

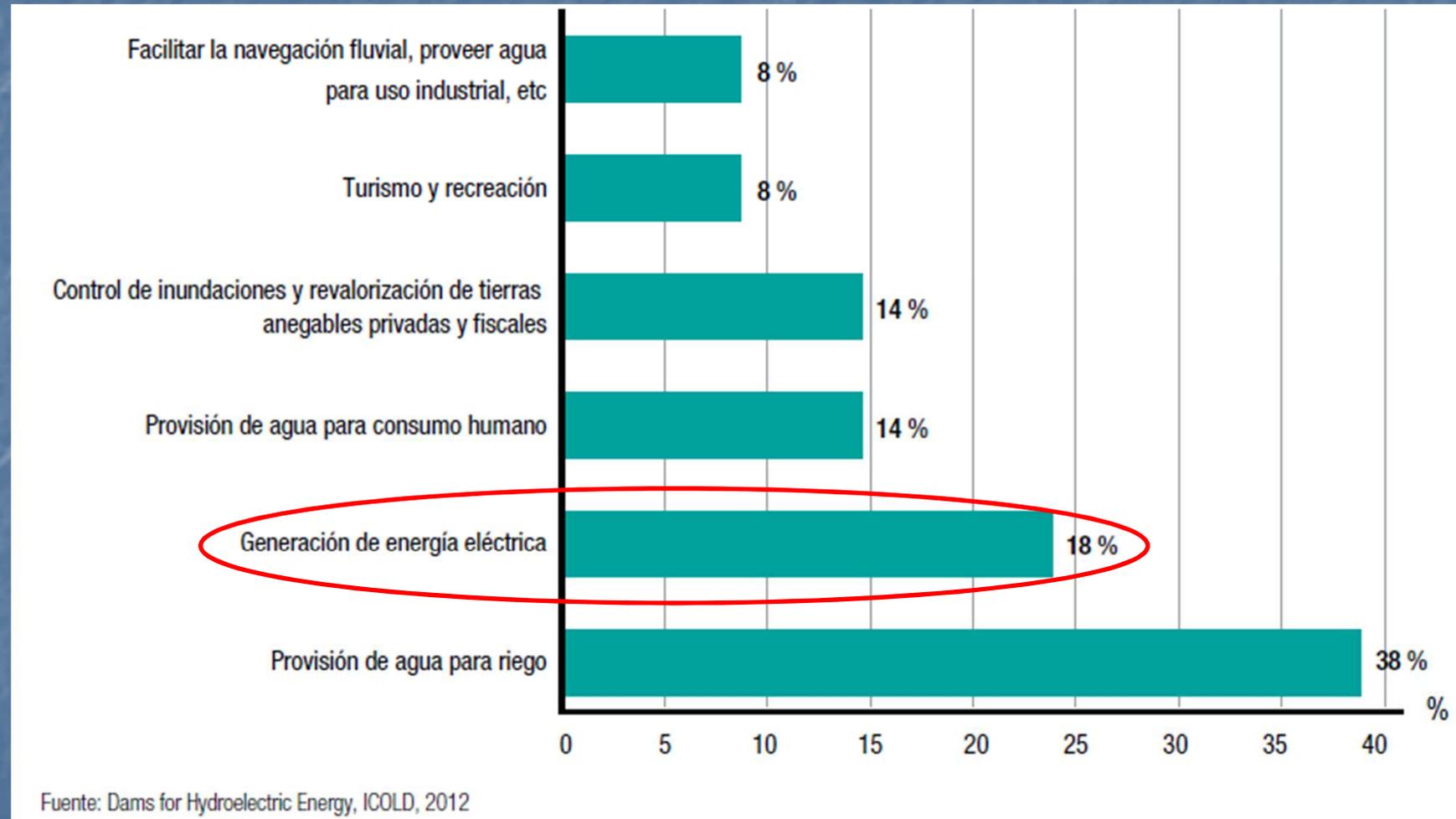
# CENTRALES HIDROELECTRICAS

Benjamin Franklin:

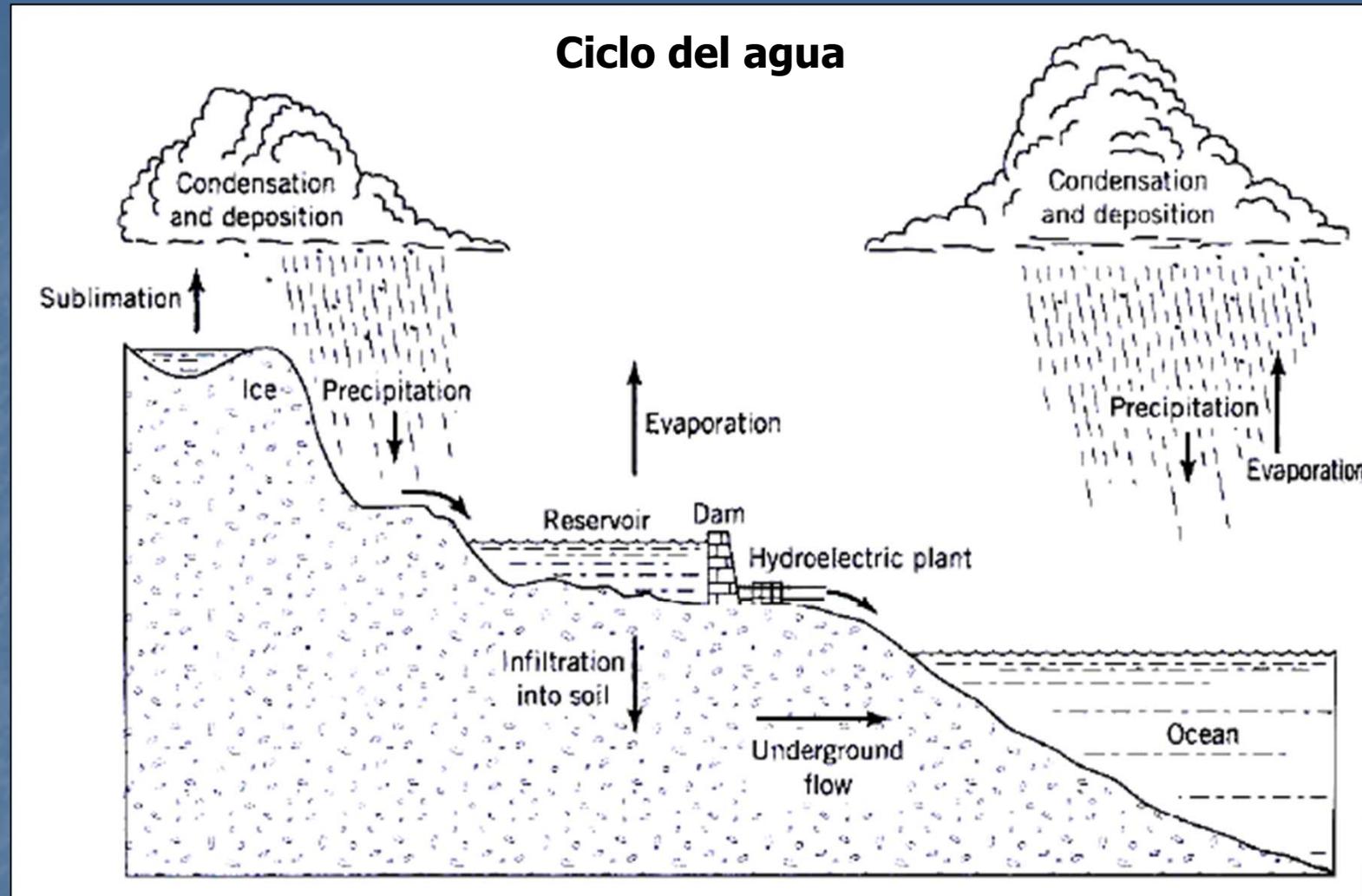
*"Cuando el pozo se seca, entendemos el valor del agua"*

# Introducción

Destino principal de las obras de infraestructura hidráulica a nivel mundial:



## Ciclo del agua



**La fuente original que da lugar a la potencia HE es el sol, que calienta las masas de agua presentes en la Tierra, causando su evaporación. La energía eólica mueve el vapor de agua, que luego vuelve a la tierra en forma de lluvia (o nieve) que corre hacia abajo en forma de arroyos y ríos (energía gravitatoria).**

Jorge A. González-FACET-UNT

**Las centrales hidroeléctricas CH son instalaciones que permiten transformar la energía potencial gravitatoria que posee una masa de agua en virtud de un desnivel (salto), en energía mecánica y energía eléctrica en el grupo turbina-generator.**

$$P = \rho g Q H$$

donde  $\rho$  es la densidad del agua ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ ),  $Q$  es el caudal del agua en  $\text{m}^3/\text{s}$  descargado en las turbinas,  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ) y  $H$  es el salto bruto en metros.

**La P eléctrica que puede obtenerse a la salida del G de una CH es:**

$$P_e [\text{kW}] = 9.8 * Q [\text{m}^3/\text{s}] * H [\text{m}] * \eta_T * \eta_G$$

*Q [m<sup>3</sup>/s] = caudal de agua que pasa por la turbina*

*H [m] = altura del salto neto (salto total descontadas las pérdidas de carga)*

*$\eta_T$  = rendimiento de la turbina (0,8-0,9)*

*$\eta_G$  = rendimiento del generador (0,9-0,95)*

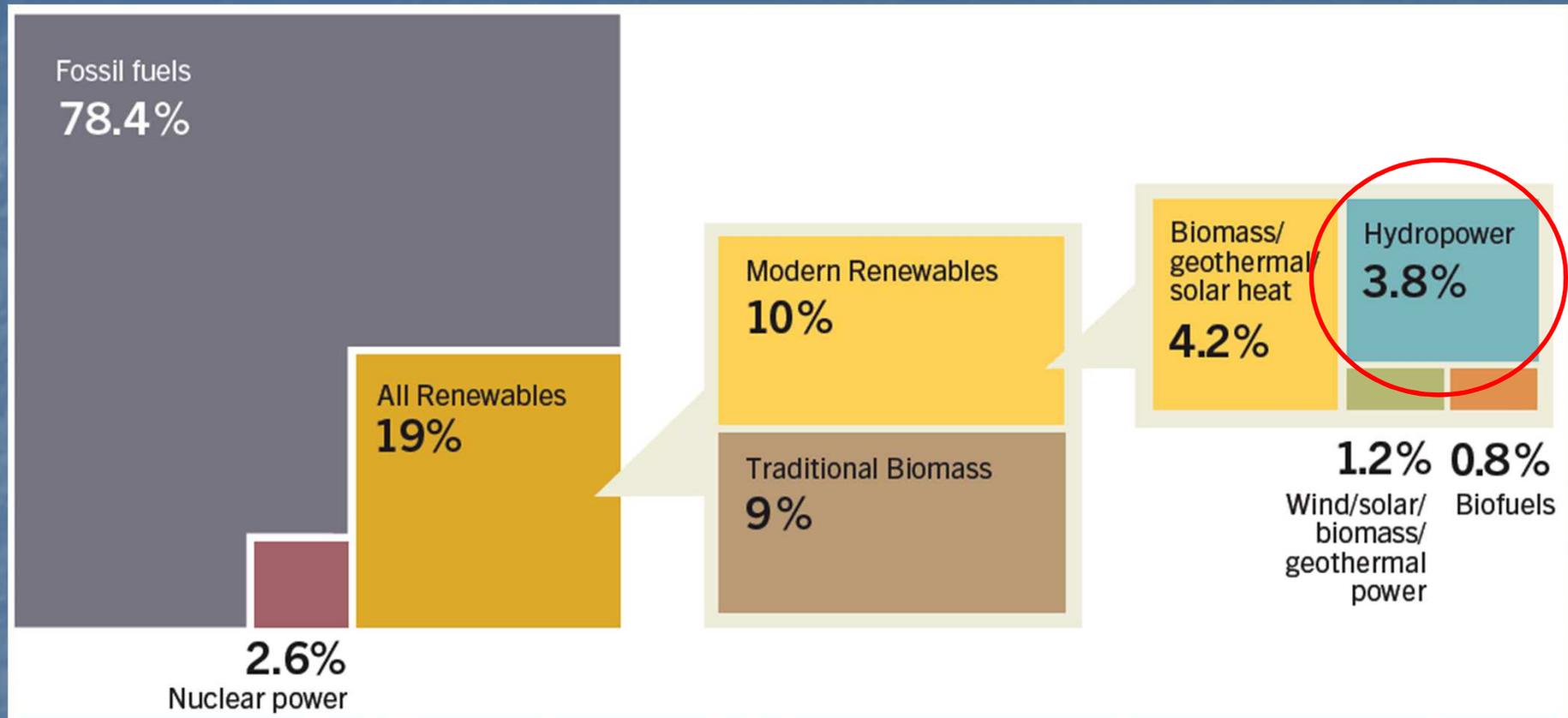
Para estimar la energía generada por una minicentral hidráulica, es preciso conocer el agua disponible a lo largo de un año medio; el estudio pertinente deberá tener en cuenta los siguientes caudales:

- Caudal de servidumbre que corresponde con el caudal ecológico o caudal mínimo necesario para mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial.
- Caudal de equipamiento ( $Q_e$ ), el cual es el seleccionado para que el volumen de turbinado sea máximo.
- Caudal mínimo técnico ( $Q_t$ ), es el proporcional al caudal de equipamiento y dependerá del tipo de turbina seleccionada (10%  $Q_e$  para Pelton, 25%  $Q_e$  para Kaplan y 40%  $Q_e$  para Francis).

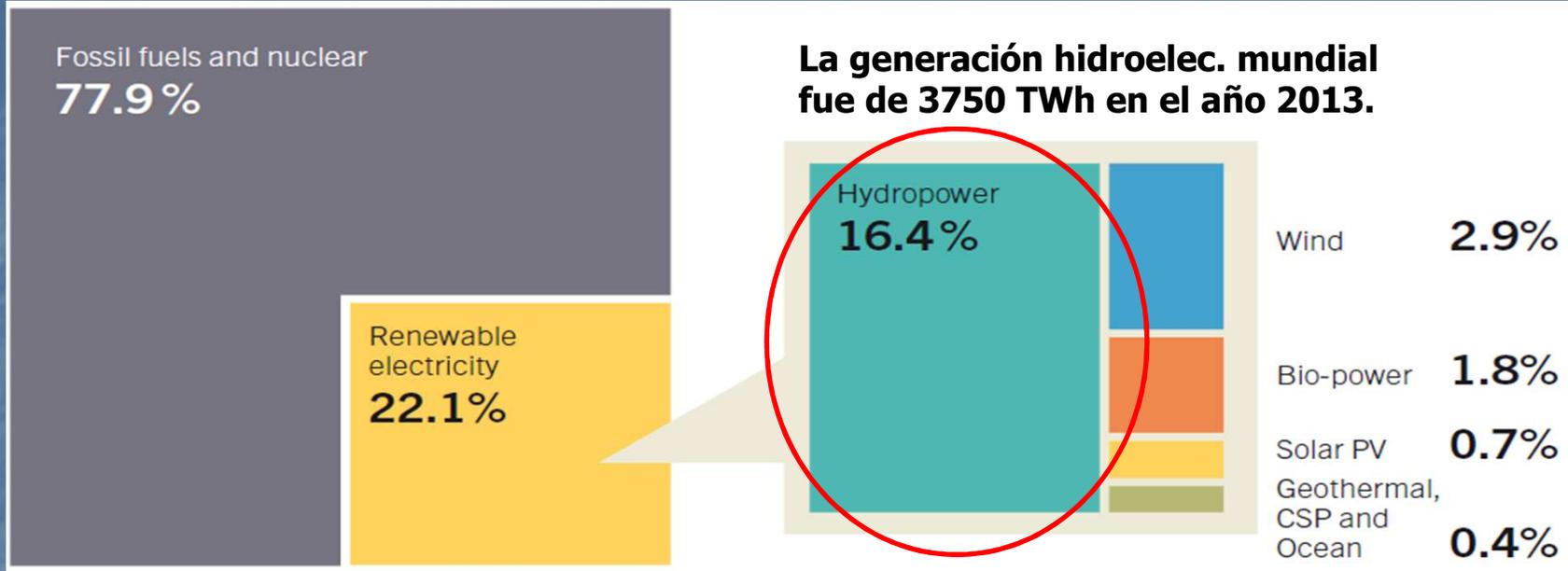
## Notas

- Las CH se construyen desde fines del SXIX, siendo en la actualidad la tecnología renovable más desarrollada y madura.
- La capacidad instalada mundial es de  $\approx 1000$  GW, con una producción hidroeléctrica de 3750 [TWh/año]. Su potencial teórico, aún tomando en cuenta aspectos técnicas, económicos y ambientales, es enorme de 8000 a 10000 [TWh/año].
- Las consideraciones a tener en cuenta en el desarrollo de grandes CH:
  - Gran costo social y ambiental (pérdida de tierras fértiles, desplazamiento de comunidades, generación de metano).
  - Alto costo inicial (en la actual estructura de mercado es difícil encontrar un privado que invierta en este tipo de obra).
  - Inclusión de los costos de la red de transmisión, debido a que la ubicación de CH en general está alejada de la demanda.
- Las pequeñas CH (PCH), si bien presentan un bajo IA, presentan también un alto costo inicial.

