



FACULTAD DE INGENIERIA
en acción continua...



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

SEMINARIO

TURBINAS KAPLAN

2020

Alumnos:

- Angel Amaya
- Micaela Campuzano

Contenido

Introducción.....	3
Reseña histórica	3
Clasificación.....	4
1er clasificación.....	4
2da clasificación	5
3ra clasificación.....	5
Turbinas Kaplan.....	5
Funcionamiento	6
Campo de aplicación	6
Velocidad específica.....	7
Velocidad sincrónica	8
Velocidad de embalamiento	8
Órganos principales de una turbina Kaplan.....	9
Cámara espiral	9
Distribuidor	9
Rodete	11
Tubo difusor	12
Eje.....	13
Cojinete guía de la turbina.....	14
Cojinete de empuje.....	14
Mecanismos de regulación en turbinas Kaplan	15
Momento hidráulico	18
Cavitación.....	19
Parámetro de cavitación y posición de las turbinas de reacción respecto al nivel de aguas abajo	20
Proporción en las dimensiones en las turbinas Kaplan y de hélice	22
Ejemplos de aprovechamientos hidroeléctricos de Argentina donde utilizan turbinas Kaplan	24

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.

Una turbina hidráulica es la máquina destinada a transformar la energía hidráulica, de una corriente o salto de agua, en energía mecánica. Por lo tanto, toda turbina convierte la energía del agua, manifestada bien en su forma de presión (energía potencial o de posición) como en la de velocidad (energía cinética), en el trabajo mecánico existente en un eje de rotación. En términos generales, podemos definir a las turbinas hidráulicas como motores hidráulicos destinados a aprovechar las corrientes y saltos de agua.

Reseña histórica

El uso de la energía hidráulica no es nada nuevo y se remonta a más de 2000 años atrás, pero se desarrolló lentamente durante espacio de 18 siglos, debido al inconveniente de que las instalaciones deberían situarse junto a los ríos; mientras que las máquinas de vapor se podían instalar en cualquier lugar.

No se tiene mucha referencia de quién y cuándo se aprovechó por primera vez la fuerza y energía que posee una corriente de agua, pero pareciera que la idea proviniera de procedimientos de irrigación los que se empleaban para elevar el agua de los ríos a una altura mayor que la de sus márgenes, para que luego discurra por canales y zanjales empleándolas en sus distintas necesidades como el consumo, el campo, etc.

Las primeras ruedas hidráulicas se construyeron posiblemente en Asia, China e India, hace unos 2200 años; de Asia pasaron a Egipto y desde allí a Europa. Constituyéndose así las ruedas como las precursoras de las modernas turbinas hidráulicas.

El francés Parent, fue quien estudia por vez primera el funcionamiento de las ruedas hidráulicas y con el paso del tiempo Leonhard Euler (Suiza), en 1754, publica por primera vez la ecuación fundamental de las turbomáquinas, con la que se inicia el estudio de las turbomáquinas hidráulicas sobre una base científica. Así también, en 1827, Fourneyron logró construir la primera turbina hidráulica.

Al evolucionar la tecnología de la transmisión eléctrica, esta permitió el gran desarrollo de las plantas hidroeléctricas y, por consiguiente, de las turbinas hidráulicas. En este nuevo esquema de transformación de energías: energía hidráulica - energía mecánica - energía eléctrica, las ruedas hidráulicas debido en gran parte a que en ellas el agua entra y actúa únicamente en parte de la circunferencia no así en las turbinas en las cuales el agua lo hace en toda la circunferencia - tienen dos desventajas fundamentales: rendimiento bajo y velocidad de rotación muy lenta (4 a 10 rpm). Las turbinas hidráulicas nacieron para superar estas desventajas, y su evolución ha sido el aumento cada vez mayor de la velocidad de rotación y de su eficiencia con el fin de conseguir potencias específicas más altas, lo que permite generación eléctrica a más bajo costo.

A grandes rasgos, podemos resumir el desarrollo de las turbinas hidráulicas como sigue:

- El siglo XVIII es el siglo de su gestación.
- El siglo XIX el de su nacimiento (en este siglo nacieron en América las Turbinas Pelton y las Turbinas Francis).
- El siglo XX es el siglo de su desarrollo. A principios de este siglo aparecen las turbinas hidráulicas de gran velocidad.
 - 1905: en EEUU existen turbinas hidráulicas de 7360 kW girando a 250 rpm (turbinas Francis gemelas);
 - 1915: creación de la turbina Kaplan;
 - 1918: la turbina Banki;

- 1919: la turbina Turgo,
- 1950: la turbina Deriaz
- 1970: la turbina Bulbo.

Las turbinas hidráulicas, como ha podido notarse, son máquinas cuyo desarrollo no pertenece a las últimas décadas. Hace más de 2000 años que el hombre hace uso de ellas y poco más de un siglo que las principales casas constructoras de Europa, Asia y América realizan un esfuerzo sistemático con el objeto de perfeccionarlas. Su evolución no ha terminado sino por el contrario se ha acelerado en los últimos años ya que la necesidad de energía limpia cada día es mayor y los sitios disponibles exigen turbinas más rápidas, más compactas y sobre todo más eficientes.

Clasificación

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.

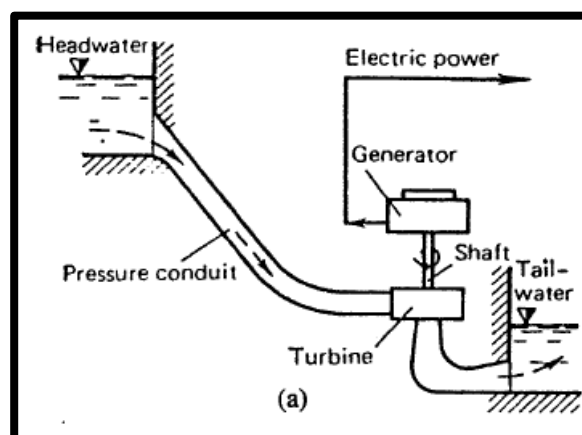
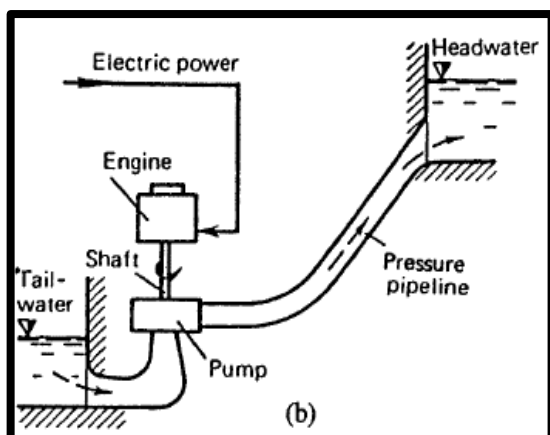
Dentro de las máquinas hidráulicas tenemos 3 tipos:

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

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

1er clasificación

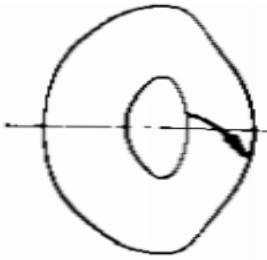
Una primera gran división que puede hacerse es, en máquinas que transfieren energía de rotor a fluido, denominadas bombas y compresores, y en máquinas que transfieren energía de fluido a rotor, llamadas turbinas.



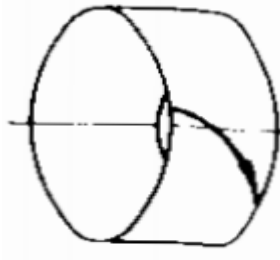
Bomba

2da clasificación

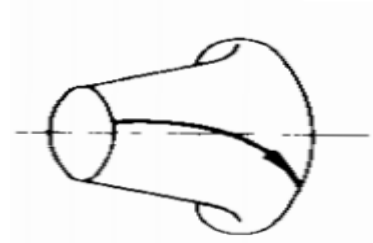
Una segunda gran clasificación se basa en la dirección que tiene el flujo a su paso por el rotor, y se tienen así máquinas de flujo radial y máquinas de flujo axial; algunas tienen los dos flujos, esto es, son de flujo mixto.



Flujo radial



Flujo axial



Flujo mixto

3ra 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: $Gr = H_p/H_t$

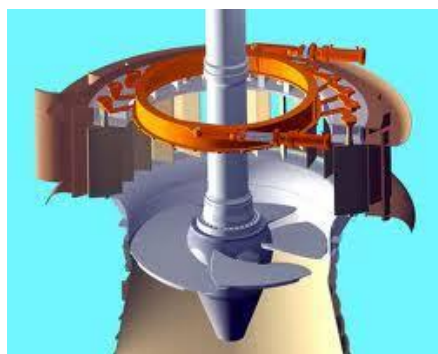
Donde H_p es la altura de presión y H_t es la altura total en el rodete. Es decir, es el cociente de la altura que da (bomba) o que absorbe (turbina) el rodete en forma de presión por la altura total que da (bomba) o que absorbe (turbina) el rodete.

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 Kaplan: 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 axial**; y son **turbinas a reacción**. Nos referimos a las turbinas **KAPLAN**.

Turbinas Kaplan

Las turbinas Kaplan son turbinas de hélice con álabes ajustables, de forma que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal y carga. Se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de potencia. Esta característica es importantísima para un rotor de hélice, pues es una de las deficiencias más notable que se advierten en las turbomáquinas de hélice de álabe fijo, en las cuales la incidencia del agua sobre el borde de

ataque se produce bajo ángulos inapropiados, dando lugar a separación o choques, que reducen fuertemente el rendimiento de la unidad. Puede, sin embargo, justificarse el empleo de turbinas de hélice de álabes fijos en aquellas instalaciones en las que no sea muy sensible la variación de potencia.

Las turbinas Kaplan, además de mantener buen rendimiento en la regulación del gasto o con las oscilaciones de la carga por variación de la cota de nivel del embalse, permite también aumentar el caudal por unidad, para una determinada carga y por tanto la potencia, con lo cual se puede reducir el número de unidades en ciertos aprovechamientos hidráulicos y en consecuencia disminuir los costos de primera instalación.

El número de álabes de una turbina Kaplan, varía de 4 a 9, correspondiendo a mayor velocidad específica menor número de álabes.

