



**fcfm**

Universidad de Chile  
Escuela de Verano 2009  
Curso de Energía Renovable

# Guía Teórica

## Experiencia de Conversión de la Energía

---



Escrito por:  
*Ignacio Polanco*

Enero 2009

# Motor de Corriente Continua

## Introducción

Entre los distintos tipos de máquinas eléctricas que actualmente se emplean en aplicaciones de potencia, la primera que en ser desarrollada fue la máquina de corriente continua (C.C.). La razón de ello fue que, en un principio, no se pensó que la corriente alterna tuviera las ventajas que hoy se le conocen, especialmente en la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias.

La primera máquina de C.C., fue ideada por el belga Gramme alrededor de 1860 y empleaba un enrollado de rotor especial (anillo de Gramme) para lograr la conmutación o rectificación del voltaje alterno generado.

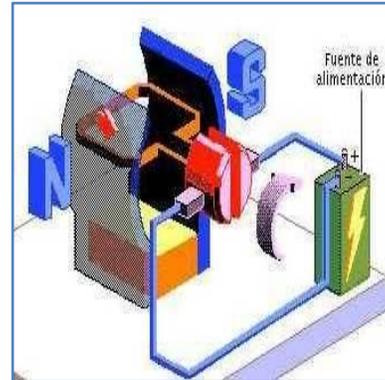


Ilustración 1: Esquema Motor Corriente Continua, dos polos y una bobina de un enrollado.

Posteriormente, el físico W. Siemens y otros, contribuyeron al desarrollo de estas máquinas realizando rectificaciones en su construcción, hasta llegar a la máquina de CC que se conoce hoy.

Pese a las mejoras que han sido desarrolladas en su diseño, la máquina de corriente continua es constructivamente más compleja que las máquinas de corriente alterna, el empleo de escobillas, colector, etc., la hace comparativamente menos robusta, requiere mayor mantenimiento y a la vez tiene un mayor volumen y peso por kilo-watt de potencia. No obstante a lo anterior, la máquina de C.C. tiene múltiple aplicaciones, especialmente como motor, debido principalmente a:

- Amplio rango de velocidades (ajutable de modo continuo y controlable con alta precisión).
- Característica de torque-velocidad variable, constante o bien una combinación ideada por tramos.
- Rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro.
- Posibilidad de frenado regenerativo.

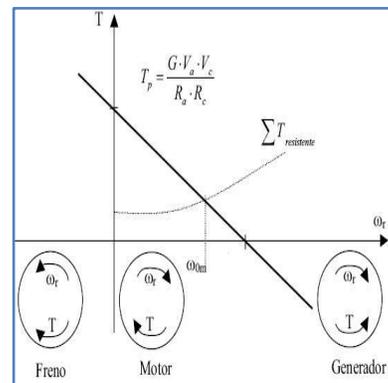


Ilustración 2: Característica Torque Velocidad, Máquina de corriente continua.

## Base Teórica

Para entender de mejor manera el funcionamiento del motor C.C es necesario tratar ciertos conceptos eléctricos asociados a su funcionamiento:

### Campo Magnético ( $\vec{B}$ )

El campo Magnético, corresponde a la perturbación en todo el espacio, producto de la circulación de una corriente. Dado que las líneas de campo magnético SIEMPRE se cierran, se deduce que NO existen fuentes donde sólo nazcan líneas de campo, a diferencia del campo eléctrico, es decir, no existen "cargas magnéticas". Para geometrías simples, el campo magnético responde a la regla de la mano derecha en torno a la dirección de la corriente que lo produce.

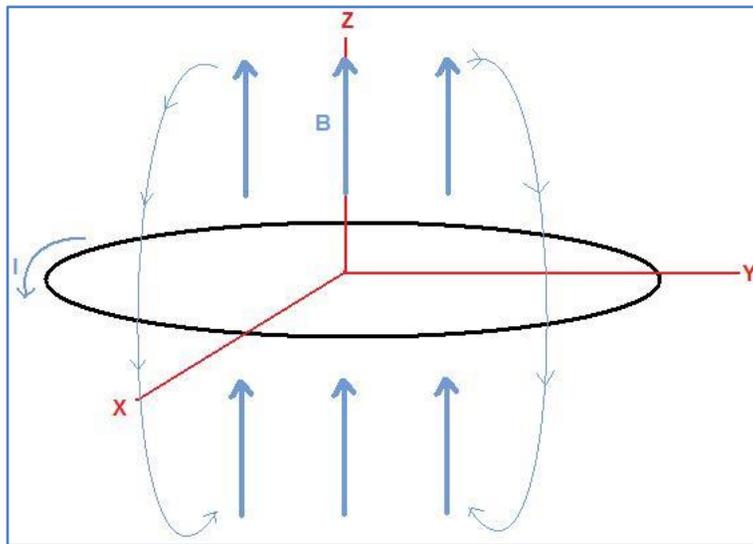


Ilustración 3: Esquema Regla Mano Derecha.

