



Universidad Nacional de Cuyo

Facultad de Ingeniería

Cátedra: Aprovechamientos Hidráulicos



SEMINARIO TURBINAS FRANCIS



Amaya, Ángel
Campuzano, Micaela

Contenido

Contenido	2
1. Introducción	3
2. Reseña histórica	5
3. Principio de funcionamiento de la turbina Francis	7
4. Ámbito de aplicación.....	9
5. Clasificación de turbinas Francis	10
5.1. Velocidad específica	10
5.2. Posición del eje.....	11
5.3. Forma de actuar de los filetes líquidos sobre los álabes	¡Error! Marcador no definido.
5.4. Dirección de flujo respecto al eje de rotación	12
6. Componentes	14
6.1 Cámara espiral.....	14
6.2 Pre-distribuidor	15
6.3 Distribuidor	15
6.4 Rodete	17
6.5 Tubo difusor	18
7. Cavitación	20
7.1 Tipos de cavitación en turbinas Francis	20
7.3 Beneficio de la forma del tubo difusor en la turbina francis.....	23
8. Velocidad síncrona y velocidad de embalamiento.....	24
8.1. Velocidad síncrona	24
8.2. Velocidad de embalamiento	24
9. Curvas características.....	25
10. Ejemplos, fotografías y filmaciones de Turbinas Francis en Argentina.....	27
11. Bibliografía	32

1. Introducción

Una máquina es un transformador de energía. Es decir, una máquina absorbe energía de una clase y restituye energía de otra clase o de la misma clase, pero transformada.

En el presente informe vamos a trabajar con unas máquinas denominadas máquinas de fluido. En toda máquina de fluido hay un intercambio entre energía de fluido y energía mecánica.

Las máquinas de fluido se clasifican en máquinas hidráulicas y máquinas térmicas. Aunque la etimología de la palabra puede generar equivocaciones, no toda máquina hidráulica tiene como fluido al agua (por ejemplo, un ventilador bombea aire y a pesar de esto es una máquina hidráulica).

La principal diferencia entre estas dos máquinas radica en que en las primeras se puede plantear la hipótesis de densidad constante mientras en las segundas no.

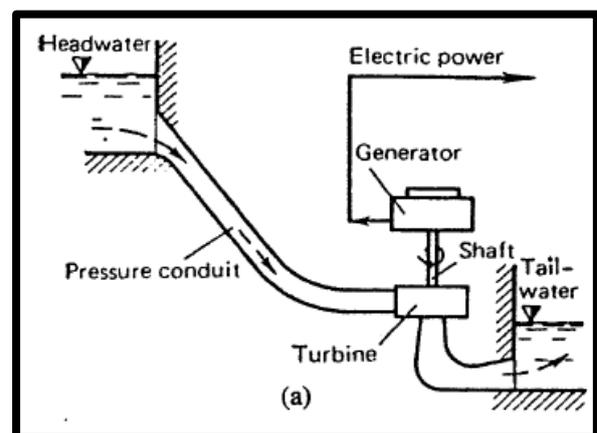
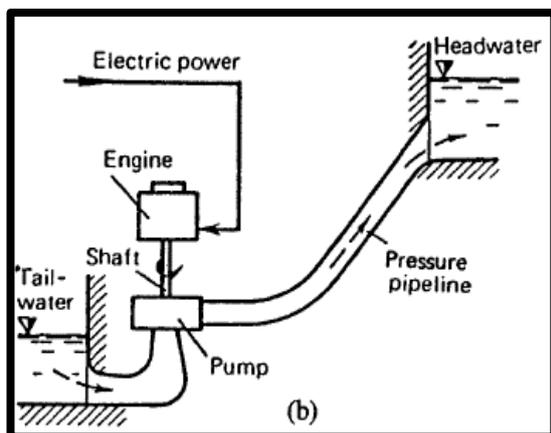
Dentro de las máquinas hidráulicas tenemos 3 tipos:

- ✓ **Máquinas de desplazamiento positivo**
- ✓ **Máquinas gravimétricas**
- ✓ **Turbomáquinas**

Nosotros vamos a trabajar con las turbomáquinas. No obstante, dentro de éstas hay varias clasificaciones:

Primera clasificación:

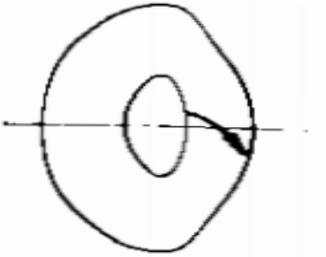
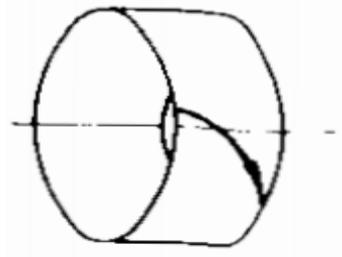
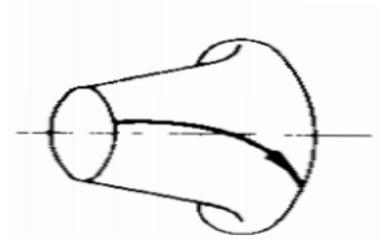
Una primera gran división que puede hacerse es, en máquinas que transfieren energía de rotor a fluido, denominadas bombas y compresores, y en máquinas que transfieren energía de fluido a rotor, llamadas turbinas.



Bomba

Segunda clasificación:

Una segunda gran clasificación se basa en la dirección que tiene el flujo a su paso por el rotor, y se tienen así máquinas de flujo radial y máquinas de flujo axial; algunas tienen los dos flujos, esto es, son de flujo mixto.

*Flujo radial**Flujo axial**Flujo mixto***Tercera clasificación:**

En esta tercera clasificación, se hace referencia al grado de reacción, teniendo de esta manera máquinas de impulso y máquinas de reacción.

El grado de reacción se define a partir de la siguiente expresión: $Gr = H_p/H_t$

Donde H_p es la altura de presión y H_t es la altura total en el rodete. Es decir, es el cociente de la altura que da (bomba) o que absorbe (turbina) el rodete en forma de presión por la altura total que da (bomba) o que absorbe (turbina) el rodete.

Si este cociente es igual a cero, estamos hablando de máquinas de impulso (una turbina Pelton, por ejemplo).

Si el cociente es distinto de cero, estamos hablando de máquinas de reacción (por ejemplo: turbinas Francis, Kaplan y bombas).

*Turbina Pelton: Máquina de impulso**Turbina Francis: Máquina de reacción*

A partir de ahora vamos a trabajar con unas turbomáquinas que transfieren energía del fluido al rotor; poseen un rodete de flujo radial o mixto; y son turbinas a reacción. Nos referimos a las turbinas FRANCIS.

2. Reseña histórica

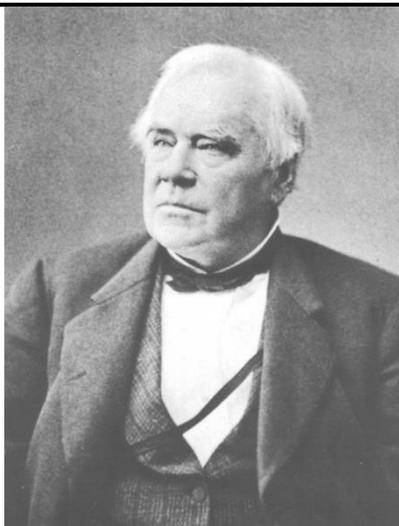
La turbina hidráulica tiene un largo período de desarrollo, siendo su forma más antigua y sencilla la rueda hidráulica, utilizada por primera vez en la antigua Grecia y posteriormente adoptada en la Europa medieval para la molienda de granos. Las norias y turbinas hidráulicas han sido usadas históricamente para accionar molinos de diversos tipos, aunque de manera bastante ineficiente. No fue hasta el siglo XIX que las mejoras logradas en las turbinas hidráulicas permitieron que, allí donde se disponía de un salto de agua, pudiesen competir con la máquina de vapor.

Un ingeniero francés, Benoit Fourneyron, desarrolló lo que se conoce como la primera turbina hidráulica en 1827. Más tarde Fourneyron construyó turbinas para propósitos industriales que alcanzaron una velocidad de 2300 rpm, desarrollando alrededor de 50 kW con una eficiencia de más del 80%. Alrededor de 1820 Jean V. Poncelet diseñó una turbina de flujo interno que usaba los mismos principios, y S. B. Howd obtuvo en 1838 una patente en los EE.UU. para un diseño similar.

Las turbinas Francis reciben su nombre en honor a James B. Francis, un ingeniero civil que manejó el sistema de canales de la ciudad de Lowell, Massachusetts, e inventó la turbina de reacción de flujo mixto. A principios de la década de 1850, Francis desarrolló turbinas más eficientes que las ruedas hidráulicas basadas en el modelo de turbina de Howd. En 1848 Francis mejoró estos diseños y desarrolló una turbina con el 90% de eficiencia. Aplicó principios y métodos de prueba científicos para producir la turbina más eficiente elaborada hasta el momento. Sus métodos matemáticos y gráficos de cálculo mejoraron el estado del arte en lo referente al diseño e ingeniería de turbinas. Sus métodos analíticos permitieron diseños seguros de turbinas de alta eficiencia.

Su turbina de reacción de flujo mixto se convirtió en el estándar para las instalaciones hidroeléctricas estadounidenses. Por ejemplo, veintidós turbinas de estilo Francis fueron instaladas en la presa de Hoover.