Funcionamiento

Las turbinas Kaplan son turbinas hidráulicas de reacción de flujo axial. A continuación, expondremos el principio de funcionamiento de estas turbinas.

1. Entre la entrada y salida del agua en el rodete existe una diferencia de presión.
2. El agua al atravesar el rodete posee energía cinética y energía potencial de presión.
3. El agua llena completamente los espacios entre los álabes, quedando sometida a presión. Por la curvatura de los álabes y la diferencia de presión entre la entrada y la salida del agua se origina un cambio de dirección y magnitud en la velocidad, que determina una reacción del agua sobre los álabes; y la componente normal al eje origina el movimiento del rodete.
4. La turbina hace girar al rotor del generador por estar ambos sujetos por un eje común. Por efecto electromagnético entre rotor y estator del generador se produce energía eléctrica.
5. Como señal exterior se puede notar que el rodete se encuentra en comunicación con aguas abajo por intermedio del tubo de aspiración.
6. Se consigue el aprovechamiento del salto, en parte por la presión del agua y su energía cinética, y en parte, por el tubo de aspiración.

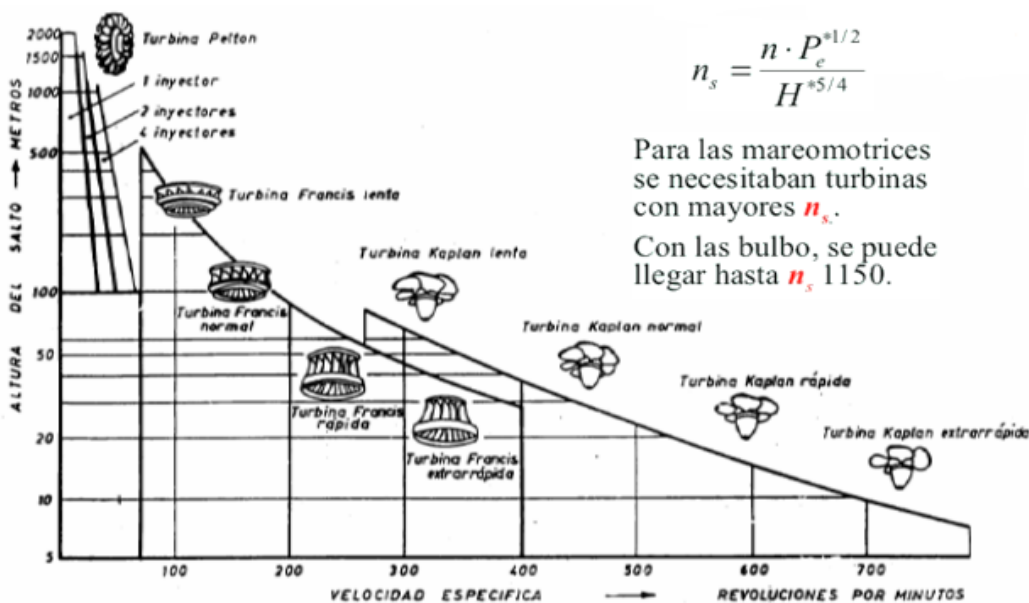
Campo de aplicación

Para seleccionar el modelo de turbina más adecuado para cada instalación, varios factores deben ser tenidos en consideración, entre ellos caída, caudal y velocidad específica.

Las turbinas Kaplan se utilizan para:

- Altura de caída: 7 – 50m
- Caudal: 0,5 – 1000 m³/s

- Velocidad específica: > 300 rpm (en las turbinas Francis con n_s del orden de 400, el agua no se puede



Campo de aplicación, función de la velocidad específica y altura de salto

guiar y conducir con precisión)

Velocidad específica

La velocidad específica es, sin duda alguna, el parámetro que mejor caracteriza a una turbomáquina, pues relaciona no sólo al caudal y la carga, variables fundamentales, sino también a la velocidad de giro, variable cinemática que sigue en importancia. Dos turbinas geoméricamente iguales y que operan en condiciones hidráulicas similares, tendrán la misma velocidad específica.

La velocidad específica es el número de revoluciones por minuto que tendría un rodete de diámetro unitario bajo un salto unitario para producir una potencia de 1kW.

La siguiente expresión permite calcular esta velocidad:

$$n_s = \frac{N * P^{1/2}}{H^{5/4}}$$

Donde:

- n_s : velocidad específica [rpm]
- N : velocidad de sincronismo [rpm]
- P : potencia de la turbina [kW]
- H : altura del salto [m]

Los valores de esta velocidad específica para los tipos de turbinas que hoy en día se construyen con mayor frecuencia (Pelton, Francis, Hélices y Kaplan) figuran en el siguiente cuadro:

Velocidad específica n_s	Tipo de turbina
De 5 a 30	Pelton con un inyector
De 30 a 50	Pelton con varios inyectores
De 50 a 100	Francis lenta
De 100 a 200	Francis normal
De 200 a 300	Francis rápida
De 300 a 400	Francis doble gemela o exprés
Más de 400	Kaplan o hélice

Velocidad sincrónica

En general, una turbina va acoplada a un alternador que ha de generar electricidad a una determinada frecuencia, 50 Hz para Argentina, por lo que su velocidad debe ser tal que, conjugada con el número de pares de polos, produzca esta frecuencia.

La relación que liga la velocidad del alternador n con el número de pares de polos z y con la frecuencia f de la corriente es:

$$f = \frac{z * n}{60} \rightarrow \text{para } f = 50\text{Hz} : zn = 3000$$

Las velocidades que cumplen la condición anterior se llaman velocidades sincrónicas; así, una turbina acoplada directamente a un alternador ha de tener una velocidad sincrónica de la forma:

Para, $z=1, n=3000 \text{ rpm}$; $z=2, n=1500 \text{ rpm}$; $z=3, n=1000 \text{ rpm}$; $z=4, n=750 \text{ rpm}$.

Velocidad de embalamiento

Cuando la turbina está funcionando en condiciones de plena carga, si se produce un rechazo de carga, la velocidad que esta puede llegar a alcanzar antes de que se corte el suministro del agua puede ser de varias veces la velocidad nominal.

Este embalamiento se debe a que se elimina bruscamente el par de freno que supone el generador (puesto que queda desconectado de la red), en tanto que el flujo de agua no ha sido eliminado.

El tiempo de corte del agua dependerá del tiempo de reacción del distribuidor de la turbina o de la válvula de guardia. Generalmente, las velocidades alcanzadas se encuentran entre el 130 y el 180 % de la velocidad nominal del grupo.

Sin embargo, si por alguna razón se produjera el fallo en los elementos de cierre, el agua seguiría fluyendo, actuando sobre la turbina y alcanzando mayores velocidades.

Se llama *velocidad de embalamiento* a la velocidad máxima que alcanza una turbina con el distribuidor en posición de máxima apertura y con el generador desconectado de la red. El valor de esta velocidad depende del tipo de turbina.

La velocidad de embalamiento es importante, puesto que es la velocidad máxima que van a alcanzar todos los elementos conectados al eje de la turbina, tales como el multiplicador y el generador, por lo que los cojinetes y el engrase deberán estar preparados para soportar estas condiciones extremas de funcionamiento. A mayor velocidad de embalamiento, mayor es el coste de estos sistemas.

Órganos principales de una turbina Kaplan

Al igual que las turbinas Francis (debido a que ambas son turbinas de reacción), los principales órganos de una turbina Kaplan son:

- Cámara espiral
- Distribuidor
- Rodete
- Tubo difusor

A continuación, se explicarán cada uno de ellos:

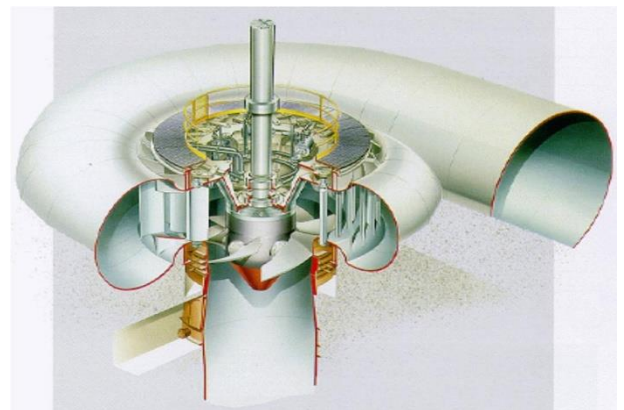
Cámara espiral

La cámara espiral es un ducto alimentador, cuya sección toroidal es decreciente y de forma circular o rectangular. Suele ser hormigón en muchos casos, debido a la gran capacidad de gasto que admite la turbina Kaplan. Circunda al rodete, procurando el fluido necesario para la operación de la turbina. Del caracol pasa el agua al 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.

Distribuidor

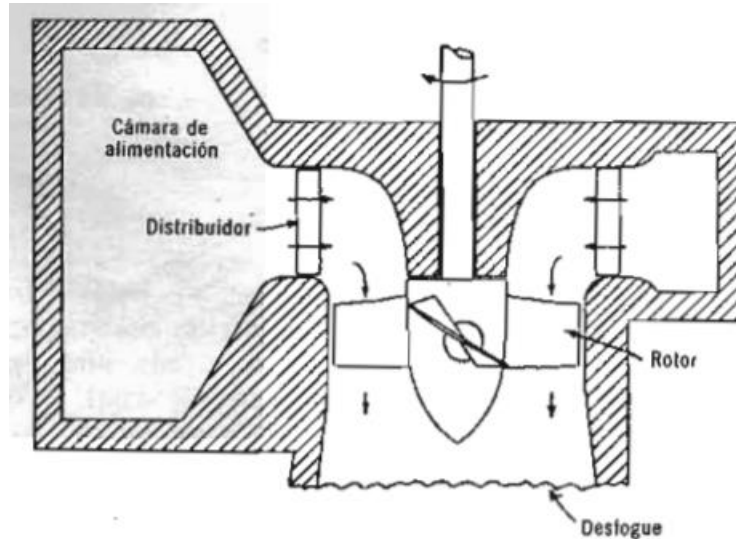
El distribuidor, que sigue a la cámara espiral, regula el gasto y además imprime al agua el giro necesario, en una zona de vórtices libres, que precede al rotor, propiciando el ataque adecuado del agua a los álabes para una transferencia de energía eficaz. Los álabes del distribuidor se ajustan automáticamente, de acuerdo con las necesidades de potencia, por medio de un servomotor ligado al gobernador que controla la velocidad del eje del



Cámara espiral de sección circular



Distribuidor

grupo turbina-generador.