# Matriz Energética Mundial de Energía Final Consumida (ref. Ren21, año 2012)



# Matriz Energética Mundial de Generación Eléctrica (ref. Ren21, año 2013)



## Principales países donde están las mayores Potencias Instaladas Hidroeléctricas (Ren21, año 2013)

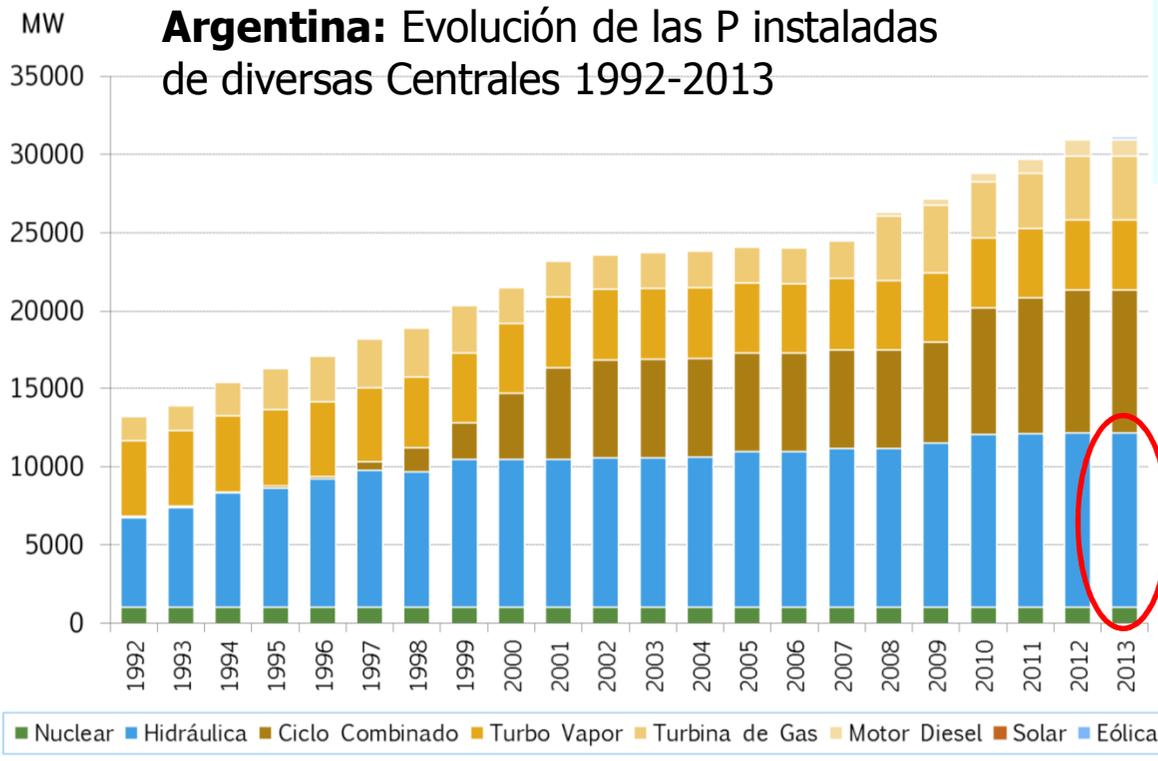


**Potencia instalada mundial , año 2013:**

***P instalada = 990 GW***

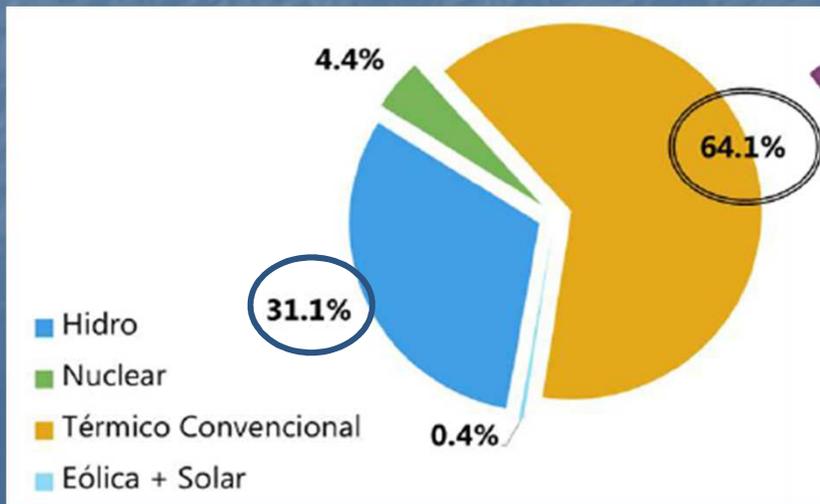
**FC ≈ 30-80 %      LCOE ≈ 2-15 [cU\$S/kWh]**

**Costo de Potencia Instalada ≈ 1100-4000 [U\$S/kW]**



**Potencia eléctrica instalada en Argentina hasta el año 2013:**  
**P instalada = 11 GW**

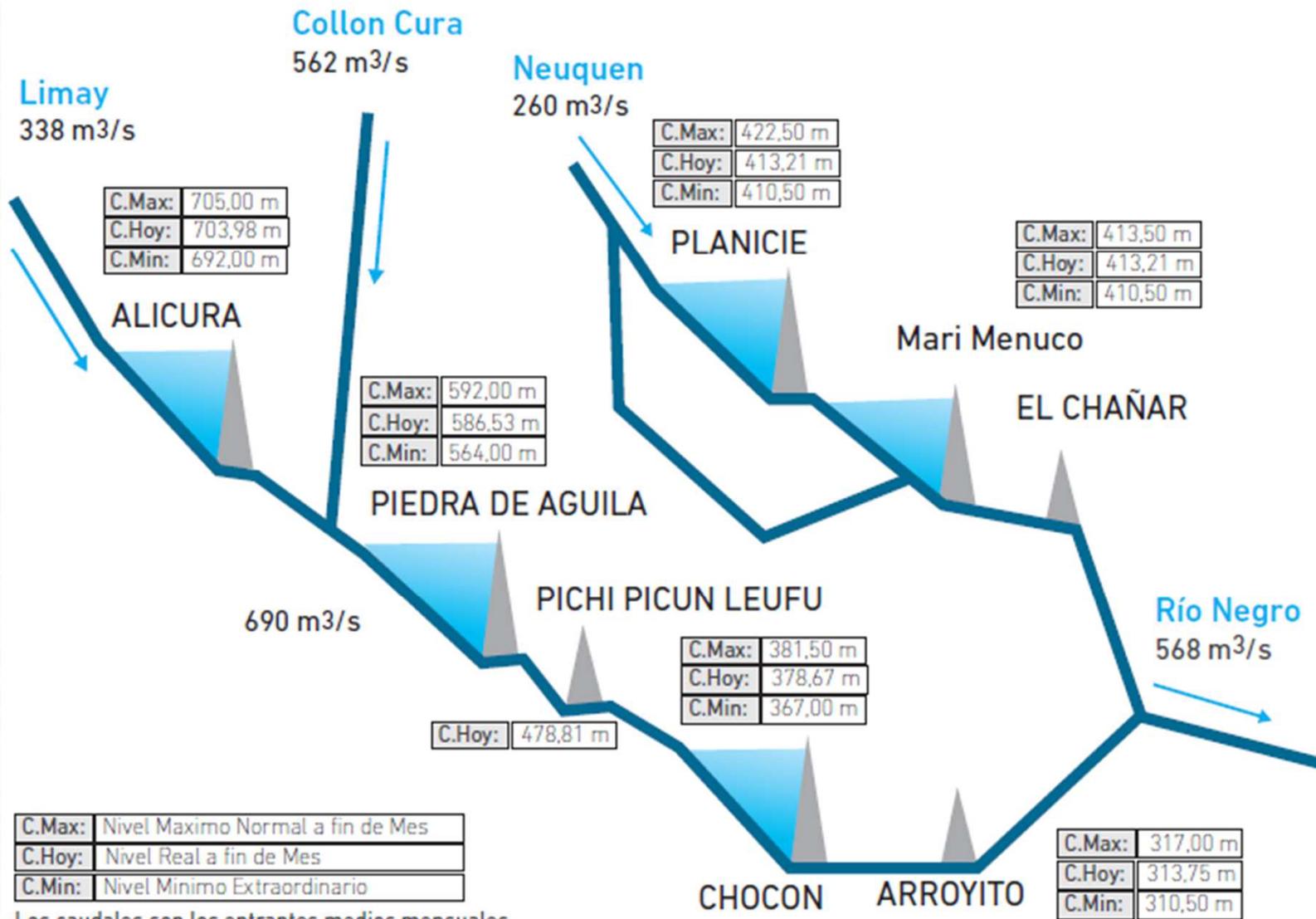
### % de producción de energía por tipo de Central, año 2013



**Energía eléctrica total producida en Argentina en el año 2013:**  
**E eléctrica = 130 TWh**

El costo de instalación medio de CH en Argentina es de 2,25 Millones de US\$/MW

# EMBALSES DEL COMAHUE - COTAS - CAUDALES al 31/08/2013





# Formas que se pueden dividir a las CH

## 1.- Según su régimen de flujo de agua

- Pasada, Embalse, Bombeo

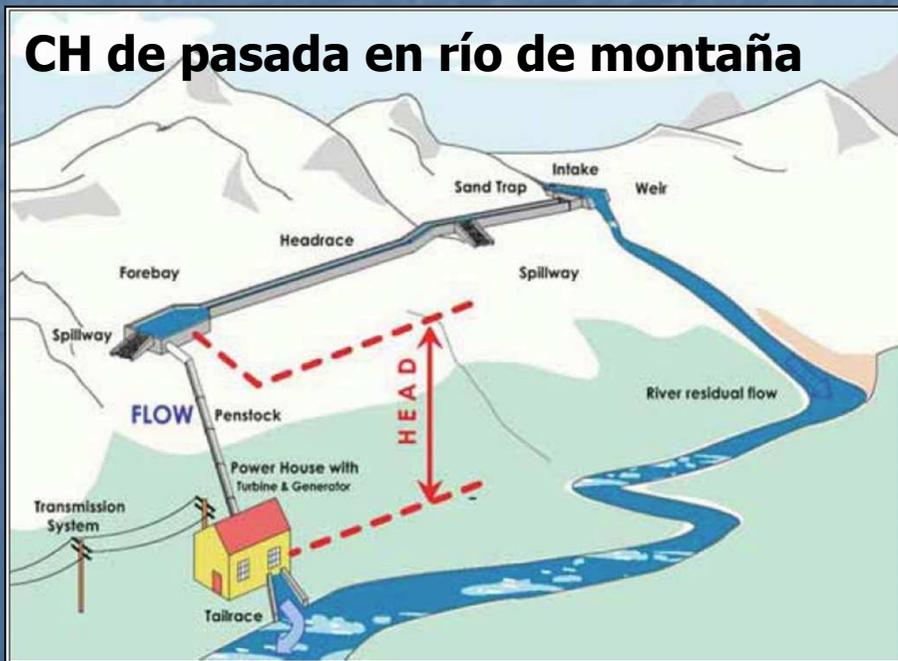
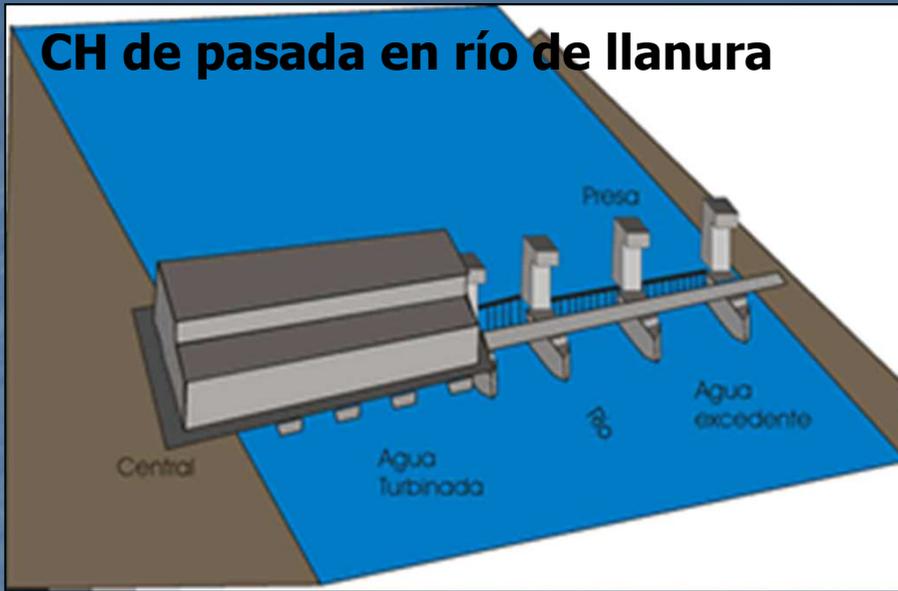
## 2.- Según su capacidad de regulación del agua

- Plurianuales, Estacionales, Mensuales, Semanales, Diarias: Regulan el balance del sistema, pueden arrancar y parar varias veces al día, regulan frecuencia de la red.
- Sin regulación (CH de pasada o agua fluyente): participan en el aporte de potencia pero no en la regulación de frecuencia.

## 3.- Según su altura de caída de agua y caudal

- Gran altura y bajo caudal (Turbina Pelton), media altura y medio caudal (Turbina Francis), baja altura y gran caudal (Turbina Kaplan)

## Central de Pasada (Yaciretá, Salto Grande, Pueblo Viejo)

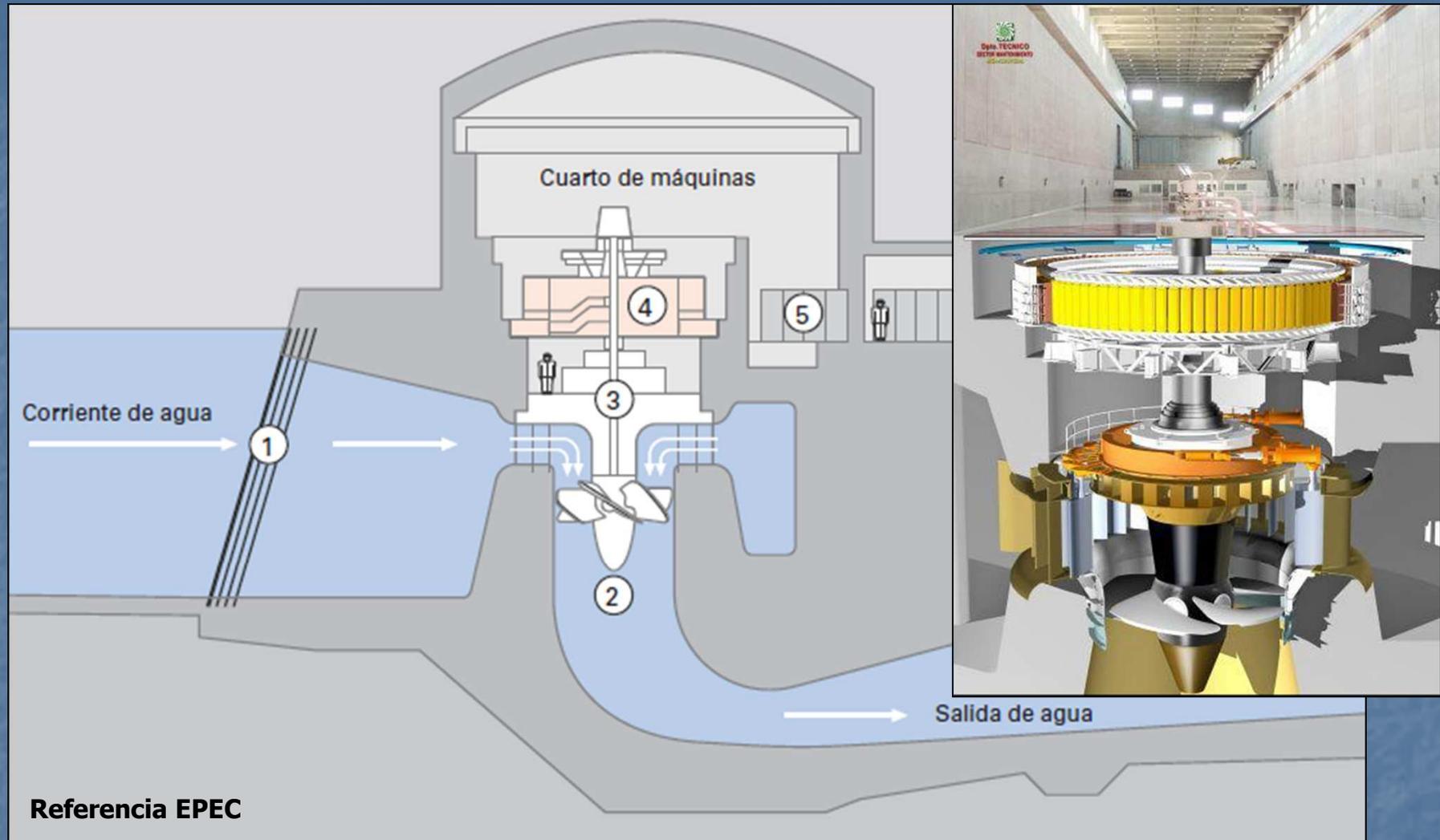


Tiene poca o nula capacidad de almacenar agua y genera energía eléctrica turbinando el agua que fluye en ese momento.

Pueden ser construidas con distintos diseños, por ejemplo formando presa sobre el cauce de los ríos, con el objetivo de mantener un desnivel constante pequeño en el caudal de agua y evitar pérdida por rebose (común en ríos de llanuras) o con canal abierto en derivación (común en ríos de montañas).

El caudal aprovechado varía dependiendo de las estaciones del año.

## Central de Pasada en río de llanura con una pequeña presa



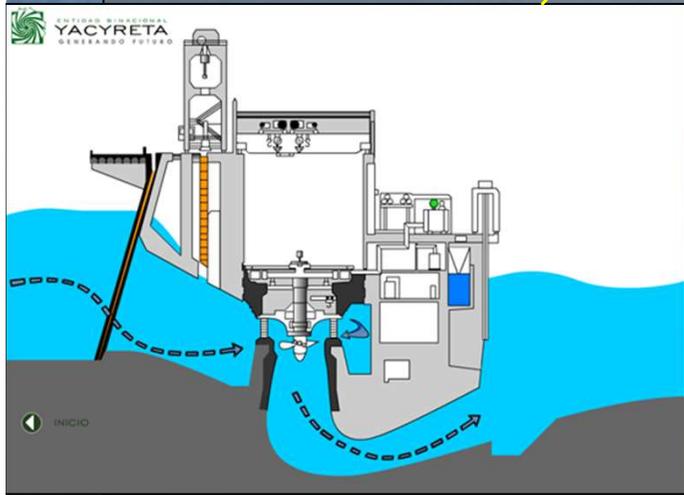
El agua es filtrada por unas rejas (1) para proteger las turbinas (2), las cuales giran al recibir el agua. Esta rotación es transmitida al generador (4) por un eje (3). Un sistema de control se ubica en la sala de control (5).