La unidad MKS de Campo Magnético es:

$$1 \text{ Tesla} = 1[T] = \left[ \frac{N}{C \text{ m/s}} \right] = \left[ \frac{\text{Fuerza}}{\text{Carga Velocidad}} \right] = 10^4 [\text{Gauss}]_{cgs}$$

### Ley de Biot-Savart

Esta Ley explica la interacción de fuerzas entre dos circuitos por los que circula corriente. La expresión asociada es:

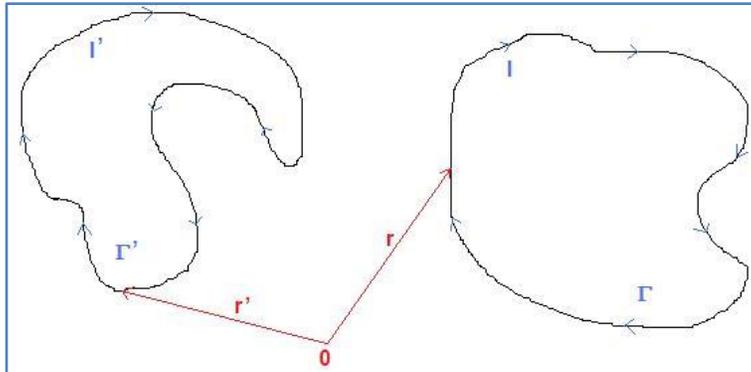


Ilustración 4: Interacción entre circuitos

$$\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_{\Gamma\Gamma'} \frac{I' I d\vec{l} \times (d\vec{l}' \times (\vec{r} - \vec{r}'))}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3}$$

Es decir, cada corriente circulante produce un campo magnético que interactúa con el otro, mediante fuerzas que pueden ser de atracción o repulsión, según sea la dirección de las corrientes.

Ahora bien, esta expresión resulta complicada de entender y aplicar, sin embargo, si conocemos el campo magnético que está produciendo uno de los circuitos, la expresión de la fuerza se reduce a:

$$\vec{F} = \oint_{\Gamma} I d\vec{l} \times \vec{B}(\vec{r})$$

Con esto se tiene que existe una fuerza completamente definida al interactuar un campo magnético con una corriente circulante, a través del producto cruz entre ambas expresiones.

Para efectos de estas experiencias, no es necesario entender “matemáticamente” las expresiones antes expuestas, sino que entender su significado de manera conceptual.

Ya que tenemos los principales conceptos relacionados a la física de un motor de corriente continua, imaginemos que se tiene una espira por donde circula una corriente  $I$  constante, sometida a un campo magnético, cuyas líneas de campo nacen y mueren en un imán permanente, como se muestra en la siguiente ilustración:

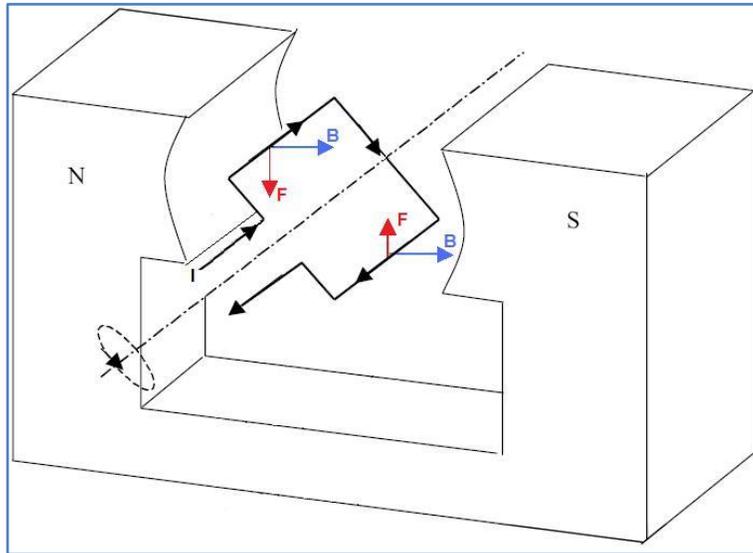


Ilustración 5: Esquema Motor de CC

En este caso, la presencia de un campo Magnético  $B$  y una corriente  $I$  por la bobina, producen un fuerza  $F$  que es perpendicular a ambos y en sentido opuesto a cada lado de la espira, luego, como la suma neta de fuerzas no es nula se tiene que la espira se moverá en torno a su eje de rotación. Es decir, tenemos un motor de corriente continua!

