

Área A1:

$$\text{Cota media} = (200 + 230)/2 = 215 \text{ m}$$

$$\text{Área A1} = 1,425 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen Área A1} = 215 \text{ m} \times 1,425 \text{ m}^2 = 306,375 \text{ m}^3$$

Área A2:

$$\text{Cota media} = (125 + 200)/2 = 162.5 \text{ m}$$

$$\text{Área A2} = 962 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen Área A2} = 162.5 \text{ m} \times 962 \text{ m}^2 = 156,325 \text{ m}^3$$

Área A3:

$$\text{Cota media} = (87 + 125)/2 = 106 \text{ m}$$

$$\text{Área A3} = 1,143 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen Área A3} = 106 \text{ m} \times 1,143 \text{ m}^2 = 121,158 \text{ m}^3$$

Área A4:

$$\text{Cota media} = (0 + 87)/2 = 43.5 \text{ m}$$

$$\text{Área A4} = 2,821 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen Área A4} = 43.5 \text{ m} \times 2,821 \text{ m}^2 = 685,196 \text{ m}^3$$

Volumen Total Acumulable = 1, 269,054 m³ de agua.

La precisión en el establecimiento de las curvas batimétricas, las áreas entre las curvas de nivel, medidas con el planímetro, es fundamental en el cálculo preciso del volumen de agua que se puede almacenar en una presa hidroeléctrica. Este volumen de agua se especifica en metros cúbicos (m³) y hectómetros cúbicos (Hm³), dependiendo del volumen de agua medido.

8.11 Potencia de Salida de un Generador Hidráulico

La potencia eléctrica de salida de una unidad hidroeléctrica se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$P_e = 9.81 \cdot \rho \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H$$

Donde:

P_e = Potencia de salida del Generador, en vatios (W)

ρ = Densidad del agua = 1,000 Kg/m³

η_t = Eficiencia de la turbina hidráulica (Rango: 0.75 - 0.90)

η_g = Eficiencia del generador eléctrico (Rango: 0.92 - 0.97)

η_m = Eficiencia del acoplamiento turbina-generador (Rango: 0.95 - 0.99)

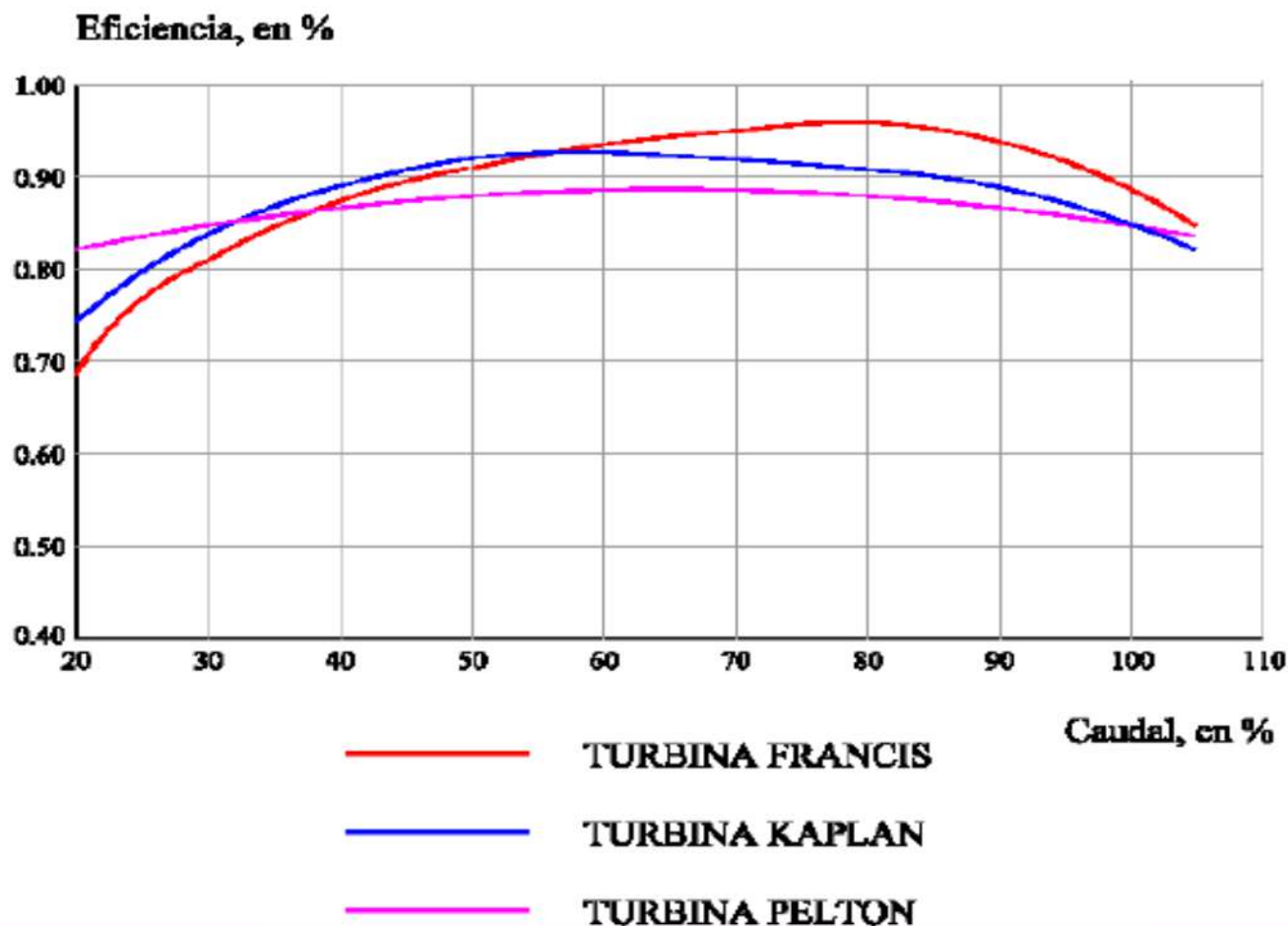
Q = Caudal medio de agua que pasa por la turbina, en m³/seg

H = Altura de presión o diferencia de nivel de agua entre la presa y la entrada a la turbina hidráulica, en metros (m)

La *potencia media* de una unidad hidroeléctrica se define como la potencia calculada mediante la fórmula dada. La *potencia instalada*, es la potencia nominal de los generadores de la central. Esta fórmula nos relaciona la potencia de salida del generador hidroeléctrico con el caudal del agua que es turbinable, y la altura de presión o nivel del embalse.

8.12 Curvas Características de Eficiencia Turbinas Hidráulicas

La Figura 8.27 muestra un gráfico donde se han representado las curvas características de eficiencia de las turbinas Francis, Kaplan y Pelton.

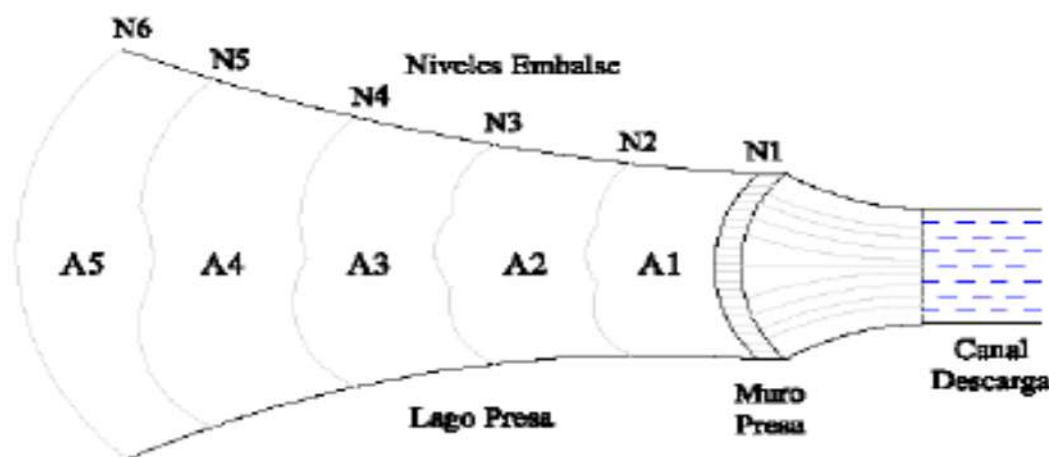


Como se deduce del gráfico de la Figura 8.27, hasta aproximadamente un 33% del caudal nominal, la turbina Pelton es la más eficiente. A partir de aproximadamente 33% del caudal nominal, la turbina Kaplan desarrolla una mayor eficiencia que la turbina Pelton. Siendo la turbina Francis más eficiente que la Pelton a partir de un 38% aproximadamente del caudal nominal. Finalmente, la turbina Francis es la más eficiente de las tres si el caudal es igual o superior al 57% del caudal nominal.

8.14 Casos de Estudio

8.14.1 Cálculo del Volumen Total del Embalse de una Central Hidroeléctrica

Dado el embalse de una presa hidroeléctrica, como el mostrado en la figura:



AREAS CURVAS NIVEL:

A1 = 1,836 m²
A2 = 1,968 m²
A3 = 2,147 m²
A4 = 4,871 m²
A5 = 4,653 m²

NIVELES EMBALSE:

N1 = 300 m
N2 = 235 m
N3 = 186 m
N4 = 121 m
N5 = 83 m
N6 = 38 m

Fuente: Imagen Autor ®

Calcular el volumen total de agua que puede ser acumulado en el embalse dado.

8.14.2 Cálculos de Potencia de Salida, Caudal Volumétrico y Eficiencia de Turbinas Kaplan, Francis y Pelton

Se proyecta la construcción de una Central Hidroeléctrica, con las siguientes características:

Potencia Eléctrica = 300 MVA, FP = 0.85

Densidad del Agua = 1,000 Kg/m³

Eficiencia del Generador Eléctrico = 93%

Eficiencia del Acoplamiento Mecánico Turbina-Generador = 96%

Altura de Presión = 100 metros

Caudal Máximo de la Fuente = 32.5 m³/seg -

Equivalencia: 1 MW = 102.2 x 10³ Kg-m/seg

Establezca lo siguiente:

- 1) Calcular la eficiencia de la Turbina Hidráulica, para el caudal máximo de la fuente y las restantes condiciones especificadas.
- 2) Si el caudal promedio de la fuente es de 14.63 m³/seg, utilizando las Curvas de Eficiencia de las Turbinas Francis, Kaplan y Pelton, del Módulo I, seleccione la Turbina Hidráulica que produzca el diseño más eficiente.

SOLUCION

- 1) Calcular la eficiencia de la Turbina Hidráulica, bajo las condiciones especificadas.

$$P_e = 9.81 \cdot \rho \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H$$
$$P_e$$

$$\eta_t = \frac{P_e}{9.81 \cdot \rho \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot Q \cdot H}$$

$$P_e = 300 \text{ MVA} \times 0.85 = 255 \text{ MW}$$

$$P_e = 255 \text{ MW} \times 102.2 \times 10^3 \text{ Kg-m/seg/MW} = 26.061 \times 10^6 \text{ Kg-m/seg}$$

$$\eta_t = \frac{26.061 \times 10^6 \text{ Kg-m/seg}}{9.81 \cdot (0.93) \cdot (0.96) \cdot (32.5 \text{ m}^3/\text{seg}) \cdot (100 \text{ m}) \cdot (1000 \text{ kg/m}^3)}$$

$$\eta_t = 0.9155$$

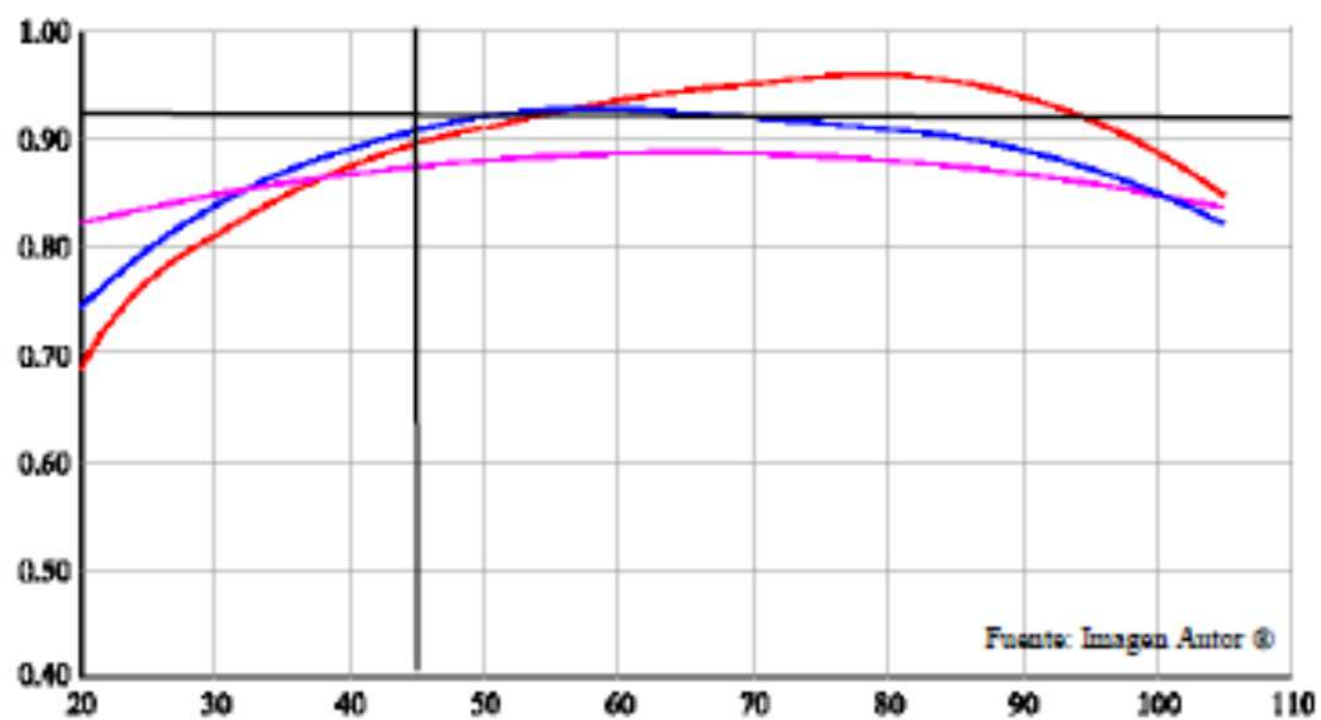
- 2) Si el caudal promedio de la fuente es de $14.63 \text{ m}^3/\text{seg}$, utilizando las Curvas de Eficiencia de las Turbinas Francis, Kaplan y Pelton, del Módulo I, seleccione la Turbina Hidráulica que produzca el diseño más eficiente.

El porcentaje del caudal total para este valor de embalse medio será:

$$\% Q = \frac{Q_{\text{MEDIO}}}{Q_{\text{TOTAL}}} = \frac{14.63 \text{ m}^3/\text{seg}}{32.5 \text{ m}^3/\text{seg}} = 0.4501$$

Para un porcentaje del caudal total de un 45.01% y una eficiencia en la Turbina de 91.55%, la selección que produce la turbina más eficiente es la Turbina Kaplan.

Eficiencia, en %



Fuente: Imagen Antor ©

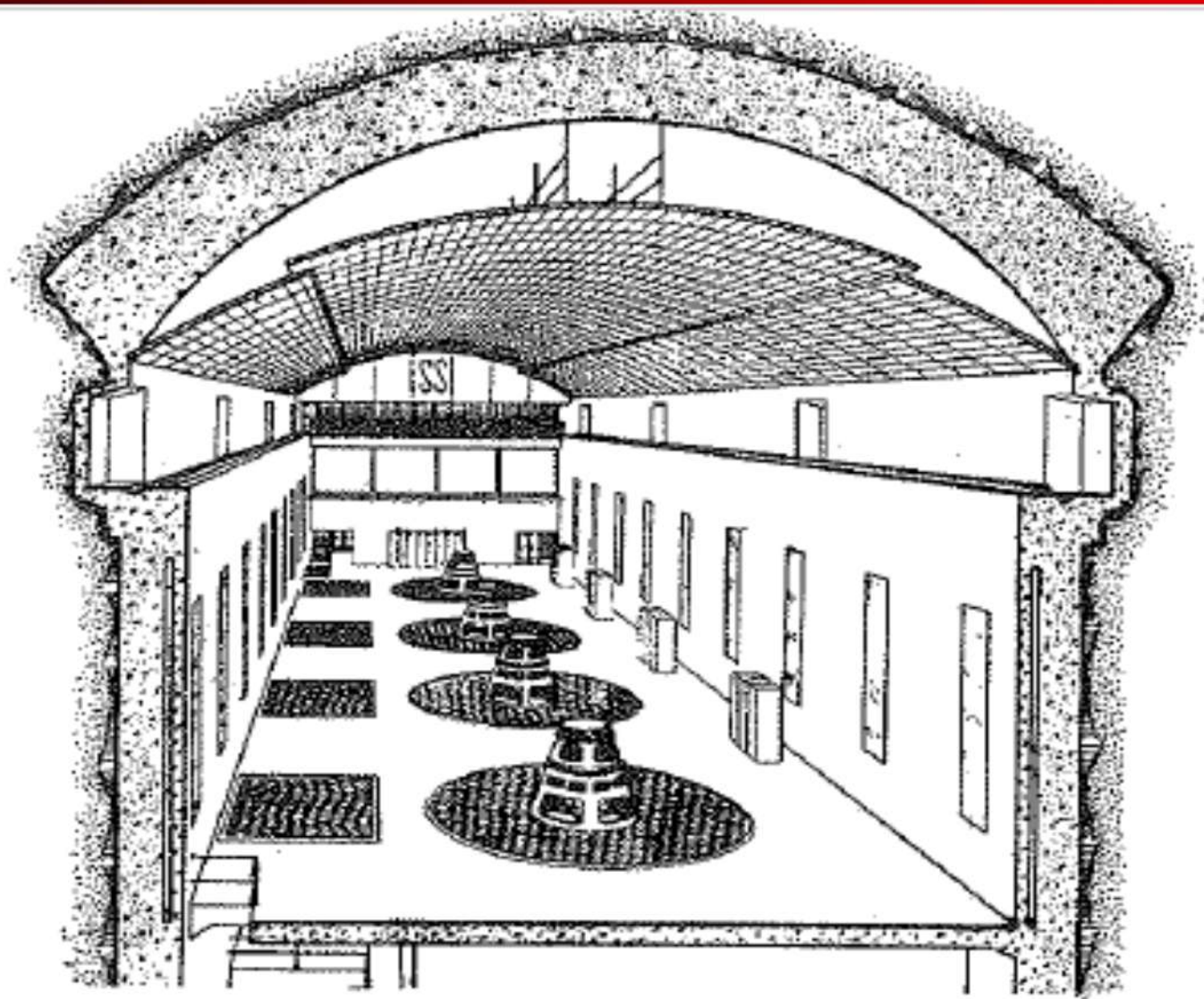
Caudal, en %

- TURBINA FRANCIS
- TURBINA KAPLAN
- TURBINA PELTON

CÁMARAS DE TURBINAS

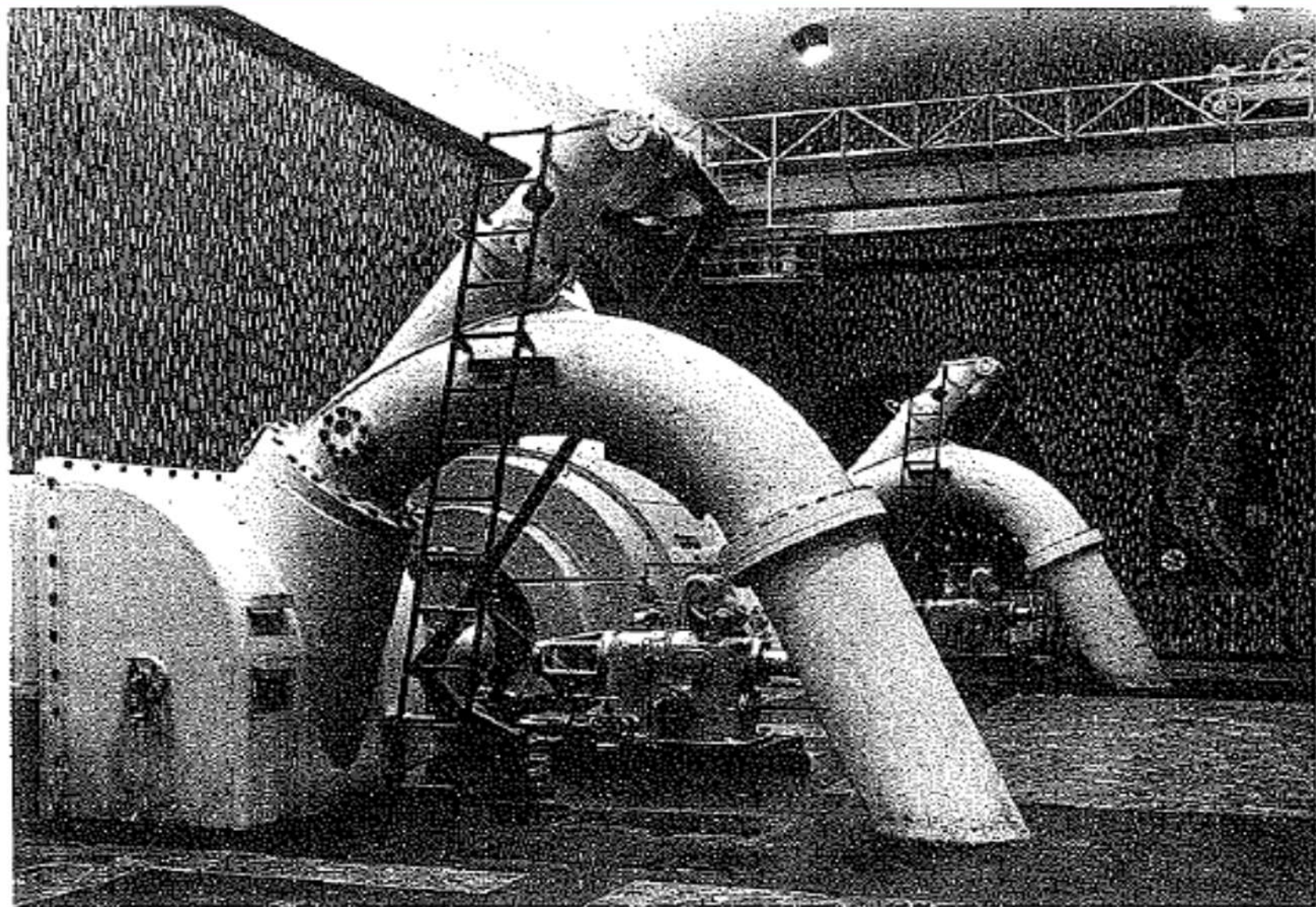
SE DENOMINA CÁMARA DE TURBINAS AL ESPACIO DESTINADO EN UNA CENTRAL HIDRO-ELECTRICA PARA EL ALOJAMIENTO DE LAS TURBINAS HIDRAÚLICAS.