Jorge A. González-FACET-UNT

# YACIRETA (3200 MW) REPÚBLICA DEL PARAGUAY (MARGEN DERECHA)

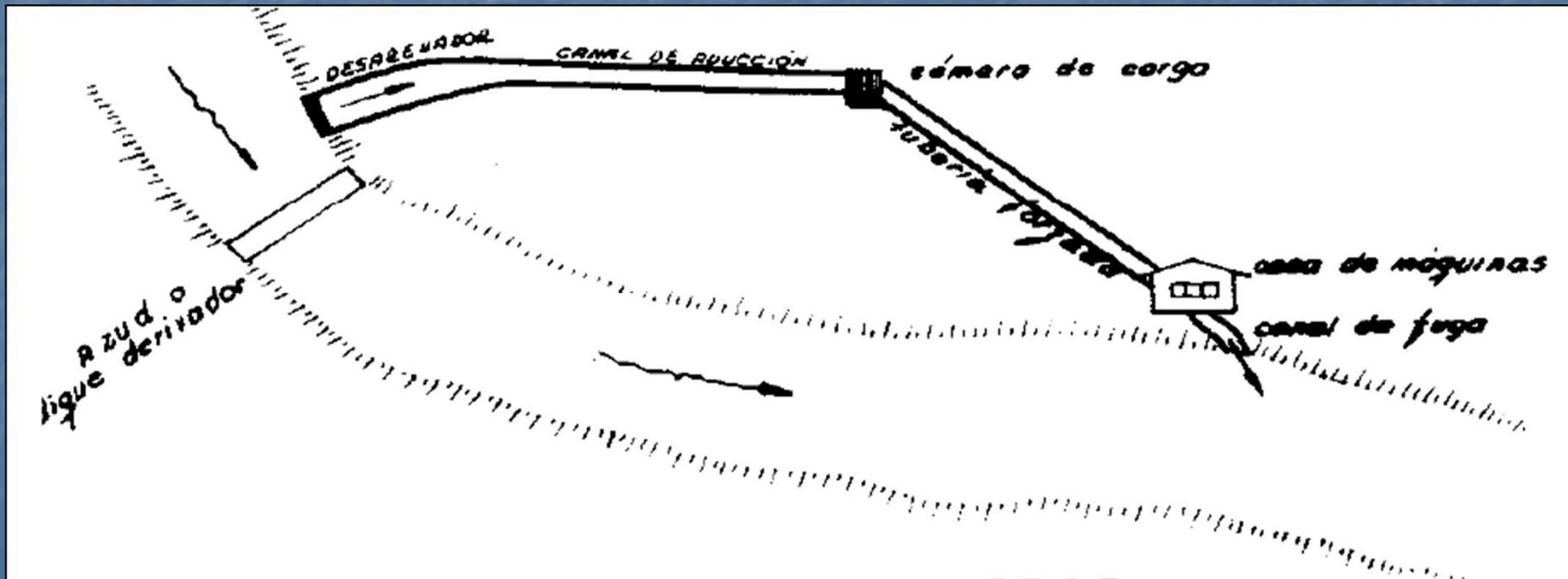
El caudal nominal que pasa por cada turbina es de 794 m<sup>3</sup>/s

20 turbinas tipo Kaplan



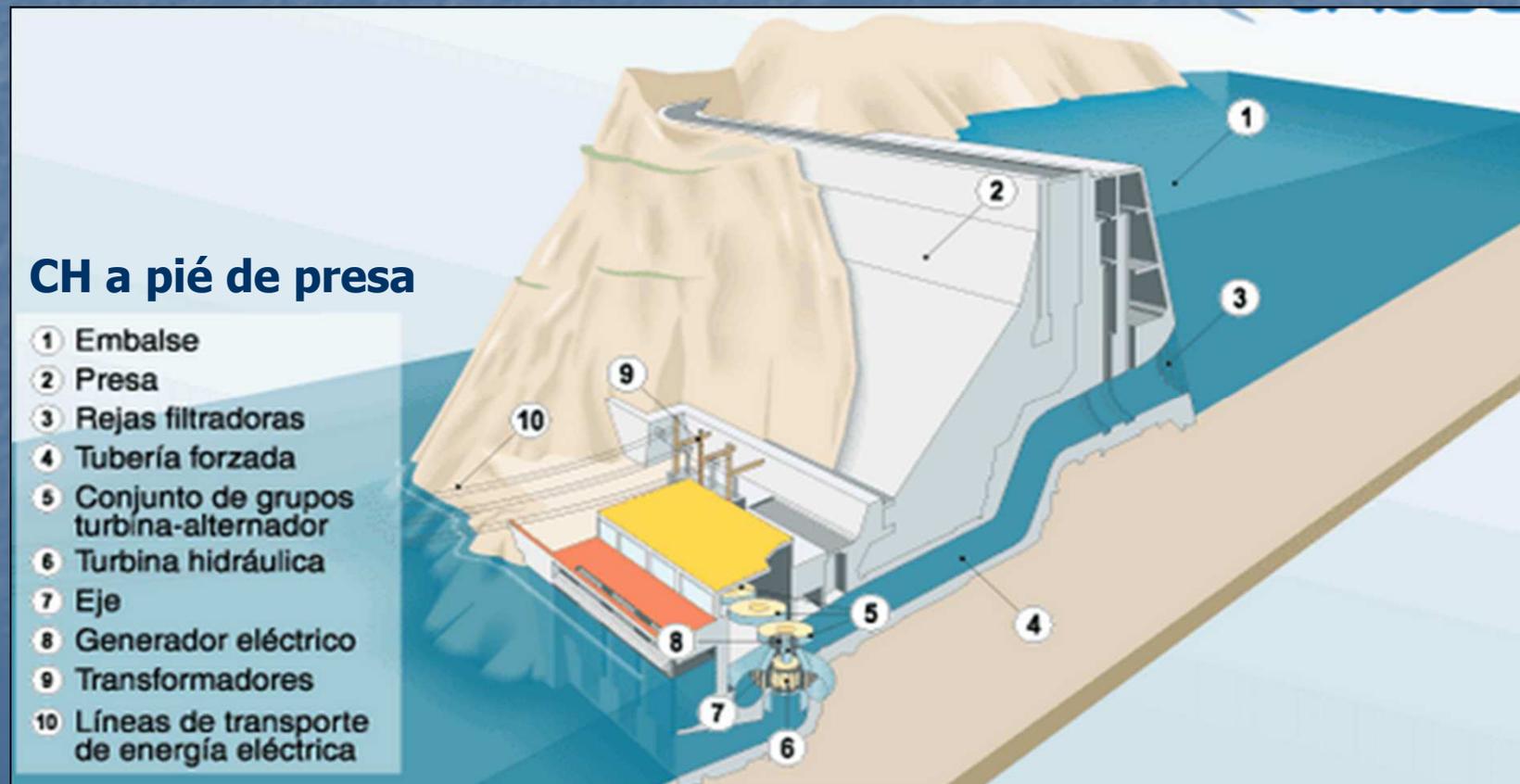
REPÚBLICA ARGENTINA (MARGEN IZQUIERDA)

Existen numerosas PCH de pasada, en las que no se acumula agua sino que solamente se deriva a través de un dique derivador llamado azud. La central se diseña para un cierto caudal: si el del río en un instante es menor, se generará menos potencia; si fuese mayor, el caudal no se puede aprovechar y se pierde. El agua derivada se hace circular por cámaras desarenadoras y por un canal de aducción, a efectos de ganar altura respecto del río. Llega a una cámara de carga o depósito y de allí se encausa en las tuberías forzadas, las que a través de distribuidores alimentan a las turbinas hidráulicas. El agua turbinada luego es restituida al río.



## Central con Embalse

Tiene capacidad de almacenar agua y de esta manera se puede desacoplar el flujo de agua que trae el río, de la generación eléctrica. La capacidad de regulación del embalse puede ser baja o alta, dependiendo de las características del sitio y de los costos. La casa de máquinas se puede encontrar a pié de presa o a una cierta distancia de ésta con el fin de ganar salto. En este último caso se debe derivar (conducir) el agua por medio de canales y/o tuberías.



# CH Itaipú (14000 MW)

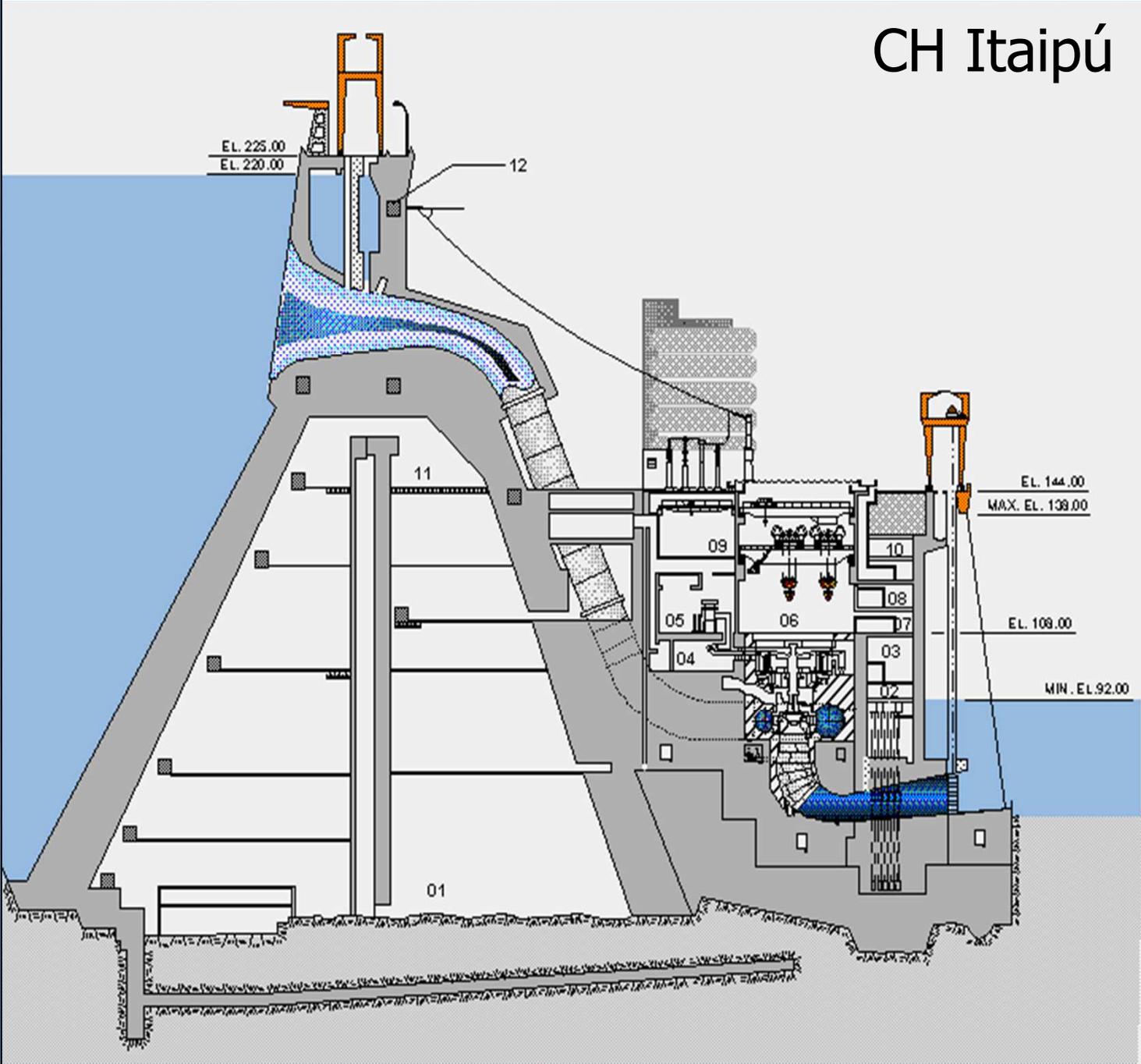


**Casa de Máquinas**  
(20 turbinas Francis)

**Vertedero de ladera**  
(tiene 3 secciones con compuertas)

El caudal nominal que pasa por cada turbina es de  $690 \text{ m}^3/\text{s}$

# CH Itaipú



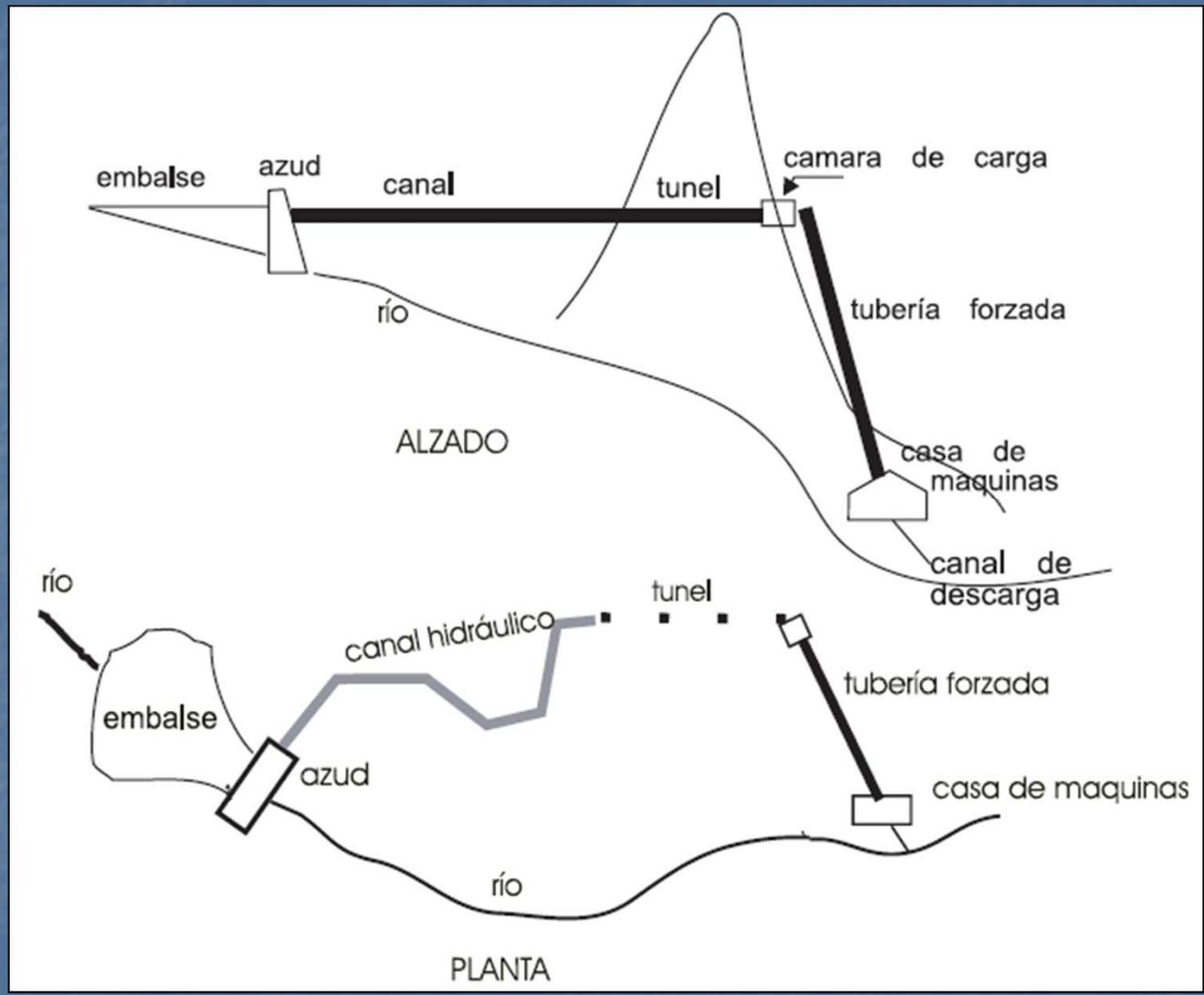
## Central con Embalse, con agua en derivación (p.e. El Cadillal, Escaba)



## CH Escaba (24 MW)



Central Hidráulica Escaba: ubicación geográfica Batirua – Ciudad Alberdi- Tucumán  
3x8 MW, turbinas Francis  
Salto de diseño 122 m



Jorge A. González-FACET-UNT

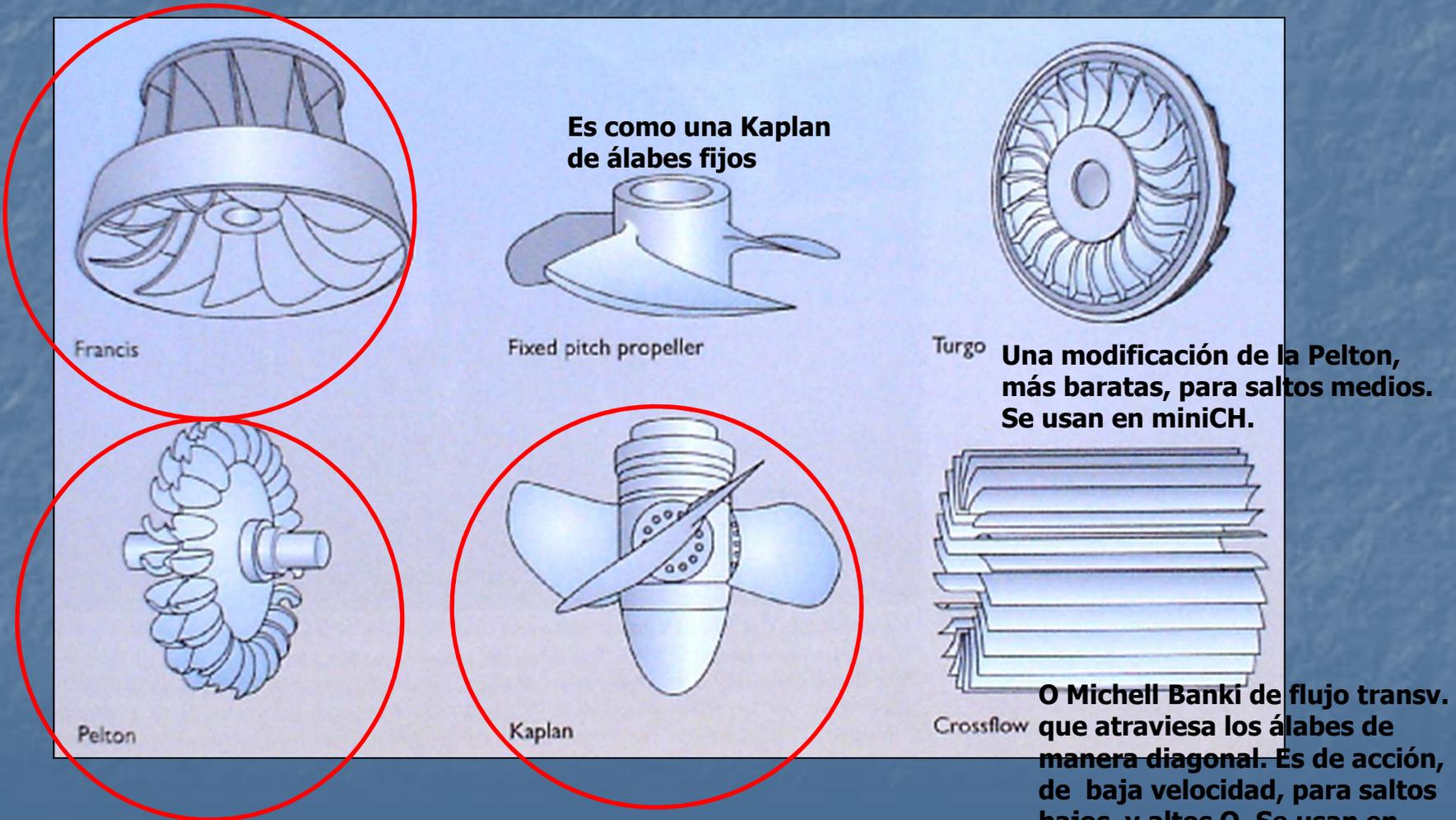
## Central de Bombeo (Río Grande-Córdoba)

Tipo especial de CH que tiene dos embalses. El agua almacenada en el embalse inferior se bombea durante las horas de menor demanda eléctrica al embalse superior (se consume energía eléctrica de la red a precio bajo). Luego esta agua se deja caer al embalse inferior pasando por las turbinas y generando electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico (se suministra energía eléctrica a la red a precio alto).



