



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Aprovechamientos Hidráulicos

“Seminario Turbinas Kaplan”

Integrantes Grupo N°3 - 2025

- **Dimatteo, Lucas - 13281**
- **Pellegrini, Gabriel - 13762**
- **Silvestre, Kevin - 13904**

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 2 de 50

Índice de Contenidos

1. Introducción	3
2. Reseña histórica	3
3. Clasificación	4
4. Turbinas Kaplan	6
4.1 Funcionamiento	7
4.2 Campo de aplicación	8
4.3 Velocidad específica	10
4.4 Velocidad sincrónica	11
4.5 Triángulo de velocidades	11
4.6 Velocidad de embalamiento	12
4.7 Órganos principales de una turbina Kaplan	13
4.6.1 Cámara espiral	13
4.6.2 Distribuidor	13
4.6.3 Servomotores	14
4.6.4 Anillo de distribución	15
4.6.5 Rodete	16
4.6.6 Tubo difusor	17
4.6.7 Eje	17
4.6.8 Cojinete guía de turbina	19
4.6.9 Cojinete de empuje	19
4.7 Mecanismos de regulación en turbinas Kaplan	20
4.8 Momento Hidraulico	24
4.9 Cavitación	24
4.9.1. Parámetro de cavitación y posición de las turbinas de reacción respecto al nivel de aguas abajo	26
4.10 Curvas características de las turbinas Kaplan	30
4.10.1 Colina de rendimientos	31
4.11 Ejemplos de aprovechamientos hidroeléctricos de argentina donde se usan turbinas Kaplan	36
4.11.1 Yacyretá (Argentina / Paraguay)	36
4.11.2 Manuel Piar / Tocomá (Venezuela)	39
4.11.3 Estreito (Brasil)	41
4.11.4 Rocky Reach (EE. UU.)	43
Bibliografía	47

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 3 de 50

1. Introducción

Las turbinas Kaplan, desarrolladas por el ingeniero Viktor Kaplan a principios del siglo XX, representan un avance crucial en el campo de los aprovechamientos hidráulicos. Estas turbinas de reacción de flujo axial, caracterizadas por sus álabes ajustables, superaron las limitaciones de sus predecesoras al mantener un alto rendimiento incluso bajo condiciones variables de caudal y carga. Su diseño permite una adaptación óptima a los requisitos del flujo de agua, evitando pérdidas significativas de eficiencia. Este seminario explorará en detalle los aspectos históricos, la clasificación, el funcionamiento, los componentes principales y los mecanismos de regulación de las turbinas Kaplan, así como su aplicación en proyectos hidroeléctricos de gran envergadura alrededor del mundo, incluyendo ejemplos en Argentina. Comprender la sofisticación y versatilidad de las turbinas Kaplan es esencial para apreciar su impacto en la generación de energía hidroeléctrica moderna.

2. 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 zanjas 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

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 4 de 50

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, las Turbinas Francis y se construyó la primera central hidroeléctrica en Inglaterra).
- 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.

3. Clasificación

Las turbinas se pueden clasificar según como sigue:

1) Según el modo de actuar el agua en ellas

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

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 5 de 50

- Si el cociente es distinto de cero, estamos hablando de máquinas de reacción (por ejemplo: turbinas Francis, Kaplan y bombas).
- **Turbinas de Impulso:** se llaman así cuando la transformación de la energía potencial en energía cinética se produce en los órganos fijos anteriores al rodete (inyectores o toberas). En consecuencia el rodete sólo recibe energía cinética. La presión a la entrada y salida de las cucharas (o álabes) es la misma e igual a la atmosférica.
- **Turbinas de reacción:** se llaman así (en el caso de reacción pura) cuando se transforma la energía potencial en cinética íntegramente en el rodete. La presión de entrada es muy superior a la presión del fluido a la salida.

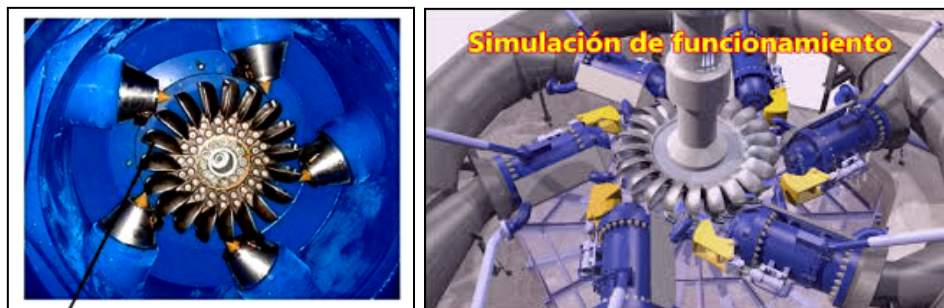


Figura 1. Turbina Pelton, inyectores y deflectores

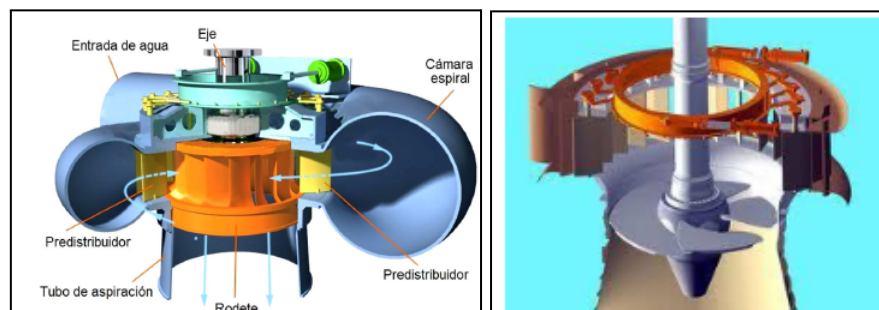


Figura 2. Turbina Francis y Kaplan

2) Según la dirección del flujo en el rodete

- **Axiales:** el desplazamiento del flujo en el rodete es paralelo al eje. Es axial y tangencial (giro).
- **Radiales:** el desplazamiento en el rodete es perpendicular al eje. No tiene componente axial.
- **Mixtas:** tiene componente axial, radial y tangencial.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 6 de 50

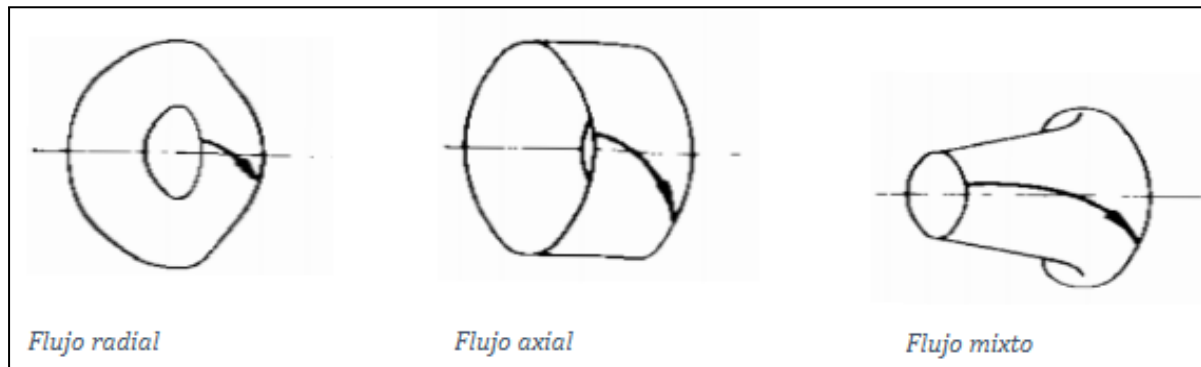


Figura 3. Distintos tipos de flujos

3) Según la dirección del eje

- **Horizontales**
- **Verticales**

4) Según el tipo de admisión

- **Total:** cuando el agua entra por todo el contorno del rodete.
- **Parcial:** cuando el agua entra solo por una parte del rodete.

4. Turbinas Kaplan

Como se mencionó anteriormente las turbinas Kaplan como la turbina hidráulica típica de reacción de flujo axial que tiene verdadera importancia en la actualidad. La Kaplan es una turbina 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 o de carga. Se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de la potencia; característica importantísima para un rotor de hélice, pues es una de las deficiencias más notables 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 álabe fijo en aquellas instalaciones en las que no sea muy sensible la variación de potencia.

La turbina Kaplan debe su nombre al ingeniero Víctor Kaplan (1876-1934), profesor de la Universidad Técnica de Brno (Checoslovaquia), quien concibió la idea de corregir el paso de los álabes automáticamente con las variaciones de la potencia. Una técnica constructiva de las turbinas hidráulicas poco desarrollada al comienzo del siglo, hacía concebir la idea de Kaplan como irrealizable. Pero con el avance del siglo progresaba el desarrollo tecnológico, y la construcción de la turbina Kaplan fue imponiéndose, primero en Europa y después en el mundo entero. Incluso va invadiendo el campo de cargas medias en

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 7 de 50

el que la Francis parecía ser insustituible. En la actualidad, la turbina Kaplan encuentra aplicación en una gama de cargas que varía aproximadamente de 1 metro a 90 metros, si se incluyen a las turbinas tubulares o de bulbo, que también son de hélice con paso variable.

La turbina 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. La multiplicación de unidades para atender mejor a las necesidades de la demanda se hace obligado en las plantas que operan aisladas. Pero, en la actualidad, lo más frecuente es la interconexión de plantas, controladas por un Despacho Central, con lo que una planta, en el sistema interconectado, viene a ser como una unidad operando en una planta aislada. Las unidades pueden ser de mayor potencia, lo cual por otra parte se va haciendo posible gracias al desarrollo de la tecnología constructiva.

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

4.1 Funcionamiento

Las turbinas Kaplan son turbinas hidráulicas de reacción de flujo axial, tal que su principio de funcionamiento es el siguiente:

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.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 8 de 50

4.2 Campo de aplicación

Para seleccionar el modelo de turbina más adecuado para cada instalación, se debe tener en cuenta el salto, caudal y velocidad específica.

Las turbinas Kaplan se utilizan para:

- Salto: Entre 7 m y 50 m
- 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 guiar y conducir con precisión).