Hoy existen turbinas Francis con rendimientos que pueden llegar cerca del 96%.



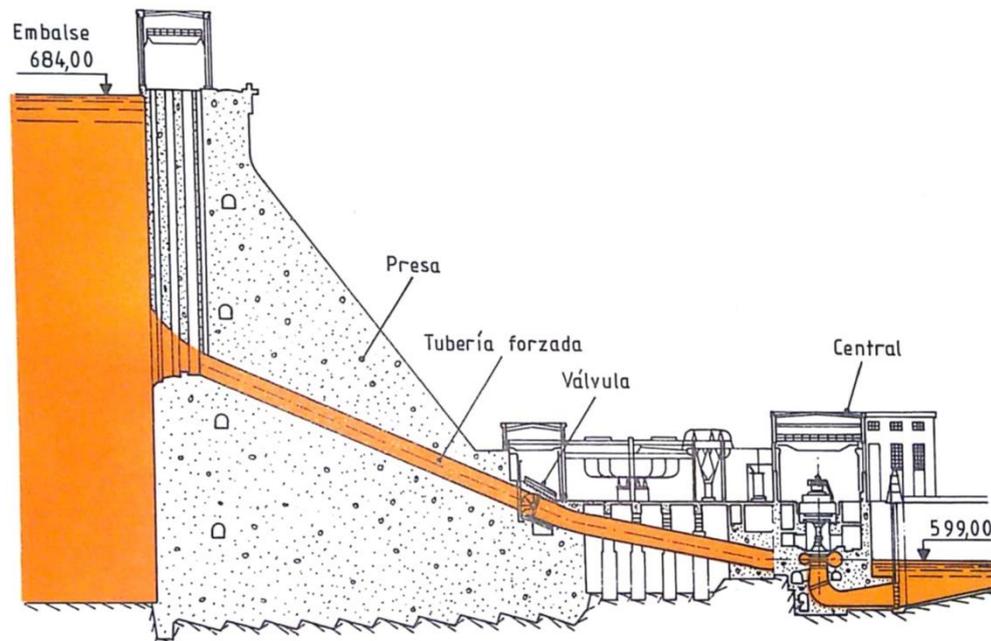
James Bicheno Francis

3. Principio de funcionamiento de la turbina Francis

La turbina hidráulica es una turbomáquina motora, y por tanto esencialmente es una bomba rotodinámica que trabaja a la inversa. Así como una bomba absorbe energía mecánica y restituye energía al fluido, una turbina absorbe energía del fluido y restituye energía mecánica, teóricamente.

Considerando los aspectos constructivos de los componentes de las turbinas Francis, se comprende con facilidad el funcionamiento de las mismas.

En la mayoría de los casos, la instalación de este tipo de turbinas se realiza en centrales para cuya alimentación de agua se requiere la existencia de un embalse o cámara de carga. Otra particularidad en la ubicación de estas turbinas radica en que el conjunto esencial de las mismas, es decir, cámara espiral – distribuidor – rodete – tubo de aspiración, se encuentran, generalmente, a un nivel inferior respecto al nivel alcanzado por el agua en su salida hacia el cauce del río en dirección aguas abajo, esto a efecto de mejorar aspectos relacionados con la cavitación.

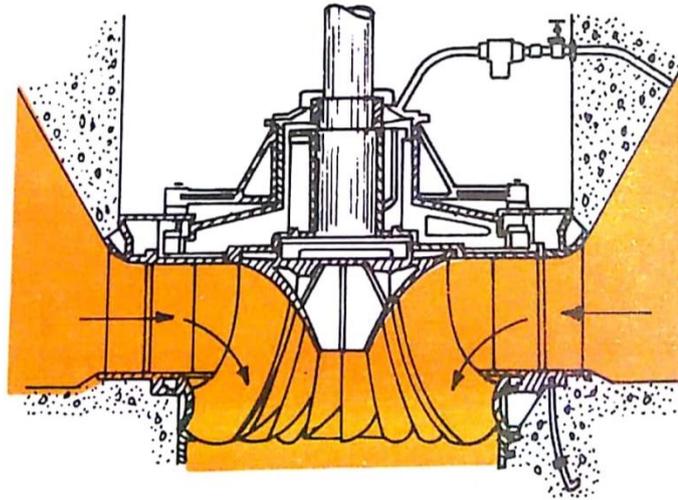


Esquema de central a pie de presa con turbina Francis

Se puede considerar, por lo tanto, la presencia de una columna de agua continua, entre los distintos niveles de los extremos mencionados, embalse y salida de agua, deduciendo que la turbina está totalmente llena de agua. Según otras disposiciones de instalación, especialmente en saltos de muy poca altura, se podría interpretar que se halla sumergida, tal es el caso de no disponer de cámara espiral, encontrándose instalado el rodete en el interior de una cámara abierta, normalmente de hormigón, enlazada directamente con la zona de toma de agua o embalse.

La energía potencial gravitatoria del agua embalsada se convierte en energía cinética en su recorrido hacia el distribuidor, donde, a la salida de éste, se dispone de energía en forma cinética y de presión, siendo, la velocidad de entrada del agua en el rodete, inferior a la que correspondería por altura de salto, debido a los cambios bruscos de dirección en su recorrido.

Centrándose en la zona del distribuidor, se puede añadir que el agua, a su paso por las palas fijas de la cámara espiral y las palas directrices del distribuidor, disminuye su presión, adquiriendo velocidad y, en tales condiciones, provoca el giro del rodete, al discurrir a través de los álabes de éste, sobre los cuales actúa el resto de la presión existente en las masas de agua dotadas, a su vez, de energía cinética (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

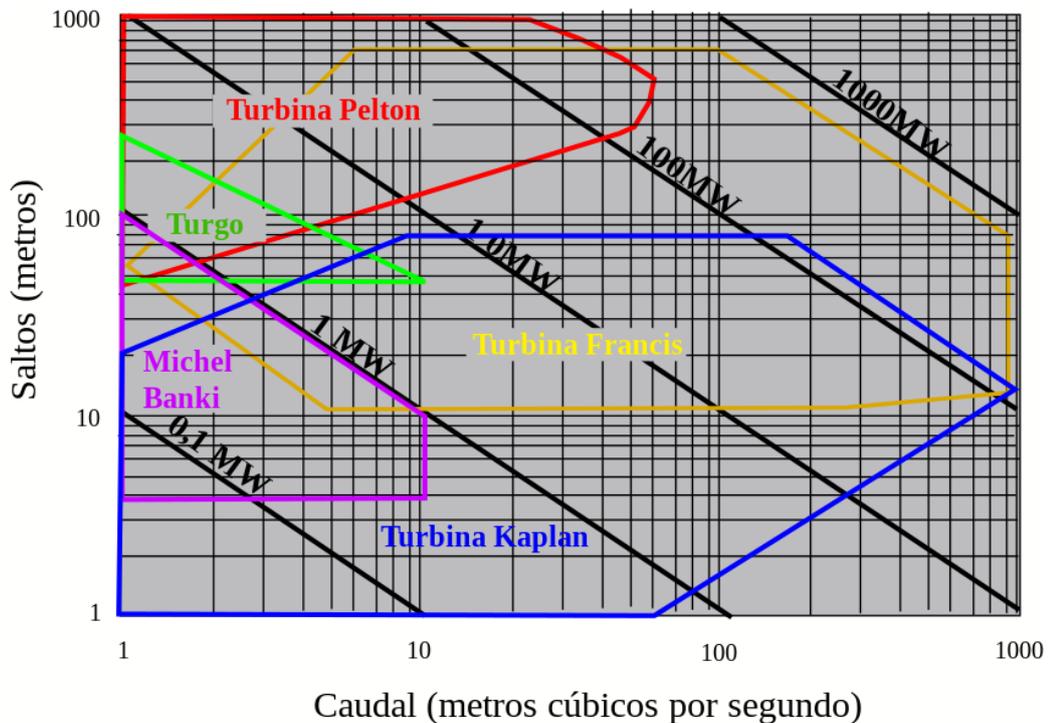


Corte transversal de una turbina Francis

El tubo de aspiración produce una depresión en la salida del rodete o, dicho, en otros términos, una succión.

4. Ámbito de aplicación

El campo de aplicación es muy extenso, dado el avance tecnológico conseguido en la construcción de este tipo de turbinas. Pueden emplearse en saltos de distintas alturas (entre 10 y 800 m aproximadamente) dentro de una amplia gama de caudales (entre 2 y 200 m³/s aproximadamente). Por su gran versatilidad y alta eficiencia, este tipo de turbina es el más utilizado en el mundo en la actualidad.



Considerando la siguiente clasificación, en función de la velocidad específica del rodete, cuyo número de revoluciones por minuto depende de las características del salto.

- Turbina Francis lenta: para saltos de gran altura (alrededor de 200 m o más).
- Turbina Francis normal: indicada en saltos de altura media (entre 200 y 80 m).
- Turbinas Francis rápidas y extrarrápidas: apropiadas para saltos de pequeña altura (inferiores a 80 m).