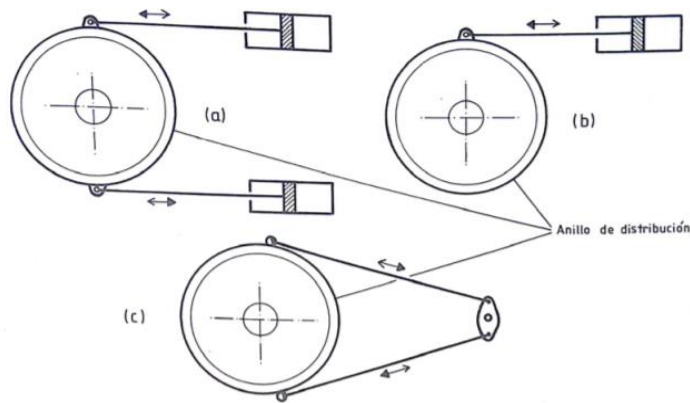
Esquema del paso del agua desde la cámara espiral al tubo de desfogue, pasando previamente por el distribuidor y luego de éste por el rodete de la turbina

Servomotores

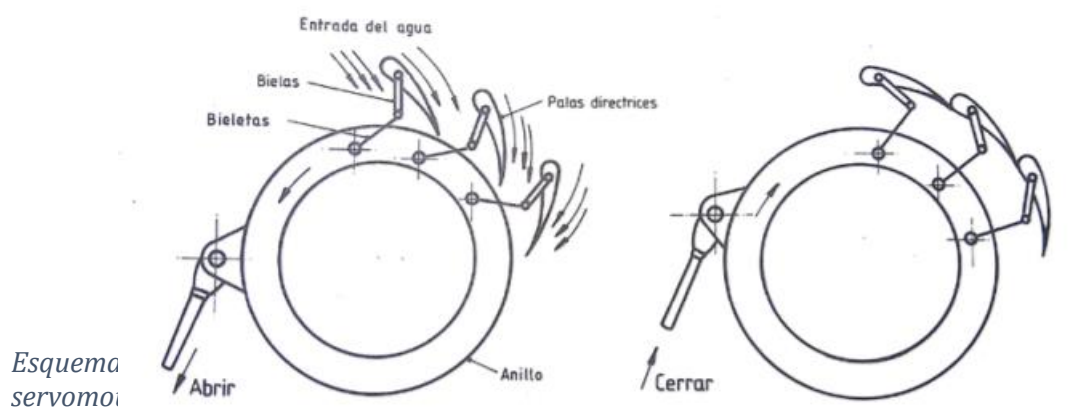
Normalmente son dos, cada uno de los cuales, accionado por aceite a presión según órdenes recibidas del regulador, desplaza una gran biela, en sentido inverso una respecto de la otra, a modo de brazos de un par de fuerzas, proporcionando un movimiento de giro alternativo a un aro móvil, llamado anillo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

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 a la



circunferencia descrita por los alabes



Accionamiento de las palas directrices con el anillo de distribución

Rodete

El rodete de la turbina, de forma de hélice, está constituido por un robusto cubo, cuyo diámetro es del orden del 40% al 50% del diámetro total al extremo de los álabes, en el cual van empotrados los álabes encargados de efectuar la transferencia de energía del agua al eje de la unidad.

La robustez del cubo se justifica no sólo por razones de resistencia mecánica sino también porque debe alojar en su interior el mecanismo de reglaje del paso de los álabes del rodete.

Los álabes del rodete tienen perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil de ala permite obtener una acción útil del agua sobre el álabe en el movimiento que aquella tiene respecto a éste. La forma helicoidal se justifica en virtud de que la velocidad relativa del flujo varía en dirección y magnitud con la distancia al eje de giro, debido a que la velocidad de arrastre se modifica en magnitud con el radio, suponiendo una velocidad angular constante

Se puede corregir la incidencia del agua en los álabes, por medio de un servomotor ajustado con el distribuidor y con el gobernador, con lo cual se logra mantener prácticamente el mismo valor del rendimiento para

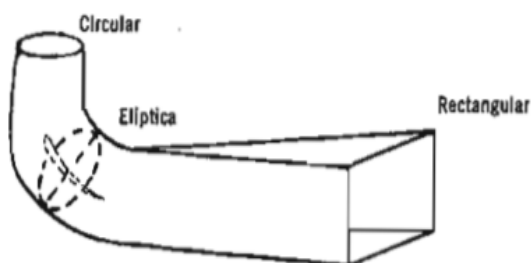


Rodete turbina Kaplan

diferentes condiciones de trabajo.

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.



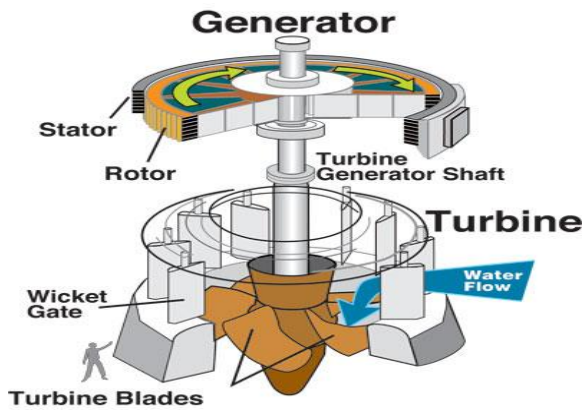
Tubo difusor tipo acodado



Tubo difusor tipo cónico

Además de estos componentes, existen otros que son los que posibilitan la generación eléctrica:

Eje
El eje de la turbina tiene ciertas peculiaridades cuando se encuentra instalado en posición vertical. Es por medio del eje de turbina que, al estar rígidamente unido mediante un acoplamiento al eje del generador, transmite al rotor del generador el movimiento de rotación.



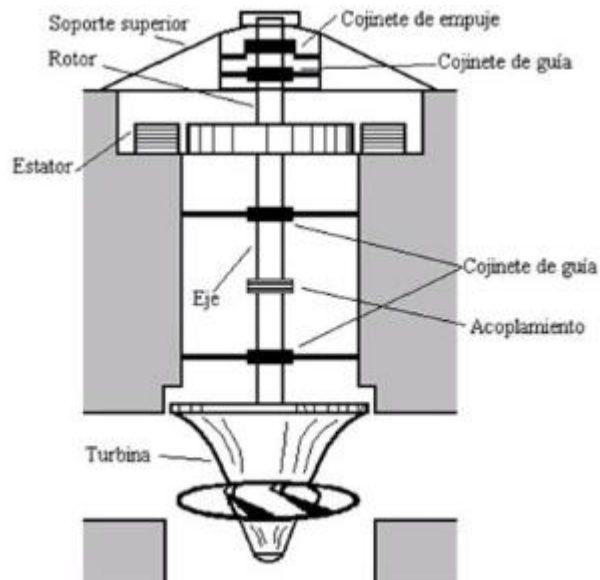
Transmisión de la rotación al rotor del generador por medio del eje

En instalaciones de este tipo, es sobre el eje del generador donde se dispone del sistema para soportar todo el peso del conjunto formado por: los ejes, el rotor del generador, la turbina y el empuje del agua sobre los álabes de la turbina. Este sistema es el denominado cojinete de empuje.



Eje de Turbina Kaplan de Caruachi

Además del cojinete de empuje, el eje completo del conjunto, dispone de hasta tres cojinetes guías, dos de ellos normalmente ubicados sobre el eje del generador y un tercero sobre el eje de la turbina. En determinados casos, por características constructivas y referidas a condiciones de peso y sustentación o de aireación del rotor, el eje es hueco en su totalidad.



Cojinete de empujes y cojinetes guías

Cojinete guía de la turbina

Constituye un anillo, normalmente dividido radialmente en dos mitades, o de una serie de segmentos, que se asientan perfectamente sobre el eje y las superficies en contacto están recubiertas de material antifricción.

Las superficies de contacto del cojinete está entallado, vertical o diagonalmente, a fin de favorecer la circulación de aceite y así lograr auto lubricación.

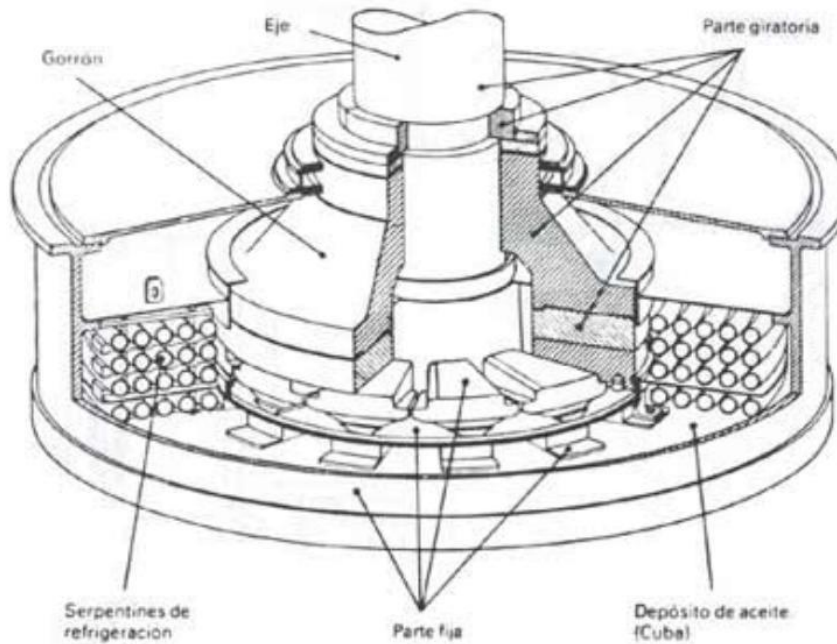
Cojinete de empuje

Este elemento, conocido también como soporte de suspensión, es un componente característico y necesario en todos los grupos (conjunto turbina-generator) de eje vertical su ubicación, respecto al eje del grupo varía según los tipos de turbina.