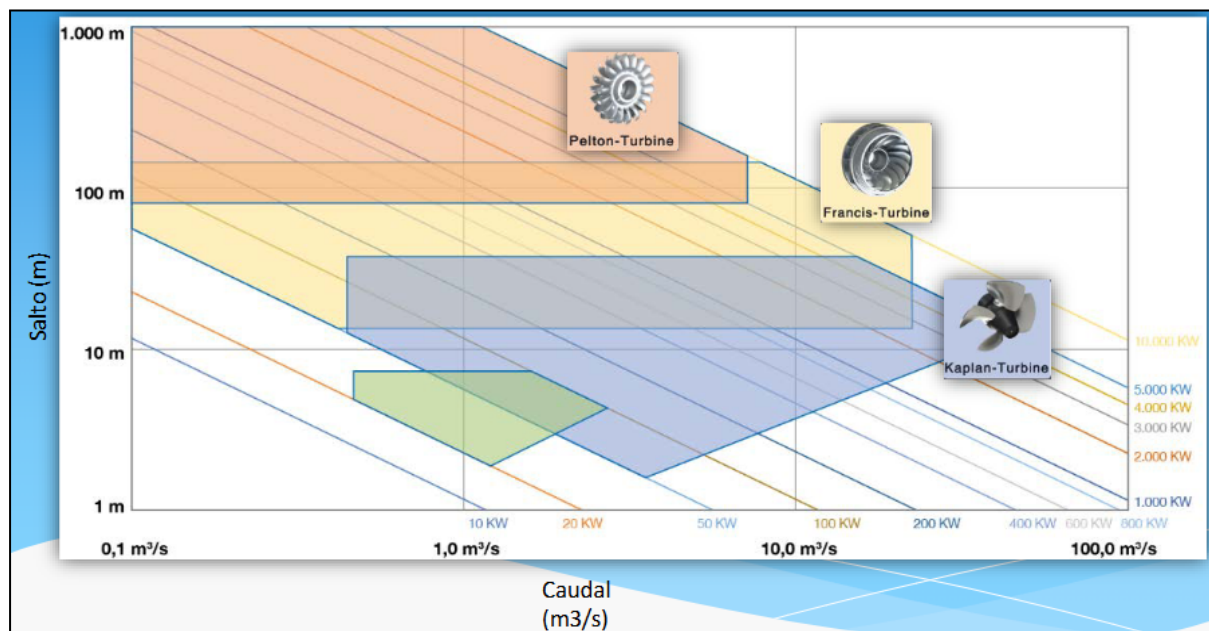


Figura 4. Rangos de selección de turbinas en función del caudal y el salto

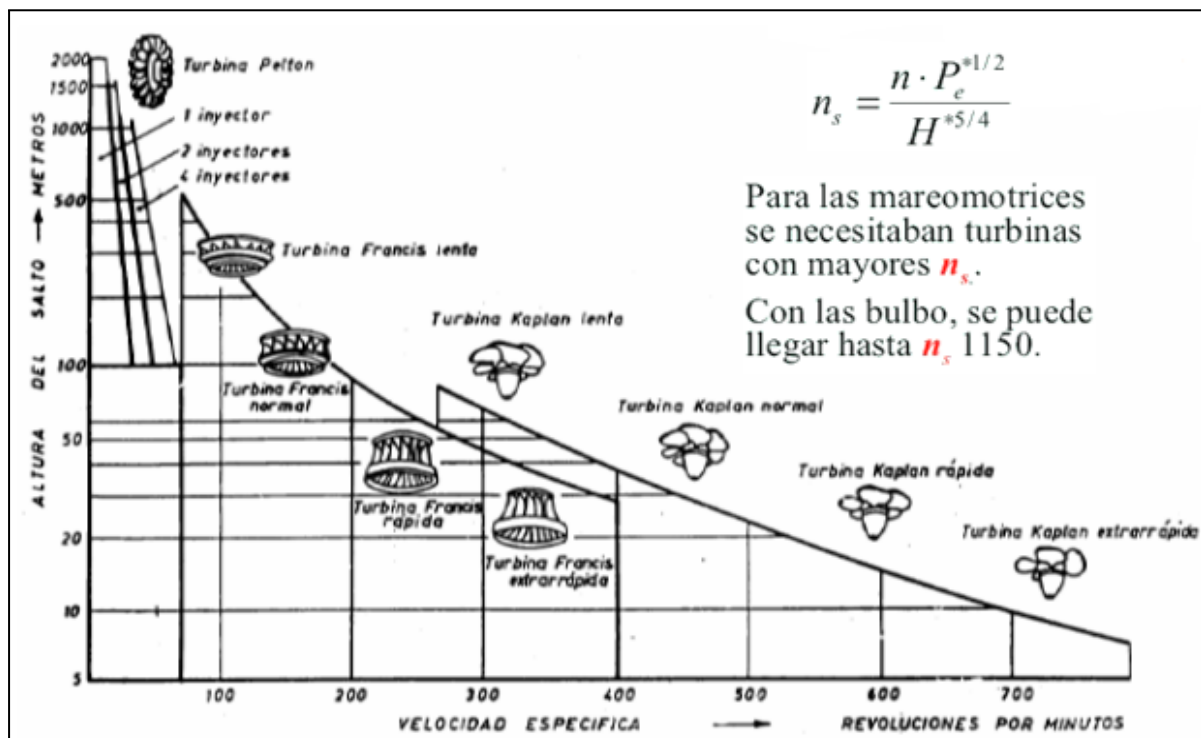


Figura 5. Turbinas en función de salto y la velocidad específica

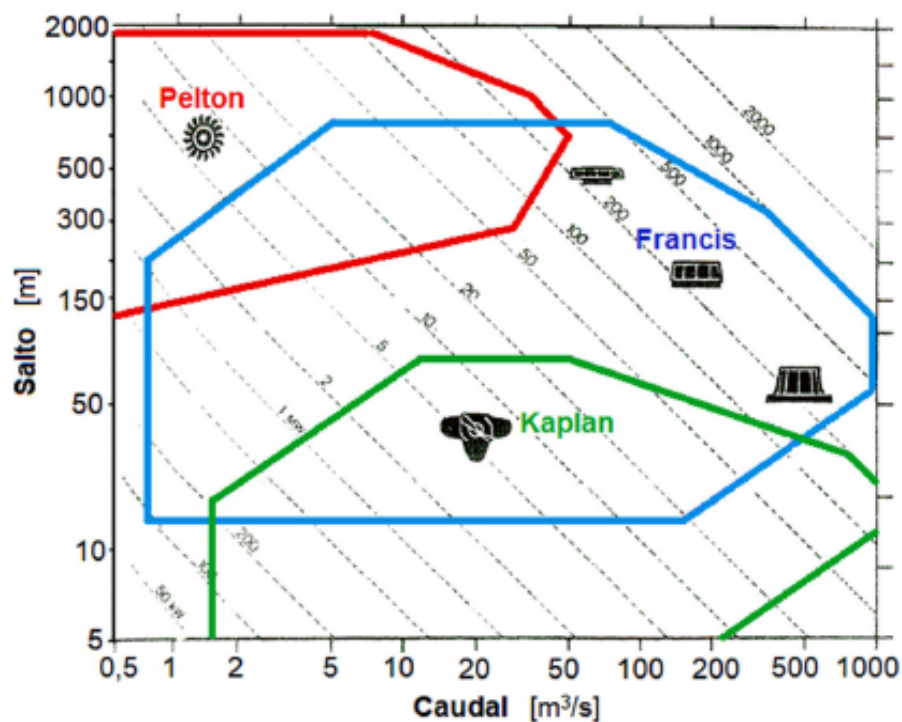
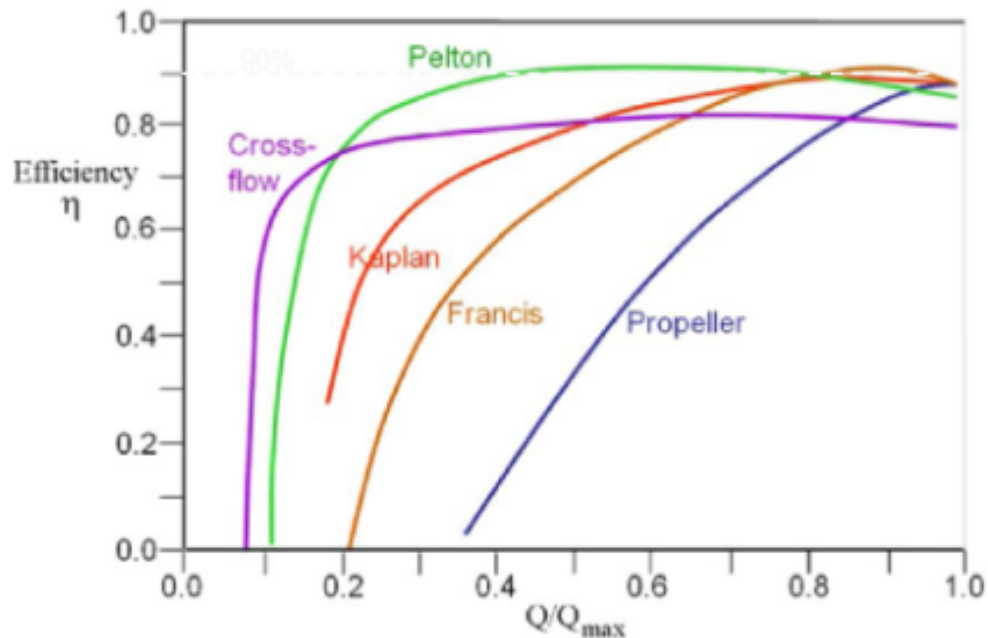


Figura 6. Rangos de selección de turbinas en función del caudal y el salto

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 10 de 50



Variation of efficiency with percentage of maximum discharge for different turbines (Sinagra et al., 2014).

Figura 7. Eficiencia de las turbinas en función del caudal relativo

4.3 Velocidad específica

La velocidad específica es, sin duda alguna, el parámetro que mejor caracteriza a una turbina, 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:

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

Donde:

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

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 11 de 50

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

4.4 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, $z=1$, $n= 3000$ rpm; $z=2$, $n=1500$ rpm; $z=3$, $n=1000$ rpm; $z=4$, $n= 750$ rpm.

4.5 Triángulo de velocidades

Para una turbina hélice del tipo que sea, si se supone una velocidad de entrada $\overline{c_1}$ uniforme para toda la altura del perfil, las distintas curvaturas de las palas se deducen de las distintas velocidades periféricas $\overline{u}$ que tiene la rueda en los diversos puntos, Figura 8, de forma que siempre se cumpla que:

$$r u = Cte$$

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 12 de 50

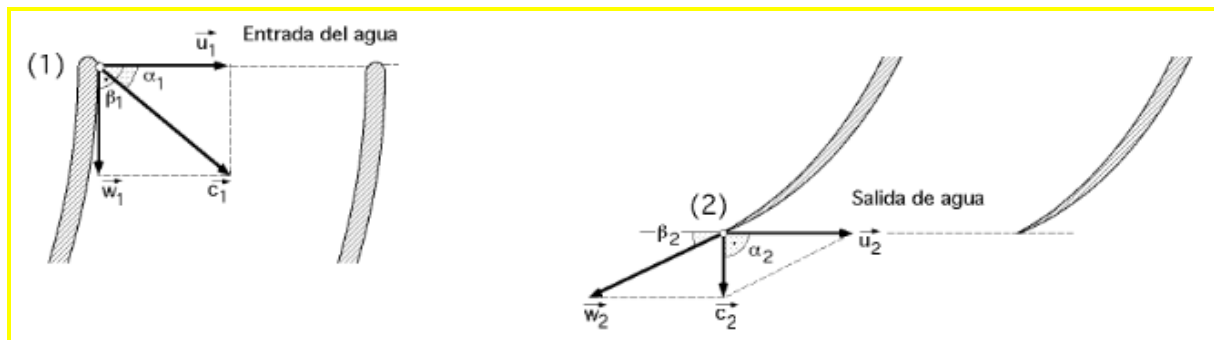


Figura 8. Triángulo de velocidades

Si la entrada del agua (1) se efectúa sin choque, la superficie del álabe debe estar en una dirección tangente a la velocidad relativa de entrada del agua $\vec{w}_1$ por lo que el álabe tiene que ser, por lo que respecta a su altura, en la parte central e inicial, bastante vertical.

En la parte final del álabe, a la salida, éste se presenta más aplanado y la velocidad $\vec{c}_2$ debe ser prácticamente axial, siendo la velocidad $w_2 \ll w_1$.

4.6 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.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 13 de 50

4.7 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:

4.6.1 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.

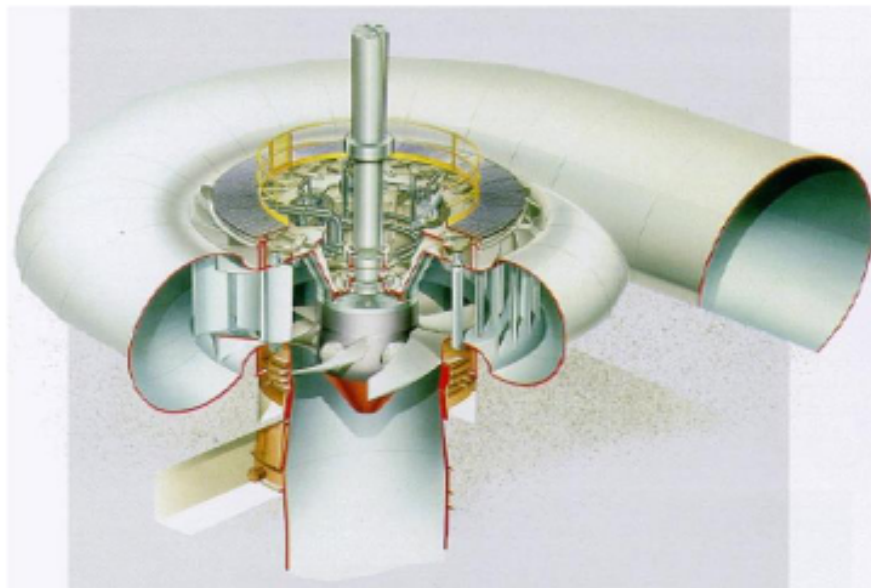


Figura 9. Cámara espiral de sección circular

4.6.2 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 grupo turbina-generador.



