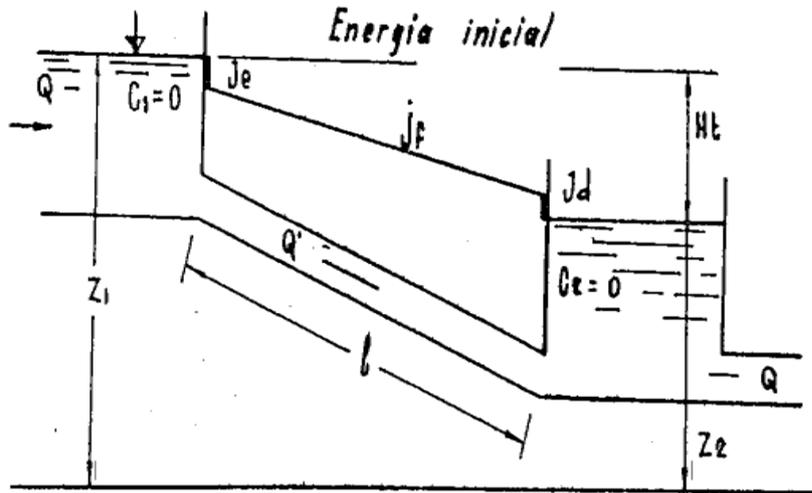
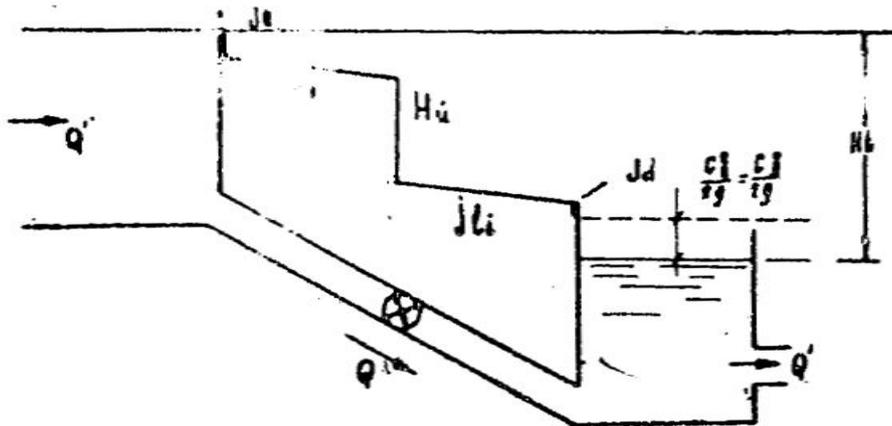


**APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO**

**POTENCIAS DE UN GRUPO TURBOGENERADOR**



$$H_t = z_1 - z_2 = J_e + J_f l + J_d$$



$$H_u \text{ (Altura Neta)} = (z_1 - z_2) - J_e - J_d - J_f$$

$$z_1 - z_2 = H_b \text{ (Altura Bruta)}$$

$$J_e + J_d + J_f = H_r \text{ (Altura de Pérdidas)}$$

$$H_u \text{ (Altura Neta)} = H_b - H_r = H_{\text{turbina}} = H_n \text{ (Altura Nominal de las Turbinas)}$$

$$N_h \text{ (Potencia Hidráulica)} = P_e \times Q \times H_u$$

$$N_m \text{ (Potencia Mecánica)} = R_t \times N_h$$

$$N_e \text{ (Potencia Eléctrica)} = R_g \times N_m$$

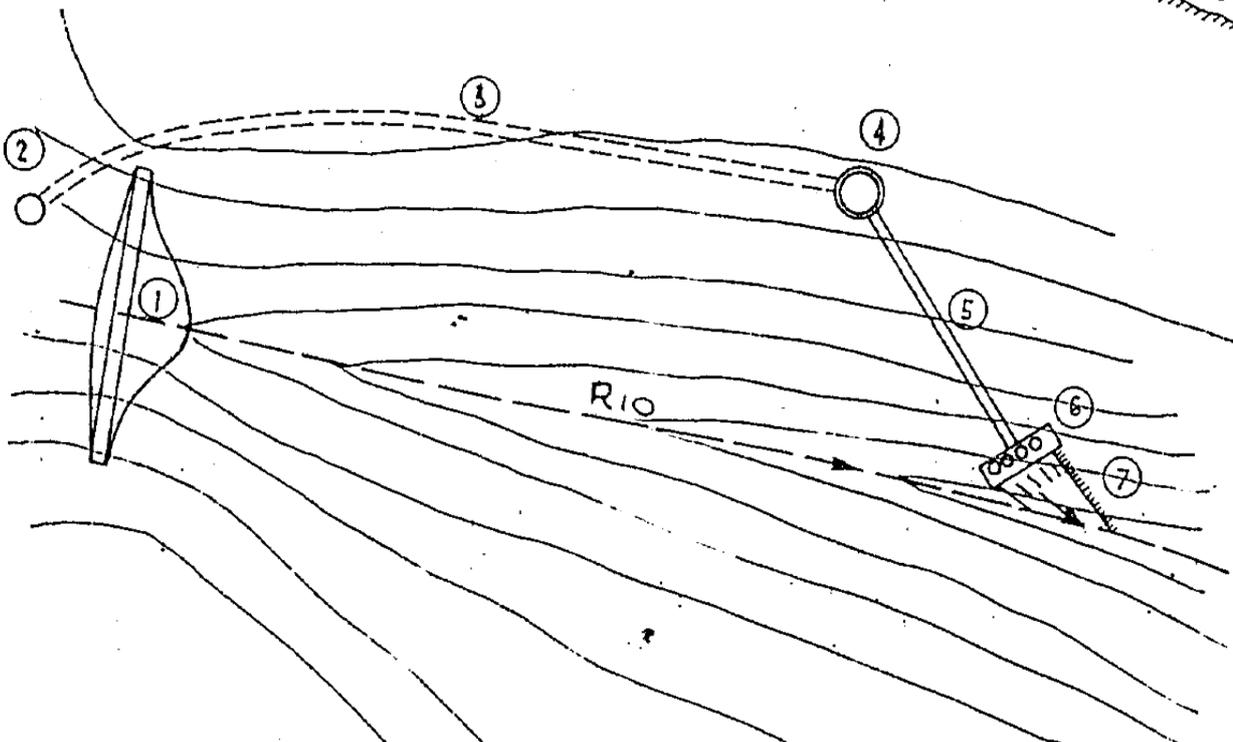
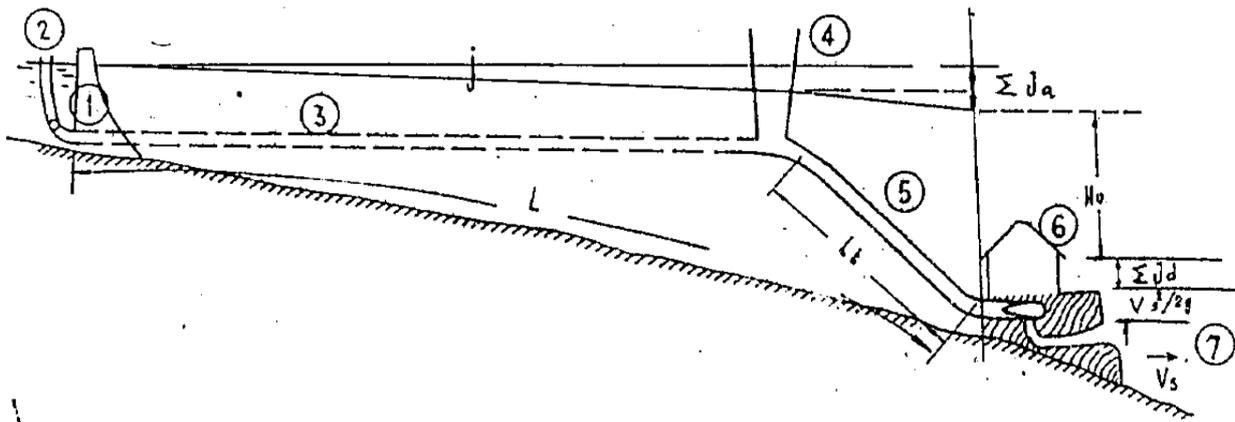
$$N_e = R_g \times R_t \times N_h$$