CÁMARAS DE TURBINAS



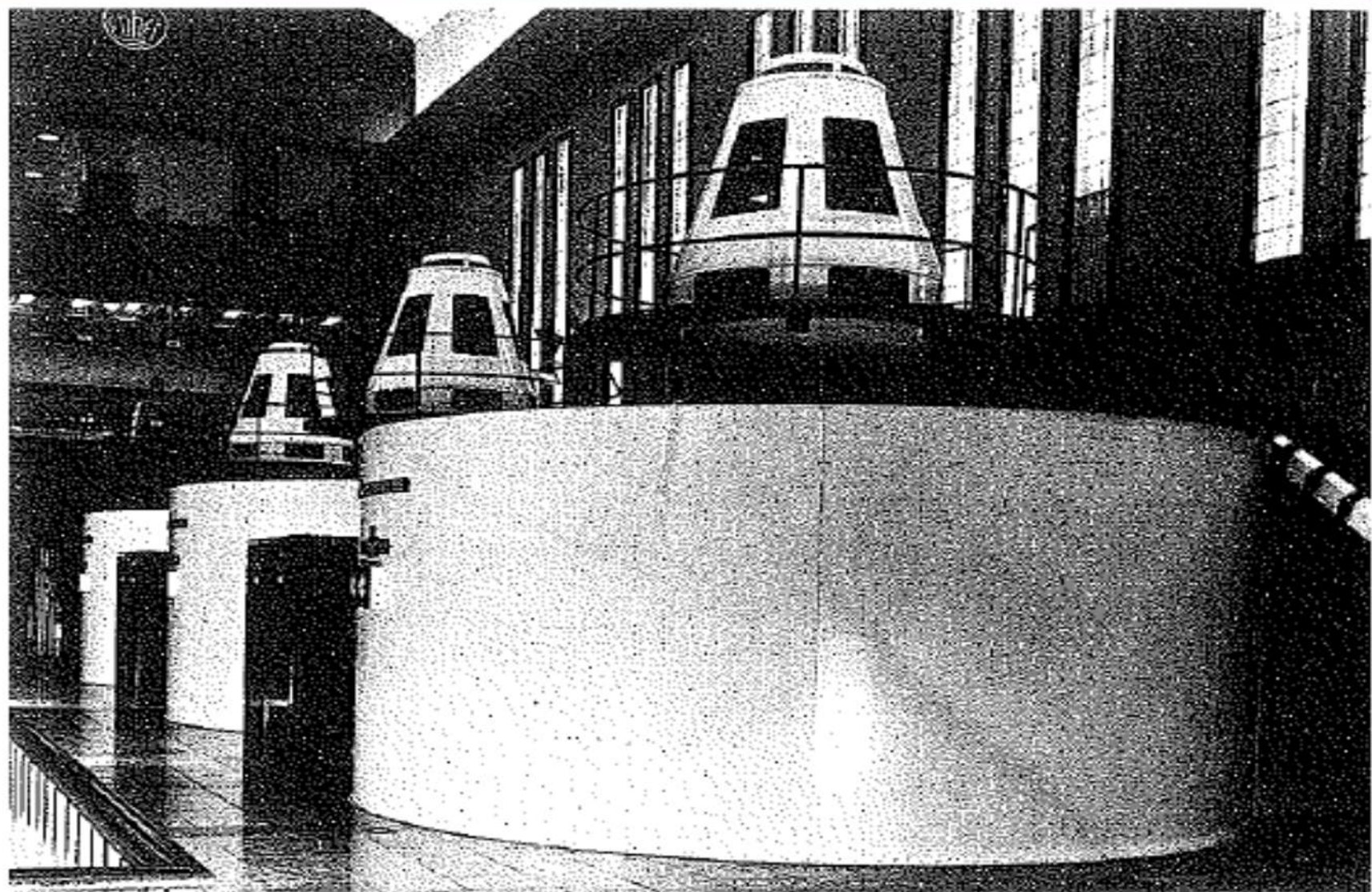
Perspectiva de la sala de generadores de la central subterránea de Bão-Ponte Bibey (Saltos del Sil S. A.).

CÁMARAS DE TURBINAS



Interior de la sala de máquinas de la central de Caldas (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana).

CÁMARAS DE TURBINAS



Interior de la sala de generadores y excitatrices de la central subterránea de Escales (Empresa Nacional Hidroeléctrica del Ribagorzana).

CÁMARAS DE TURBINAS

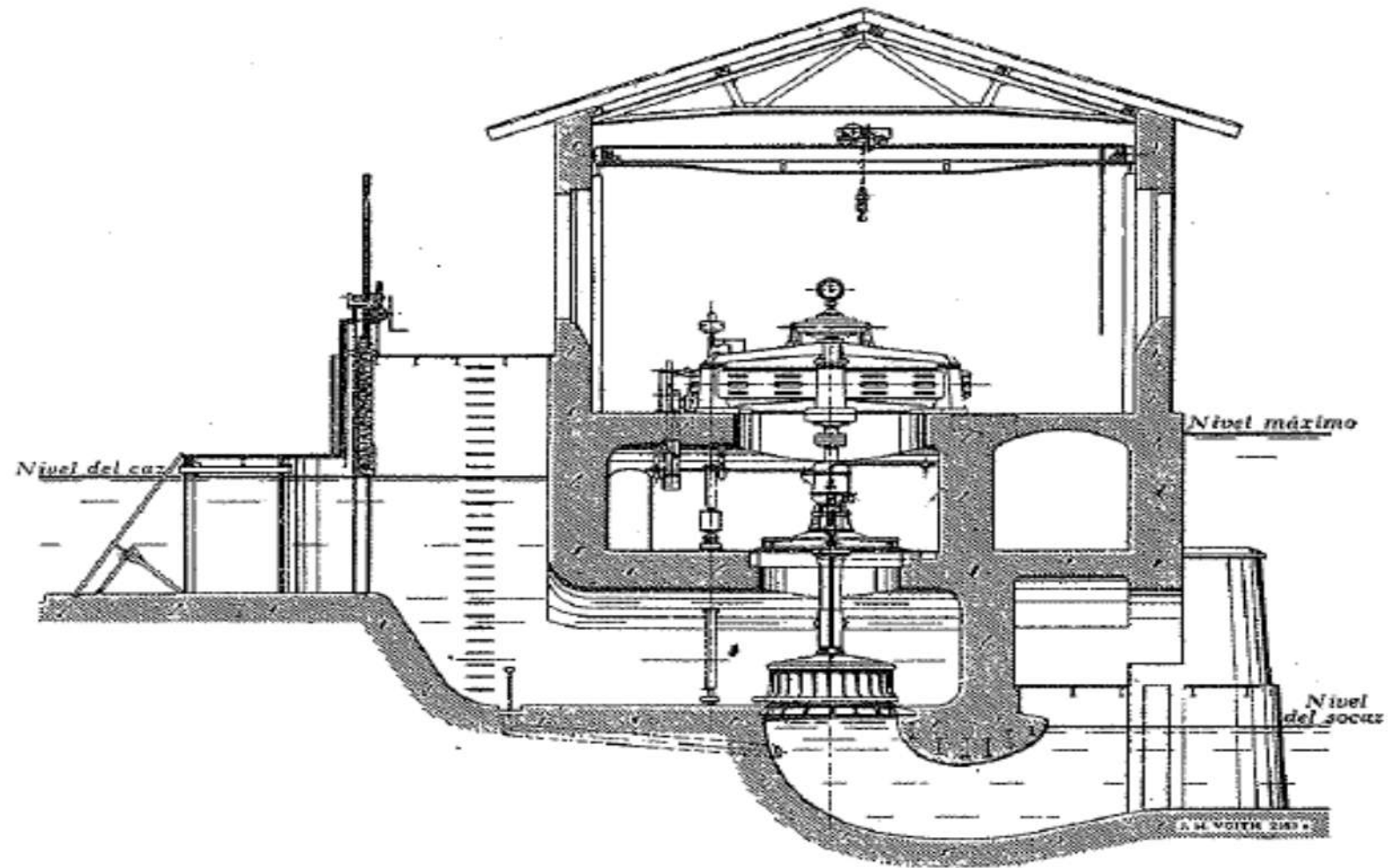


Fig. — Central hidráulica con turbina Francis de eje vertical, en cámara abierta.

CÁMARAS DE TURBINAS

LA CÁMARA DE TURBINAS SE LLAMA DEL TIPO ABIERTO SI ESTA EN CONTACTO CON EL EXTERIOR, Y SE LA UTILIZA EN SALTOS DE PEQUEÑA ALTURA DE HASTA UNOS 15 METROS.

CÁMARAS DE TURBINAS

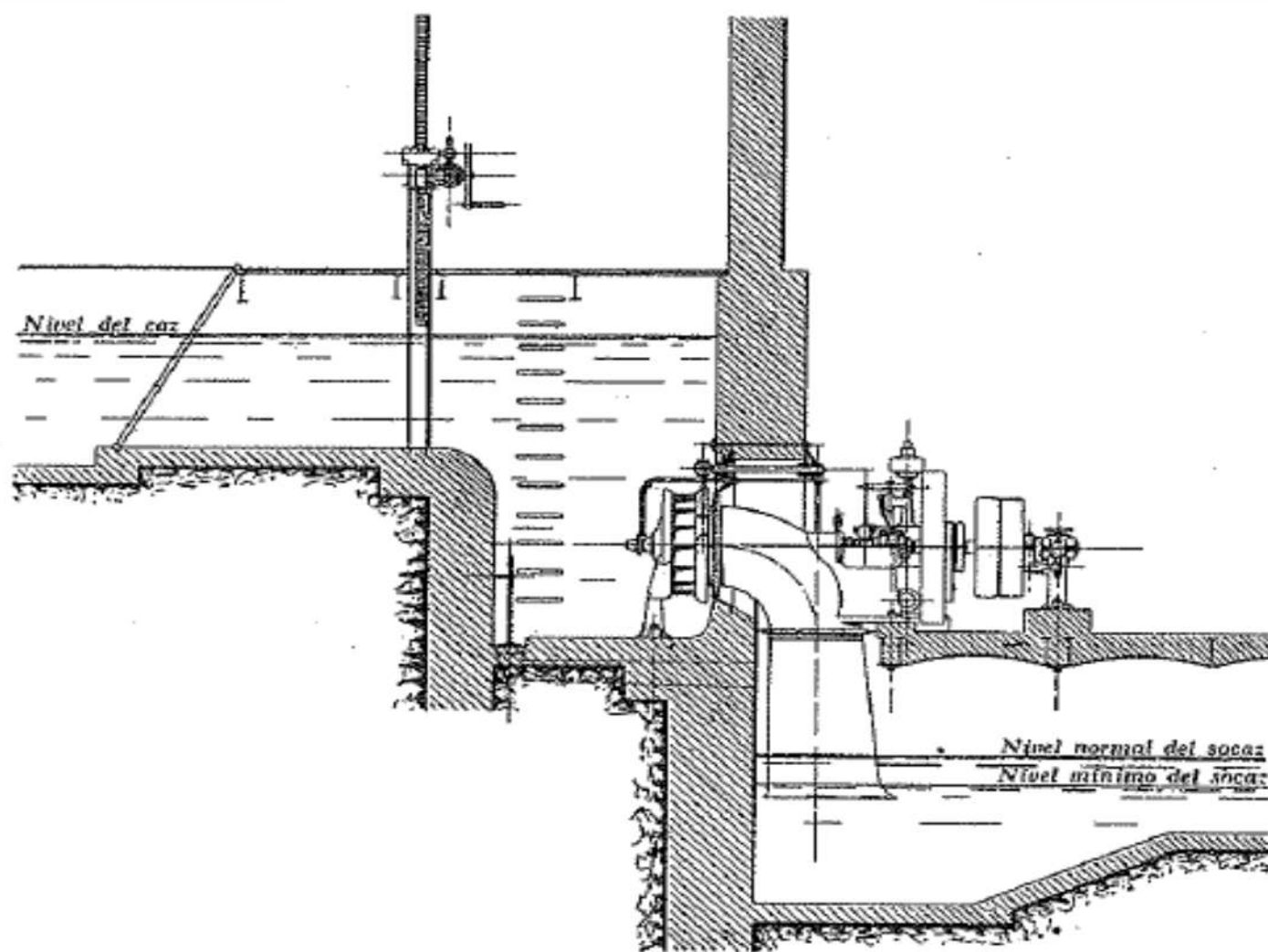


Fig. 126. — Central hidráulica con turbina Francis de eje horizontal en cámara abierta.

CÁMARAS DE TURBINAS

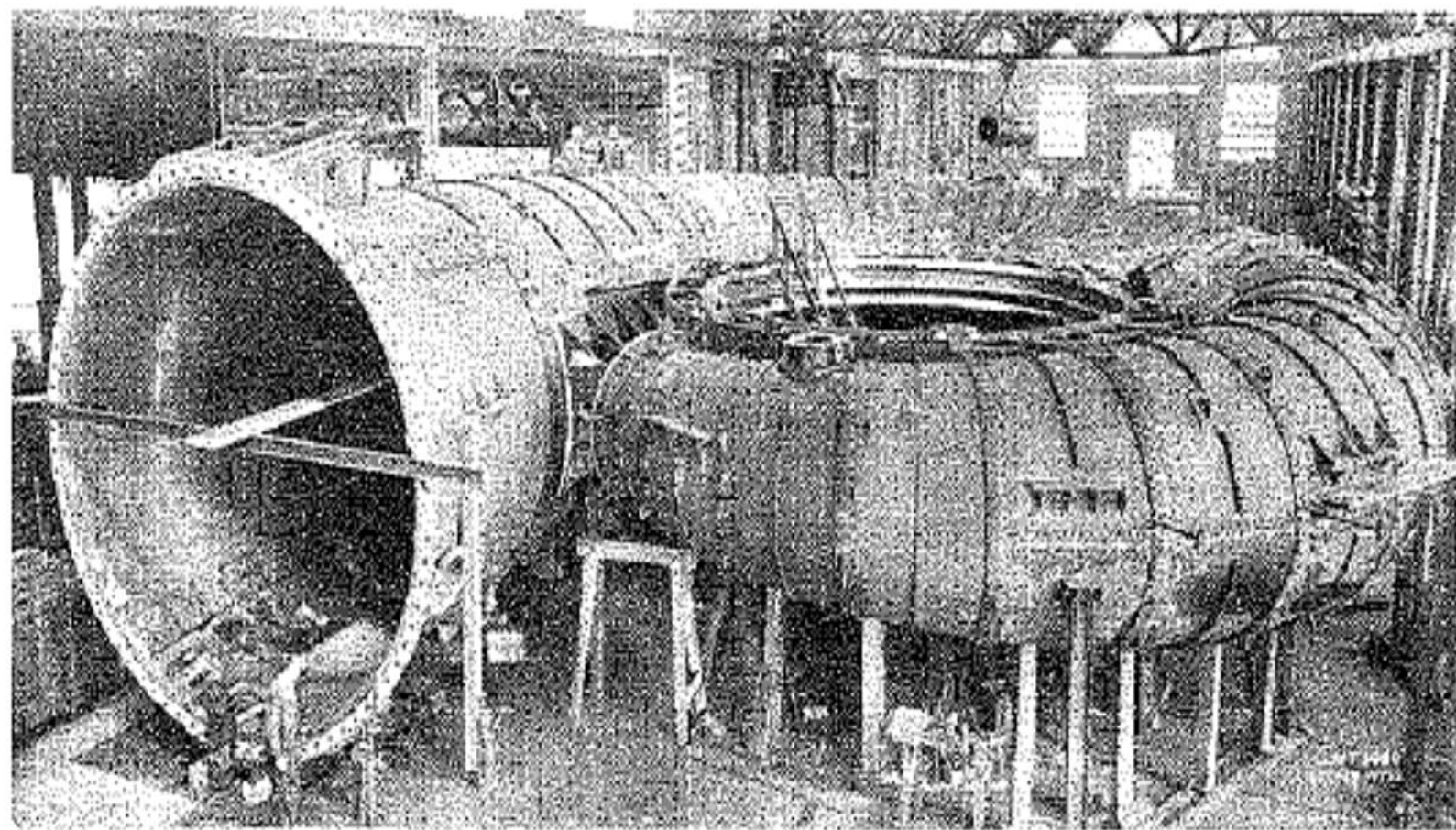
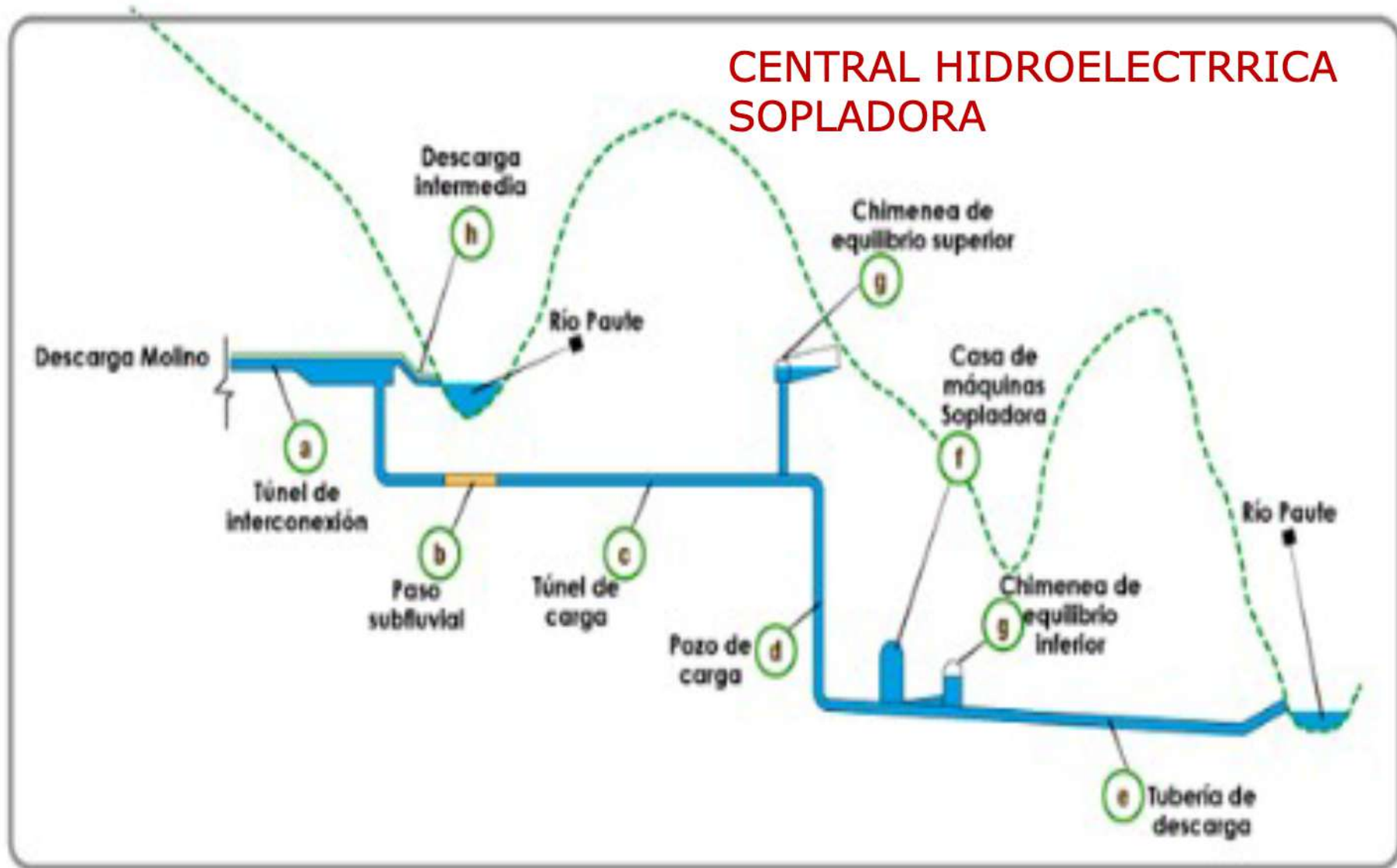


Fig. 127.—Cámara en espiral de chapa de acero roblonada para una turbina Francis de Escher Wyss.