Figura 10. Cámara espiral de sección circular

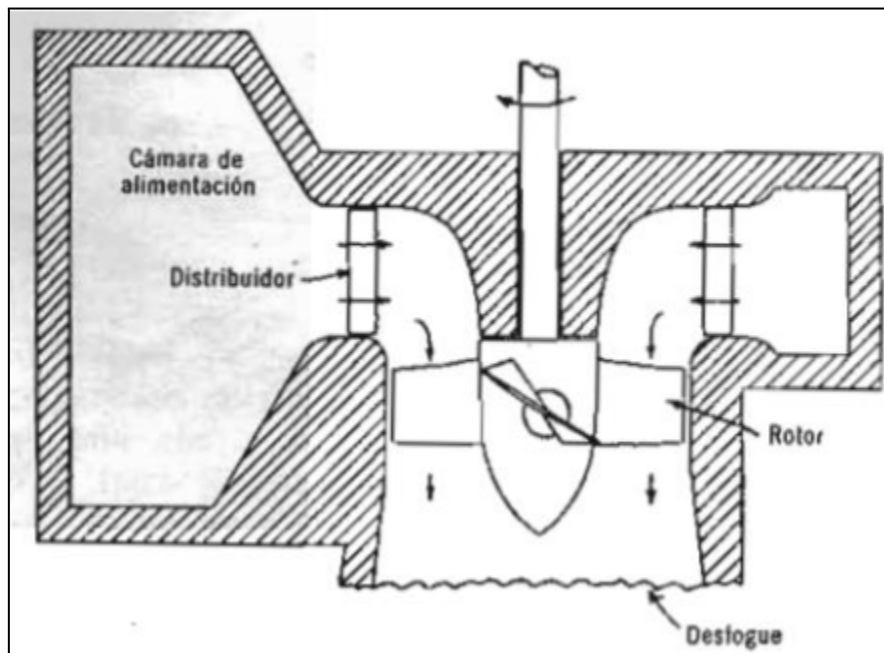


Figura 10. Cámara espiral de sección circular

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

4.6.3 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

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 15 de 50

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

4.6.4 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 bielas, 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.

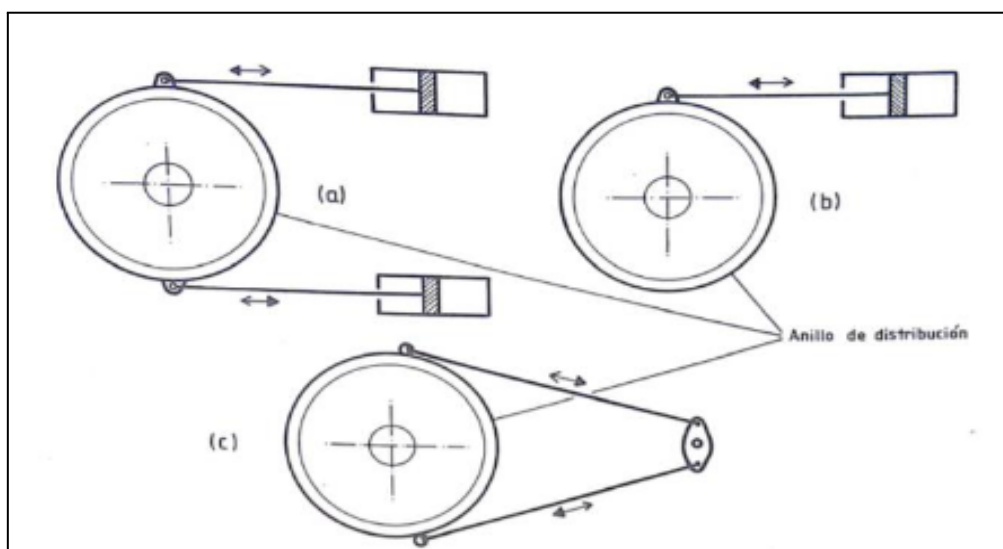


Figura 11. Esquemas de accionamiento del anillo de distribución: a) por servomotores; b) y c) por un servomotor

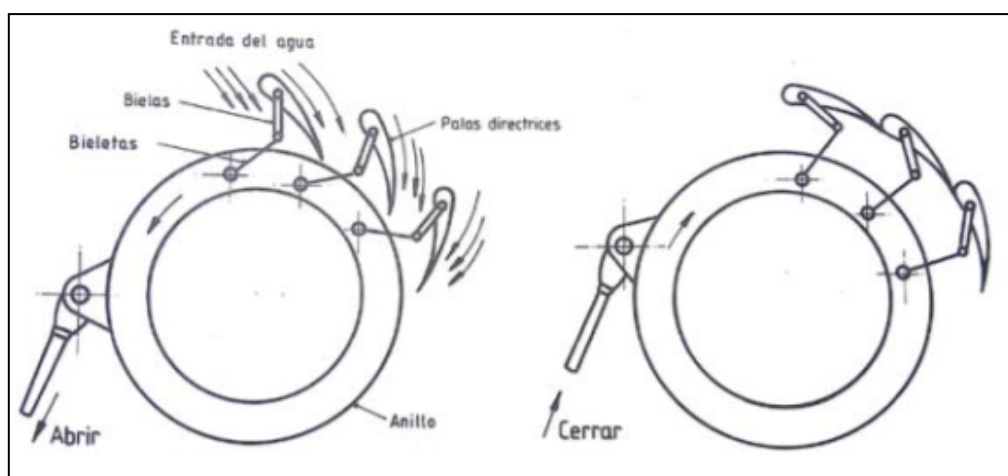


Figura 12. Accionamiento de las palas directrices con el anillo de distribución

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 16 de 50

4.6.5 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 diferentes condiciones de trabajo.



Figura 13. Rodete de turbina Kaplan

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 17 de 50

4.6.6 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 acordada (la sección es cónico-elíptico-rectangular). La forma acordada 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.

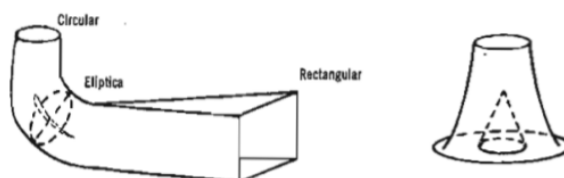


Figura 14. Tubo difusor tipo acordado y tipo cónico.

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

4.6.7 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.

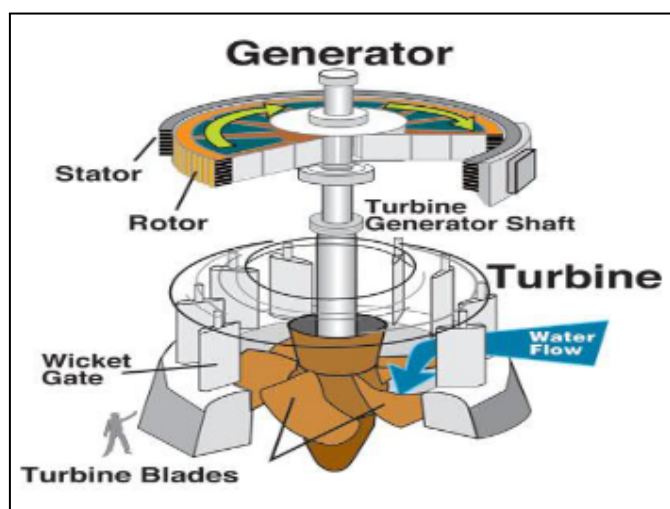


Figura 15. Transmisión de la rotación del rotor del generador por medio del eje

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 18 de 50

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.



Figura 16. 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.

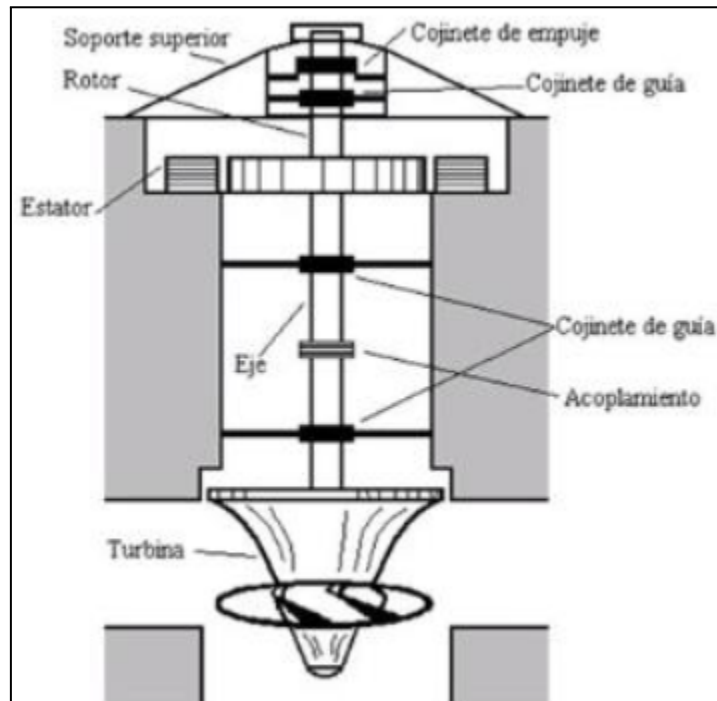


Figura 17. Cojinete de empujes y cojinetes guías

4.6.8 Cojinete guía de 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.

4.6.9 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.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 20 de 50

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

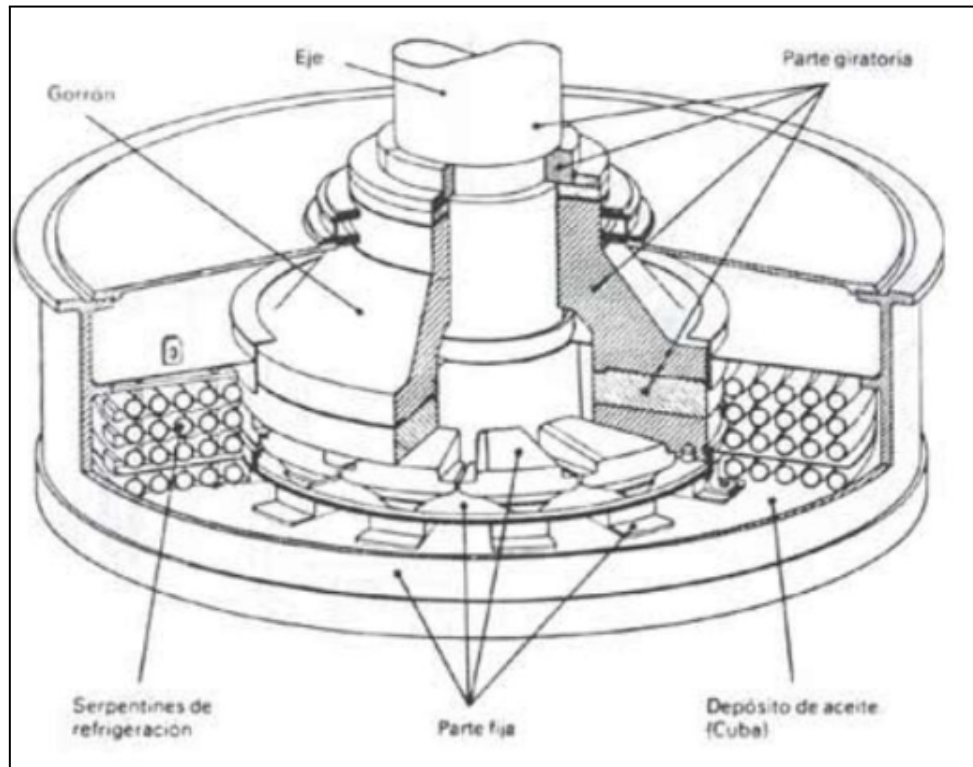


Figura 18. Cojinete de empujes y cojinetes guías

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 determinada, aproximadamente el 30% de la normal de funcionamiento, el sistema de aceite a presión queda desconectado, manteniendo la capa de lubricación como consecuencia del baño de aceite que cubre las zonas en contacto.

4.7 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.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 21 de 50

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.

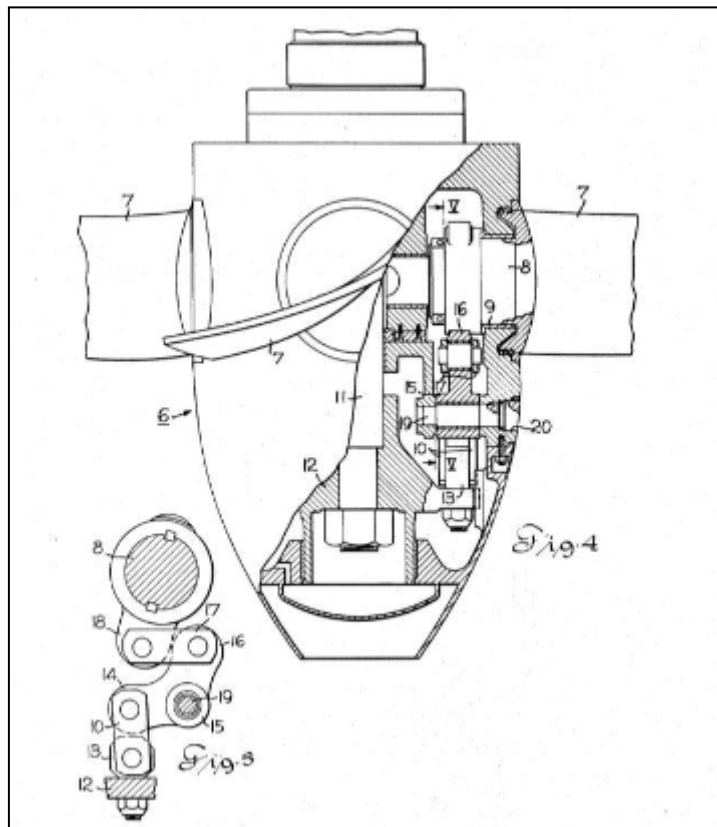


Figura 19. Servo motor en el núcleo

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.