$$N_e = R_g \times R_t \times P_e \times Q \times H_u$$

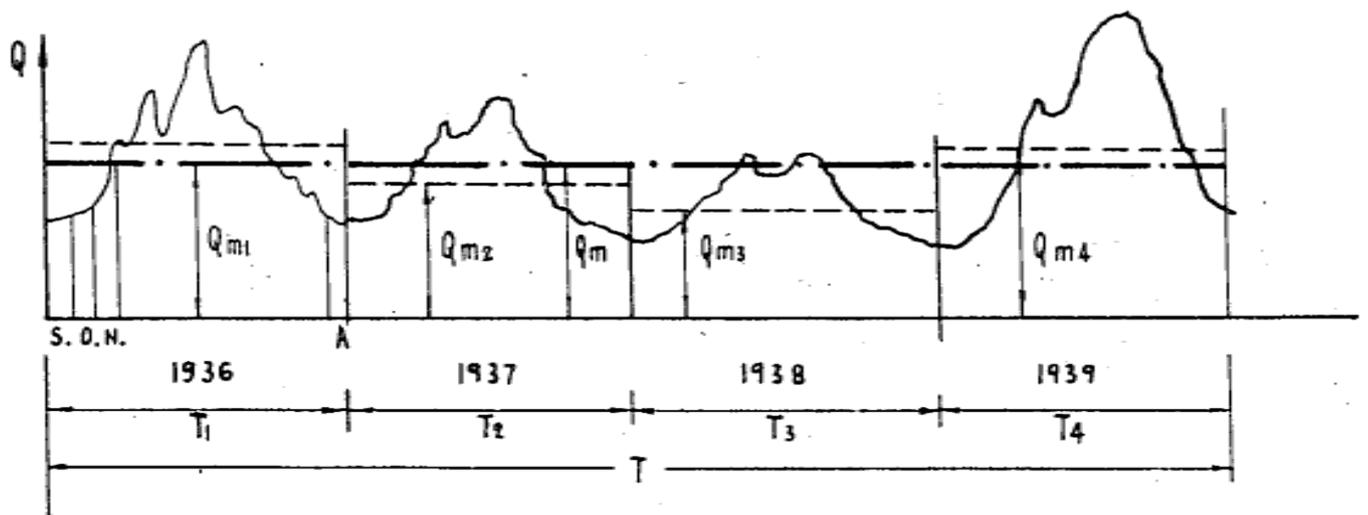
$$N_e \text{ (Kgm/s)} = 0.91 \times 0.90 \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)} \times Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H_u \text{ (m)} = 819 Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H_u \text{ (m)}$$

$$N_e \text{ (kW)} = 819/102 Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H_u \text{ (m)} = 8 Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H_u \text{ (m)}$$

**CONCLUSIÓN:** La Potencia depende de la Altura y del Caudal aprovechados.



**CURVA DE GASTOS CRONOLÓGICOS**



El volumen de agua escurrido en el tiempo  $T_1$ , valdrá:

$$V_1 = \int_0^{T_1} Q \, dt \text{ y análogamente } V_2 = \int_{T_1}^{T_2} Q \, dt \text{ etc.}$$

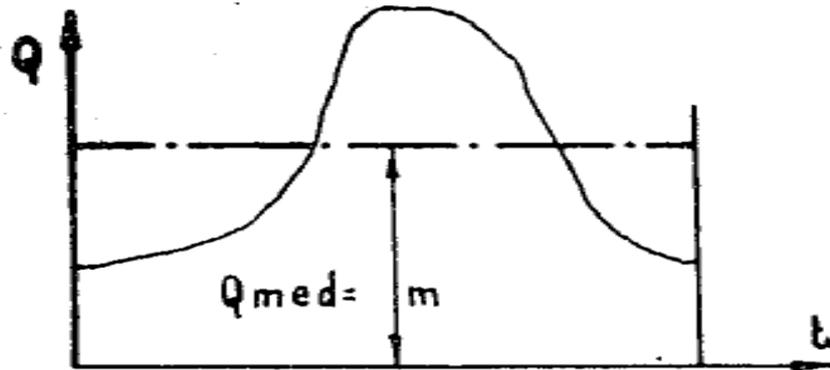
y los valores medios anuales de los gastos:

$$Q_{m1} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} Q \, dt \quad ; \quad Q_{m2} = \frac{1}{T_2} \int_{T_1}^{T_2} Q \, dt \text{ etc.}$$

A lo largo del período  $T = T_1 + T_2 + T_3 \dots$  también se puede calcular el volumen de agua y el gasto medio

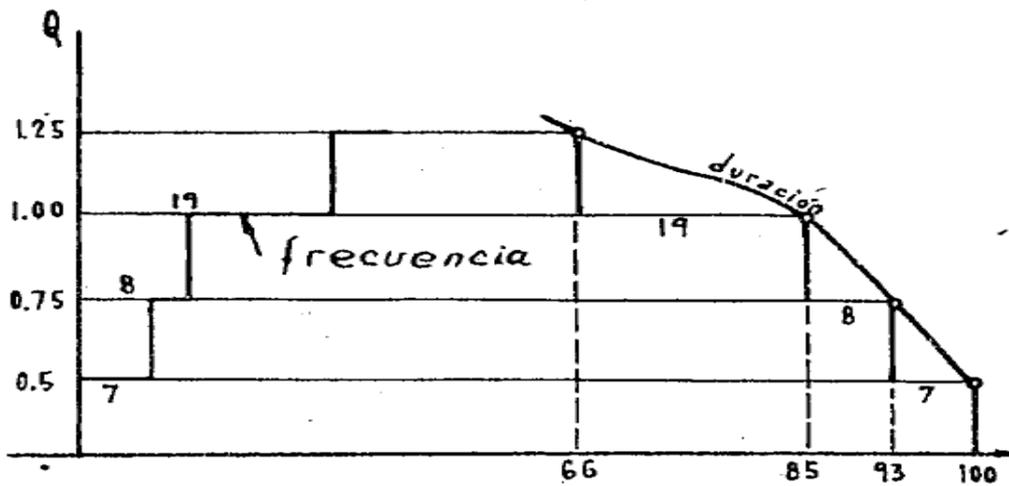
$$V = \int_0^T Q \, dt \text{ y } Q_m = \frac{V}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T Q \, dt$$

Promediando los Caudales Medios Diarios, día a día para todos los años de registro obtenemos la:

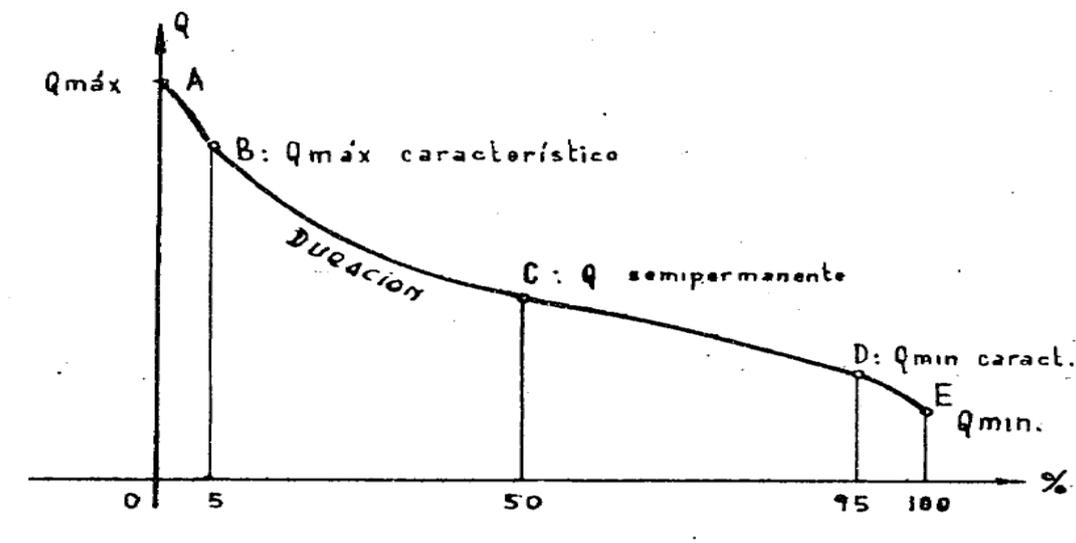


Curva de Descarga Anual o Curva Media de Régimen

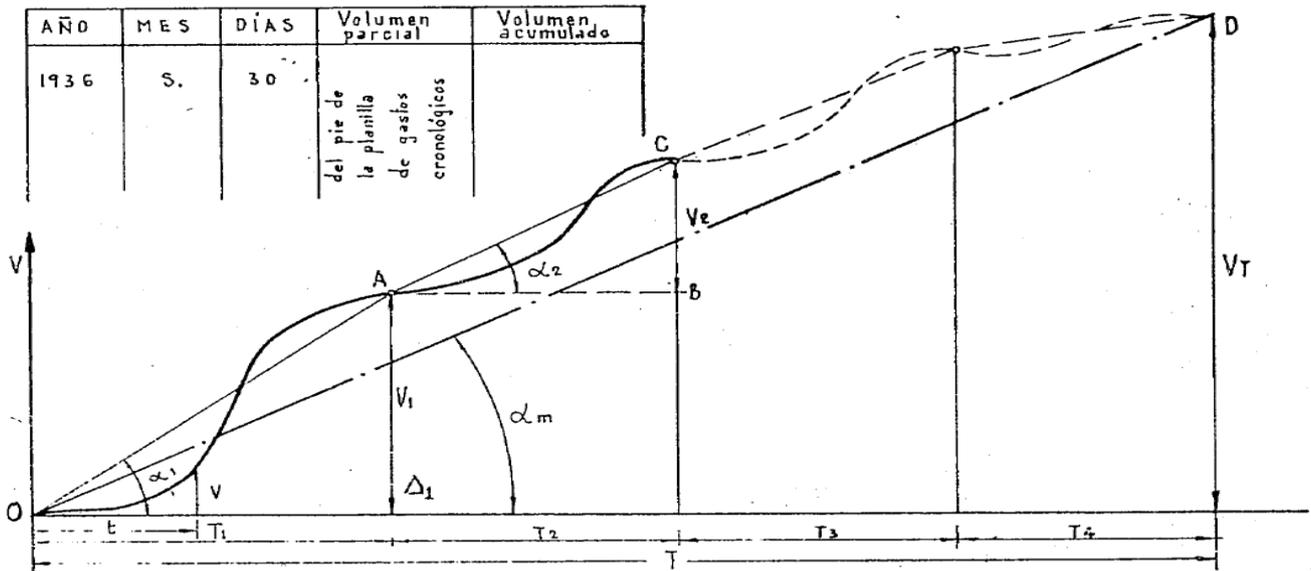
**CURVA DE FRECUENCIA DE GASTOS (O DE GASTOS CLASIFICADOS)**



**CURVA DE FRECUENCIA DE GASTOS ACUMULADA O DE DURACIÓN DE GASTOS**



CURVA DE VOLÚMENES ACUMULADOS

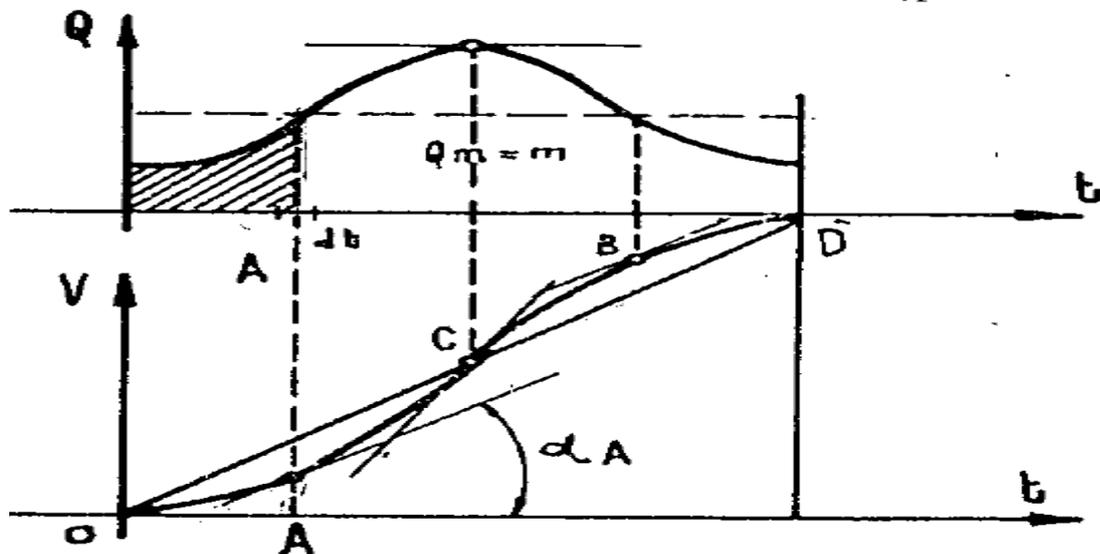


$$M_1 = \frac{V_1}{T_1} = \operatorname{tg} \alpha_1 \frac{\eta \text{ m}^3/\text{cm}}{\Sigma \text{ seg}/\text{cm}}$$

y análogamente  $M_2 = \frac{V_2}{T_2} = \operatorname{tg} \alpha_2 \frac{\eta}{\Sigma}$

y sucesivamente se obtienen  $M_3 - M_4 - M_5 - M_n$

El módulo total del período  $m = \frac{V_T}{T} = \operatorname{tg} \alpha_m \frac{\eta}{\Sigma}$



