

Turbinas Pelton

Aprovechamientos Hidráulicos - 2025

- Buenanueva, Santiago
- Fernández, Matías Nicolás
- Bruni, Melina
- Ferrari Gaibazzi, Juan Agustín



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Reseña Histórica e Introducción

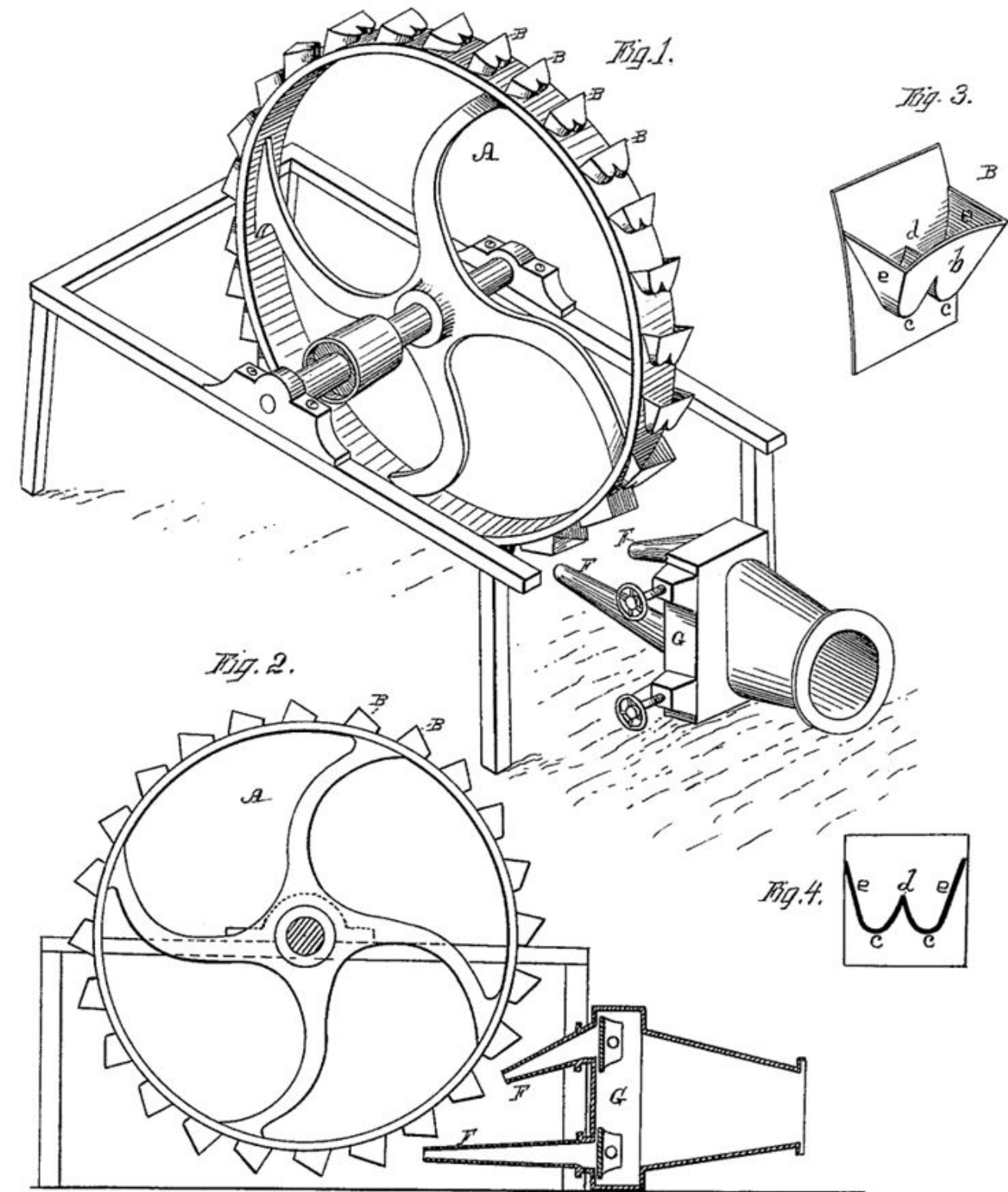
Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025



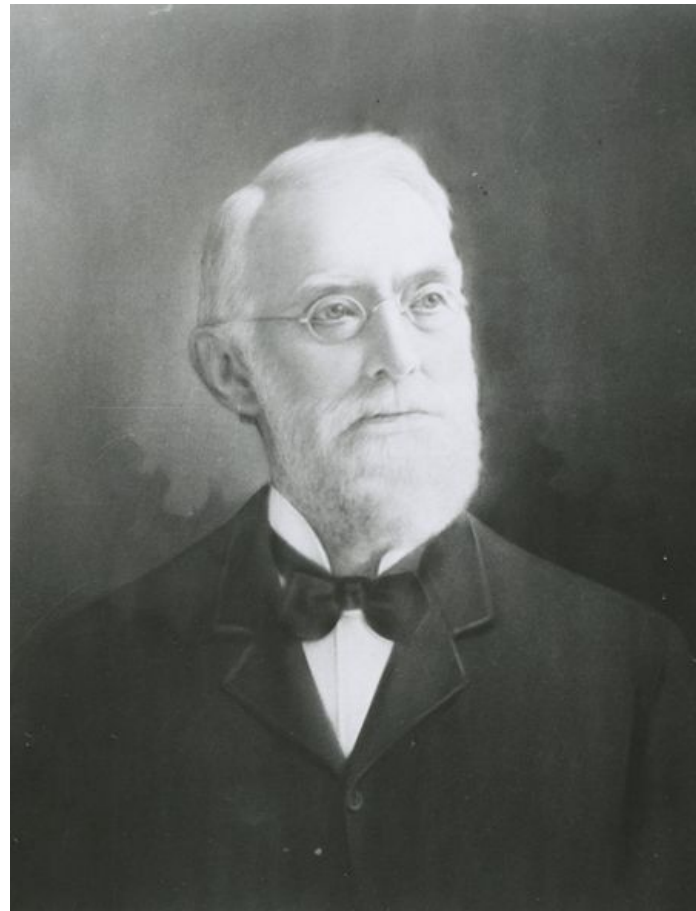
UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



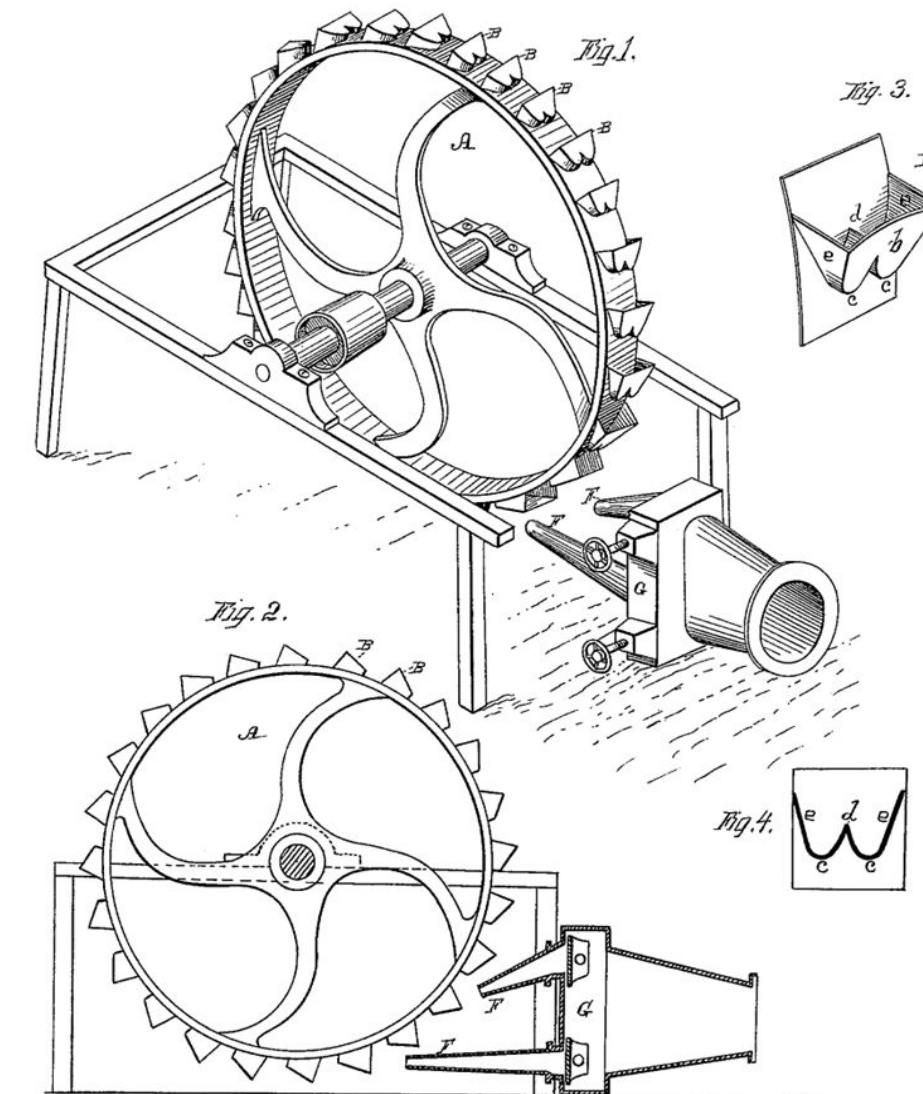
FACULTAD
DE INGENIERÍA



RESEÑA HISTÓRICA



→ Lester Allan Pelton
(1829 - 1908)

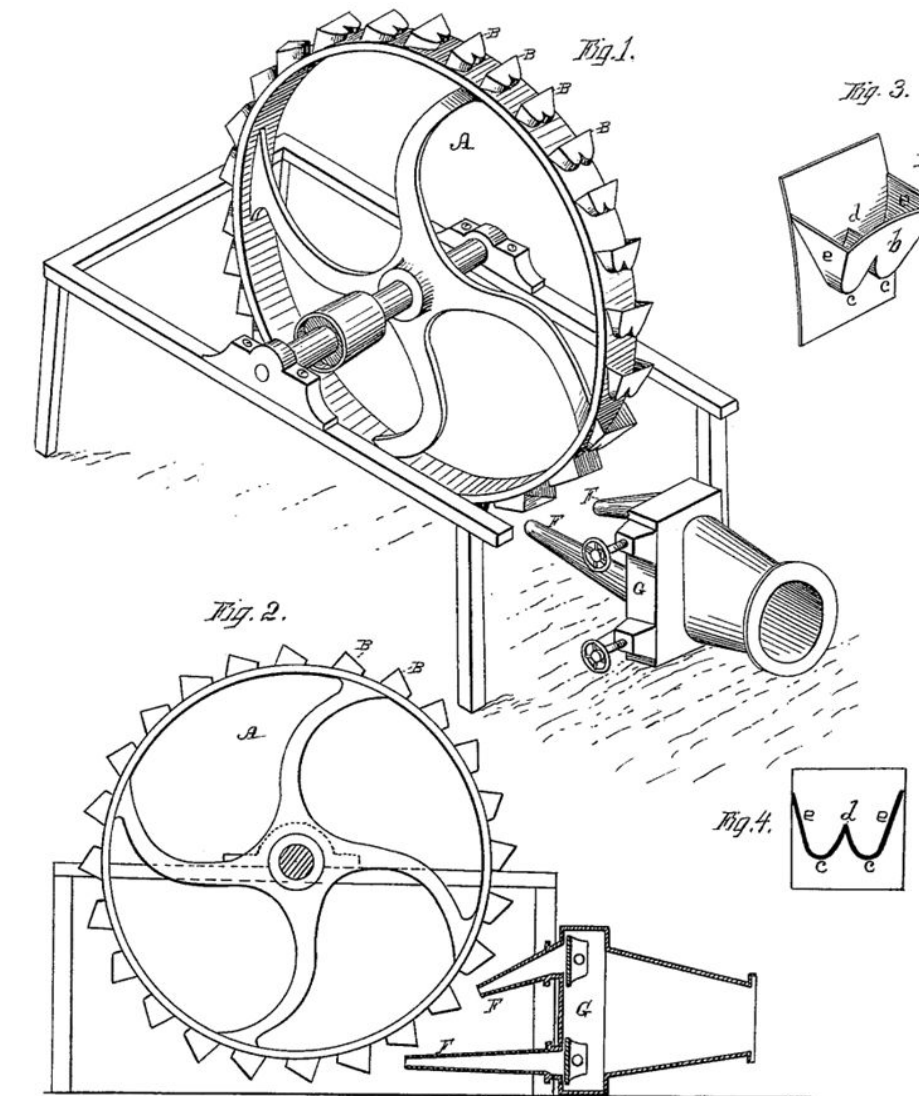


→ Primer Patente de Rueda Pelton
(1880, $\eta = 82,5\%$)

Flujo sobre el
lomo de la W

INTRODUCCIÓN

La turbina de agua Pelton o rueda, es un rotor accionado por el impulso de un chorro de agua sobre cubos curvos fijados a su periferia, cada cubo se divide a la mitad por un borde divisor que divide el agua en dos corrientes, sección curva que invierte completamente la dirección del chorro de agua que los golpea.



→ Primer Patente de Rueda Pelton
(1880, $\eta = 82,5\%$)

Principio de Funcionamiento

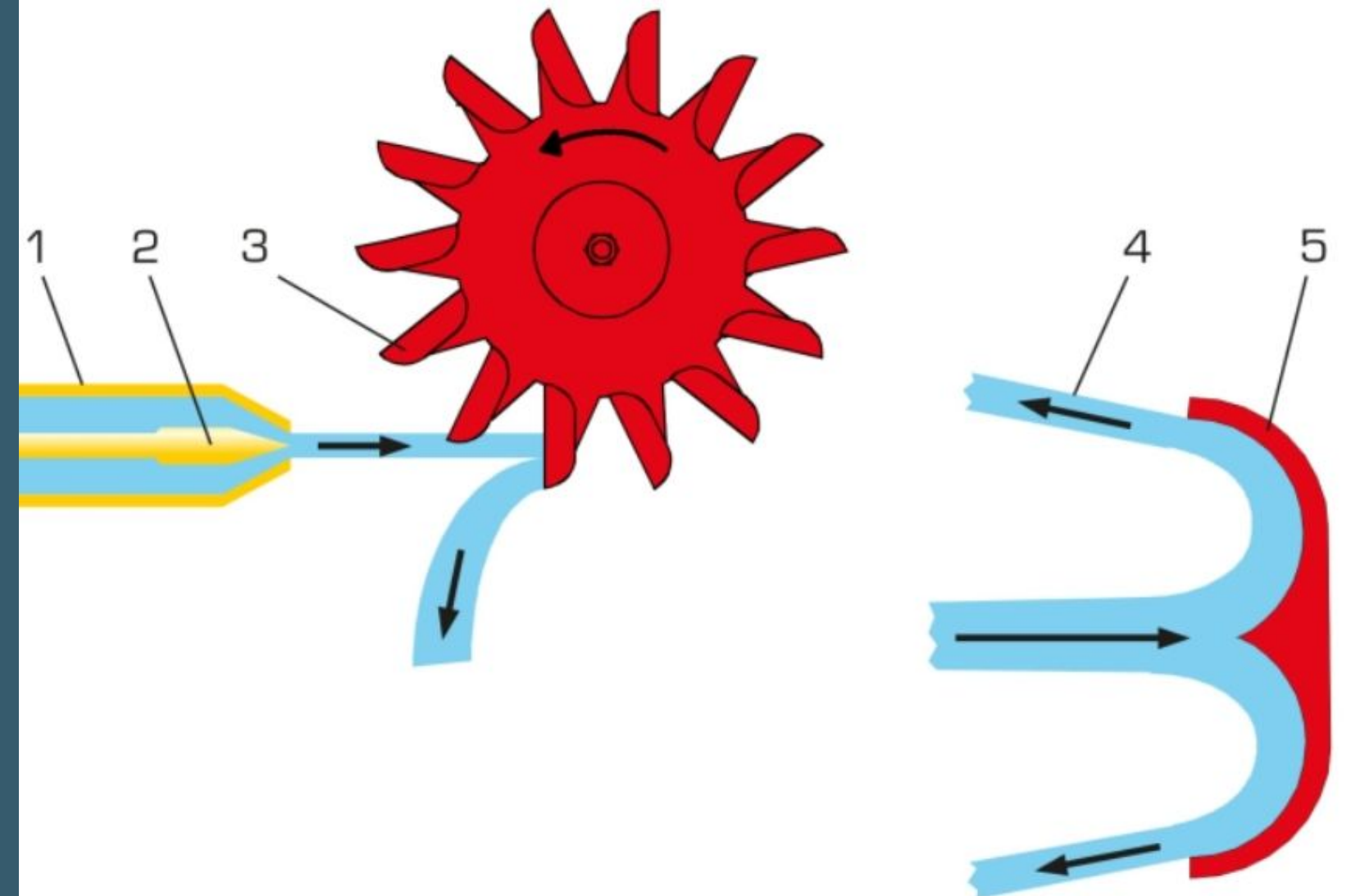
Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD
DE INGENIERÍA

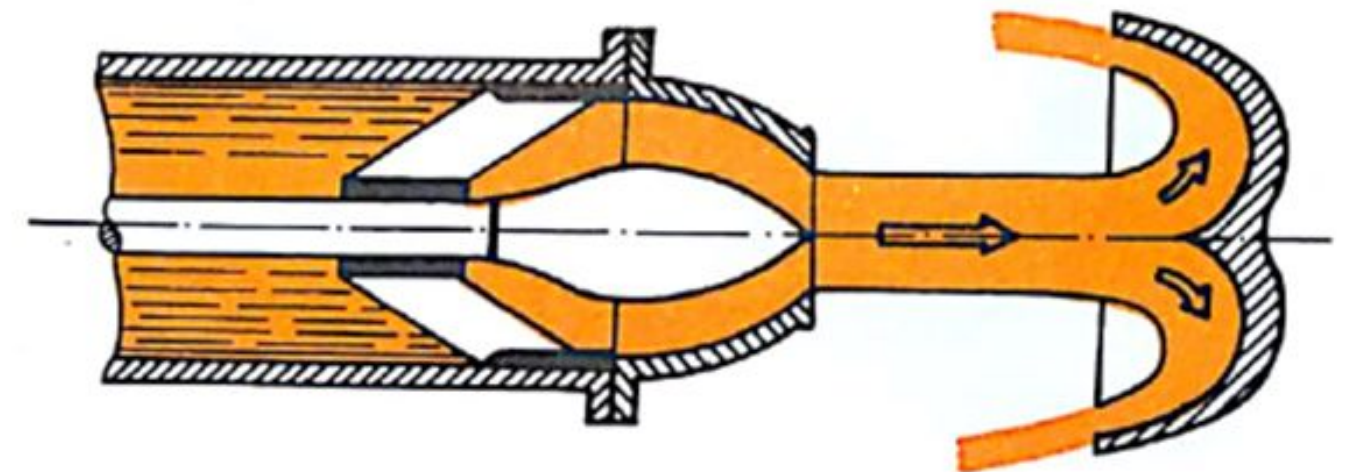


Principio de Funcionamiento

La energía potencial gravitatoria del agua embalsada llega hasta los orificios de las toberas y se convierte, en energía cinética al salir el agua a través de dichos orificios en forma de chorros libres.

El chorro de agua transmite su energía cinética al rodete, donde queda transformada instantáneamente en energía mecánica.

La válvula de aguja, gobernada por el regulador de velocidad, cierra más o menos el orificio de salida de la tobera consiguiendo modificar el caudal de agua que fluye por ésta.



→ Acción del chorro de agua sobre cada cangilón

Se invierte el sentido del flujo!

Ámbito de Aplicación

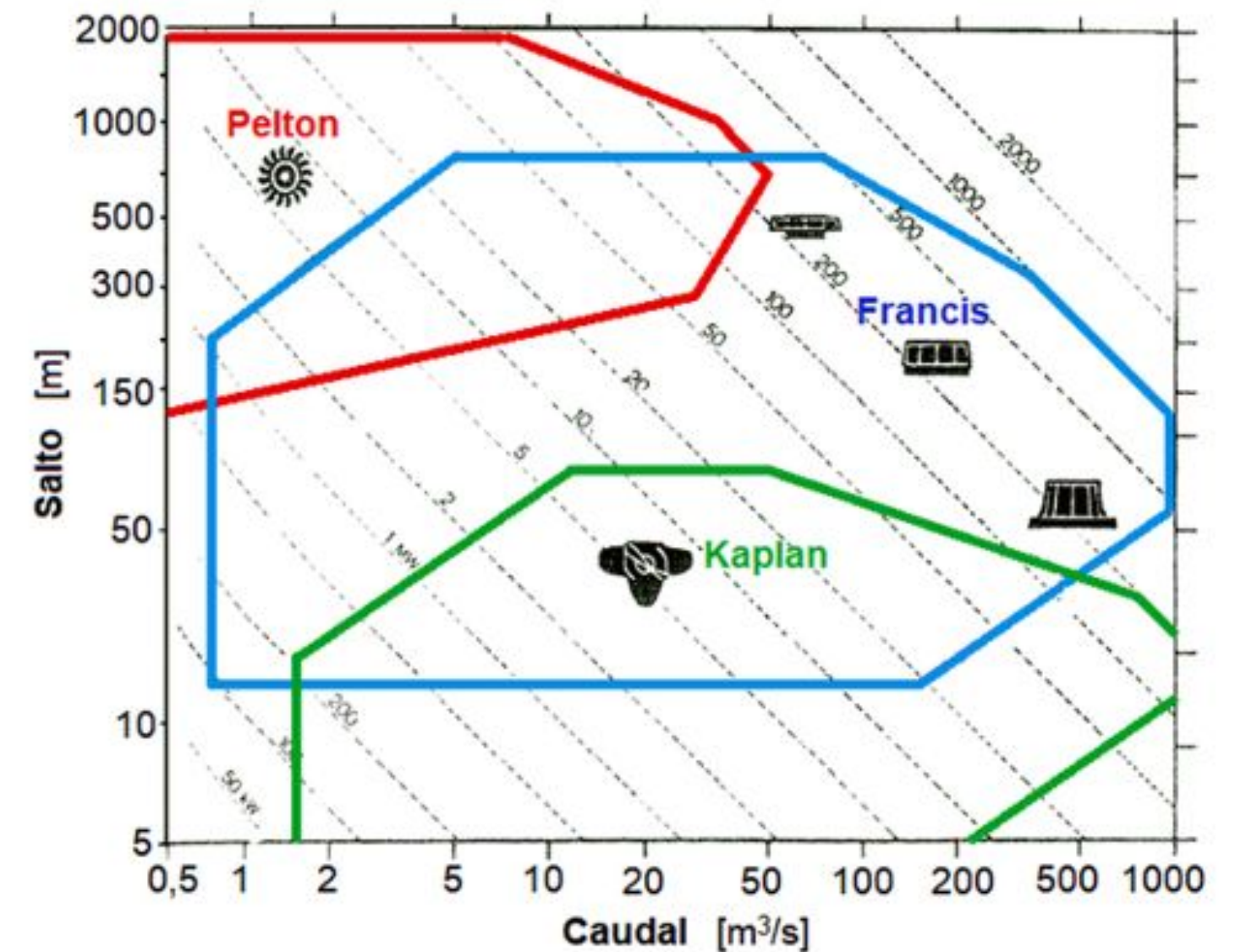
Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

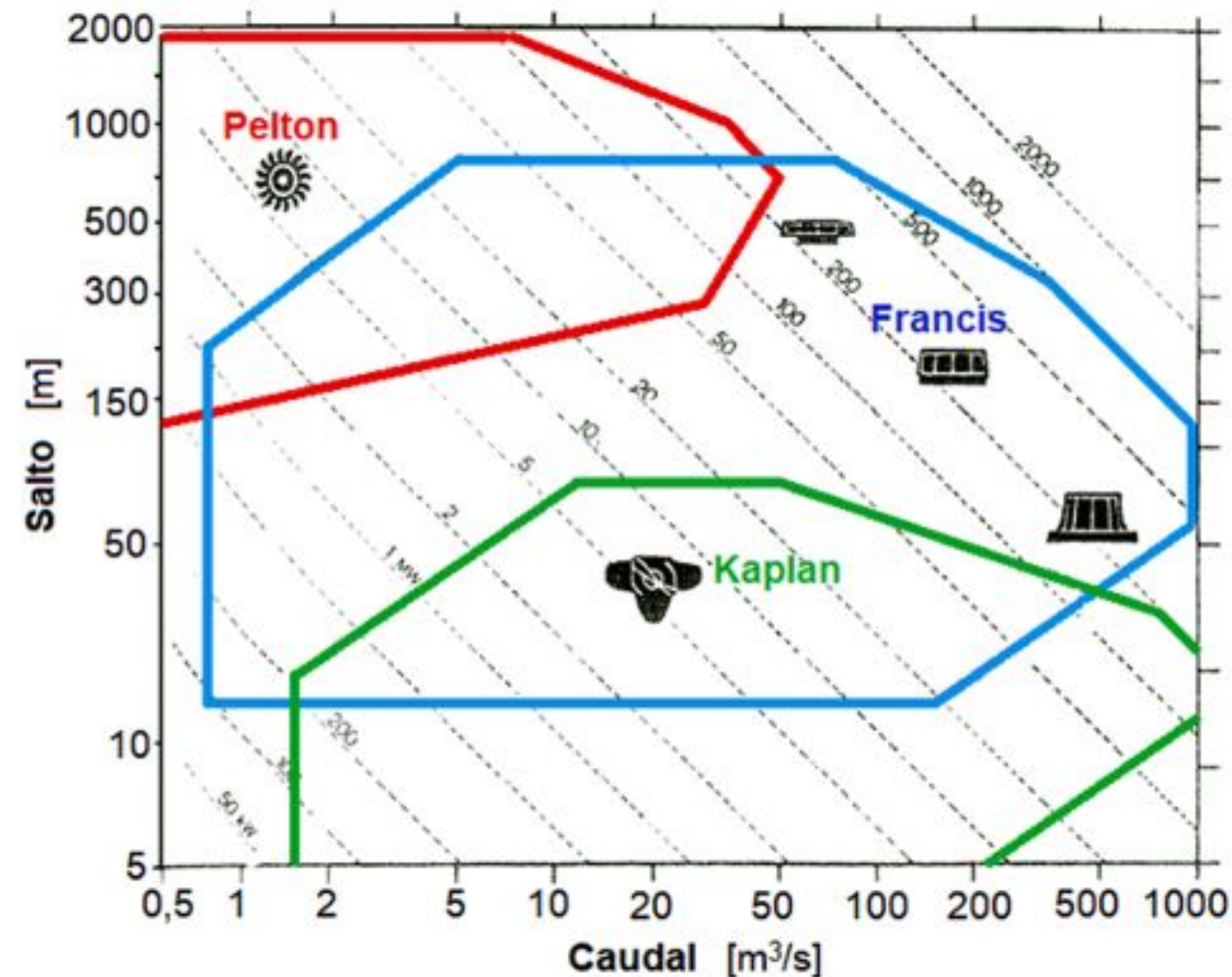


FACULTAD
DE INGENIERÍA



ÁMBITO DE APLICACIÓN

- En general para saltos de gran altura y bajos caudales.
- Saltos entre 2000 y 140m.
- Eficiencia entre el 15 y 100% del caudal máximo.