# TURBINAS HIDRAULICAS

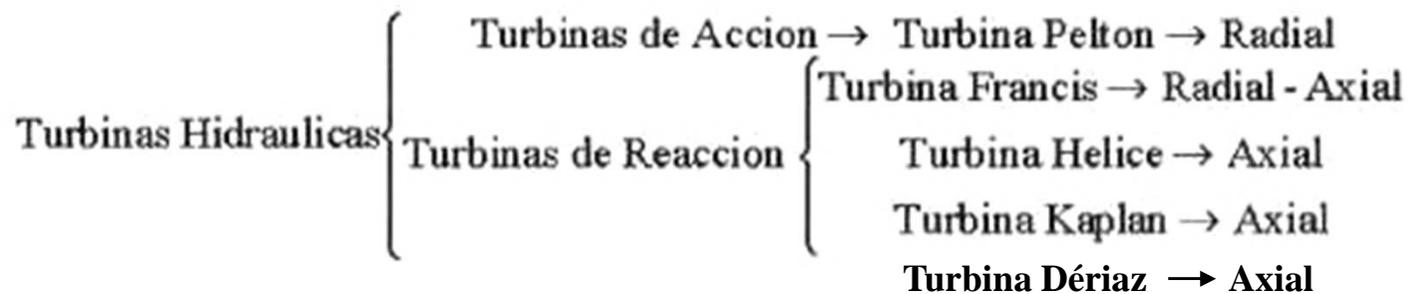
El agua es retenida (CH con embalse), controlada y encauzada hacia las turbinas hidráulicas, donde transforma su energía cinética (turbina de acción) y de presión (turbina de reacción) en energía mecánica.



## Clasificación de Turbinas

Como se observa, las turbinas hidráulicas (TH) tienen formas constructivas muy variadas, para adaptarse a las distintas características de altura y caudal de los saltos de agua que se han de aprovechar.

Se pueden dividir a las TH como "**turbinas de acción y turbinas de reacción**" según su principio de funcionamiento. Por lo general, las turbinas de acción se emplean para grandes saltos de agua y pequeño caudal y las turbinas de reacción se utilizan para saltos y caudales medios y, también, para saltos de gran caudal y poca altura.



También se pueden dividir en "**turbinas radiales**" si el agua choca radialmente sobre el rodete de la turbina, "**turbinas axiales**", si el agua choca siguiendo la dirección del eje de la turbina y "**turbinas radiales-axiales**", si la entrada el agua se efectúa radialmente y la salida se realiza en la dirección del eje. Además hay "**turbinas de eje horizontal y turbinas de eje vertical**".

**Turbinas de acción:** turbinas en que la energía hidráulica se transforma en energía cinética mediante un flujo de agua a alta velocidad que, a presión atmosférica, choca con los álabes del rodete. Ello equivale a decir que la presión del agua a la salida del difusor es la misma que la existente a la salida del rodete y en donde la carcasa que la envuelve no debe soportar mucha presión, pero si evitar salpicadura de agua y accidentes. La TH Pelton, Michell Banki, Turgo pertenecen a este tipo.

**Turbinas de reacción:** turbinas en que la energía hidráulica se aprovecha como energía cinética y también como presión. A diferencia de las turbinas de acción, la carcasa juega un papel importante en su funcionamiento, ya que regula la entrada de agua al distribuidor. En este tipo de turbina, la presión del agua a la entrada del rodete, es distinta que a la de salida del mismo. Las turbinas de la presente clasificación se dividen en dos tipos: la Francis y la de hélice (tipo Kaplan)

**Turbina Pelton:** Pertenece al tipo de turbina de acción, de admisión parcial y tiene la particularidad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido, no existe grandes presiones o caídas entre la entrada y salida de la máquina, el grado de reacción es cero. Esta turbina lleva el nombre de su inventor que la patentó en 1880. Contaba de una paleta con un partidor en el centro, pues antiguamente eran simples "tazones". Es una rueda con álabes en forma de doble cuchara con una arista en la parte central, lo que facilita que el chorro líquido salga en la misma dirección que el entrante pero en sentido contrario, el agua recorre un ángulo de  $180^\circ$ , el nivel del líquido aguas abajo se encuentra a un nivel de 2[m] con respecto a el rodete, esta turbina se usan para saltos grandes.

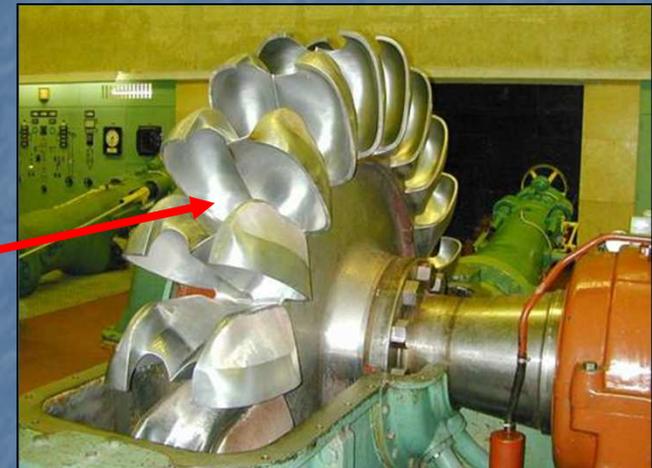
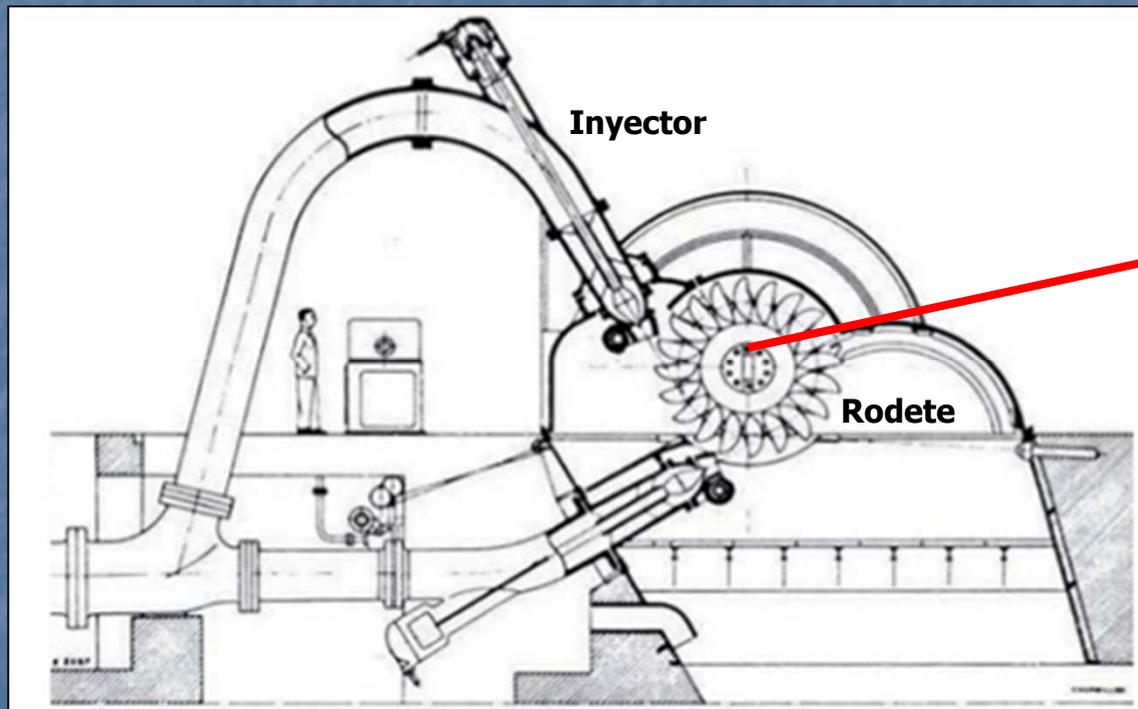
Por lo general son de eje horizontal, (ver Fig. n°15) el rendimiento es del orden del 90% y opera con bastante buen rendimiento para cargas parciales, el número específico de revoluciones es bajo  $n_s = 10-60$ . Esta constituida por una rueda en cuya periferia lleva los álabes en forma de doble cuchara con una arista central aguda y cuenta de uno a cuatro inyectores que terminan en una boquilla, con una aguja de cierre que maneja la salida del "chorro de agua" dirigido tangencialmente a la rueda incidiendo sobre la arista central dividiéndose en dos partes que se repliegan casi a  $180^\circ$ , escurriendo en los dos receptáculos laterales.

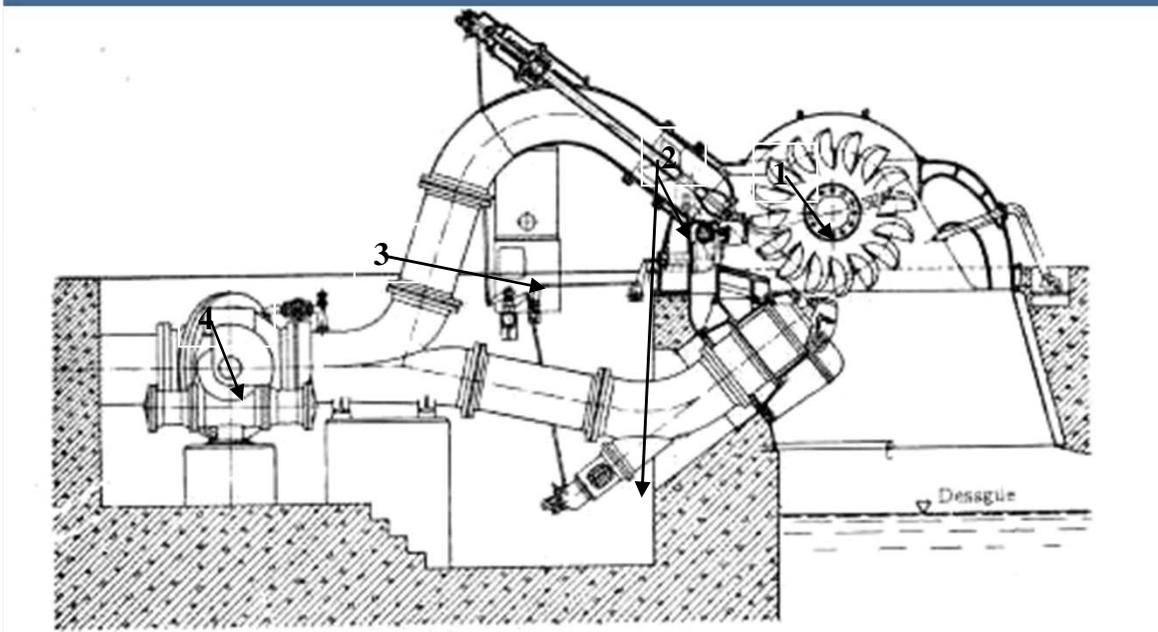
# TURBINAS DE ACCION

Jorge A. González-FACET-UNT

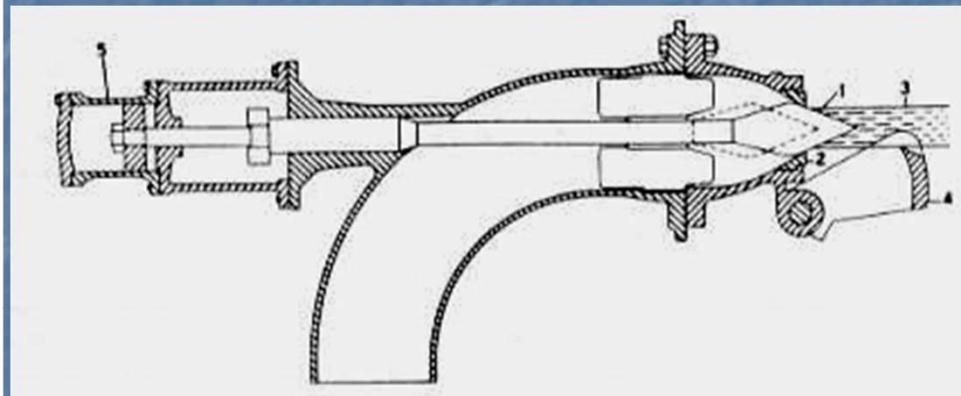
## Turbina Pelton (turbina de acción):

En general se utiliza para caudales pequeños y grandes saltos (150-1500 m). Aprovecha la energía cinética del agua que sale de los inyectores para "golpear" tangencialmente las paletas del rodete en forma de cucharas, convirtiéndola en energía mecánica. Se puede regular el "chorro" de agua por medio de una aguja de cierre situada en el interior del inyector.





T.H.Pelton (acción con dos inyectoros). 1– Rodete; 2 – Eyectores; 3 –Regulador velocidad; 4 – Válvula de turbina



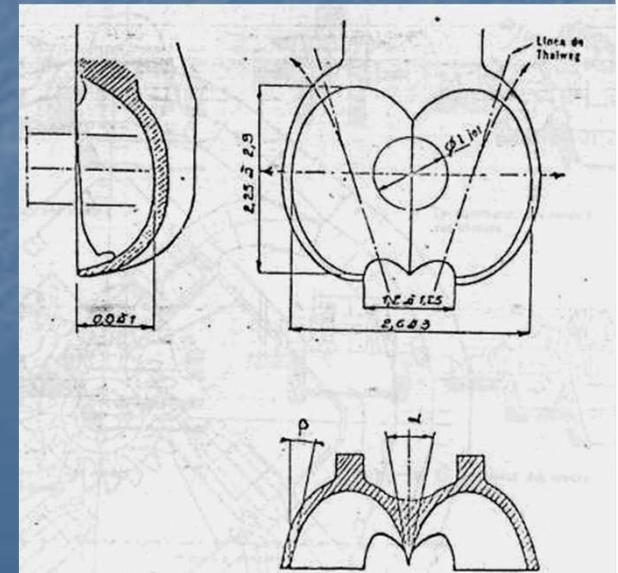
Vista de corte de un inyector. 1 –Aguja; 2 –Anillo de cierre; 3 –Sección del chorro; 4 –Deflector, cambia la dirección del chorro

El objeto de los inyectoros es transformar la energía potencial de presión del agua en energía cinética, con una boquilla cónica que operada por el regulador de velocidad de la turbina, permite graduar la velocidad hasta que los filetes del chorro sean paralelos.

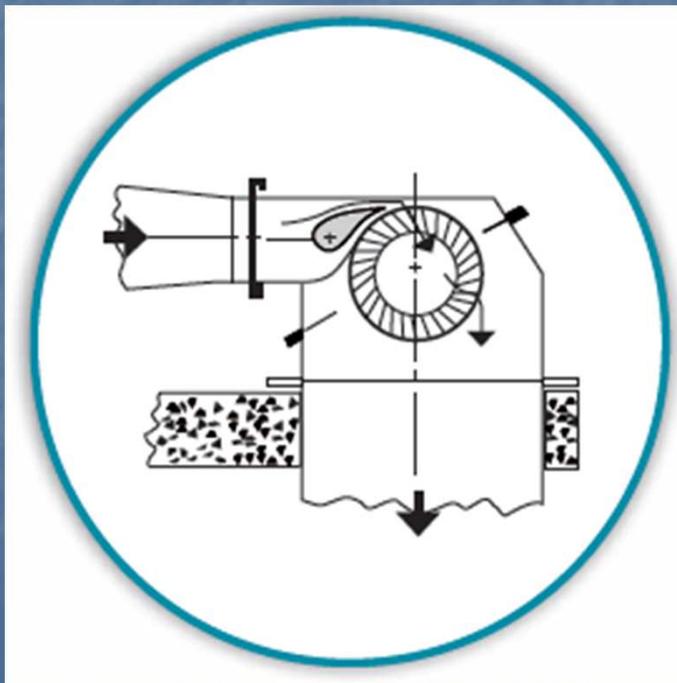
El “deflector”, su función es desviar el chorro para evitar la sobrevelocidad de la máquina, hasta que actúe el regulador cerrando la aguja de la boquilla, con el fin de disminuir el caudal de agua. El “deflector” también es operado por el regulador de velocidad.

Los álabes pueden ser desmontables de la rueda o fundidos en una sola pieza con la rueda

### Vista de los álabes de un rodete Pelton



**TH de flujo cruzado (cross-flow):** también conocida como de corriente transversal o Michell- Banki. Puede ser usada para situaciones con un espectro de alturas de caída del agua muy grande (desde 0 hasta 140 m. aproximadamente). En estas turbinas el agua entra por el distribuidor, ubicado en la parte superior del rodete, y atraviesa por los álabes superiores casi sin ejercer presión hasta que llega a los álabes inferiores los que mueve produciendo el giro del rodete. Debido al cambio de dirección ocasionado por el diseño, este tipo de turbinas poseen un menor rendimiento nominal pero la simplicidad de su construcción las hace más baratas.