## Aspectos constructivos

### Partes principales

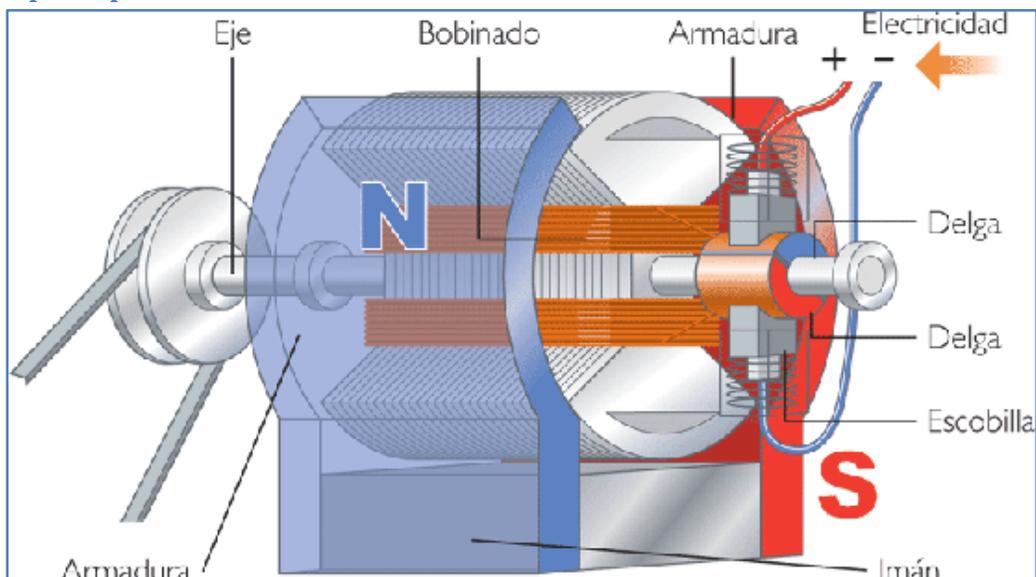


Ilustración 6: Partes de una máquina de C.C

### Conmutadores

Al momento de querer construir un motor de corriente continua, uno de los problemas más difíciles de resolver es alimentar el rotor con corriente y, además, permitir su giro. Claramente, no es posible sólo conectar cables al rotor, pues este debe girar, por lo que se hace necesario utilizar técnicas y métodos de construcción que posibiliten un adecuado funcionamiento.

En la actualidad lo más utilizado, corresponde al sistema de delgas y escobillas que se diagraman a continuación:

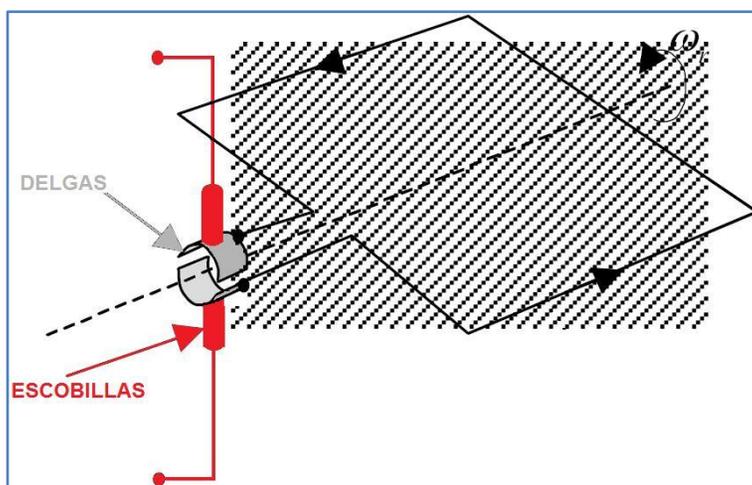
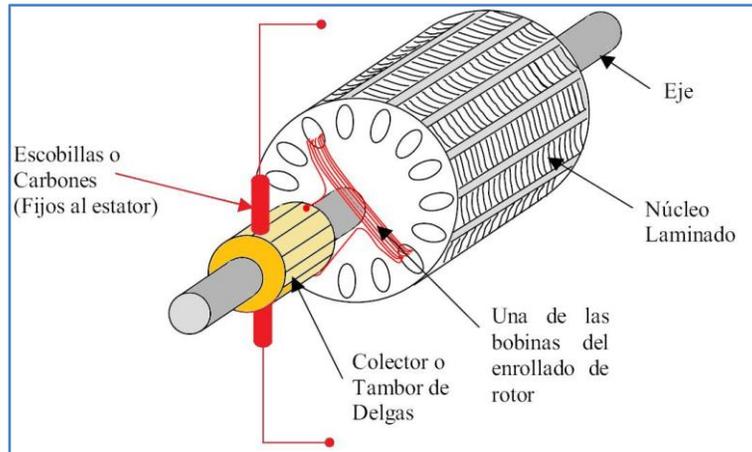