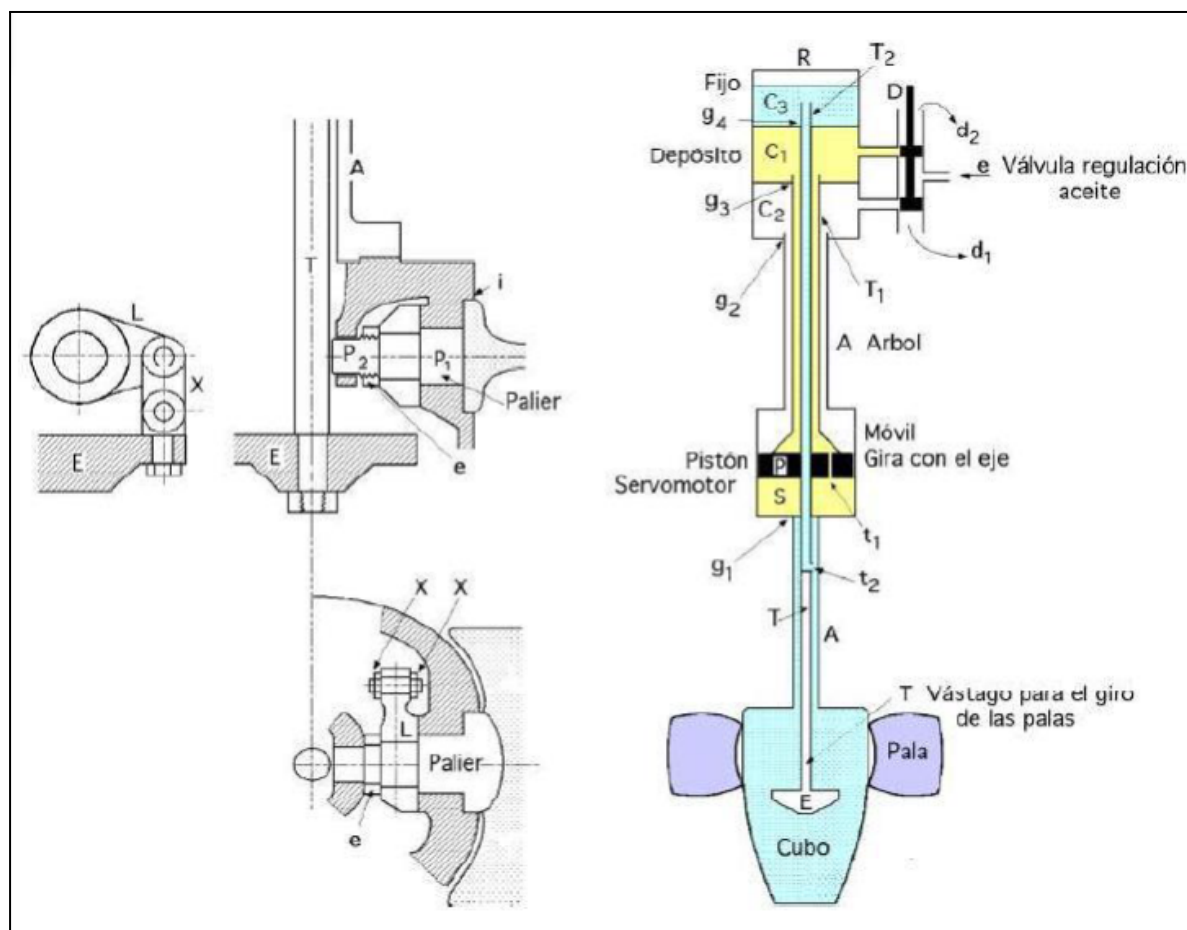


Figura 20. Mecanismos de regulación de los álabes de una turbina Kaplan

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.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 23 de 50

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.

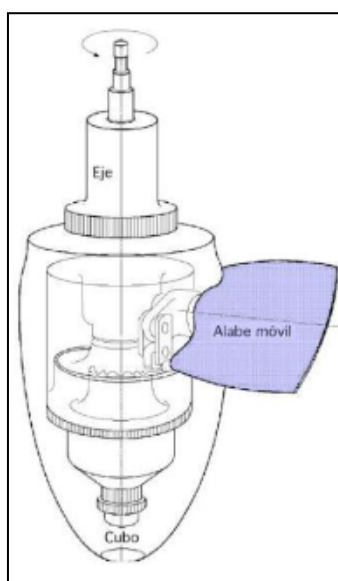


Figura 21. Disposición del cubo y la pala

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 24 de 50

4.8 Momento Hidraulico

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, el 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.

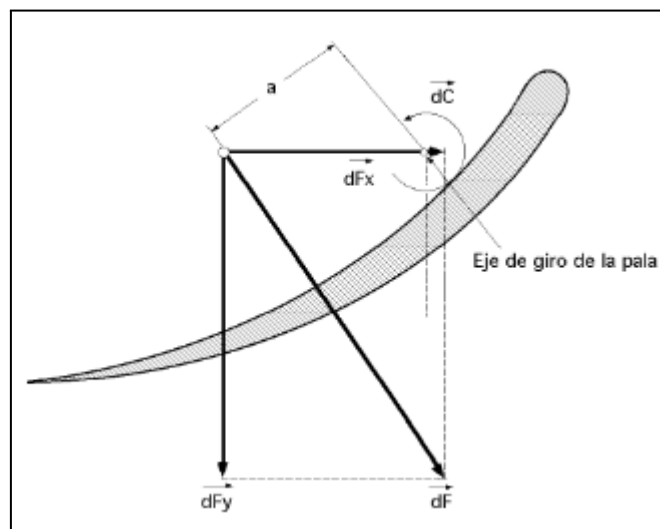


Figura 22. Reacción del agua sobre las palas

El servomotor se tiene que calcular para vencer el par hidráulico máximo de la pala, teniendo también en cuenta los efectos de rozamiento de los diversos mecanismos que conforman el sistema de regulación.

4.9 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.



Figura 23. 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.

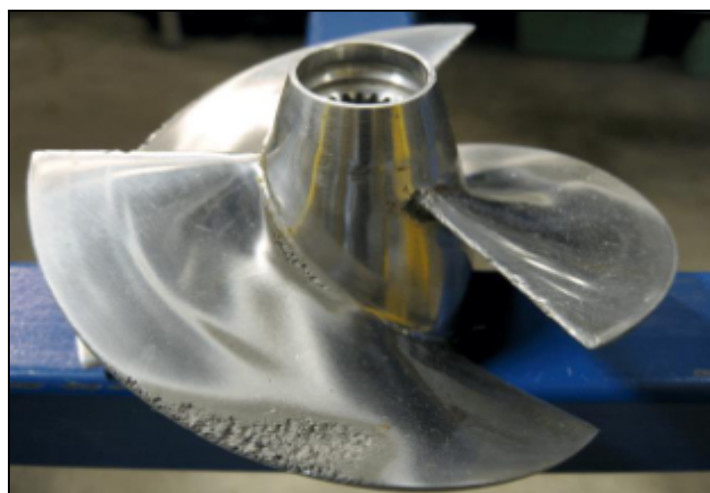


Figura 24. Superficie afectada por la cavitación

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 26 de 50

4.9.1. 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. 25 se representa en esquema el caso más general, de estar colocada la unidad más alta que el nivel de aguas abajo.

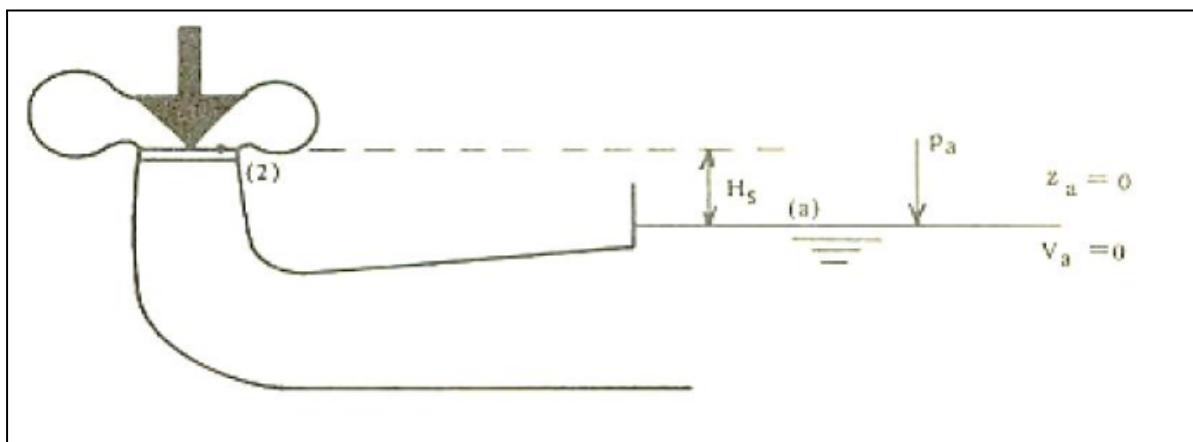


Figura 25. Esquema para definir el parámetro de la cavitación

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 altura 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:

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

Considerando que $\frac{p_a}{\gamma} = H_{at}$:

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

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

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

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 27 de 50

Donde:

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

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:

$$H_s = H - \sigma * H_n$$

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

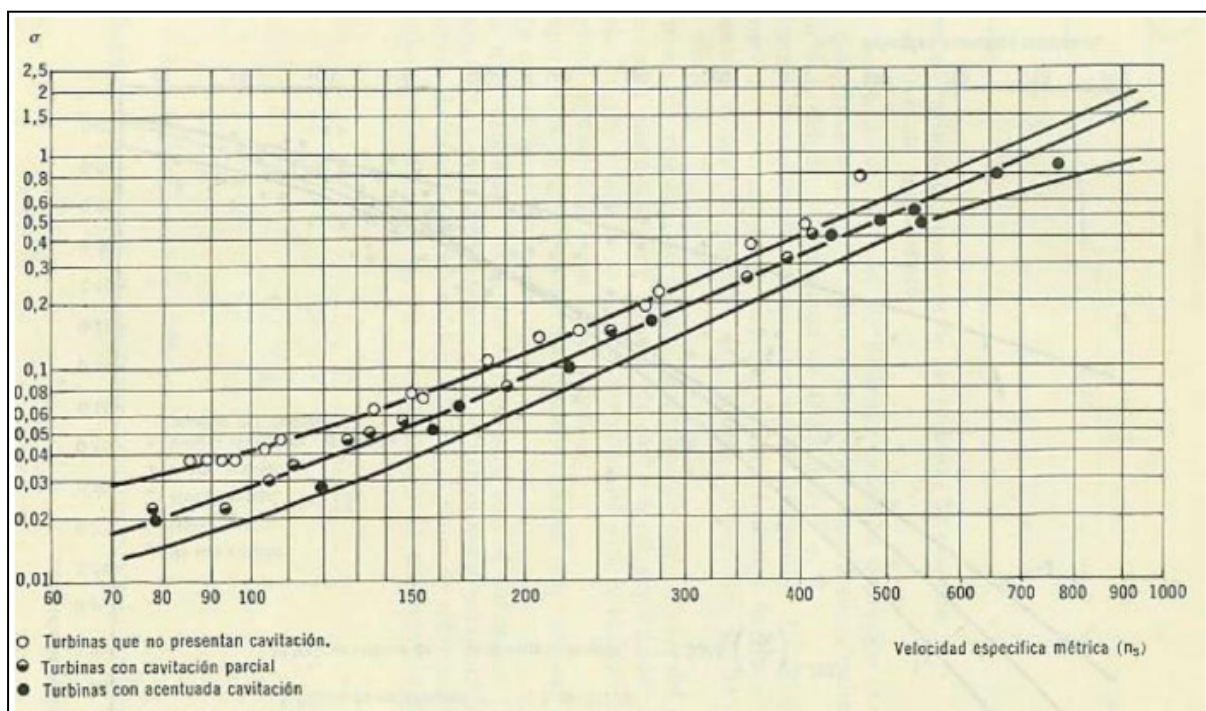


Figura 26. Coeficiente de cavitación en función de la velocidad específica

Los valores del coeficiente σ se establecen por experimentación en función de la velocidad específica. La Fig. 26 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. 27.