CÁMARAS DE TURBINAS

CENTRAL HIDROELECTRICA SOPLADORA



Esquema General de Obras

CÁMARAS DE TURBINAS

CASA DE MÁQUINAS CENTRAL HIDRO-ELECTRICA SOPLADORA.



CÁMARAS DE TURBINAS

DATOS DE LAS TURBINAS Y GENERADORES

LA CASA DE MÁQUINAS ESTA FORMADA POR UNA CAVERNA SUBTERRANEA: LARGO= 87 m , ANCHO 22M, ALTURA = 46 M, INCLUYE EL EDIFICIO DE CONTROL.

TURBINAS : 3 UNIDADES FRANCIS DE EJE VERTICAL. CAIDA NETA NOMINAL 362,52m. Caudal nominal $56 \text{ m}^3/\text{s}$. POTENCIA NOMINAL DE CADA UNIDAD 163,9 MW. VELOCIDAD SINCRÓNICA = 360 RPM VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO 608 RPM.

VÁLVULA DE GUARDA TRES UNIDADES TIPO ESFERA, DIÁMETRO 2.20 m.

GENERADORES.- TRES UNIDADES. POTENCIA NOMINAL 162.60MW FACTOR DE POTENCIA 0.9033, POTENCIA APARENTE 180MVA. FRECUENCIA 60HZ, 360 RPM

CÁMARAS DE TURBINAS

Válvulas de mariposa

Aunque es bastante habitual el uso de válvulas de compuerta para estas funciones, una de las válvulas que mejor realiza las mismas con seguridad, facilidad de accionamiento, mantenimiento y economía de inversión, son las válvulas de mariposa de doble excéntrica.



Válvula de mariposa doble excéntrica

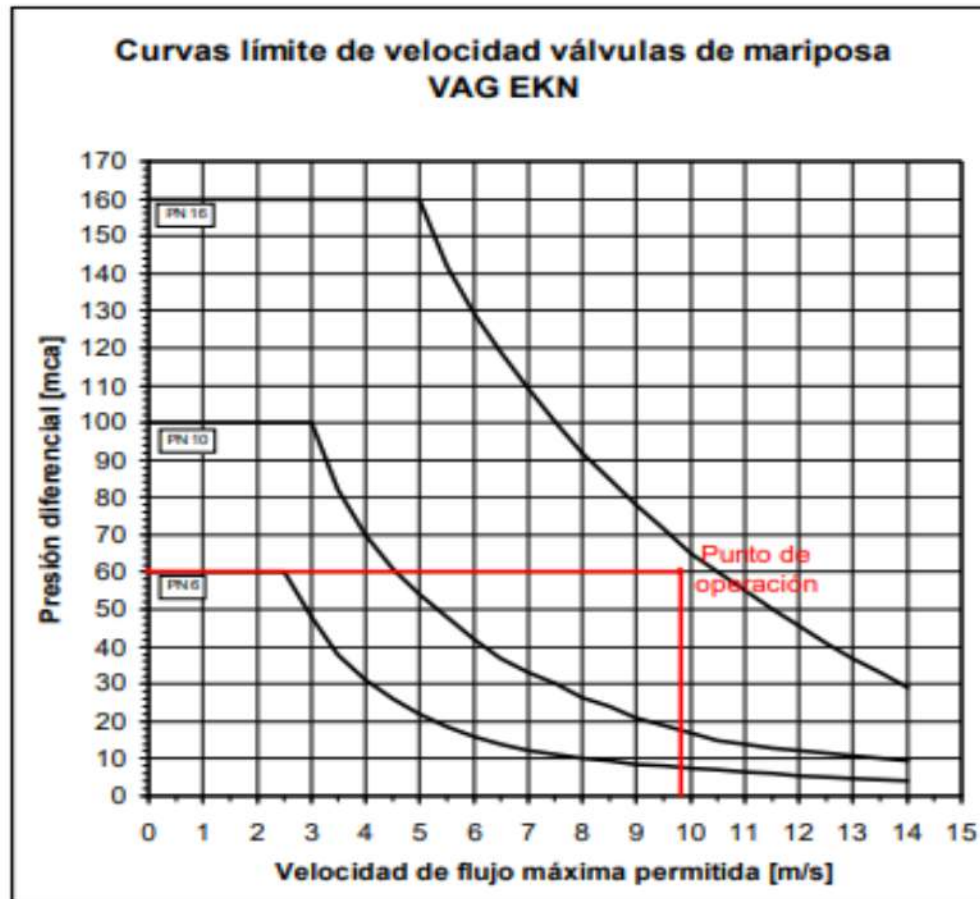
Izquierda: con actuador por desmultiplicador y volante

Derecha: actuador por contrapeso y cilindro hidráulico

Las válvulas de mariposa consisten en un cuerpo dentro del cual se mueve un disco, que es el elemento obturador. Este disco gira alrededor de un eje siendo su trayectoria completa de 90° , que van desde la posición de máxima apertura, con el disco paralelo al flujo a la de cierre con el disco perpendicular al flujo.

VÁLVULAS DE MARIPOSA

El flujo al paso por el disco produce un esfuerzo dinámico que debe ser soportado por el disco y los ejes. Por este motivo existen unas curvas que relacionan la presión de trabajo y la velocidad con la presión de diseño (PN) de la válvula, de manera que es posible que para una presa de 30 m (3 bar) se requiera una válvula PN10 ó PN16



Curvas límite de velocidad para válvulas de mariposa

VÁLVULA TIPO MARIPOSA

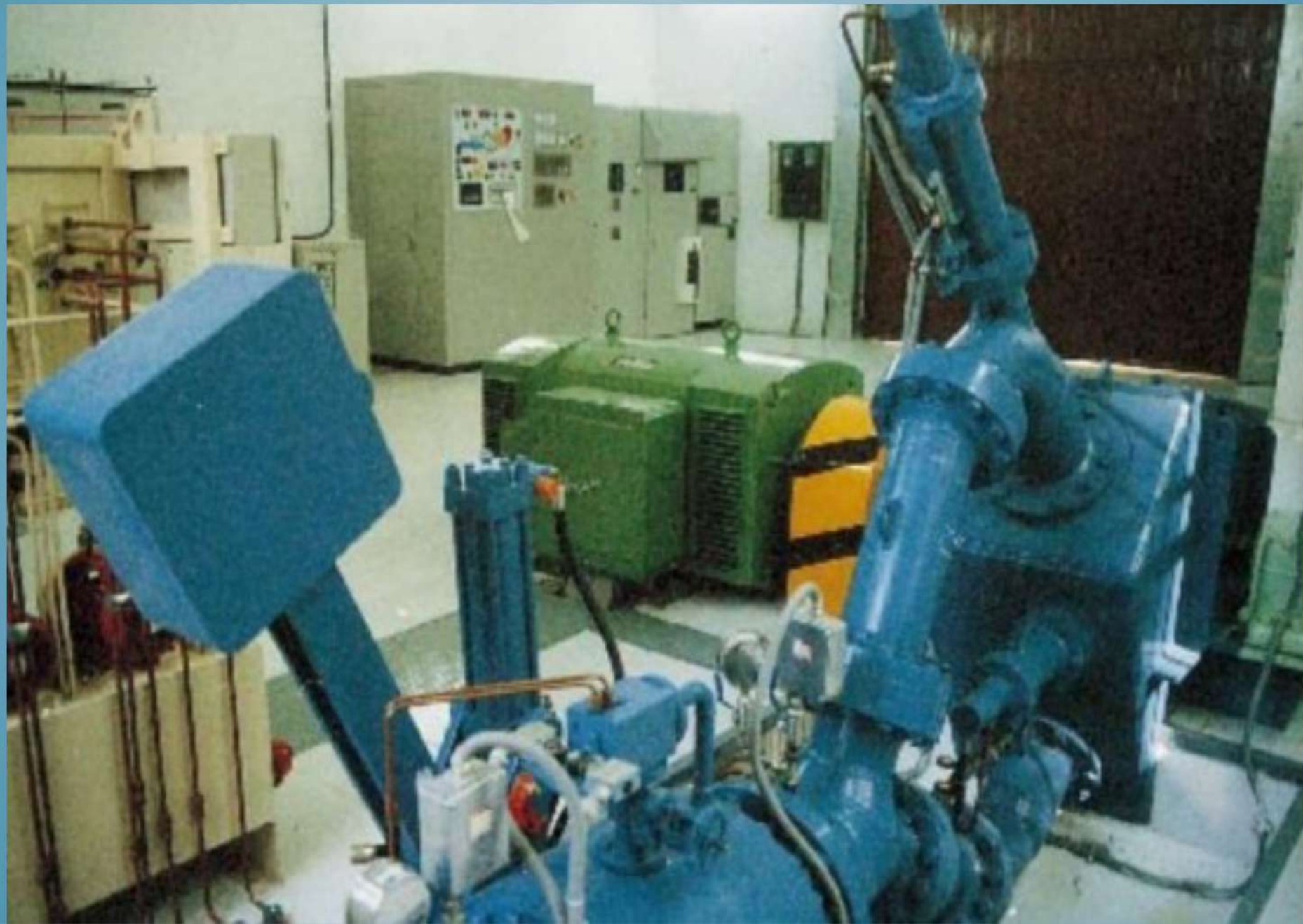


Accionamiento por cilindro hidráulico y contrapeso

VÁLVULA TIPO ESFERA



CÁMARAS DE TURBINAS



TURBINAS HIDRÁULICAS

Son máquinas hidro-motrices que convierten la energía cinética del agua en energía mecánica, la cual se utiliza para impulsar un generador eléctrico.

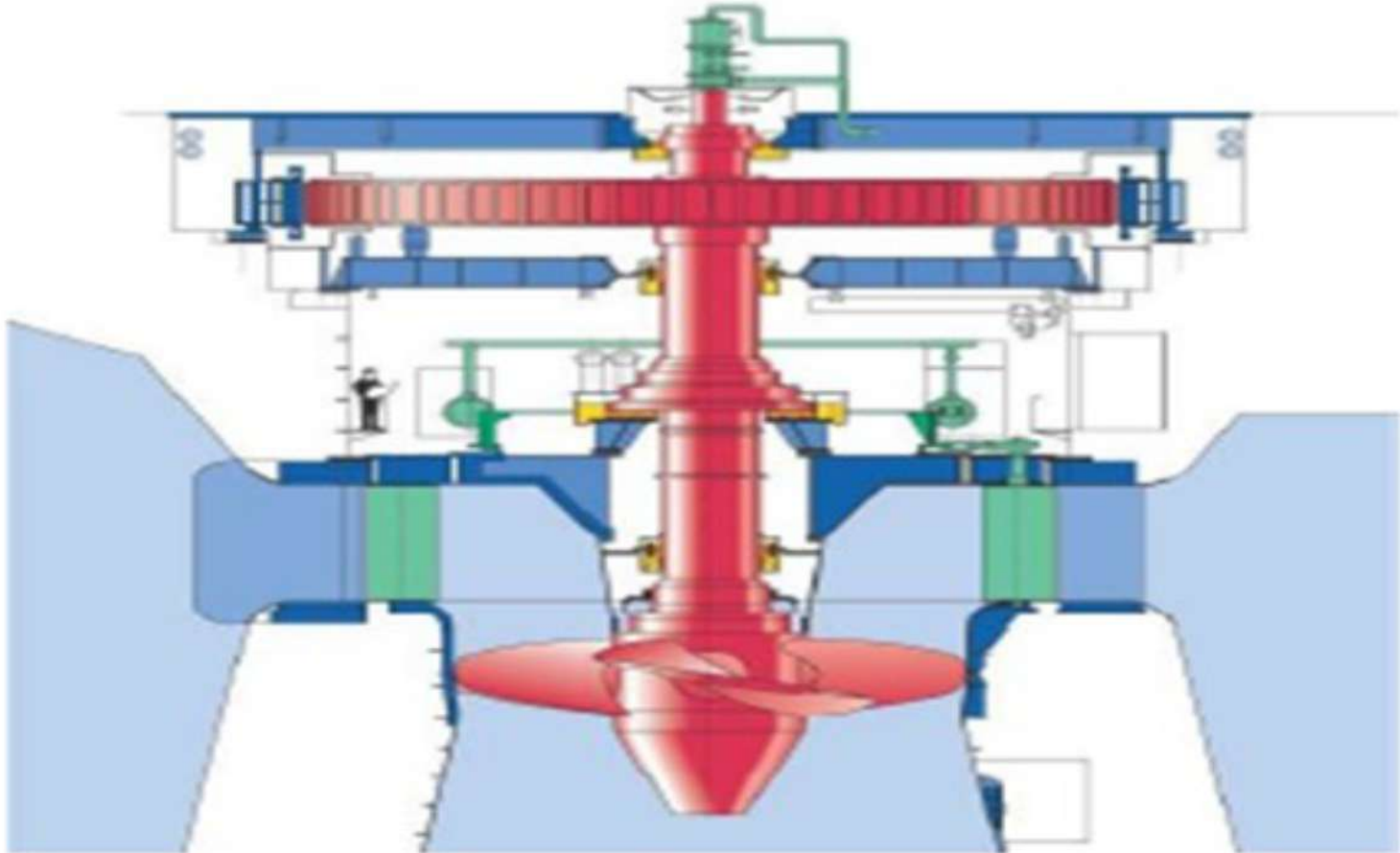
La eficiencia de las turbinas hidráulicas es normal-mente alta, superior al 85% después de contabilizar las perdidas hidráulicas, de chumaceras, de fricción, y las perdidas mecánicas en general.

Hay tres tipos de turbinas hidráulicas, a saber:

1. Turbina Kaplan
2. Turbina Francis
3. Turbina Pelton

TURBINAS HIDRÁULICAS

Turbinas Kaplan



Sección longitudinal turbina Kaplan.

Su uso se limita a alturas entre 4- 90m

Sus velocidades usuales están entre 400-900 rpm

Sus velocidades óptimas están entre los rangos

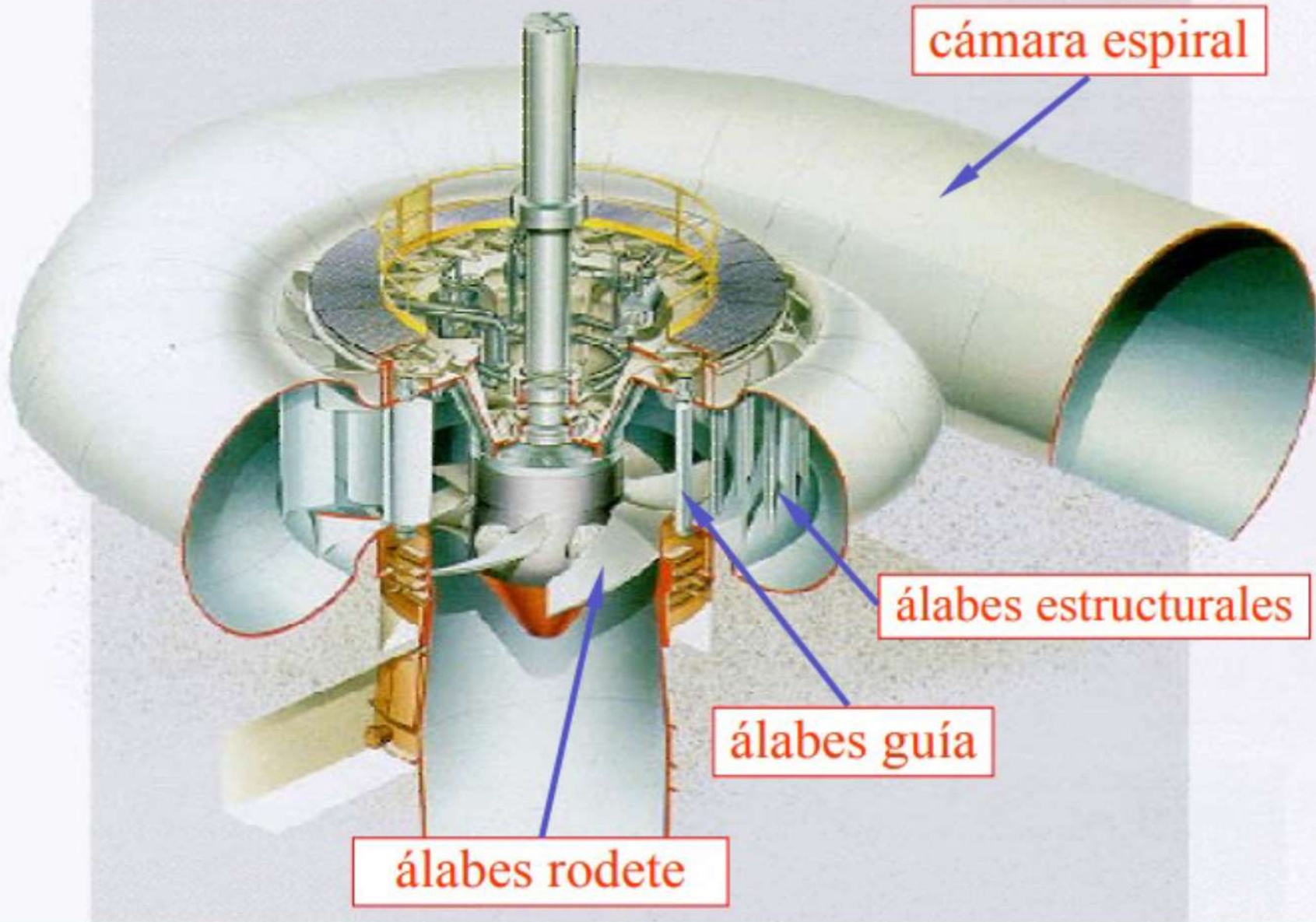
Más bajos y grandes potencias.