Ilustración 7: Delgas y Escobillas

Consisten básicamente en un sistema de contactos rozantes, en que las delgas se encuentran fijas al rotor y las escobillas, fijas al estator, rozan las delgas, a medida que el rotor gira. La ilustración 6 diagrama el caso de una bobina, sin embargo, dependiendo del uso del motor, puede tener una gran cantidad de bobinas y en consecuencia Delgas, transformando un diseño simple en uno mucho más complejo:



**Ilustración 8: Rotor de verdad, con solo una bobina remarcada**

## Centrales Eléctricas

La función de una central hidroeléctrica es transformar la energía potencial y cinética del agua primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Mediante un sistema de captación (en general será a través de embalses y tuberías) y un sistema de transformación (turbinas y generadores) la energía eléctrica obtenida, será adecuada para suministrar los sistemas de consumo.

La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad.

La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX. Las centrales dependen de un gran embalse de agua contenido por una presa. El caudal de agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua se transporta por

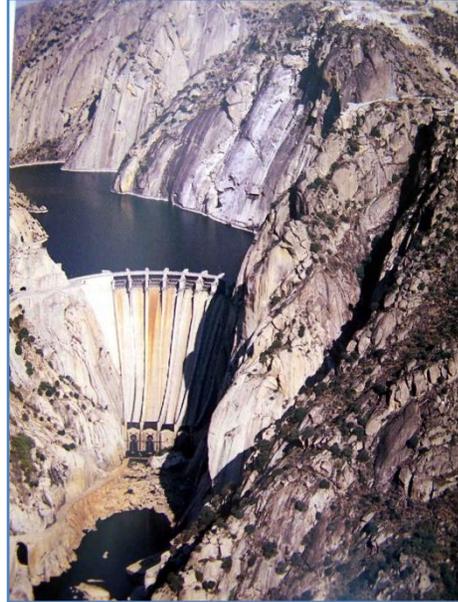


Ilustración 9: Central Hidráulica

unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y turbinas para adecuar el flujo de agua con

respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina sale por los canales de descarga. Los generadores están situados justo encima de las turbinas y conectados con árboles verticales. El diseño de las turbinas depende del caudal de agua; las turbinas Francis se utilizan para caudales grandes y saltos medios y bajos, y las turbinas Pelton para grandes saltos y pequeños caudales.

Además de las centrales situadas en presas de contención, que dependen del embalse de grandes cantidades de agua, existen algunas centrales que se basan en la caída natural del agua, cuando el caudal es uniforme. Estas instalaciones se llaman de agua fluente. Una de ellas es la de las Cataratas del Niágara, situada en la frontera entre Estados Unidos y Canadá.

A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de centrales hidráulicas. En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que constituye fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%). La central de Itaipú, en el río Paraná, está situada entre Brasil y Paraguay; se inauguró en 1982 y tiene la mayor capacidad generadora del mundo

## Tipos de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas, en general, se clasificarán según el discurrir del agua, en:

- Centrales Hidráulicas de Pasada
- Centrales Hidráulicas con Embalse de Reserva
  - Casa de máquina a pie de presa
  - Aprovechamiento por derivación de agua
  - De Bombeo

### Central Hidráulica de Pasada

Una central de pasada es aquella en que no existe una acumulación apreciable de agua "corriente arriba" de las turbinas. En una central de este tipo las turbinas deben aceptar el caudal disponible del río "como viene", con sus variaciones de estación en estación; si ello es imposible el agua sobrante se pierde por rebosamiento.

En la misma se aprovecha un estrechamiento del río, y la obra del edificio de la central (casa de máquinas) puede formar parte de la misma presa. El desnivel entre "aguas

arriba" y "aguas abajo", es reducido, y si bien se forma un remanso de agua a causa del azud, no es demasiado grande. Este tipo de central, requiere un caudal suficientemente constante para asegurar a lo largo del año una potencia determinada. En épocas de lluvias la potencia generada es máxima, pero en tiempo de sequía es mínima, por esto se utiliza como central base.