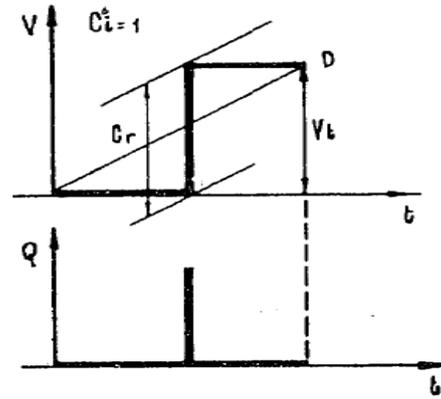
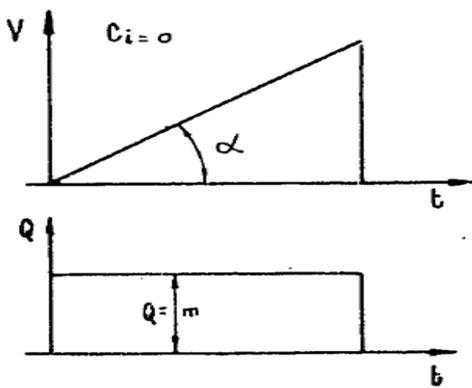
$$V = \int_0^t Q dt$$

$$\frac{dV}{dt} = Q$$

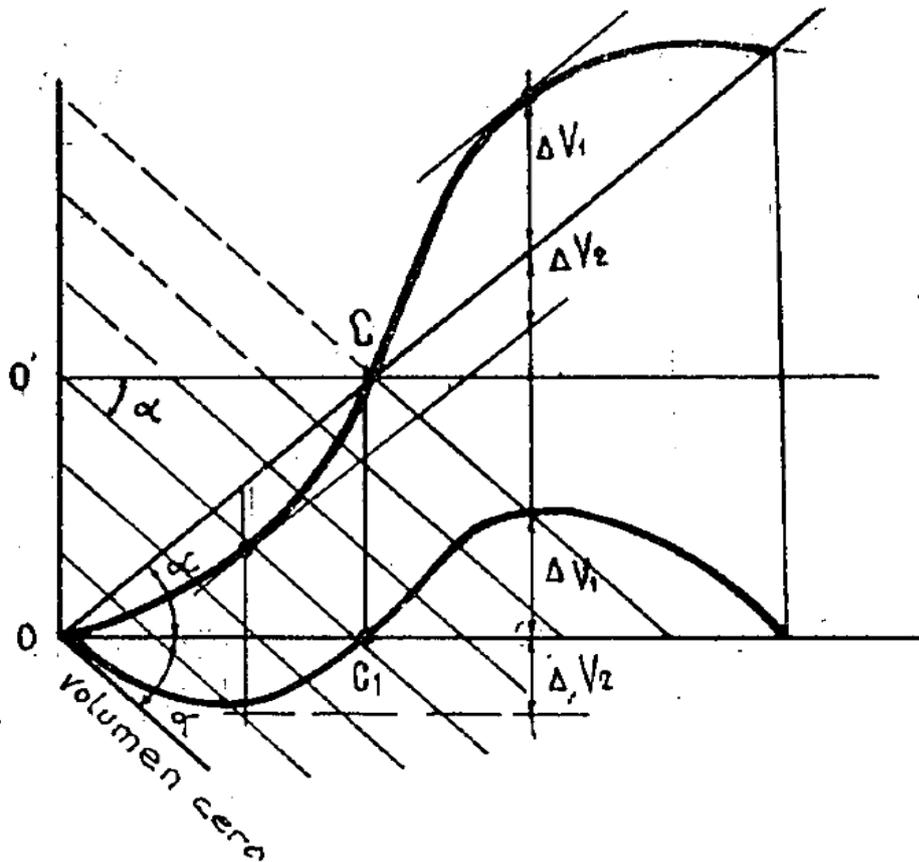
$$\frac{d^2 V}{dt^2} = \frac{dQ}{dt}$$

### COEFICIENTE DE IRREGULARIDAD

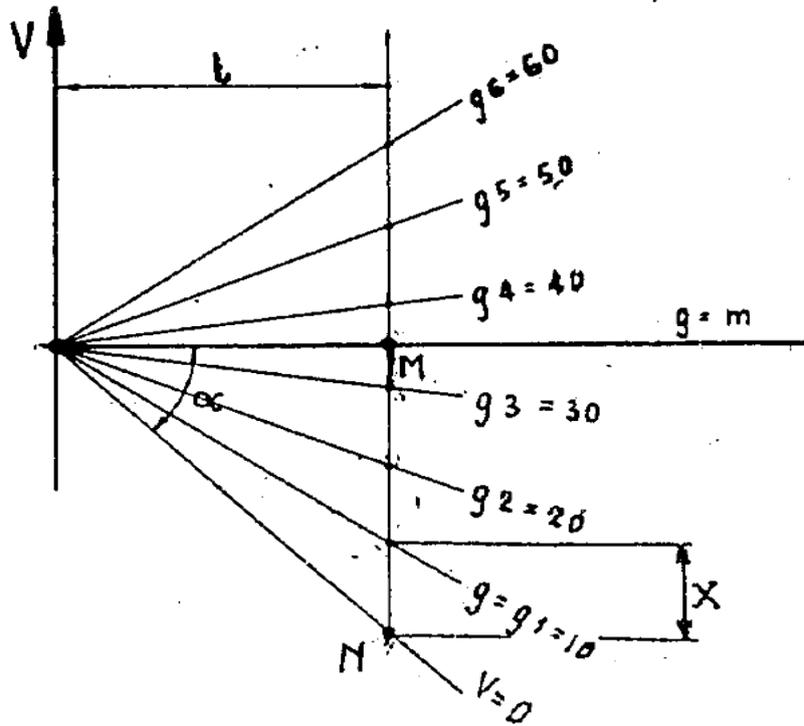
Se define como CI (Coeficiente de Irregularidad) a la relación Capacidad Reguladora/Derrame