Jorge A. Gonzalez-FACE I-UNT

## TH de Flujo Cruzado

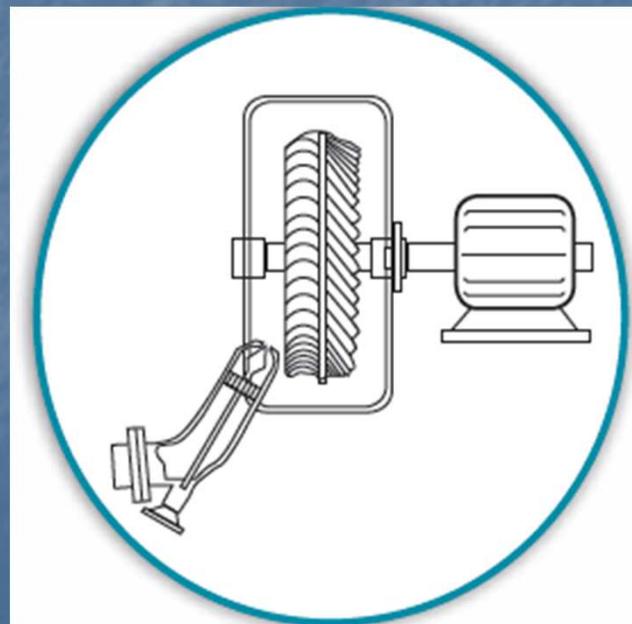
En referencia a las distintas turbinas que existen en el mundo destinadas a pequeñas centrales hidráulicas, además de las clásicas Pelton, Francis y Kaplan (que se usan también en centrales de gran potencia), se destaca la turbina de flujo transversal o turbina de flujo cruzado (turbina Mitchell-Banki).

En esta turbina el fluido atraviesa los álabes de forma diagonal, pasando el agua dos veces por su rodete: 1) del inyector hacia el interior del rodete, 2) del interior del rodete hacia el canal de descarga (solo 1/3 del trabajo se efectúa en la segunda pasada).

Es una máquina de acción (como la Pelton) apta para trabajar en un aprovechamiento de hasta unos 2000 kW. La turbina es de baja velocidad, apta para bajas alturas y elevados caudales, de muy buena regulación, bajo nivel de mantenimiento y de costo reducido gracias a su simplicidad constructiva.

Todo esto la hace apropiada para centrales de pequeño tamaño. Una de las desventajas que tiene frente a las turbinas clásicas es su menor rendimiento

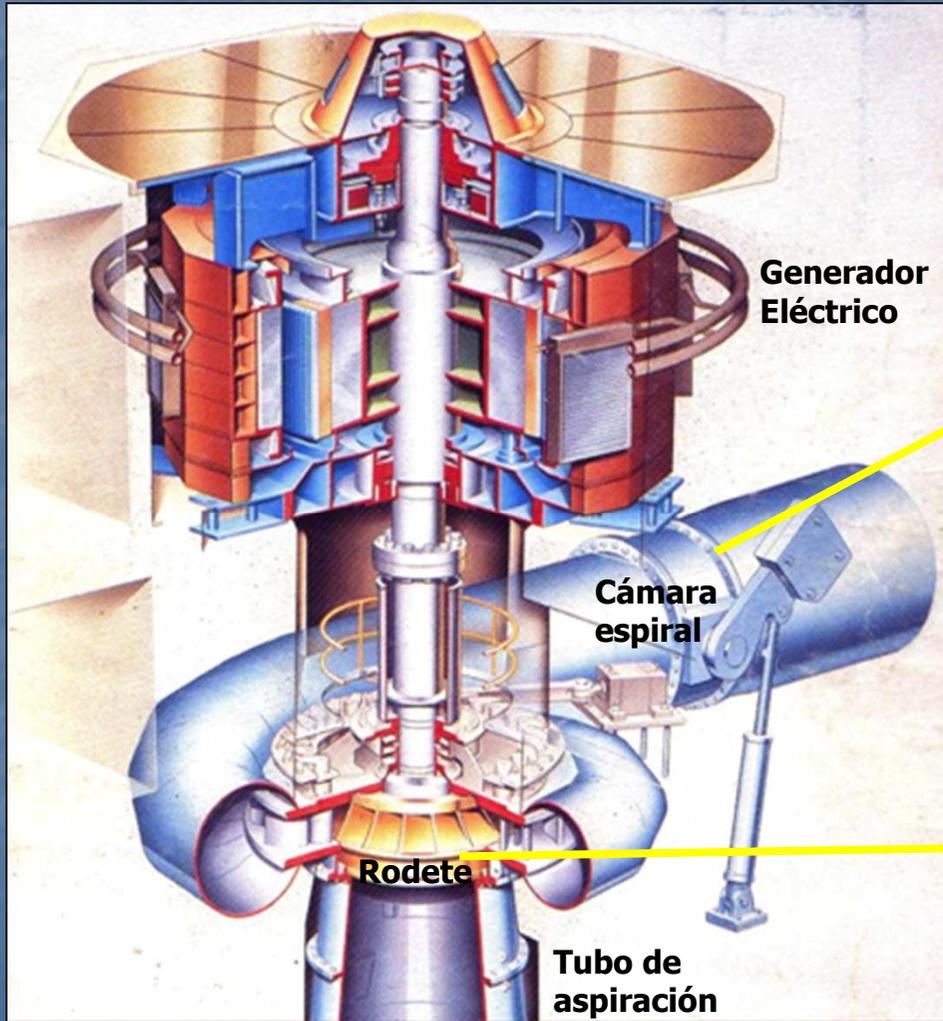
**Turgo:** Este tipo de turbinas se diferencia de las Pelton por dos aspectos principales. El primero de ellos está relacionado con la posición de la tobera y la llegada del flujo de agua a los álabes. En una turbina Turgo, el flujo incide en varios álabes al mismo tiempo debido a la posición de diseño de la tobera. El segundo aspecto es el que se refiere al diseño de los álabes, puesto que éstos son distintos a los de las turbinas Pelton. Una característica singular de este tipo de turbina es que permite aprovechar alturas de caída relativamente bajas (no cubiertas por las Pelton) y puede ser una buena alternativa a la Francis si el caudal es muy variable, puesto que existe una reducida sensibilidad de su rendimiento ante estos cambios.



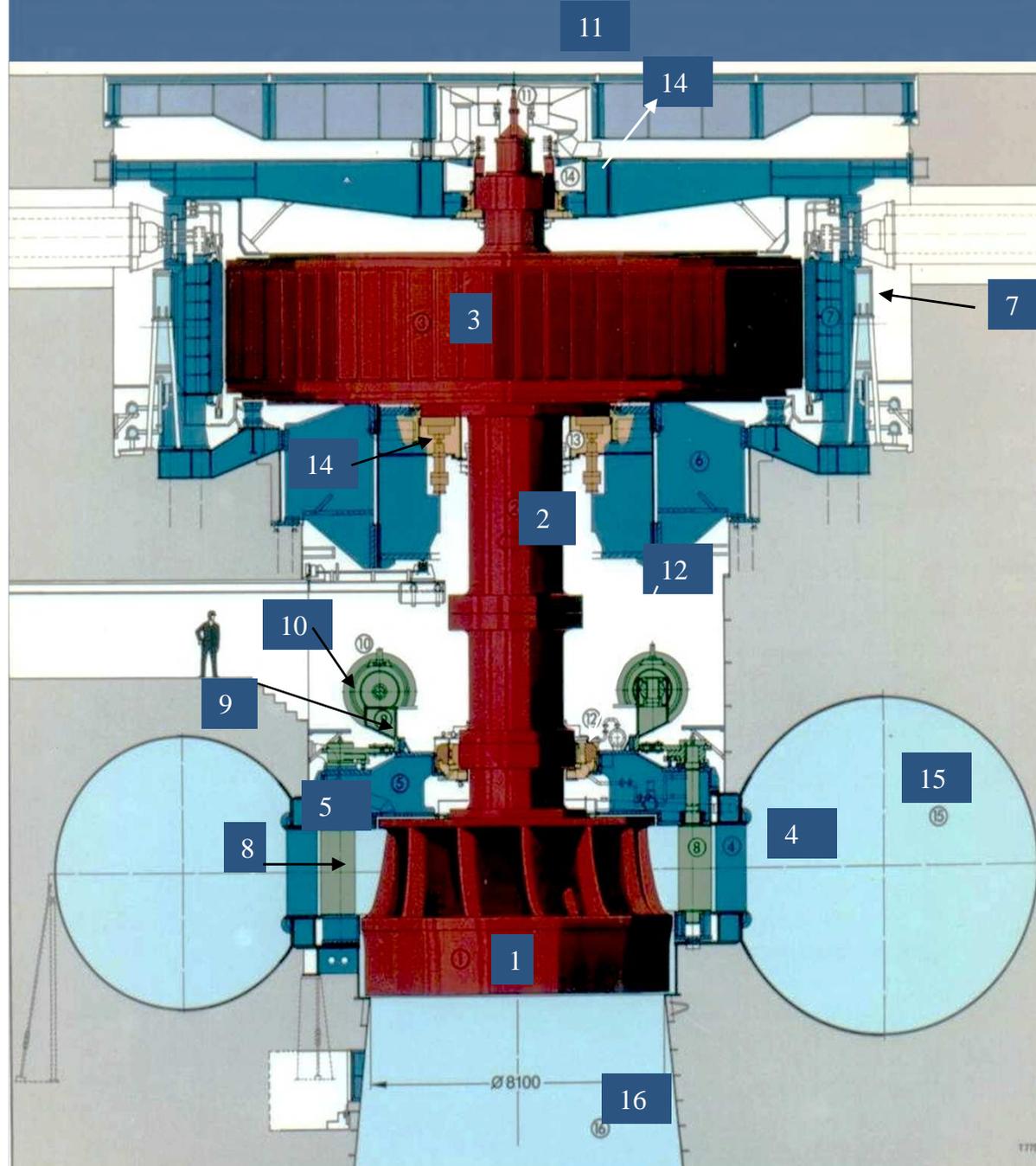
# TURBINAS DE REACCION

Jorge A. González-FACET-UNT

**Turbina Francis** (turbina de reacción), Escaba, El Chocón, Piedra del Aguila, Itaipú  
En general se utilizan para caudales y saltos medios (20-700 m).  
Se puede regular solo el distribuidor. Es la más difundida en el mundo.



# Turbina Francis



## ITAIPU

### Turbina Francis Generador:

$P = 715$  [MW],  $n = 90,9023$  [rpm]

$H = 126,7 - 118,4 - 112,9 - 96,7$  [m]

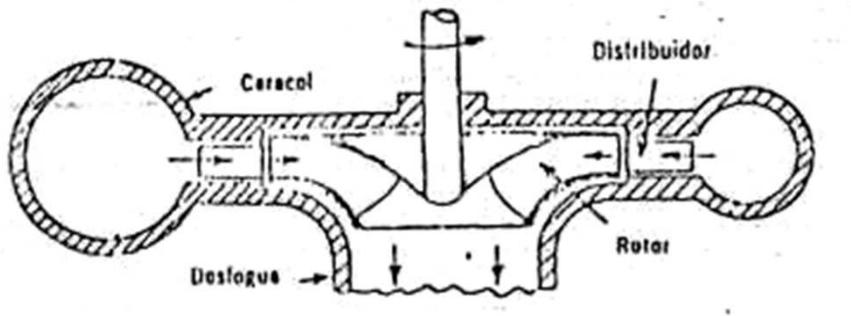
Nº de máquinas 18

### Descripción:

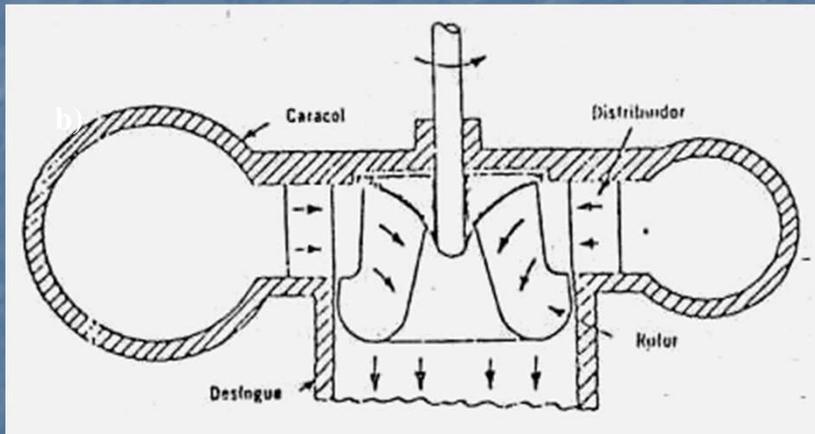
1 – Rodete turbina, 2 - Eje turbina generador, 3 – Generador, 4 – Paleta fija, 5 – Tapa de turbina, 6 – Soporte, 7 – Estator. 8 – Paleta del distribuidor (móvil), 9 – Anillo de operación de álabes del distribuidor, 10 – Mando del servomotor, 11 – Válvula de aireación, 12 – Cojinete guía inferior, 13 – Cojinete de guía y empuje, 14 – Cojinete de guía superior, 15 – Cámara espiral o caracol, 16 – Tubo de aspiración

**La turbina Francis:** es de reacción y es la turbina típica con derrame interno dentro del rotor y de admisión total. Se emplea en aprovechamientos hidroeléctricos de características muy variadas de carga y caudal. Se utiliza en saltos de agua entre 30[m] y 500[m] y caudales de 10[m<sup>3</sup>/seg.] hasta 200[m<sup>3</sup>/seg.].

Es la más generalizada en el mundo. Hay dos tipos perfectamente definidos,



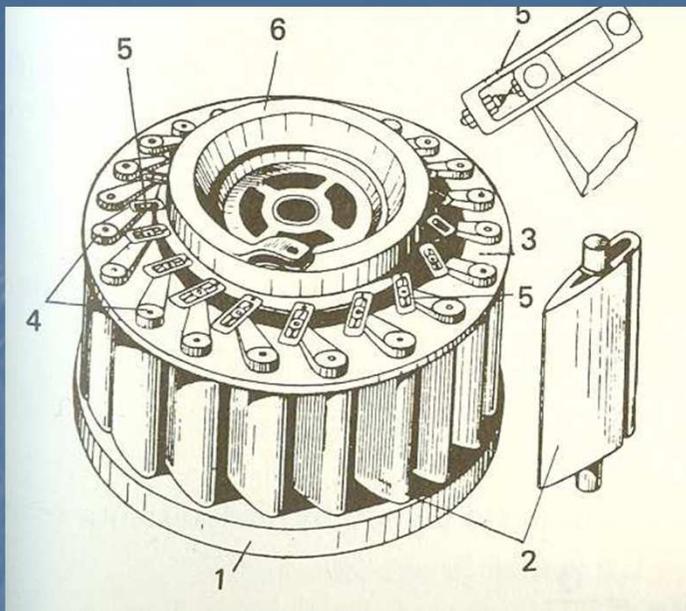
**a) Turbina Francis radial**



**b) Turbina Francis mixta**

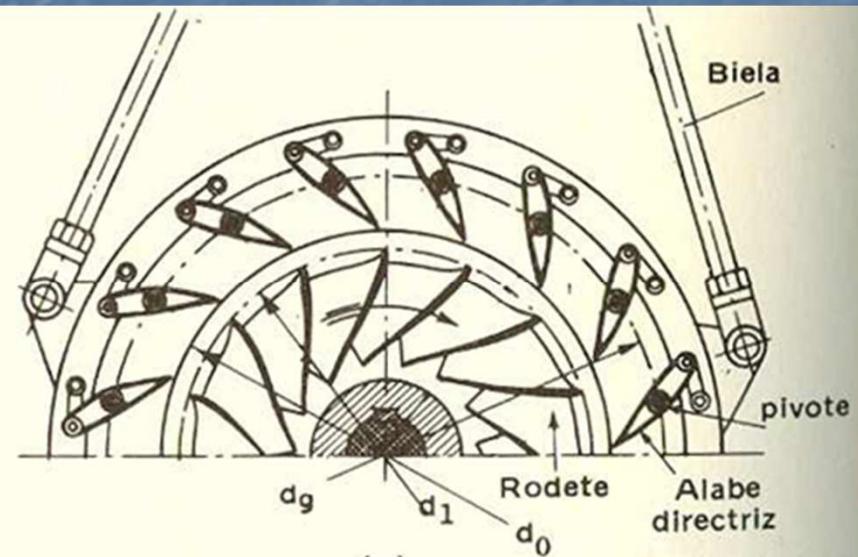
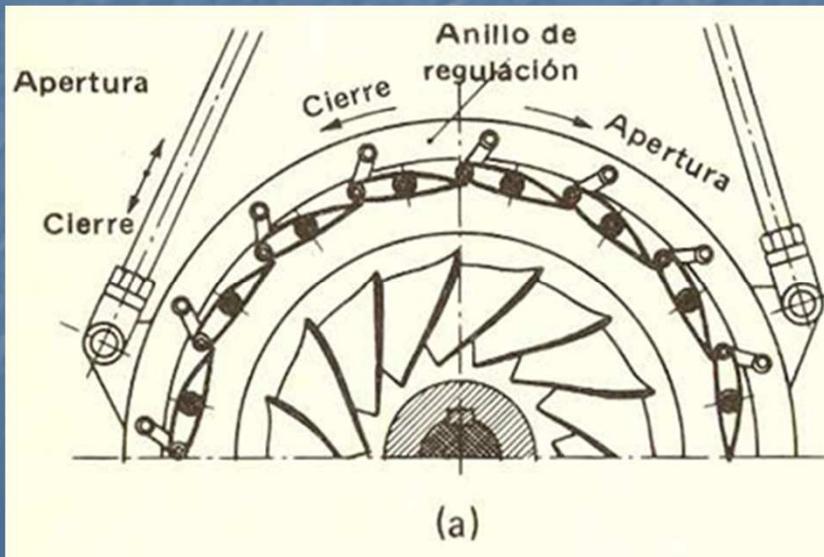
**a) La Francis pura radial:** donde todas las transformaciones energéticas del fluido se efectúan mientras el agua pasa a través de los álabes en dirección radial, de afuera hacia adentro. Se utiliza en saltos de agua con carga relativamente grandes y caudales reducidos

**b) La Francis mixta:** El agua recorre los álabes en dirección radial de afuera hacia adentro sólo en una parte de los mismos (superior), terminando el agua su recorrido por entre los álabes en dirección axial (paralela al eje en las máquinas de eje vertical), en cuya parte final trabaja como turbina axial. La ponderación de la acción radial y de la axial puede establecerse en forma gradual, según las exigencias de la carga y el caudal disponible. La acción axial se acentúa cuando aumenta el caudal con relación a la carga para una determinada potencia. Como veremos al tratar turbinas axiales de reacción (Kaplan), la disposición del rodete para un recorrido axial del agua, permite desalojar gran cantidad de agua. En la “**Francis mixta**”, para lograr la doble acción, los álabes deben tener un alabeo muy singular, que los hace aparecer alargados en dirección axial, presentando al mismo tiempo una forma abocardada al final. La Francis mixta tiene aplicación, para saltos de agua de carga mediana y bajas con caudales medios y relativamente grandes