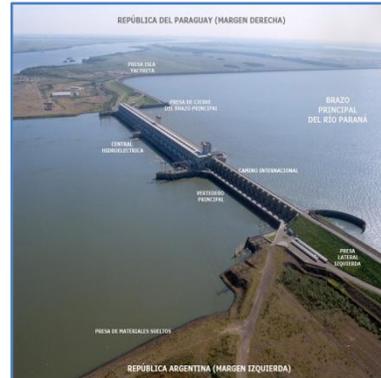


Ilustración 10: Central de Pasada, Río Panamá

### Central Hidráulica con Embalse de Reserva

En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido "aguas arriba" de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales. El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas, así, la generación depende de la demanda y en particular se utiliza para los horarios punta de consumo. Con embalse de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses, cosa que sería imposible en un proyecto de pasada.

Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de pasada, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir kilovatios-hora más baratos.

### *Central con Casa de Máquinas al pie de presa*

En este tipo de central, la casa de máquinas se ubica en el pie de la represa, según se muestra en la figura.

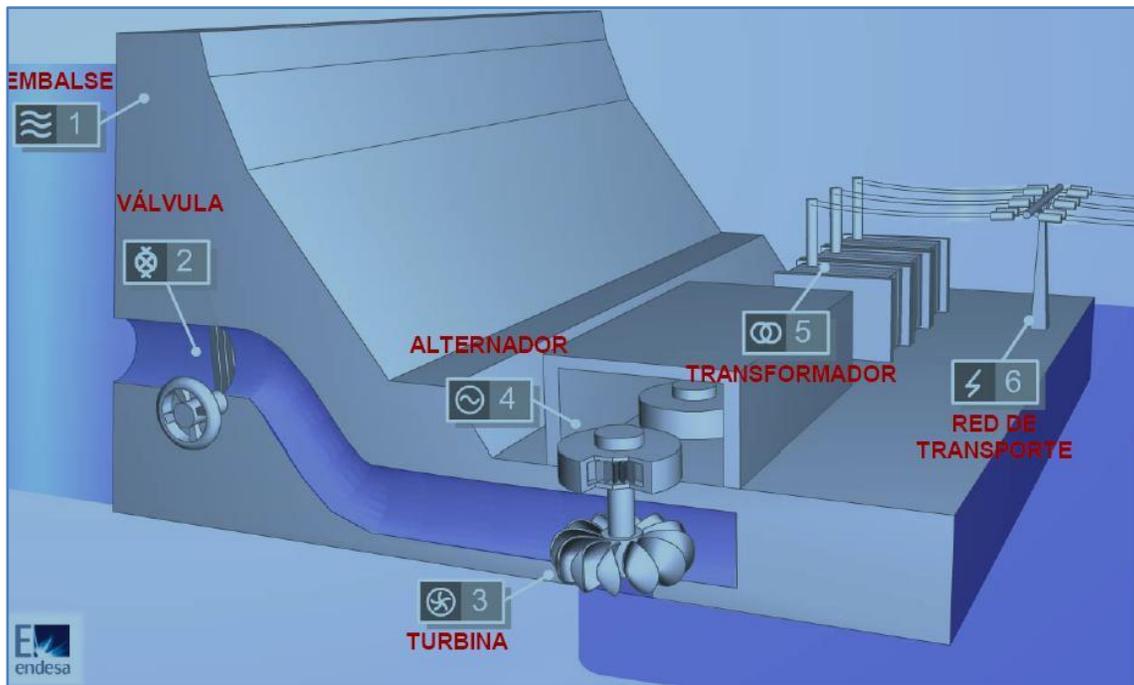


Ilustración 11: Central con Casa de Máquina al pie de la presa

### *Central con Aprovechamiento por derivación de Agua*

En el lugar apropiado por la topografía del terreno, se ubica la obra de toma de agua, y el líquido se lleva por medio de canales, o tuberías de presión, hasta las proximidades de la casa de máquinas. Allí se instala la chimenea de equilibrio, a partir de la cual la conducción tiene un declive más pronunciado, para ingresar finalmente a la casa de máquinas. La chimenea de equilibrio es un simple conducto vertical que asegura, al cerrar las válvulas de la central, que la energía cinética que tiene el agua en la conducción, se libere en ese elemento como un aumento de nivel y se transforme en energía potencial.

### Central Hidroeléctrica de Bombeo

Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales que posibilitan un empleo más racional de los recursos hídricos de un país. Disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel a lo largo del día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía, con el movimiento de agua del embalse superior al inferior, quedando almacenada. Durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor el agua es bombeada al embalse superior para que pueda hacer el ciclo productivo nuevamente. Para ello la central dispone de grupos de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores.