5. Clasificación de turbinas Francis

5.1. Velocidad específica

El parámetro más utilizado en relación con el dimensionamiento y diseño de una turbina de características determinadas (caudal, salto, velocidad de giro y potencia) es la velocidad específica. Entonces se puede definir como:

$$n_s [rpm] = \frac{n \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Siendo:

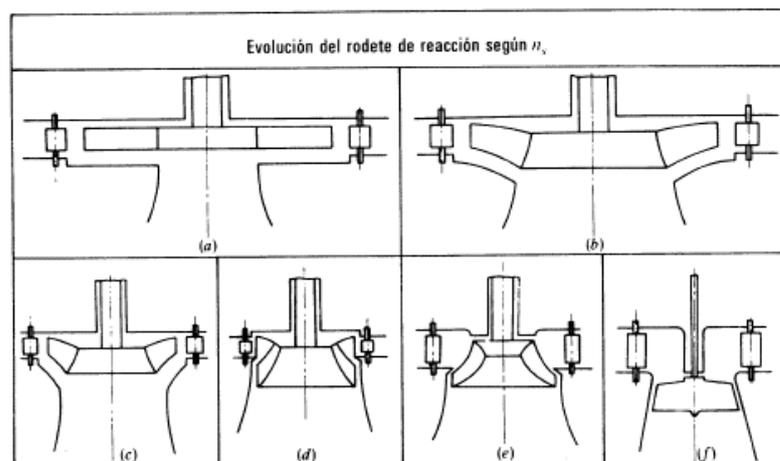
n : Revoluciones por minuto [rpm]

P : Potencia del eje [kW]

H : Salto neto [m]

Al analizar esta expresión se comprueba que, a grandes alturas, para una velocidad y una potencia de salida dadas, se requiere una máquina de velocidad específica baja como una rueda de impulso. En cambio, una turbina de flujo axial con una alta velocidad específica es la indicada para pequeñas alturas. Sin embargo, una turbina de impulso puede ser adecuada para una instalación de poca altura si el caudal (o la potencia requerida) es pequeño, pero, a menudo, en estas condiciones el tamaño necesario de la rueda de impulso llega a ser demasiado grande.

Además, de esta ecuación se observa que la velocidad específica de una turbina depende del número de revoluciones por minuto; cantidad que tiene un límite, y además debe tenerse en cuenta que para cada altura o salto existe un cierto número de revoluciones con el que el rendimiento es máximo. También depende de la potencia P a desarrollar, función a su vez del caudal Q de que pueda disponer, y de la altura H del salto. Fijada la potencia y el caudal aprovechable, el valor de la velocidad específica indica el tipo de turbina más adecuado.



Tipos de turbina Francis según velocidad específica

El rodete de una turbina de reacción se adapta a las exigencias de Q , H y n . De (a) a (f) la turbina se adapta a caudales relativamente mayores y a alturas de salto relativamente

menores: **(a)** rodete radial centrípeto; **(b)** $n_s = 45$: Francis lenta; **(c)** $n_s = 110$; **(d)** $n_s = 200$: Francis normal; **(e)** $n_s = 400$: Francis exprés; **(f)** $n_s = 800$: hélice o Kaplan.

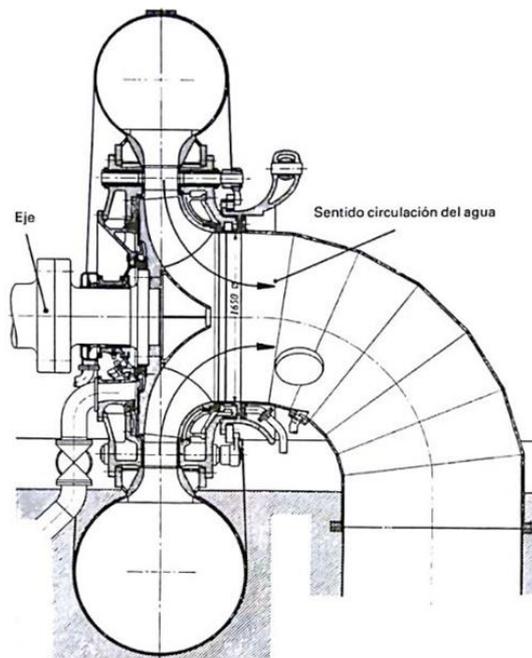
	Francis Lentas	Francis Normales	Francis Rápidas	Extrarrápidas
Salto H	$\leq 500\text{m}$	$\leq 300\text{ m}$	$\leq 80\text{ m}$	$\leq 40\text{ m}$
Velocidad específica n_s	$< 100\text{ rpm}$	100 rpm - 200 rpm	200 rpm - 300 rpm	300 rpm - 400 rpm

Clasificación de turbinas Francis según velocidad específica

5.2. Posición del eje

Las turbinas Francis pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal o vertical siendo esta última disposición la más generalizada por esta ampliamente experimentada, especialmente en el caso de unidades de gran potencia.

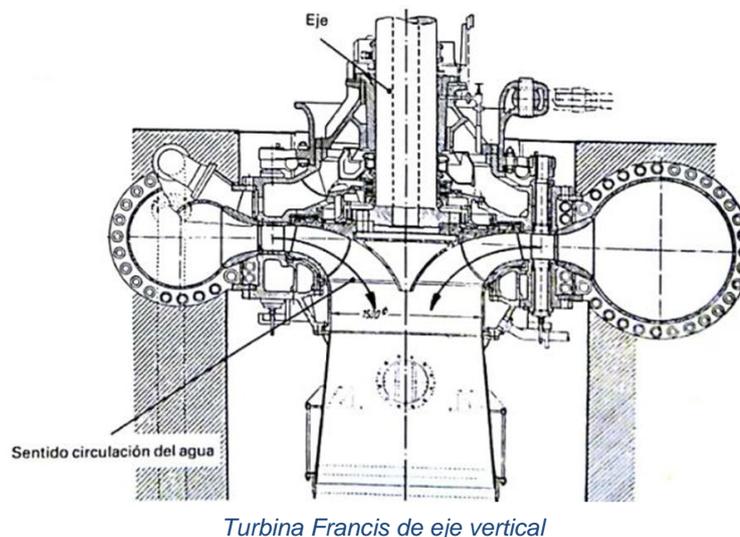
- Turbinas de eje horizontal:
 - Ventajas
 - Separación completa de la turbina y el generador.
 - Disposición ventajosa de la sala de máquinas ya que la turbina y el generador están situados al mismo nivel.
 - Fácil montaje.
 - Facilidad de reparaciones en la turbina y en el generador.
 - Costo reducido de la turbina y el generador.
 - Desventajas
 - Generalmente para turbinas chicas de baja potencia.
 - Son de baja eficiencia.
 - Poseen un tubo difusor corto.



Turbina Francis de eje horizontal

- Turbinas de eje vertical:

- Ventajas
 - Gran utilización de este tipo de turbinas.
 - Pueden ser turbinas grandes.
 - Generan grandes potencias.
 - Tubo difusor largo.
- Desventajas
 - La turbina y el generador están soportadas por un cojinete axial común.
 - Al estar superpuestas la turbina y el generador, requiere una sala de máquinas de por lo menos, dos plantas.
 - El montaje es más difícil.
 - Los dispositivos de engrase (sobre todo del cojinete axial) son más complicados.
 - El costo es superior en aproximadamente, un 20 % a igualdad de las demás condiciones.



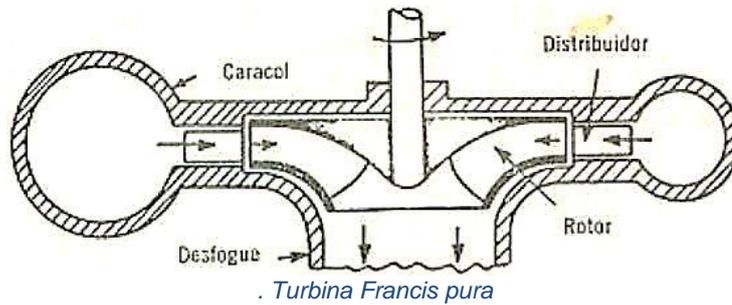
5.3. Dirección de flujo respecto al eje de rotación

Cuando el paso del agua por el rotor se efectúa en dirección radial, las máquinas se llaman radiales, de las cuales, el tipo más representativo es la turbina Francis. Cuando el paso por entre los álabes se hace en la dirección del eje de la máquina, se dice que ésta es de tipo axial, de las que son ejemplo la turbina Kaplan.

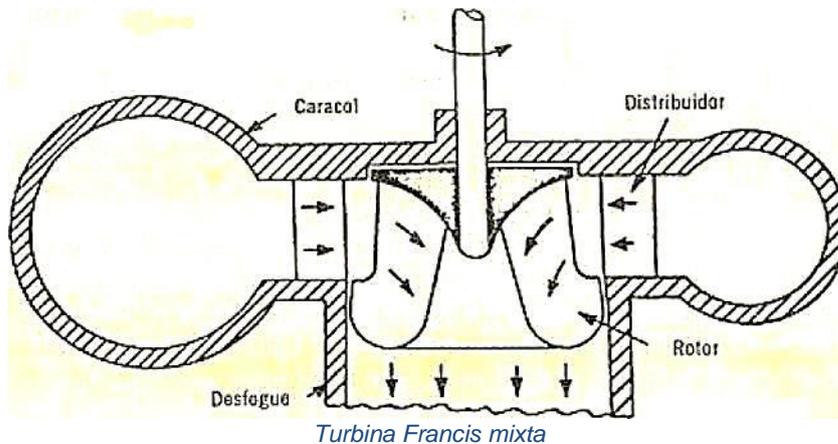
La turbina Francis ha evolucionado mucho en el curso de este siglo, encontrando buena aplicación en aprovechamientos hidráulicos de características muy variadas de carga y caudal. Se encuentran turbinas Francis en saltos de agua de 30 metros como también en saltos de 550 metros y con caudales que a veces alcanzan 200 m³/s por segundo y otras sólo de 10 m³/s. Esta versatilidad ha hecho que la turbina Francis sea la turbina hidráulica más generalizada en el mundo hasta el momento actual. De acuerdo con la ponderación de la carga sobre el caudal o viceversa, se originan unas particulares características en la máquina, que dan lugar a dos tipos, no siempre completamente definidos: la Francis pura y la Francis mixta.