cámara espiral

álabes estructurales

álabes guía

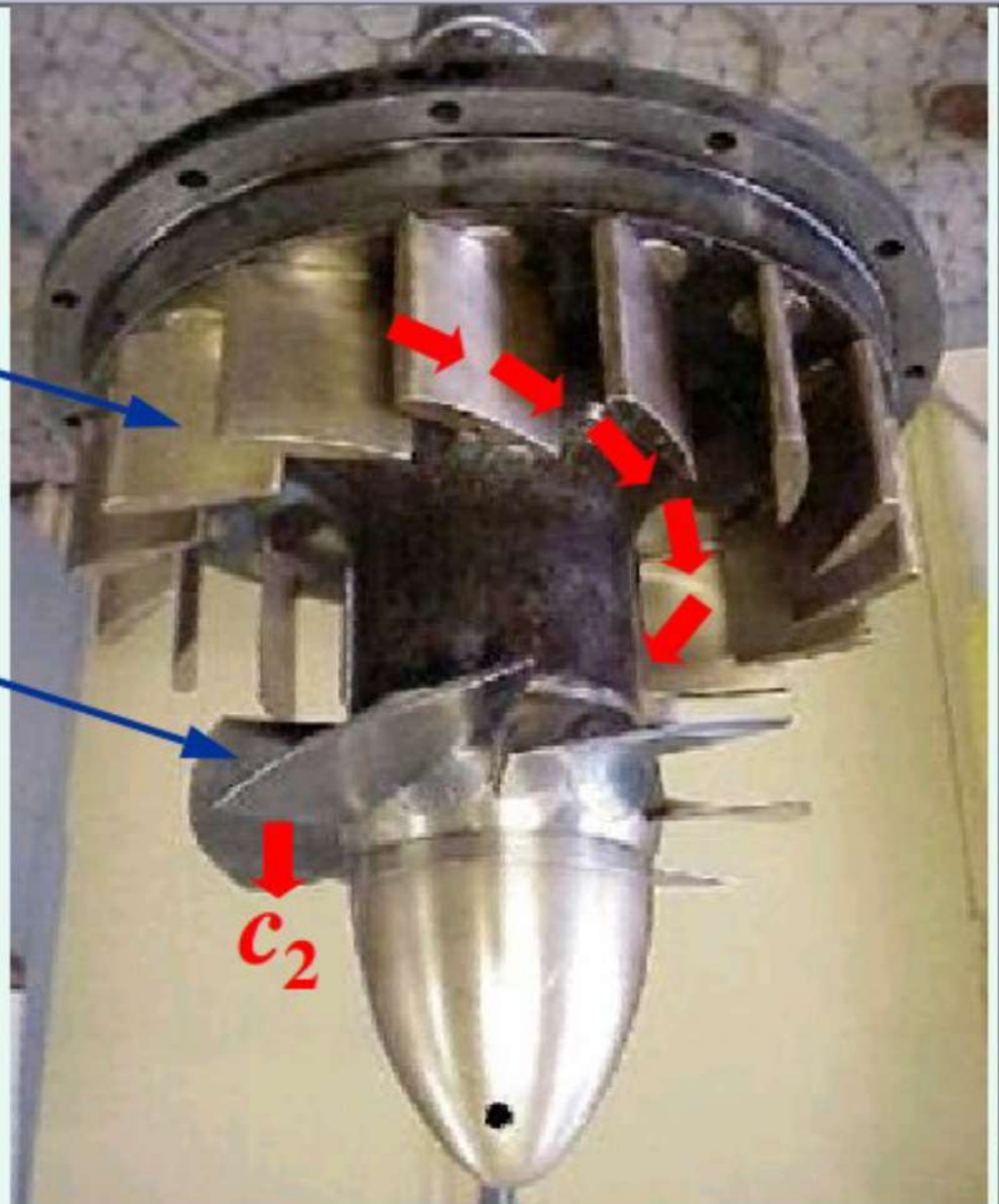
álabes rodete



Turbina Kaplan

álabes guía

álabes rodete



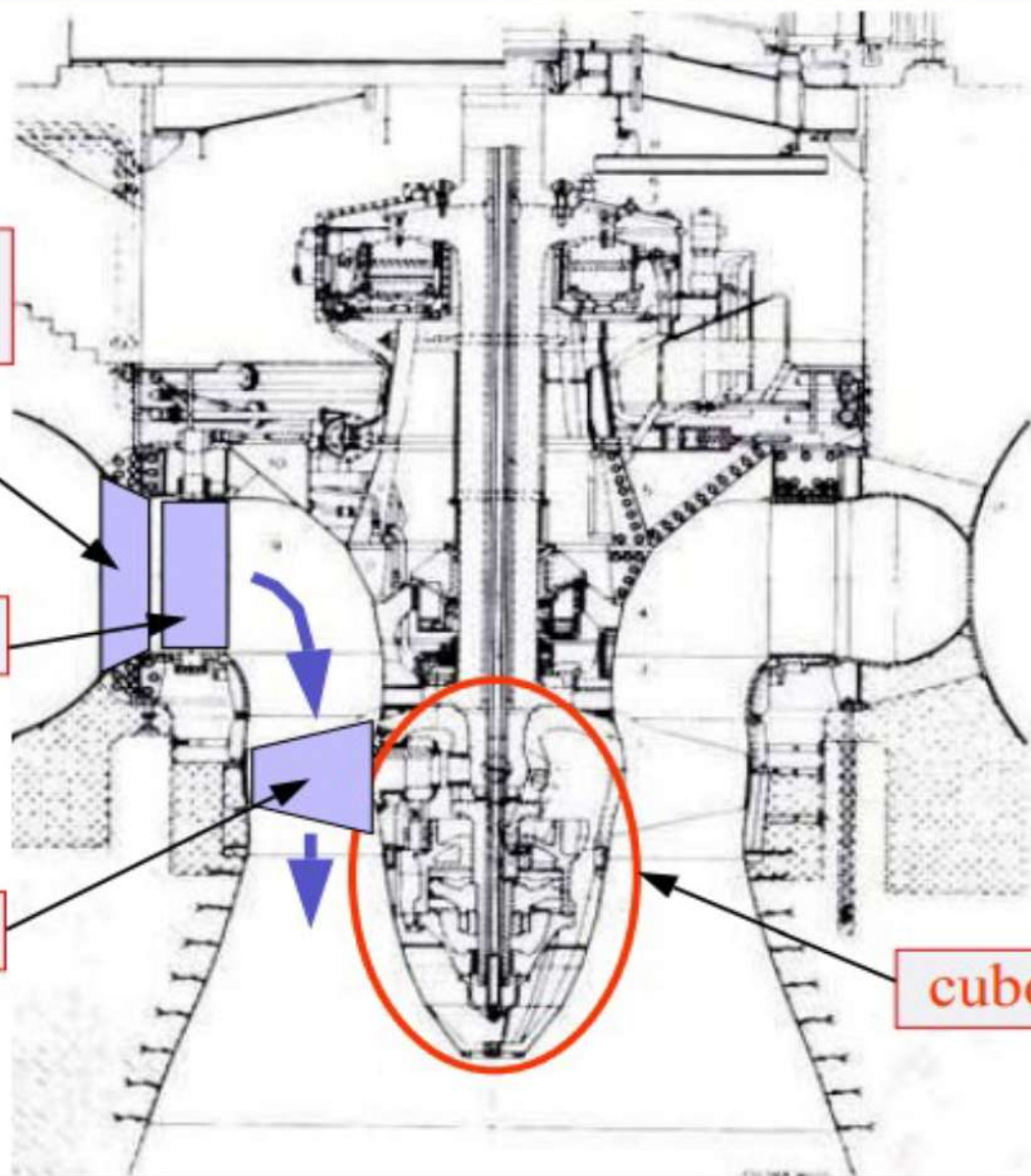


álabes
estructurales

álabes guía

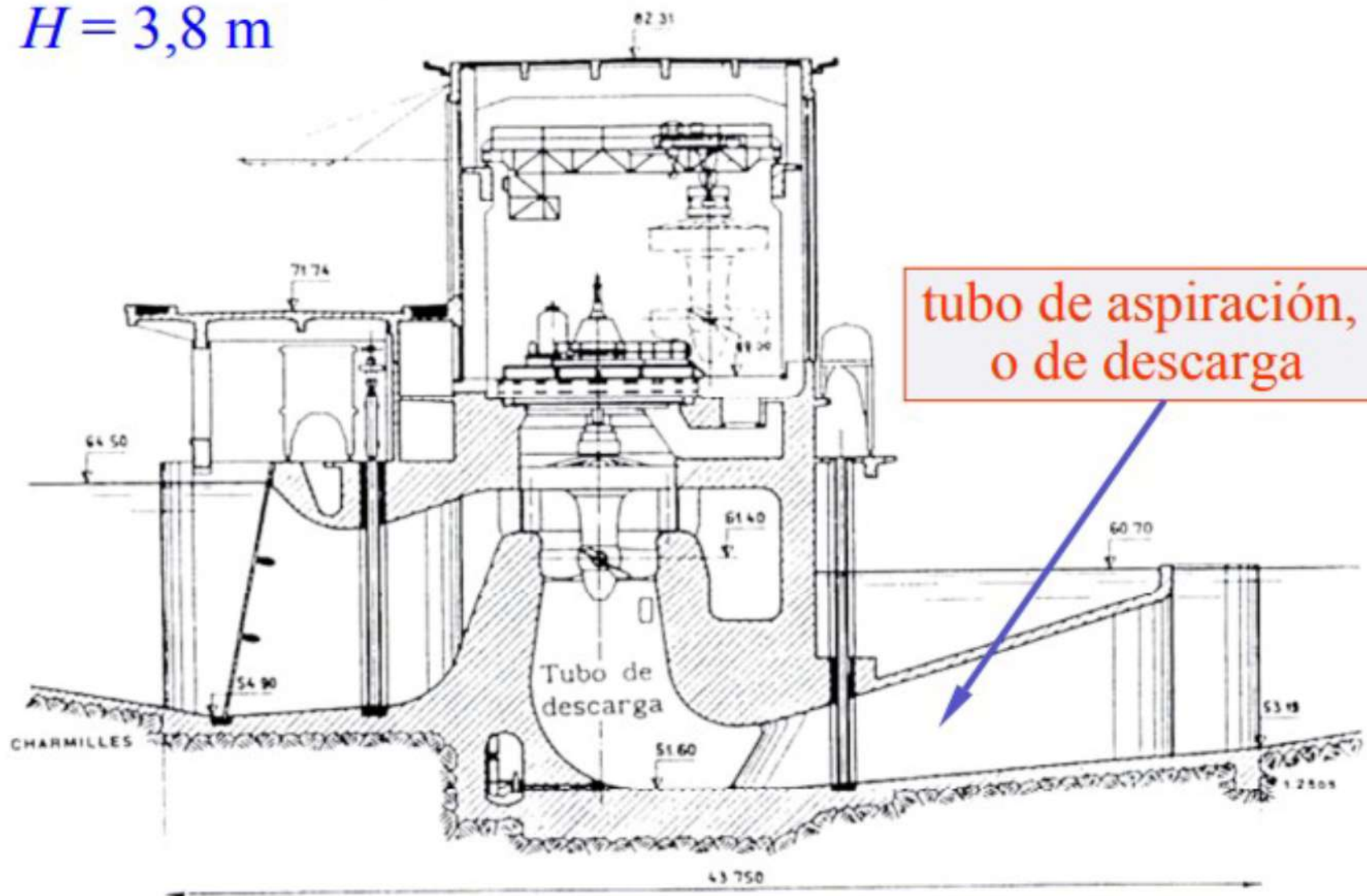
álabes rodete

cubo rodete



Turbina Kaplan

$H = 3,8 \text{ m}$

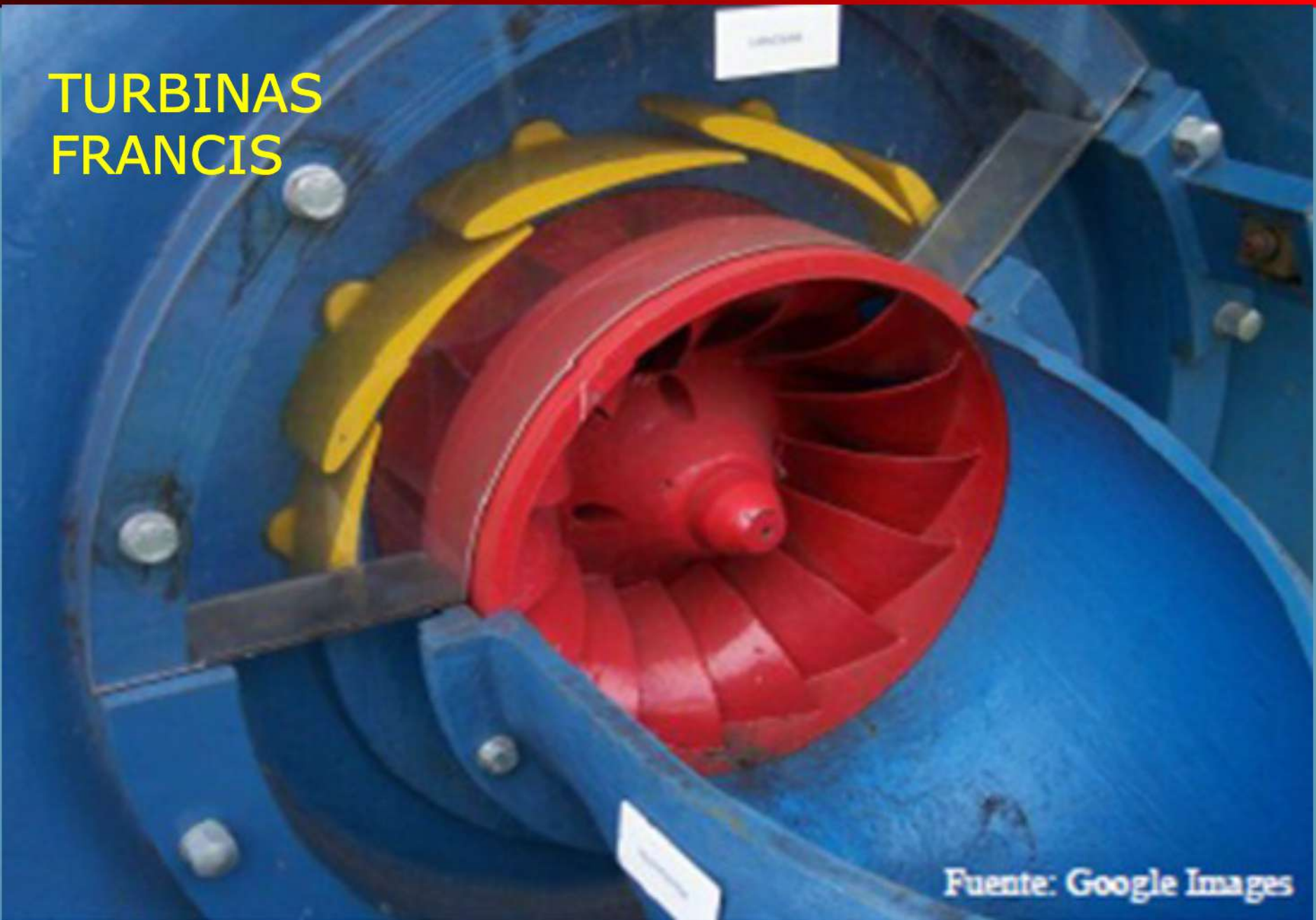






TURBINAS HIDRÁULICAS

TURBINAS FRANCIS



Fuente: Google Images

TURBINAS HIDRÁULICAS



Cuerpos o carcasas turbinas Francis.

TURBINAS FRANCIS

Su aplicación es para medianas y pequeñas alturas y caudales medianos. Es una turbina de reacción cuya altura de trabajo está entre el nivel del agua en la cámara de carga y el canal de descarga.