→ Rango de Operación de Turbinas

Clasificación

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**



Francis Turbine



Fixed Pitch Propeller



Turgo



Pelton



Kaplan



Crossflow

CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

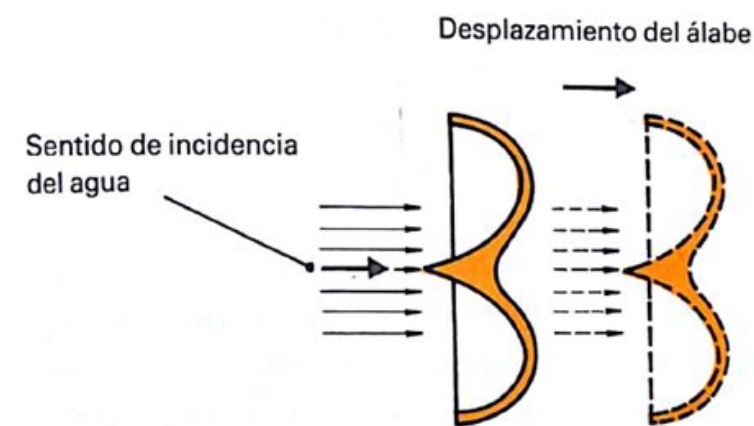
Acción "Pelton"

El caudal de agua se utiliza en forma de chorro a la presión atmosférica, para lo que previamente se ha de transformar toda la energía potencial del agua en energía cinética.

TURBINAS

Reacción "Kaplan y Francis"

El agua se utiliza a una presión superior a la atmosférica, por lo que solo una parte de su energía es cinética.



CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

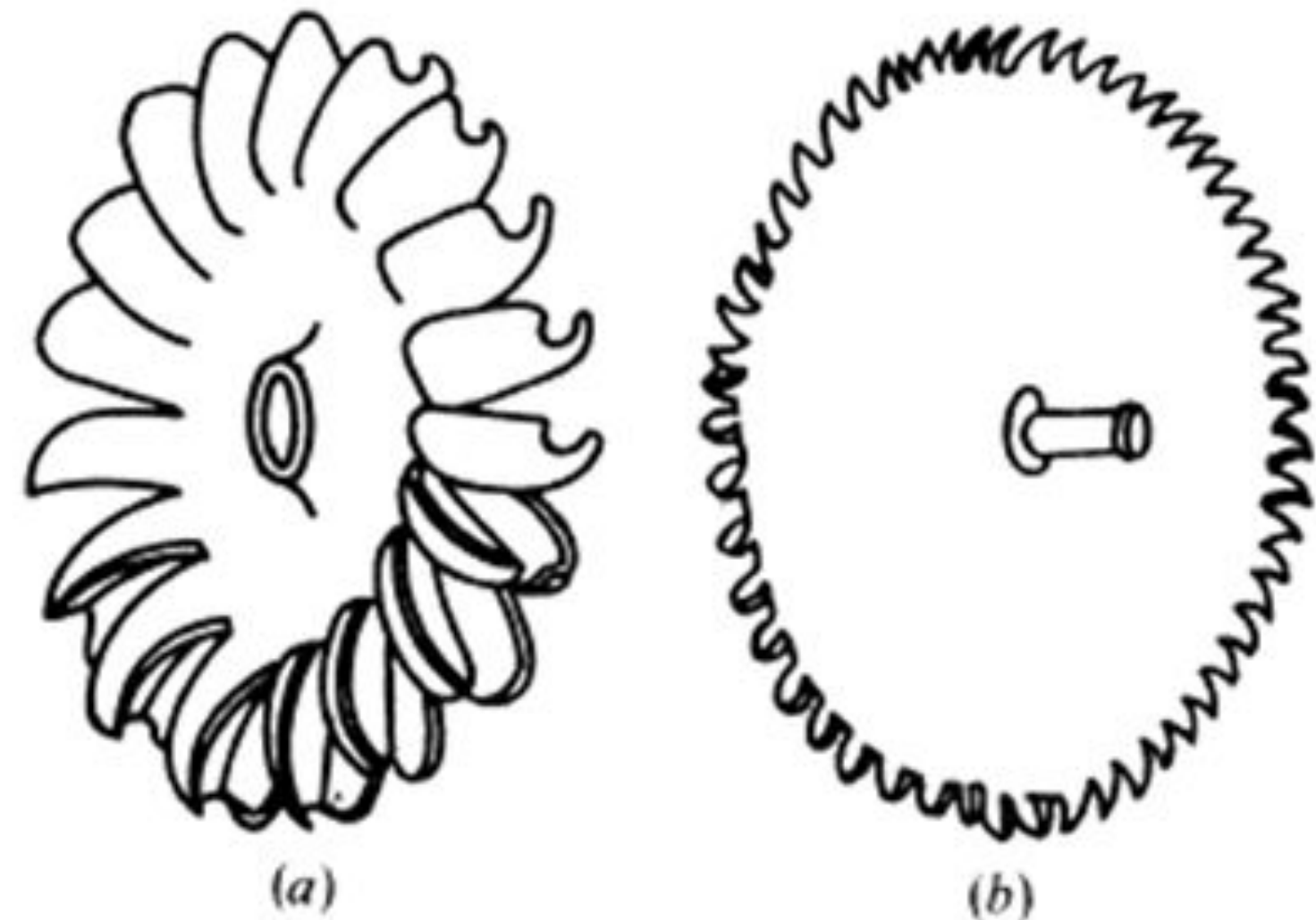
Velocidad Específica

Parámetro adimensional que se usa para caracterizar y comparar el comportamiento hidráulico de las turbinas hidráulicas. Esta es la misma para todas las turbinas geoméricamente semejantes.

- Lenta
 - Rápida
- No solo depende de las rpm!

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{p}}{H^{5/4}}$$

potencia instalada
salto



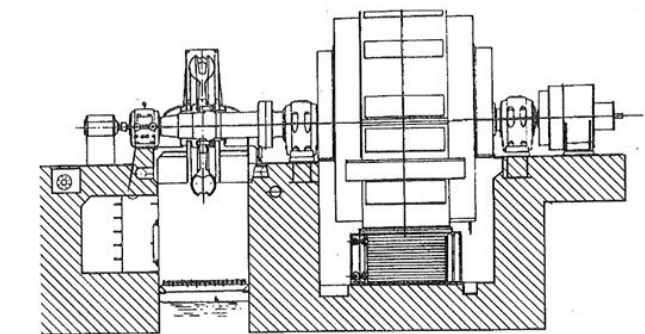
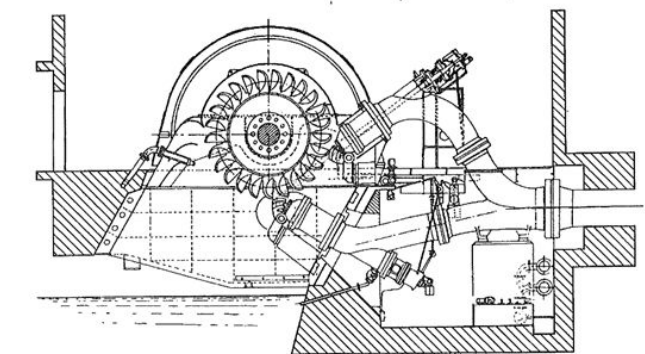
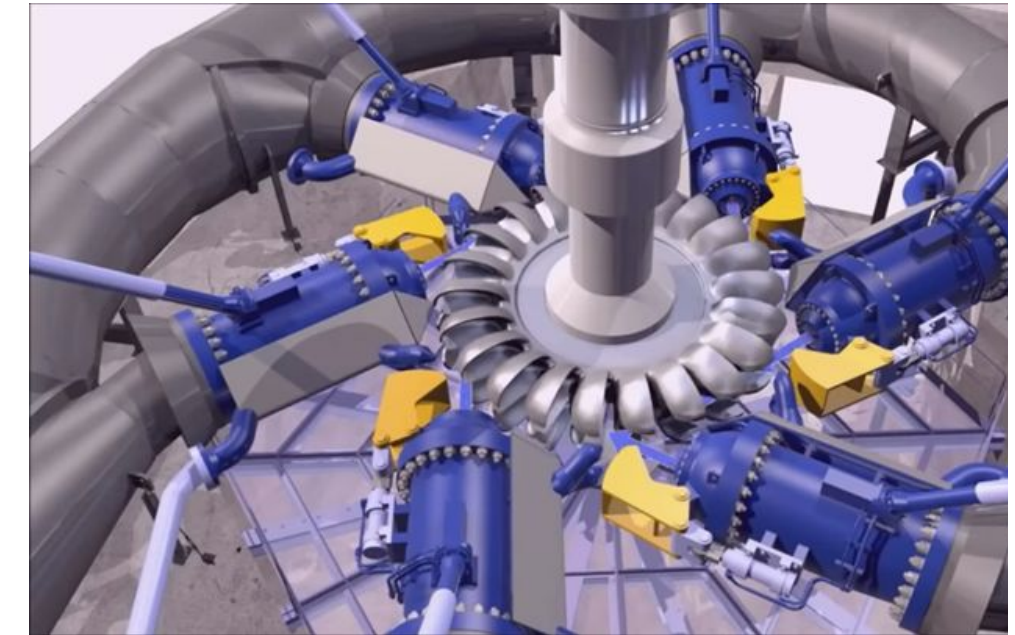
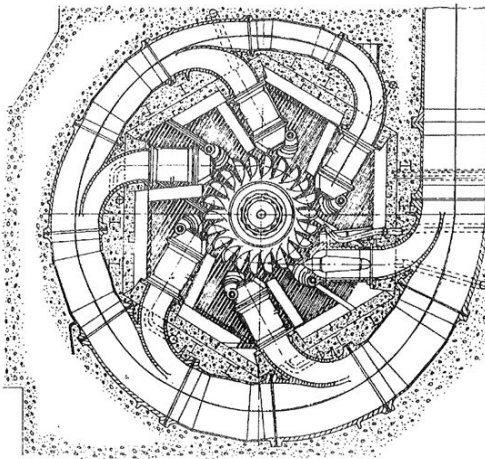
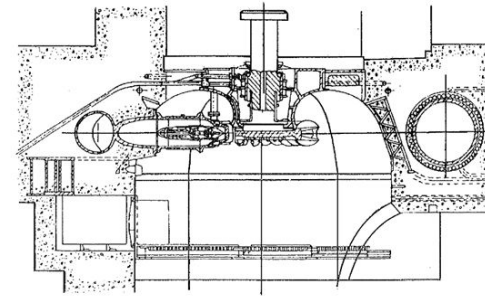
→ (a) Rápido $n_s=35$; (b) Lento $n_s=4$

CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

- Vertical

Posición del Eje

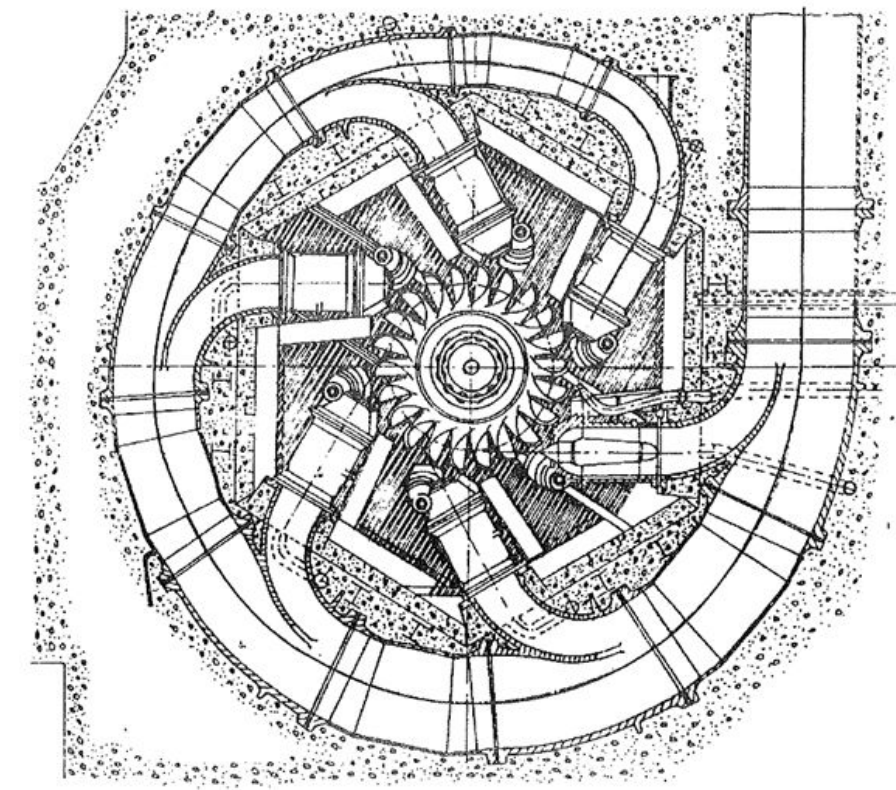
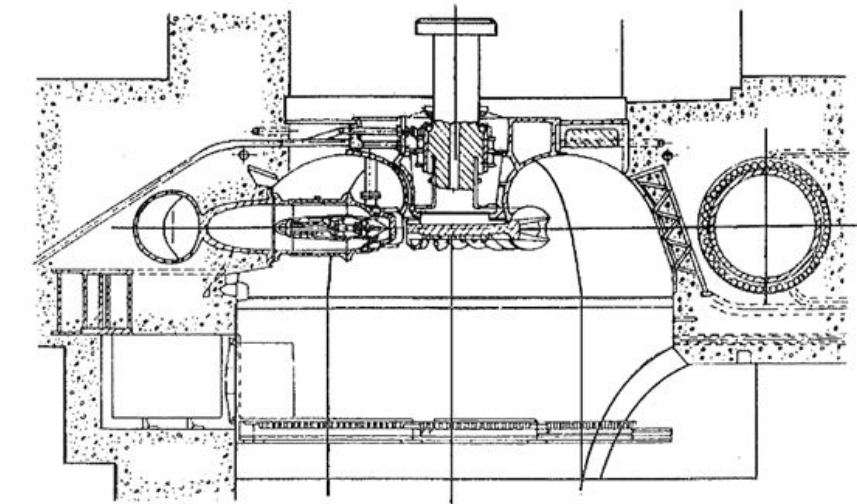
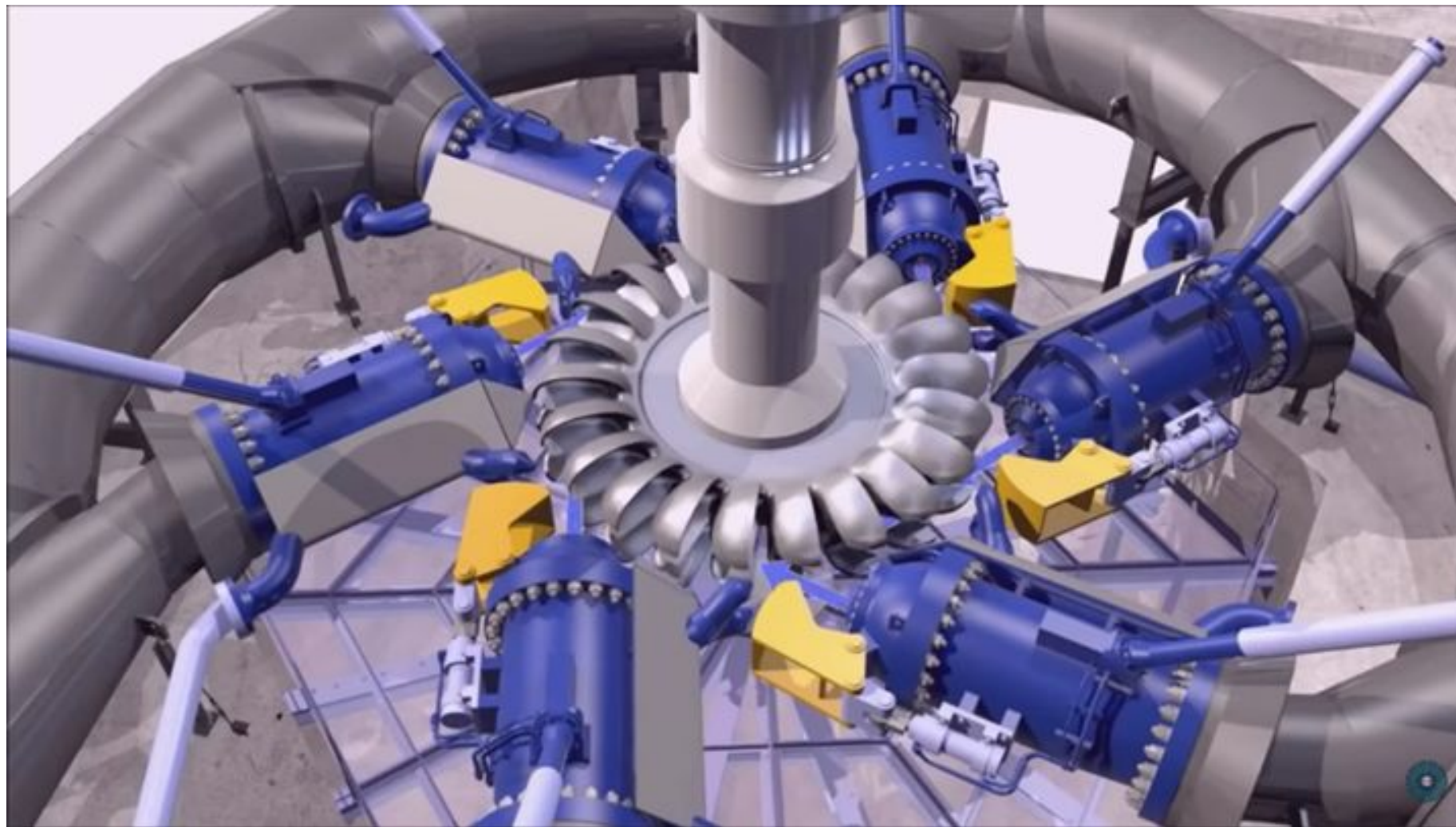
- Horizontal



CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

Posición del Eje

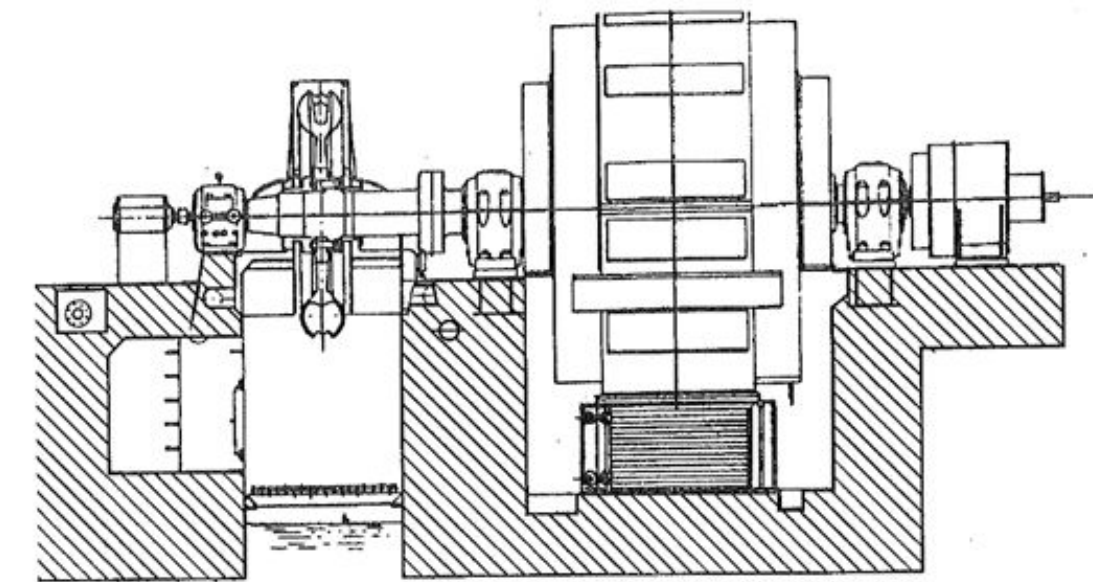
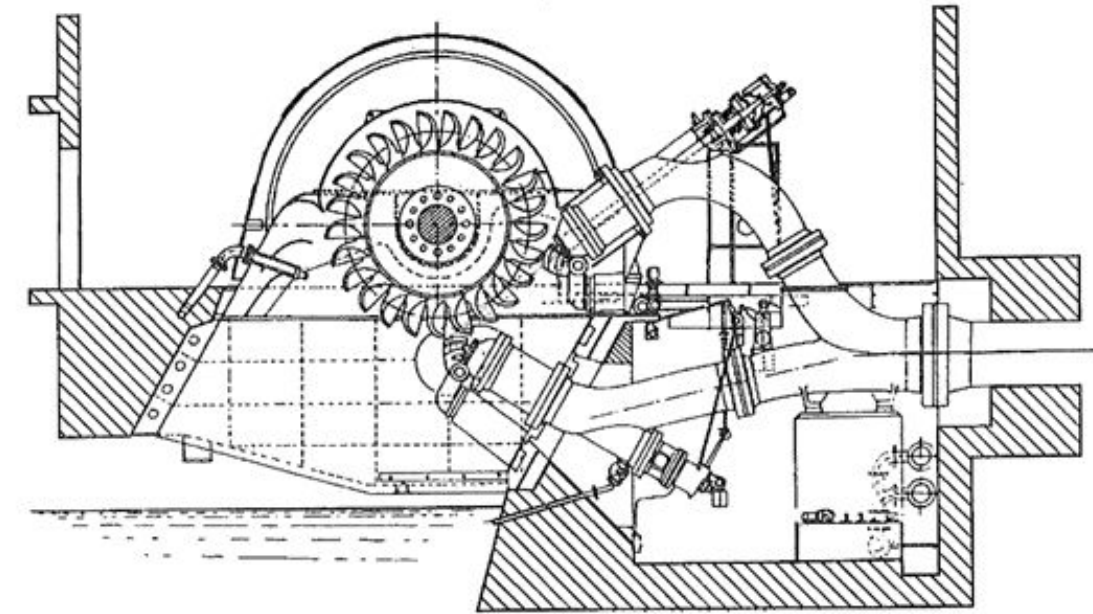
- Vertical



CLASIFICACIÓN DE TURBINAS

Posición del Eje

- **Horizontal** Menos utilizada



Componentes

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**

- 1. Distribuidor**
- 2. Rodete**
- 3. Carcasa**
- 4. Cámara de Descarga**
- 5. Eje**