En la Francis puramente radial, prácticamente toda la transferencia energética de fluido a rotor se efectúa mientras el agua pasa a través de los álabes, todo el tiempo, en dirección radial y de afuera hacia dentro, con un aprovechamiento máximo de la acción centrípeta, para lo cual se procura siempre dar al agua un recorrido radial relativamente largo. Sin embargo, se hace difícil el desfogue central, por lo que el gasto se halla en cierta manera limitado. Se

justifica este tipo de Francis pura en los saltos de agua con cargas relativamente grandes y caudales relativamente reducidos.



En la Francis mixta, el agua recorre los alabes en dirección radial y de afuera hacia dentro sólo en una parte de los mismos (la superior), terminando el agua su recorrido por entre los alabes en dirección axial (vertical hacia abajo en las máquinas de eje vertical), en cuya fase 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 caudal disponible. Evidentemente la acción axial se acentúa cuando aumenta el caudal con relación a la carga, para una determinada potencia. La disposición del rodete para un recorrido axial del agua permite desalojar gran caudal. En la turbina Francis mixta, para lograr la doble acción, los alabes deben tener un alabeo muy particular, que los hace aparecer alargados en dirección axial, presentando conjuntamente una forma abocardada que, naturalmente, facilita el desfogue de mayor caudal. La Francis mixta tiene así aplicación en saltos de agua de cargas medianas y bajas, con caudales medianos y relativamente grandes.



6. Componentes

Componentes principales de una turbina Francis

En el orden del paso del agua, los principales componentes de una turbina Francis son:

- ✓ Cámara espiral
- ✓ Pre-distribuidor
- ✓ Distribuidor
- ✓ Rodete
- ✓ Tubo difusor

A continuación, se explicarán cada uno de ellos:

6.1 Cámara espiral

La cámara espiral es un ducto alimentador, de sección generalmente circular y diámetro decreciente, que circunda al rodete, procurando el fluido necesario para la operación de la turbina. Del caracol pasa el agua al distribuidor guiada por unas paletas direccionales fijas a la carcasa (pre-distribuidor).

Debido a su diseño, se consigue que el agua circule con velocidad relativamente constante a medida que va ingresando al distribuidor y entregando caudal sin formar torbellinos, disminuyendo pérdidas de carga.



Cámara espiral

6.2 Pre-distribuidor

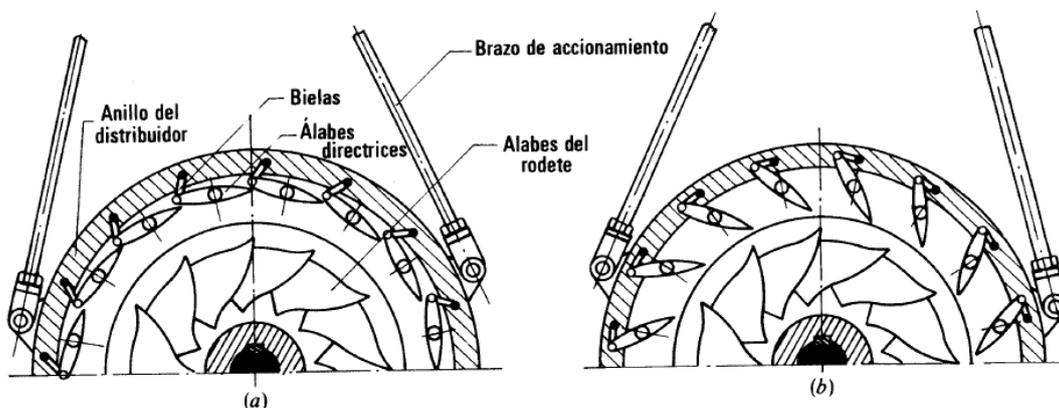
En la zona periférica interna, totalmente concéntrica con el eje de la turbina, y siguiendo planos paralelos, perpendiculares a dicho eje, se encuentra una abertura circular, formando un anillo, cuyos extremos están enlazados perpendicularmente por una sucesión de palas fijas, situadas equidistantemente unas de otras, a lo largo del contorno de la circunferencia descrita por dicho anillo, a través del cual, y por toda su periferia, fluirá el agua, cubriendo la totalidad de los orificios así formados. La zona mencionada, se suele denominar pre-distribuidor, ante-distribuidor o anillo traviesa.



En la imagen se puede observar una cámara espiral y en su zona periférica interna se ven unas paletas fijas que dirigen el ingreso de agua. Estas constituyen el pre-distribuidor.

6.3 Distribuidor

El distribuidor lo constituye una serie de álabes directores en forma de persiana circular cuyo paso se puede modificar con la ayuda de un servomotor, lo que permite imponer al fluido la dirección de ataque exigida por el rodete móvil y además regular el gasto de acuerdo con la potencia pedida a la turbina, desde valores máximos a un valor cero, en posición cerrada. En el distribuidor se transforma parcialmente la energía de presión en energía cinética.



Detalle del funcionamiento de los álabes del distribuidor. A) Distribuidor cerrado; b) distribuidor abierto.

Palas directrices

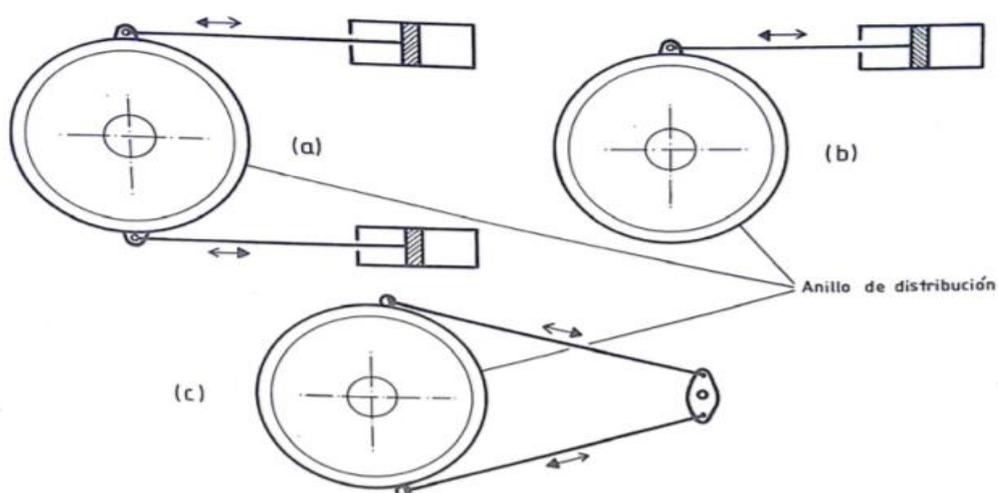
Todas las palas directrices, cuyo número oscila aproximadamente entre 12 para las turbinas pequeñas y 24 para las grandes, son exactamente iguales y conservan entre sí idénticas posiciones respecto al eje de turbina.



Palas directrices de un distribuidor.

Servomotores

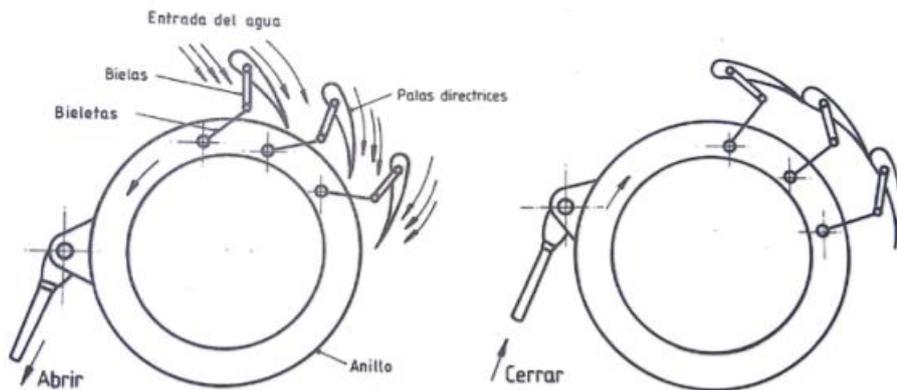
Normalmente son dos, cada uno de los cuales, accionado por aceite a presión según órdenes recibidas del regulador, desplaza una gran biela, en sentido inverso una respecto de la otra, a modo de brazos de un par de fuerzas, proporcionando un movimiento de giro alternativo a un aro móvil, llamado anillo o volante de distribución, concéntrico con el eje de la turbina.