La altura del salto esta entre 30 Y 550m

Su velocidad oscila entre los 50 y 550 RPM

ELEMENTOS DE UNA TURBINA FRANCIS

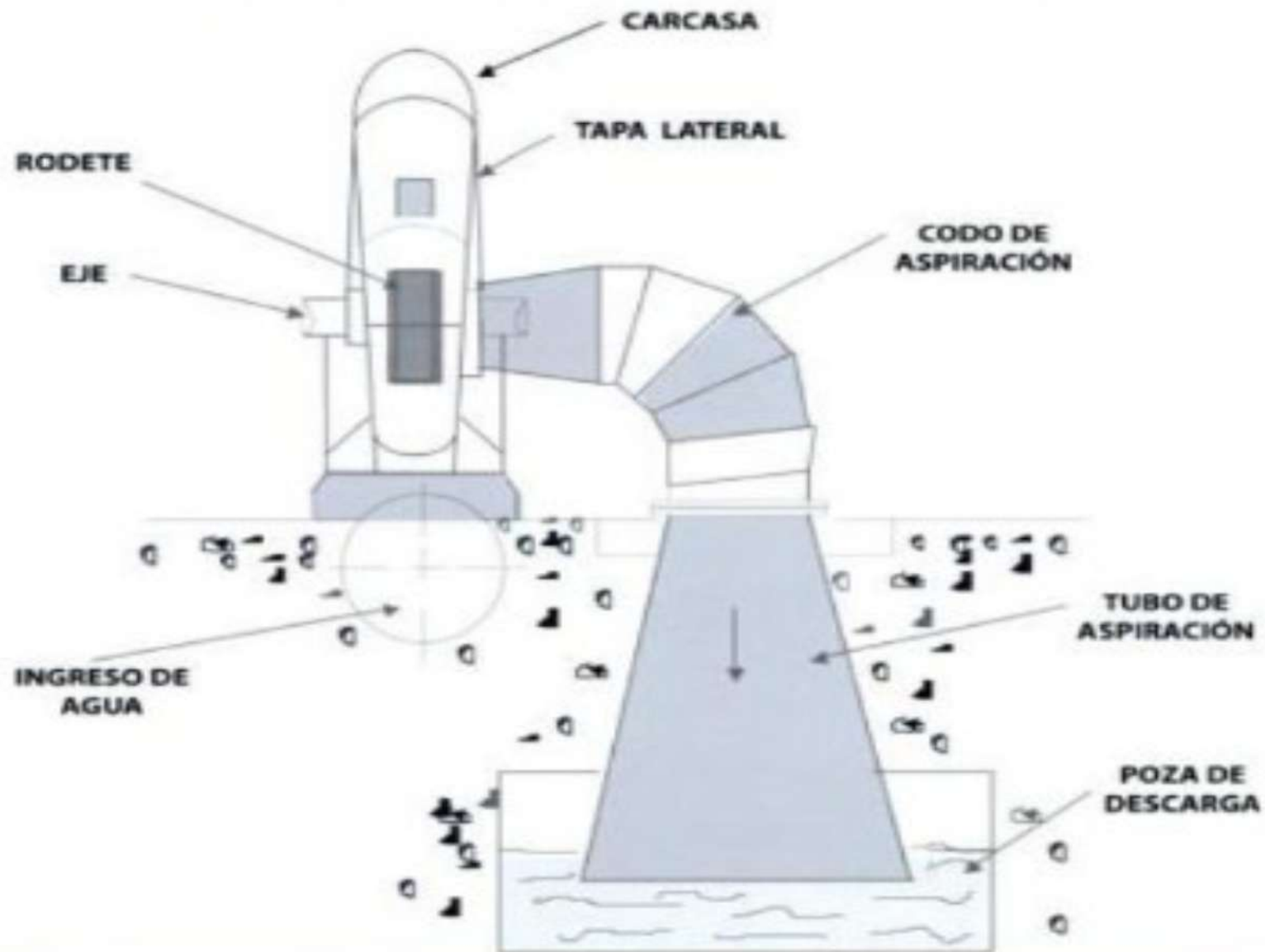
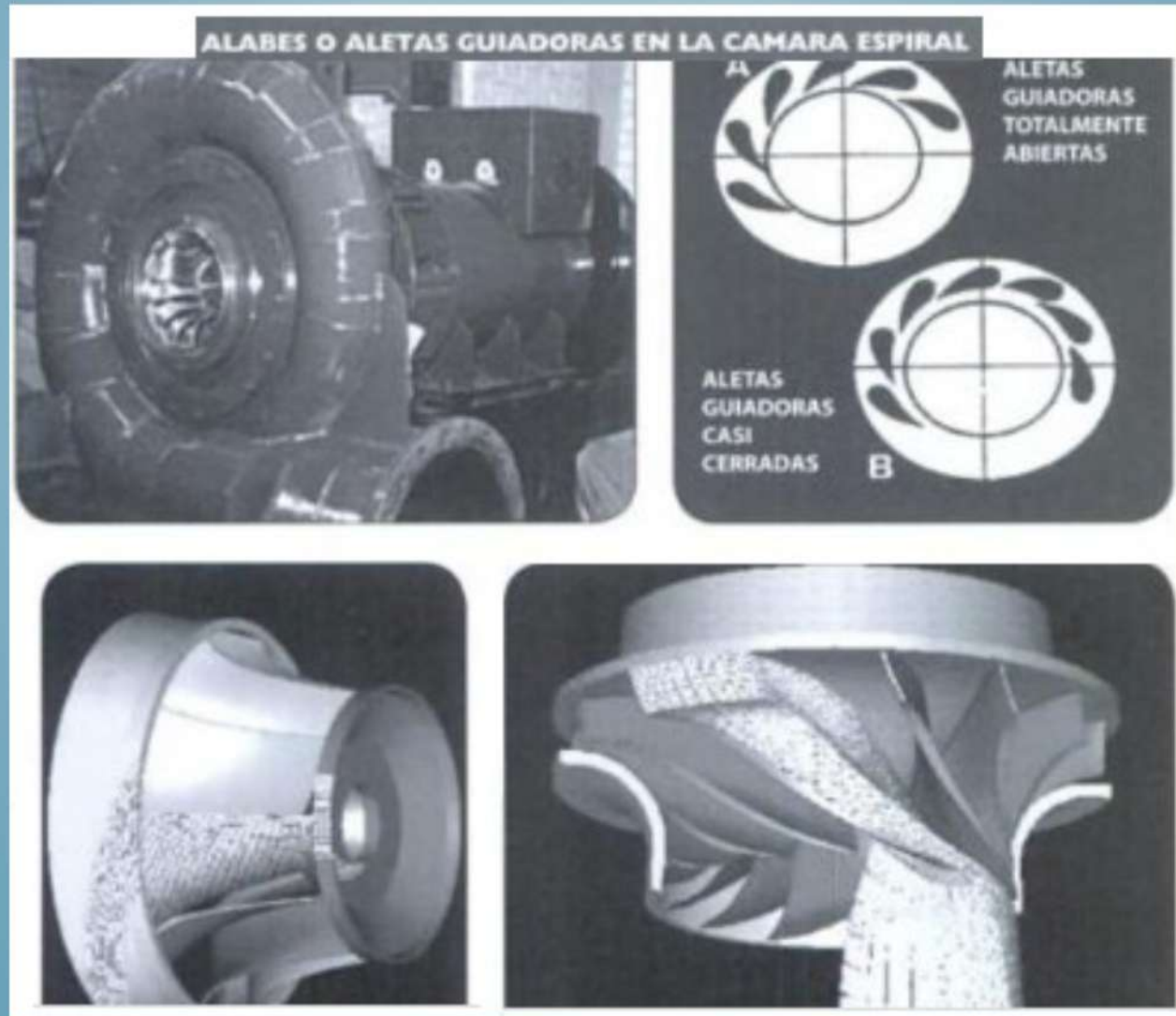
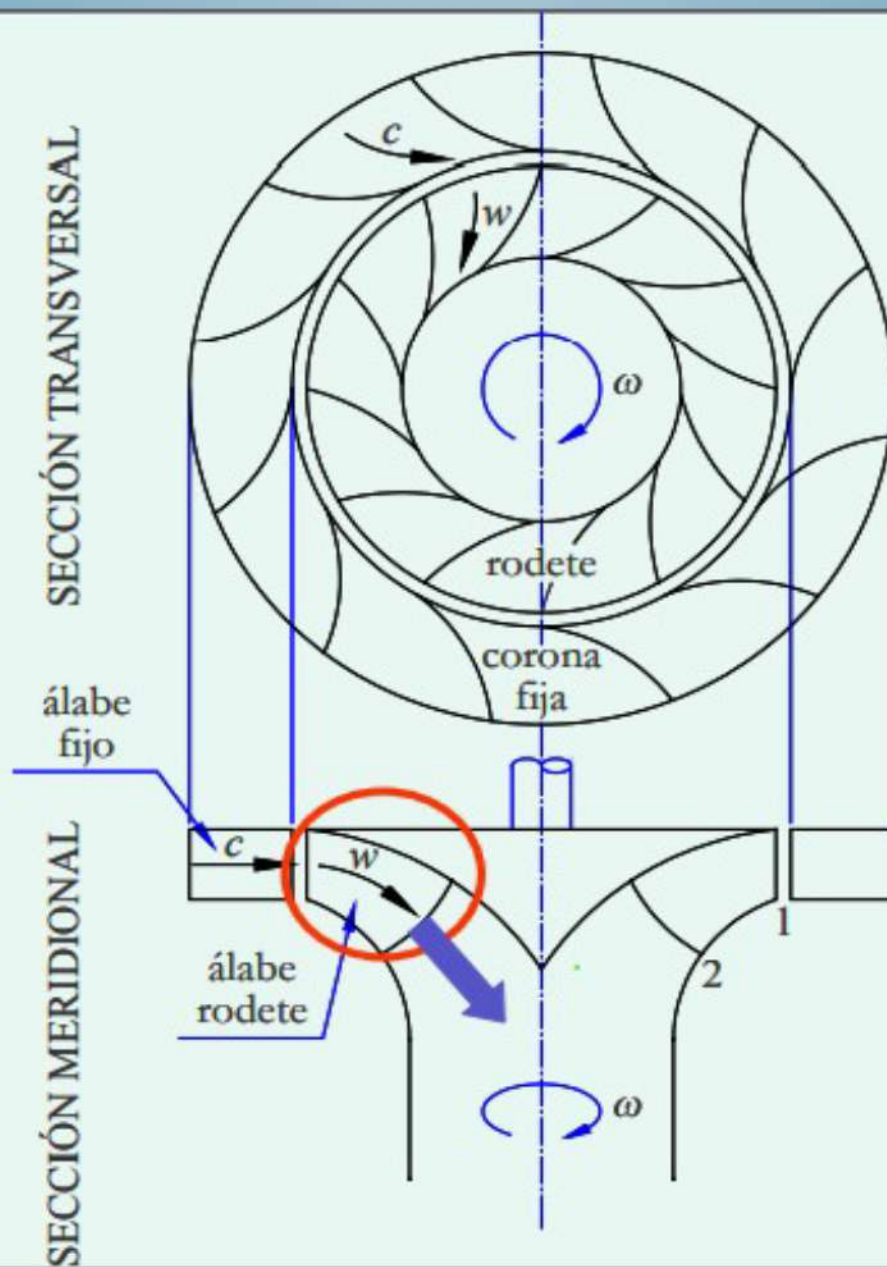


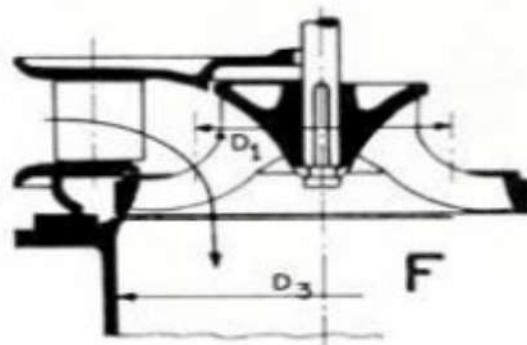
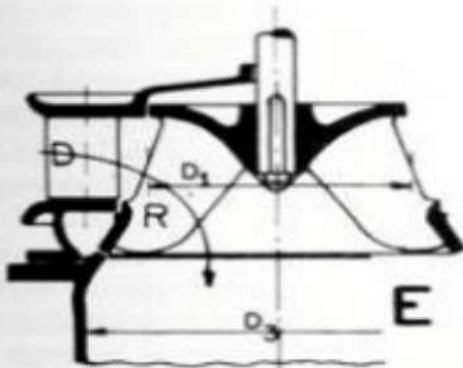
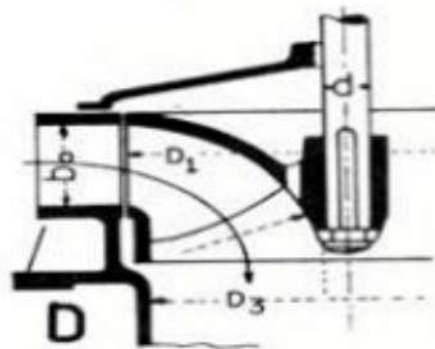
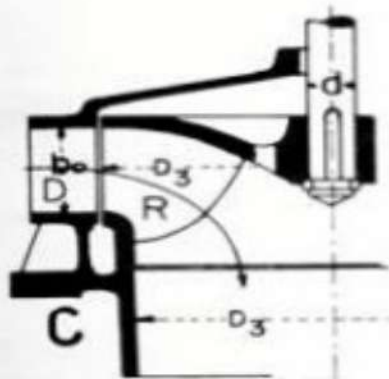
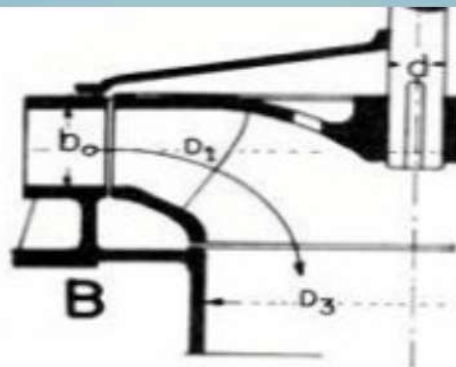
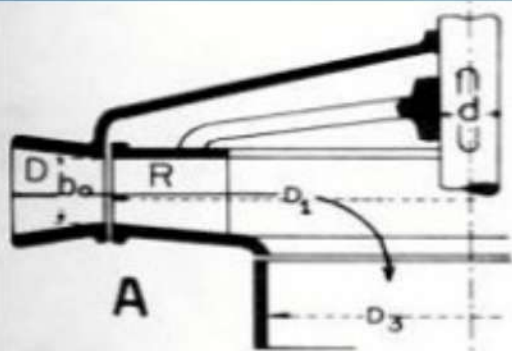
FIGURA 5.A: ELEMENTOS DE UNA TURBINA FRANCIS

ELEMENTOS DE UNA TURBINA FRANCIS

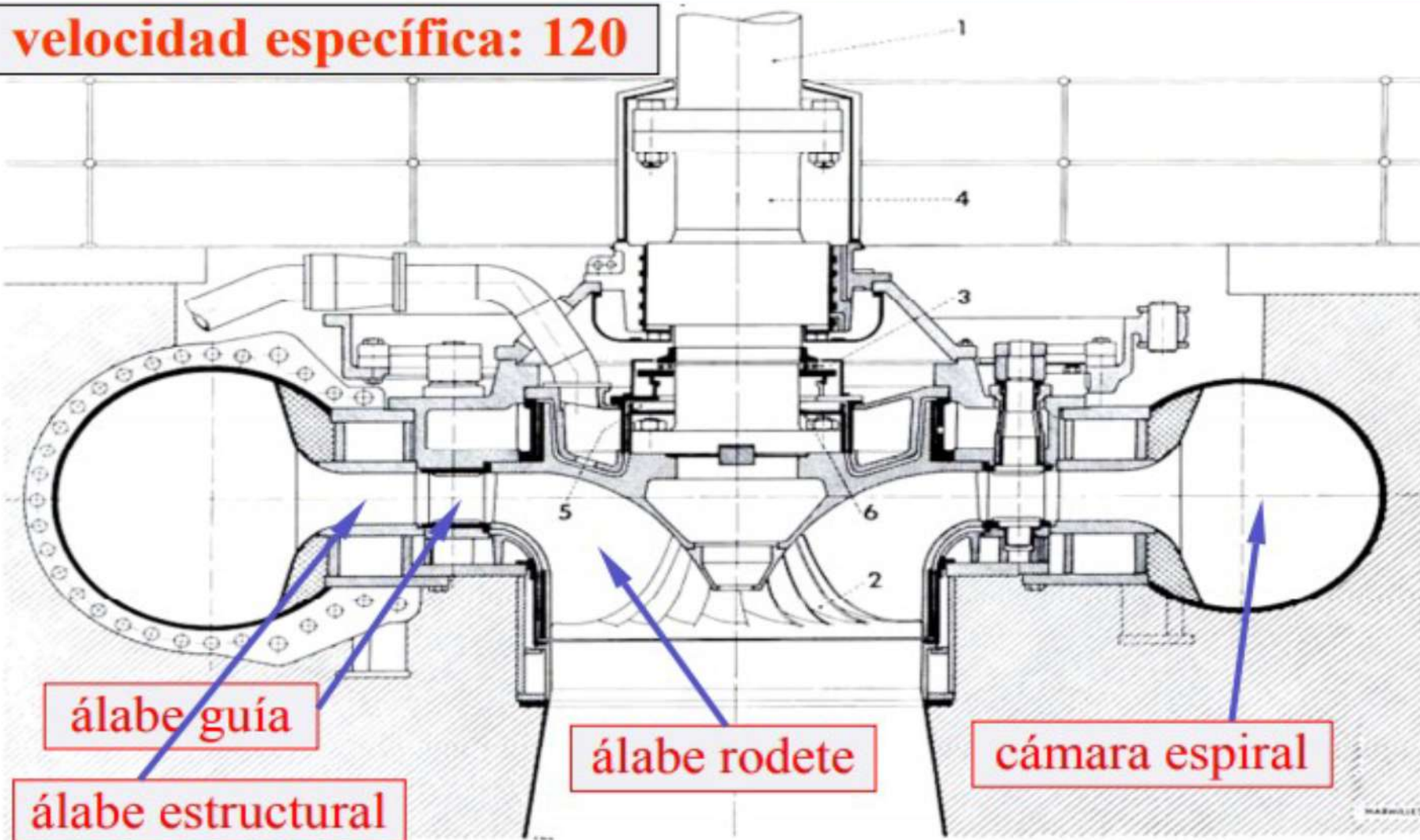


Turbina Francis





velocidad específica: 120



- 1. Eje intermedio
- 2. Rodete
- 3. Junta de anillo de carbono

- 4. Eje de la turbina
- 5. Junta plana de aislamiento
- 6. Tapa de protección de los pernos de acoplamiento del rodete

Turbina-bomba reversible. Tajo de la Encantada (Málaga)

