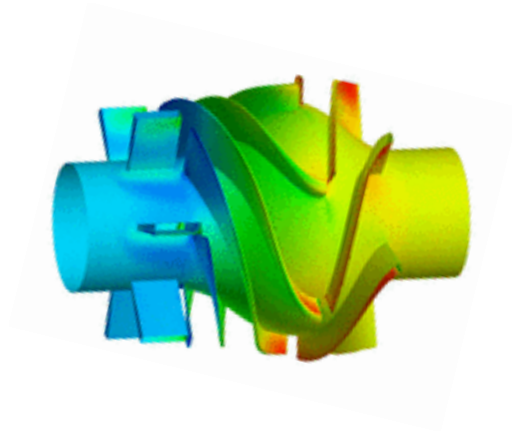
El complejo Hidroeléctrico de Cleuson-Dixence fue construido entre 1993 y 1998 para incrementar la capacidad de generación de la Grande Dixence.

Comprende:

Una nueva toma en la presa, un túnel de 15.8 Km. de longitud desde la presa hasta Tracouet, una chimenea de equilibrio en Tracouet, excavada en el pico Nendaz , una tubería forzada de acero de 4,3 Km. largo desde Tracouet hasta la central de Bieudron, la casa de maquinas subterránea de Bieudron.

La central Bieudron posee tres record mundiales: mayor salto (1883 m), Mayor potencia de punta cada unidad Pelton (423 MW) y la mayor potencia eléctrica por polo de un generador (35.7 MVA).

De acuerdo a la demanda eléctrica, el agua es despachada a cuatro centrales hidroeléctricas: Fionnay, Nendaz, Chandoline y Bieudron. Las cuales descargan al río Rin.



Turbinas Pelton

FIN