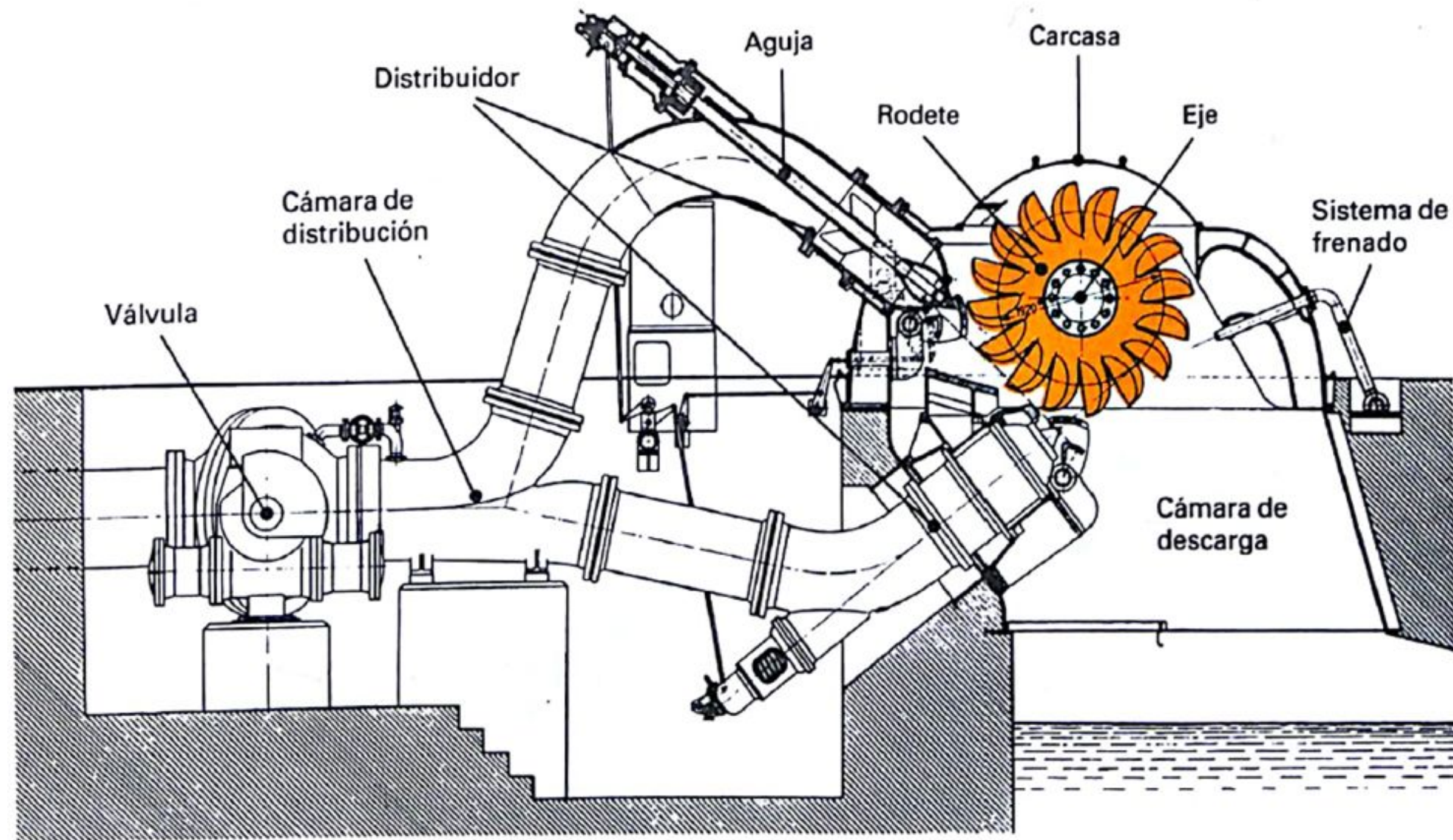


UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

COMPONENTES

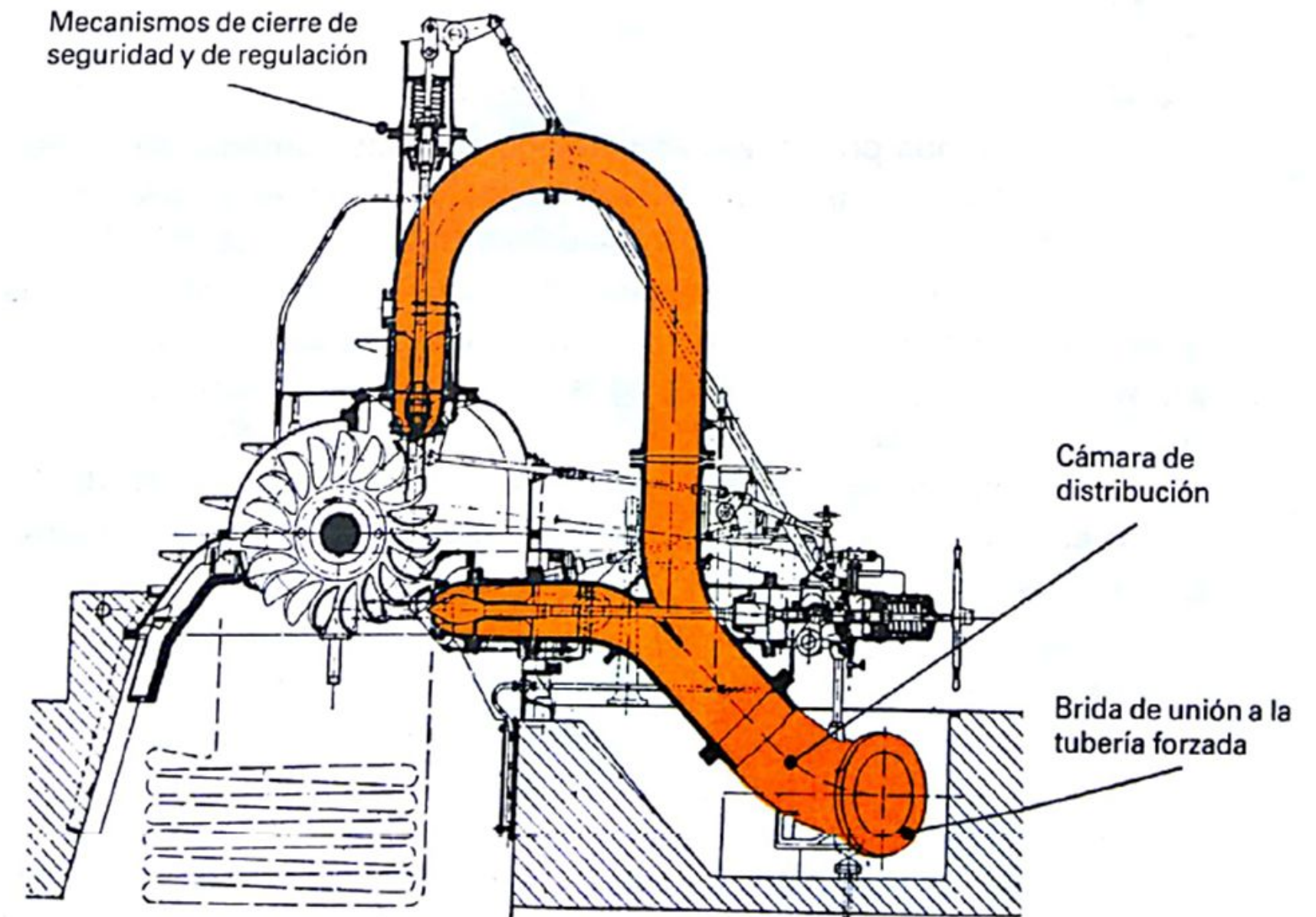


DISTRIBUIDOR

Dirige un chorro de agua, cilíndrico y de sección uniforme, que se proyecta sobre el rodete, así como también, regular el caudal preciso que ha de fluir hacia dicho rodete.

- **Cámara de Distribución**

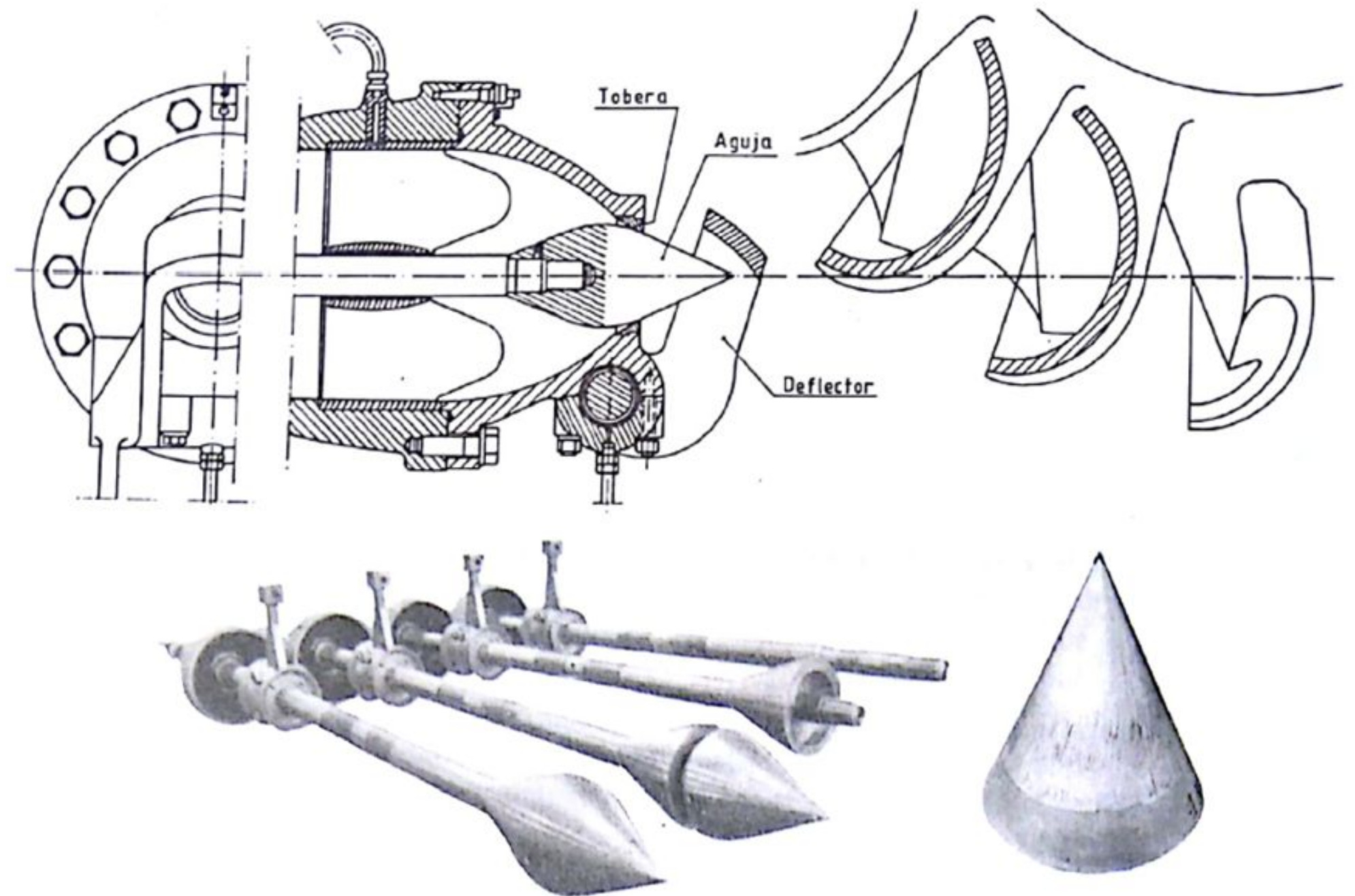
Conduce el caudal de agua y sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor.



DISTRIBUIDOR

- **Inyector**

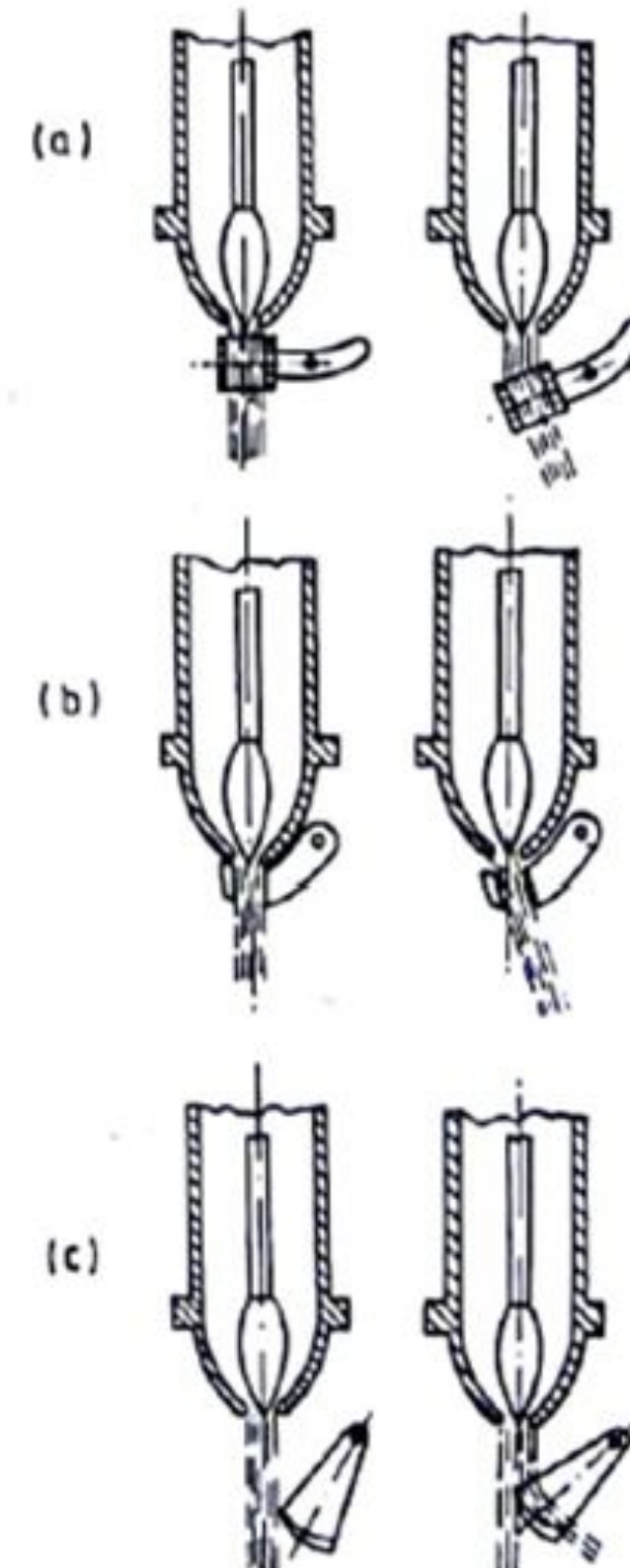
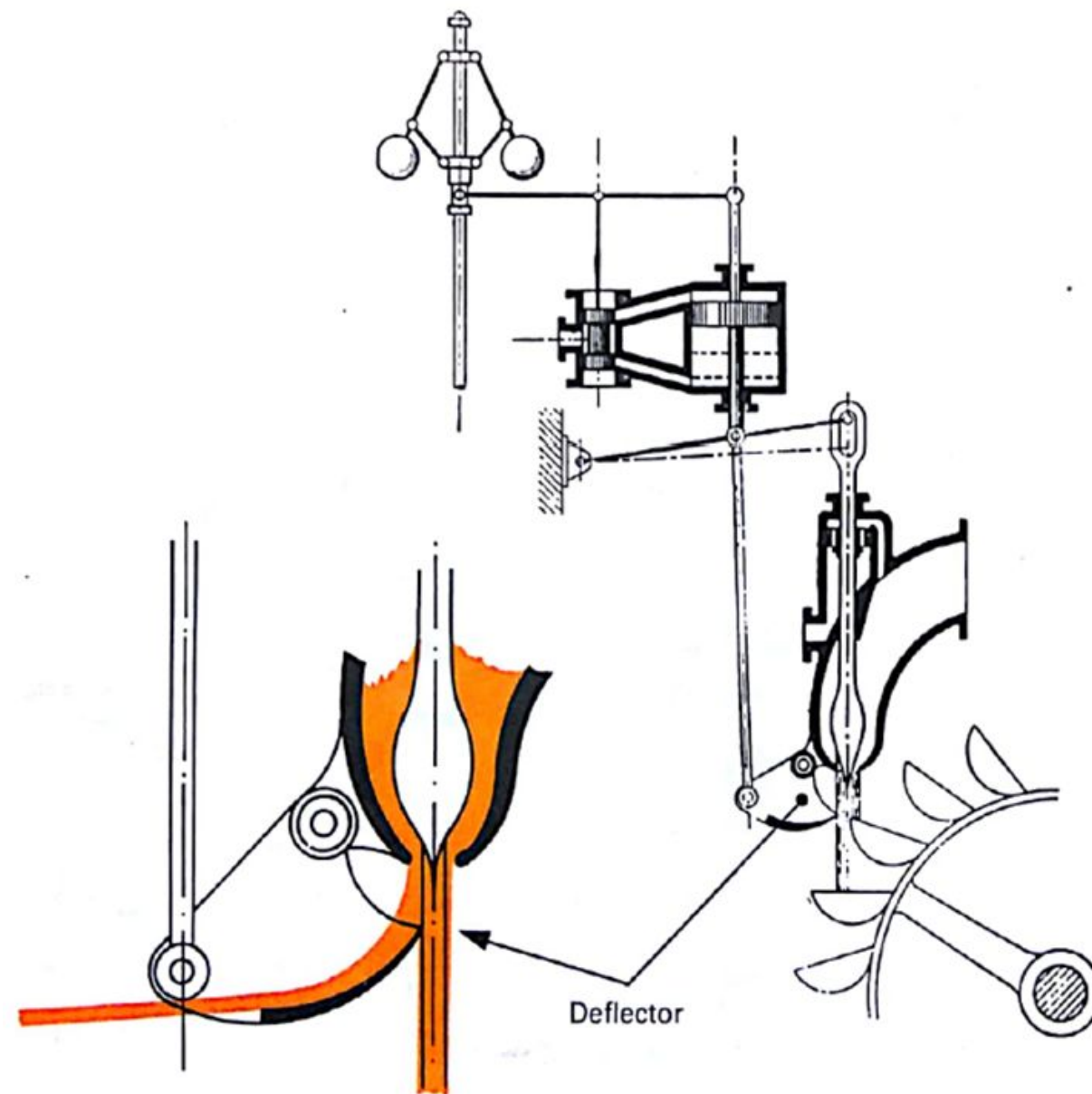
Con forma de tobera convergente, con aguja de cierre cónica, que cumple las funciones de alimentador, de regulador del gasto y de convertidor de la energía potencial del agua en energía cinética para ser aprovechada por la turbina.



DISTRIBUIDOR

- **Deflector**

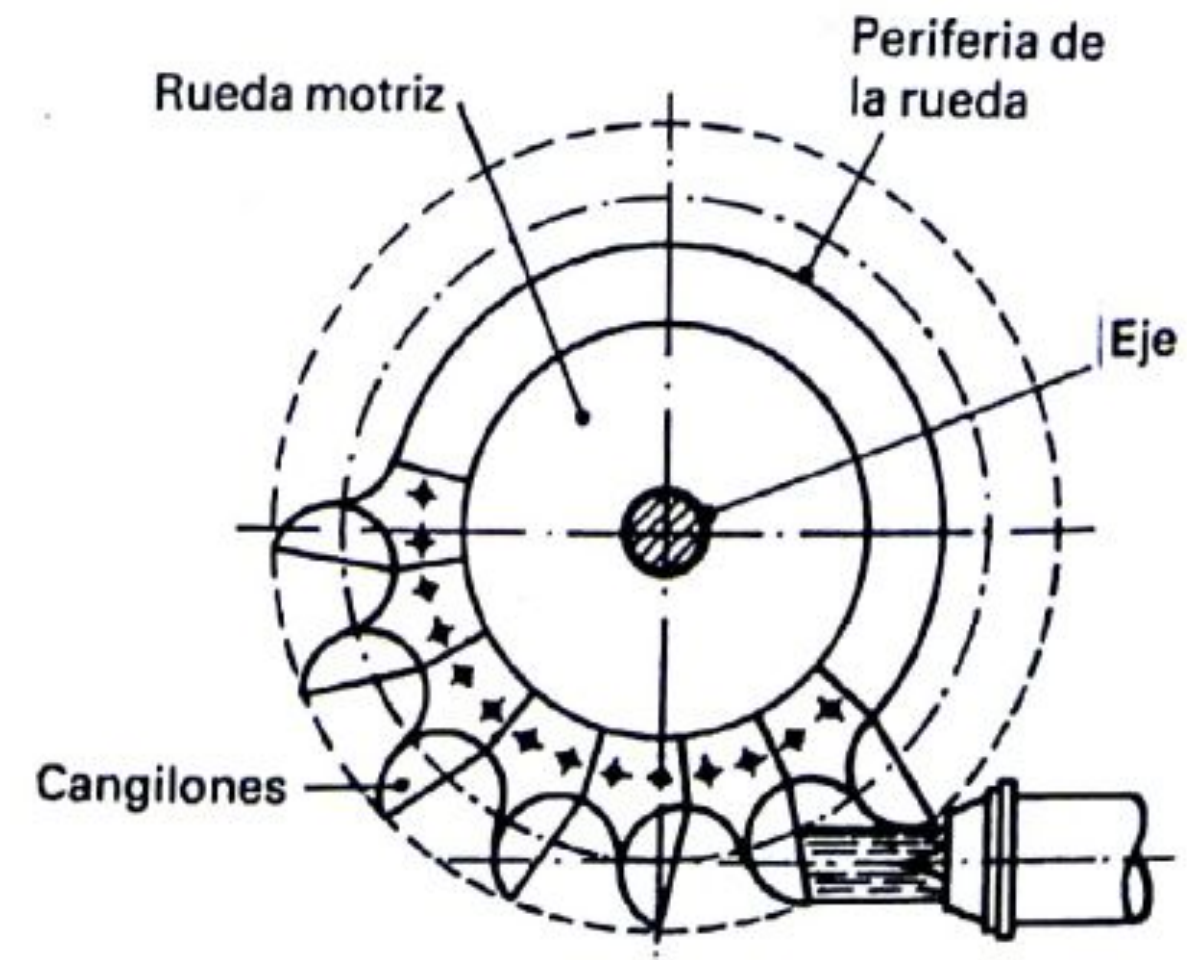
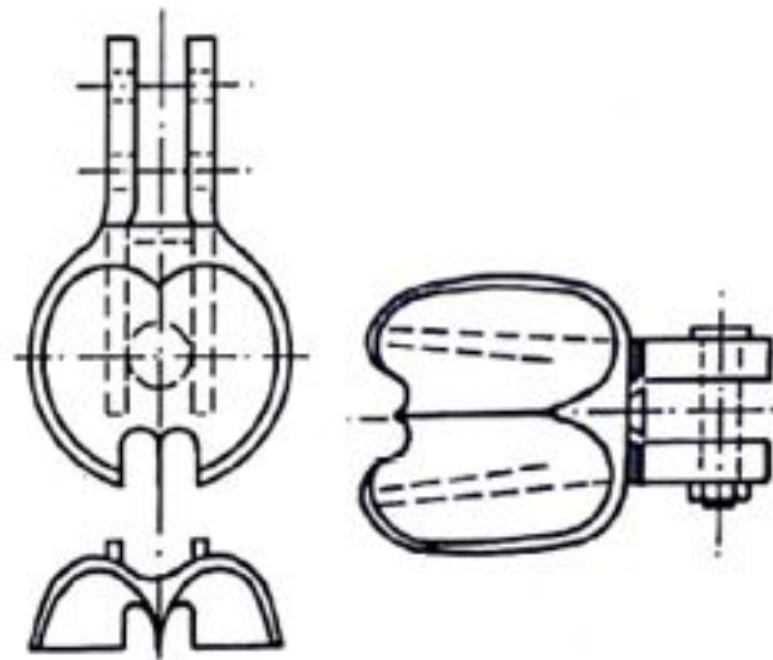
Encargado de desviar el agua



RODETE

Es la pieza clave donde se transforma la energía hidráulica del agua, en su forma cinética, en energía mecánica o, dicho de otra manera, en trabajo según la forma de movimiento de rotación.