Potencia máxima: 90 MW

Revoluciones: 500 rpm

Altura máxima: 398,5 m

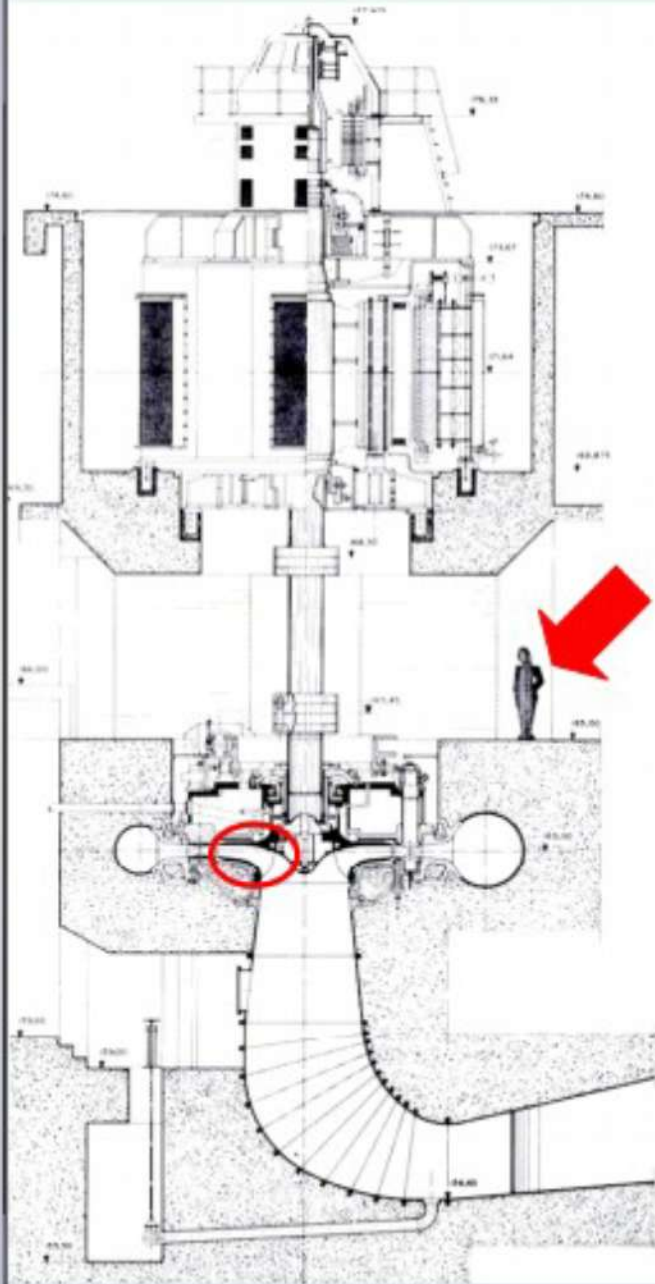
Caudal máximo (turbina): 27,2 m³/s

Caudal máximo (bomba): 24,5 m³/s

Velocidad específica: 100

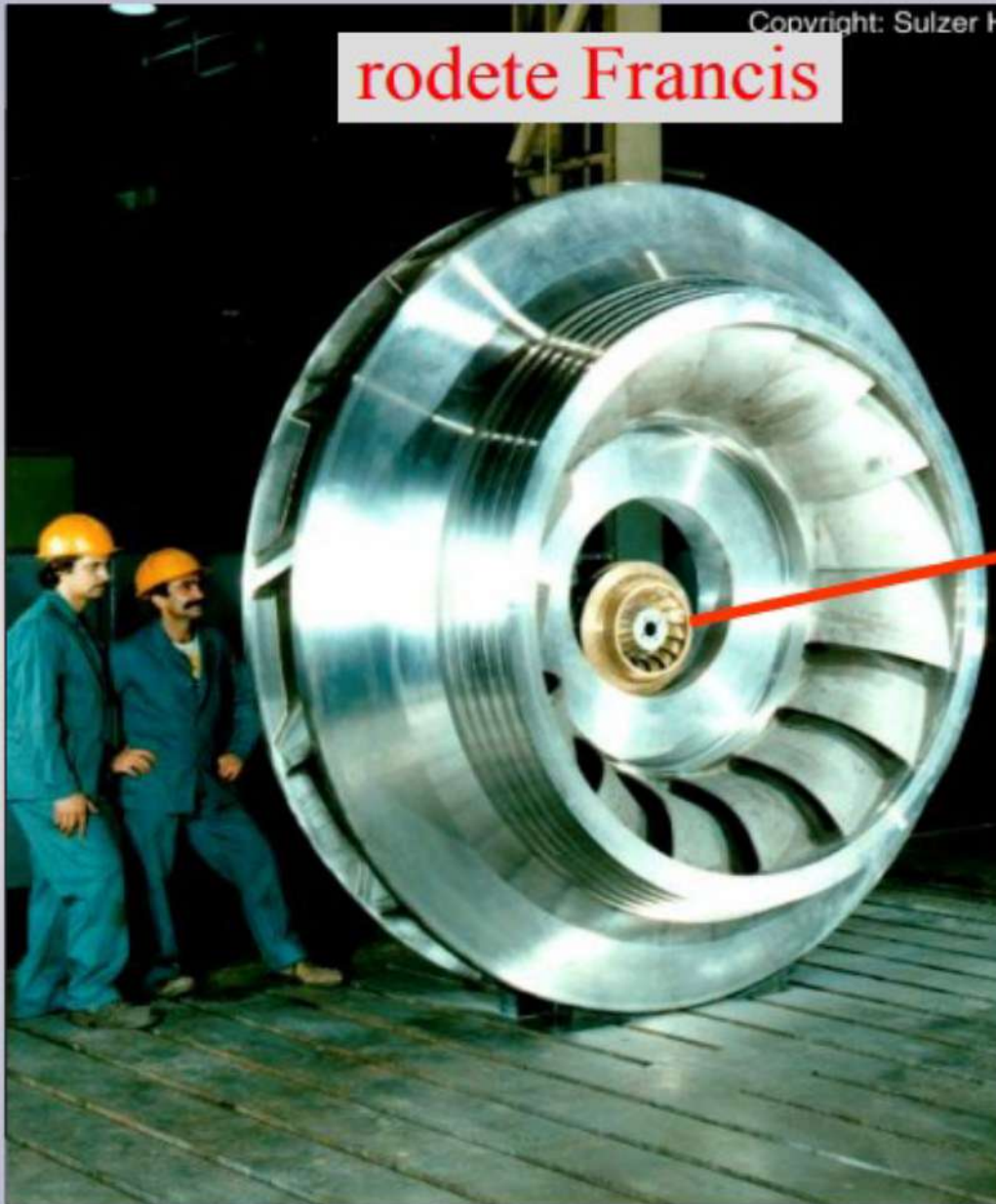
Cuatro grupos

Potencia total: 360 MW



Copyright: Sulzer H

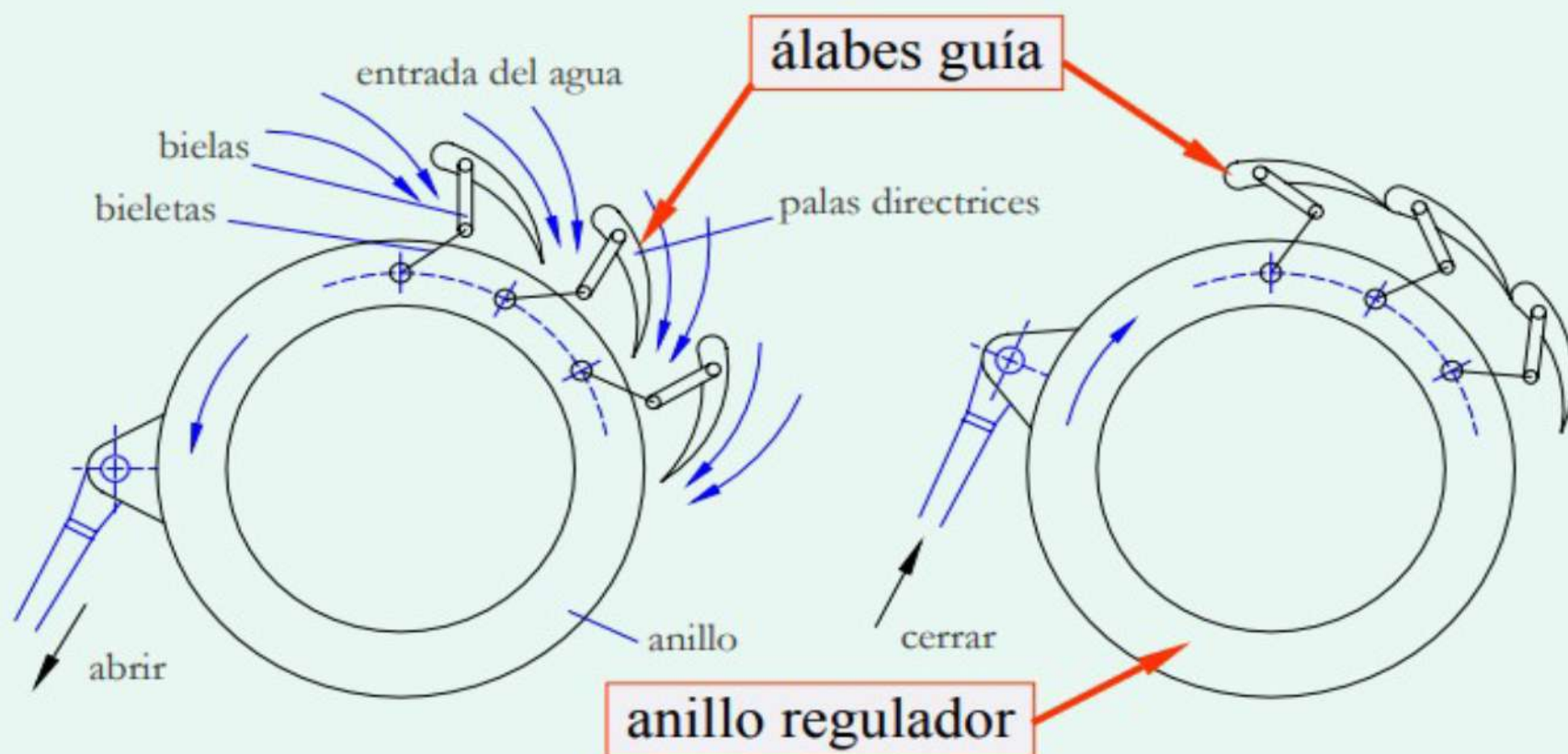
rodete Francis



modelo



Sistema de regulación turbinas de reacción



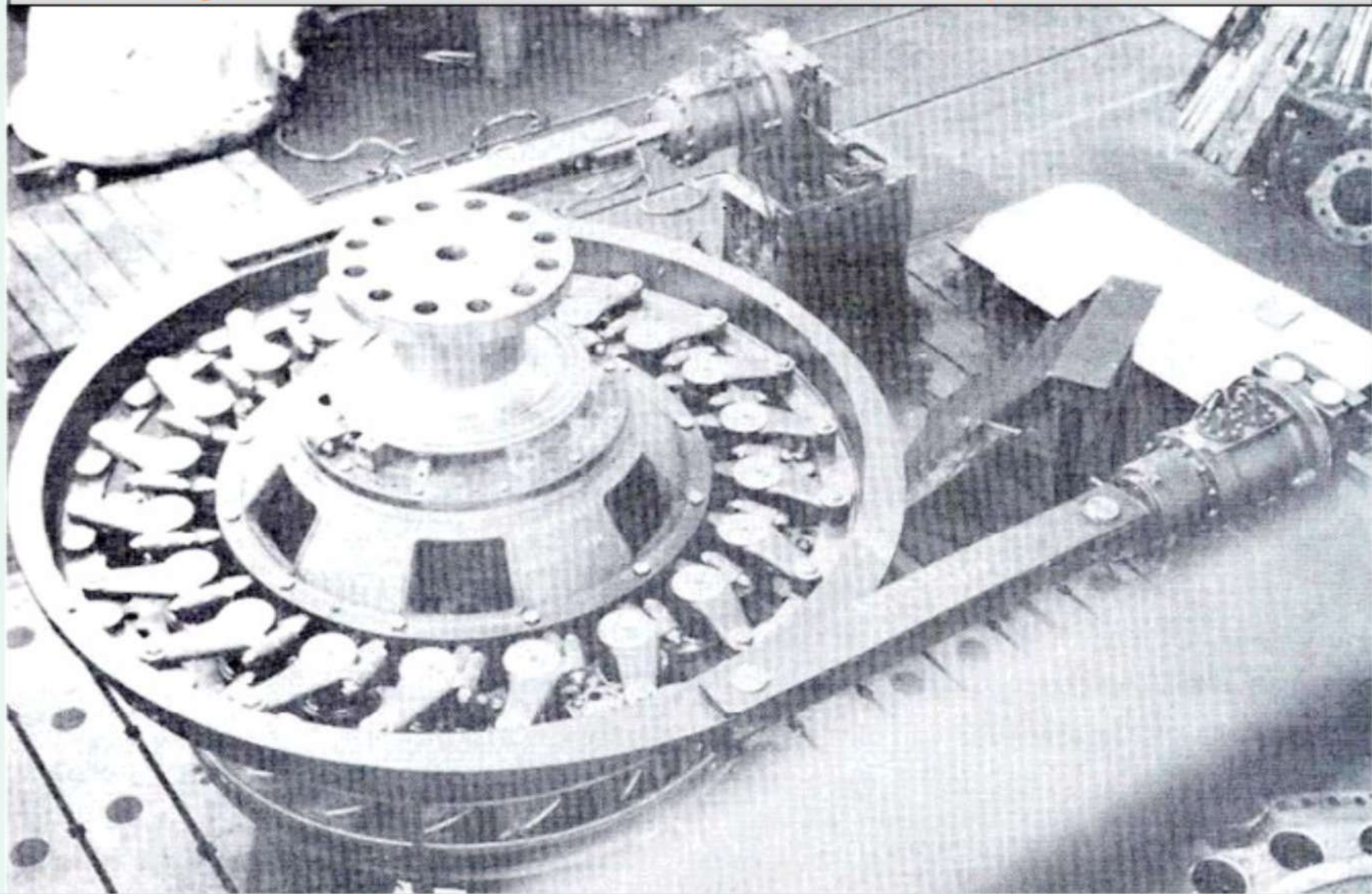
cerrado



abierto



bielas y anillo de distribución movido por dos brazos

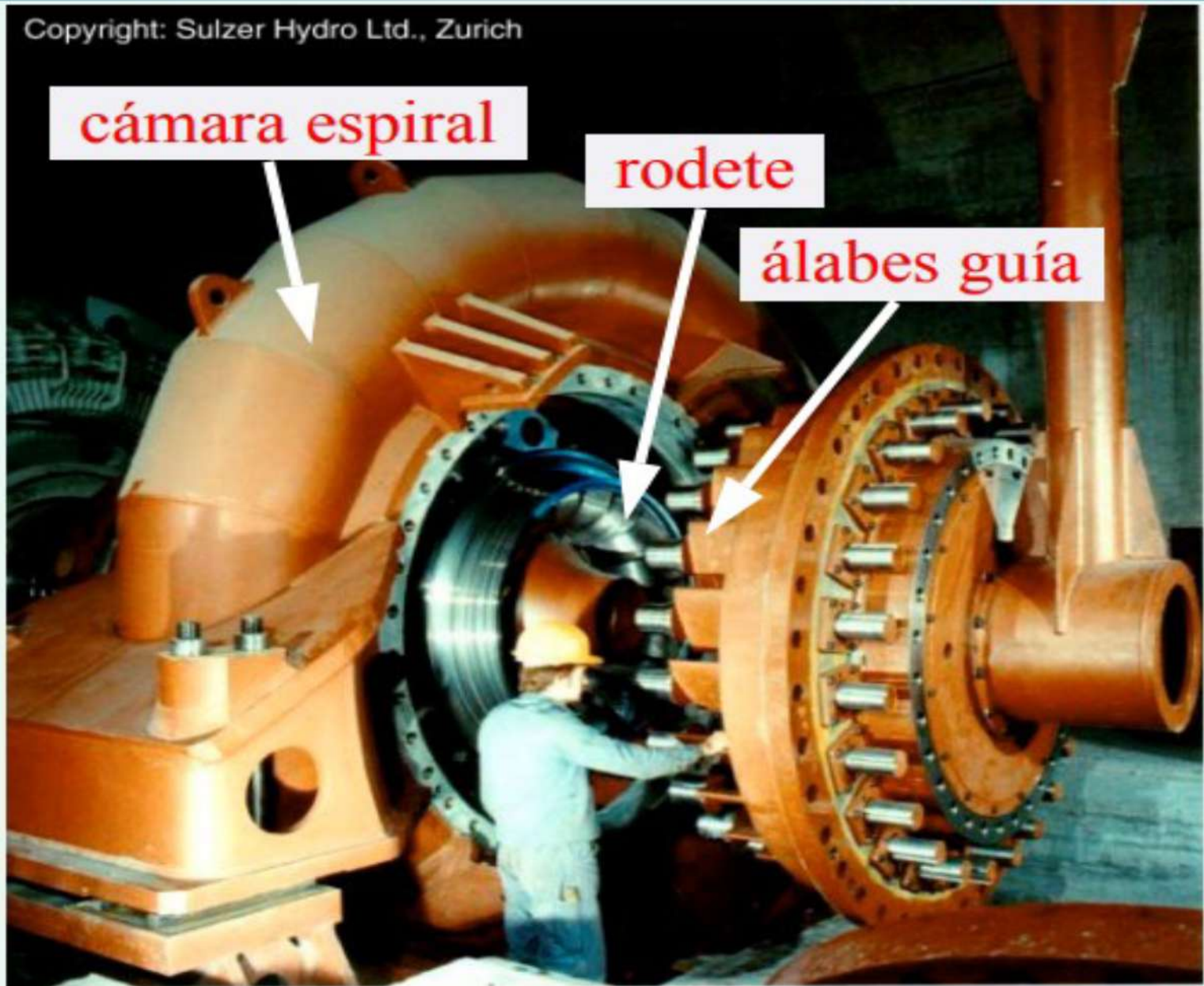


Copyright: Sulzer Hydro Ltd., Zurich

cámara espiral

rodete

álabes guía





bielas y anillo de distribución movido por dos brazos

TURBINAS PELTON



TURBINAS PELTON



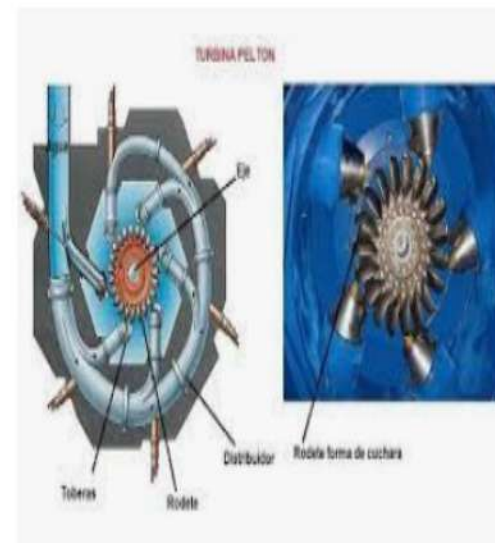
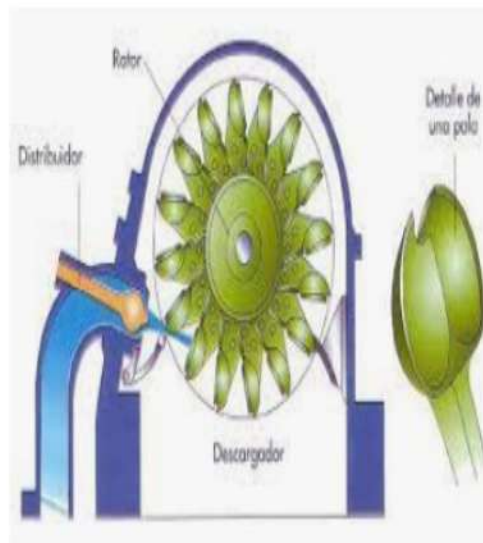
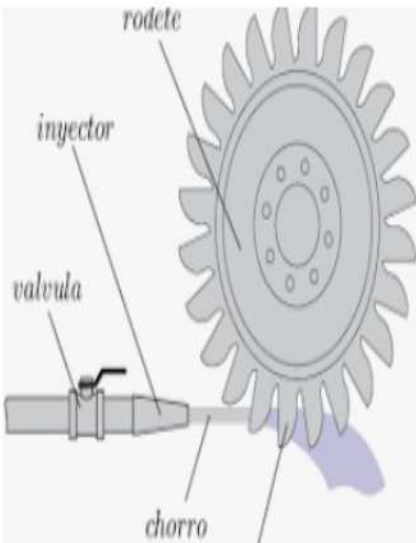
Turbina Pelton - Wikiped...
es.wikipedia.org

Turbinas Pelton
ghiggia.it

Turbina Pelton - ZECO - hidráulica / ver...
directindustry.es

Turbinas Pelton - YouTube
youtube.com

La Turbina pelton más poderosa del mundo - Y...
youtube.com



Características de las turbinas Peltón

Es el tipo de turbina más popular. Siendo su Componente principal la rueda o rodete Peltón. Su aplicación esta dada para grandes saltos y caídas y caudales pequeños, aunque es posible su Aplicación con caudales medianos cuando se Fabrican con más de un chorro.

Es una turbina de acción que transforma la energía cinética del agua en energía mecánica.

La altura del salto esta entre 100 y 1800 m.

Su velocidad oscila entre 10 a 75 RPM.