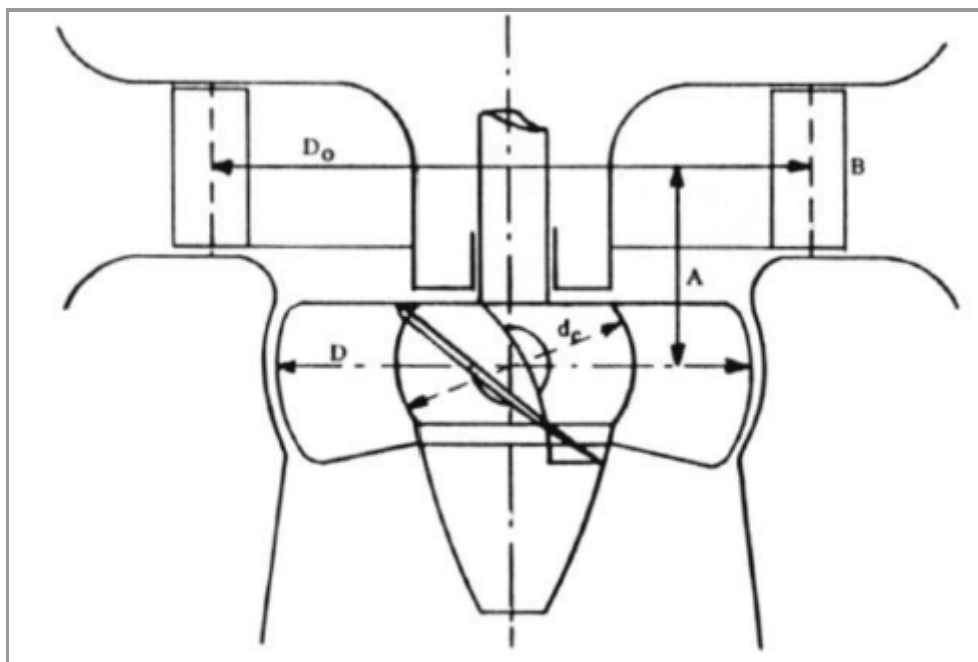


Figura 27. Dimensiones principales

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 29 de 50

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

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

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. 28 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.

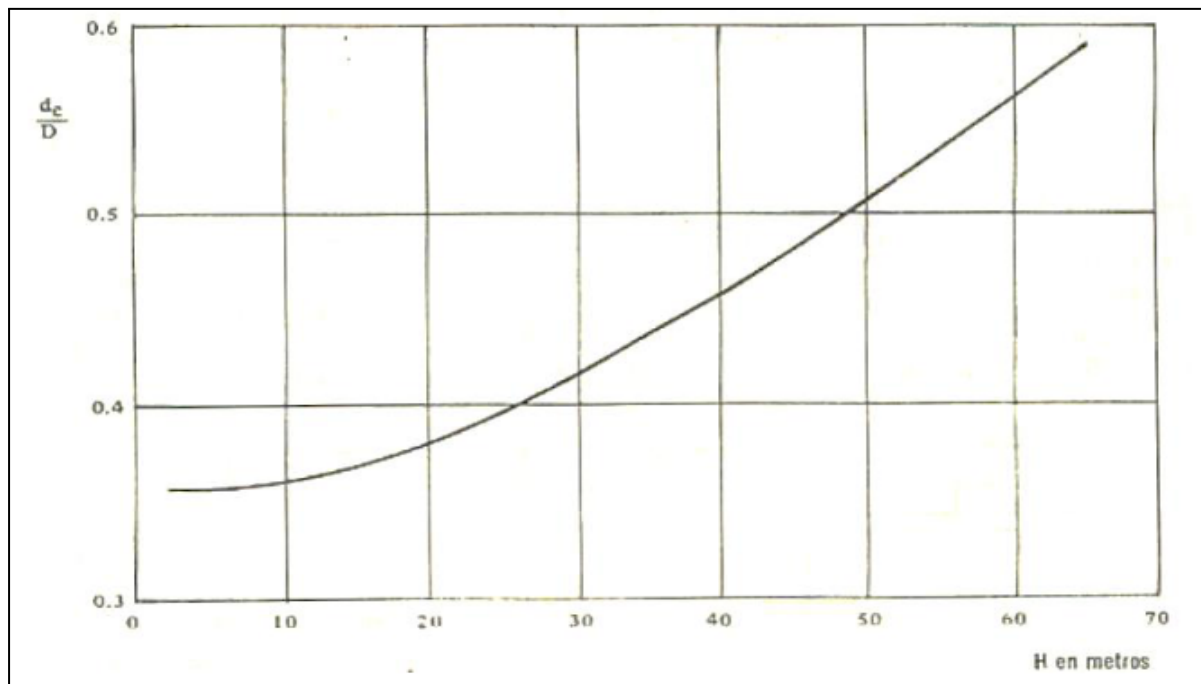


Figura 28. Relación d_c/D en función de H

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 30 de 50

En la Fig. 29 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.

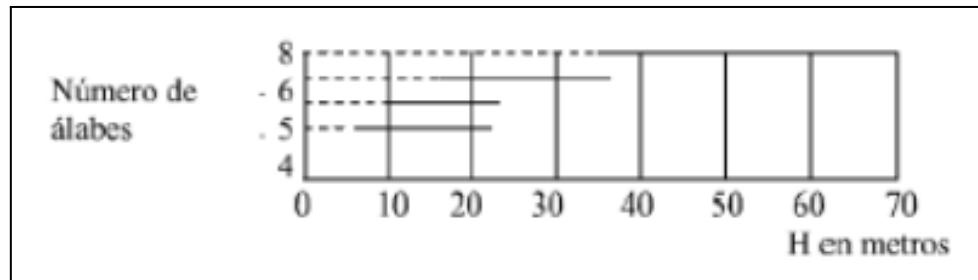


Figura 29. Número de álabes en función de la carga

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.

4.9.2. Regulación, giro de los álabes



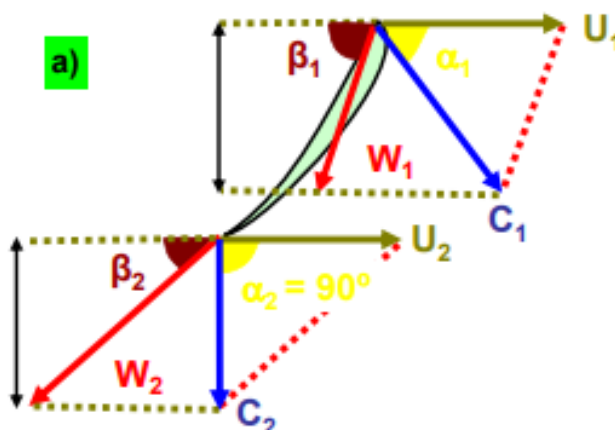
El **giro de los álabes del rodete** permite buscar el punto óptimo de trabajo

$$H_{M.H.} = \frac{u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}}{g}$$

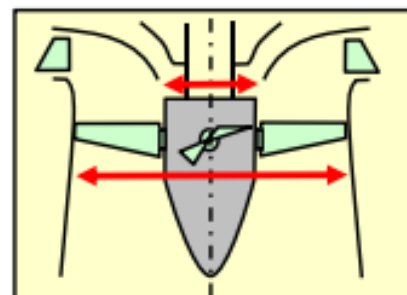
Se busca que el flujo de agua a la salida sea totalmente axial ($c_{2u} = 0$)

$$\Rightarrow H_{M.H.} = H_{M.H.Max} = \frac{u_1 \cdot c_{1u}}{g}$$

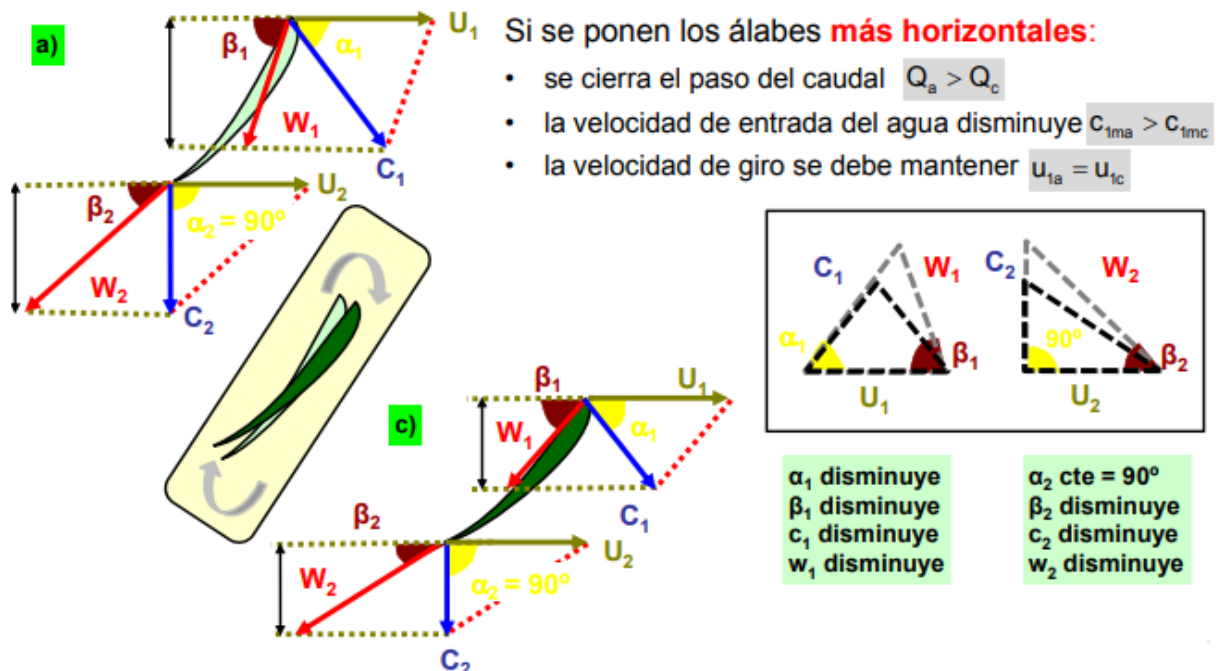
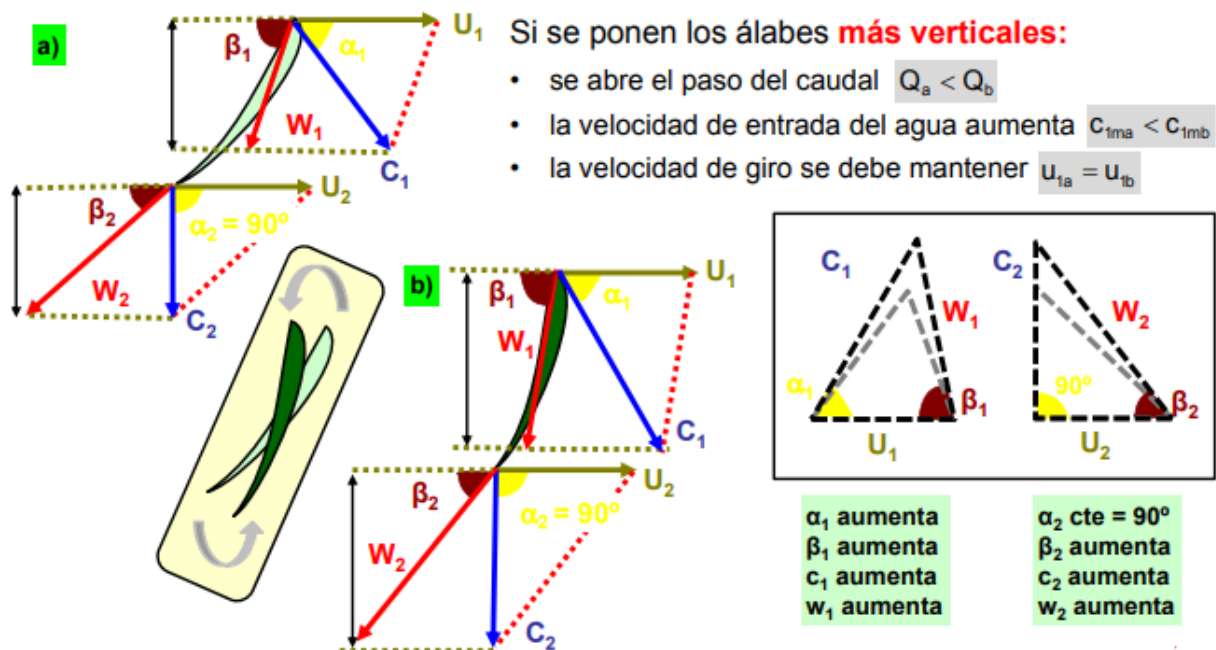
El **giro de los álabes del distribuidor** permite modificar α_1



$$Q = c_{1m} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_{rodete1}^2 - d_{eje1}^2)$$



 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 31 de 50



4.9.3. Comparación de eficiencias

En razón a que los álabes de los rodets son móviles y pueden acercar los vectores de las velocidades, la característica de la eficiencia para turbinas Kaplan y Deriaz es más estable. Las turbinas Pelton poseen una característica estable, sin embargo, frente a las turbinas de reacción son menos eficientes.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 32 de 50

En el caso de las Francis se puede apreciar un pico, y es en el instante en que la velocidad de entrada a la directriz y la velocidad del caudal dentro del rodete coinciden en dirección y por tanto las pérdidas son menores. Sin embargo, al variar la posición de los álabes móviles de la directriz, cambia el ángulo y consecuentemente aumentan las pérdidas, disminuyendo la eficiencia de la turbina.