### CURVA DE VOLÚMENES ACUMULADOS ABATIDA

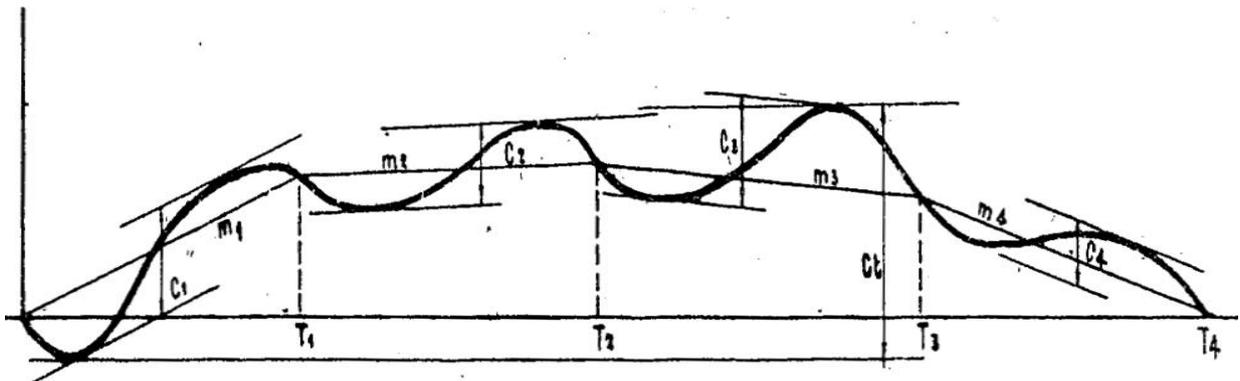


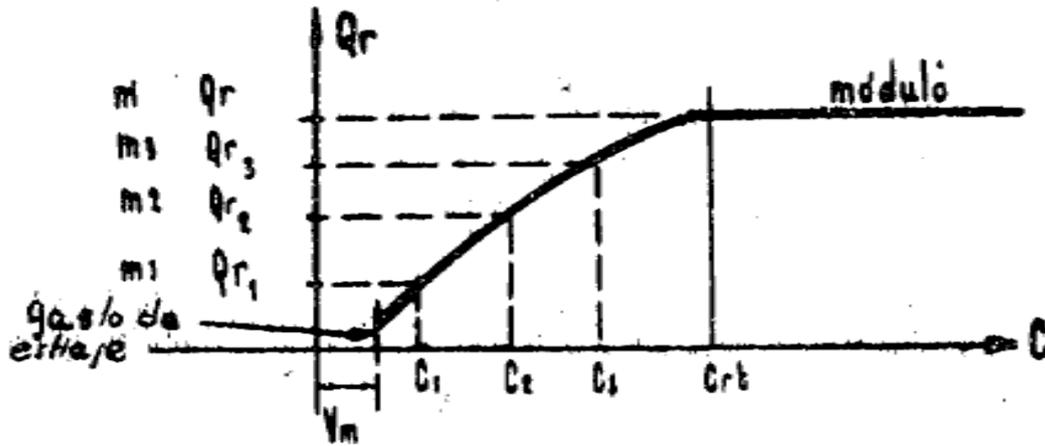
RADIACIÓN DE GASTOS



CURVA DE GASTOS REGULARIZADOS EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD REGULADORA

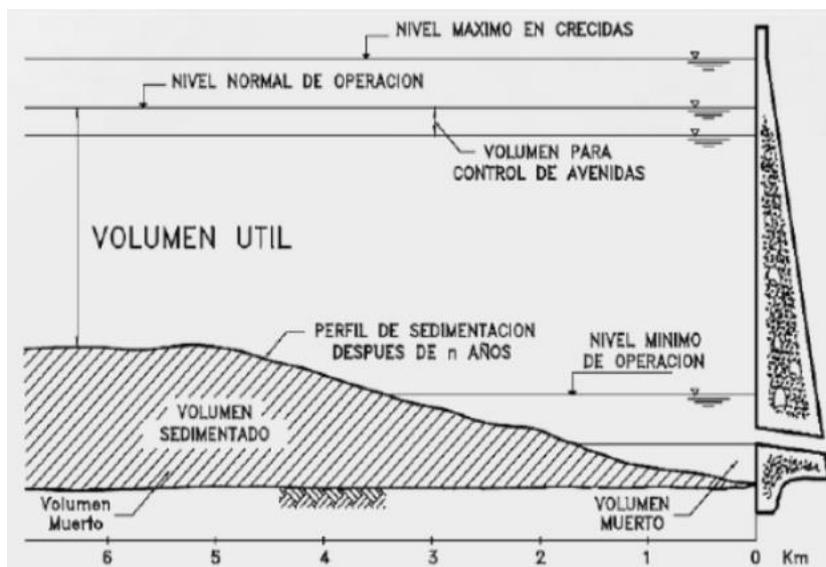
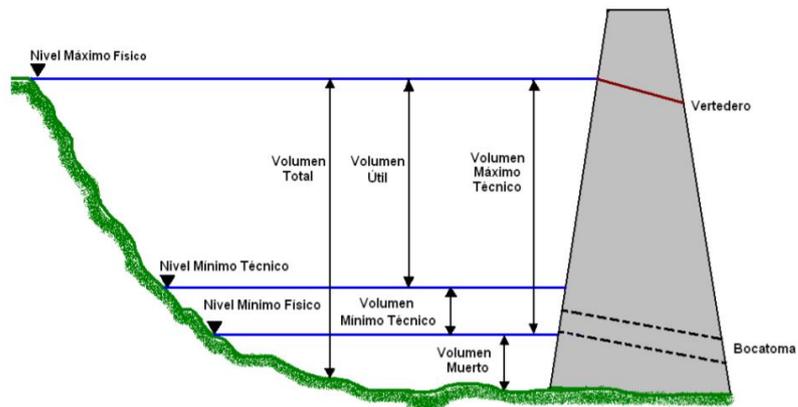
Se ha visto que la capacidad reguladora está dada por la distancia vertical comprendida entre las tangentes extremas paralelas al módulo. En este sentido se tendrán capacidades reguladoras anuales, si se refieren a un periodo de un año hidrológico, bianuales, trianuales, etc o total si se refieren a una regulación de dos años, tres ó más o a todo el periodo estudiado.



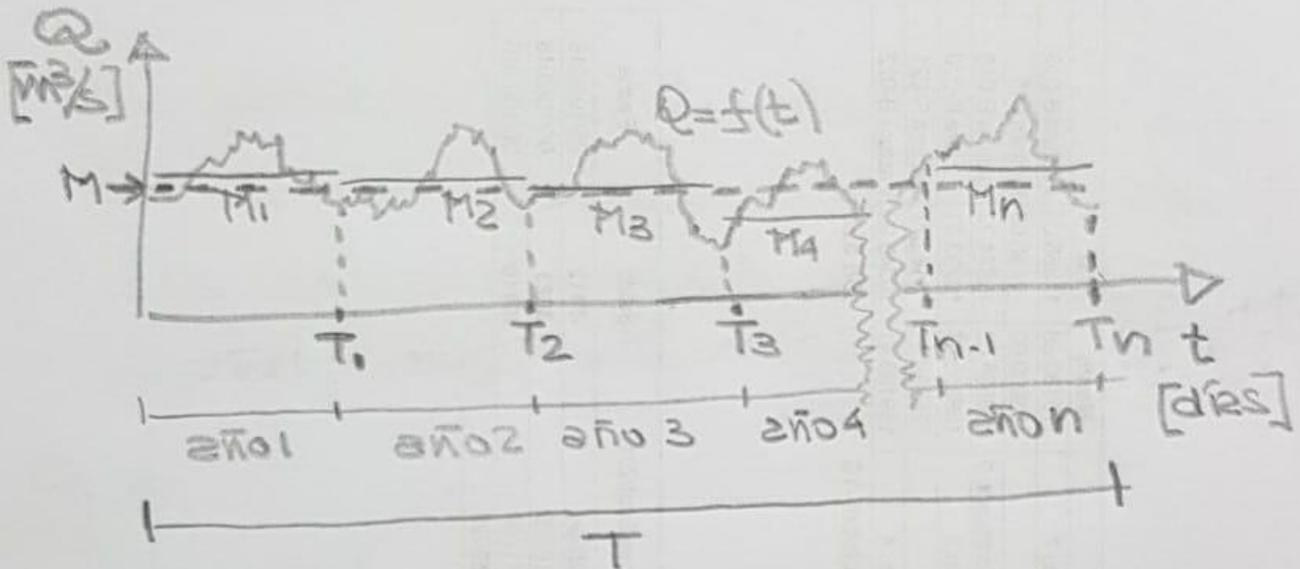


El Volumen Útil disponible en el Embalse debe ser igual o mayor que la Capacidad Reguladora.

$$\text{Volumen Útil} = \text{Volumen Total} - \text{Volumen Muerto} - \text{Volumen Técnico}$$



CURVA DE GASTOS CRONOLÓGICOS



$Q$  = Caudal (variable, obtenido por limnimetría)

Caudal ídem Gasto (sinónimos)

$T$  = Período Total de Registro [días]

$T_i$  = Período Anual de Registro Año  $i$

$$\text{Como } Q = f(t) \Rightarrow V_2 = \int_0^T Q dt$$

$V_2$  = Volúmen Acumulado en  $T$ .