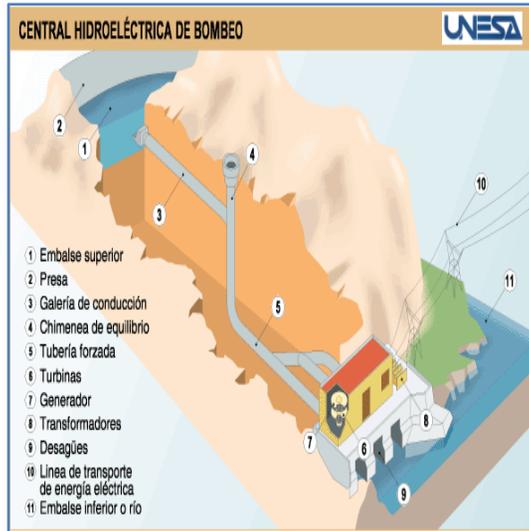


Ilustración 12: Esquema Central de Bombeo

## Componentes principales de una Central Hidráulica

En general, una central hidráulica constará de las siguientes partes:

- Presa
  - Presa de Tierra
  - Presa de Hormigón
    - De Gravedad
    - De Bóveda
- Aliviaderos
- Tomas de Agua
- Casa de Máquinas
- Turbinas
  - De Acción: Pelton
  - De Reacción: Kaplan y Francis

## Presa

Para generar el desnivel de agua, se construye una contención que ataja el río y lo tranquiliza, para que posteriormente se haga pasar por las turbinas. Estas pueden ser construidas con material suelto (tierra) u hormigón.

### Presa de Tierra

En este caso se utiliza material de árido apisonado, revestido de hormigón.

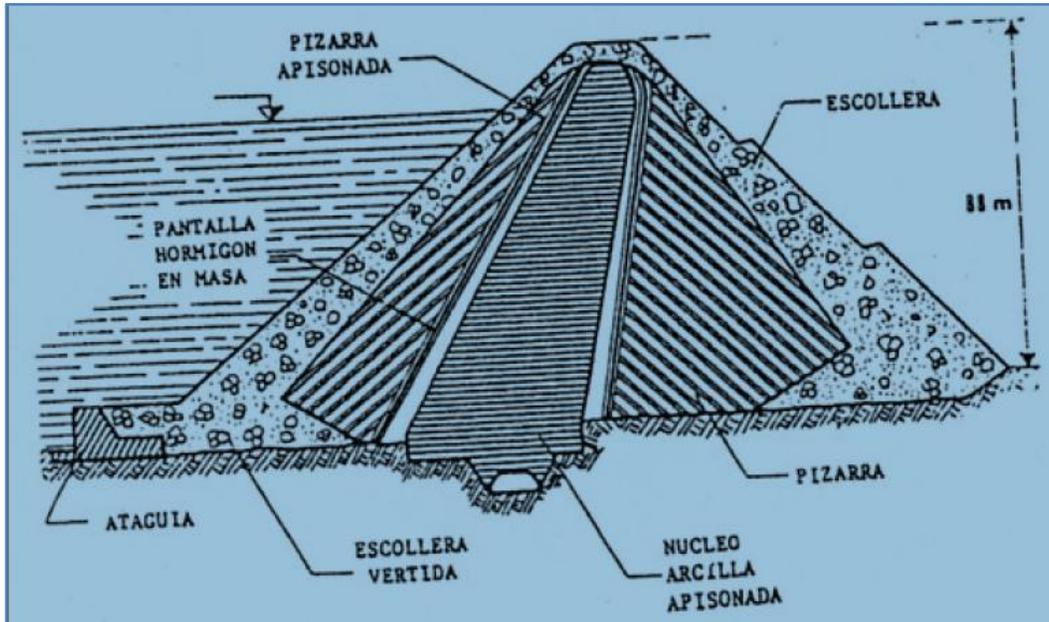


Ilustración 13: Presa de Tierra o Escollera

### Presa de Hormigón

Este tipo de presas son las más utilizadas debido a su seguridad y duración en el tiempo. Según la forma de diseño se sub clasifican en Presa de Gravedad y Presa de Bóveda (que son las más comunes, pues existen otras formas utilizadas).

#### Presa de Gravedad

Es de perfil triangular, cuyo peso contrarresta el torque ejercido por el agua.

#### Presa de Bóveda

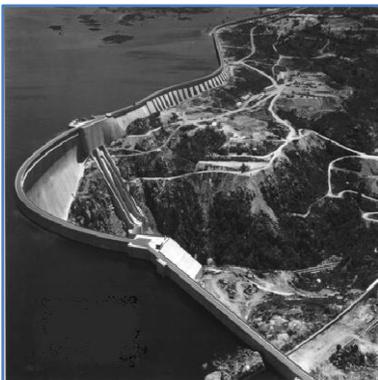


Ilustración 15: Presa de Gravedad

Necesita menos materiales que las de gravedad y se suelen utilizar en gargantas estrechas. En estas la presión provocada por el agua se transmite íntegramente a las laderas por el efecto del arco.