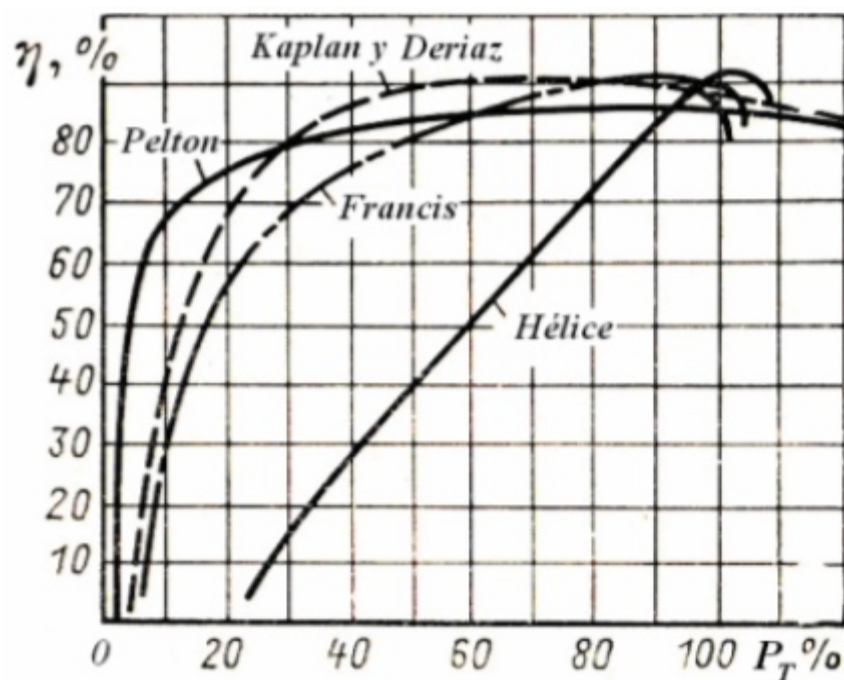


Figura 25: Eficiencia de diferentes tipos de turbinas hidráulicas

4.10 Curvas características de las turbinas Kaplan

Sabemos que en las turbinas Kaplan existen dos órganos reguladores del caudal, los álabes del distribuidor caracterizados por el parámetro a_0 (en las figuras se representa con la letra x) que determina su grado de apertura, y los álabes móviles del rodete, cuya posición viene caracterizada por el ángulo φ_0 .

Esto hace que sea posible el que la turbina funcione en un mismo punto del campo característico con rendimientos distintos; lo que se pretende es conseguir que la turbina Kaplan funcione en cada punto con un rendimiento óptimo. En lugar de una sola colina de rendimientos, como en las turbinas Francis y Pelton, se pueden trazar dos series distintas de colinas de rendimientos, como en la siguiente figura:

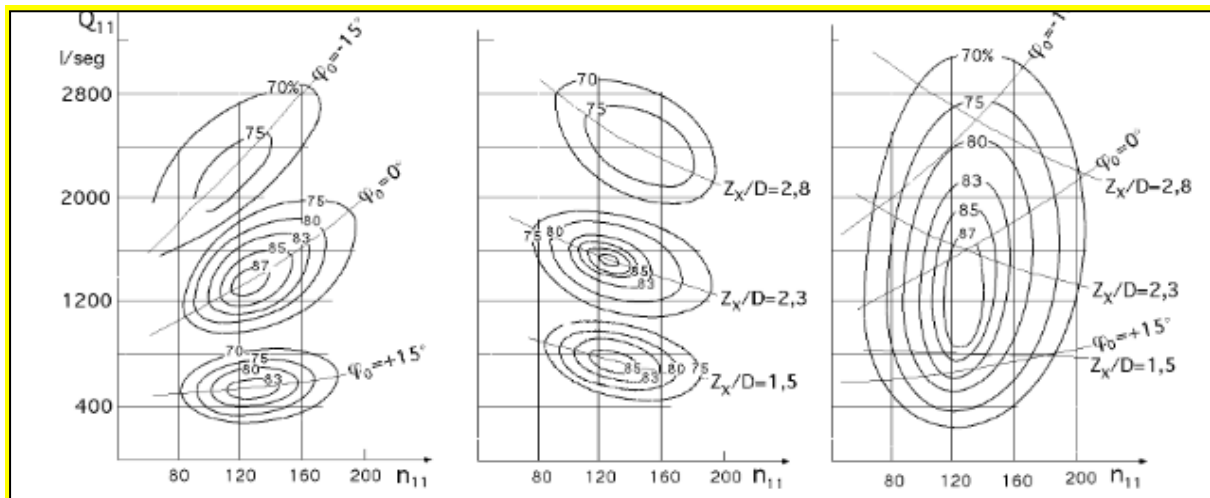


Figura 30. Trazado de la colina de una turbina Kaplan

REGULACIÓN DEL CAUDAL ORIENTANDO LOS ÁLABES DEL DISTRIBUIDOR, MANTENIENDO LOS DEL RODETE FIJOS.

En la primera serie se fijan los álabes del rodete en una posición determinada, $\varphi_0 = \text{Cte}$, y se traza una colina regulando el caudal únicamente con el distribuidor; para ángulos φ_0 distintos se obtienen otras tantas colinas de rendimientos.

REGULACIÓN DEL CAUDAL ORIENTANDO LOS ÁLABES DEL RODETE, MANTENIENDO LOS DEL DISTRIBUIDOR FIJOS.

En la segunda serie se fija la apertura x del distribuidor, y se traza una colina regulando el caudal, modificando únicamente el ángulo φ_0 de los álabes del rodete; para distintas aperturas del distribuidor $\alpha_0 1, \alpha_0 2, \alpha_0 3, \dots$, etc, se obtienen otras tantas colinas.

4.10.1 Colina de rendimientos

De este doblete de colinas hay una muy singular, cuyos rendimientos son los óptimos que se pueden alcanzar en el punto correspondiente del campo característico; a esta colina es a la que normalmente se conoce como colina de rendimientos de la turbina Kaplan. Para el trazado de las curvas características universales de las turbinas Kaplan, se pueden seguir varios procedimientos

Mediante el primero se obtienen un número conveniente de colinas de la primera serie, una colina para cada valor de α_0 dado, regulando el caudal variando el ángulo φ_0 de los álabes del rodete.

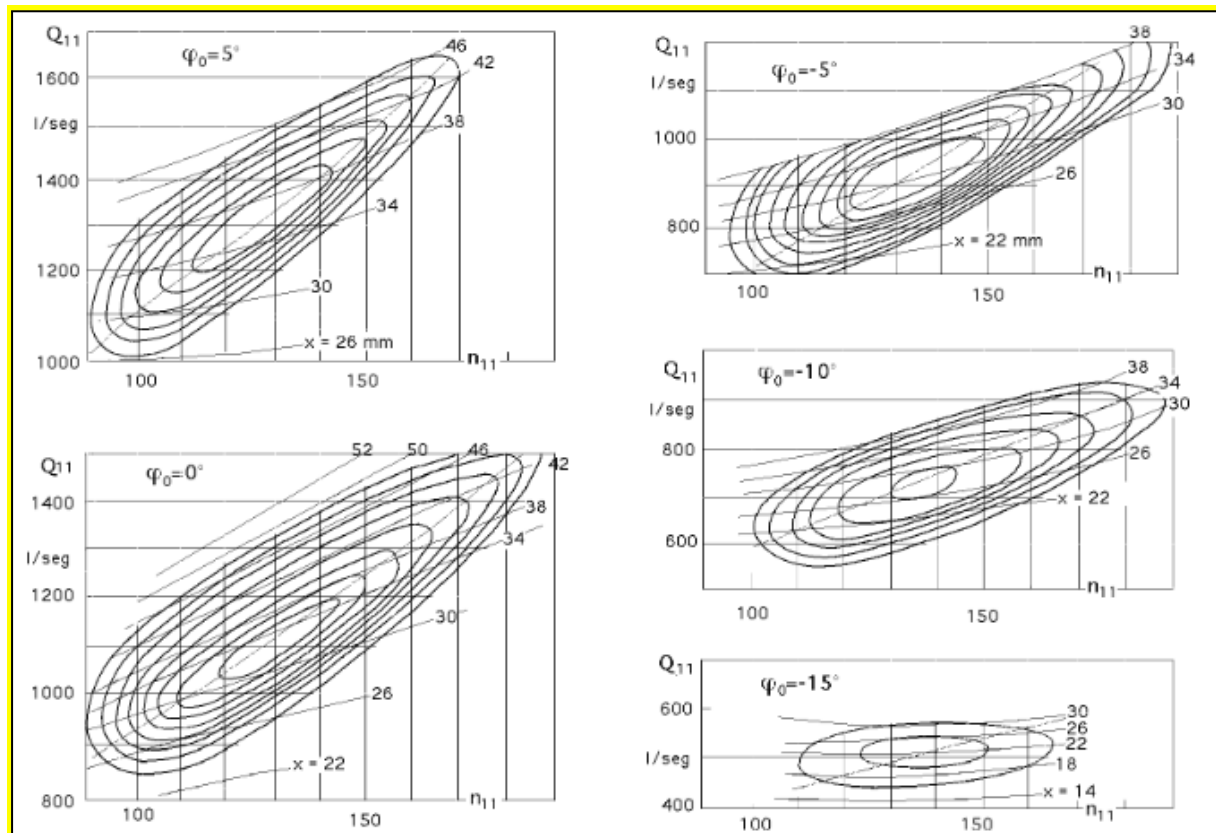


Figura 31. Colinas de rendimientos de una turbina Kaplan para cinco valores del ángulo φ

Según esto, cada punto del campo característico se puede realizar con el η (total máximo) correspondiente a la isolínea de, η_{total} , que pasa por dicho punto, con la condición de que la apertura del distribuidor y el ángulo de los álabes del rodete sean los correspondientes a las líneas de los puntos $\alpha_0 = \text{Cte}$, $\varphi_0 = \text{Cte}$, que pasan por dicho punto.

Siguiendo otro procedimiento se trazan una serie de colinas de rendimientos de uno de los dos tipos descritos anteriormente, siendo preferidos los del primero porque es más fácil variar φ_0 .

Se comprueba que al aumentar φ_0 aumenta Q_{11} mientras que el valor óptimo de n_{11} varía poco, disminuyendo para ángulos φ elevados, como se muestra en las colinas de rendimientos de la turbina Kaplan representada en la Figura 31 obtenidas para cinco valores del ángulo φ_0 de posición de los álabes del rodete. Se establece la condición de situar cada punto del plano (Q_{11}, n_{11}) , con el rendimiento óptimo, obteniéndose así la colina de rendimientos.

Se escoge un valor determinado de n_{11} , se traza la vertical, $n_{11} = \text{Cte}$, y se leen en las diferentes colinas los valores máximos del rendimiento, (caracterizadas por valores

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 35 de 50

distintos de φ_0), y en la intersección de la vertical, $\eta_{11} = \text{Cte}$, con cuantos valores de Q_{11} se deseen, en cada caso, notándose también el valor de φ_0 de la colina respectiva y el valor de α_0 con el que se obtiene dicho rendimiento.

Para cada valor de η_{11} se obtienen los tres tipos de curvas:

$$\eta_{total} = f(Q_{11}) \quad ; \quad \alpha_0 = f(Q_{11}) \quad ; \quad \varphi_0 = f(Q_{11})$$

que se han representado en la Figura 33, para un mismo valor de η_{11} , obtenidas a partir de las curvas características universales descritas anteriormente.

Para otros valores de η_{11} se trazan otras series de curvas de este tipo, y con estos datos se pueden trazar las curvas características universales de las turbinas Kaplan.