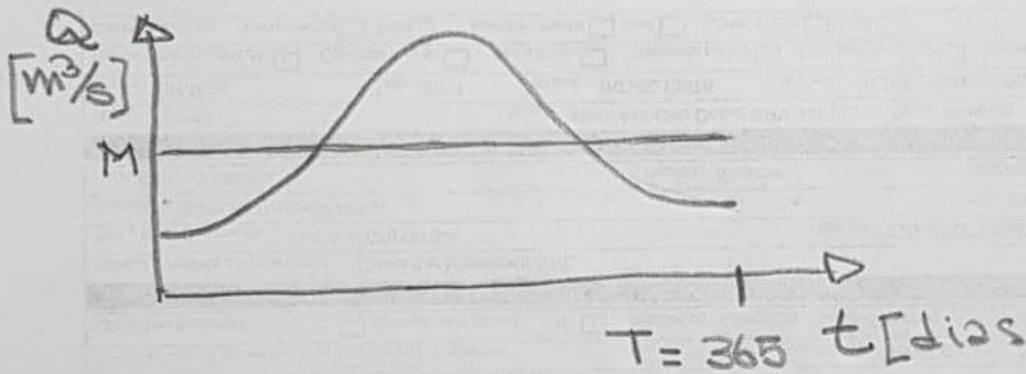
$M$  = Módulo (Caudal Medio en  $T$ ).

$$M = \frac{\int_0^T Q dt}{T} \approx \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}$$

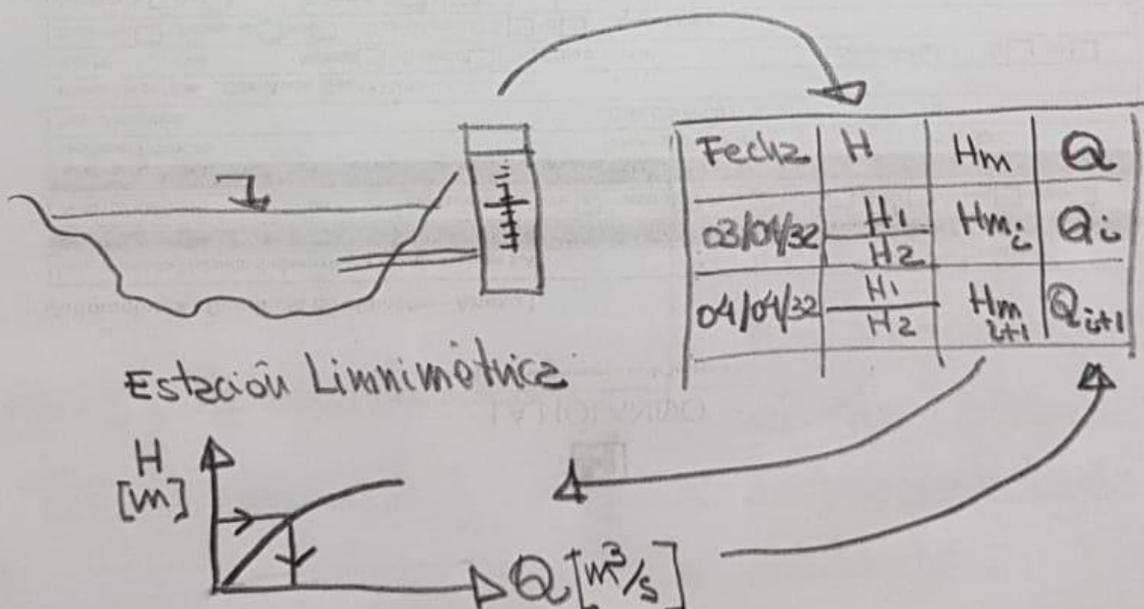
$$M_i = \frac{\int_{t=T_{i-1}}^{t=T_i} Q dt}{T_i}$$

## CURVA DE DESCARGA ANUAL

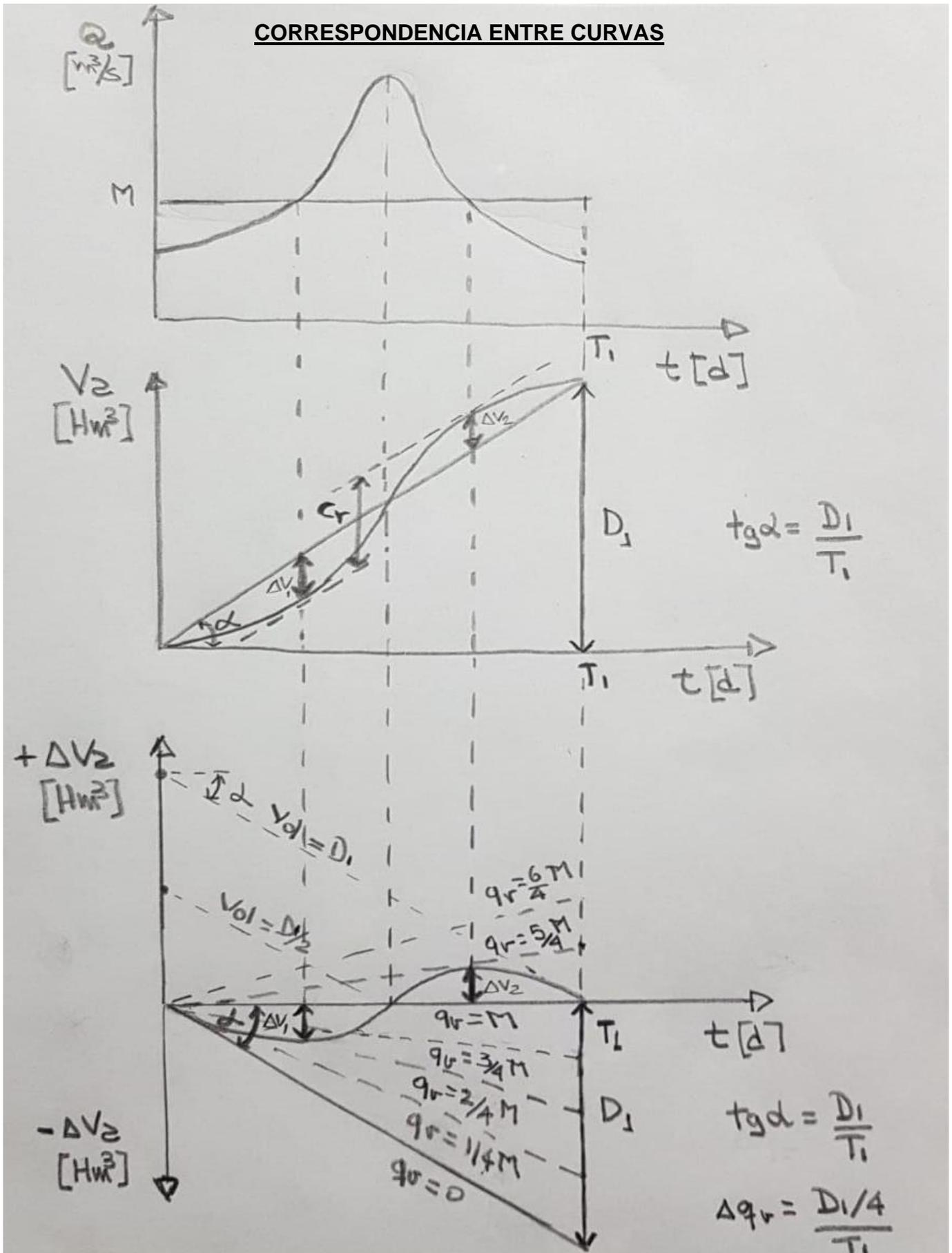
Se obtiene promediando día a día los caudales correspondientes a cada día del año, para todos los años de registro.