En el caso de grupos accionados por turbinas Pelton o Francis, el cojinete se ubica encima del rotor del generador. En el caso de turbinas Kaplan, puede estar localizado por debajo del rotor del generador.

La parte giratoria del cojinete está solidaria con el eje del grupo y descansa sobre la parte fija que se encuentra enclavada en las estructuras rígidas inmóviles próximas al eje. La parte giratoria consta de una pieza de material especial en forma anular, cuya superficie de contacto con la parte fija está perfectamente pulida, denominada espejo.

La parte fija está constituida, esencialmente por un número determinado de zapatas o segmentos conocidos como patines.



Cojinete de empuje

Los cojinetes de empuje, especialmente los de grupos grandes, disponen de un sistema de lubricación de aceite a presión, a fin de proporcionar lubricación desde el instante que el grupo comienza a girar, con lo que se logra la formación de una película de aceite que soporta la carga total. Dicha película, de milésimas de milímetro, ha de mantenerse desde el momento de arranque del grupo hasta la parada total del mismo. Cuando el grupo adquiere una velocidad predeterminada, aproximadamente el 30% de la normal de funcionamiento, el sistema de aceite a presión queda desconectado, manteniéndose la capa de lubricación como consecuencia del baño de aceite que cubre las zonas en contacto.

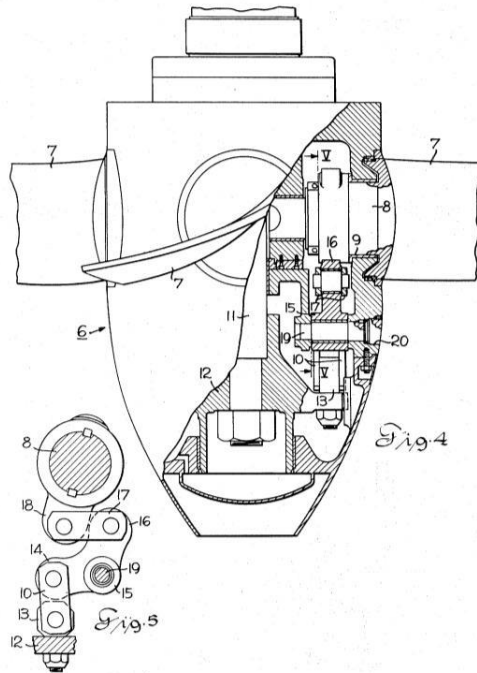
Mecanismos de regulación en turbinas Kaplan

Las turbinas Kaplan, son también conocidas como turbinas de doble regulación. Porque regular el proceso por los álabes del distribuidor, y por los álabes del rotor, en función de las condiciones de carga y del salto. Con este procedimiento pueden lograr rendimientos grandes, no solo para cargas bajas y variables, sino también en el caso de fluctuaciones importantes del caudal.

Hay tres sistemas para manejar las palas del rotor, depende de la ubicación del servomotor de accionamiento en las distintas zonas del eje del grupo turbina-generador.

Así se tiene:

- Servomotor en cabeza: el servomotor está instalado en el extremo superior del eje, en la zona del generador.
- Servomotor intermedio: en este caso está situado en la zona de acoplamiento de los ejes de la turbina y del generador.
- Servomotor en núcleo: está alojado en el propio núcleo del rotor.

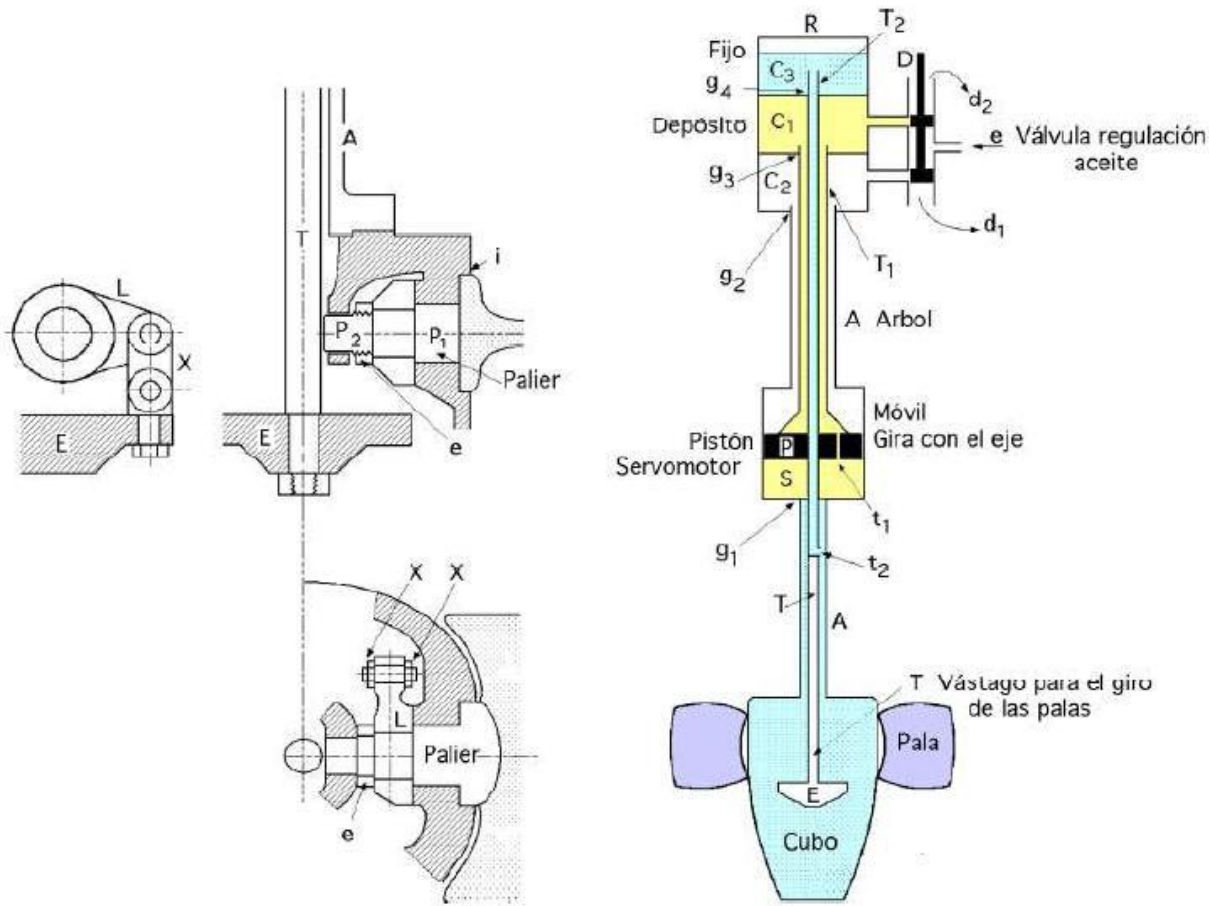


Servomotor en el núcleo

Actualmente el empleo de servomotor en el núcleo es el más utilizado, con él se reducen las dimensiones y el número de elementos mecánicos que en los otros sistemas realizan la interconexión entre el servomotor y los ejes de las palas del rotor. En los sistemas de servomotor intermedio y en núcleo, los conductos de aceite entre regulador de velocidad

y el servomotor se realizan mediante conductos concéntricos dispuestos en el interior del eje del grupo turbina-generador.

En la Fig. XX se presenta un esquema del mecanismo de regulación de las palas móviles del rodete, dispuesto en el interior del cubo. Cada pala se prolonga mediante un eje, que penetra en el cubo, perpendicular al eje de giro de la rueda. Cada eje de pala pivota en dos palieres P1 y P2 entre los que se encuentra calada una palanca L que es la que regula la orientación de la pala, y que a su vez va sujeta al eje de la rueda. La fuerza centrífuga de la pala se transmite a la palanca L mediante bieletas, y en turbinas muy importantes, por un sistema de anillo incrustado en el eje y apoyado sobre L.



Mecanismo de regulación de los alabes de una turbina Kaplan

Las bieletas X colocadas en la extremidad de la palanca L van sujetas al árbol mediante un soporte E; todo ello está dirigido por un vástago que pasa por el interior del árbol A, de forma que cualquier desplazamiento axial de este vástago provoca una rotación simultánea de todas las palas.

Todo el mecanismo de regulación está bañado en aceite a una cierta presión, proporcionando la lubricación necesaria a todos los cojinetes y conexiones, y no permitiendo la entrada del agua en el interior del cubo.

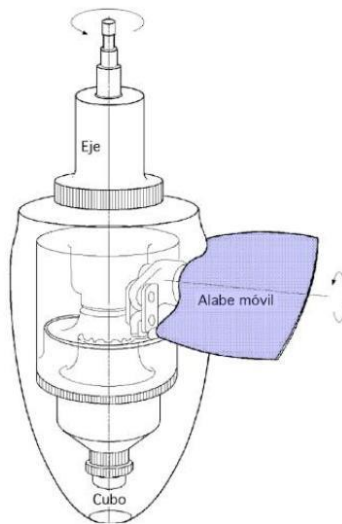
El vástago T se acciona por un servomotor S que gira solidario con el árbol; por encima de éste va situado un depósito fijo R, en el que las cámaras C1 y C2 están comunicadas con una válvula de regulación de aceite D de una entrada y dos salidas.

En el interior del árbol A existen dos tubos concéntricos T1 y T2 por los que pasa el aceite a presión; el conducto entre el árbol y T1 pone en comunicación la cámara C1 con la parte inferior del servomotor a través del agujero t1 practicado en el pistón P que actúa directamente sobre el vástago T de regulación.

Como se trata de piezas giratorias, hay que procurar en g2, g3 y g4 evitar pérdidas o fugas de aceite entre las diversas cámaras que están a presiones diferentes; asimismo, como el conjunto formado por el pistón P el vástago T y los tubos T1 y T2 situados en el interior del árbol A tienen que ir también engrasados, hay que disponer una junta de estancamiento en g1 de forma que se evite la comunicación desde la parte interior del cubo de la rueda hacia la parte inferior del pistón P del servomotor, que está a presión variable.