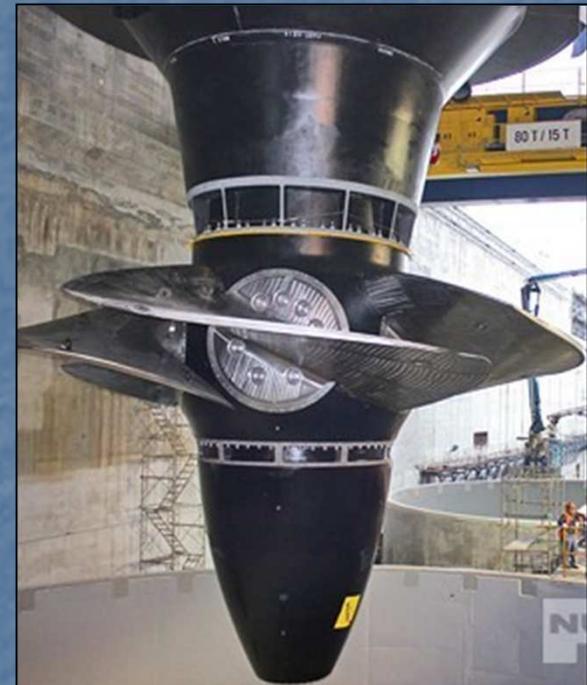
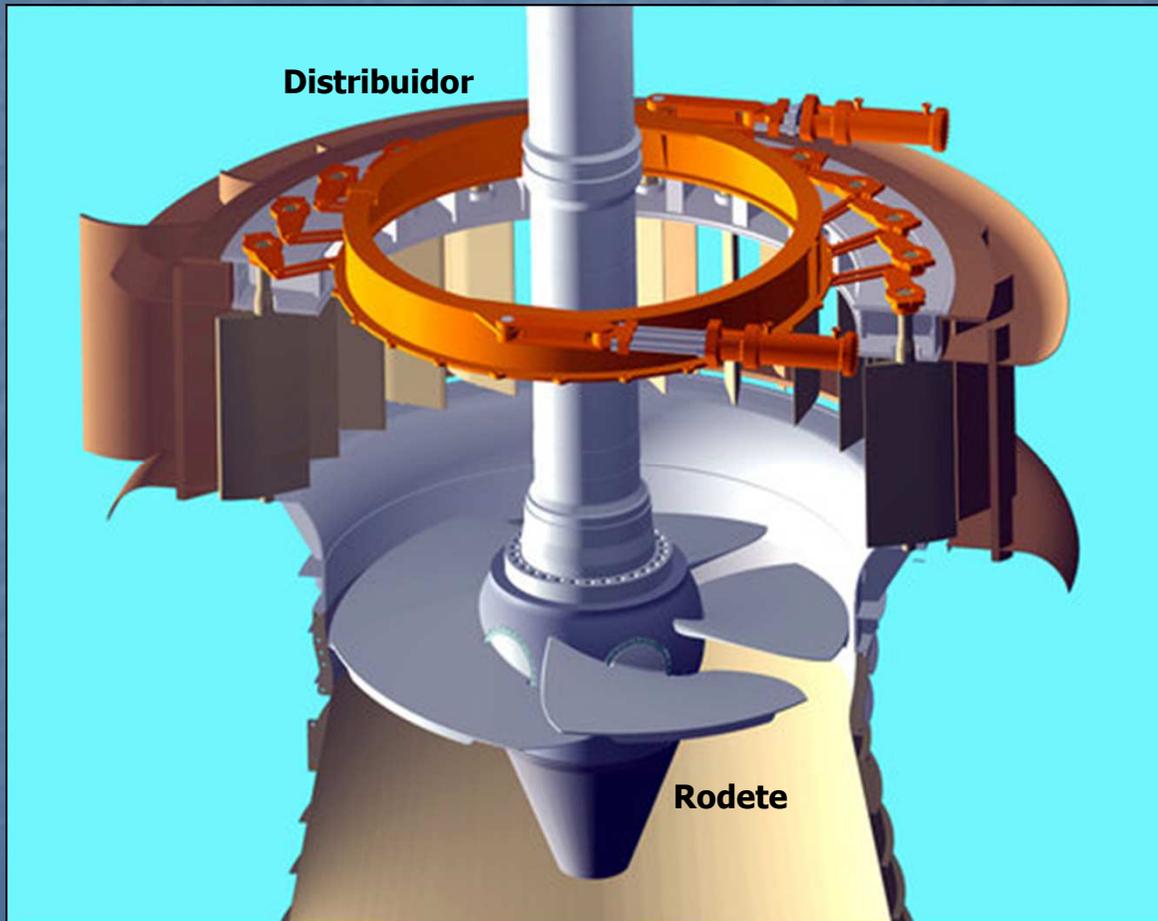
Para turbinas Francis lentas ( $ns$  bajo), la cámara espiral suele ser metálica y de sección circular y suele existir una válvula de alivio en la cámara espiral, conocida como orificio compensador. Su misión es evitar las sobrepresiones ocasionadas por las variaciones de caudal en la turbina, necesarias para ajustarse a la demanda de electricidad.

El distribuidor está constituido por una serie de álabes guía orientados, situados en todo el perímetro de entrada del fluido desde la cámara espiral hacia el rodete, encargados de dirigir el fluido hacia el rodete en la dirección más adecuada para aprovechar al máximo su energía (obtener el rendimiento más elevado posible).

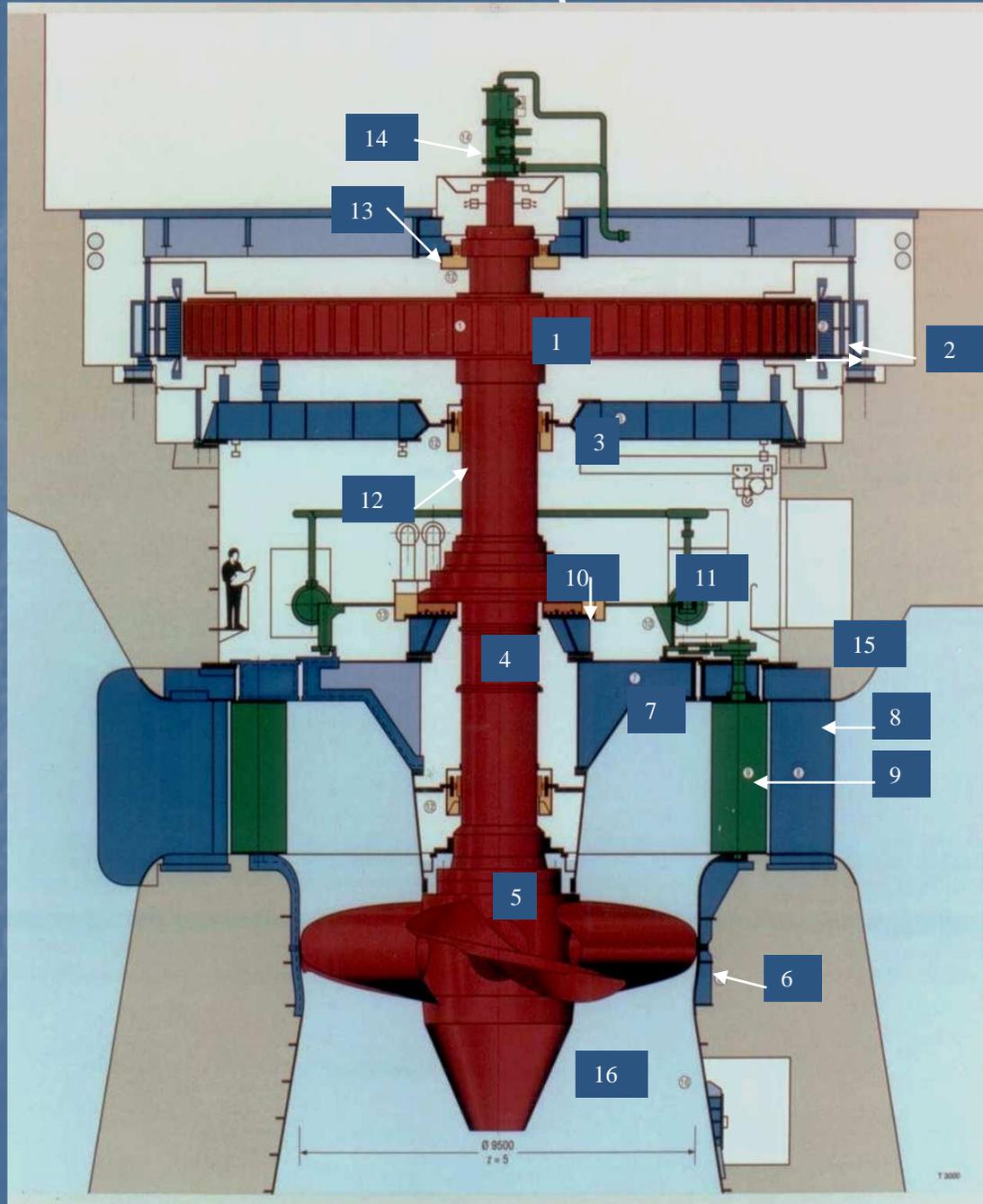


**Turbina Kaplan** (turbina de reacción), (Río Hondo, Yaciretá, Salto Grande)

Parece una hélice de un barco. En general se utilizan para grandes caudales y saltos de poca altura (inferiores a 50 m). Se puede regular el distribuidor y los álabes del rotor, lográndose mantener un buen rendimiento para distintas condiciones de trabajo.



# Turbinas Kaplan



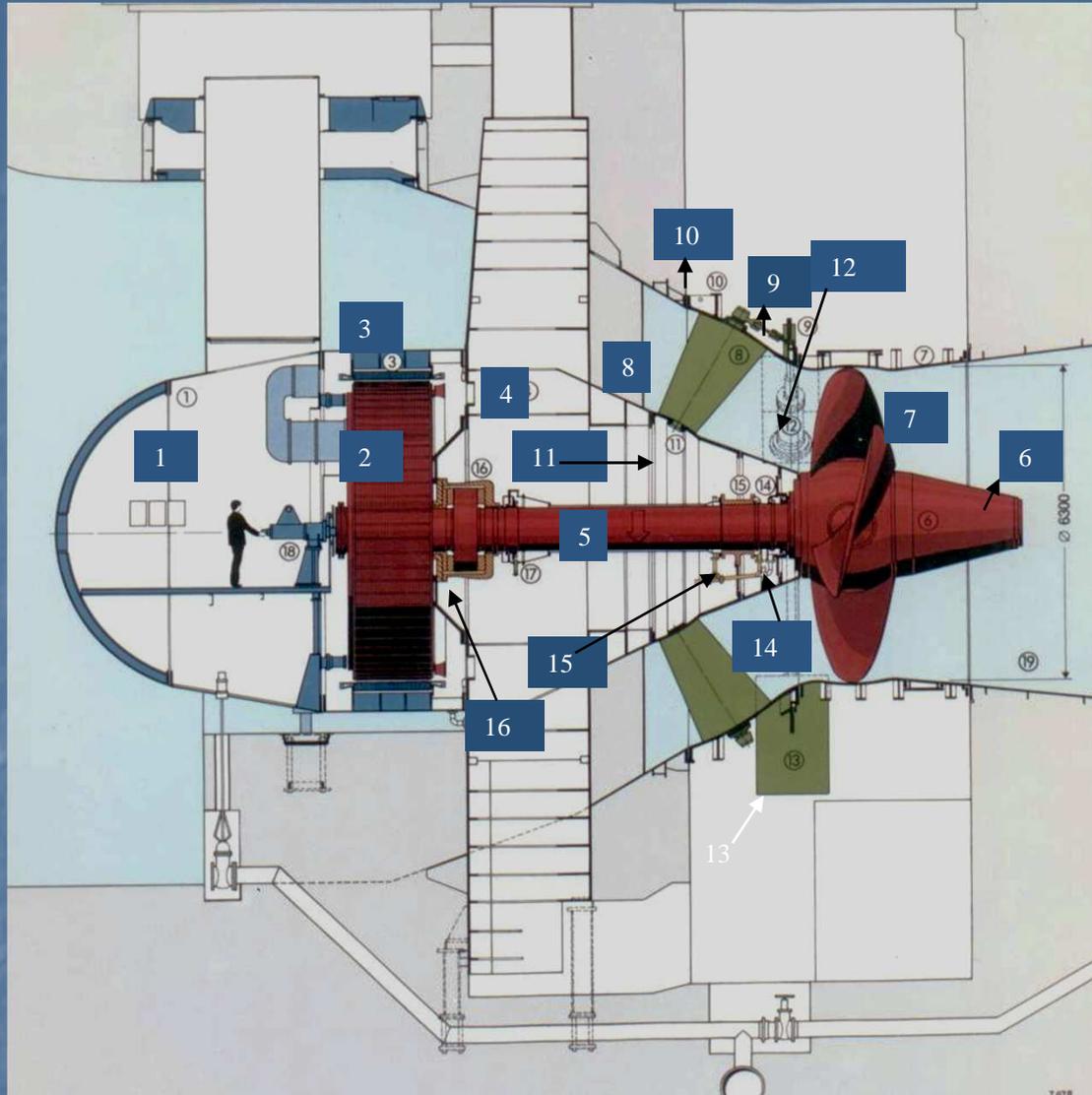
**Turbina Kaplan** de reacción de flujo axial de eje vertical. Los álabes del rotor son ajustables (paso variable), de modo que se puede regular perfectamente la potencia, cualquiera sea los requisitos de caudal o de carga. Se puede corregir la incidencia modificando el paso de los álabes, por medio de un servomotor ajustado con el distribuidor y con el regulador de velocidad, con lo que se logra mantener casi el mismo rendimiento para distintas condiciones de trabajo. Las turbinas Kaplan deben su nombre al Ing. Kaplan(1876-1934). Encuentran aplicación en una gama de carga que varía entre 1 a 50[m]. Se incluyen en este tipo las turbinas bulbos, que también son de hélice de paso variable

C.H. Yacyretá:

$H = 21,30[m]$ ,  $n = 790,40[m^3/seg.]$ .  $P = 150 [Mw.]$

1 – Rotor generador, 2 – Estator generador,  
3 – Soporte, 4 – Eje turbina generador,  
5 – Rotor turbina, 6 – anillo de descarga,  
7 – Tapa de turbina, 8 – Alabes fijos,  
9 – Alabes móviles del distribuidor, 10- Anillo de operación de álabes distribuidor,  
11 – Mando del servomotor, 12 Cojinete guia,  
13 – Cojinete de empuje, 14 – Entrada de aceite de comando palas rotor, 15 – Concreto semi-espiral, 16 – Cono de desagüe

# Turbinas Bulbos



- 1- Tapa generador, 2 – Rotor gen., 3 – Estator gen., 4 – Cubierta tubular,  
5 – Eje turbina, 6 –Rotor, 7- Cámara de escurrimiento, 8 –paleta distribuidor,  
9-Anillo de regulación paletas del distribuidor, 10 – Cierre exterior,  
11- Cierre interior, 12 – Entrada servomotor, 13 –Soporte, 14 – Sello de árbol,  
15 Cojinete guía, 16 –Cojinete guía y de empuje

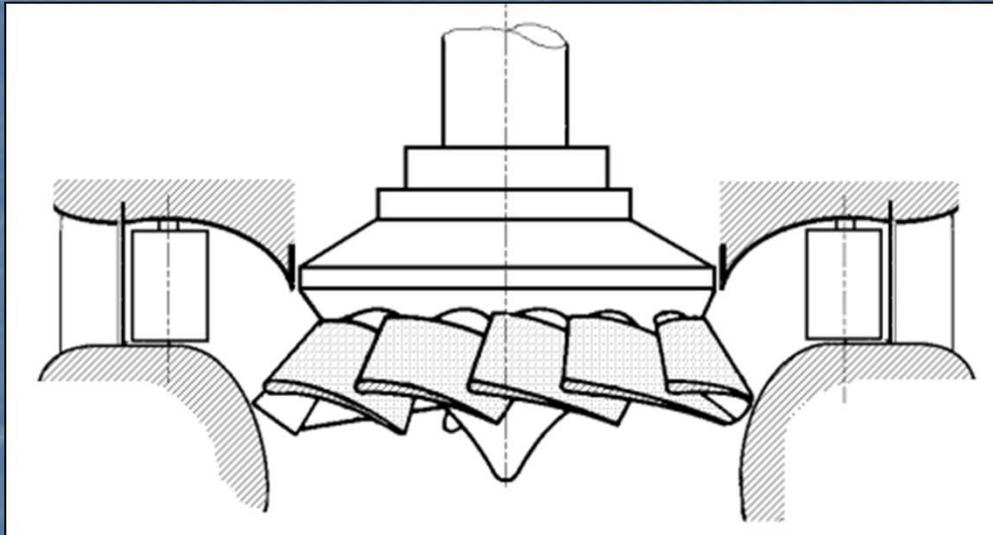
Para saltos entre 1 y 15 [m], en donde se maneja grandes caudales de agua. Se desarrolló la turbina “Bulbo” que permite aprovechar estos saltos con elevado caudal y gran eficiencia.

La particularidad de esta turbina es que el eje se ha dispuesto horizontal, con el fin de disminuir las dimensiones verticales y por lo tanto las excavaciones para su montaje. La alimentación se hace directamente desde el embalse por medio de un tubo de aspiración rectilíneo que manda el agua sobre el rotor de la turbina, a través de paletas directrices. El rotor tipo hélice con alabes fijos o variables, tiene un eje en la misma dirección del “ducto”, facilitando el paso de gran caudal de agua.