Esquemas de accionamiento del anillo de distribución: a) por servomotores; b) y c) por un servomotor

Anillo de distribución

Con sus movimientos, en sentido de apertura o cierre total o parcial, hace girar a todas y cada una de las palas directrices, por medio de palancas de unión entre éste y la parte superior de cada uno de los ejes respectivos de aquellas. El giro conjunto y uniforme de las palas directrices, permite variar la sección de paso de agua a través del distribuidor. Las palancas mencionadas reciben el nombre de bieletas y bielias, según el sentido desde el anillo de distribución hacia las palas directrices. El accionamiento puede ser interior o exterior, respecto



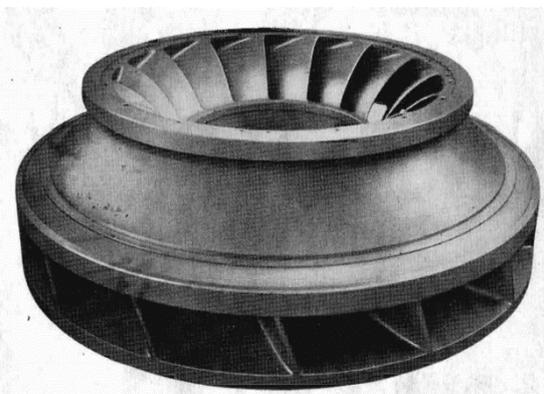
Accionamiento de las palas directrices con el anillo de distribución

a la circunferencia descrita por los alabes.

6.4 Rodete

El rodete móvil o rotor está conformado por los propios álabes, los cuales se colocan en un plato perpendicular al eje de la máquina, de cuyo plato arrancan siguiendo la dirección axial, tomando en forma progresiva un alabeo y abriéndose hacia la dirección radial, con lo que el conjunto presenta forma abocardada, tanto más acentuada cuanto mayor sea la sección axial exigida a la turbina. Los álabes se ciñen en su extremo final por zuncho en forma de anillo para dar la debida rigidez al conjunto.

Para saltos grandes y caudales relativamente reducidos se pueden utilizar rodetes Francis de flujo radial. Para saltos medianos y bajos y caudales medianos a relativamente altos, se suelen



Rodete Francis Radial

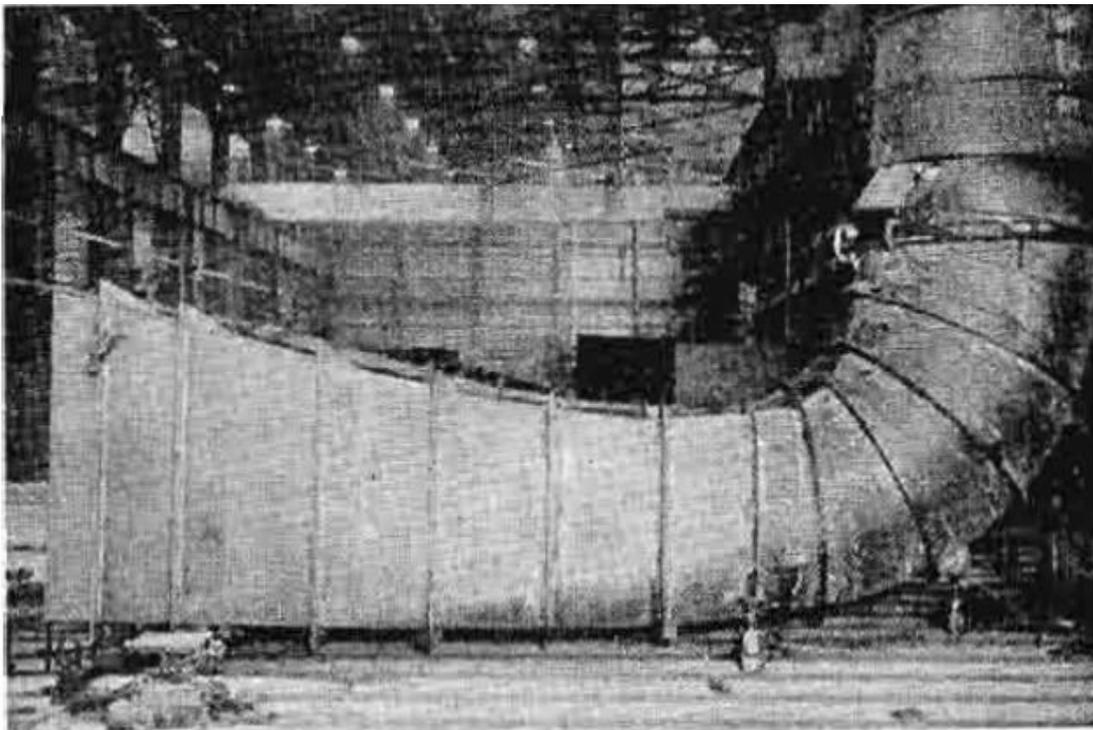


Rodete Francis Mixto

emplear rodetes Francis mixtos.

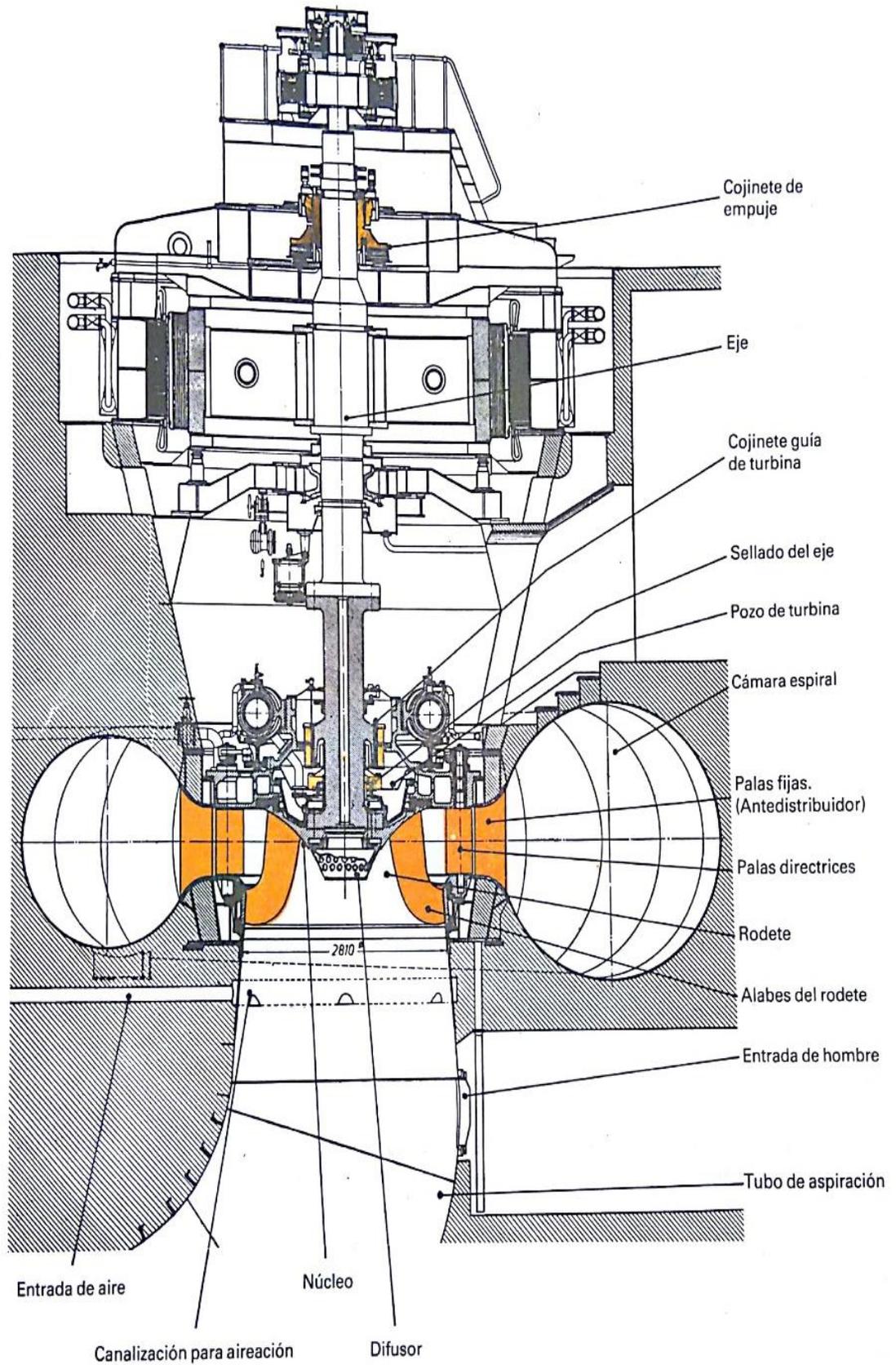
6.5 Tubo difusor

El tubo de desfogue o difusor da salida al agua de la tubería y al mismo tiempo procura una ganancia en carga estática hasta el valor de la presión atmosférica, debido a su forma divergente. Se tiene así a la salida del rodete una presión más baja que la atmosférica y, por lo tanto, un gradiente de presión dinámica más alta a través del rodete. Su forma puede ser simplemente cónica (tubo Moody) o más compleja cuando es acodada (la sección es cónico-elíptico-rectangular). La forma acodada permite colocar el rodete móvil más próximo al nivel de aguas abajo, exigencia que se tiene particularmente en las máquinas de velocidad específica alta, o sea, las Francis mixtas, con mucha acción axial, que se emplean con más grandes caudales.