Según sea la posición del distribuidor de aceite D se puede colocar una de las caras del pistón P en comunicación con la llegada de aceite a la presión de la tubería de entrada e, mientras que el otro lado del pistón P está a la presión de descarga. El interior del tubo T2 pone en comunicación la parte superior del depósito R (cámara C3), con el interior del cubo de la rueda, por medio de un agujero t2 practicado en la cruceta de mando T de orientación de las palas. Esta cámara C3, que está a la presión atmosférica, contiene aceite a un cierto nivel y juega el papel de depósito de expansión del aceite contenido en el cubo, siendo este volumen de aceite función de la posición de las palas.

Esta cámara se debe situar en un nivel tal que la presión estática que asegura la presencia de aceite en el cubo, sea suficiente para evitar la entrada del agua en el interior del cubo. El servomotor S puede estar colocado en una posición cualquiera del árbol, como en la parte superior, o por encima del alternador, o bien entre el alternador y la turbina, o por debajo del mecanismo de orientación de las palas cuando el espacio lo permita, como en la Fig. 14, etc.



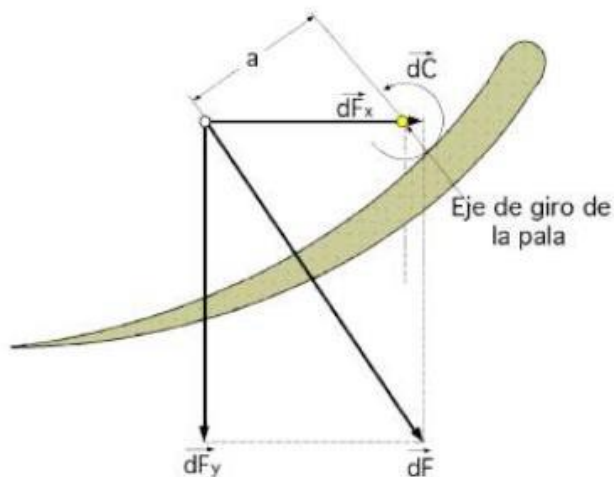
Disposición del cubo y la pala

Momento hidráulico

La reacción del agua sobre las palas de la rueda provoca en cada una de ellas un esfuerzo dR que a su vez se puede descomponer en dos fuerzas dF_x y dF_y . La posición de dR , es decir, su brazo de palanca a , con relación al eje de la articulación elegido O , no se puede determinar más que a partir de un estudio teórico o experimental del movimiento del agua, cual puede crear presiones en todos los puntos del álabe.

En la mayoría de los casos el eje está situado de forma que tienda a reducirse el par de maniobra todo lo que sea posible.

En algunos casos, el eje está situado de forma que exista una tendencia al cierre, esto es una medida de seguridad contra el embalamiento, ante la eventualidad de un fallo en el mecanismo de regulación.

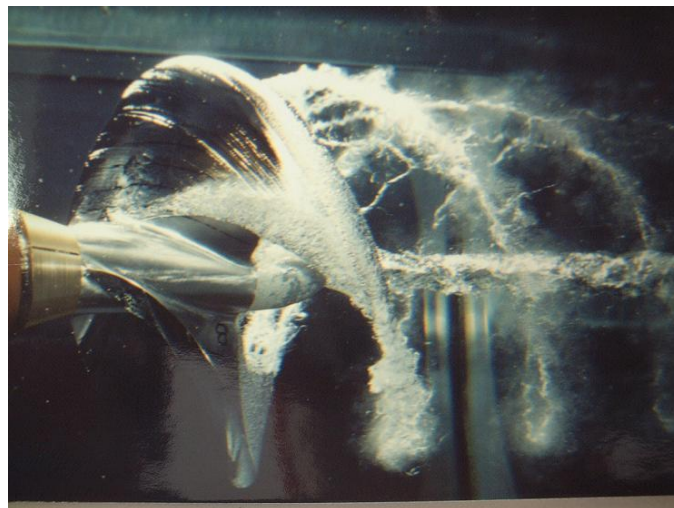


Reacción del agua sobre las palas

El servomotor debe ser calculado para que sea mayor que el par hidráulico máximo de la pala. También tienen que tener en cuenta los efectos de rozamiento de los diversos mecanismos que conforman el sistema de regulación.

Cavitación

El nombre significa la formación de cavidades en el seno del líquido, definidas por burbujas de vapor dentro de la masa líquida y producidas por una vaporización local a causa de ciertas condiciones dinámicas, como pueden ser una alta velocidad relativa y consecuentemente una reducción de la presión local hasta el valor de la tensión del vapor a la temperatura actual del líquido. Estas condiciones suelen presentarse en la parte convexa de los álabes que confinan la zona de succión de una bomba o de descarga de una turbina, así como en la región periférica del rodete móvil donde las velocidades tangenciales son altas. En general, en todo punto en que se produzca una aceleración local suficiente para reducir la presión al valor del de vaporización.

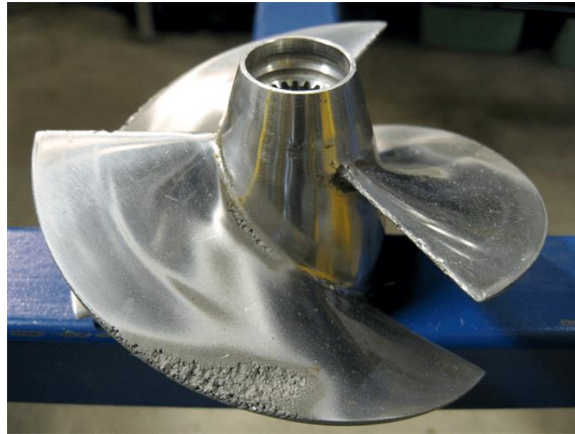


Flujo helicoidal

La cavitación disminuye el rendimiento hidráulico, pero el efecto más grave es la erosión de los álabes, que se acentúa más y más una vez iniciada, obligando a revisiones periódicas de la máquina y a la reparación de la parte afectada. La falta de masa local, producida por la cavitación, puede dar lugar también a vibraciones del rotor.

Una burbuja de vapor formada por una reducción local de la presión eventualmente se destruye cuando es arrastrada a una zona de más alta presión y este colapso instantáneo de la burbuja produce una onda de

presión que se transmite a través del líquido, alcanzando la superficie del material del álabe. Nótese, además que la mayor velocidad relativa se tiene precisamente en la proximidad de los contornos. Asociada con la alta presión de impacto se tiene una temperatura local elevada, la combinación de las cuales puede ser suficiente para deteriorar el material.

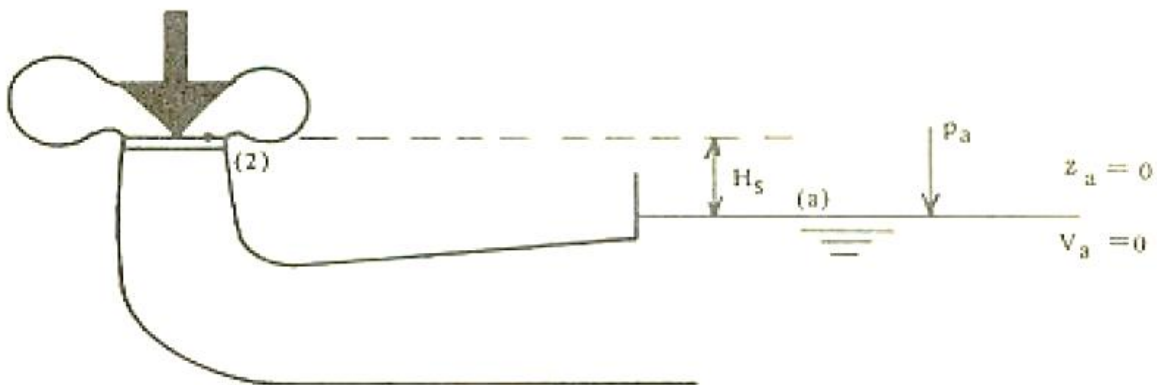


Superficie afectada por la cavitación

Parámetro de cavitación y posición de las turbinas de reacción respecto al nivel de aguas abajo

Las turbinas de reacción se sitúan generalmente por encima del nivel de aguas abajo, pero también pueden instalarse por debajo de dicho nivel empleando convenientes tubos difusores acodados, como ocurre con ciertas turbinas de alta velocidad específica. El criterio lo fija el parámetro de cavitación que se va a definir.

En la Fig. 20 se representa en esquema el caso más general, de estar colocada la unidad más alta que el nivel de aguas abajo.



Esquema para definir el parámetro de la cavitación

Las condiciones a la salida del rotor se representan con el subíndice (2) y las del nivel de agua en la restitución por (a). A la coordenada z_s se la denomina generalmente por la literal H_s que representa la altura de aspiración. Considerando como plano de referencia el correspondiente al nivel de aguas abajo, $z_a = 0$; y siendo $V_a = 0$, aplicando el teorema de Bernoulli entre (2) y (a) se tiene:

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + H_s = \frac{p_a}{\gamma}$$

Designando, $\frac{p_a}{\gamma} = H_{at}$ queda:

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} = H_{at} - H_s$$

El coeficiente o parámetro de cavitación se designa por la letra griega σ y se define por la expresión:

$$\sigma = \frac{H_{at} - H_s}{H_n}$$

donde:

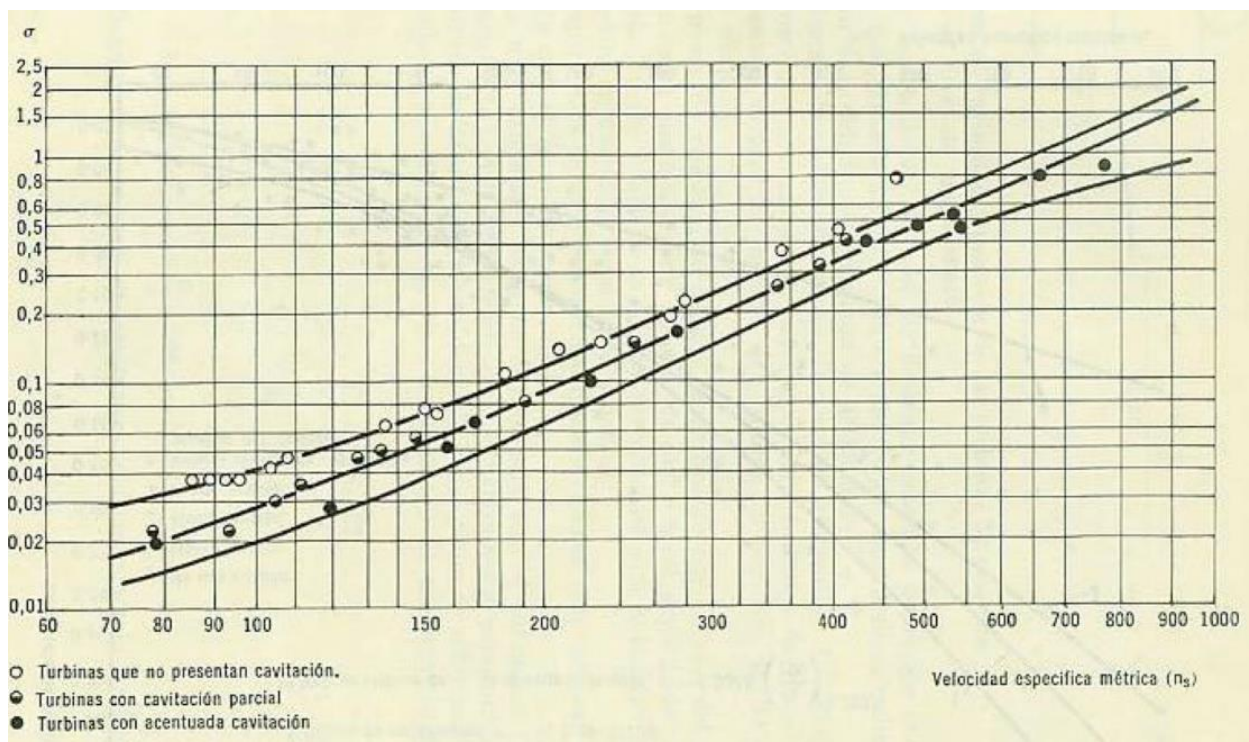
- H_s = altura de aspiración
- H_{at} = altura de presión atmosférica

El numerador representa cuantitativamente el valor de la carga de velocidad más la carga de presión a la salida del rotor. El denominador es la carga neta sobre la turbina.

La posición de la turbina, respecto al nivel de aguas abajo, la fija la altura de aspiración H_s , que se determina así:

$$H_s = H_{at} - \sigma * H_n$$

El valor de H_s suele estar entre ± 5 metros, y raras veces sobrepasa este valor, pues se crean problemas en la descarga.



Coeficiente de cavitación en función de la velocidad específica

Los valores del coeficiente σ se establecen por experimentación en función de la velocidad específica. La Fig. 21 presenta resultados de experimentación con turbinas Francis y Kaplan de diferentes velocidades específicas. Para un mismo valor de n_s pueden presentarse condiciones de acentuada cavitación, de cavitación parcial o sin cavitación. Las curvas presentan una tendencia con un crecimiento casi proporcional de σ con n_s .

En la tabla siguiente, podemos observar valores experimentales del coeficiente de cavitación para diferentes velocidades específicas.

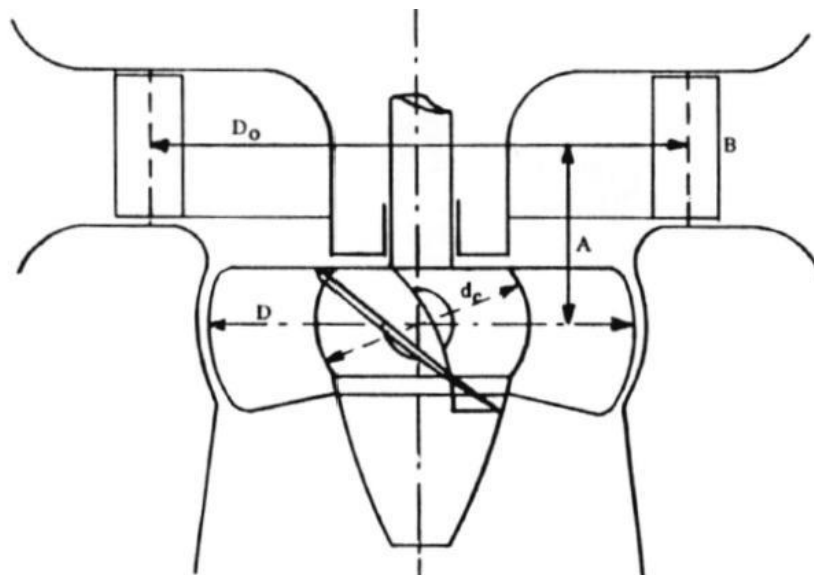
n_s	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
σ	0,04	0,05	0,08	0,13	0,22	0,31	0,45	0,6	0,7	0,9	1,5	2,1
Tipo turbina	Francis lenta	Francis normal	Francis rápida	Francis extra rápida	Hélice y Kaplan							

Del análisis se deduce que, para una misma carga, si se emplean turbinas de reacción (Francis o Kaplan), de velocidad específica alta, se debe reducir la altura de aspiración.

En algunas instalaciones, con turbinas de reacción, con velocidad específica alta, como Francis mixta o Kaplan, se hace necesario a veces situar la turbina por debajo del nivel de aguas abajo, a fin de reducir la altura de aspiración y aumentar σ al valor exigido por las normas establecidas sobre la cavitación. Esta disposición obliga a realizar, en muchos casos, excavaciones profundas, sobre todo tratándose de unidades grandes, lo que puede elevar notablemente los costos de primera instalación.

Proporción en las dimensiones en las turbinas Kaplan y de hélice

Las dimensiones principales de una turbina Kaplan están esquematizadas en la Fig. 22.



Dimensiones principales

El valor del diámetro de la hélice se determina por medio de la fórmula empírica siguiente:

$$D = \sqrt{\frac{68HP}{H}}$$

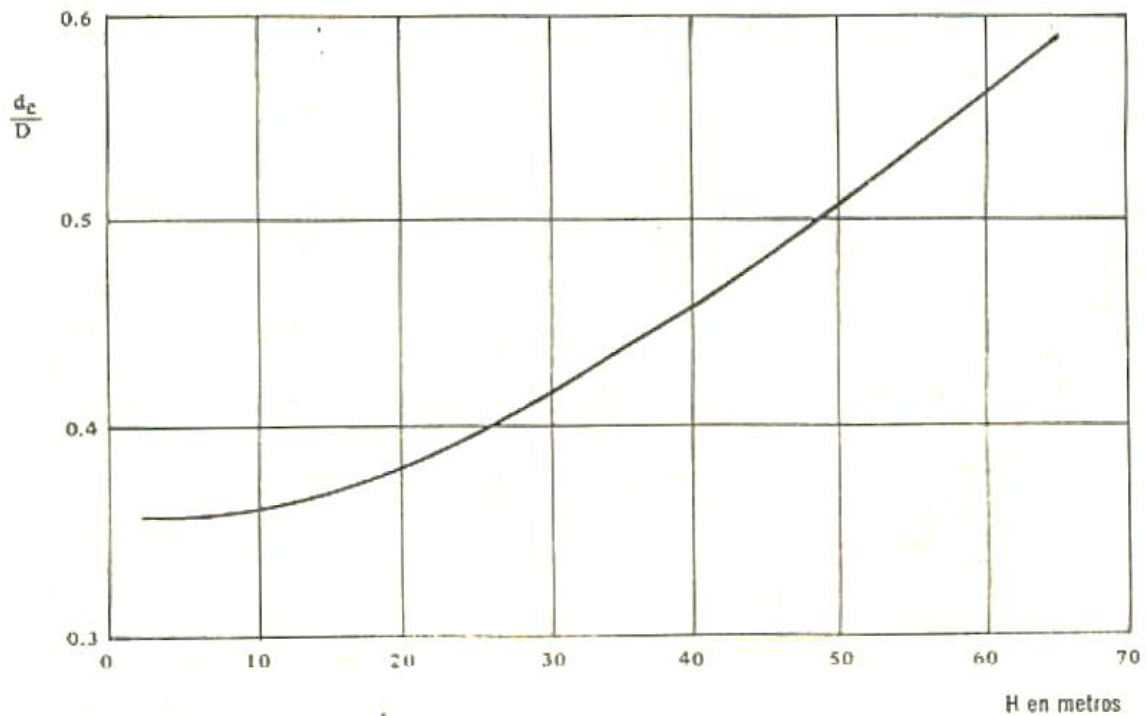
en la cual D viene dado en pulgadas, para valores de la carga en pies y de la potencia en caballos de fuerza.

La distancia A entre el plano ecuatorial del distribuidor y el del rodete móvil está entre el 40 y el 50% del valor del diámetro de este último, siendo menor para valores altos de la velocidad específica,

El diámetro ecuatorial del distribuidor D_0 , medido entre los puntos de pivoteo de los álabes, es del orden de 1.20 a 1.30 D, correspondiendo valores menores para mayor velocidad específica.

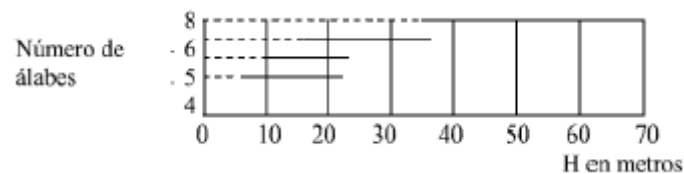
La relación B/D (altura del distribuidor al diámetro de la hélice) es del orden de 0.40, esto es, mayor en la turbina Kaplan que en la Francis. Ello se debe a la necesidad de aumentar las secciones de paso a mayores caudales, sin agrandar exageradamente el diámetro del distribuidor.

La proporción entre el diámetro del cubo y el de la hélice (d_c/D) se da en la Fig. 21 en función de la carga. El cubo es muy robusto en la turbina Kaplan ya que debe alojar el mecanismo de regulación de los álabes del rotor y, al mismo tiempo, soportar el tremendo par que produce la acción del agua sobre los álabes.