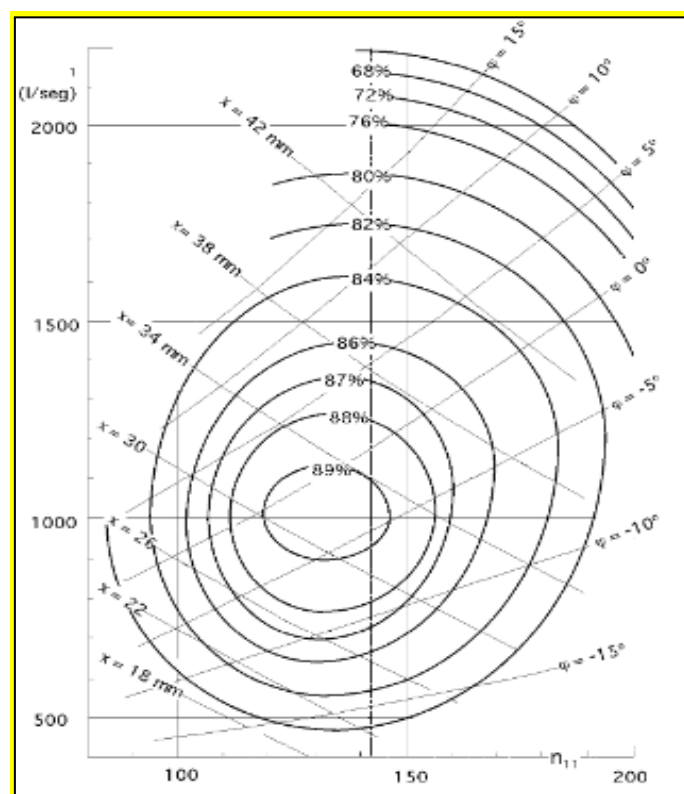


Figura 32. Curvas características universales de una turbina Kaplan

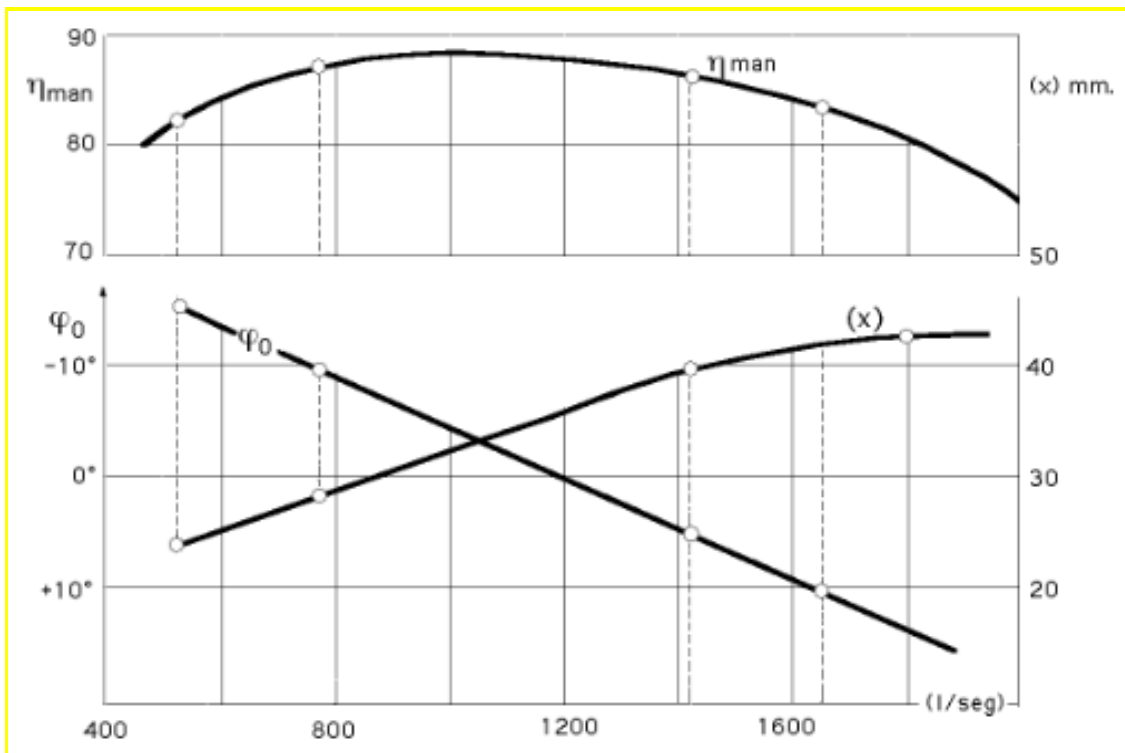


Figura 33. Curvas de η , φ , α para un mismo valor de η_{11}

Para ello, en cada punto del plano (Q_{11}, η_{11}) se anotan tres valores de η_{total} y x , obteniéndose el diagrama de dichas turbinas trazando:

- Las isolíneas de igual rendimiento
- Las isolíneas de $\varphi = Cte$, que son los valores del ángulo del rodete con los que se obtienen los rendimientos máximos
- Las de apertura, $x = Cte$, como se indica en la Figura 31.

Obteniéndose así un diagrama universal aplicable a una serie de turbinas Kaplan geoméricamente semejantes a la turbina ensayada, Figura 32.

La turbina Kaplan en funcionamiento se caracteriza por un número de revoluciones por minuto n , su diámetro D y altura neta H_n determinados, que a su vez proporcionan un η_{11} para dicha turbina Kaplan, siempre que H_n se mantenga constante, por cuanto

$$\eta_{11} = \frac{n^*D}{\sqrt{H_n}}$$

Las características particulares de la turbina Kaplan se determinan sobre el diagrama universal, trazando la vertical que pasa por el punto η_{11} obteniéndose así los

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 37 de 50

valores máximos del rendimiento, para diferentes caudales, y los valores de α_0 y de φ que hay que adoptar para conseguir dichos rendimientos.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 38 de 50

4.11 Ejemplos de aprovechamientos hidroeléctricos de argentina donde se usan turbinas Kaplan

4.11.1 Yacyretá (Argentina / Paraguay)



Figura 34. Presa de Yacyretá

Yacyretá es una presa multipropósito emplazada en el río Paraná, cuyo caudal medio es de 12.000 m³/s. Se trata de una central de llanura equipada con 20 turbinas hidráulicas tipo Kaplan y una potencia instalada de 3200 Mw. A través de cada turbina pueden pasar 2.630 millones de litros de agua por hora. Por las 20 turbinas de Yacyretá puede pasar por hora lo que en su momento equivalía al consumo de agua potable de 13 días de la ciudad de Asunción o de 2 días de la ciudad de Buenos Aires. Posee dos vertederos a lámina guiada, equipados en sus crestas con compuertas radiales: el Brazo Principal y el del Brazo Añá Cuá que conjuntamente poseen una capacidad de vertido de 95.000 m³/s. Con las obras y acciones proyectadas para alcanzar la cota final de proyecto (83 metros sobre el nivel del mar- msnm), sus turbinas podrán operar con su máximo potencial y producir anualmente 19.000 Gwh de energía. De instalarse otras tres turbinas en el Brazo Añá Cuá, esta cifra superará los 20.000 Gwh.

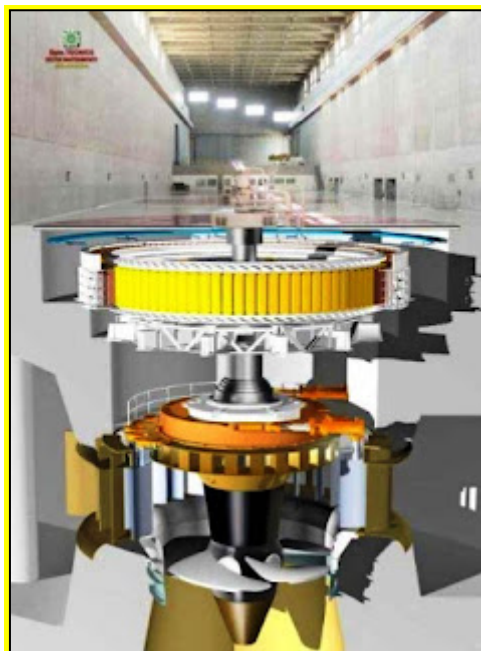


Figura 35. Esquema de turbina instalada en el aprovechamiento

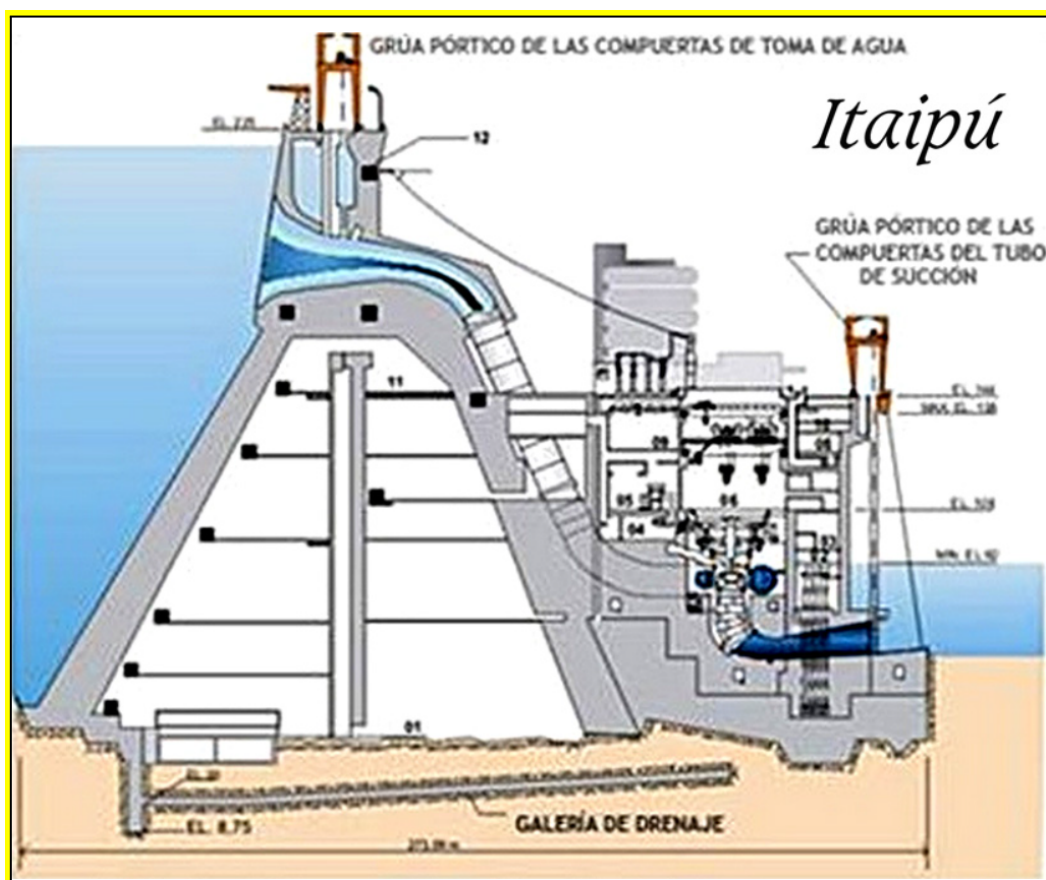


Figura 36. Turbina Kaplan instaladas



Figura 37. Turbina Kaplan instaladas

A continuación se presentan algunos de los parámetros del aprovechamiento:

KAPLAN de eje vertical acoplada directamente al generador	
CAUDAL Unidad – Mínimo	376 m ³ /s
CAUDAL Unidad – Máximo	830 m ³ /s
SALTO NETO NOMINAL	21,3 m
CAUDAL p/ Salto Nominal	794 m ³ /s
POTENCIA NOMINAL	154 MW
POTENCIA MÁXIMA	160 MW
VELOCIDAD ROTACIÓN	71,4 rpm
DIÁMETRO RODETE	9,5 m
PESO RODETE	278 Tn

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 41 de 50

4.11.2 Manuel Piar / Tocoma (Venezuela)



Figura 38. Represa Tocoma

Este Proyecto está ubicado en el Bajo Caroní, a 15 Km. aguas abajo de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar en Guri. El embalse tendrá una cota de 127 m.s.n.m., inundando un área de 87 Km². El proyecto tendrá 10 unidades generadoras, con una capacidad nominal por unidad de 216 megavatios cada una, para un total de 2.160 MW de capacidad instalada. La presa principal tendrá una altura de 65 m y una longitud de 360 m. En la cresta y a todo lo largo de las presas de cierre laterales, está prevista una carretera de servicio

La Central Hidroeléctrica Manuel Piar, mejor conocida como Tocoma, es el cuarto proyecto del complejo Bajo Caroní en Guayana, junto con las centrales Simón Bolívar (Guri), Francisco de Miranda (Caruachi) y Antonio José de Sucre (Macagua). Tocoma es un proyecto clave en los planes de CORPOELEC para suministrar energía segura y eficiente al sistema eléctrico nacional de Venezuela de manera rentable.