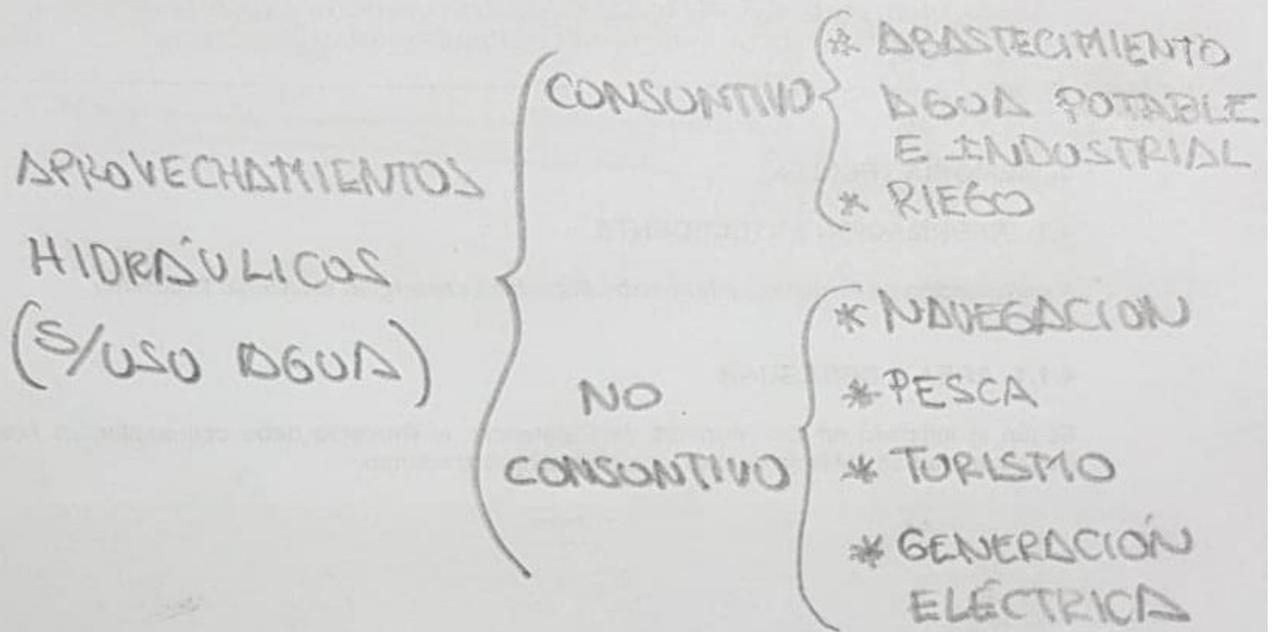


$$V_2 = D_2 (\text{Devenime Anual}) = \int_0^T Q dt = MT$$

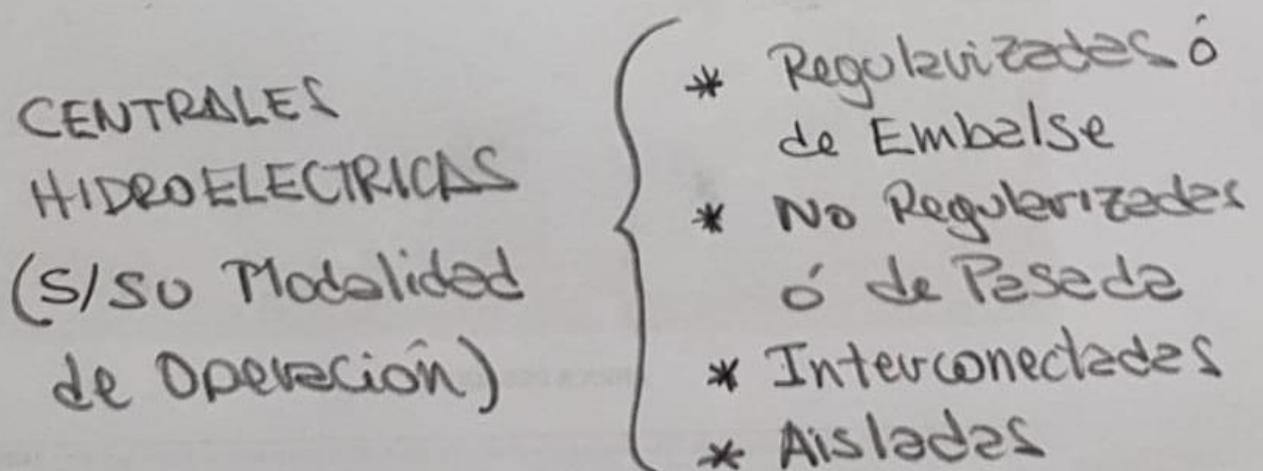
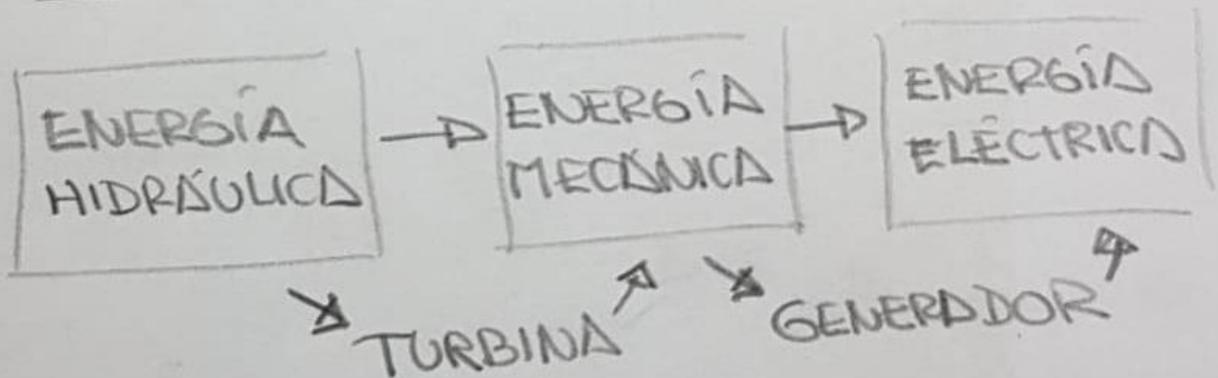