Ilustración 14: Presa de Gravedad

## Aliviaderos

Los aliviaderos son elementos vitales de la presa que tienen como misión liberar parte del agua detenida sin que esta pase por la sala de máquinas. Se encuentran en la pared principal de la presa y pueden ser de fondo o de superficie. Son capaces de liberar, si es preciso, grandes cantidades de agua o atender necesidades de riego. Para evitar que el agua pueda producir desperfectos al caer desde gran altura, los aliviaderos se diseñan para que la mayoría del líquido se pierda en una cuenca que se encuentra a pie de presa, llamada de amortiguación. Para conseguir esto existen grandes compuertas de acero que se pueden abrir o cerrar a voluntad, según la demanda de la situación.

## Tomas de Agua

Las tomas de agua son construcciones adecuadas que permiten recoger el líquido para llevarlo hasta las máquinas por medios de canales o tuberías. Las tomas de agua de las que parten varios conductos hacia las tuberías, se hallan en la pared anterior de la presa que entra en contacto con el agua embalsada. Estas tomas, además de unas compuertas para regular la cantidad de agua que llega a las turbinas, poseen unas rejillas metálicas que impiden que elementos extraños como troncos, ramas, etc. puedan llegar a los álabes y producir desperfectos.

## Casa de Máquinas

Es la construcción en donde se ubican las máquinas (turbinas, alternadores, etc.) y los elementos de regulación y comando

## Turbinas

La turbina es la máquina que convierte la energía del agua en energía mecánica que será transmitida al generador eléctrico. Se clasifican según la forma de actuar del agua sobre los álabes en Turbina de Acción y de Reacción. Las turbinas de acción tienen un efecto único de velocidad, el sentido de proyección del chorro de agua coincide con el sentido de giro del rodete, la presión de agua no varía en los álabes y el rodete no está inundado. En cambio, las turbinas a reacción tienen un efecto conjunto de la velocidad y la presión, el sentido de proyección del chorro de agua y el giro del rodete no coinciden, existe una mayor presión de agua en la entrada que en la salida y el rodete está inundado. Las principales turbinas de acción es la Pelton y la de reacción son Francis y Kaplan.

### *Turbina Pelton*

Un chorro de agua convenientemente dirigido y regulado, incide sobre las cucharas del rodete que se encuentran uniformemente distribuidas en la periferia de la rueda. Debido a la forma de la cuchara, el agua se desvía sin choque, cediendo toda su energía cinética, para caer finalmente en la parte inferior y salir de la máquina. La regulación se logra por medio de una aguja colocada dentro de la tobera. Este tipo de turbina se emplea para saltos grandes y presiones elevadas.



Ilustración 16: Turbina Pelton

### *Turbina Kaplan*

En los casos en que el agua sólo circule en dirección axial por los elementos del rodete, tendremos las turbinas de hélice o Kaplan. Las turbinas Kaplan tienen álabes móviles para adecuarse al estado de la carga. Estas turbinas aseguran un buen rendimiento aún con bajas velocidades de rotación.