- Rueda Motriz
- Cangilones o Cucharas



RODETE



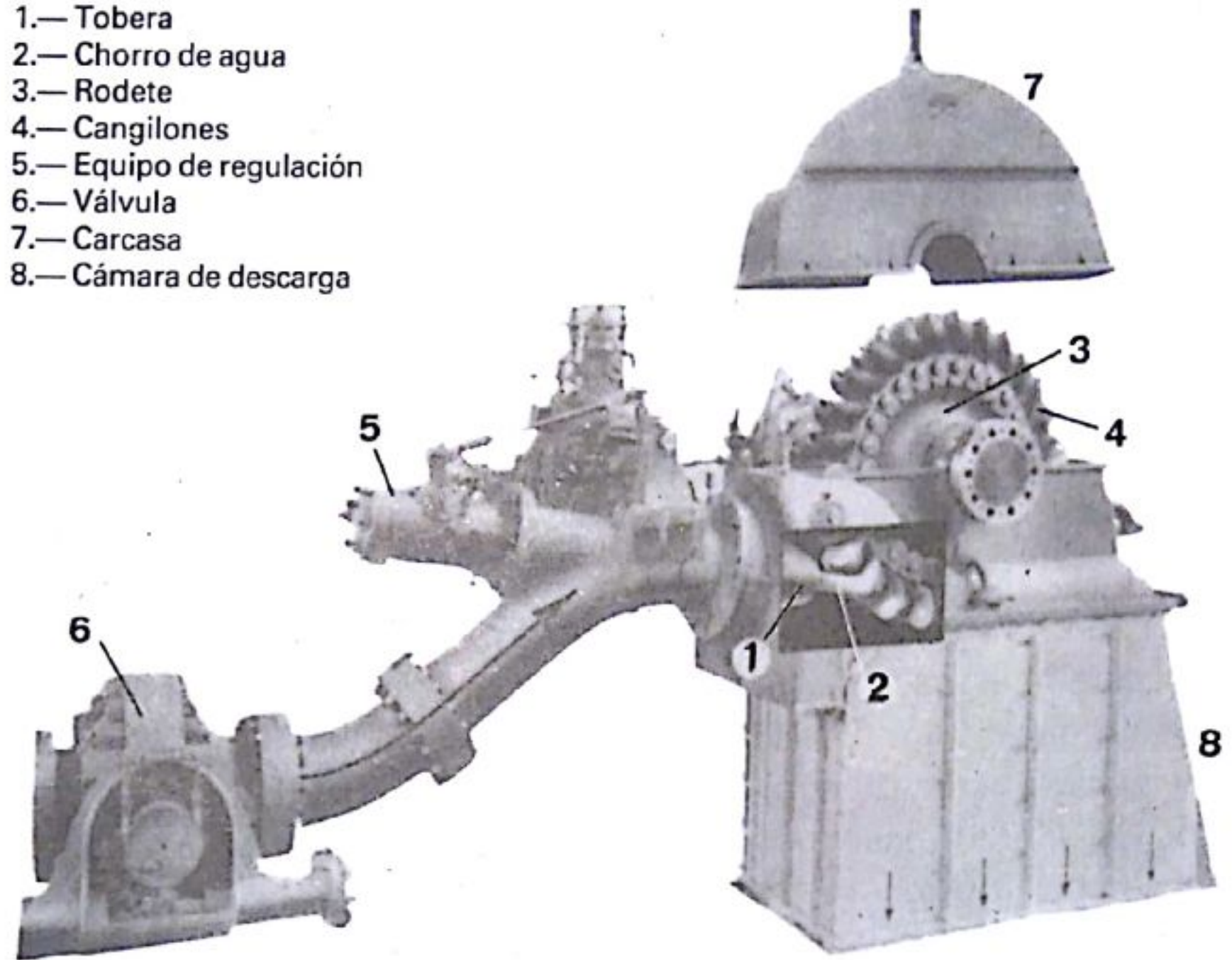
CARCASA

Envoltura metálica que cubre los inyectores, rodete y otros elementos mecánicos de la turbina.

Evita que el agua salpique al exterior cuando, después de incidir sobre los cangilones, abandona a éstos.

También como medida de seguridad por si los cucharones salen volando

- 1.— Tobera
- 2.— Chorro de agua
- 3.— Rodete
- 4.— Cangilones
- 5.— Equipo de regulación
- 6.— Válvula
- 7.— Carcasa
- 8.— Cámara de descarga

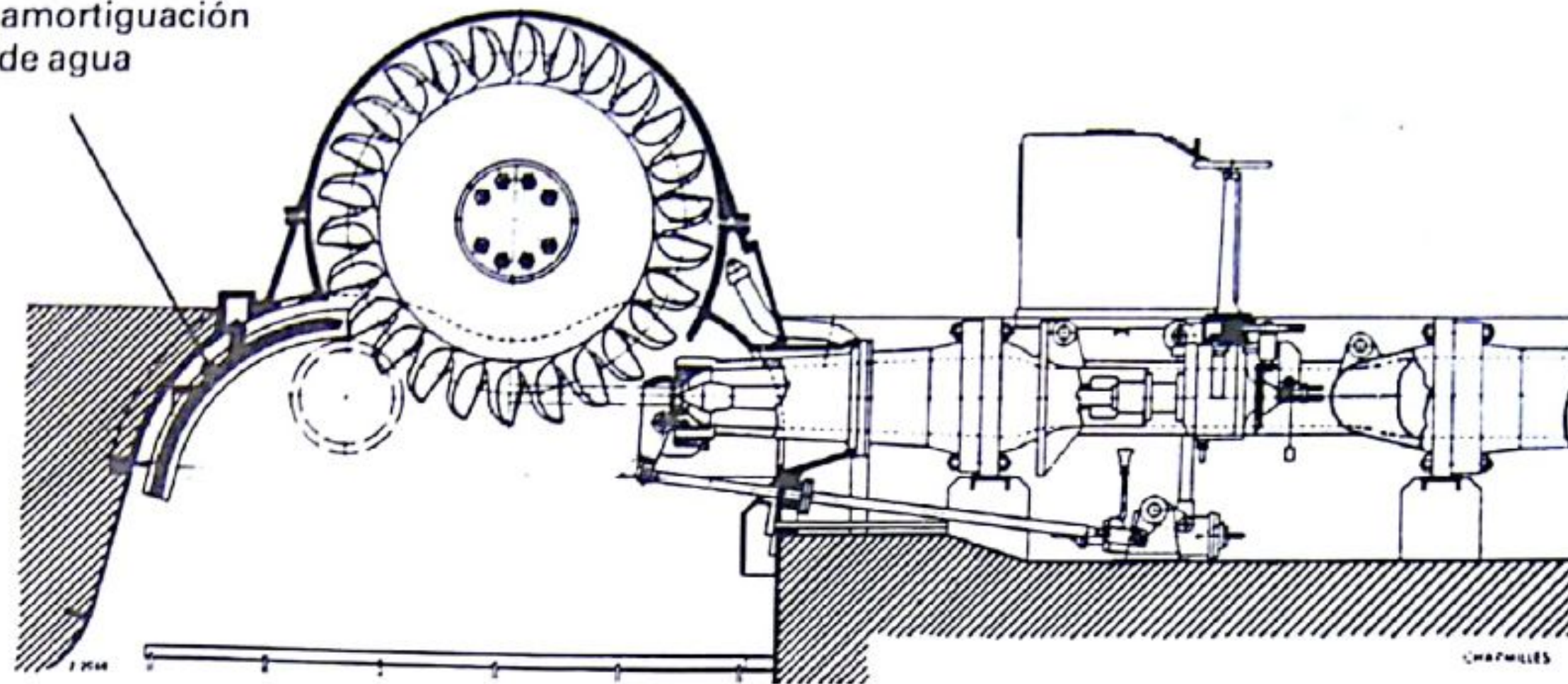


CÁMARA DE DESCARGA

Zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüe, después de haber movido al rodete.

Todo a presión atmosférica

Placa para amortiguación
del chorro de agua

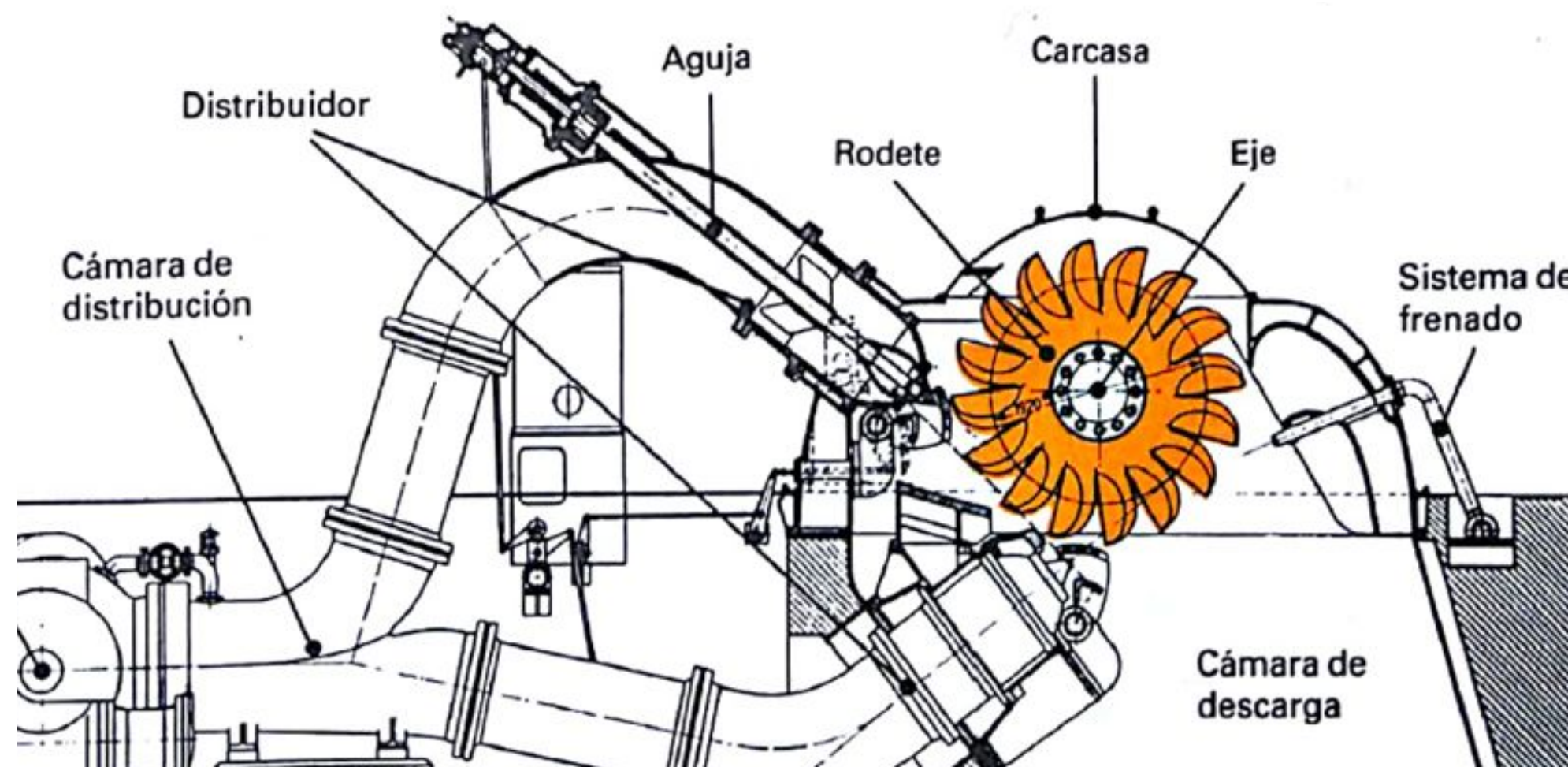


SISTEMA DE FRENADO

Consiste en un circuito de agua derivado de la cámara de distribución. El agua, proyectada a gran velocidad sobre la zona convexa de los cangilones, favorece el rápido frenado del rodete.

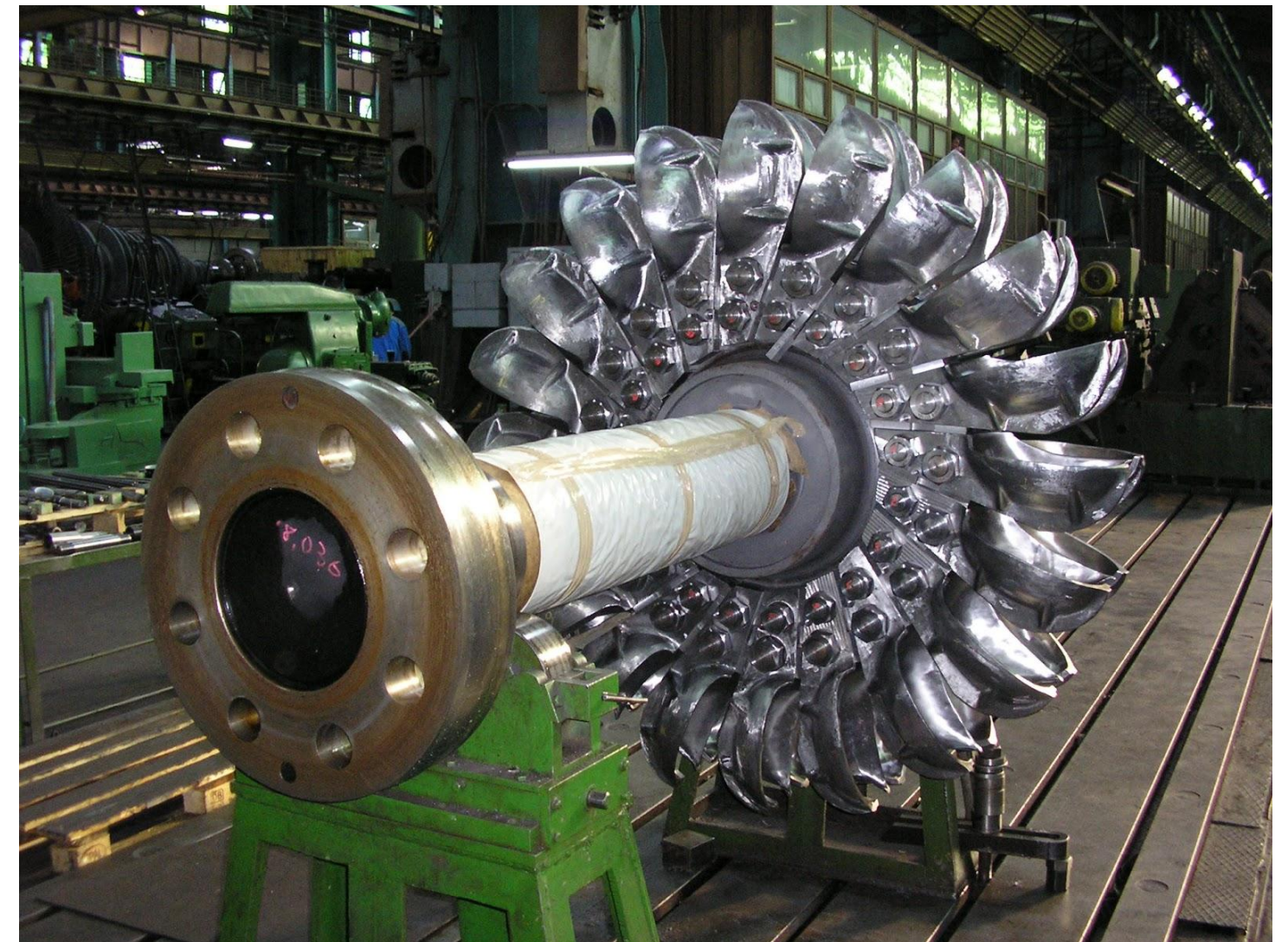
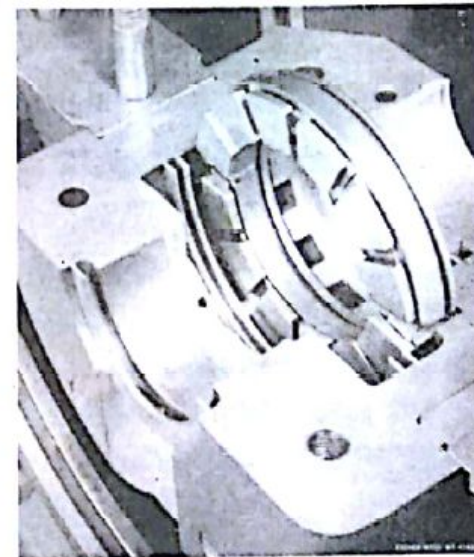
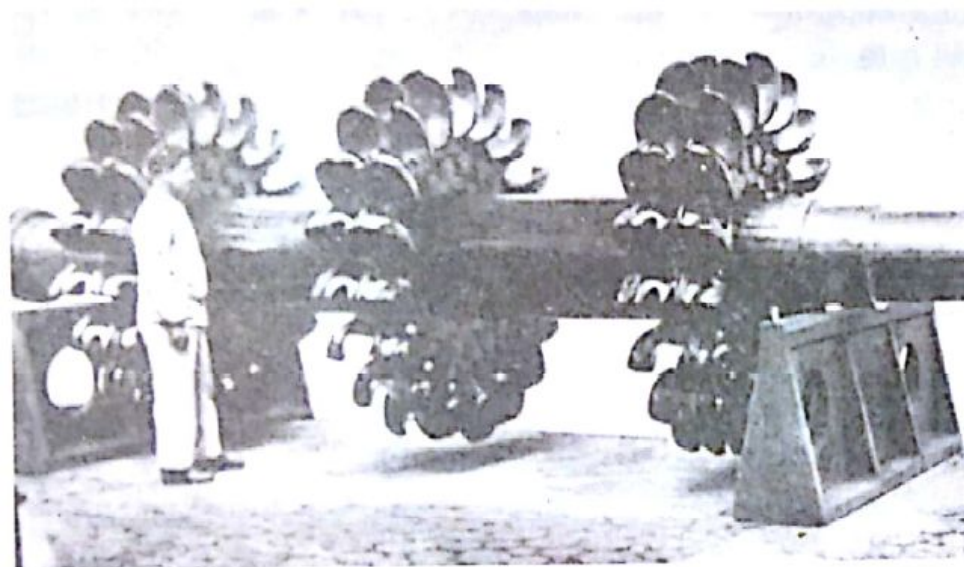
Pega del lado de atrás

Sale desde una tubería forzada similar



EJE

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



Regulación de Turbina

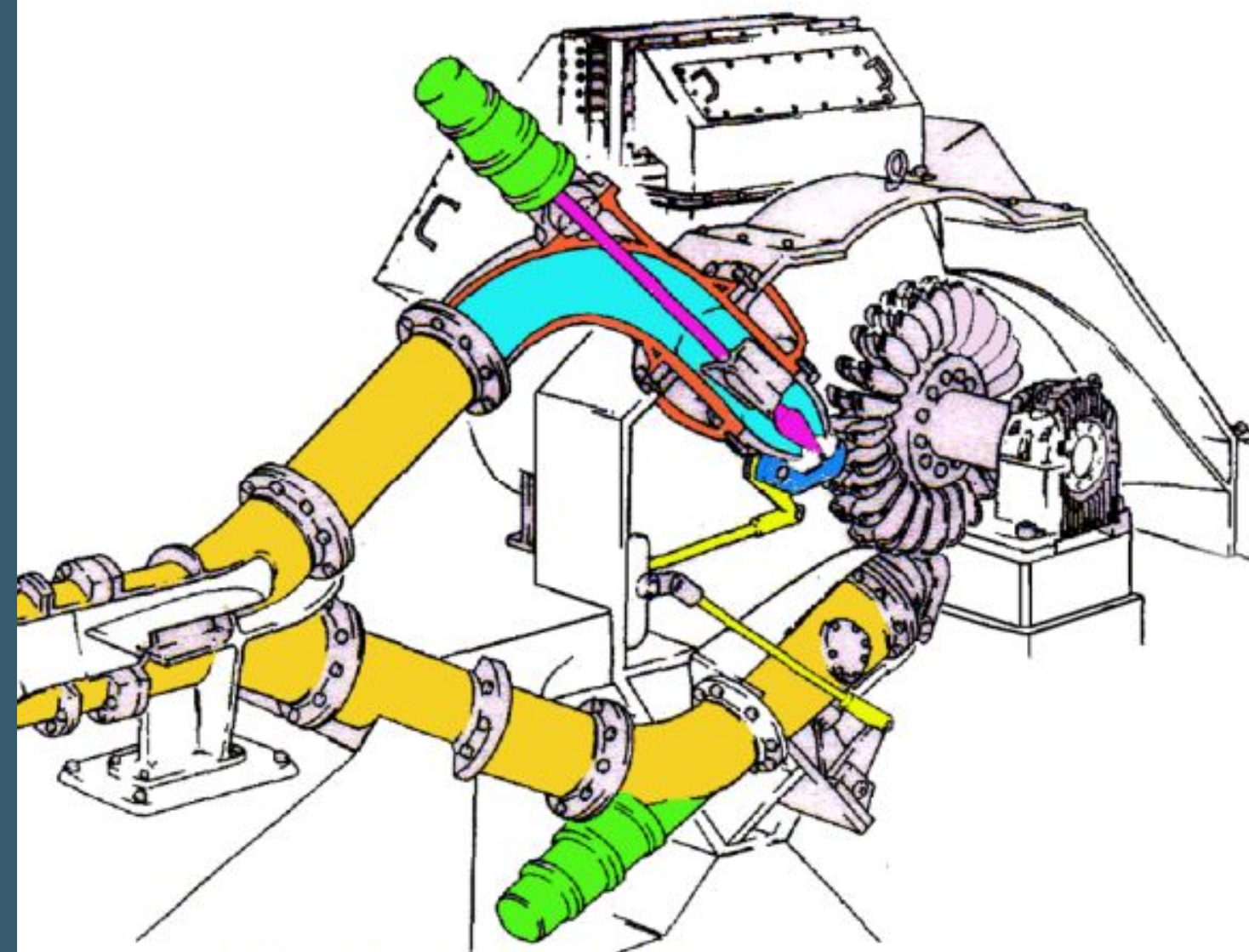
Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



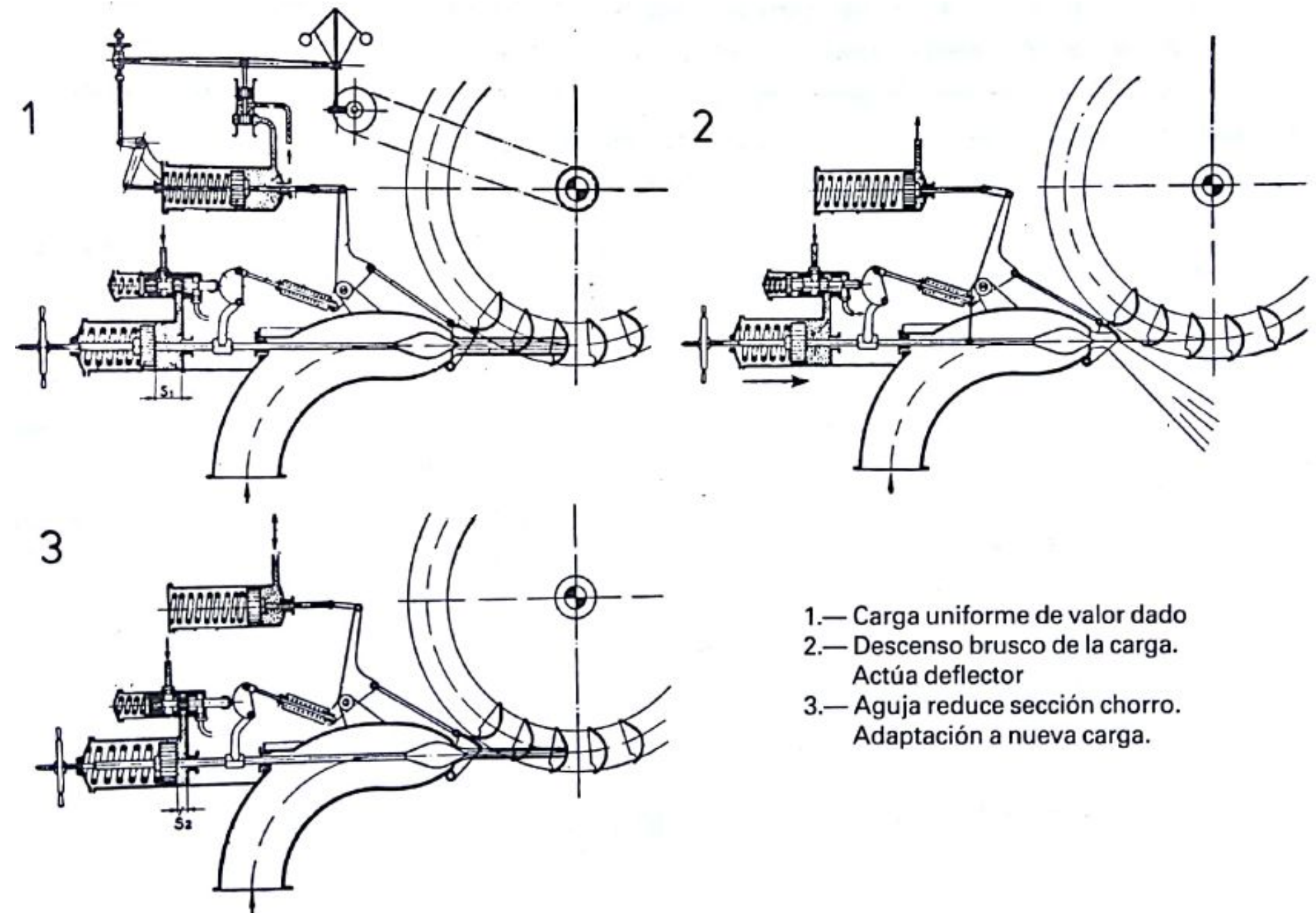
FACULTAD
DE INGENIERÍA



REGULACIÓN DE TURBINA

La acción del regulador se realiza sobre la válvula de aguja del inyector, y también en el deflector.

En caso de disminuir la carga proporcionada por el grupo, bruscamente o por un disparo, el deflector interviene rápidamente en primer lugar, desviando parte del chorro hacia el exterior del rodete; posteriormente, y de forma lenta, se realiza el acercamiento de la aguja hacia la tobera.