La central de Tocoma está equipada con diez unidades generadoras Kaplan de 230 MW, las más grandes y eficientes del mundo.

Las obras incluyen la construcción de un aliviadero con compuertas radiales y las correspondientes presas de cierre. La central y la nave de ensamble están integradas con la estructura de toma. La presa principal de enrocado con revestimiento de hormigón (CFRD) tiene 65 m de altura y 360 m de longitud.

Las unidades generadoras Kaplan más grandes y eficientes del mundo.

El modelo a escala desarrollado por IMPSA se probó en su propio Centro de Investigación Tecnológica en Mendoza, Argentina. Los resultados se validaron en el laboratorio de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), que confirmó su mayor rendimiento entre todos los modelos presentados por los licitadores.

Una vez conectado al Sistema Eléctrico Nacional, CORPOELEC podrá satisfacer toda la demanda energética de Venezuela, estimada en hasta 17.000 MW.

Data Sheet	
> Type of turbine	Kaplan
> Turbine capacity	10 x 230 MW
> Rated head	34.65 m
> Speed	90 rpm
> Runner diameter	8600 mm
> Generator capacity	10 x 257 MVA
> Rated voltage	13.8 kV
> Frequency	60 Hz

Figura 39. Parámetros represa Tocoma

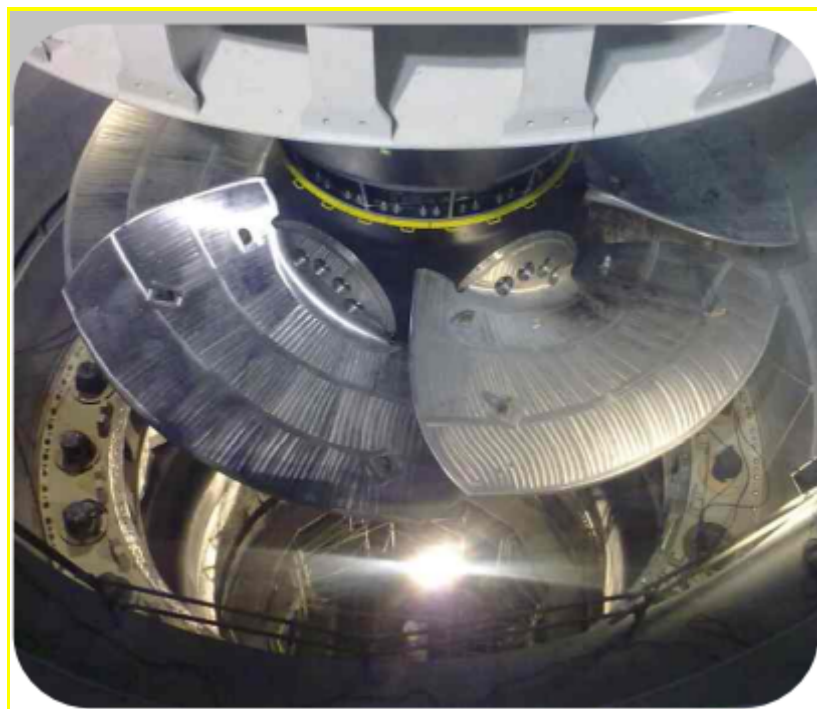


Figura 40. Turbina Kaplan utilizada en el aprovechamiento



Figura 41. Montaje de turbina en casa de máquinas

4.11.3 Estreito (Brasil)

El embalse de Estreito corresponde al lago del reservorio de la Central Hidroeléctrica de Estreito (UHE Estreito), una importante planta generadora de energía ubicada en el río Tocantins, en la frontera entre los estados de Maranhão y Tocantins, en Brasil.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 44 de 50



Figura 42. Vista aérea embalse Estreito.

Características principales:

- Ubicación: Río Tocantins, marcando la frontera entre Maranhão y Tocantins. El módulo del río (caudal medio anual) en la zona de Estreito se estima entre 6.800 m³/s, según la Agencia Nacional de Aguas, BR.
- Capacidad de generación: La planta posee una capacidad instalada total de 1.087 MW, suficiente para abastecer una gran área.
- Área del embalse: El lago represado cubre una superficie total de aproximadamente 400 km², afectando a 12 municipios de la región.
- Funcionamiento central de paso: El diseño de la hidroeléctrica es del tipo de centrales de paso, lo que significa que no necesita un gran embalse de acumulación. Este tipo de proyecto es posible gracias al gran reservorio de la Central de Serra da Mesa, ubicada aguas arriba, lo que permite optimizar la generación de energía con un menor impacto ambiental directo en comparación con las centrales de acumulación.
- Número de unidades: 8 turbinas-generadores verticales, tipo Kaplan
- Potencia por unidad: ~135.9 – 138.7 MW
- Caudal por unidad: ≈ 811 m³/s
- Salto nominal: Bruto ≈ 22 m; Neto ≈ 18.94 m (valor de proyecto usado en fichas técnicas)
- Diámetro del rodete (runner): 9,5 m (dato de Voith para Estreito).



Figura 43. Turbina Kaplan en casa de maquinas.

4.11.4 Rocky Reach (EE. UU.)

La presa Rocky Reach es una presa hidroeléctrica de pasada en el estado de Washington, EE. UU., propiedad del Distrito de Servicios Públicos del Condado de Chelan, que también la opera. Cuenta con 11 generadores con una potencia total de 1300 MW. El proyecto se ubica en el río Columbia, en la zona centro-norte del estado de Washington, a unos 11 km aguas arriba de la ciudad de Wenatchee. La presa se encuentra 761 km por encima de la desembocadura del río Columbia. El embalse que contiene la presa es el lago Entiat. El proyecto abastece de energía a más de 7 millones de personas en todo el noroeste del Pacífico.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 46 de 50



Figura 44. Presa Rocky Reach

Las personas de todo el noroeste se benefician de la energía limpia y renovable producida en Rocky Reach. El proyecto también es reconocido a nivel nacional por sus esfuerzos para proteger el medio ambiente. En 2003 se completó un sistema de derivación para peces jóvenes, el primero de su tipo, para ayudar a los salmones y truchas arcoíris jóvenes en su camino hacia el océano. Una importante modernización de la central eléctrica, iniciada en 1995, incluye nuevas turbinas más respetuosas con los peces. Las mejoras en las turbinas y generadores también están diseñadas para mejorar la eficiencia y la fiabilidad.

Datos breves sobre el proyecto hidroeléctrico Rocky Reach:

- Longitud de la presa: 516 m
- Altura de la presa: 38 m
- 11 generadores
- La capacidad nominal del generador es de 1.349 megavatios.
- La presa contiene 12 compuertas de aliviadero
- La construcción original comenzó en 1956.
- Operación comercial 1961 (siete generadores)
- Se agregaron cuatro generadores entre 1969 y 1971.
- La licencia del proyecto expira en el año 2052

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página N° 47 de 50



Figura 45. Turbina en casa de maquinas

Rocky Reach ha implementado medidas para reducir el impacto sobre peces (especialmente salmones y steelhead) que migran río arriba o río abajo:

- En 2003 se construyó un sistema de paso / bypass para peces juveniles (juvenile fish bypass) para que los peces puedan evitar ciertas zonas peligrosas del turbina / vertedero.
- Las turbinas fueron modificadas / modernizadas con diseños más amigables para peces ("fish-friendly Kaplan turbines") alrededor de 1995. Esto significa que el rodete y canales de flujo internos se ajustan para reducir la mortalidad por colisión, turbulencia severa, golpes de presión, etc.
- En los informes de monitoreo (HCP = Habitat Conservation Plan) se evalúa la supervivencia de juveniles que pasan por la planta: por ejemplo, en el informe 2023 se menciona que más del 93 % de los jóvenes Chinook sobrevivieron el paso combinado de la planta + bypass.
- En el documento "Development of Environmentally Advanced Hydropower" se detalla el diseño de turbinas Kaplan optimizadas para la supervivencia de peces (por ejemplo con geometrías especiales, superficies suavizadas, control de gradientes de presión, etc.).

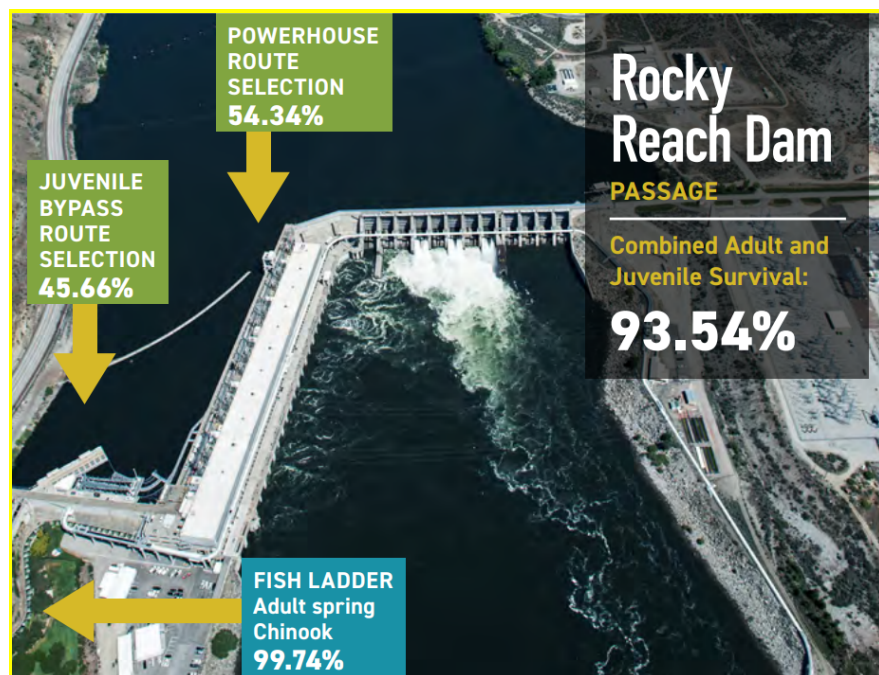


Figura 46. Sistema de protección de fauna ictícola.

Con las turbinas Alden y Minimal Gap Runner (MGR), Voith Hydro es líder en el desarrollo y suministro de turbinas amigables con los peces.

La turbina Alden gira más lentamente que las turbinas convencionales y tiene solo tres palas del rotor, cuya forma minimiza la fuerza de cizallamiento, los cambios de presión y las presiones mínimas dentro del paso del agua.

De este modo, los peces pueden pasar mucho mejor a través de la turbina. Dependiendo de la especie de pez, la tasa de supervivencia de los peces adultos es del 98 al 100 %.

El laboratorio de investigación estadounidense Alden desarrolló el innovador concepto del rodete, y Voith Hydro lo optimizó:

- Baja mortalidad de peces por colisión.
- Número óptimo de palas y álabes guía.
- Perfil hidráulico mejorado de los componentes individuales.
- Velocidad de rotación reducida.
- Excelente geometría del flujo de agua, que favorece el paso descendente de los peces.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 49 de 50

Minimum Gap: máxima ganancia para el medio ambiente

Como alternativa a la turbina Alden, existen turbinas Kaplan amigables con los peces. Para preservar las poblaciones de peces, Voith desarrolló la tecnología Minimum Gap Runner (MGR) como parte del programa Advanced Hydro Power Turbine System (AHTS) del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Las palas MGR están diseñadas con precisión para ajustarse a un cubo completamente esférico y a su periferia.

Esto minimiza el tamaño del hueco, que se mantiene constante en todo el rango de inclinación.

Los estudios han demostrado que casi el 100 % de los peces que pasan por la turbina sobreviven.

Además, la tecnología MGR también garantiza que la turbina funcione de manera más eficiente en la mayoría de los casos.

Esto no ocurre con las turbinas convencionales: durante el ajuste de las palas de una Kaplan tradicional, se genera un hueco más grande tanto en el borde interior como en el exterior de las palas.

Los vórtices, las mayores velocidades del agua, las fluctuaciones de presión y las fuerzas de cizallamiento que se producen durante este proceso representan un peligro para los peces que atraviesan la turbina.

 FACULTAD DE INGENIERÍA	APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS	GRUPO III
	Seminario sobre turbinas Kaplan	Página Nº 50 de 50

Bibliografía

- Chelan County Public Utility District. (n.d.). *Rocky Reach Dam*. Chelan PUD. Retrieved October 12, 2025, from <https://www.chelanpud.org/hydropower/rocky-reach-dam>
- Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. Universidad de Cantabria.
- Entidad Binacional Yacyretá. (s. f.). *Datos técnicos*. Recuperado de <https://www.eby.gov.py/datos-tecnicos/>
- ENGIE Brasil. (n.d.). *Usina Hidrelétrica Estreito*. ENGIE. Retrieved October 12, 2025, from <https://www.engie.com.br/usinas/usina-hidreletrica-estreito/>