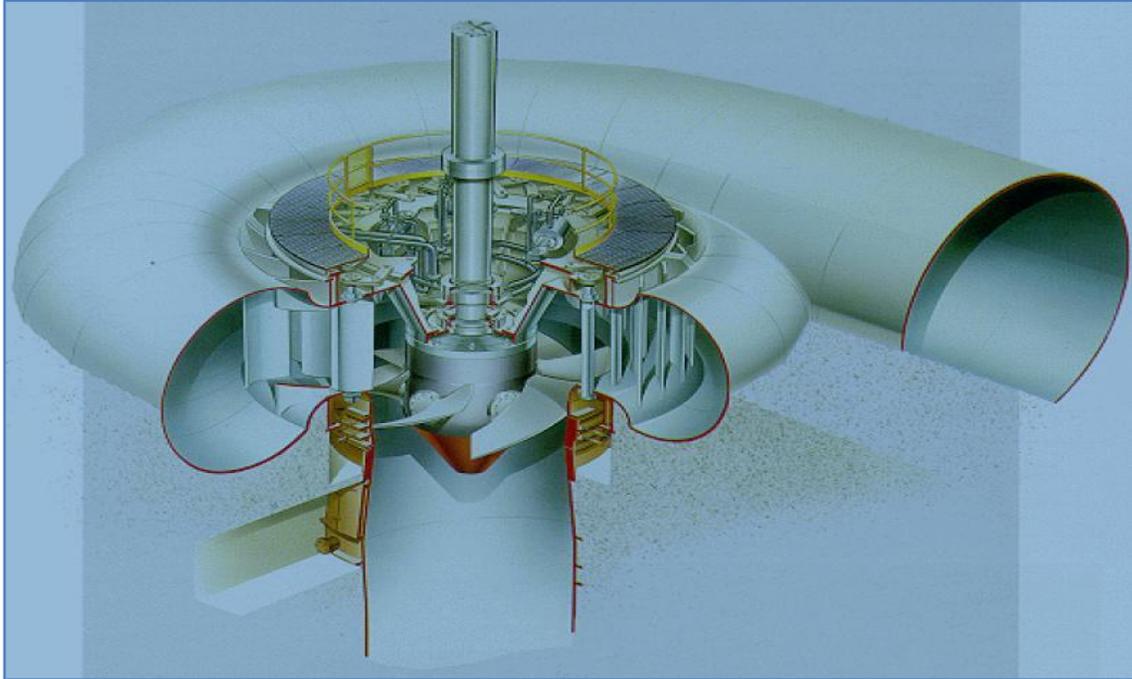


Ilustración 17: Turbina Kaplan

### *Turbinas Francis*

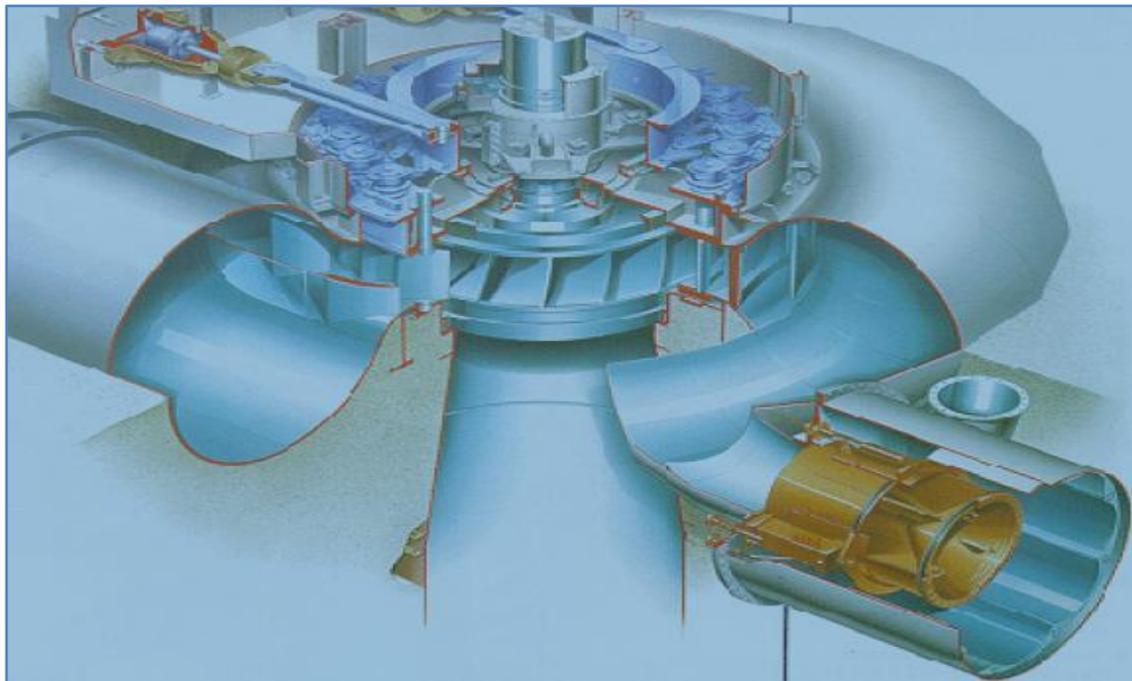


Ilustración 18: Turbina Francis

## Ventajas y Desventajas de las Centrales Hidráulicas

### Ventajas

- No requieren combustible, sino que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.
- Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
- A menudo puede combinarse con otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, navegación y aún ornamentación del terreno y turismo.
- Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.
- Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable.
- La turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia siendo sus costes de mantenimiento, por lo general, reducidos.

### Desventajas

- Los costos de capital por kilovatio instalado son con frecuencia muy altos.
- El emplazamiento, determinado por características naturales, puede estar lejos del centro o centros de consumo y exigir la construcción de un sistema de transmisión de electricidad, lo que significa un aumento de la inversión y en los costos de mantenimiento y pérdida de energía.
- La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
- La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.