Salto Neto

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



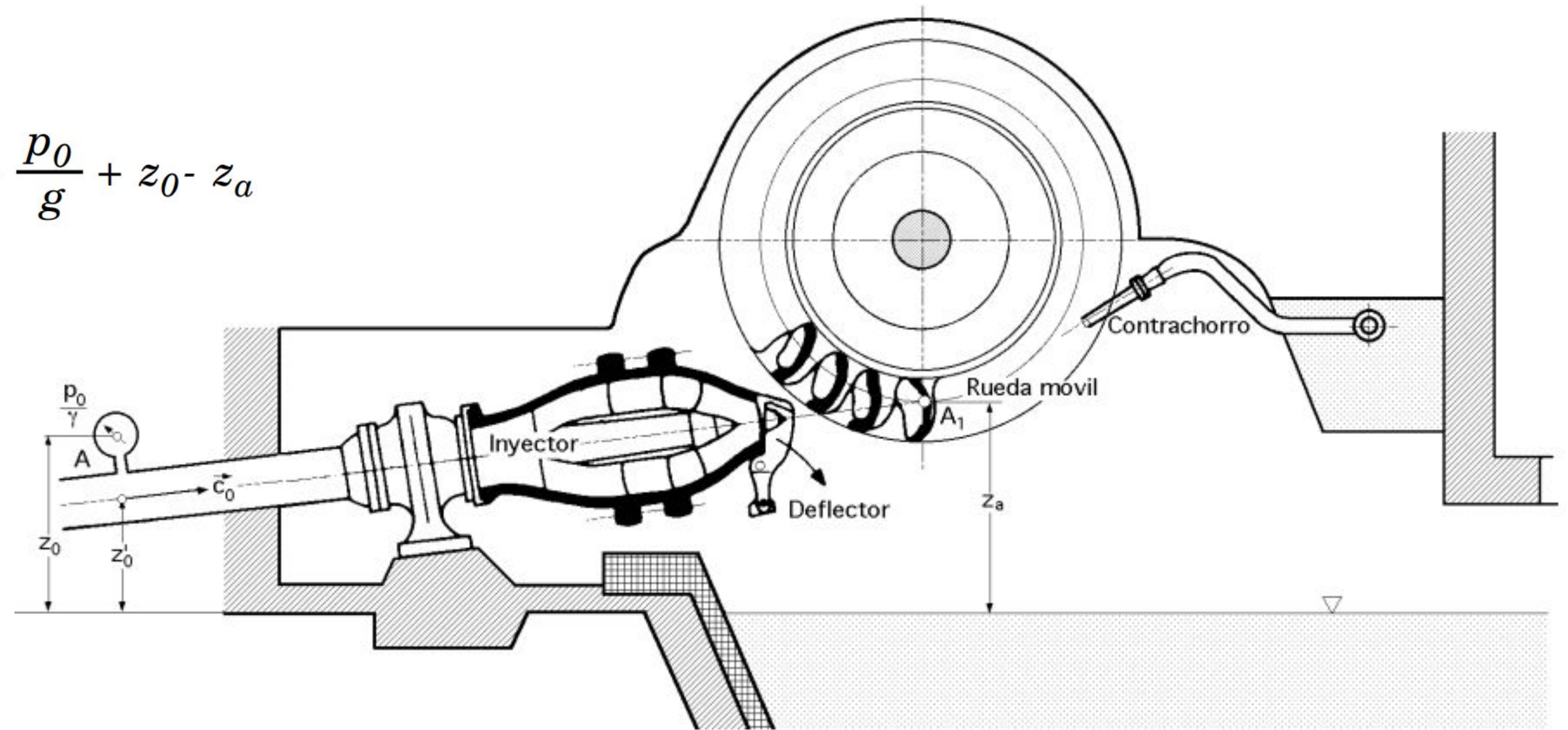
**FACULTAD
DE INGENIERÍA**



SALTO NETO

- 1 Inyector

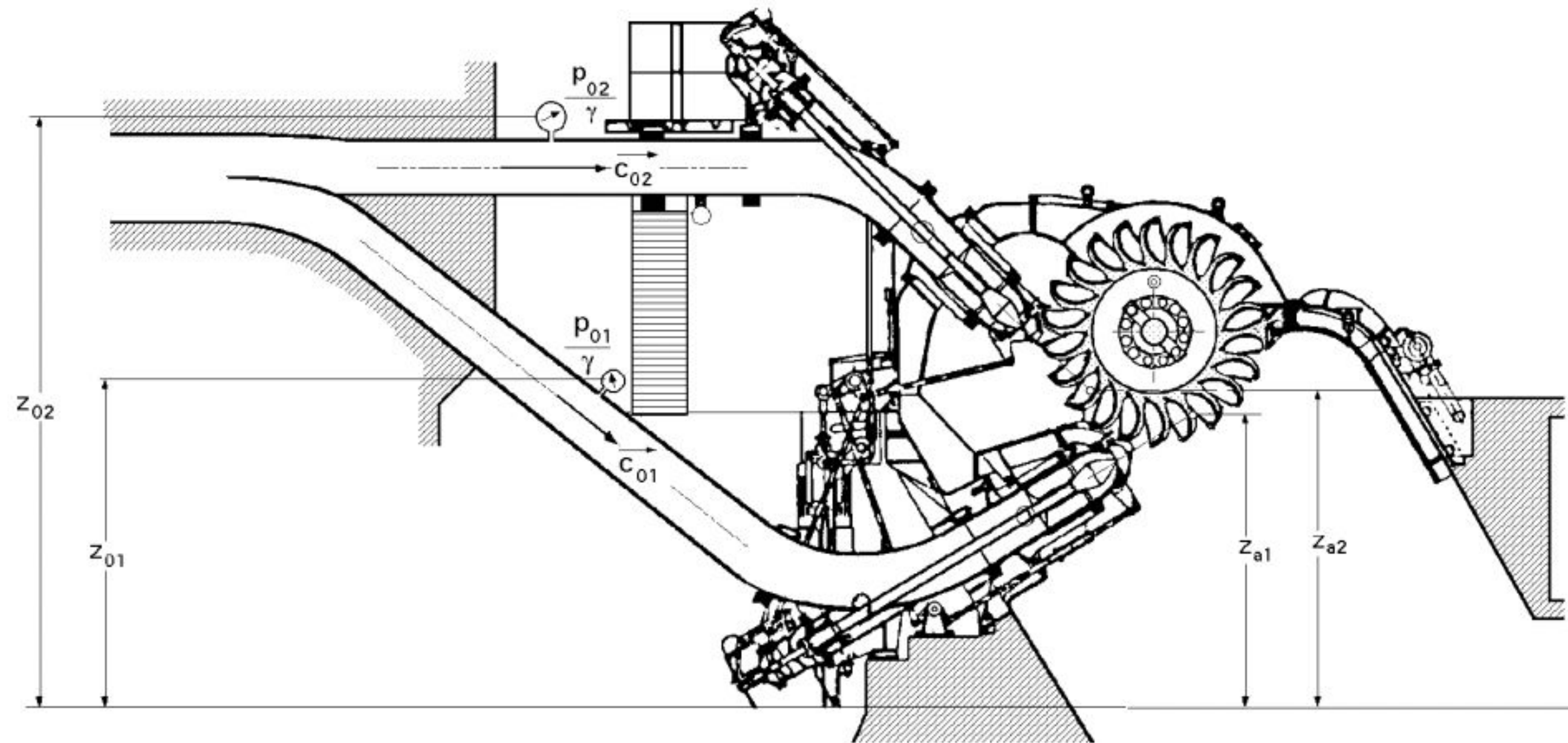
$$H_n = \frac{c_0^2}{2g} + \frac{p_0}{g} + z_0 - z_a$$



SALTO NETO

- Varios Inyectores

$$H_n = \frac{Q_1 \left(\frac{c_{01}^2}{2g} + \frac{p_{01}}{\gamma} + z_{01} - z_{a1} \right) + Q_2 \left(\frac{c_{02}^2}{2g} + \frac{p_{02}}{\gamma} + z_{02} - z_{a2} \right)}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_1 H_{n1} + Q_2 H_{n2}}{Q}$$



Dimensionado

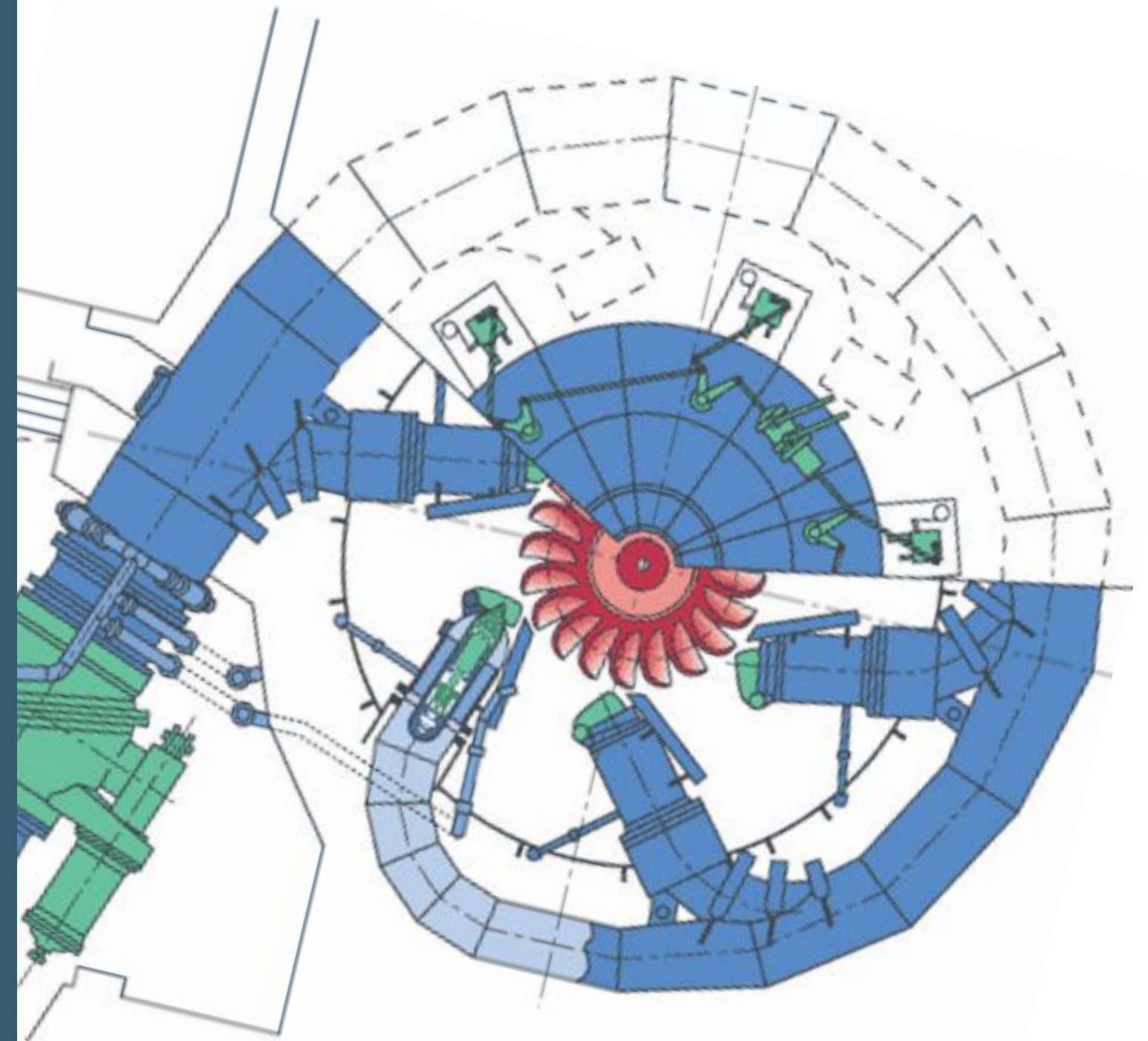
**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**



DIMENSIONAMIENTO

$$n_s = n \cdot \frac{1}{H_n^{5/4}}$$

- **Velocidad Específica:** por chorro

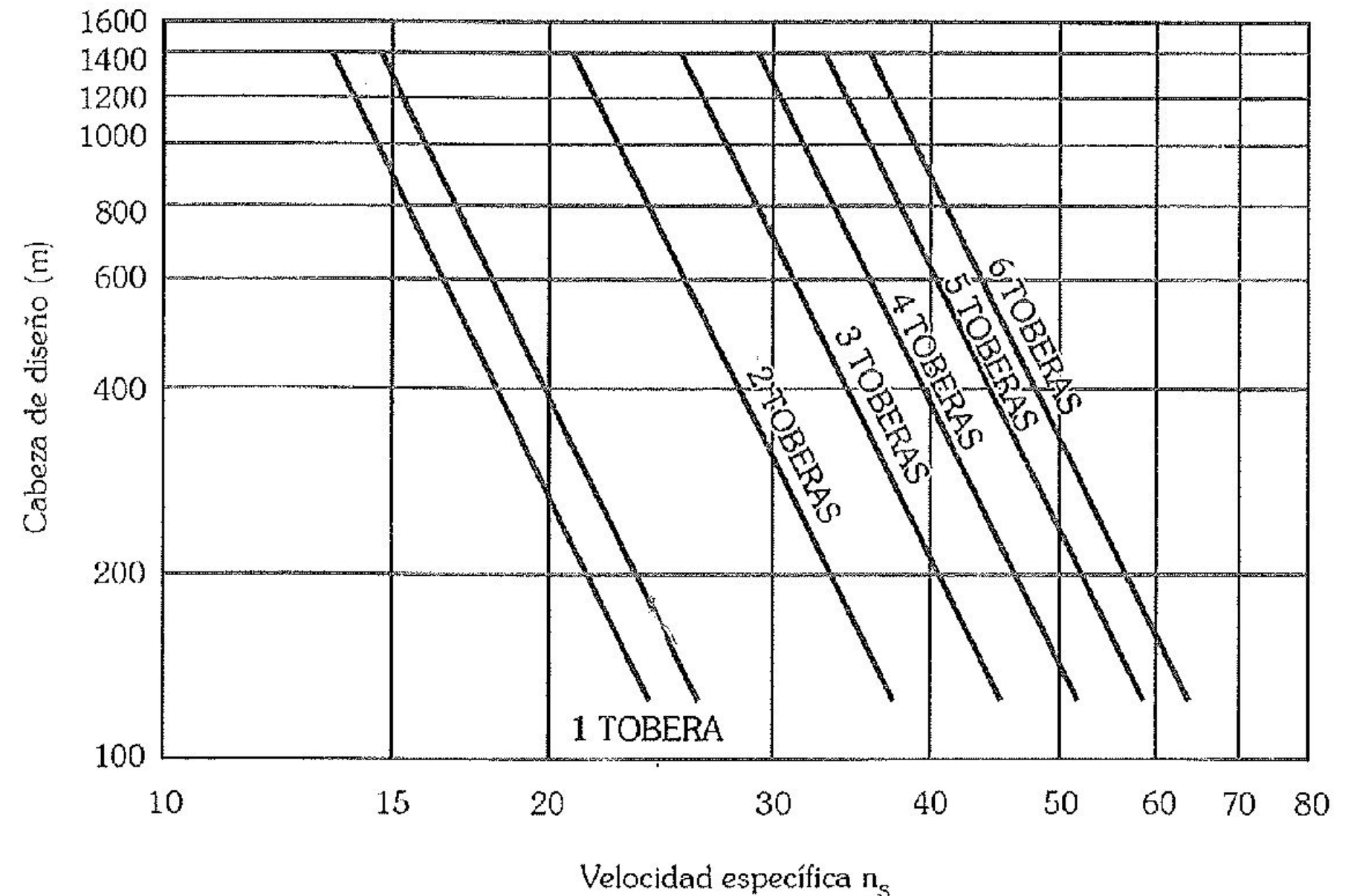
Se obtiene por ábaco en función del salto neto el número de chorros o toberas o se puede calcular mediante la siguiente fórmula.

$$n_s = n * (P)^{\frac{1}{2}} * H_d^{-1.25} * 1,167$$

Donde:

- ❖ n: velocidad nominal [r.p.m.]
- ❖ ns: velocidad específica de la turbina
- ❖ P: potencia nominal de la turbina [kW]
- ❖ Hd: salto neto de diseño [m]

★ Tomás Ocho Rubio, Tomo II
Ochoa

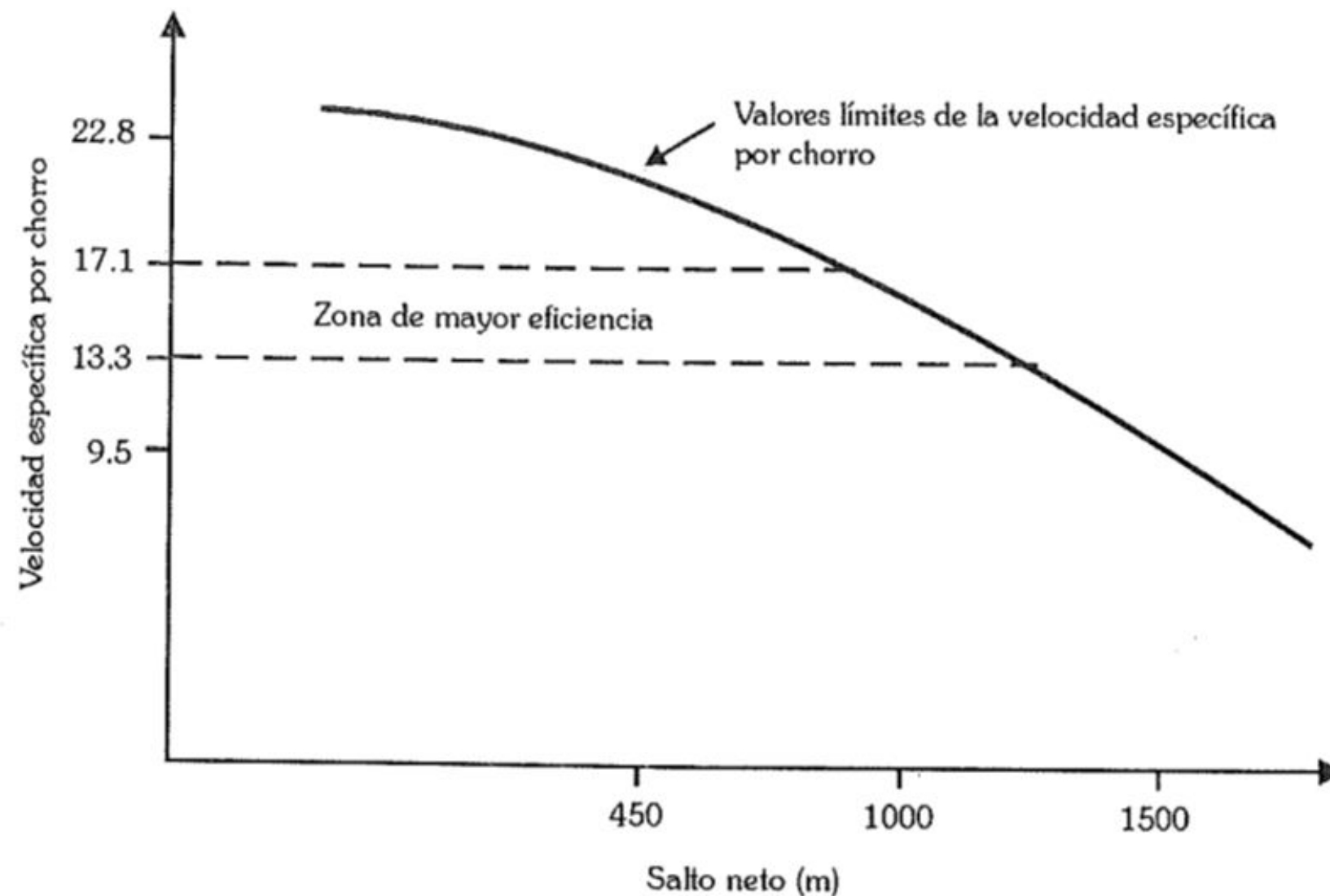


Nos sirve para despejar n, la velocidad nominal de rotación!
Mismo n_s =similares condiciones/características hidráulicas

DIMENSIONAMIENTO

- **Velocidad Específica por Chorro:**

Considerando la frecuencia de 50Hz



$$N^{\circ} \text{ par de polos} = 60 * \frac{f}{n}$$

$$N^{\circ} \text{ par de polos} = \frac{3000}{n} \text{ con } f = 50\text{Hz}$$

$$n_s = n_{AS} * P^{0,5} * H^{-1,25} * 1,167$$

$$n_{SC} = 85,49 * H^{-0,243}$$

$$n_{SC} = n * \left(\frac{P}{i}\right)^{0,5} * H^{-1,25} * 1,167$$

Donde:

- ❖ n_{SC} : velocidad específica del chorro
- ❖ P : Potencial de la turbina [Kw]
- ❖ i : número de chorros
- ❖ n : velocidad nominal [rpm]
- ❖ H_d : salto neto de diseño [m]

DIMENSIONAMIENTO

- **Diámetro Medio del Rodete:**

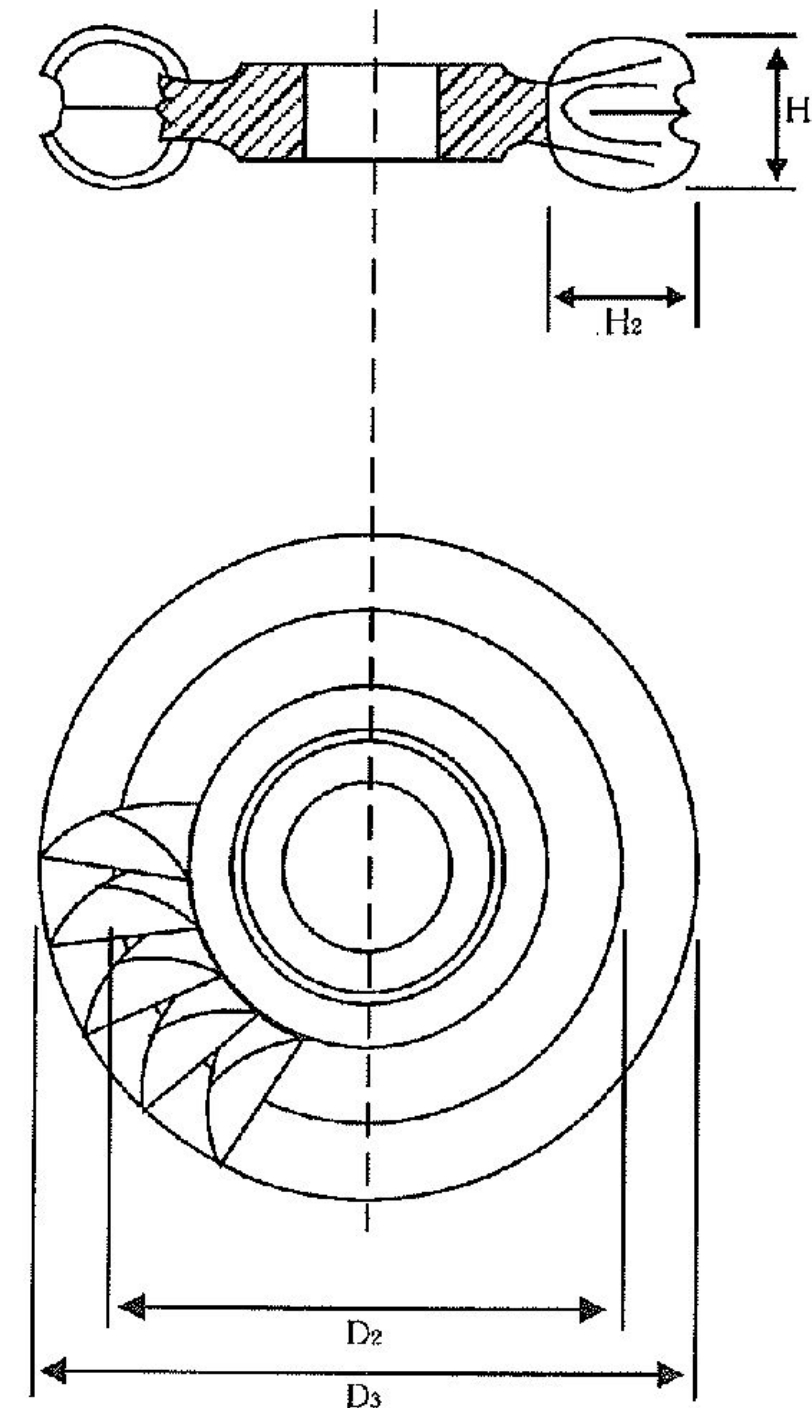
- Coeficiente de Velocidad Periférica:

$$\phi = 0,5445 - 0,0039n_{sc}$$

- Diámetro Medio del Rodete: sin los cucharones

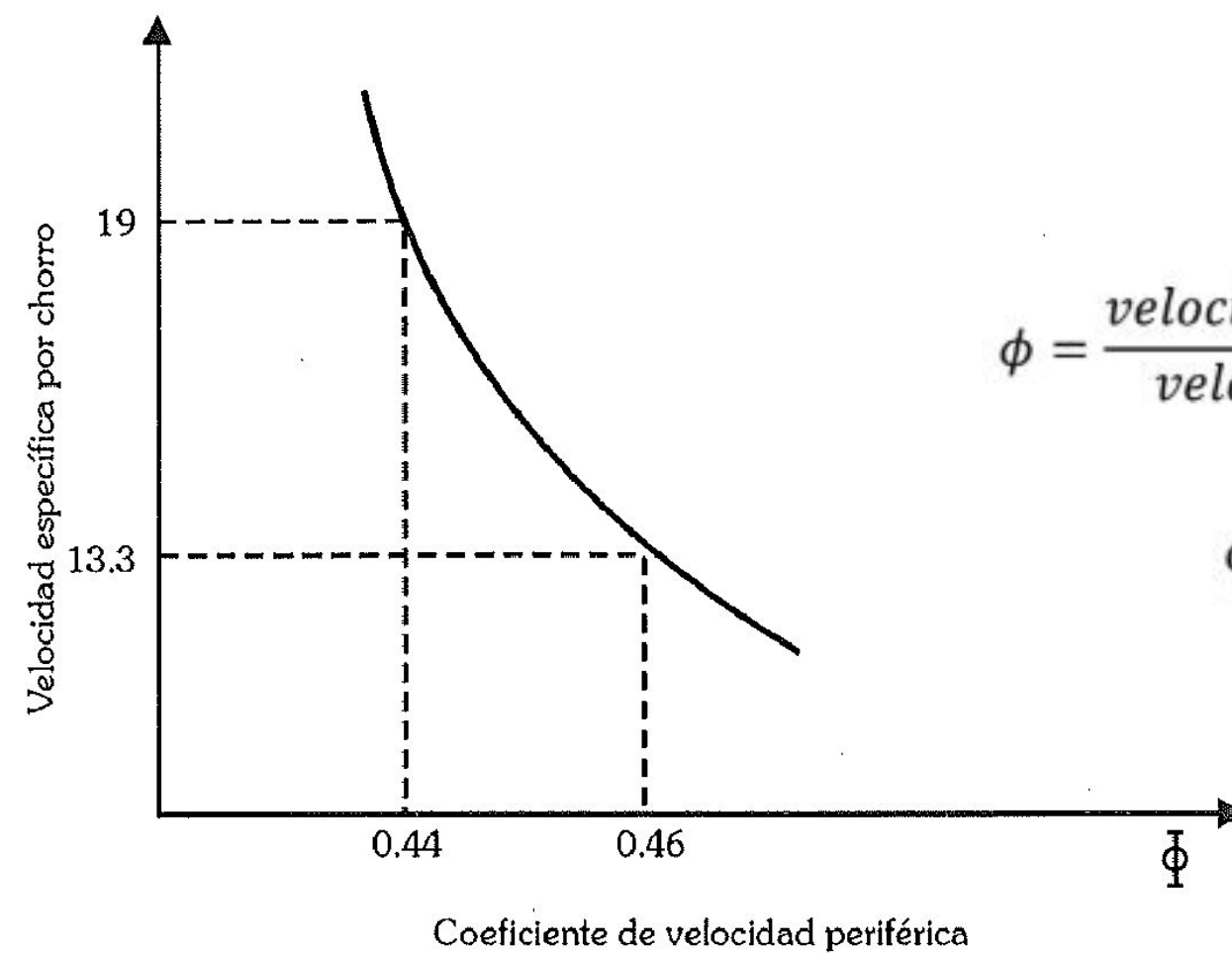
$$D_2 = \phi * \left(60 * \frac{\sqrt{2 * g * H}}{\pi * n} \right) [m]$$

$$D_2 = \frac{60}{\pi} * \frac{Vu}{n}$$



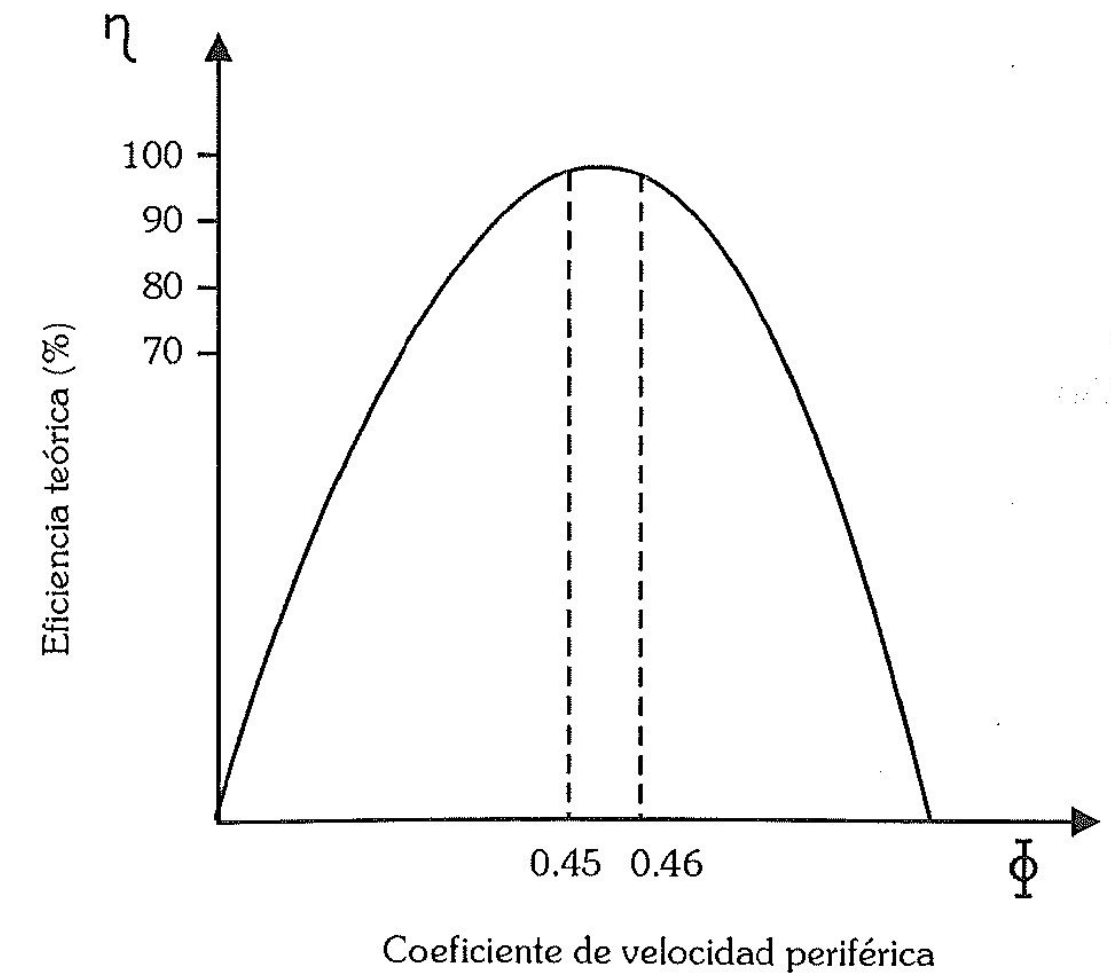
DIMENSIONAMIENTO

- **Diámetro Medio del Rodete:**



$$\phi = \frac{\text{velocidad periférica de la rueda}}{\text{velocidad teórica del chorro}}$$

$$\phi = \frac{Vu}{\sqrt{2 * g * H}}$$



DIMENSIONAMIENTO

- **Diámetro del chorro:**

o tobera

80-140m/s aprox

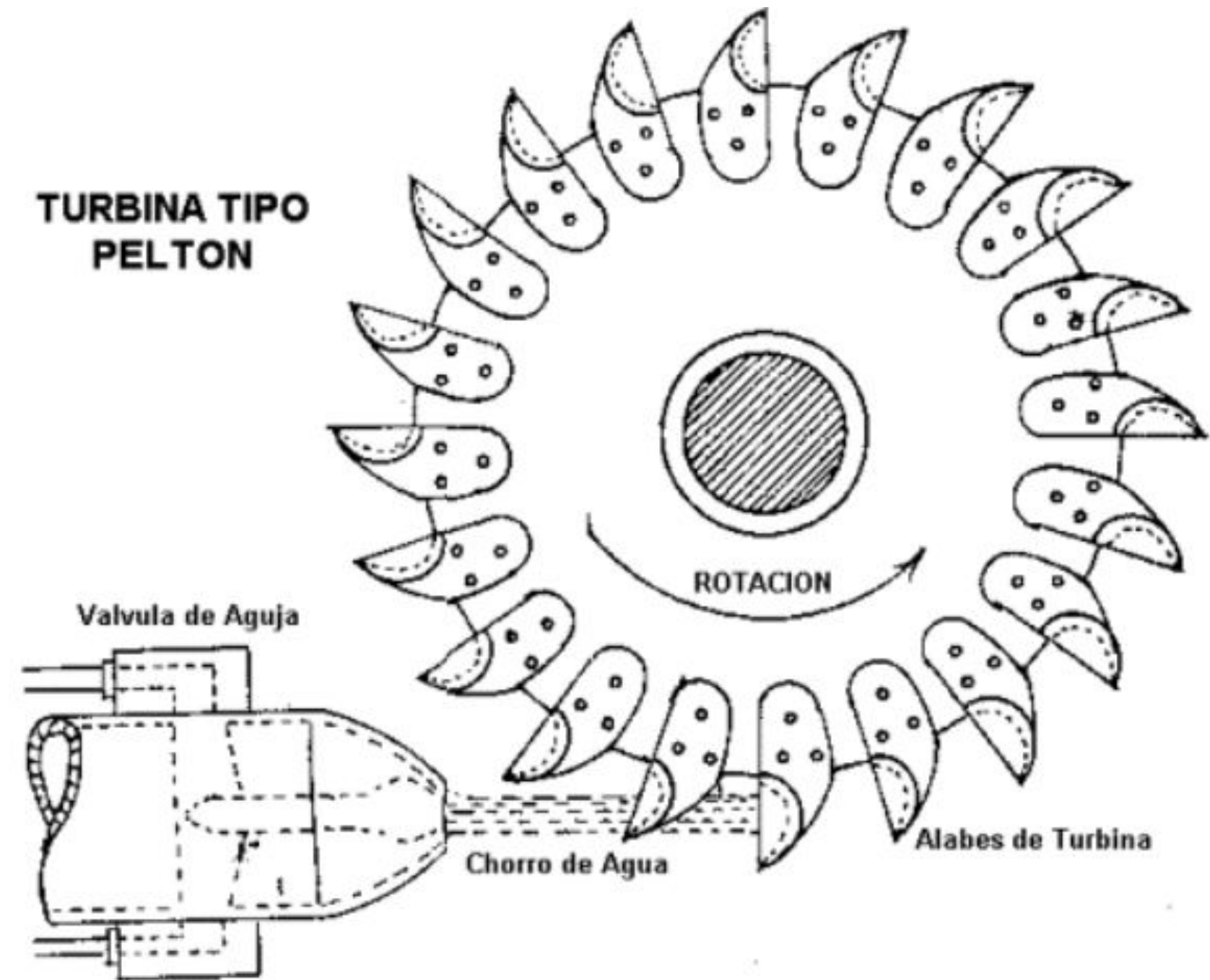
$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} * \frac{q_c}{C}}$$

○ Donde:

qc: caudal por chorro

C: velocidad del chorro

d: diámetro del chorro



DIMENSIONAMIENTO

- **Diámetro del Cangilón:**

$$H1 = 3,20 * d^{0,96} [m]$$

$$H2 = 3,23 * d^{1,02} [m]$$

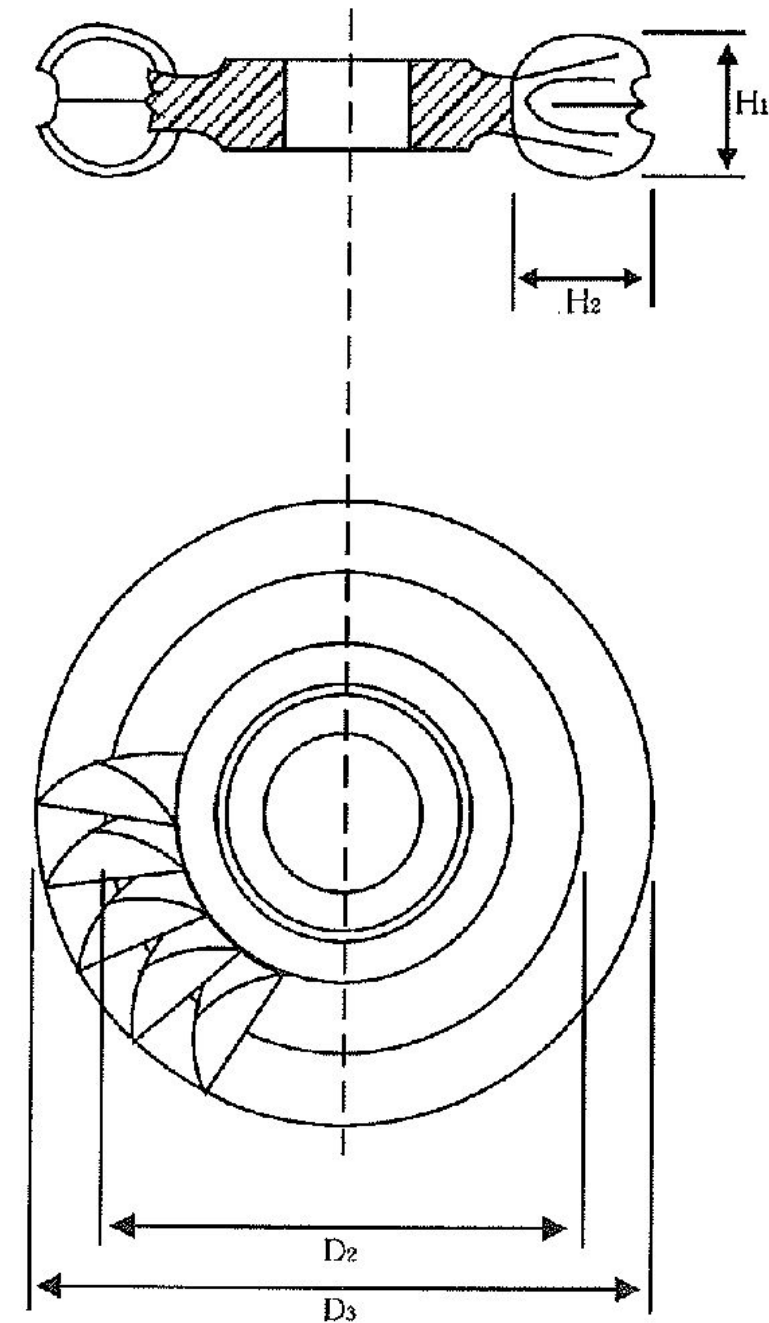
$$D3 = D2 + H2 [m]$$

○ Donde:

d: diámetro del chorro

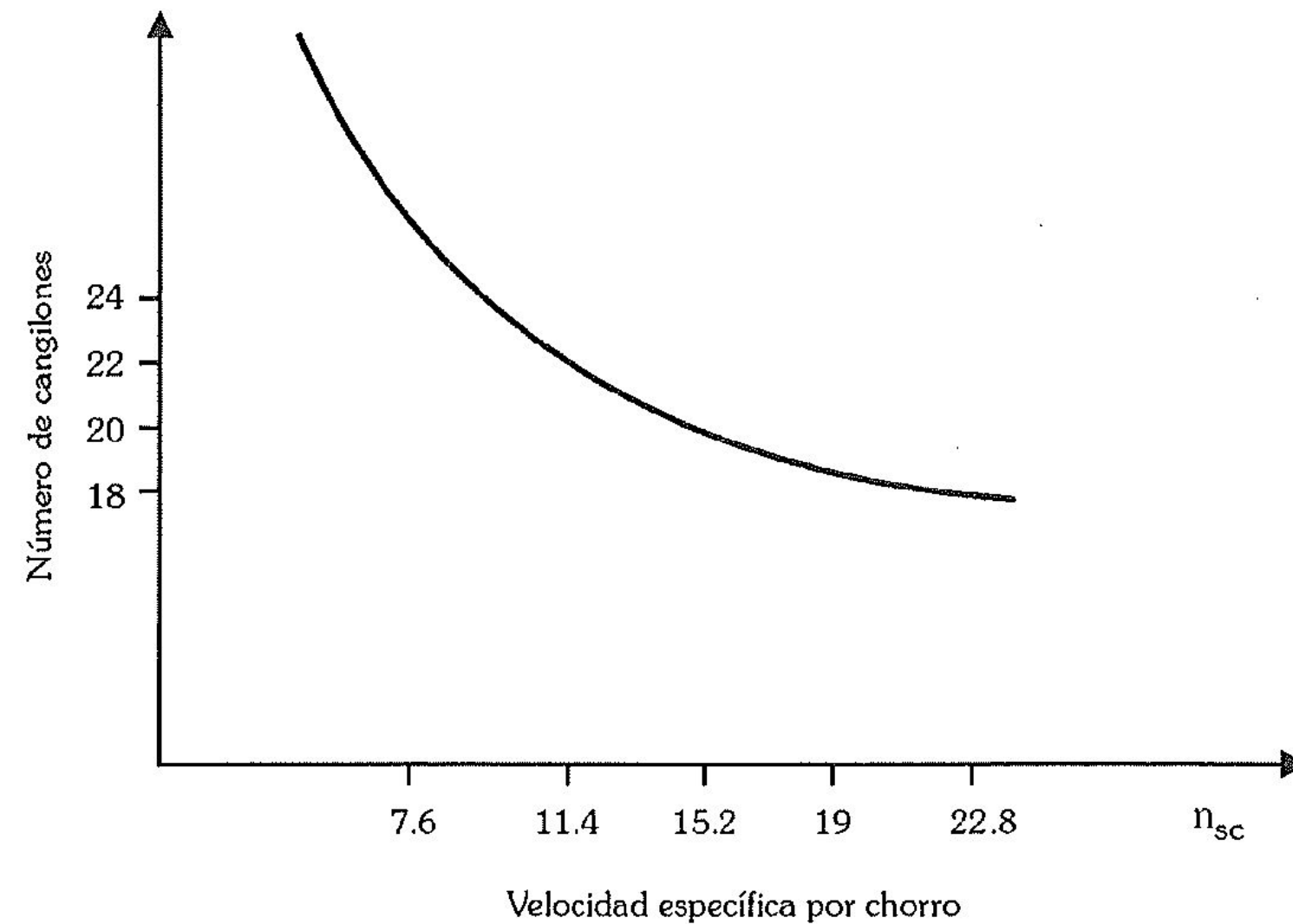
Q: caudal de diseño de la turbina [m³/s]

nS: velocidad específica de la turbina



DIMENSIONAMIENTO

- Número de Cangilones:



DIMENSIONAMIENTO

- Cubierta:

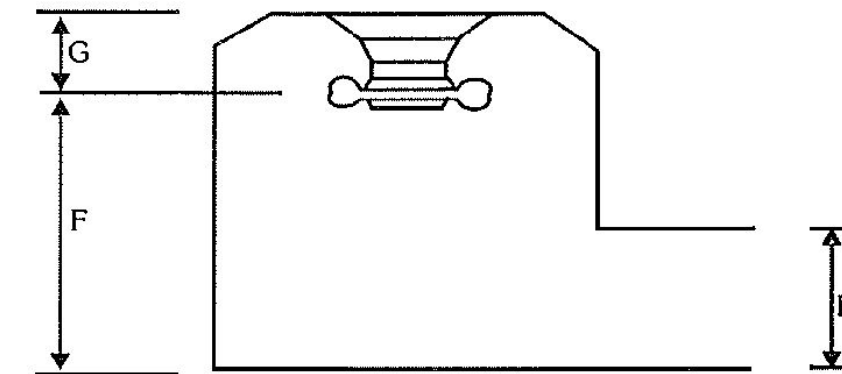
$$L = 0,78 + 2,06 * D_3$$

$$G = 0,196 + D_3$$

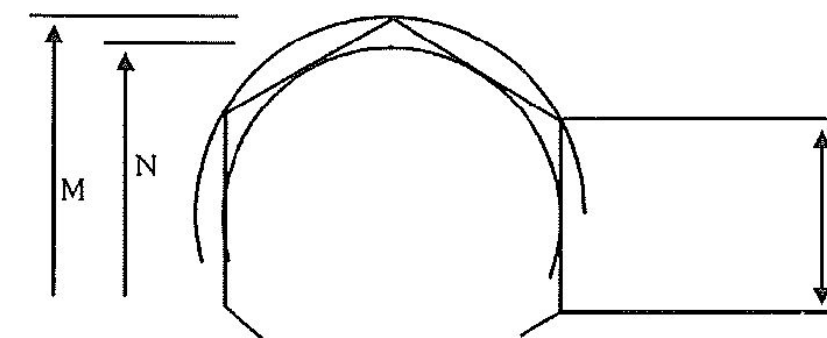
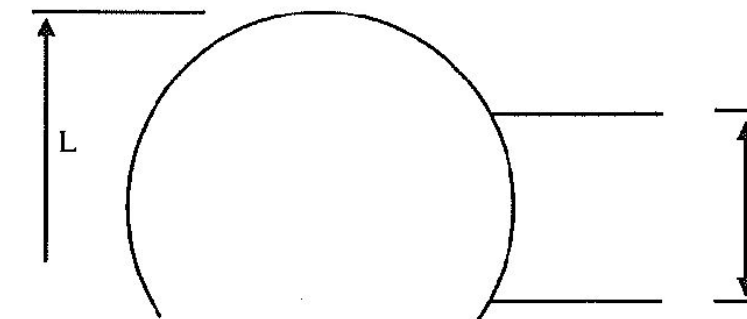
$$F = 1,09 + 0,71 * L$$

$$I = 1,28 + 0,37 * L$$

$$H = 0,62 + 0,513 * L$$



VISTA EN CORTE



VISTA EN PLANTA

DIMENSIONAMIENTO

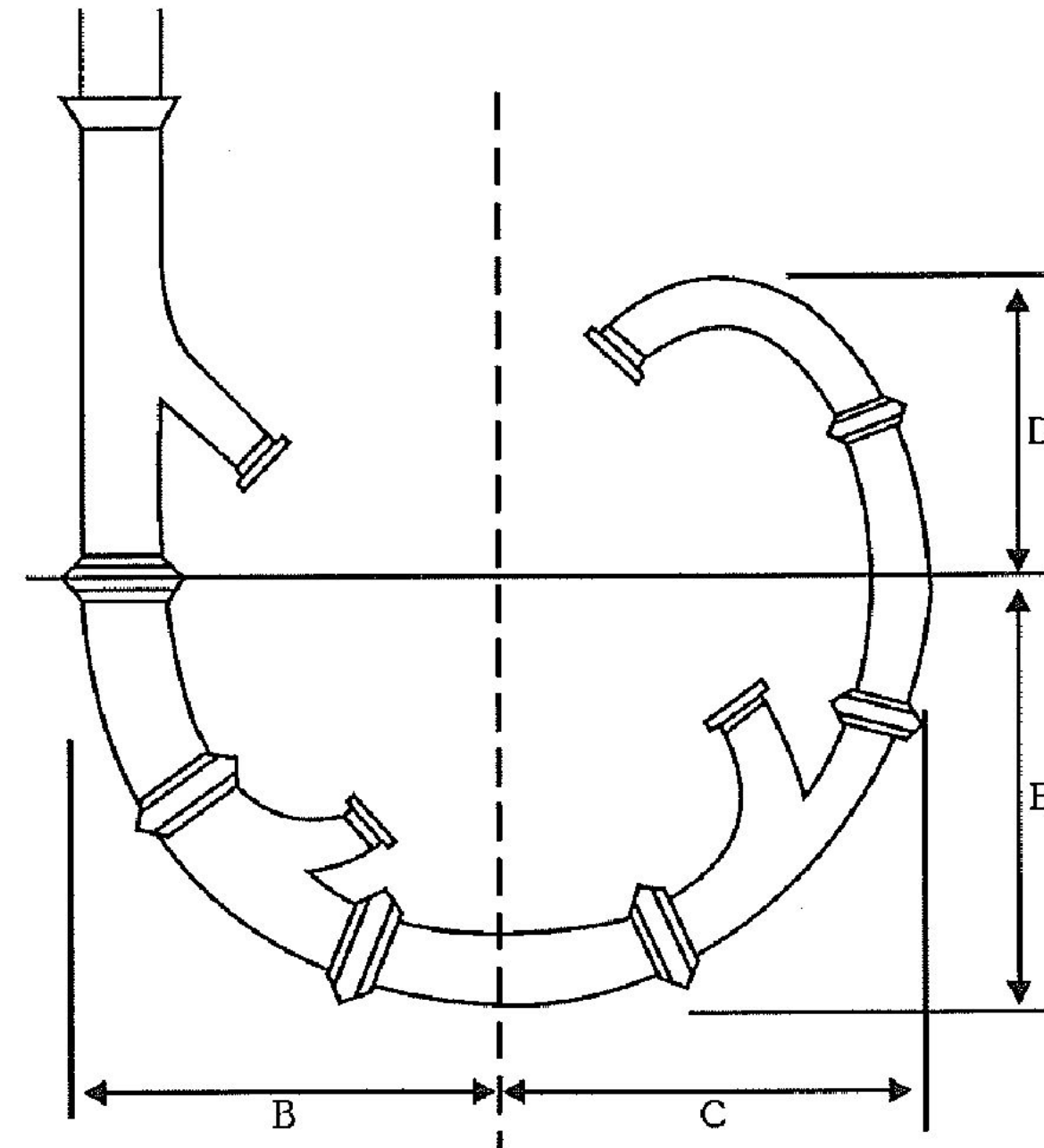
- **Tamaño de la Espira:**

$$B = 0,595 + 0,69 * L$$

$$C = 0,362 + 0,68 * L$$

$$D = 0,7 * L - 0,219$$

$$E = 0,43 + 0,70 * L$$



Características Constructivas

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

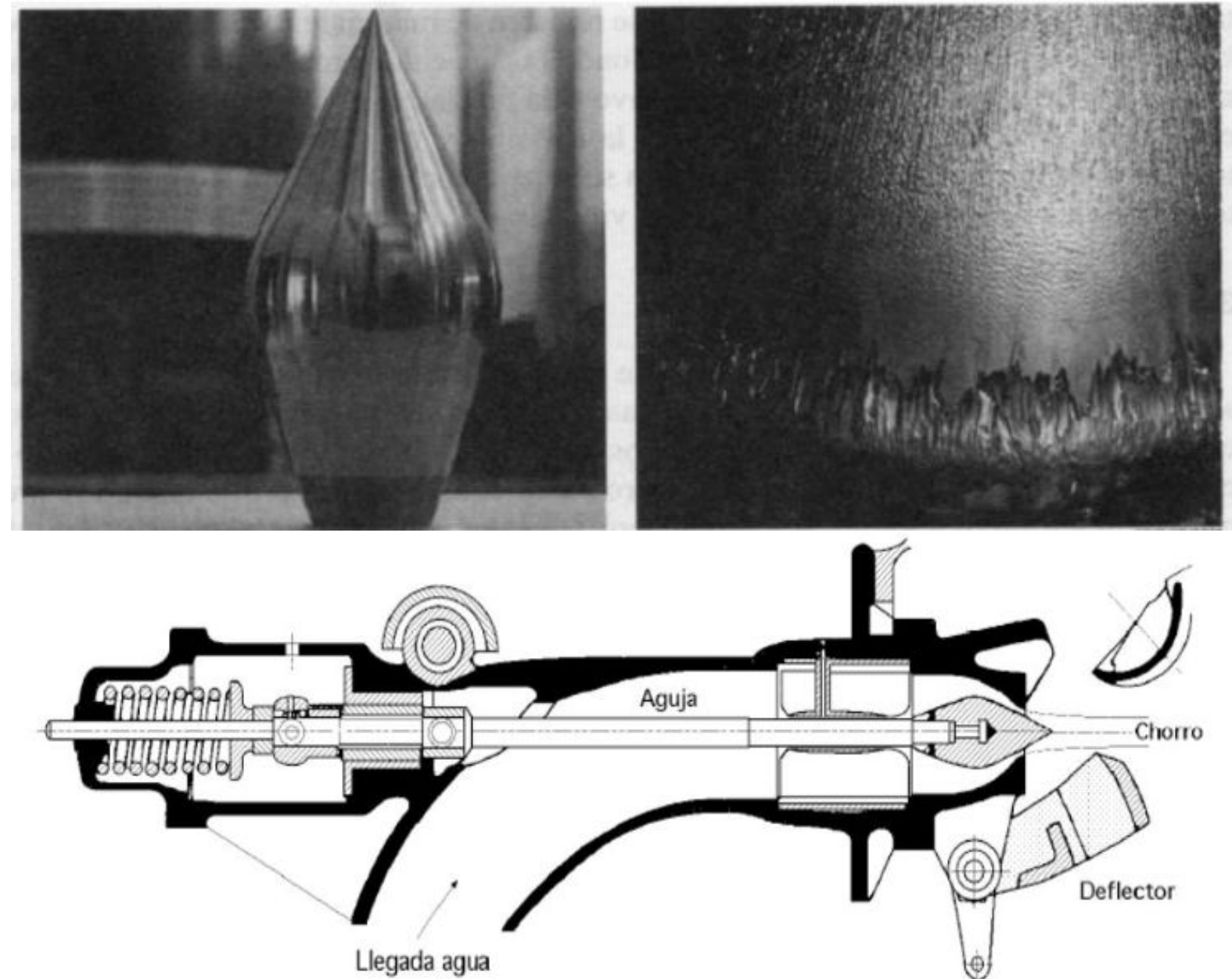


**FACULTAD
DE INGENIERÍA**



CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

- Velocidad del Chorro:
80 m/s - 140 m/s
- Alta Capacidad Erosiva.
- Material de fabricación muy duro y resistencia. Sobre todo en la aguja
- Número de Álabes:
17 - 26