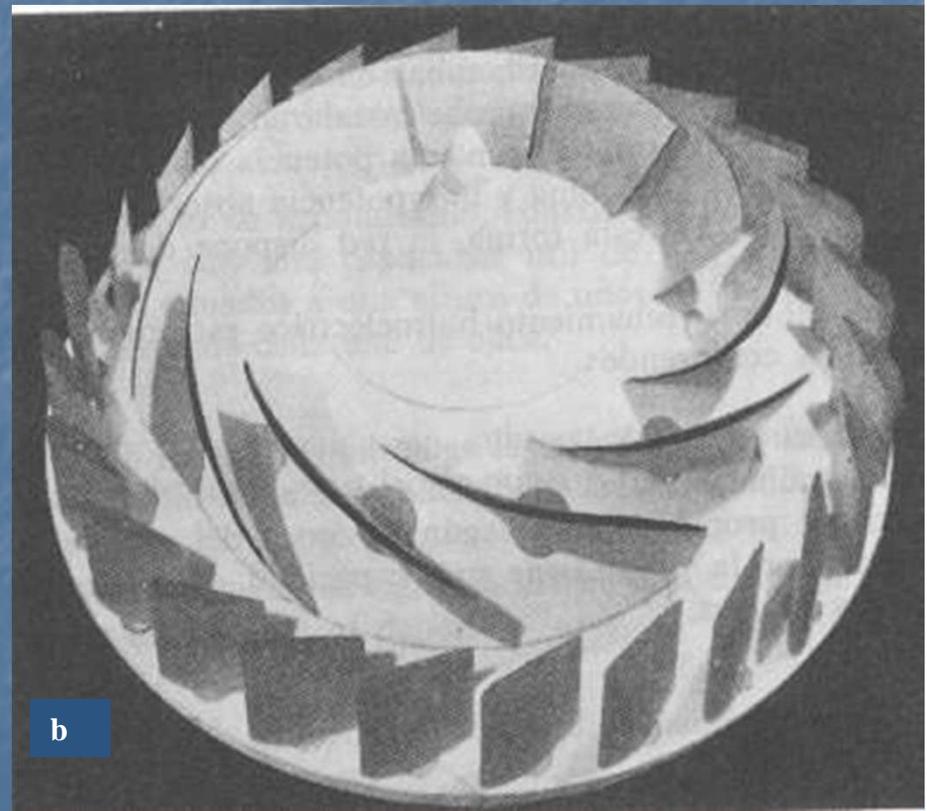
En la “turbina bulbo” el generador está encerrado en un recinto metálico estanco que normalmente precede al rotor de turbina, la forma del conjunto es como una “pera o bulbo”. Para llegar hasta el alternador, como así también a las conducciones y servicios se dispone de una chimenea que comunica con el exterior. Estos grupos se fabrican de potencia máxima de 10 a 14 MW de 5,55 [m] de diámetro de hélice y para caudales del orden de 750 [m<sup>3</sup>/seg].

## Turbina Deriaz (turbina de reacción), (El Cadillal)

Es una turbina de álabes orientables. Se usa para saltos medios y de gran altura. Es una turbina reversible, que puede actuar como turbina o bomba.



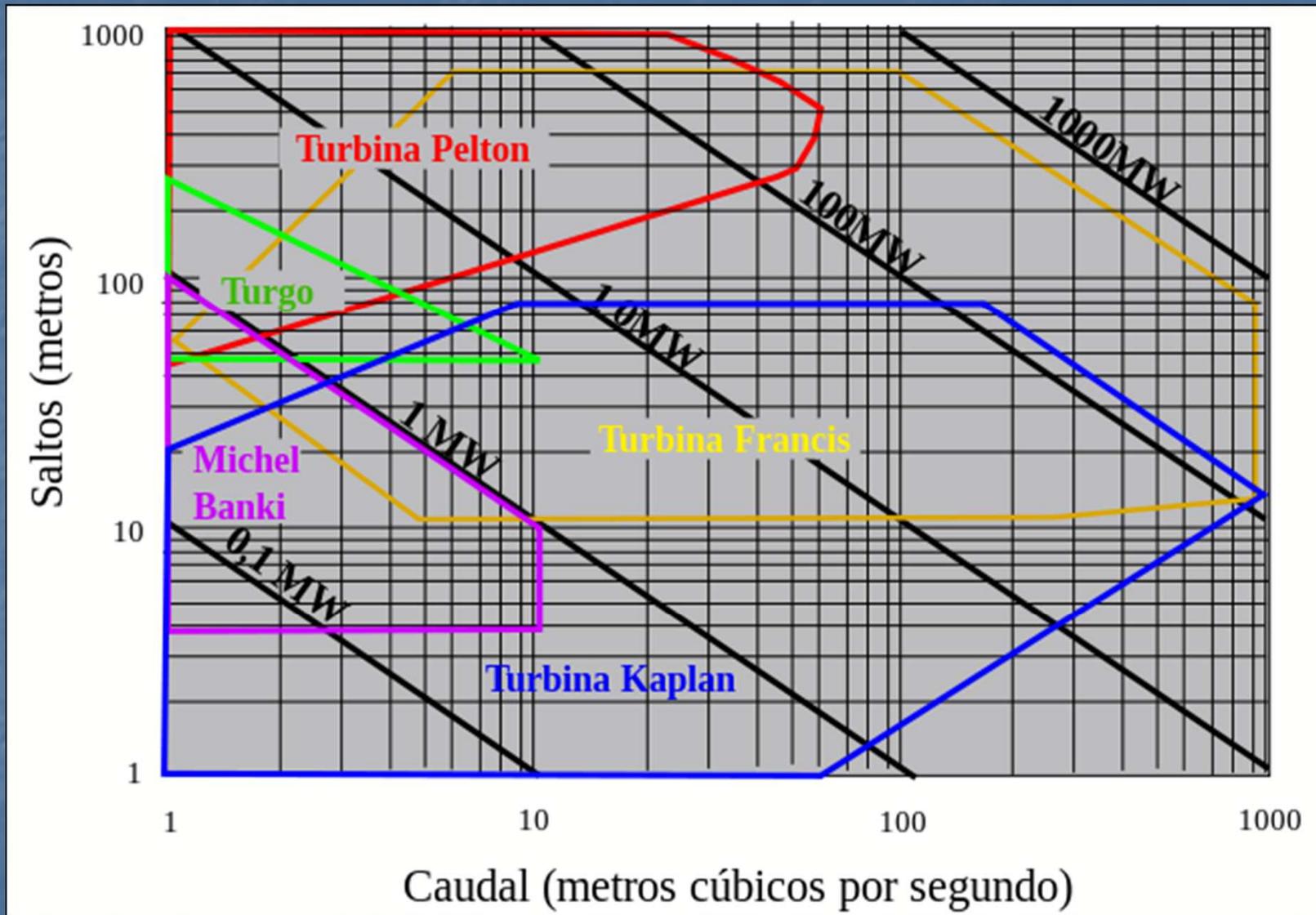
La turbina Deriaz de álabes orientables, fue inventada en el año 1956. Se usa para saltos medianos y de gran altura, es una turbina reversible, puede actuar como turbina o como bomba y también cumple las dos funciones en centrales de bombeo, en la cual opera como turbina y por medio de un alternador genera energía eléctrica al sistema, el agua turbinada se almacena en una presa aguas debajo de la central, luego desde esta presa eleva el agua hasta la presa principal operando como bomba. Tiene mejor rendimiento que una Francis de rotor análogo y de alabes fijos, en cargas intermedias y más redimiendo que una turbina - bomba de alabes fijos



Turbina Deriaz (reacción) de álabes orientables. a – Rodete de turbinada Deriaz, C.H. Cadilla. b – Otro tipo de rodete de turbina Deriaz, para operar la máquina como turbina-bomba.

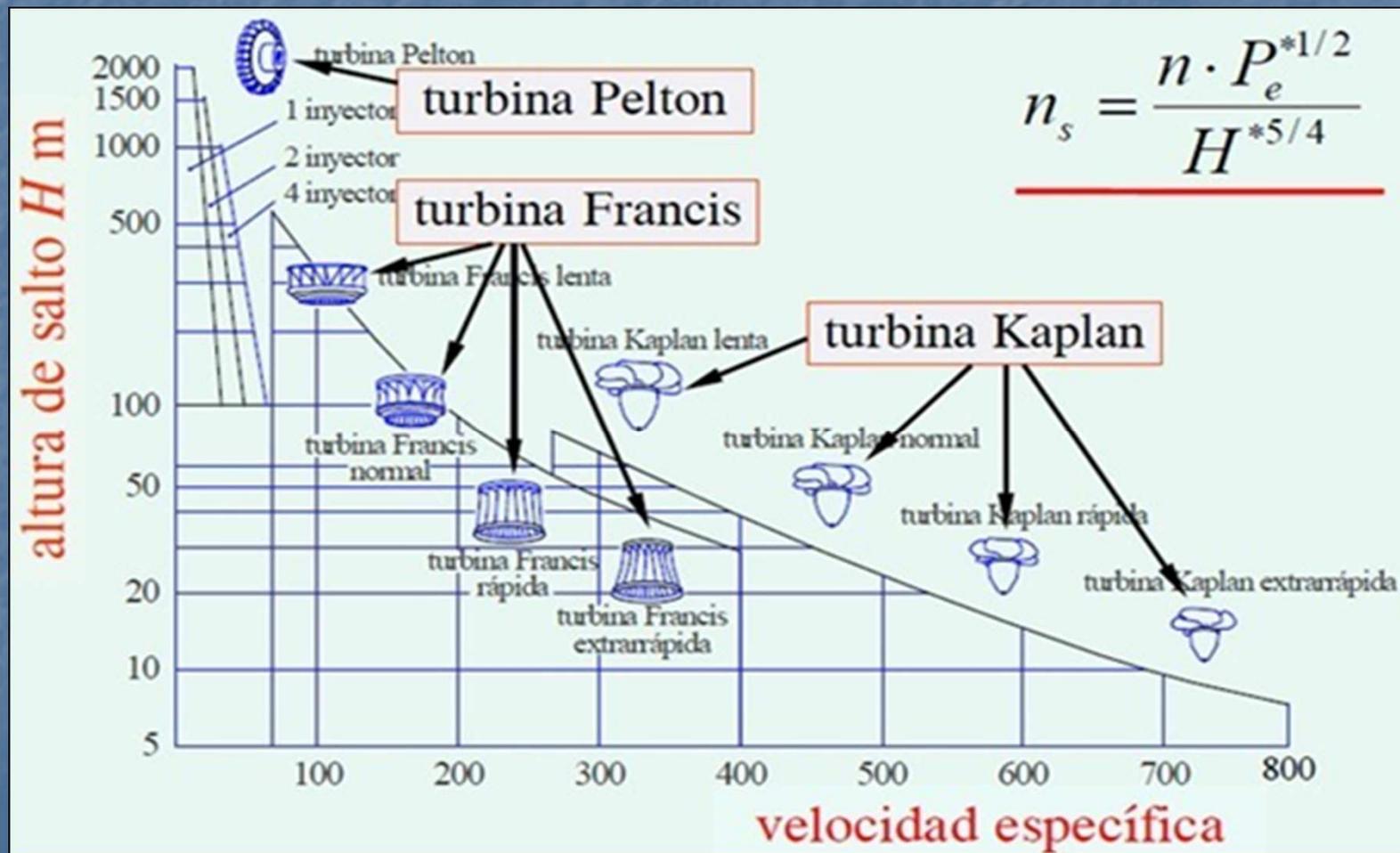
Jorge A. González-FACET-UNT

## Elección de la Turbina en función del caudal Q y el salto H



## Velocidad Específica $n_s$

$n_s$  es el nº de rpm que tendrá la turbina que se está buscando y que entrega una potencia de 1 CV al ser instalada en un salto de 1 m. Esta  $n_s$  rige el estudio comparativo de la velocidad de las turbinas, y es la base para su clasificación.



## Velocidad Especifica

La gran mayoría de las estructuras hidráulicas - aliviaderos, disipadores de energía a la salida de un embalse, tomas de agua, etc.- se proyectan hoy en día sobre la base de ensayos realizados con modelos a escala reducida. El comportamiento de estos modelos se fundamenta en la teoría de la similitud hidráulica, que incluye el análisis de la interrelación de las diversas magnitudes físicas que intervienen en el comportamiento dinámico del agua sobre la estructura, más conocido como análisis dimensional. El diseño de turbinas hidráulicas no constituye una excepción y los fabricantes de equipos también utilizan modelos a escala reducida.

La pregunta que se plantea es la de si, conociendo como funciona un cierto tipo de máquinas bajo determinados parámetros hidráulicos, se puede saber como funcionará esa misma máquina, u otra geoméricamente semejante, cuando opera bajo otros parámetros hidráulicos diferentes. Si podemos contestar a esta pregunta, la teoría de la similitud nos proporcionará un criterio científico con el que catalogar las turbinas, de gran utilidad en el proceso de selección de la turbina que mejor se adapta a las condiciones del aprovechamiento que proyectamos.

La contestación es positiva si el modelo y el prototipo son:

1. Geométricamente semejantes
2. Tienen el mismo coeficiente volumétrico, definido por  $[Q / A 2gH]$

Para ser geoméricamente semejantes, el modelo tendrá que ser una reducción del prototipo con una relación fija para todas las dimensiones homogéneas. Las cantidades físicas involucradas en la semejanza son la longitud  $l$ , el rea  $A$  y el volumen  $V$ . Si la relación de longitudes es  $k$ , la de áreas será  $k^2$  y la de volúmenes  $k^3$ .

Realizando los ensayos del modelo, con un salto de 1 metro, y con un caudal  $Q$  tal que genere 1 kW de potencia, y suponiendo que el rodete gira a  $n_s$  rpm:

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

A  $n_s$  se la conoce como velocidad específica. Todas las turbinas con idénticas proporciones geométricas, aunque de diferente tamaño, tendrán una misma velocidad específica. Si el modelo se ha afinado para que el rendimiento hidráulico sea optimo, todas las turbinas con la misma velocidad específica, tendrán también un rendimiento optimo.

Realizando algunas sustituciones:

$$\frac{HQ}{H'Q'} = \left(\frac{H}{H'}\right)^{5/2} \left(\frac{n'}{n}\right)^2; HQ = H^{5/2} \frac{n_q}{n} \text{ supuesto que } H'=1, Q'=1 \text{ y } n'=n_q$$

obtenemos 
$$n_q = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (6.6)$$

Por regla general los fabricantes de equipos anuncian el valor  $n_s$  de sus turbinas. Gran número de estudios estadísticos, llevados a cabo por De Siervo y Lugaresi, Lugaresi y Massa, Schweiger y Gregory, Gordon, Lindstrom, Kpordze y otros, sobre aprovechamientos muy diversos, han permitido correlacionar, para cada tipo de turbina, la velocidad específica con la altura de salto neto. A continuación damos las correlaciones utilizadas. Se observa que existen zonas de solape en las que el proyectista tendrá que basar su elección en razones de costes.

Pelton (1 chorro)	$n_s = 85,49 / H^{0,243}$
Francis	$n_s = 3763 / H^{0,654}$
Kaplan	$n_s = 2283 / H^{0,486}$
Flujo cruzado	$n_s = 513,25 / H^{0,505}$
Hélice	$n_s = 2702 / H^{0,5}$
Bulbo	$n_s = 1520,26 / H^{0,2837}$

Conociendo la velocidad específica se pueden estimar las dimensiones fundamentales de las turbinas. En las turbinas Pelton con una tobera, la velocidad específica varía entre 12 para un salto de 2000 m y 26 para uno de 100 m. Al aumentar el número de toberas, la velocidad específica aumenta en proporción a la raíz cuadrada de su número. Así, la velocidad específica de una Pelton con cuatro toberas (rara vez se sobrepasan las seis toberas, y eso solo en turbinas de eje vertical) es el doble del de una con una. La velocidad específica de una Pelton nunca supera 60 rpm

Como ya se dijo. la velocidad específica constituye un excelente criterio de selección, más preciso sin duda que el más convencional y conocido de las envolventes operacionales que acabamos de mencionar.

Por ejemplo, si queremos generar energía eléctrica en un aprovechamiento con un salto neto de 100 metros, utilizando una turbina de 800 kW directamente acoplada a un generador standard de 1500 rpm, empezaremos por calcular la velocidad específica, según ecuación:

$$n_s = \frac{1500\sqrt{800}}{100^{1,25}} = 134$$

de lo que se deduce que la única elección posible es una turbina Francis. Si, por el contrario admitimos la instalación de un multiplicador con una relación de hasta 1:3, la turbina podría girar entre 500 y 1.500 rpm, con lo que su velocidad específica podría situarse entre 45 y 134 rpm. De esta forma la elección podría recaer, además de en la Francis, en una Turgo, una Ossberger o una Pelton de dos toberas. Supongamos ahora que queremos instalar una turbina de 1500 kW de potencia en un aprovechamiento con un salto de 400 m, directamente acoplada a un generador a 1000 rpm. Calcularemos primero la velocidad específica  $n_s$ :

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{1,25}} = \frac{1000\sqrt{1500}}{400^{1,25}} = 21,65$$

que nos confirma debemos seleccionar una Pelton de una tobera, cuyo diámetro, de acuerdo con la ecuación (6.8) será

$$D = \frac{38,567\sqrt{800}}{750} = 0,77 \text{ m}$$

# Centrales Hidráulicas: Velocidad de turbinas

## Velocidad de las turbinas hidráulicas.

En contraste con las turbinas de vapor, que trabajan a altas velocidades (1.500 a 3.000 r.p.m.) las turbinas hidráulicas trabajan a velocidades relativamente bajas, que oscilan entre 75 y 600 r.p.m. Las velocidades menores corresponden a las turbinas Pelton, y las más elevadas a las turbinas Kaplan.

Como la mayoría de las turbinas se construyen para accionar directamente generadores eléctricos, su velocidad debe ser la velocidad del alternador que, como sabemos, vale:

$$n = 60 \times f / p$$

Donde

$n = n^\circ$  de revoluciones por minutos[r.p.m.];  $f$  = frecuencia en periodos por segundo;  $p$  = número de pares de polos.

A continuación en la tabla 1, se expresan las velocidades de generadores en revoluciones por minuto, en función del número de pares de polos y dentro de los límites de aplicación de las turbinas hidráulicas para la frecuencia, normalmente utilizada, de 50 periodos por segundo.

TABLA N°1			
Velocidades de los Generadores Accionados por Turbinas Hidráulicas			
Número de pares de polos	Velocidad en r.p.m.	Número de pares de polos	Velocidad en r.p.m.
40	75.0	18	166.5
38	79.0	16	87.5
36	83.5	14	214.5
34	88.0	12	250.0
32	94.0	10	300.0
30	100.0	8	375.0
28	107.0	7	428.5
26	115.5	6	500.0
24	125.0	5	600.0
22	136.5	4	750.0
20	150.0		

TABLA N°2	
Sobrevelocidades Admisibles en Turbina Hidráulica	
Turbinas	Exceso de Velocidad en % de la normal
Pelton	80
Francis	85 - 100
Hélice	80 - 120
Kaplan	80 - 120

Siempre se debe verificar los valores de sobrevelicidad con el fabricante de la turbina

# Centrales Hidráulicas: Velocidad específica de T.H.

Las turbinas hidráulicas están proyectadas para soportar velocidades máximas muy superiores a las velocidades de trabajo; estas velocidades máximas corresponden al generador eléctrico sin carga (en vacío) y el distribuidor completamente abierto (caudal máximo), caso el más desfavorable que se puede presentar. Suponiendo que se instalan las turbinas más apropiadas a la altura del salto de que se trata, en la tabla 2 se expresan las sobrevelocidades que pueden admitirse.