Relación d_c/D en función de H

En la Fig. 24 se da el número de álabes del rotor en función de la carga, en la turbina Kaplan. Como puede observarse varía de 4 a 8, aunque hay turbinas Kaplan para altas cargas que llegan a tener 9 álabes. Los álabes son de grandes dimensiones a causa de la gran cantidad de agua con que deben operar para transmitir potentes pares al eje de la unidad.



Número de álabes en función de la carga

Los álabes del rotor de toda turbina de hélice tienen muy poco espesor en relación a su gran tamaño, evitándose en todo momento formas redondeadas que produzcan aceleraciones locales que propicien la cavitación. Es por esto, que las aristas de ataque se presentan relativamente agudas y que la curvatura del álabe es pequeña.

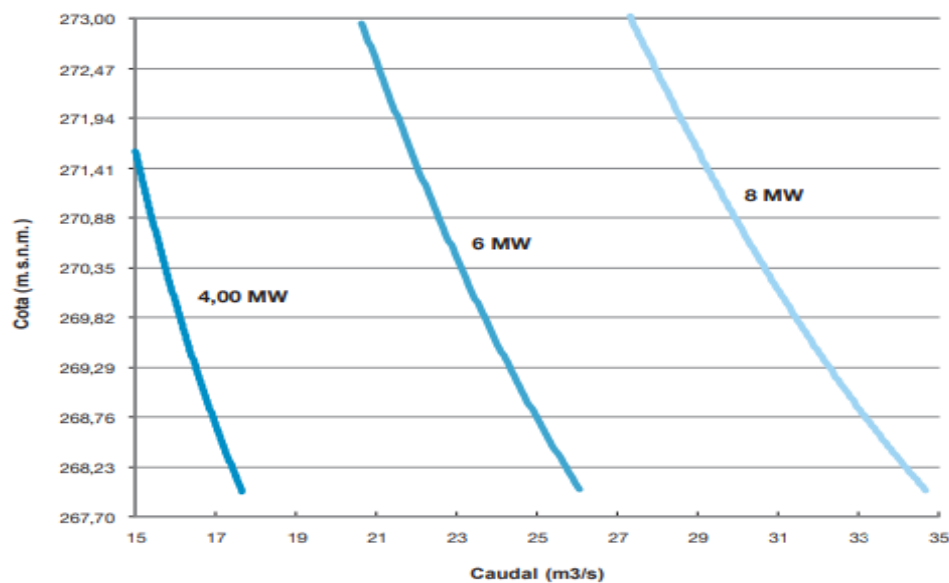
Ejemplos de aprovechamientos hidroeléctricos de Argentina donde utilizan turbinas Kaplan**Complejo Hidroeléctrico Río Hondo**

La presa Río Hondo, se encuentra ubicada en la región Noroeste de Argentina (NOA) en la provincia de Santiago del Estero, a la salida de la cuenca del Río Salí, sobre el río Dulce, con coordenadas 27° 31' 18" Sur y 64° 53' 17" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de Termas de Río Hondo y su principal uso es la generación de energía. Su construcción se inicia en 1958 y se termina el 28 de Setiembre de 1967 y bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. E., comienza su operación en Marzo de 1976. La presa es recta y mixta, es decir, un tramo de hormigón entre dos tramos de materiales sueltos con una altura sobre lecho del río de 29,00 m y una longitud total de 4347,31 m, lo que le permite almacenar 995,00 Hm³, el caudal medio anual del río es de 77,50 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 3000,00 m³/s. La central posee 2 turbinas, una Kaplan y otra Voight, con potencias unitarias de 8,00 y 9,50 MW respectivamente y una generación media anual de 99,00 GWh.

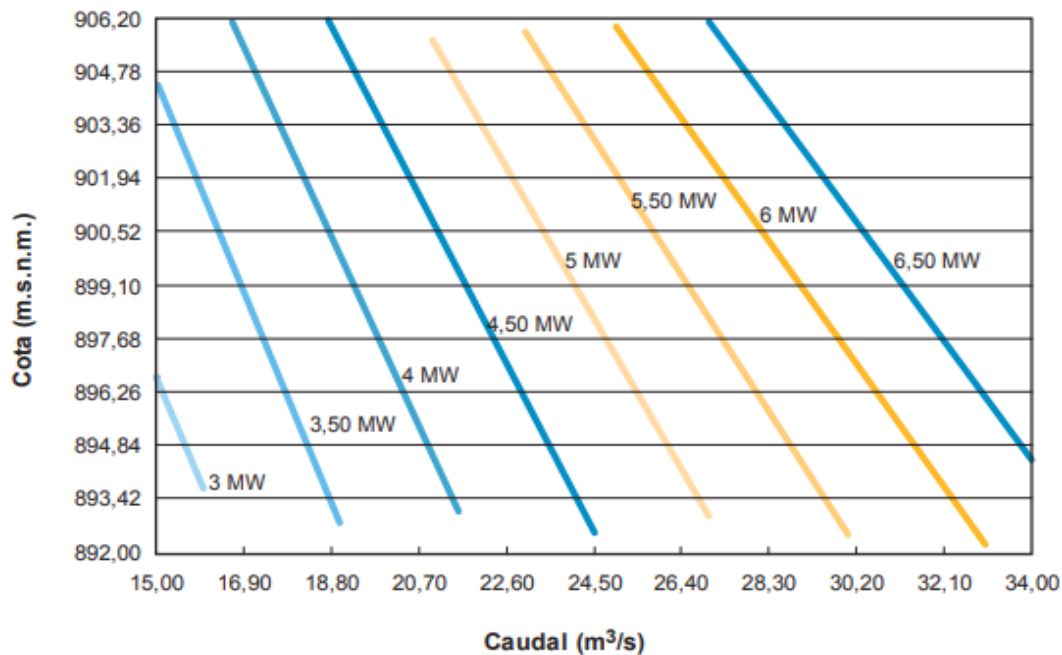


Vista de la central con ambos grupos generadores

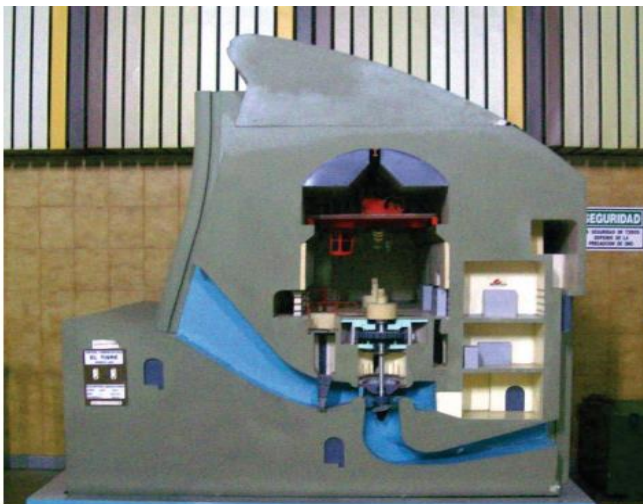
Vista del rodete de una de las turbinas. En este caso, la Kaplan

**Complejo hidroeléctrico El Tigre**

La presa El Tigre, se encuentra ubicada en la región de Cuyo al oeste de Argentina en la provincia de Mendoza, en la cuenca del Río Diamante, en las coordenadas 34° 36' 31" Sur y 68° 36' 47" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de 25 de Mayo y su principal uso es mantener el nivel de restitución de la central Los Reyunos, al mantener la cota de su propio embalse. Su construcción se inicia el 23 de Noviembre de 1983 y comienza su operación bajo el control de Agua y Energía S. E. La presa es mixta, es decir de materiales sueltos y de hormigón; de eje recto con una altura sobre lecho del río de 24,00 m y una longitud de 660,00 m; lo que le permite almacenar 7,47 Hm³, el caudal medio anual del río es de 36,00 m³ /s. La central posee 2 turbinas tipo Kaplan, con una potencia unitaria de 5,90 MW y una generación media anual de 50,10 GWh.



Curva cota - caudal - potencia. Central El Tigre.



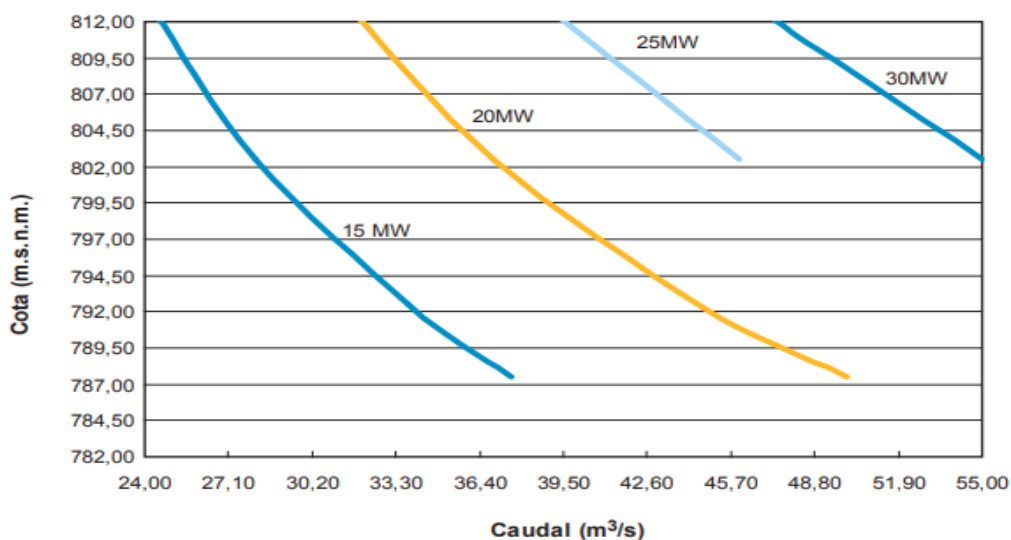
Vista de la maqueta que muestra la compuerta de aducción, la turbina, el generador y el edificio de central dentro de la presa en el tramo de hormigón y las guías para alojar las compuertas de cierre aguas abajo.



Vista de la central y de uno de los grupos generadores.