Tubo de desfogue de sección cónico- elíptico-rectangular

Estos componentes regulan el comportamiento hidráulico para permitir la transferencia de energía del agua a la turbina. A partir de esto, la turbina se acopla a un eje rotatorio que está unido en su parte superior al rotor del generador, el cual posee polos que giran produciendo una variación del campo magnético que se produce en el bobinado del estator, lo cual genera energía eléctrica, la cual a partir de un transformador eleva su voltaje permitiendo su conducción a los centros de consumo. Otro elemento importante a mencionar son los cojinetes guía y de empuje. Los primeros impiden el desplazamiento lateral del eje de la turbina mientras que los segundos impiden movimiento vertical del eje. A continuación, podemos observar una imagen que resume los componentes que hemos explicado:



Esquema general de una turbina Francis

7. Cavitación

La cavitación en máquinas hidráulicas es el resultado de una reducción en la presión del líquido cuando se acelera al trasladarse a lo largo de superficies curvas. El cambio de fase se originará en la superficie del sólido o bien en el medio fluido, donde se detecta vaporización de núcleos

Los flujos o las corrientes cavitantes pueden erosionar las superficies sólidas al colapsar las burbujas como consecuencia de un nuevo aumento de la presión por encima de la presión de saturación del fluido (y siempre que estas burbujas se encuentren lo suficientemente cerca de las superficies: colapso no es sinónimo de erosión).

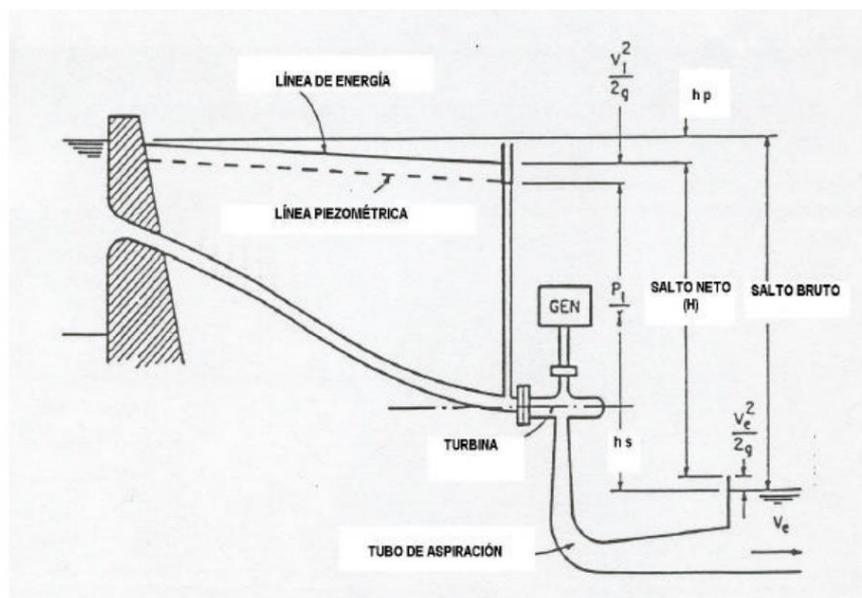
Esta es la razón fundamental por la que conviene evitar, en la medida de lo posible, la presencia de flujos cavitantes en máquinas hidráulicas.

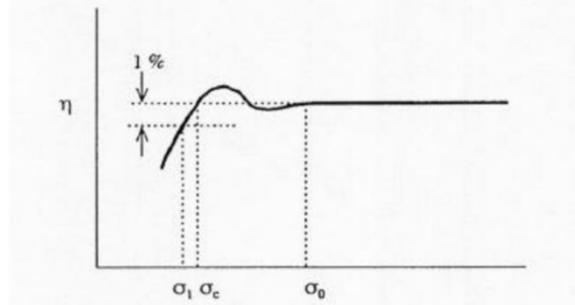
7.1 Tipos de cavitación en turbinas Francis

En el caso de las turbinas hidráulicas, la cavitación se caracteriza por un coeficiente: el de Thoma. Comenzamos definiéndolo.

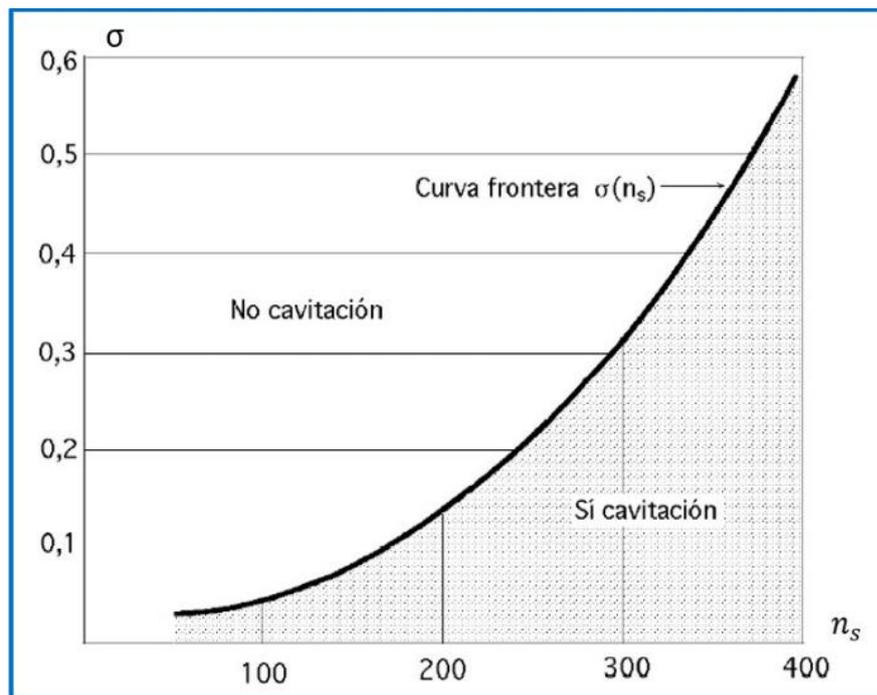
$$\sigma = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n}$$

En este caso, los subíndices a y v , representan la altura de presión atmosférica y la altura de presión de vapor, respectivamente. H_n es el salto neto de la turbina y H_s es la altura de sumergencia (altura de la configuración de la turbina respecto del nivel del agua en la restitución).





Sigma critico

Grafico obtenido experimentalmente n_s vs σ

La cavitación se puede presentar de dos formas, como incipiente o constante:

- ✓ **Cavitación incipiente:** Se define como la condición del flujo en el cual la cavitación comienza a ser detectable. Usualmente se identifica con sonidos suaves e intermitentes que pueden ser detectados por el oído humano o mediante la asistencia de hidrófonos o acelerómetros.
- ✓ **Cavitación constante o crítica:** Se define como la situación del flujo en la que aparece cavitación continua en un grado moderado. Puede identificarse por medios de detección sonora (se caracteriza por ruidos de intensidad inferior a 80 dB).

1. Cavitación conducida (travelling)

Luego de iniciada la cavitación, las burbujas de vapor viajan a lo largo de la superficie de los álabes cubriendo gran parte de ellos, esto normalmente sucede cuando la cavitación está en su

forma constante o crítica. Este alojamiento de burbujas impide que se realice de forma normal la transferencia de energía entre el fluido y el rodete.

2. Cavitación en borde de entrada lado succión (BELS)

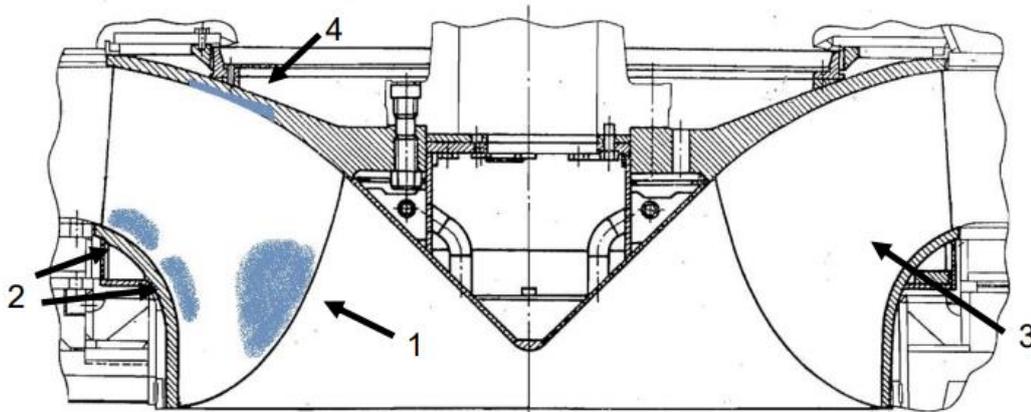
Prácticamente no depende de la sumergencia, sino del diseño del rodete. Es muy peligrosa, provoca socavación de material (pitting). En este caso se produce una migración de burbujas desde la zona de baja presión hacia la zona de alta presión en donde terminan implosionando generando vibraciones de alta frecuencia muy destructivas. Suele aparecer en las regiones de operación de saltos altos. En los prototipos, el daño es a menudo muy variable según el alabe considerado. Se desarrolla cerca de borde entrada, cerca de cubo o banda. Contra la banda puede producir daños a los álabes en forma muy rápida (pocas horas de operación).