Simulaciones sobre Cuchara de Turbina

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**

- 1. Modelo de Estudio**
- 2. Convergencia de Resultados**
- 3. Geometría de la Cuchara**
- 4. Elección entre Modelos**
- 5. Comparación con Teoría Unidimensional**



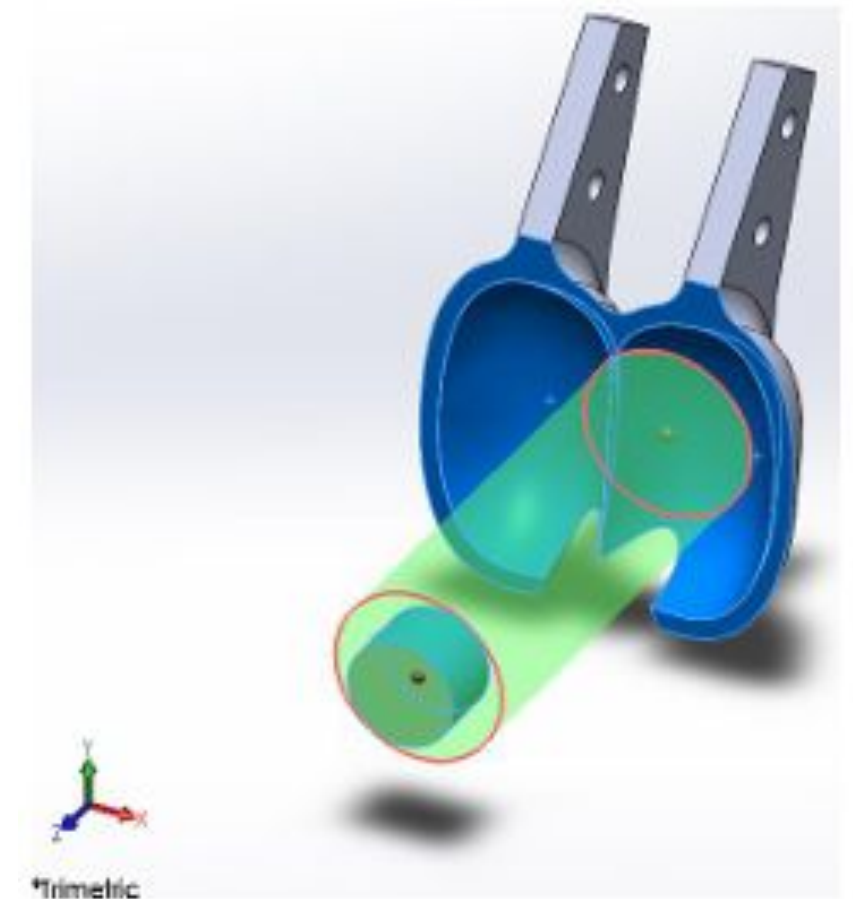
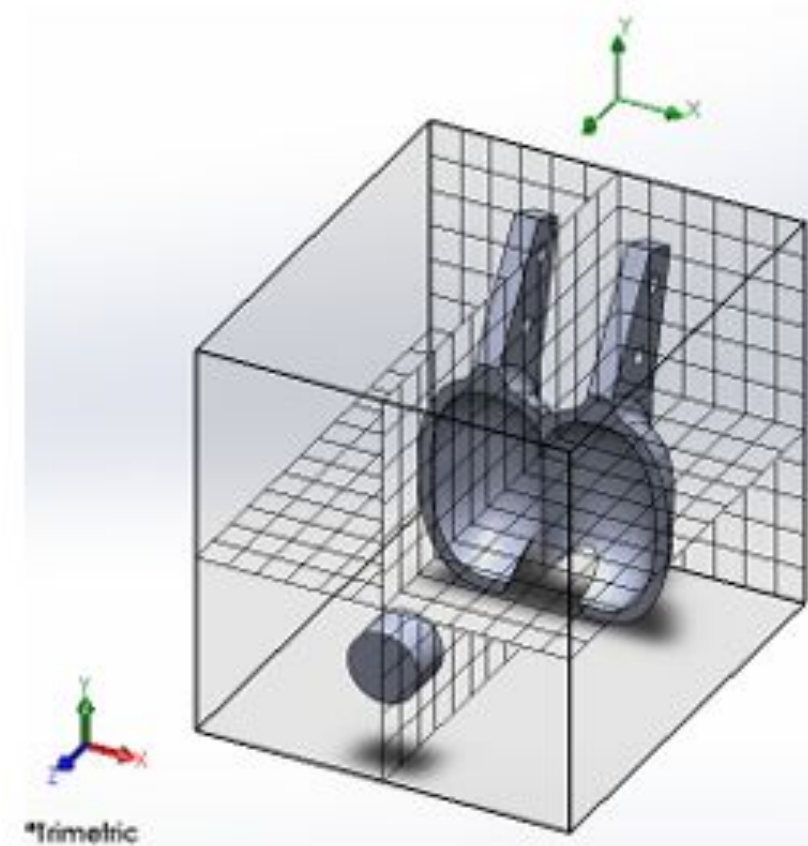
UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Modelo de Estudio

- El dominio computacional es un prisma que contiene el inyector y la cuchara.
- Se considera la turbina detenida.
- Se definió dos subdominios adicionales, el primero concéntrico al chorro de agua y la segundo sudominio sobre la cara interna de la cuchara.
- Se utilizó el programa "SolidWorks".



Convergencia de Resultados

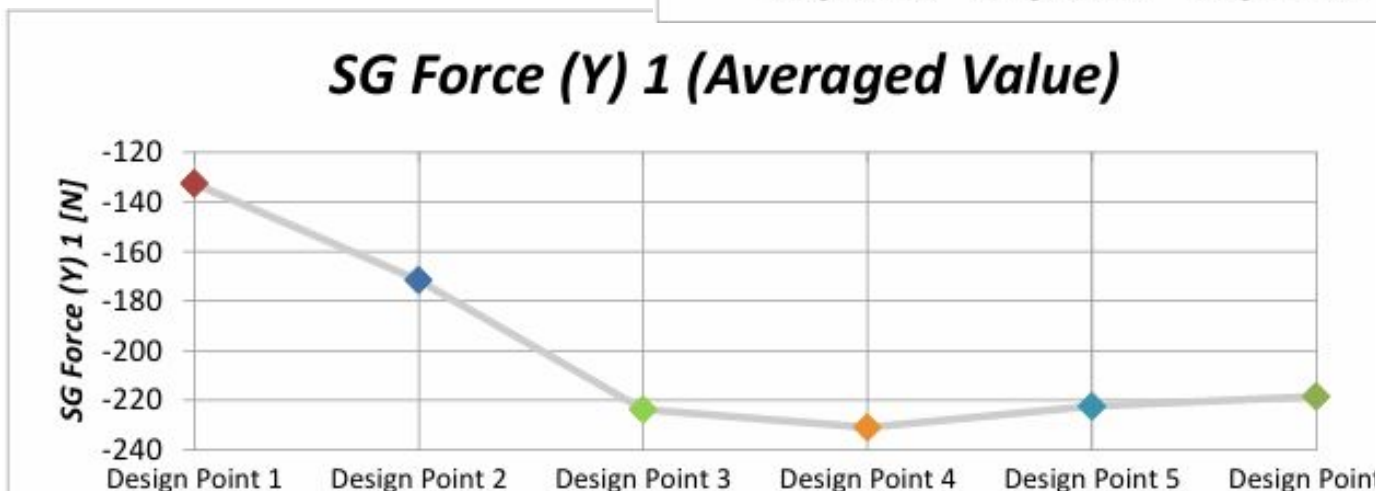
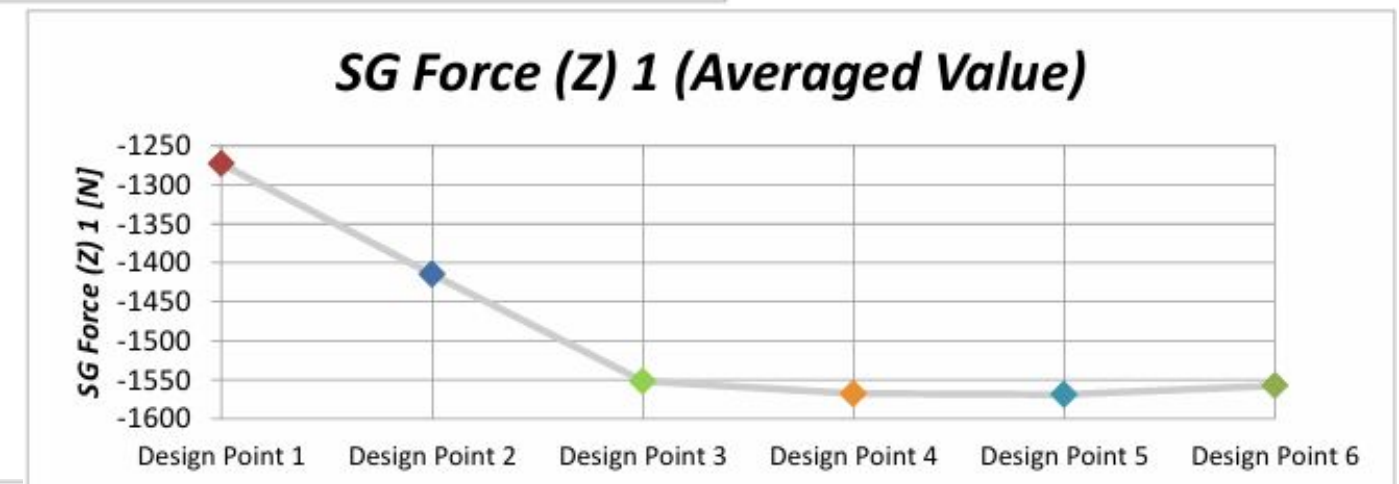
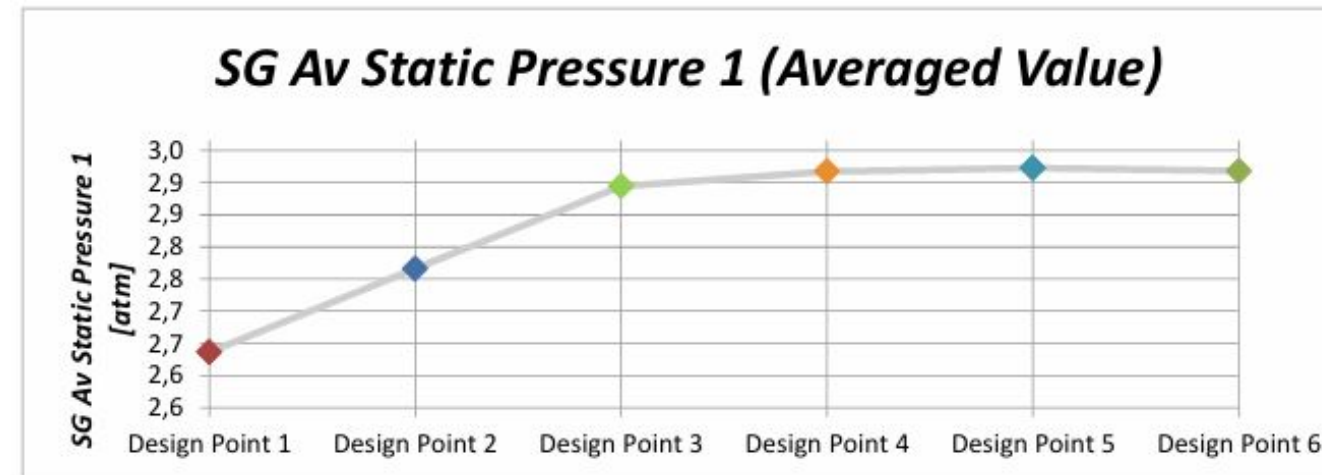
- El programa permite realizar estudios mediante la modificación de ciertos parámetros (mallado o geometría).
- Para el mismo se utilizaron los siguientes parámetros:
 - A. El nivel de partición de las celdas del subdominio del chorro de agua.
 - B. El nivel de partición de las celdas de la frontera fluido-sólido del subdominio de las caras.
 - C. El nivel de partición de las celdas de fluido del subdominio de las caras.
 - D. El nivel de partición máxima equidistante de la cara de la cuchara y el inyector.

Estudio	Parámetro				Número total de celdas	Número de celdas en contacto con las caras internas y el inyector	Tiempo de cálculo [s]
	A	B	C	D			
DP 1	0	1	1	1	2.168	794	7
DP 2	1	2	2	2	6.485	2.689	4
DP 3	2	3	3	3	31.432	8.441	25
DP 4	3	4	4	4	202.921	30.394	181
DP 5	4	5	5	5	1.517.450	115.736	2.201
DP 6	3	5	3	3	259.548	110.191	394

DP: Design Point

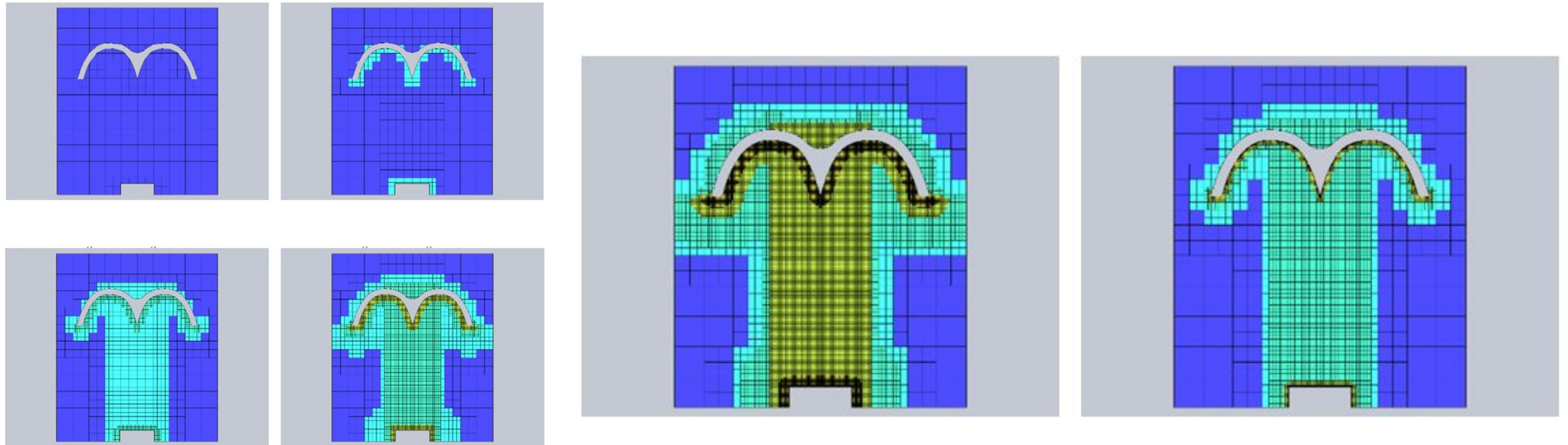
Convergencia de Resultados

- Los parámetros de convergencia analizados fueron:
 - Presión estática sobre la cara de la cuchara.
 - Fuerza resultante por la acción del chorro sobre la cuchara en el eje "y" y "z".



Convergencia de Resultados

- Esquema de mallado para los DP 1 al 6:

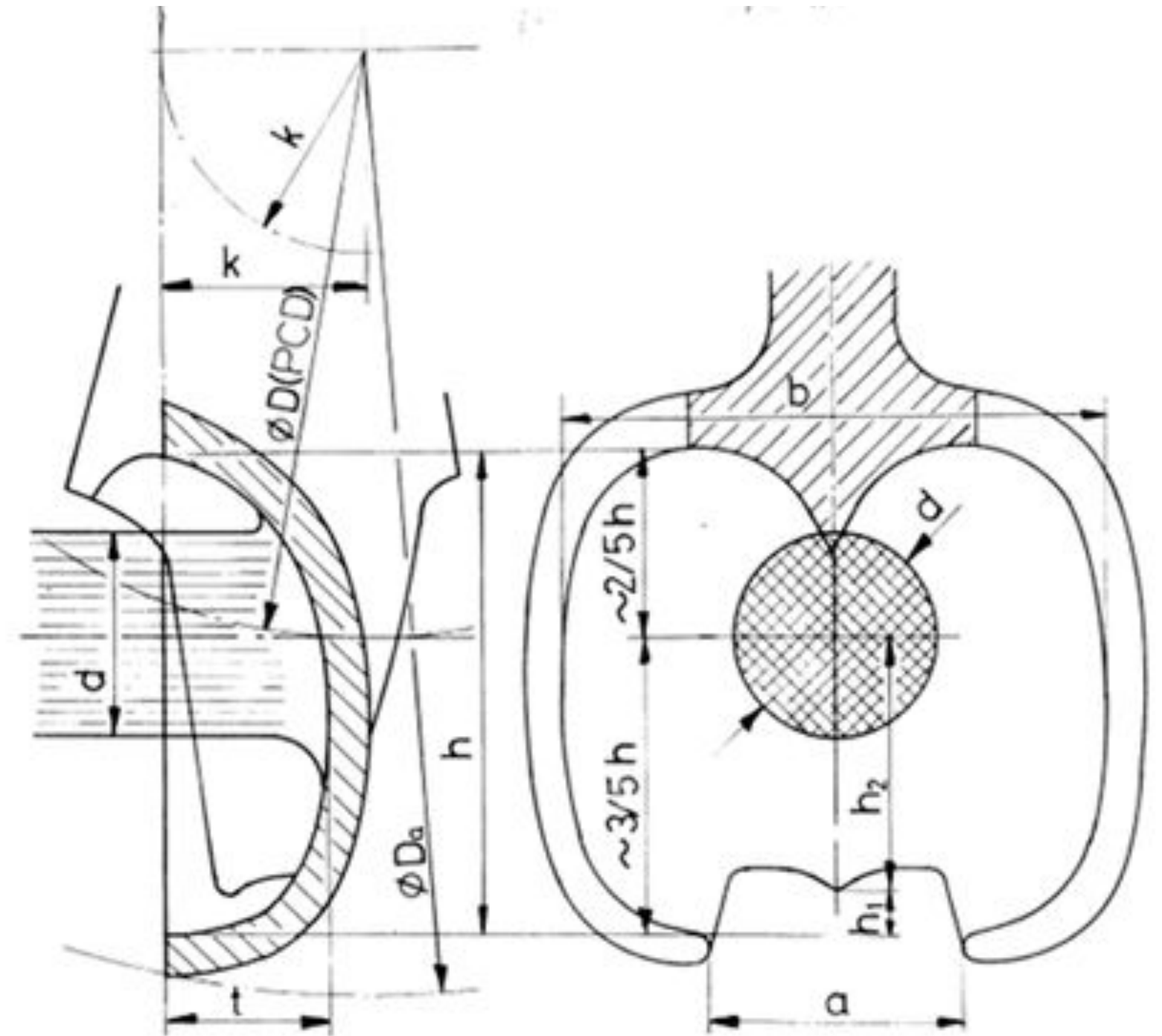


Geometría de la Cuchara

- La geometría básica recomendada por la bibliografía (Eisenring, 1991), es la siguiente:

Dónde:

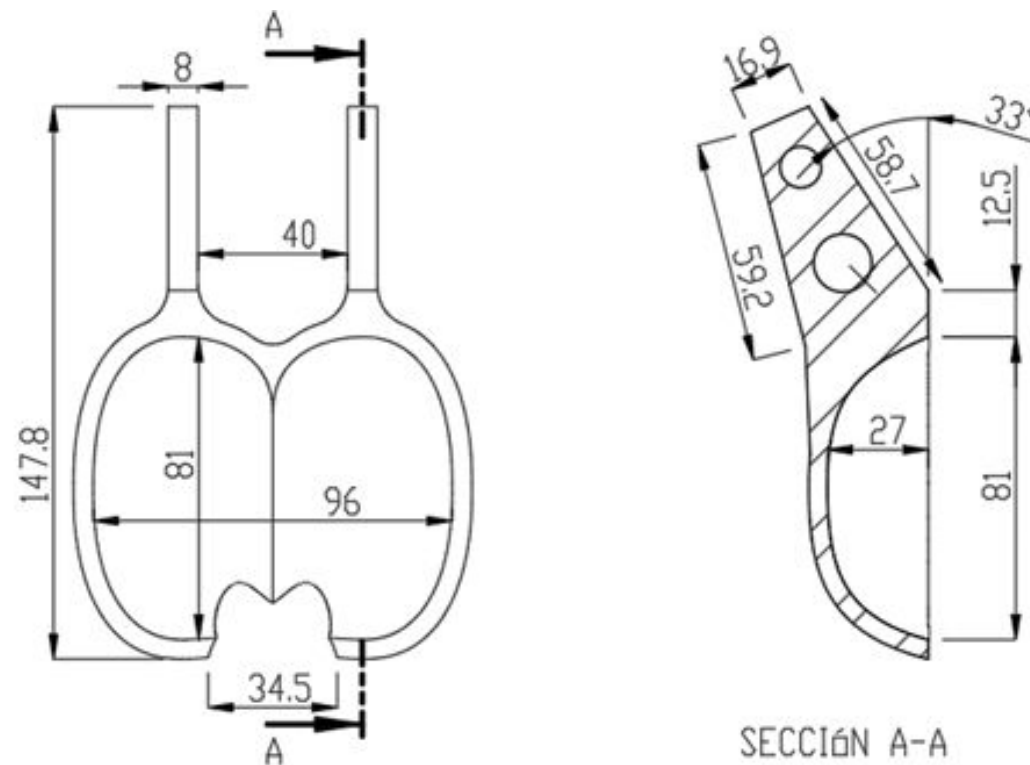
- $b=(2,5...3,2)d$, es el ancho de cuchara.
- $h=(2,1...2,7)d$, es la altura de cuchara.
- $t=0,9d$, es la profundidad.
- $k=(0,1...0,17)D$, es el offset.
- $h_2=(0.85...1.5)d_0$, es la distancia de la punta del filo hasta el centro del chorro de agua.
- $a \approx 1.2d_0$, es el ancho del pasaje de agua inferior.