Complejo hidroeléctrico Nihuil IV

La presa Valle Grande cuya central se denomina Nihuil IV, se encuentra ubicada en la región de Cuyo al oeste de Argentina en la provincia de Mendoza, a la salida de la cuenca del río Atuel, en las coordenadas 34° 49' 59" Sur y 68° 31' 01" Oeste. La población más cercana a la presa es la ciudad de San Rafael y su principal uso es la generación de energía. Su construcción se inicia en el año 1958 y se termina en el año 1975. Comienza su operación bajo el control de la concesionaria Hidronihuil S. A. en el año 1997. La presa es de hormigón de eje recto con una altura sobre lecho del río de 115,00 m y una longitud de 300,00 m, lo que le permite almacenar 150,80 Hm³, el caudal medio anual del río es de 32,00 m³ /s, habiéndose observado crecidas de hasta 400,00 m³ /s. La central posee 1 turbina Kaplan, con una potencia unitaria total de 30,00 MW y una generación media



Curva cota - caudal - potencia. Central Nihuil IV

anual de 130,00 GWh.



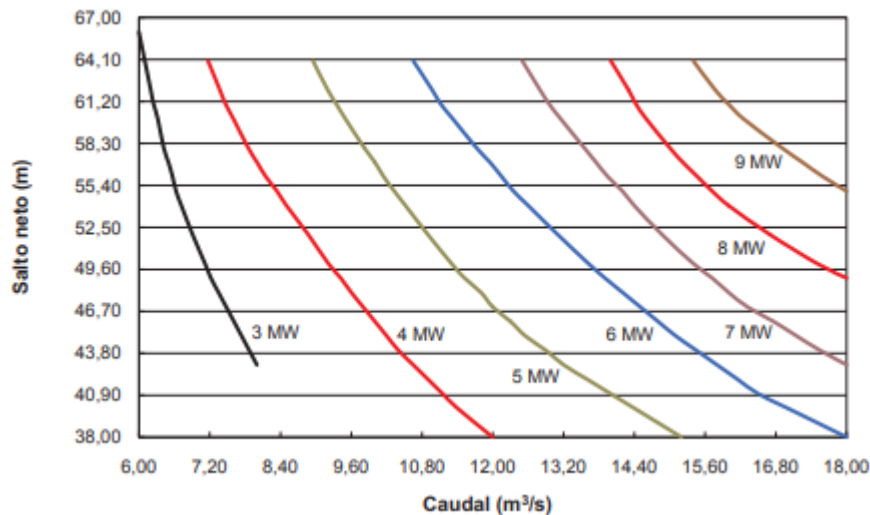
Vista del único grupo generador de la central.



Vista de la maqueta del complejo. Puede apreciarse la válvula mariposa, la cámara espiral, la turbina y la estructura de las compuertas de restitución al río Atuel.

Complejo hidroeléctrico Cuesta del Viento

La presa Cuesta del Viento se encuentra ubicada en la región Cuyo de la República Argentina en la provincia de San Juan, en la cuenca del Río Jáchal, en las coordenadas 30° 11' 34" Sur y 69° 03' 47" Oeste. La población más cercana es la ciudad de Rodeo y su principal uso es la regulación de crecidas y captación de agua para riego. Su construcción se inicia en el año 1986 y se termina en Septiembre de 1998, y comienza su operación en el año 2000 bajo el control de la Dirección de Recursos Energéticos. La presa es de materiales sueltos, con una altura sobre lecho del río de 62,00 m y una longitud de 247,00 m, lo que le permite almacenar 192,50 Hm³, el caudal medio anual del río es de 8,70 m³/s, habiéndose observado crecidas hasta 960,00 m³/s. La central posee 1



Curva salto - caudal - potencia. Central Cuesta del Viento

turbina Kaplan, con una potencia unitaria de 8,89 MW y una generación de energía media anual de 28,00 GWh.

Complejo hidroeléctrico Quebrada de Ullum

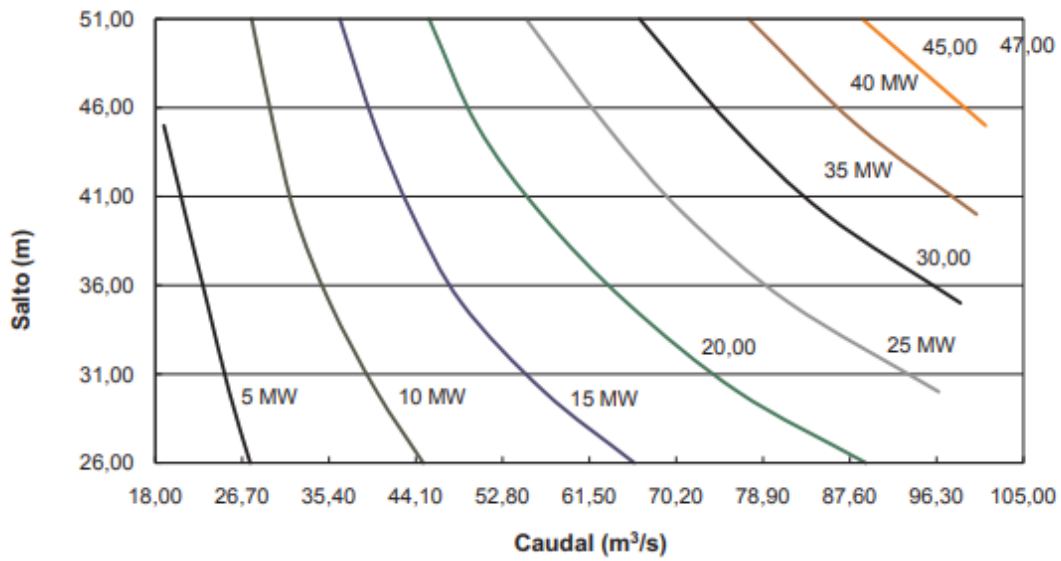


Vista de la central con el único grupo generador.



La presa Quebrada de Ullúm, se encuentra ubicada en la región Cuyo al oeste de la República Argentina en la provincia de San Juan, en la cuenca del Río San Juan, en las coordenadas 31° 28' 28" Sur y 68° 39' 01" Oeste. La población más cercana es la localidad de Marquesado y su principal uso es la provisión de agua para riego. Su construcción se inicia en el año 1972 y termina en Diciembre de 1980 y comienza su operación bajo el control de la provincia de San Juan. La presa es de materiales sueltos de eje recto con una altura sobre lecho del río de 53,00 m y una longitud de 350 m, lo que le permite almacenar 456,76 Hm³, el caudal medio anual del río es de 62,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 744,00 m³/s. La central posee 1 turbinas Kaplan, con una potencia unitaria de 47,00 MW y una generación media anual de 17,10 GWh.

Curva salto - caudal - potencia. Central Quebrada de Ullúm



Vista del generador de la central

Complejo hidroeléctrico Los Molinos II

La presa Los Molinos II se encuentra ubicada en la región Centro de la República Argentina en la provincia de Córdoba, en la cuenca del Río Los Molinos, en las coordenadas 31° 50' 52" Sur y 62° 26' 86" Oeste. La población más cercana es la ciudad de Villa Belgrano y su principal uso es compensar el nivel de restitución de la central Los Molinos I, generación de energía eléctrica y abastecimiento de agua potable. Su construcción se inicia en el año 1952 y se termina en el año 1954, comienza su operación bajo el control de Agua y Energía Eléctrica S. A. La presa es de tipo mixta con eje curvo y está compuesta por un sector de materiales sueltos y otro de hormigón, con una altura máxima sobre lecho del río de 28,60 m y una longitud total de 551,00 m, lo que le permite almacenar 3,83 Hm³. El caudal medio anual del río es de 7,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta



Vista superior del rodete de la turbina tipo Kaplan de la central Los Molinos II, en proceso de extracción por la rotura de uno de sus álabes.

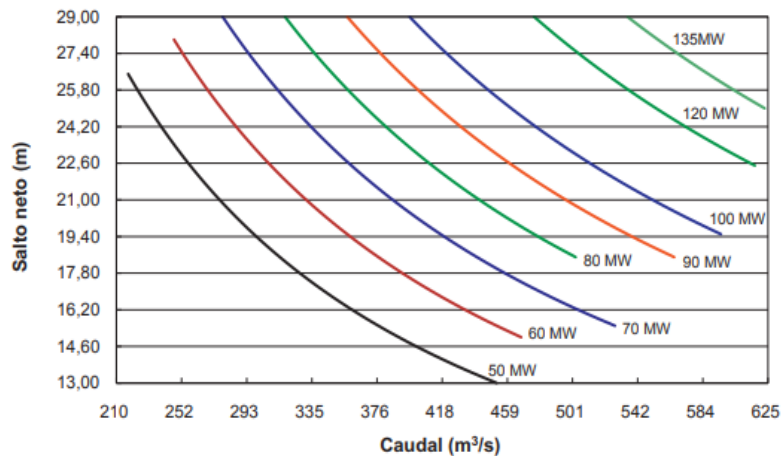


1240,00 m³/s. La central posee 1 turbina tipo Kaplan, con una potencia unitaria de 4,48 MW.

Complejo hidroeléctrico Salto Grande

Vista lateral del mismo rodete de la turbina

La presa Salto Grande se encuentra ubicada en la región Noreste de la República Argentina en la provincia de Entre Ríos, en la cuenca del río Uruguay, en las coordenadas 31° 16' 29" Sur y 57° 56' 21" Oeste. La población más cercana es la ciudad de Concordia y su principal uso es la generación de energía. Su construcción se inicia el 1 de Abril del año 1974 y se termina en el año 1979, comienza su operación en la misma fecha bajo el control de la Comisión Técnica Mixta Salto Grande. La presa es tipo mixta con eje recto y está compuesta de materiales sueltos y un tramo de hormigón, con una altura sobre lecho del río de 39,00 m y una longitud de 2486,70 m, lo que le permite almacenar 5500,00 Hm³. El caudal medio anual del río es de 4737,00 m³/s, habiéndose observado crecidas de hasta 37714,00 m³/s. La central posee 14 turbinas Kaplan, con una potencia unitaria de



Curva salto neto - caudal - potencia. Central Salto Grande.

135,00 MW y una generación media anual de 8500,00 GWh.



Vista de la central de margen derecha (idéntica a la de margen izquierda), con sus siete grupos generadores.



Vista de la maqueta del sector de la central. Pueden verse el edificio de la central, los transformadores, generador, turbina y los puentes grúa aguas arriba y abajo para la apertura de las compuertas y ataguías.