3. Cavitación en borde de entrada lado presión (BELP)

Este tipo de cavitación no depende mucho del nivel de sumergencia, es de tipo no erosiva, aunque produce mucho ruido y vibraciones tanto en modelo como en prototipo. Se puede decir que la burbuja no migra, sino que queda encapsulada en la zona de presión. Suele aparecer en las áreas de operación de saltos bajos.

4. Cavitación por vórtices (vortex cavitation)

A la salida del rodete aparece un vórtice cavitante en el tubo de aspiración cuando se trabaja a cargas parciales o con sobrecargas. Esta antorcha provoca oscilaciones de presión que pueden traducirse en fluctuaciones no deseadas de par en el eje de la turbina, acompañado de un notable nivel de vibraciones



Tipos de cavitación

7.2 Influencia de la cavitación en turbinas Francis

Las consecuencias que convierten en dañina la presencia de la cavitación son:

- ✓ La formación de inestabilidades de carga parcial, consecuencia de trabajar con caudales inferiores al de diseño.
- ✓ La formación de antorchas por sobrecarga (caudales de funcionamiento superiores al de diseño).
- ✓ Aparición de ruido y vibraciones.
- ✓ Disminución de prestaciones de las turbinas Francis (caída del rendimiento), reduciendo la fiabilidad de nuestras instalaciones.
- ✓ Desarrollo de procesos erosivos.

- ✓ Incremento en los gastos de mantenimiento (no hablamos únicamente del coste asociado a la sustitución de las piezas afectadas, sino al costo del número de horas sin producción).

7.3 Beneficio de la forma del tubo difusor en la turbina francis

La presión a la salida del rodete puede llegar a descender de manera peligrosa, favoreciendo el fenómeno de la cavitación.

La solución más económica no consiste en construir una turbina en la cual se excluya totalmente la cavitación. En la práctica se construyen turbinas en las cuales se llega a producir una cavitación "controlada". Esto producirá un cierto desgaste en los álabes, pero sin que llegue a afectar de manera inaceptable al rendimiento de la máquina. Esto se tiene que tener presente a la hora de planificar el mantenimiento de las centrales hidroeléctricas.

La consecuencia beneficiosa de la geometría del tubo difusor guarda relación con la presencia de la cavitación, ya que la forma del tubo difusor cónica elíptica rectangular permite colocar la turbina en un nivel inferior a la restitución.

A la salida del rodete el flujo de agua a través del tubo difusor crea un "colchón" de agua, que aumenta la presión entonces disminuye esa caída de presión que causa la cavitación.

8. Velocidad síncrona y velocidad de embalamiento

8.1. Velocidad síncrona

Los alternadores acoplados a las turbinas hidráulicas no pueden girar con una velocidad arbitraria, sino que, al estar conectados a la red eléctrica, deben girar con una velocidad n que origine una corriente alterna con la frecuencia propia de la red; llamando a esta frecuencia f y al número de pares de polos del alternador $2p$, se debe verificar que:

$$n = \frac{60 \cdot f}{2p}$$

Las frecuencias más usuales son 50 Hz en Europa, el Cono Sur de América Latina, África y Asia (excepto parte del Japón) y 60 Hz en el resto de los países americanos y del Japón. Las velocidades de giro correspondientes a esta condición se denominan velocidades de sincronismo o síncronas y, dependen del número de pares de polos utilizado. En las máquinas lentas con más de 10 pares de polos, solo se utiliza un número par de pares de polos para simplificar la construcción del alternador.

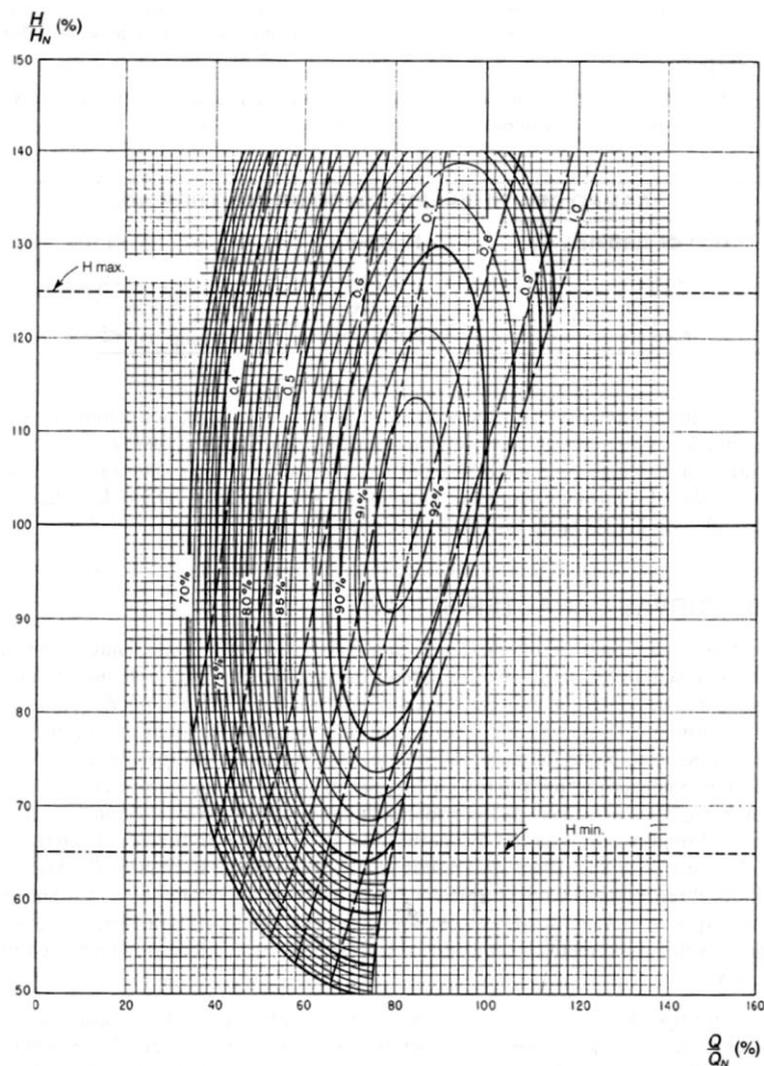
8.2. Velocidad de embalamiento

Cuando se retira bruscamente la carga eléctrica del alternador, el distribuidor de la turbina comienza a cerrarse para reducir el caudal de agua admitido pero, mientras se completa el proceso de cierre, el grupo se acelera como consecuencia del exceso de energía hidráulica utilizada. La velocidad máxima se alcanza coincidiendo con el cierre total y su magnitud depende de la ley de cierre del distribuidor, del rendimiento de la turbina fuera del campo de utilización normal, de la inercia del grupo y de la masa de agua en movimiento. Suele oscilar entre el 130% y 160% de la velocidad síncrona para las turbinas de tamaño medio y grande, y entre el 140% y 180% para los grupos pequeños.

No obstante, si por una operación defectuosa el distribuidor no cierra totalmente, se sigue turbinando un caudal de agua que depende del grado de apertura y de las características de la turbina, con lo que el grupo se acelera hasta alcanzar una velocidad límite con la que se anula el rendimiento de la turbina. La velocidad de giro correspondiente a esta situación y a una apertura total del distribuidor se denomina velocidad de embalamiento y constituye un estado límite para el diseño mecánico de la turbina, del alternador y de los equipos auxiliares como cojinetes, equipo de engrase, etc. La velocidad de embalamiento se estima mediante un coeficiente multiplicador de la velocidad nominal que, por lo general, oscila en torno de 1,8 para las TF; 1,9 para las TP; 2,2 para las TK de eje vertical y 2,8 para las de eje horizontal.

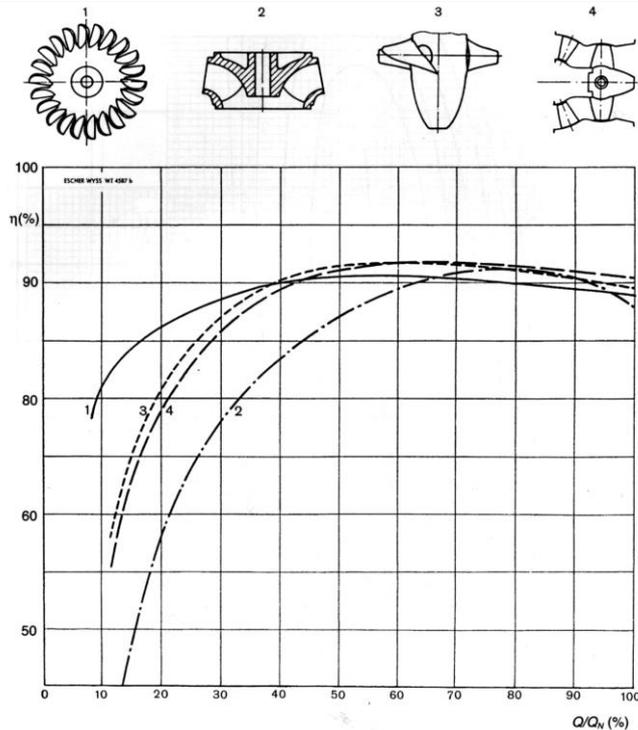
9. Curvas características

Las condiciones de operación de una turbina se definen mediante diagramas que representan los parámetros de interés en función de H y Q o de otra pareja de variables que se juzgue más conveniente; en estos diagramas se puede representar el rendimiento, la potencia, el coeficiente de cavilación, la apertura del distribuidor, la orientación de las palas del rodete, etc., mediante isóneas que definen el lugar geométrico de los puntos en los que el valor del parámetro en estudio es constante. Este es el caso del siguiente gráfico, también conocidos como diagrama colinar o topográfico, donde se representa el rendimiento y grado de apertura del distribuidor en función de H/H_N y de Q/Q_N para TF y TK. Estos diagramas se han tomado del Bureau of Reclamation (1976) y representan valores típicos de los rendimientos obtenidos en los años 60, por lo que en la actualidad resultan algo conservadores; por otra parte, es de notar que el valor de n , métrico señalado en los gráficos está calculado con la potencia en CV.