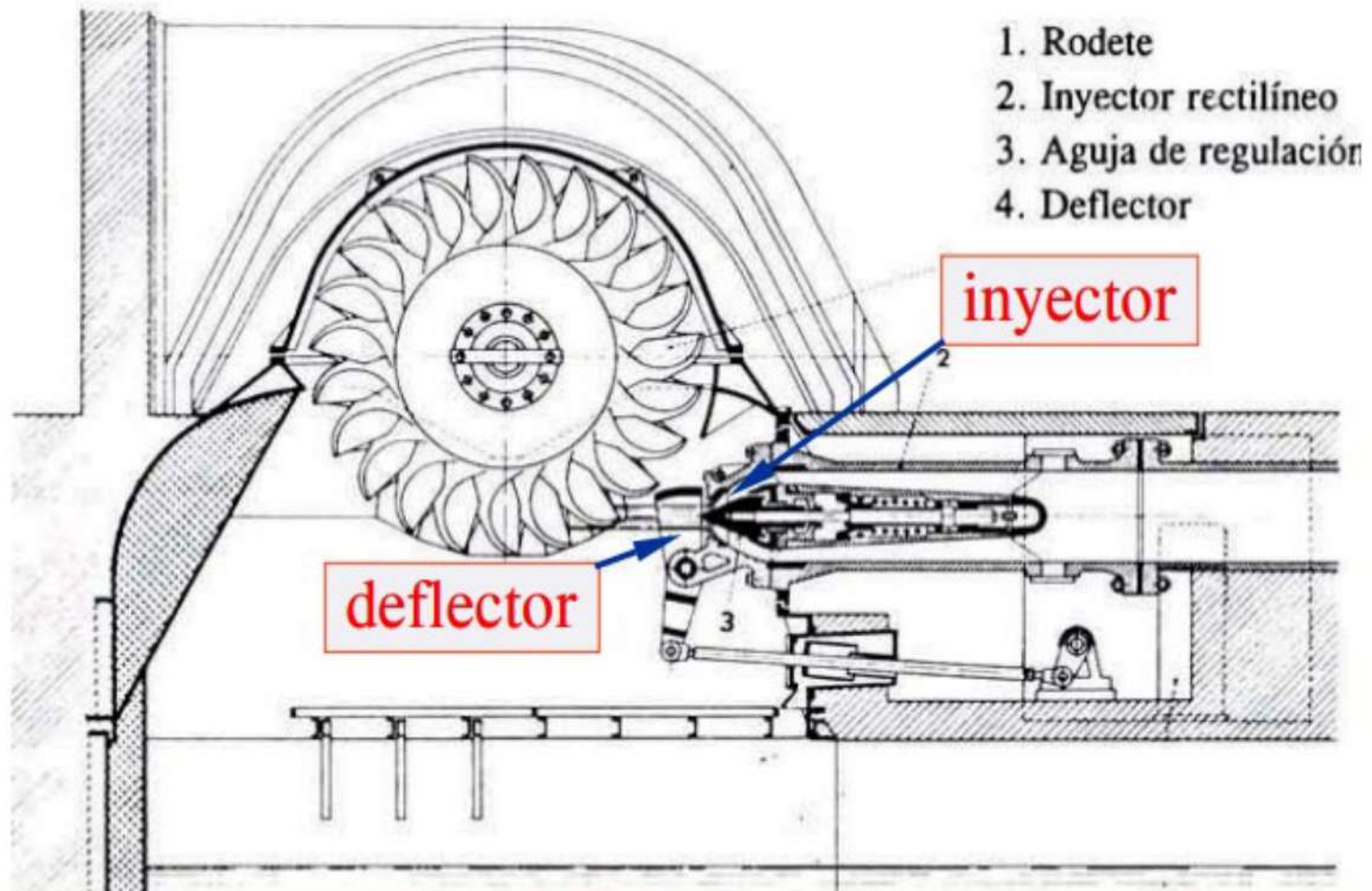
tamaño y número de cucharas



rodete Pelton



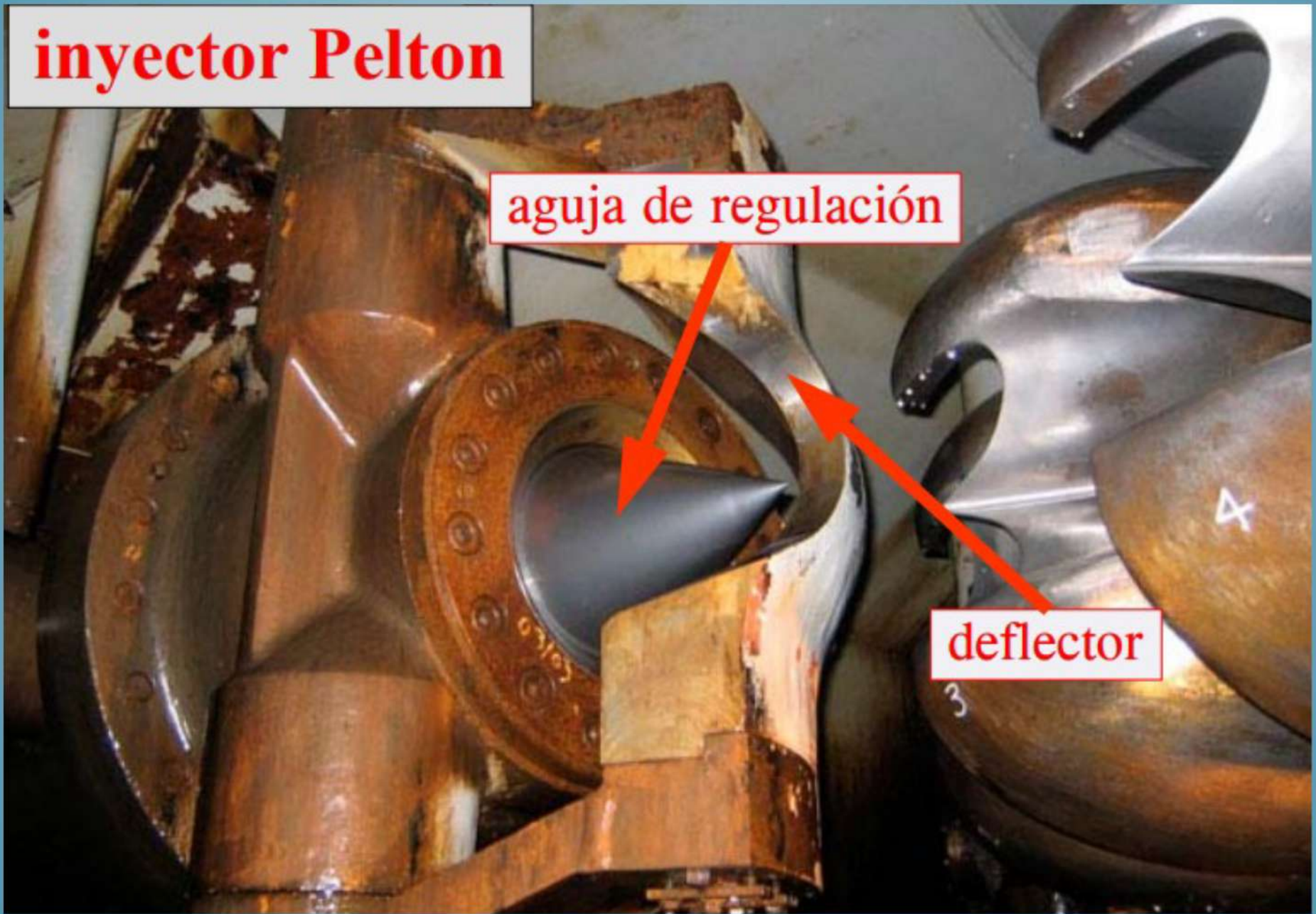
Pelton con 1 inyector

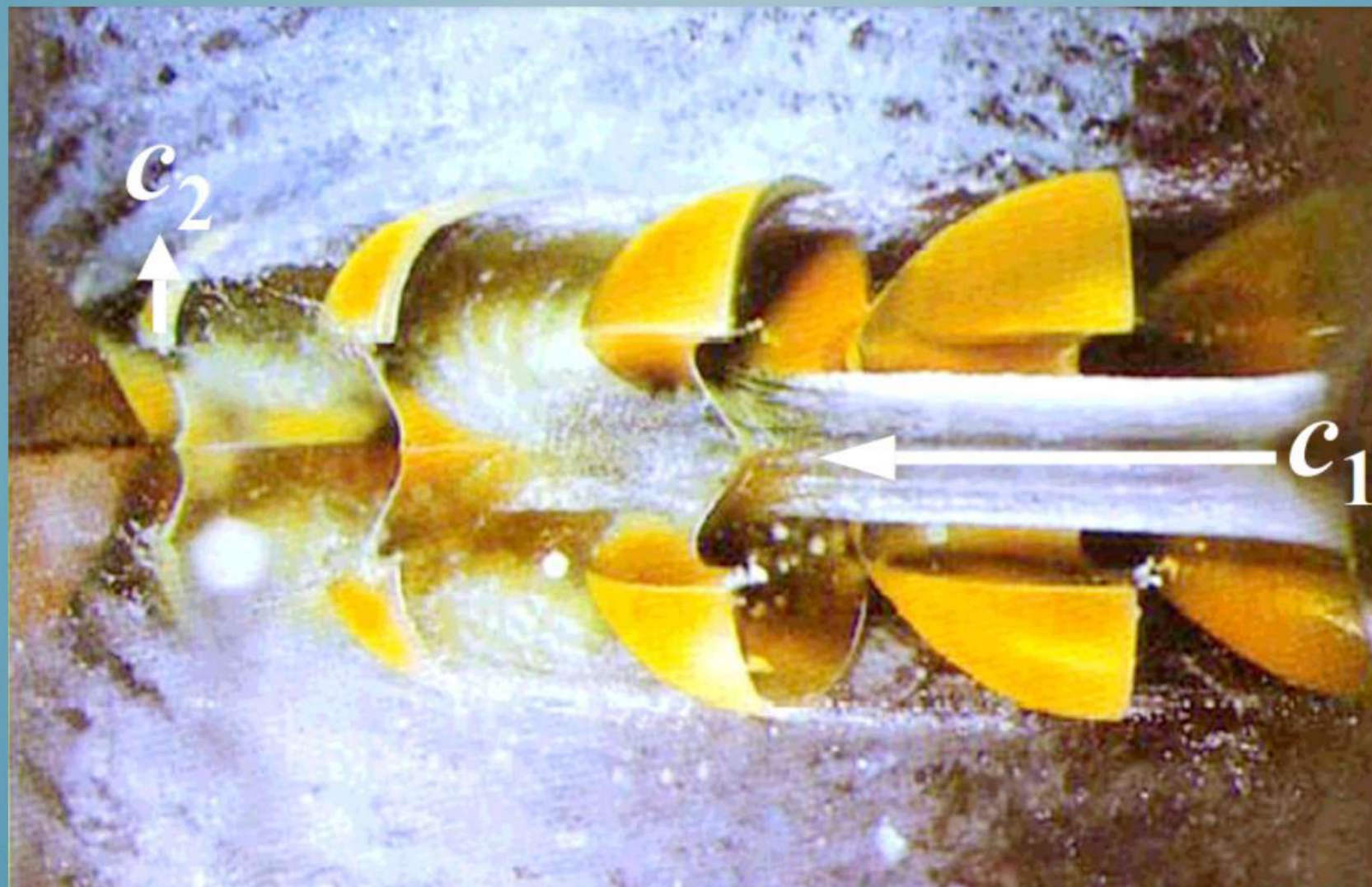


inyector Pelton

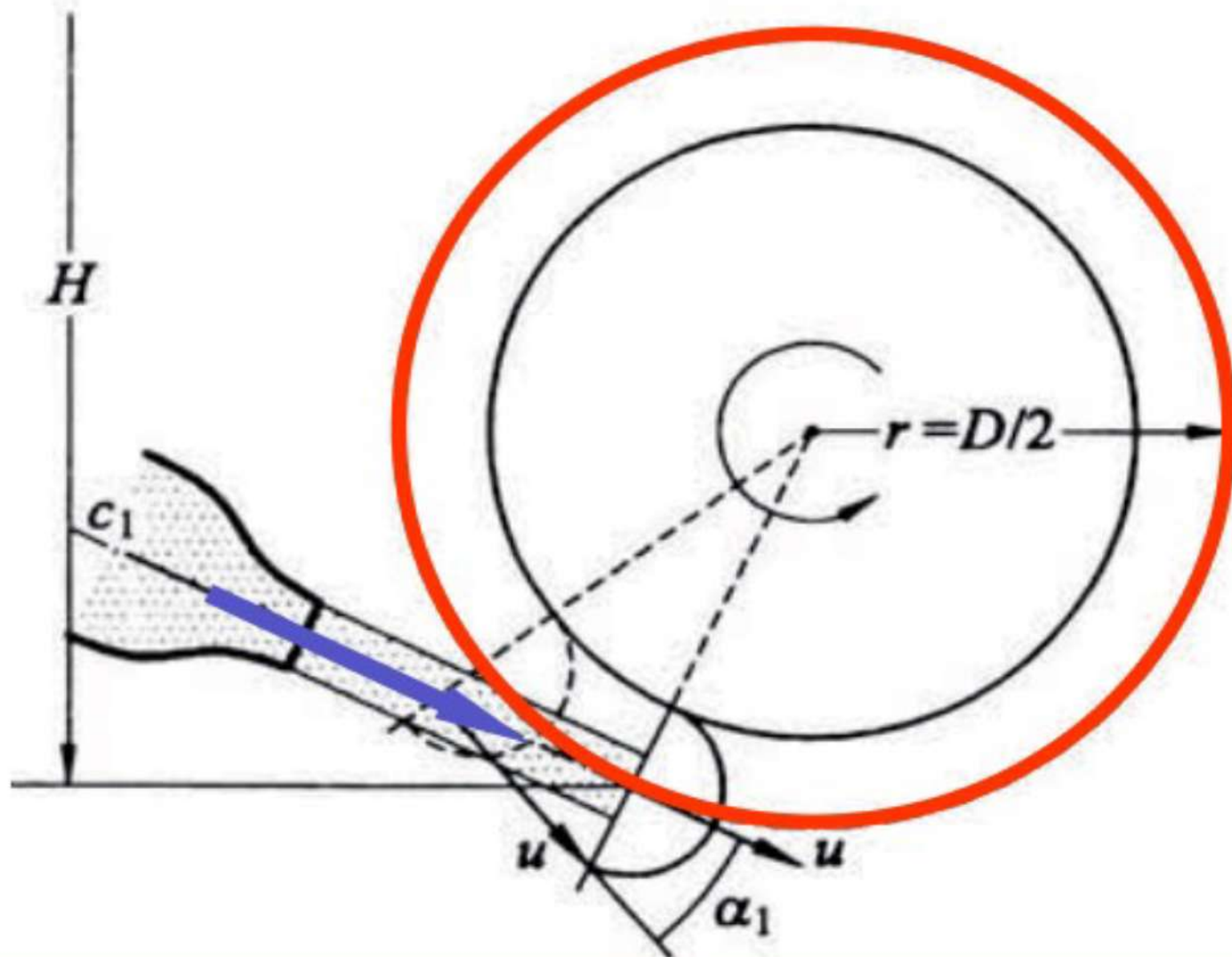
aguja de regulación

deflector

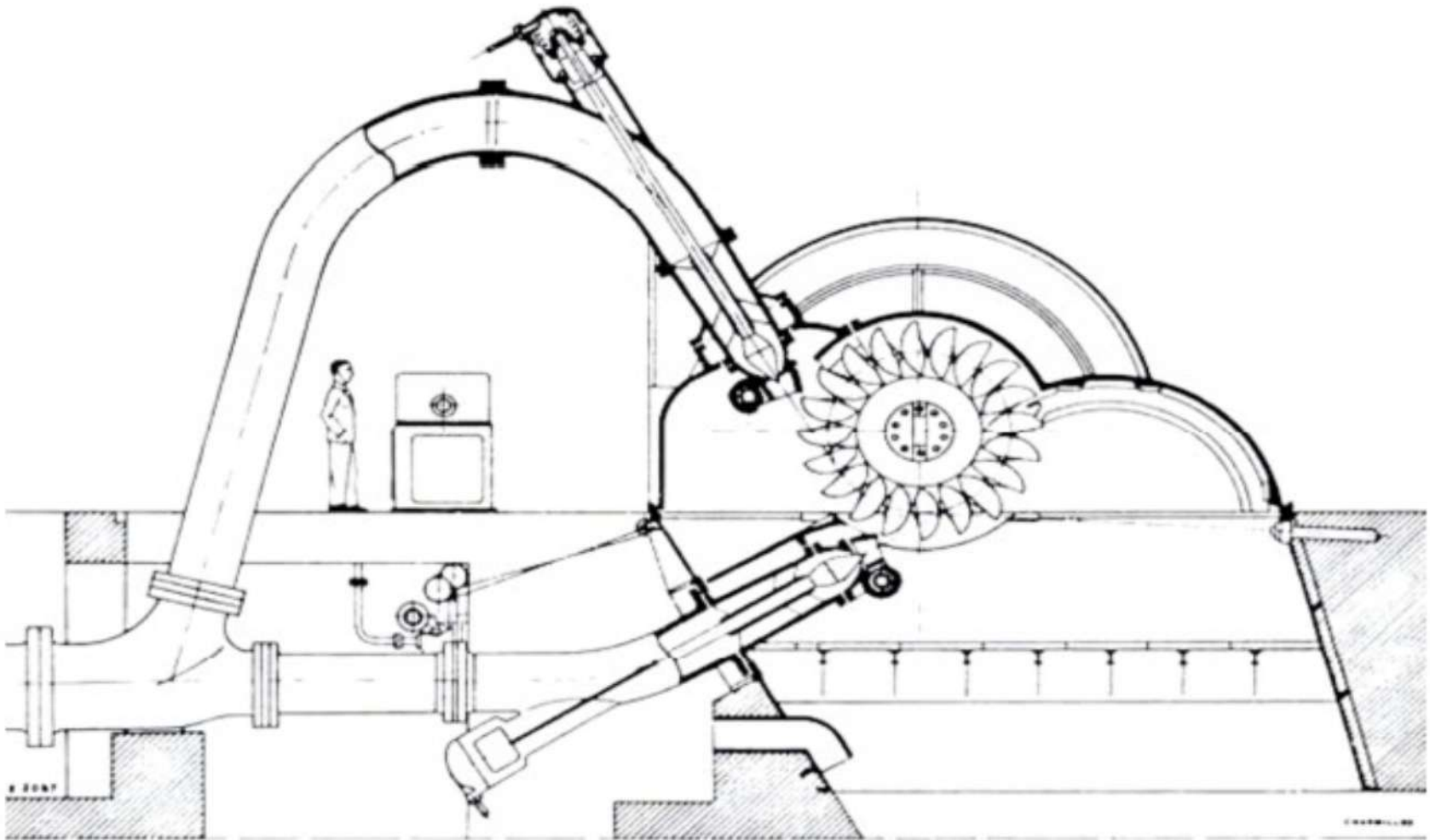


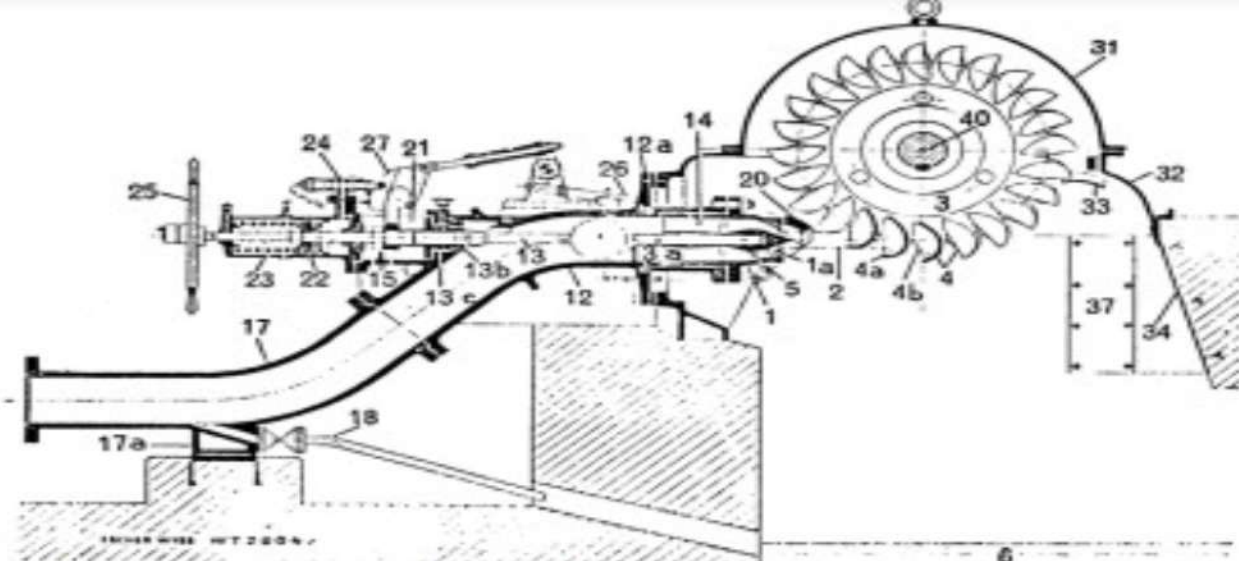


Diámetro del rodete (D)



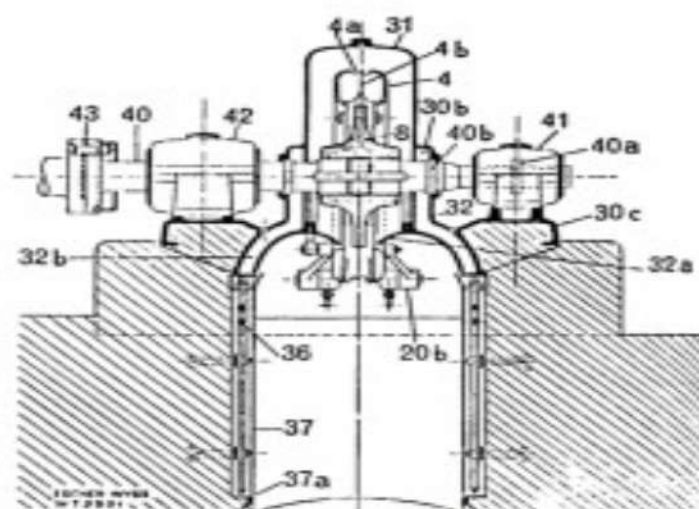
Pelton con 2 inyectores





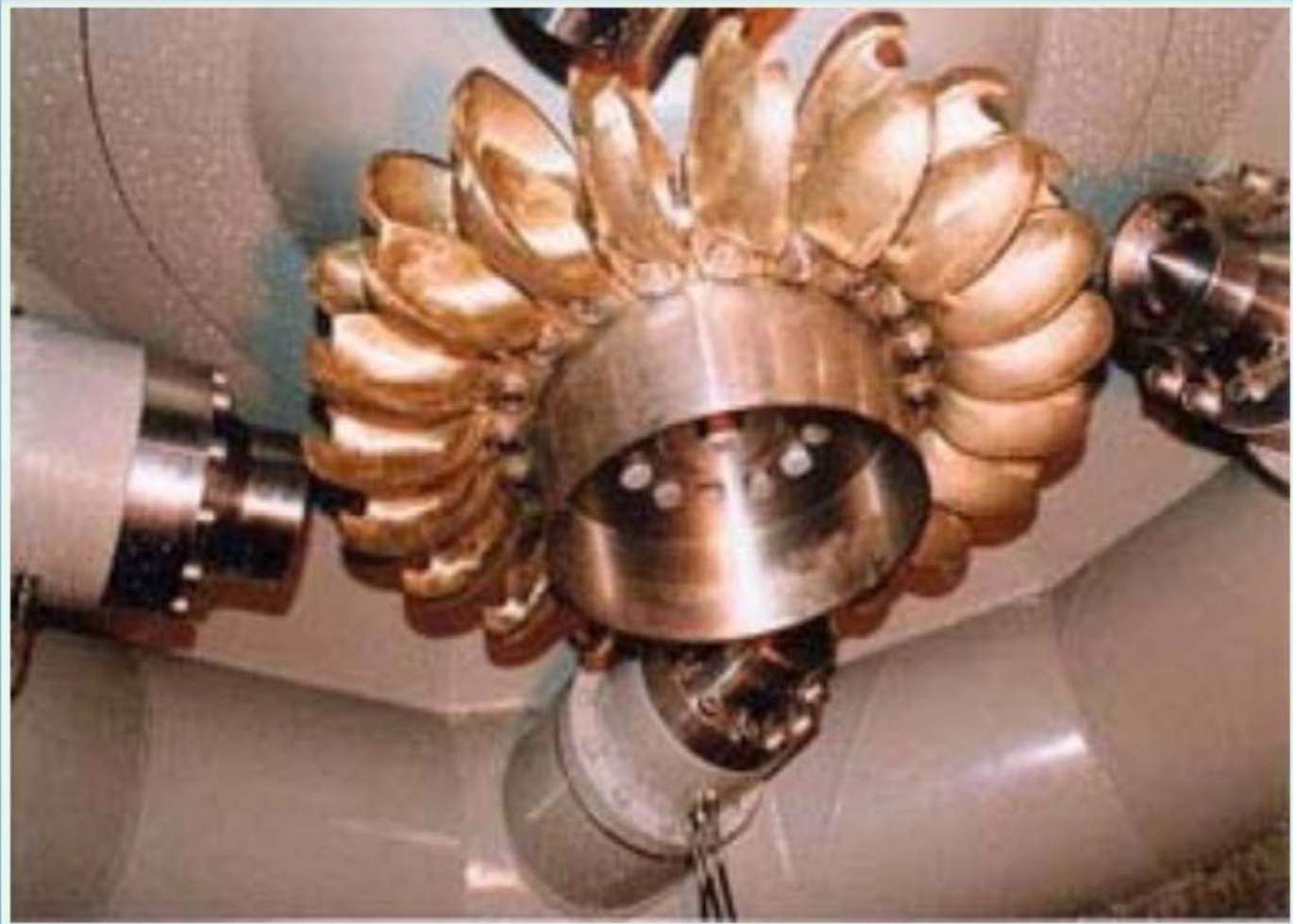
- 1 Tobera o chiflón
- 1a Pieza intermedia
- 1b Pieza de sujeción
- 1c Buerenados
- 1d Tapas de protección
- 2 Chorro de la agua
- 3 Rodete
- 4 Alabes o cangilones
- 4a Escotadura de los alabes
- 4b Arista divisoria
- 5 Cabeza de la aguja
- 5a Punta de la aguja
- 5c Tornillo calibrado
- 5d Cuña
- 5e Cuerpo de la aguja
- 5f y 5g Agujeros cilindricos para espigas
- 6 Nivel del desfogue
- D₁ Diámetro del rodete
- d₂ Diámetro del chorro(buscar fig complementaria o se quitan los números)
- 7 Solapas
- 8 Corona de rodete
- 8a Cubo del rodete
- 9 Bulones de fijación con tuercas
- 9a y cabezas de bulones
- 9b 10 Bulones tensores
- 11 Cuñas
- 12 Codo de entrada
- 12a Brida de sujeción
- 13 Vástago de la aguja
- 13a Camisa de bronce
- 13b Pistón de descarga
- 13c Guarnición de cuero
- 14 Cruzeta de guía