## Velocidad específica.

Se denomina *velocidad específica* de una turbina hidráulica a la velocidad a la cual trabajaría una turbina exactamente homóloga (es decir, de la misma forma constructiva pero más reducida), desarrollando una potencia de 1 CV, bajo un salto de 1 m. Esta relación se expresa la siguiente fórmula:

$$n_s = n \times \sqrt{P} / H \times \sqrt[4]{H} \quad [\text{r.p.m.}]$$

$n$  = velocidad de la turbina en r.p.m.

$P$  = potencia de la turbina en CV.

$H$  = altura del salto en m.

Por ejemplo, una turbina de 1.500 CV, para un salto de 80 m y a 750 r.p.m. tendrá una velocidad específica:

$$n_s = n \times \sqrt{P} / h \times \sqrt[4]{h} = [r.p.m.] = 750 \times \sqrt{1500} / 80 \times \sqrt[4]{80} = 125 [r.p.m.]$$

La velocidad específica es un índice para determinar, en cada caso, cuál es el tipo de turbina más apropiado.

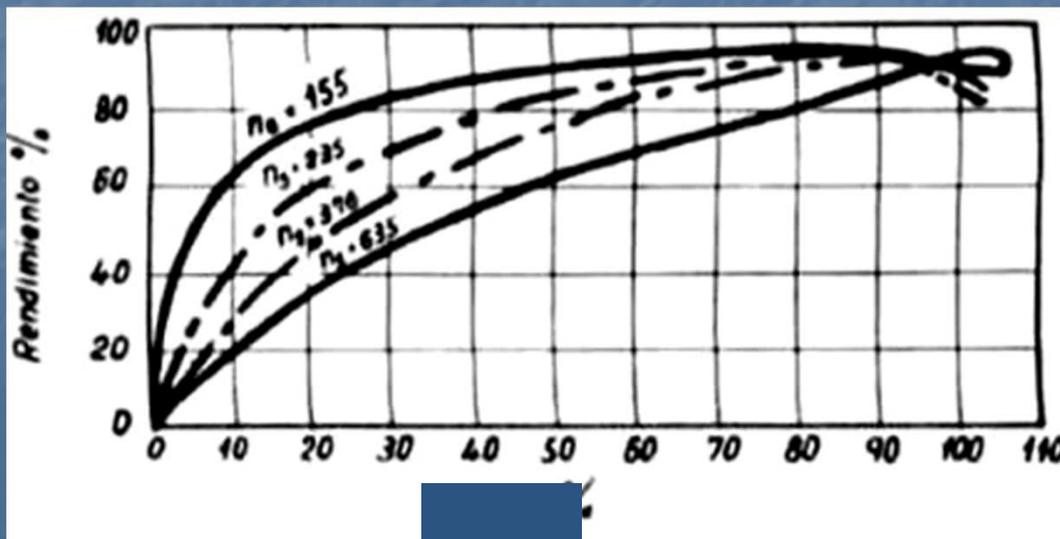


Fig. N° 3- Curvas de comparativas de potencia y rendimiento de diferentes rodetes

$n_s = 155$  Turbinas Francis normal

$n_s = 235$  Turbinas Francis rápidas

$n_s = 376$  Turbinas Francis extra rápidas

$n_s = 635$  Turbina Kaplan rápida

# Centrales Hidráulicas: Elección de turbina

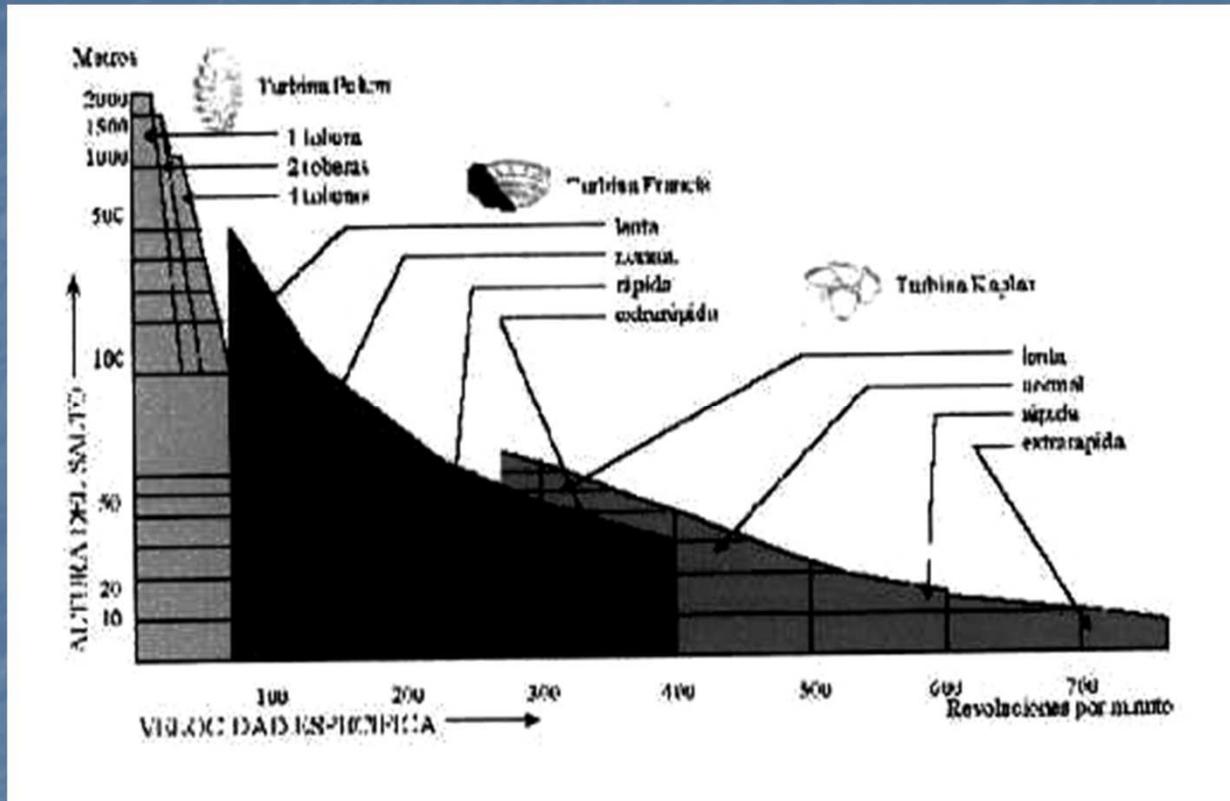


Fig. N°4- Curvas de la altura en función de la velocidad específica [ns], para la elección de turbina

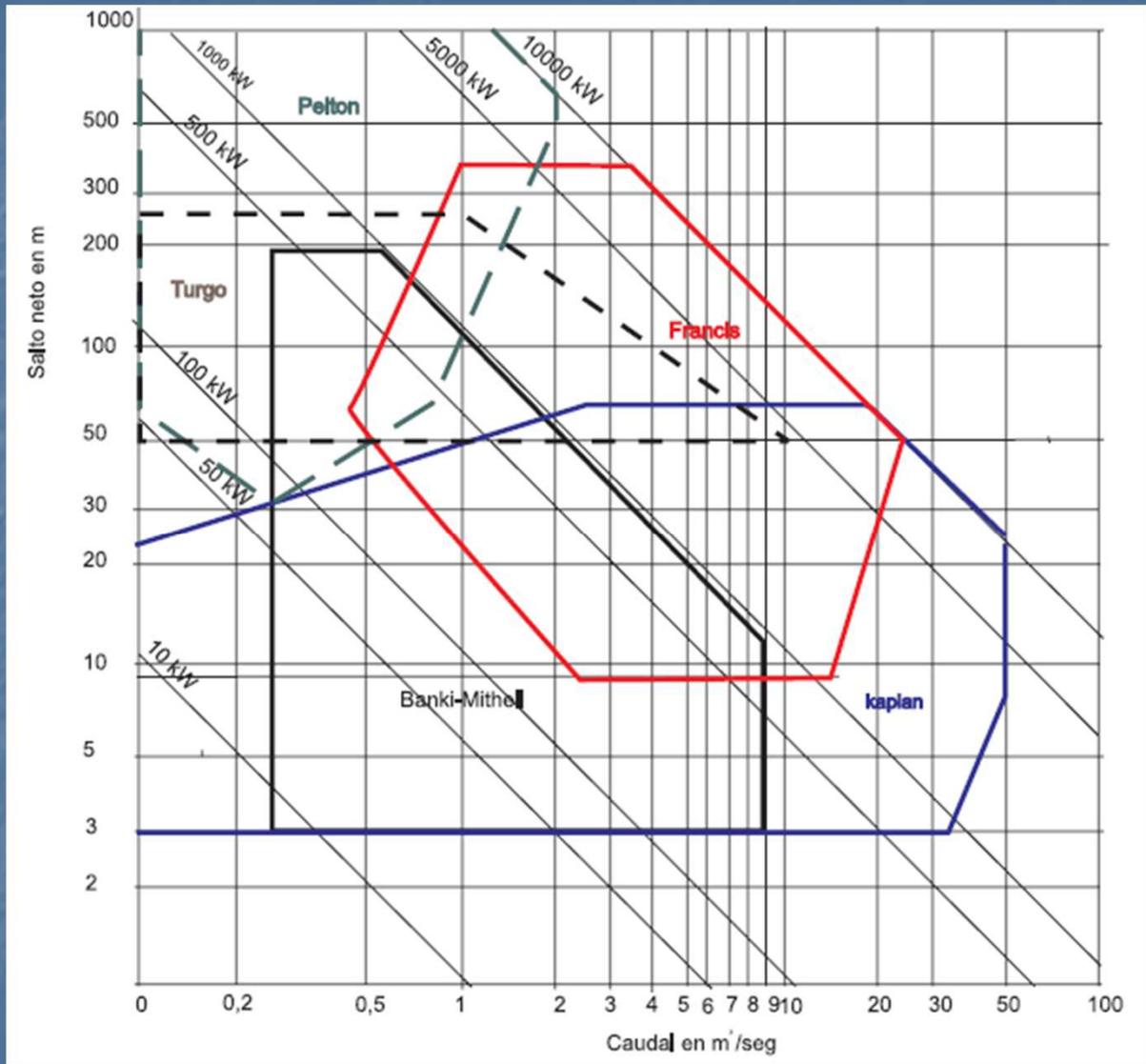
Veamos ahora unos ejemplos de aplicación de la tabla 3. Supongamos un salto de agua de 150 m. con un caudal de 50 m<sup>3</sup>/seg., con generador (o generadores) eléctrico de 10 pares de polos es decir (ver la tabla 1), de 300 r.p.m. La turbina (o turbinas) irá directamente acoplada al generador y, por lo tanto, su velocidad será también de 300 r.p.m. Vamos a ver que tipo de turbina tenemos que elegir, si disponemos tres y cuatro grupos turbina-generador.

### Para 3 grupos turbina-generador

$$\text{Potencia de cada turbina} = \frac{1}{3} \times 1000 \times Q \times h / 75 = 1000 \times 50 \times 150 / 3 \times 75 = 35.000 \text{ [CV]}$$

$$n_s = n \times \sqrt{P / h} / h \times \sqrt[4]{h} = [\text{r.p.m.}] = 300 \times \sqrt{35000} / (150 \times \sqrt[4]{150}) = 300 \times 187 / 150 \times 3,5 =$$

$$n_s = 56100 / 525 = 107 \text{ [r.p.m]} \text{ corresponde a una Francis lenta (ver ábaco)}$$



Jorge A. González-FACET-UNT

# Centrales Hidráulicas: Ejemplo elección de turbina

TABLA 3		
Tipos de Turbina más Adecuado en Función de la Velocidad		
Velocidad Específica r.p.m.	Tipo de turbina	metros
Hasta 18	Pelton de una tobera	Hasta 800
De 18 a 25	Pelton de una tobera	De 800 a 400
De 26 a 35	Pelton de una tobera	De 400 a 100
De 26 a 35	Pelton de dos toberas	De 800 a 400
De 36 a 50	Pelton de dos toberas	De 400 a 100
De 51 a 72	Pelton de cuatro toberas	De 400 a 100
De 55 a 70	Francis muy lenta	
	Cámara forzada en espiral	De 400 a 200
De 70 a 120	Francis lenta - Cámara forzada en espiral	De 200 a 100
De 120 a 200	Francis media - Cámara forzada en espiral	De 100 a 50
De 200 a 300	Francis rápida	
	Cámara cerrada	De 50 a 25
De 300 a 450	Francis ultrarrápida	
	Cámara abierta	De 25 a 15
De 400 a 500	Hélice ultrarrápida	Hasta 15
De 270 a 500	Kaplan lenta	De 50 a 15
De 500 a 800	Kaplan rápida	De 15 a 5
De 800 a 1.100	Kaplan ultrarrápida	Menos de 5

Para cuatro grupos turbina - generador caudal  $Q_{total} = 50 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ;  $h = 150 \text{ m}$ . Calcular Potencia en [CV] y  $n_s$  velocidad específica:

$$\text{Potencia de cada turbina} = \frac{1}{4} \times 1000 \times Q \times h / 75 = 1000 \times 50 \times 150 / 4 \times 75 = 25.000 \text{ CV}$$

$$n_s = n \times \sqrt{P} / h \times \sqrt[4]{h} = [\text{r.p.m.}] = 3000 \times \sqrt{25000} / 150 \times \sqrt[4]{150} = 3000 \times 158 / 150 \times 3,5 = 90 [\text{r.p.m.}]$$

Corresponde a una "Francis lenta", con cámara forzada en espiral ver tabla 3

# ALIVIADEROS



## Vertedero tipo "Glory Hole"



Aliviadero de la Presa de Monticello en el Lago Berryessa, en California



Aliviadero de la Presa de Benagéber, cerca de Valencia, construida en la década de 1950



## Escalera de peces

Sistema de transferencia para peces. Es un canal con rugosidad artificialmente aumentada, que comunica el nivel del río aguas abajo con el nivel aguas arriba del embalse. La forma de la escalera debe permitir atravesar la presa a los peces que migran en el río que ha sido cortado por esta.

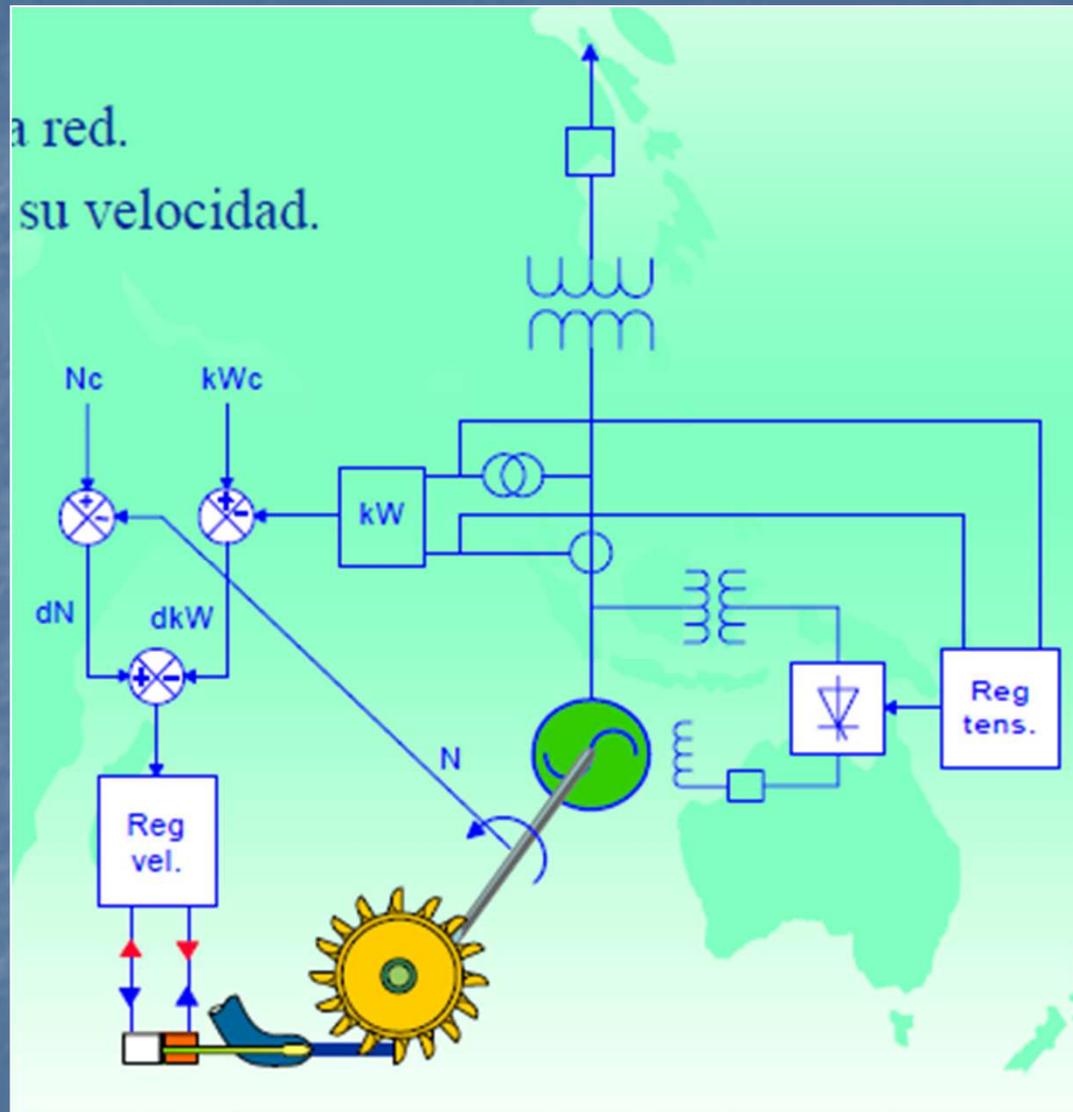


John Day Dam fish ladder on the Columbia River

La escala de la presa de Geesthacht, en el río Elba en Hamburgo, de 550 m de longitud y 16 de ancho con más de 50 piscinas para salvar el desnivel de 4 m



# Sistema de control de una turbina



## Distribución indicativa de costos para una CH de 500 MW en USA\_