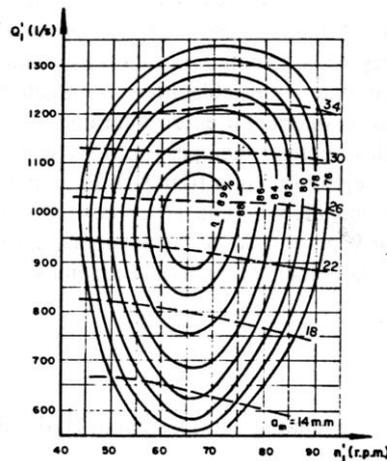
Curva de rendimiento TF

Otro tipo de representación habitual es el de la siguiente figura, en la que se establece el valor de un parámetro en función de una variable como el salto, el caudal o la apertura del distribuidor; en el caso de la citada figura se han representado los rendimientos típicos para el salto nominal de varios tipos de turbinas en función del caudal turbinado (en realidad de Q/Q_N , donde Q_N es el caudal nominal).



. Curvas de rendimiento típicas de TP, TF, TK y TB

Más interesantes que estos tipos de representación son las curvas características universales que en función de n y de q definen mediante isolíneas los parámetros de interés; estas curvas se obtienen mediante ensayos en modelos reducidos y son de aplicación a toda la serie de turbinas semejantes con la del modelo, haciendo la transformación correspondiente para pasar de las variables reducidas (n y q) a las variables absolutas (N , Q y H) mediante distintas expresiones.



Curva característica universal

ENSAYOS EN MODELOS

REDUCIDOS

TURBINA FRANCIS (modelo)

Curvas topograficas de igual rendimiento.

Diametro del modelo $D_m = 0,46$ m.

- Q' = caudal característico (l/seg.)
- n_1 = número de revol. característico (r.p.m.)
- η = rendimiento (%)
- a = apertura del distribuidor (m.m.)

Con la ayuda de estos diagramas se puede obtener el diámetro del rodete y la velocidad de giro más convenientes para las condiciones de la turbina en estudio así como definir el campo de operación más interesante; una vez establecidas las características de la turbina se puede delimitar el campo de operación en el diagrama $n - q$ y transformar las variables para obtener las representaciones gráficas específicas como las de la. Como ejemplo, en la se presentan las curvas correspondientes al modelo de una TF en las que se define el rendimiento, la apertura del distribuidor y, en el caso de las primeras, la orientación de las palas del rodete, en función de la velocidad y caudal reducidos.

10. Ejemplos, fotografías y filmaciones de Turbinas Francis en Argentina

- **Complejo Hidroeléctrico FLORENTINO AMEGHINO**

Su construcción se inicia en el año 1943 y se termina el 19 de Abril de 1963, y bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E., comienza su operación el 4 de Noviembre de 1994. La presa es recta de hormigón compuesta por 25 módulos, con una altura sobre lecho del río de 70,00 m y una longitud de 255,00 m, lo que le permite almacenar 1258,40 Hm³. El caudal medio anual del río es de 48,13 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 920,00 m³/s. La central posee 2 turbinas Francis, con una potencia unitaria de 41,00 MW y una generación media anual de 160,00 GWh.



Vista de la turbina Francis de eje horizontal para arranque "en negro"

- **Complejo Hidroeléctrico CERRO PELADO**

Su construcción se inicia en el año 1974 y se termina en 1986 y, bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E., comienza su operación el 14 de Febrero de 1986. La presa principal es de materiales sueltos, tiene una altura sobre lecho del río de 104,00 m y una longitud de 410,00 m, lo que le permite almacenar 371,00 Hm³. Cuenta además con dos presas laterales a ambas márgenes, de iguales características, de 1450,00 m y 59,00 m respectivamente. El caudal medio anual del río es de 11,46 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 1600,00 m³/s. La central posee 4 turbinas Francis reversibles, que le permiten trabajar también como bomba de elevación de agua, con una potencia unitaria de 187,50 MW y una generación media anual de 970,00 GWh.



Vista de detalle de uno de los rodetes de las turbinas de la central de Cerro Pelado

- **Complejo Hidroeléctrico CABRA CORRAL**

Su construcción se inicia en Febrero de 1966 y se termina en 1972 y, bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E., comienza su operación. La presa es de materiales sueltos de eje curvo con una altura sobre lecho del río de 94,75 m y una longitud de 510 m, más otros 70 metros de una presa lateral, lo que le permite almacenar 2784,30 Hm³, el caudal medio anual del río es de 29,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 721,00 m³/s. La central posee 3 turbinas Francis, con una potencia unitaria de 34,60 MW y una generación media anual de 250 GWh.



Vista de la central con los tres grupos generadores de la misma, vista del rotor de una de las turbinas Francis

- **Complejo Hidroeléctrico EL CARRIZAL**

Su construcción se inicia el 30 de Junio de 1965 y termina el 27 de Noviembre de 1971 y comienza su operación bajo el control del Departamento de Irrigación de la provincia de Mendoza. La presa es de materiales sueltos de eje recto con una altura sobre lecho del río de 46,00 m y una longitud de 2113,00 m; lo que le permite almacenar 4620,00 Hm³, el caudal medio anual del río es de 33,70 m³/s. La central posee 2 turbinas tipo Francis, con una potencia unitaria de 8,50 MW y una generación media anual de 83 GWh.



Vista de uno de los grupos generadores, vista del rodete de la turbina Francis

- **Complejo Hidroeléctrico LOS REYUNOS**

Su construcción se inicia en el año 1980 y termina el 26 de Noviembre de 1983 y comienza su operación bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E. La presa es de materiales sueltos de eje recto con una altura sobre lecho del río de 106,00 m y una longitud de 295,00 m; lo que le permite almacenar 256,00 Hm³, el caudal medio anual del río es de 34,80 m³/s. La central posee 2 grupos turbina - bomba reversible, con una potencia unitaria de 115,00 MW y una generación media anual de 247 GWh.



Vista del rodete de la turbina



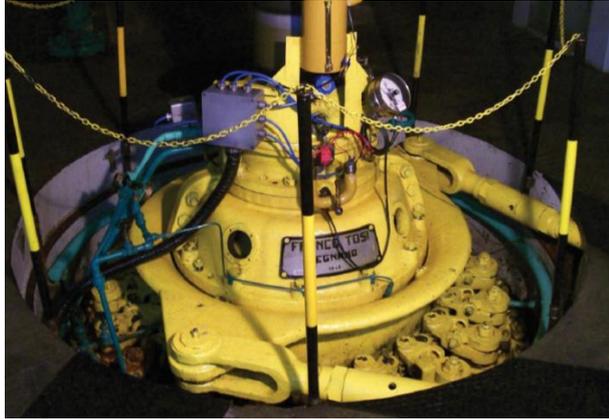
Vista de la maqueta del complejo puede apreciarse la válvula mariposa, la cámara espiral, la turbina, el escudo de protección y la estructura para las compuertas que cierran los conductos de restitución al río Diamante

- **Complejo Hidroeléctrico NIHUIL I**

Su construcción se inicia en el año 1942 y se termina en el año 1947, pero entrando en servicio en el año 1957. Comienza su operación bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E. La presa es de hormigón de eje curvo con una altura sobre lecho del río de 25,00 m y una longitud de 465,00 m, lo que le permite almacenar 263,13 Hm³, el caudal medio anual del río es de 32,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 230,00 m³/s. La central posee 4 turbinas Francis, con una potencia unitaria total de 18,56 MW y una generación media anual de 365,00 GWh.



Vista de la central con los cuatro grupos generadores de la central Nihuil I



Vista del anillo del distribuidor de una de las turbinas, se puede apreciar los brazos accionadores

- **Complejo Hidroeléctrico NIHUIL II**

Su construcción se inicia en el año 1967 y se termina en el año 1969, pero entrando en servicio en el año 1968. Comienza su operación bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S.E. La presa es de hormigón de eje recto con una altura sobre lecho del río de 40,00 m y una longitud de 85,00 m, lo que le permite almacenar 222,28 Hm³, el caudal medio anual del río es de 32,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 230,00 m³/s. La central posee 6 turbinas Francis, con una potencia instalada de 131,20 MW y una generación media anual de 380,00 GWh.



Vista de los seis generadores de la central Nihuil II



Rodete de una de las turbinas Francis de la central Nihuil II

11. Bibliografía

- Cuesta Diego, L., Vallarino, E., Aprovechamientos Hidroeléctricos, Tomo II, 2000.
- IBERDROLA, Endesa, Sevillana de Electricidad, UNION FENOSA, Centrales Hidroeléctricas, 1994.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos, Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina, 2011.
- Mataix, C., Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, 1993.
- Polo Encinas, M., Turbomáquinas Hidráulicas, 1975.