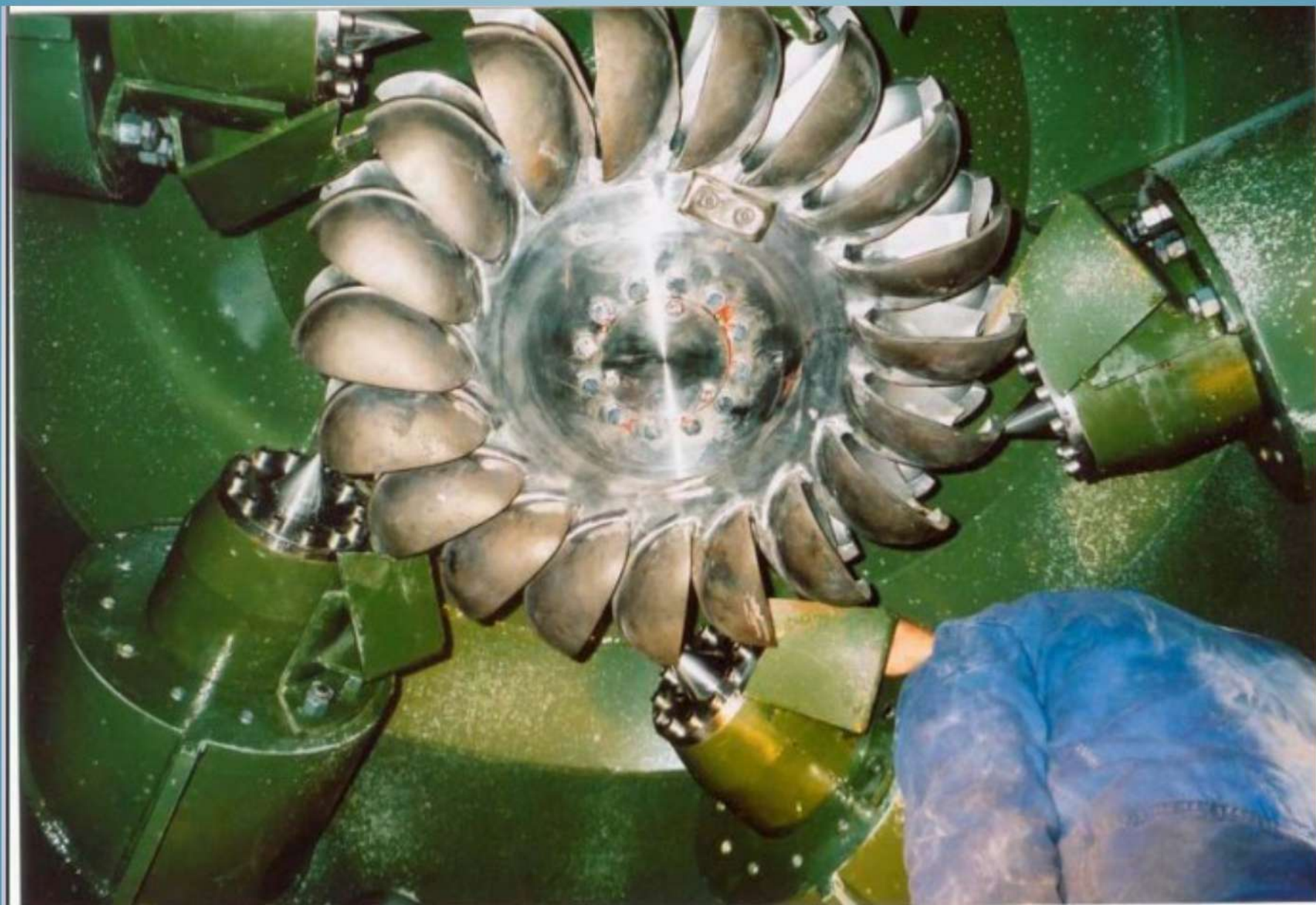
- 14a Nervios de guía
- 14b Envoltorio por los anteriores
- 15 Consola para el vástago de la aguja
- 16 Agujero de limpieza
- 17 Codo inferior
- 17a Soporte del codo inferior
- 18 Válvula y Tubería de desagüe
- 19 Válvula de la turbina
- 20 Desviador
- 20a Cuchilla del anterior
- 20b Palanca
- 21 Palanca de retorno
- 22 Pistón del servo-motor para la regulación de la aguja
- 23 Resorte de cierre para la aguja
- 24 Válvula de distribución para la aguja
- 25 Volante a mano para regulación de la aguja
- 26 Varilla del desviador
- 27 Rueda de levas
- 30 Caja
- 30a Orificio para el codo de entrada
- 30b Departamentos laterales
- 30c Soportes de los cojinetes fundidos en una sola pieza con la caja
- 31 Tapa de la caja
- 32 Parte inferior de la caja
- 32a Paredes de la guía



- 32b Canales de desagüe para salpicaduras en el eje de la turbina
- 33 Colector de salpicaduras
- 34 Blindaje
- 36 y 37 Serpentin de refrigeración y recubrimiento
- 37a Orificios para el desagüe del agua refrigerante

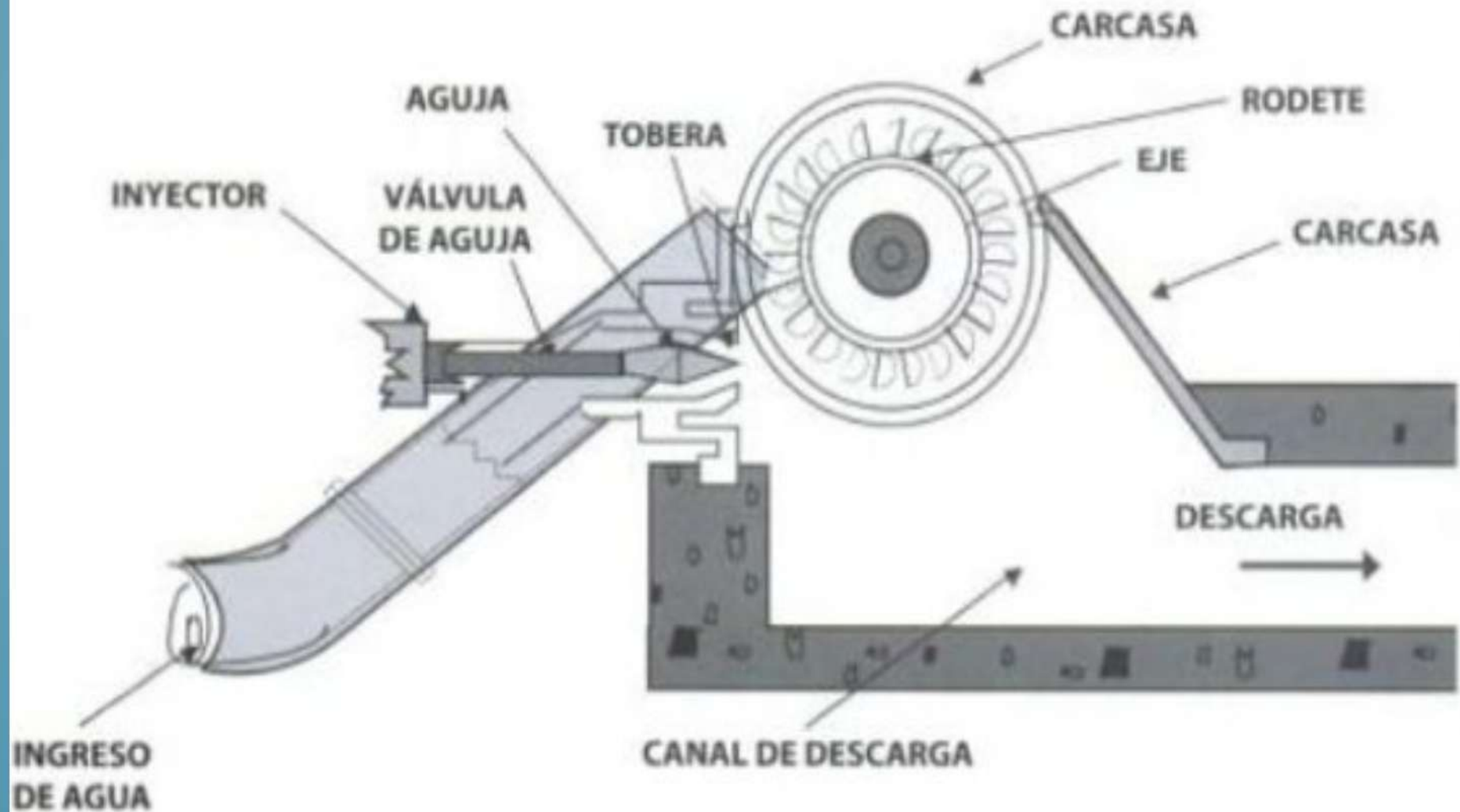
- 40 Eje de la turbina
- 40a Anillo de reborde
- 40b Anillo centrífugo
- 41 Cojinete exterior de la turbina
- 42 Cojinete interior de la turbina
- 43 Acoplamiento del eje
- 44 Regulador de velocidad
- 45 Volante







Esquema general de una turbina Pelton



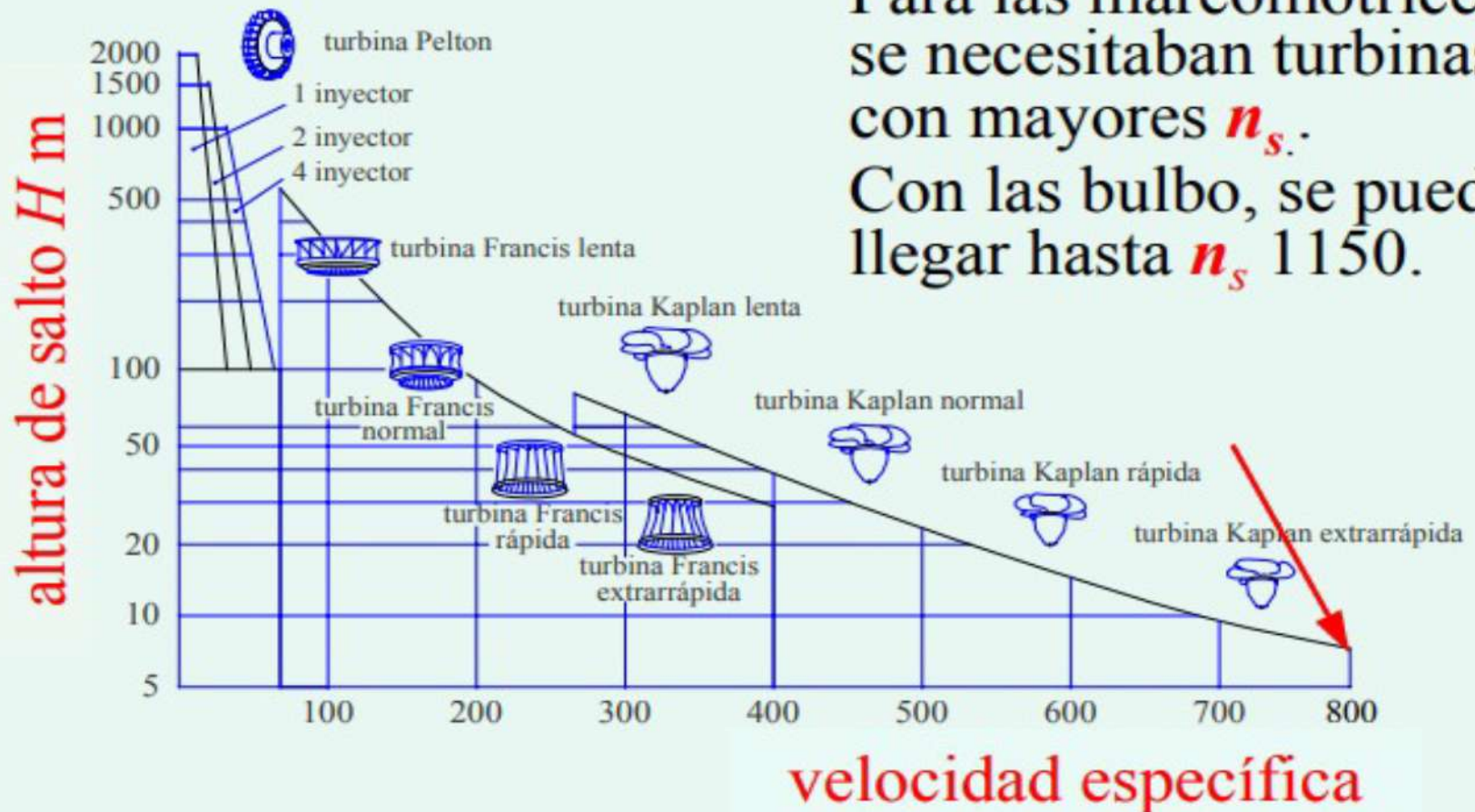
ELECCIÓN DEL TIPO DE TURBINA

elección de la turbina en función de la velocidad específica, n_s

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

Para las mareomotrices se necesitaban turbinas con mayores n_s .

Con las bulbo, se puede llegar hasta n_s 1150.



ELECCIÓN DEL TIPO DE TURBINA

La velocidad específica permite fijar un criterio racional para la elección del tipo de turbina más adecuado a las características de la instalación. Que en los saltos de agua tiene relación con el Caudal y la altura. La velocidad específica es un Número teórico y es a la que trabajaría una turbina homologa (de la misma forma pero más reducida) desarrollando una potencia en el eje de 1 Cv con un salto de un metro.

ELECCIÓN DEL TIPO DE TURBINA

$$Ne = \frac{N}{H} \sqrt{\frac{P}{\sqrt{H}}}$$

En donde:

P : Potencia a plena carga en Cv

H: Salto útil aprovechable en metros

N: Velocidad nominal $N = 60 * F / \text{polos}$ en RPM

Ne: Velocidad específica en rpm.

SELECCIÓN DE UNA TURBINA

DATOS PARA SELECCIÓN DE TIPO DE TURBINA

VELOCIDAD TEÓRICA EN RPM	TIPO DE TURBINA	ALTURA DEL SALTO metros(m)
hasta 35 rpm	Pelton con una tobera	800
36-72	Pelton con dos toberas	100-800
51-72	Pelton con cuatro toberas	100-400
55-70	Francis Lentísima	200-400
70-120	Francis lenta	100-200
120-200	Francis media	50-100
200-300	Francis veloz	25-50
300-450	Francis ultraveloz	15-25
400-500	Hélice veloz	hasta 15
270-500	Kaplan lenta	15-50
500-800	Kaplan veloz	5 a 15
800-1100	Kaplan veloz	5

8.13 Servicios Auxiliares Provistos Centrales Hidroeléctricas

Los *Servicios Auxiliares* son aquellos recursos y funciones requeridos para apoyar la transferencia de energía eléctrica desde las fuentes generadoras hasta las cargas, conservando la operación confiable del sistema eléctrico interconectado. Las centrales hidroeléctricas proveen una serie de servicio auxiliares críticos, tales como:

8.13.1 Aporte de Reactivos y Control de Tensión

Consiste en la capacidad de los generadores sincrónicos de proveer potencia reactiva al sistema, para mejorar el factor de potencia y la tensión del sistema. Este servicio provee además control de tensión y estabilidad. Los generadores de centrales hidroeléctricas, operando como motores síncronos o condensadores síncronos, son capaces de producir potencia reactiva de hasta 45% de la capacidad nominal de la máquina.

8.13.2 Regulación de Frecuencia

Se define como la capacidad de respuesta ante las variaciones de carga del sistema. En operación automática, el sistema de gobernación de velocidad de la máquina regula permanentemente la velocidad de giro, y por tanto, la frecuencia de la misma. Este servicio es requerido para mantener la frecuencia en los valores nominales del sistema y para ayudar a preservar la integridad del sistema de transmisión.

8.13.3 Reserva Rotante

Representa la capacidad de los generadores hidráulicos de almacenar energía potencial en las masas de los rotores del turbo-generador, mientras la máquina está en operación. Esta energía está disponible para servir la carga en caso de una contingencia en el sistema.

8.13.4 Arranque en Negro (Black Start)

Se define como la habilidad de la unidad generadora, durante una falla total del sistema (blackout), de poder ir desde una posición de parada, a condiciones de operación y de despacho de energía, sin requerir energía auxiliar del sistema de potencia. Esto se logra con el uso de plantas de emergencia, para proveer energía a los servicios auxiliares y al sistema de excitación.

Tabla 3.8. Elección de turbina según salto y velocidad específica.

Salto neto H_n [m]	Tipo de turbina	Velocidad específica n_s [r.p.m.]
1-200	Flujo cruzado (Ossberger, Michell-Banki)	10-200
Más de 400	Pelton con un inyector	Hasta 25
400-100	Pelton con un inyector	26-35
400-100	Pelton con dos inyectores	36-50
800-400	Pelton con dos inyectores	26-35
400-100	Pelton con cuatro inyectores	51-72
400-200	Francis muy lenta	58-70
200-100	Francis lenta	70-120
100-50	Francis media	120-200
50-25	Francis rápida	200-300
25-15	Francis muy rápida	300-450
Hasta 15	Hélice muy rápida	400-500
50-15	Kaplan lenta	270-500
15-5	Kaplan rápida	500-800
Menos de 5	Kaplan muy rápida	800-1100