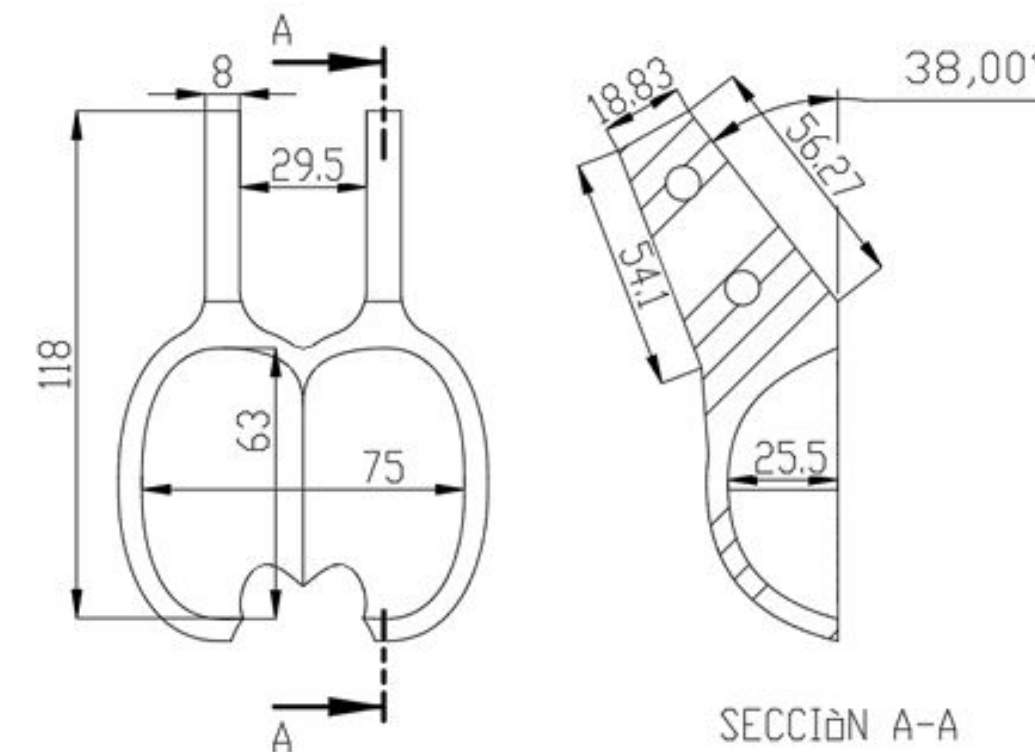
Geometría de la Cuchara

- De los valores recomendados se consideraron el extremo superior y el extremo inferior:

Cuchara d=30mm	B [mm]	H [mm]	T [mm]	K [mm]	h_2 [mm]	a [mm]
Rango inferior	75	63	25,5	70	30,24	36
Rango superior	96	81	27	70	38,88	36



→ Cuchara Rango Superior

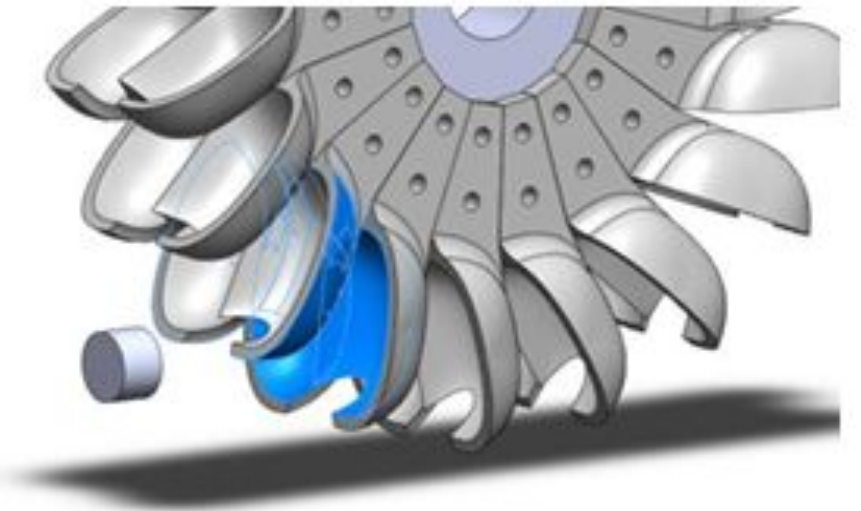
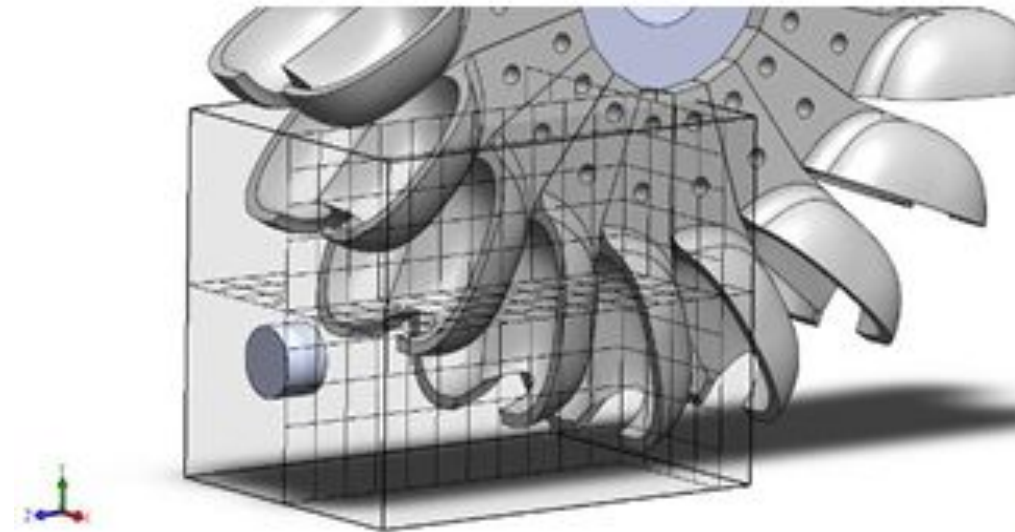


→ Cuchara Rango Inferior

Elección entre los Modelos

- Se propusieron dos modelos de cuchara en función de los parámetros presentados por (Eisenring, 1991).
- Se simularon ambos modelos para seleccionar aquel que presente mejor performance.
- Se definieron como parámetros de cálculo el torque positivo y el torque negativo sobre las superficies que se muestran:

Cuchara d=30mm	B [mm]	H [mm]	T [mm]	K [mm]	h_2 [mm]	a [mm]
Rango inferior	75	63	25,5	70	30,24	36
Rango superior	96	81	27	70	38,88	36



Elección entre los Modelos

Goal (Value)	Cuchara máximo del rango	Cuchara mínimo del rango
GG Torque (X) [N*m]	232,552	185,695
SG Torque negativo [N*m]	-1,121	-7,528
SG Torque positivo [N*m]	226,275	184,212
SG Force (Z) [N]	- 1580,611	-1280,024
SG Force (Y) [N]	221,915	-86.019

- i. *Resultados tal cual los arroja el programa.
- ii. *SG AV: Surface Goal Average.
- iii. *GG: Global Goals.

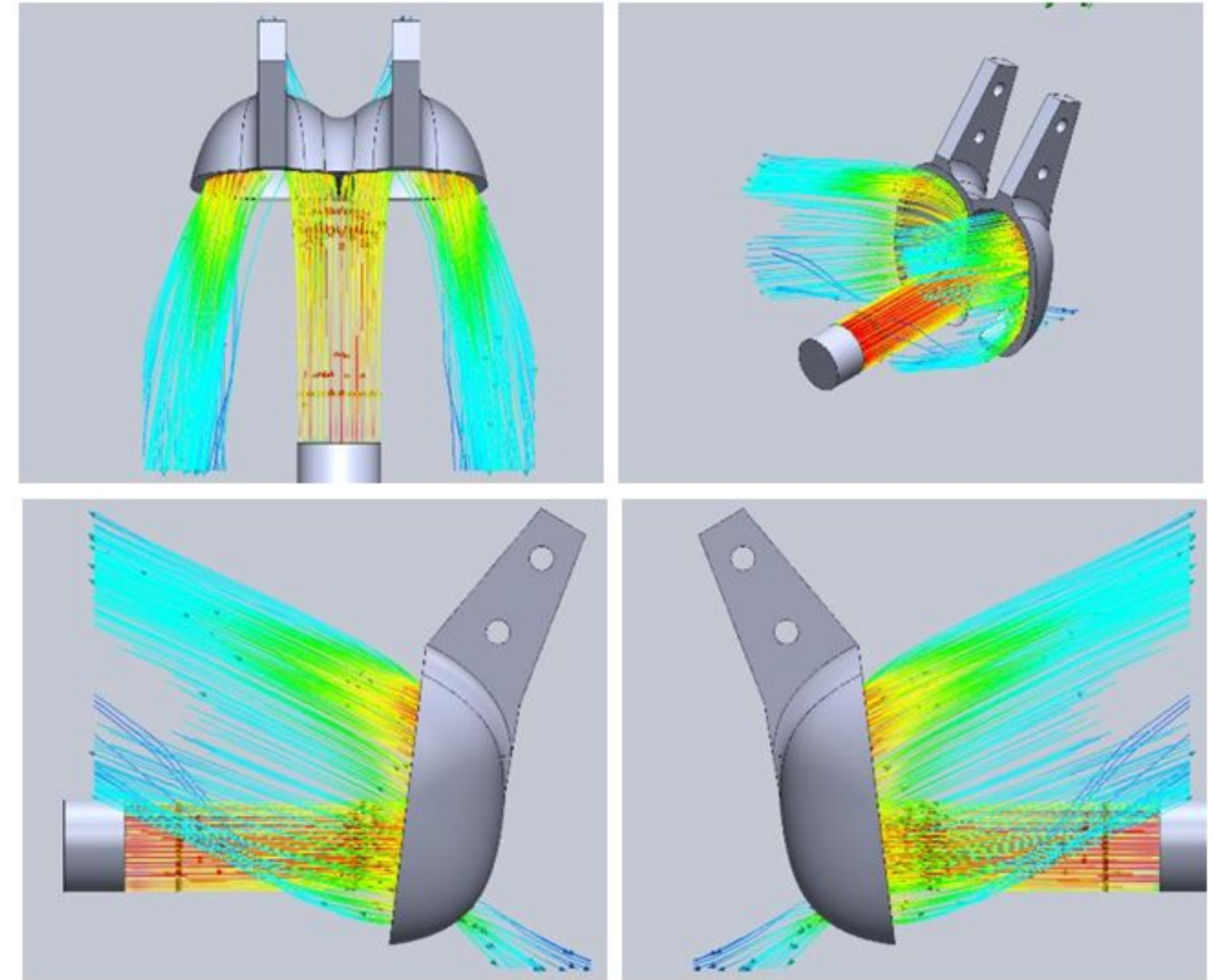
- De la tabla anterior se observa que la cuchara de mayor tamaño es superior a la más pequeña en todos los objetivos calculados.

Comparativa con Teoría Unidimensional

- La teoría unidimensional permite simplificar el problema para calcular la fuerza ejercida por el agua de una manera sencilla.
- Pero sólo es capaz de predecir el valor de la fuerza en el sentido del eje z.
- La teoría predice que el jet de agua ejerce una fuerza en z con la turbina detenida igual a:

$$F_z = \dot{m}c(1 + \cos(\beta_2)) = 1832,9 \text{ N}$$

- Siendo que la simulación arrojó un valor de la fuerza en z de $|F_z| = 1580,6 \text{ N}$



→ Trayectoria del Flujo

Centrales con Turbinas Pelton

**Aprovechamientos
Hidráulicos - 2025**

- 1. CH de Jostedal, Noruega**
- 2. Ch de Chivor, Colombia**
- 3. CH de la Tasajera, Colombia**
- 4. Ch de Bieudron, Suiza**



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Centrales

CH de Jostedal, Noruega

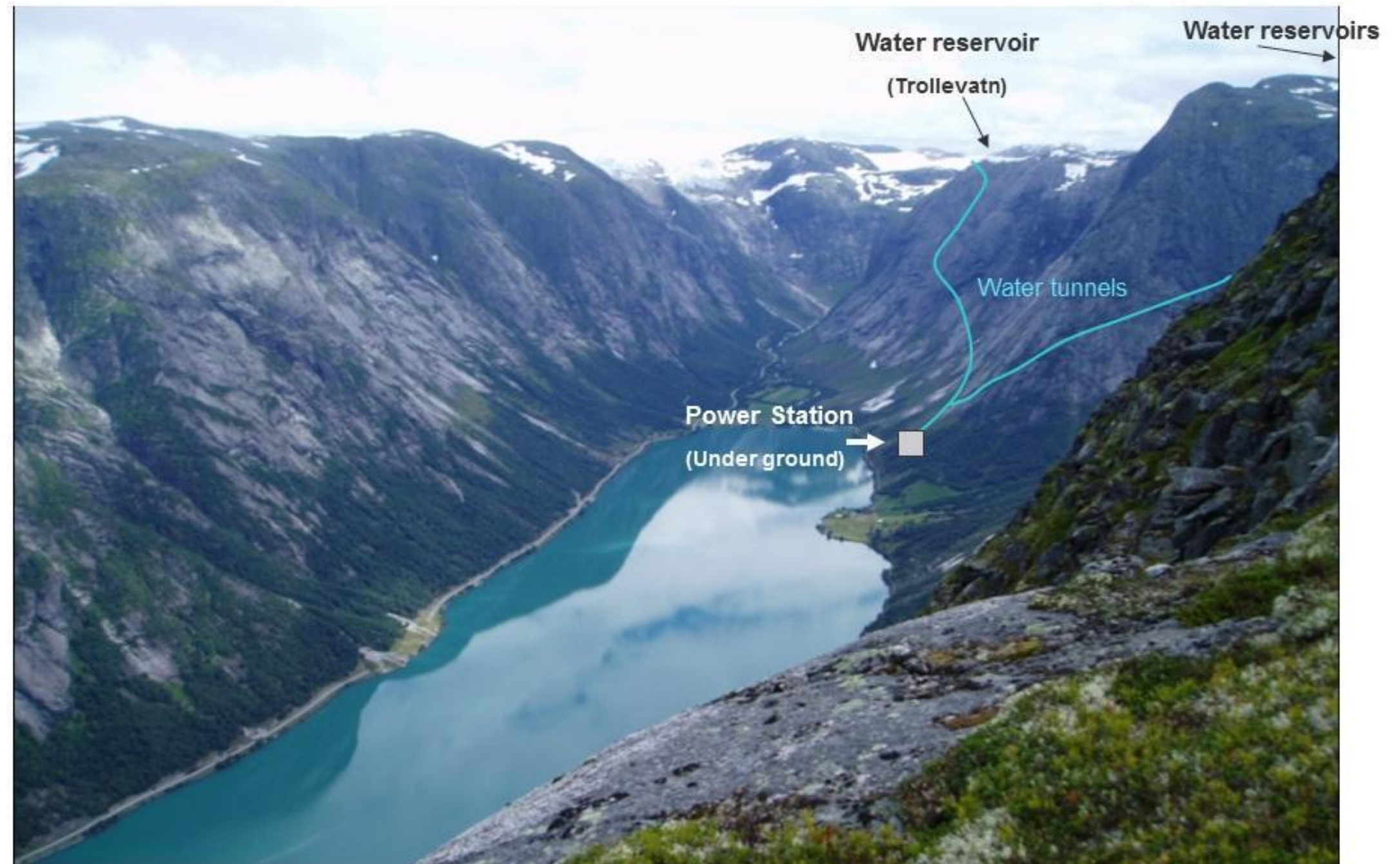
- Potencia instalada: 301 MW
- Unidades: 1 turbina de 288 MW
- Salto bruto máximo: 1163 m
- Caudal por unidad: 28.5 m³/s
- Año de inauguración: 1990



Centrales

CH de Jostedal, Noruega

- Potencia instalada: 301 MW
- Unidades: 1 turbina de 288 MW
- Salto bruto máximo: 1163 m
- Caudal por unidad: 28.5 m³/s
- Año de inauguración: 1990



Centrales

CH La Tasajera, Colombia

- Potencia instalada: 315 MW
- Unidades: 3 turbinas de 105 MW
- Salto bruto máximo: 933 m
- Caudal por unidad: 13.25 m³/s
- Año de inauguración: 1993 (primer unidad)



Centrales

CH La Tasajera, Colombia

- Potencia instalada: 315 MW
- Unidades: 3 turbinas de 105 MW
- Salto bruto máximo: 933 m
- Caudal por unidad: 13.25 m³/s
- Año de inauguración: 1993 (primer unidad)

Erosión depende fundamentalmente del caudal sólido (en suspensión)

Ventaja: fácil de desmontar



Centrales

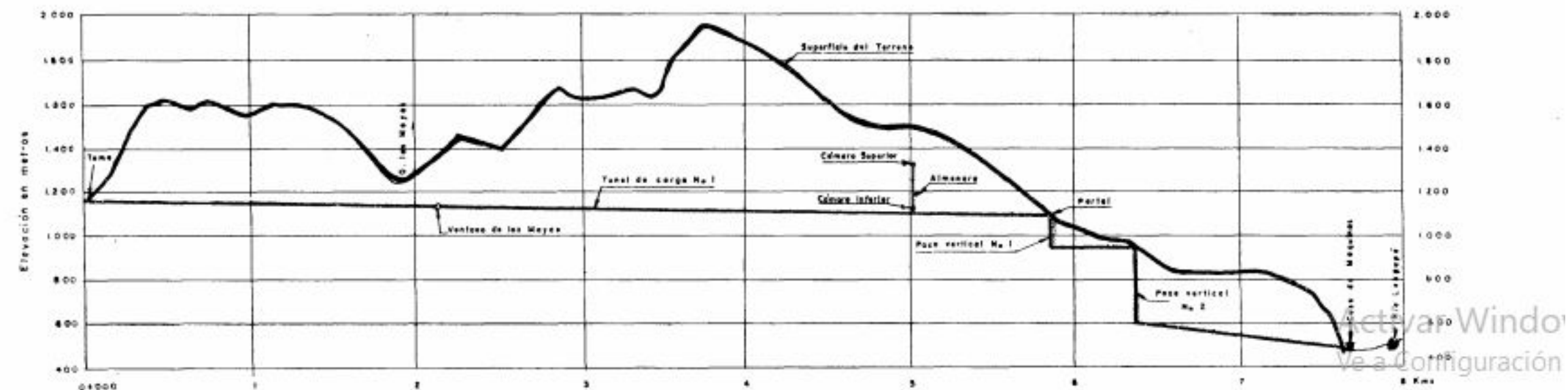
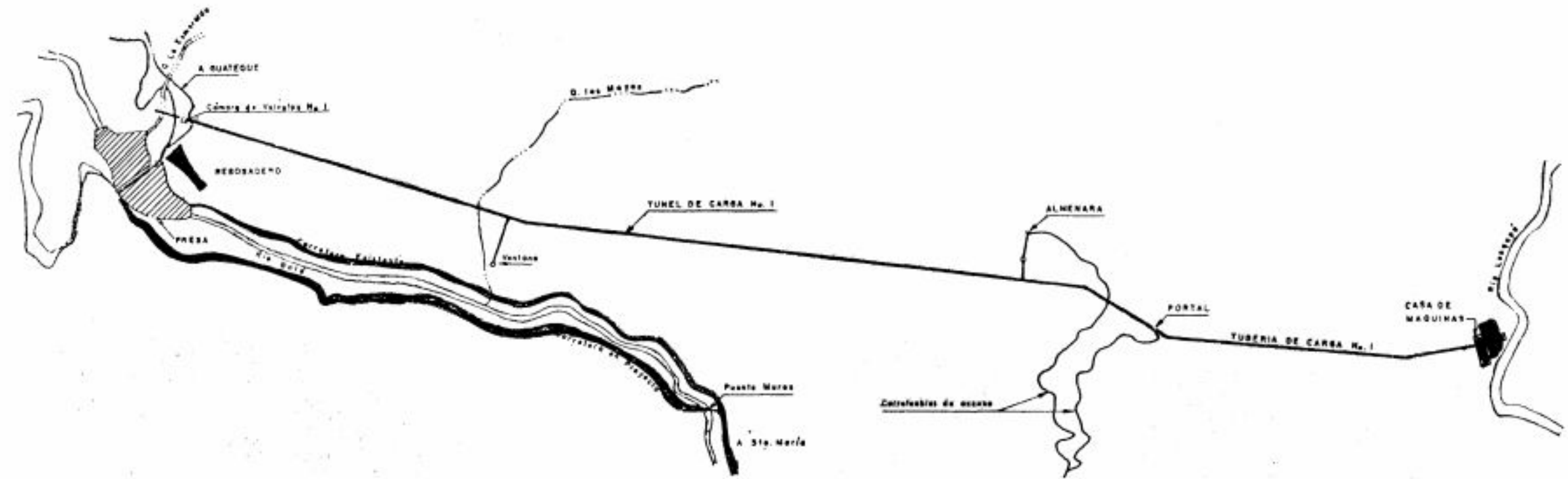
CH de Chivor, Colombia

- Potencia instalada: 1000 MW
- Unidades: 8 turbinas de 125 MW
- Salto bruto promedio: 756 m
- Caudal por unidad: 20.25 m³/s
- Año de inauguración: 1976 (4 unidades)



Centrales

CH de Chivor, Colombia



Centrales

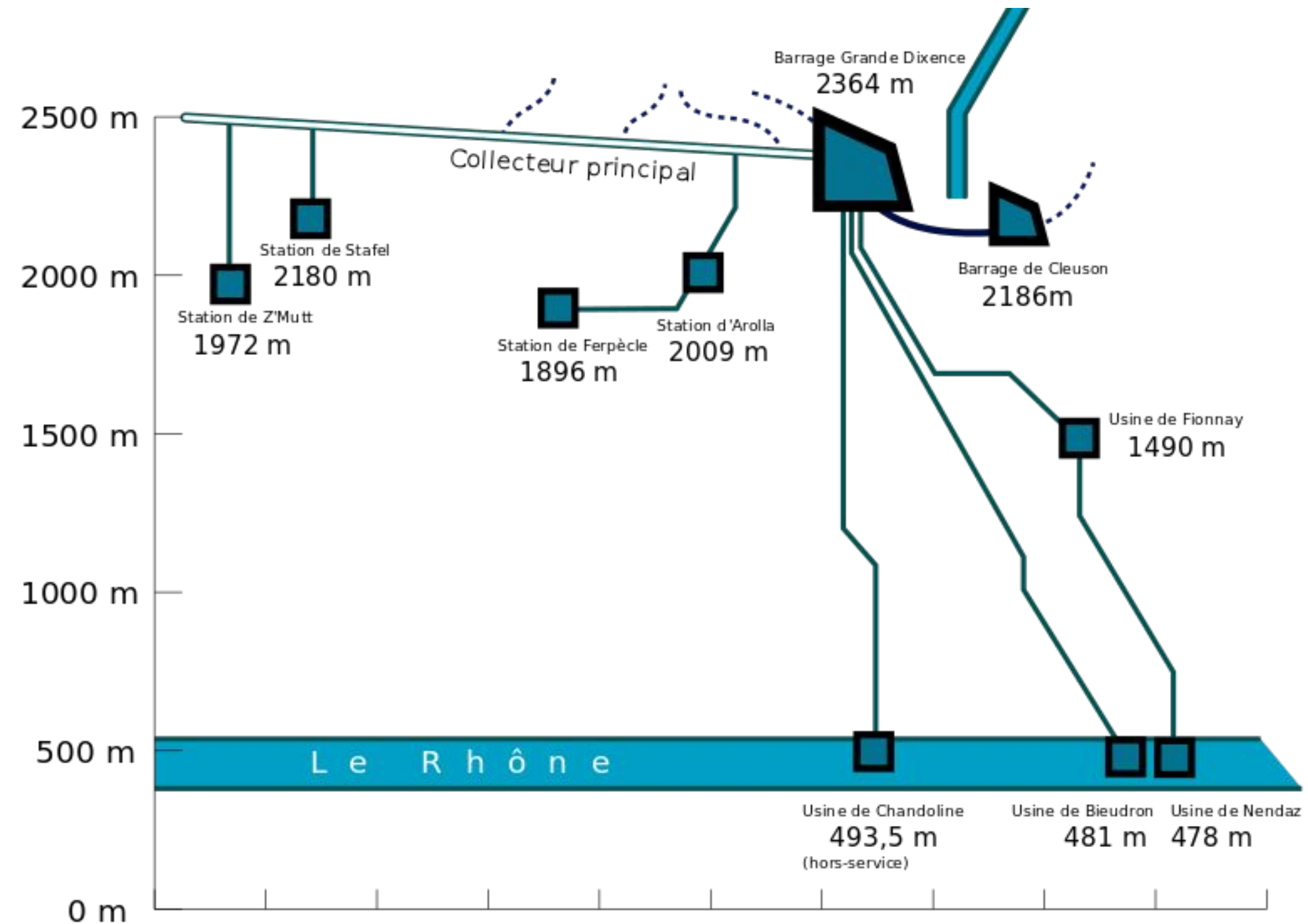
CH del Bieudron, Suiza

- Potencia instalada: 1269 MW
- Unidades: 3 turbinas de 423 MW
- Salto bruto máximo: 1869 m
- Caudal por unidad: 25 m³/s
- Año de inauguración: 1998



Centrales

CH del Bieudron, Suiza



MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Aprovechamientos Hidráulicos - 2025



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**