**CORRESPONDENCIA ENTRE CURVAS**





### CENTRALES HIDROELECTRICAS

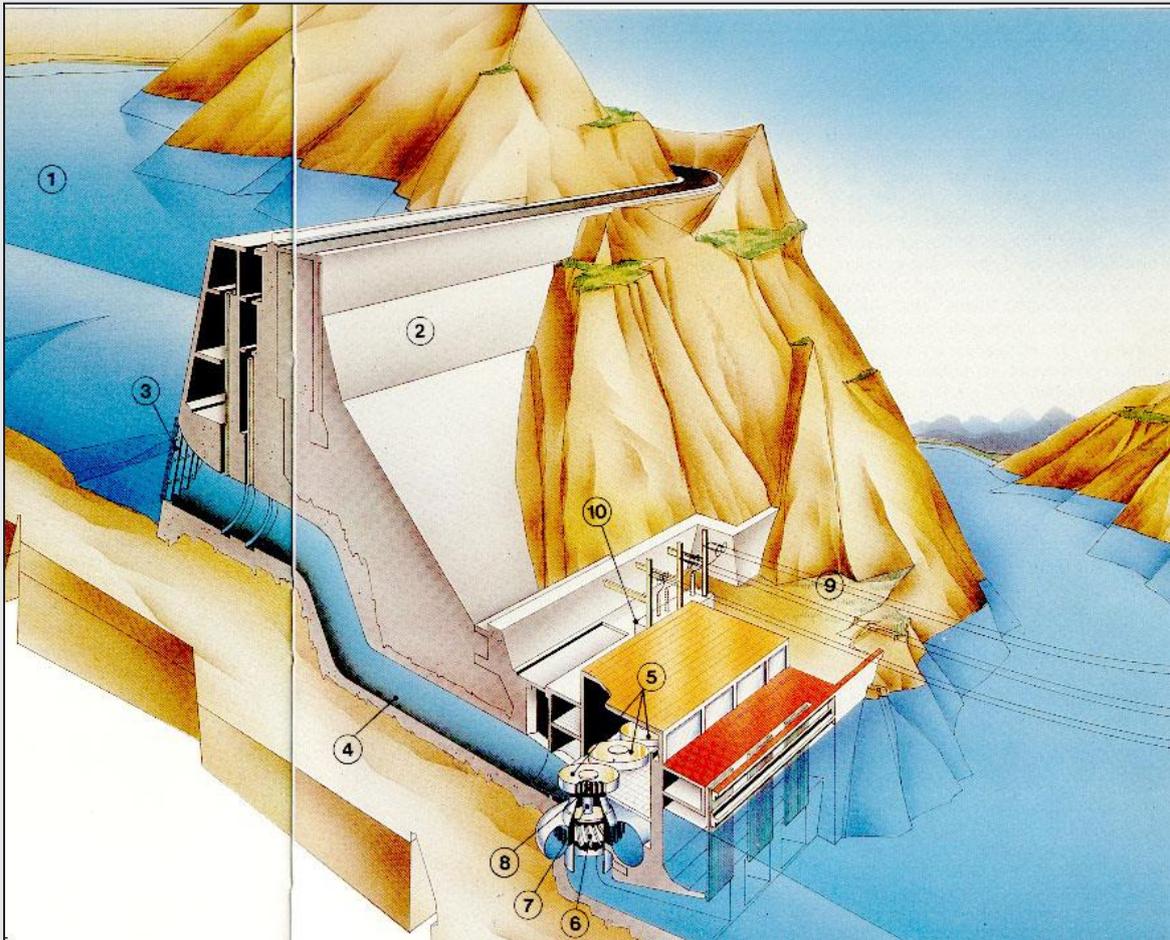


## CENTRALES HIDROELECTRICAS

### Introducción

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica.

*El esquema general de una central hidroeléctrica puede ser*



1. Agua embalsada

2. Presa

3. Rejas filtradoras

4. Tubería forzada

5. Conjunto de grupos turbina-alternador

6. Turbina

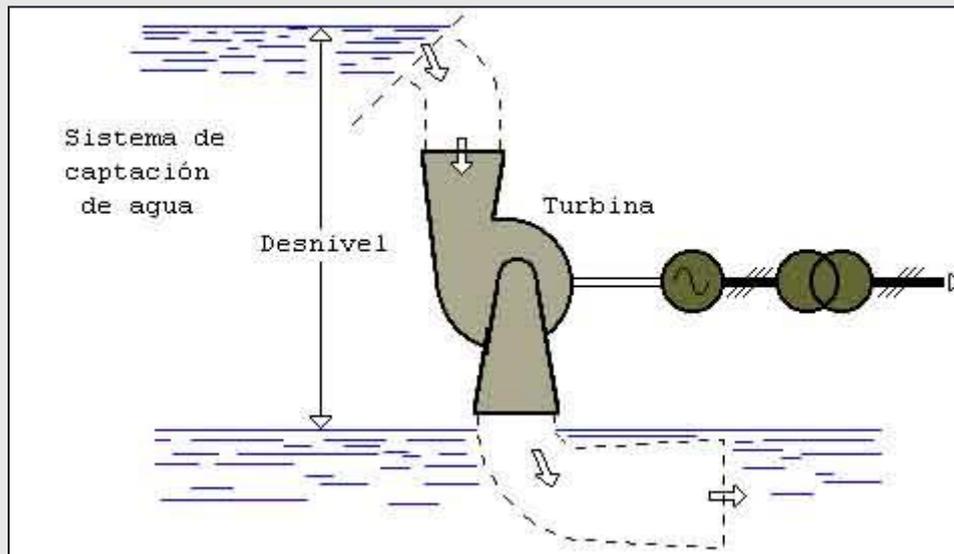
7. Eje

8. Generador

9. Líneas de transporte de energía eléctrica

10. Transformadores

## Sistemas de Captación de Agua



Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el alternador y produce la corriente eléctrica.

### Las ventajas de las centrales hidroeléctricas son evidentes:

1. No requieren combustible, sino que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.
2. Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
3. 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.
4. Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.
5. Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable.
6. 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.

### Contra estas ventajas deben señalarse ciertas desventajas:

1. Los costos de capital por kilovatio instalado son con frecuencia muy altos.
2. 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.
3. La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
4. La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.

## Tipo de Centrales Hidroeléctricas

### Central Hidroeléctrica de Pasada

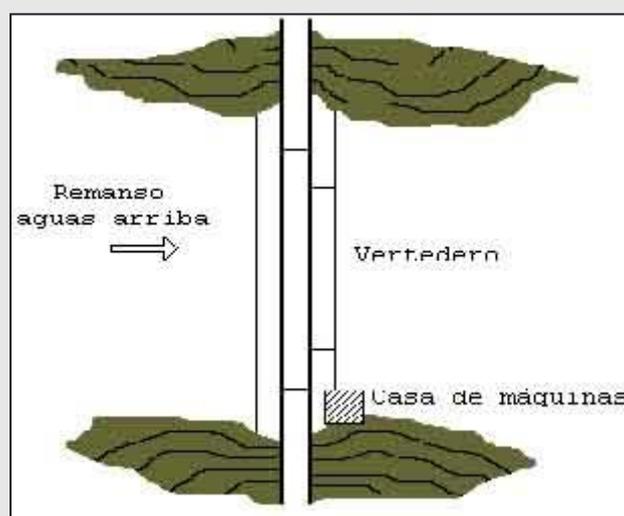
Una central de pasada es aquella en que no existe una acumulación apreciable de agua "corriente arriba" de las turbinas.

En una central de este tipo las turbinas deben aceptar el caudal disponible del río "como viene", con sus variaciones de estación en estación, o si ello es imposible el agua sobrante se pierde por rebosamiento.

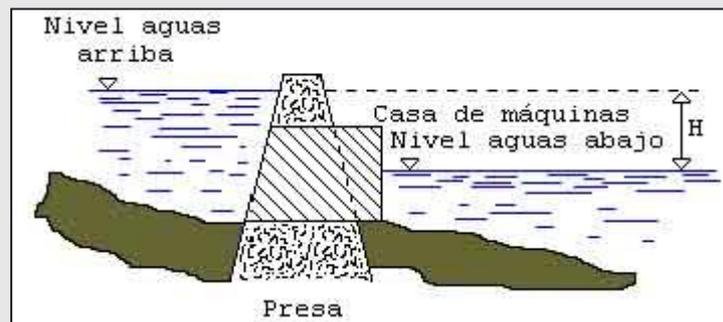
En ocasiones un embalse relativamente pequeño bastará para impedir esa pérdida por rebosamiento.

*El esquema de una central de este tipo puede ser el siguiente:*

#### PLANTA



## CORTE



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.

### Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva (Regularizada)

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.

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.

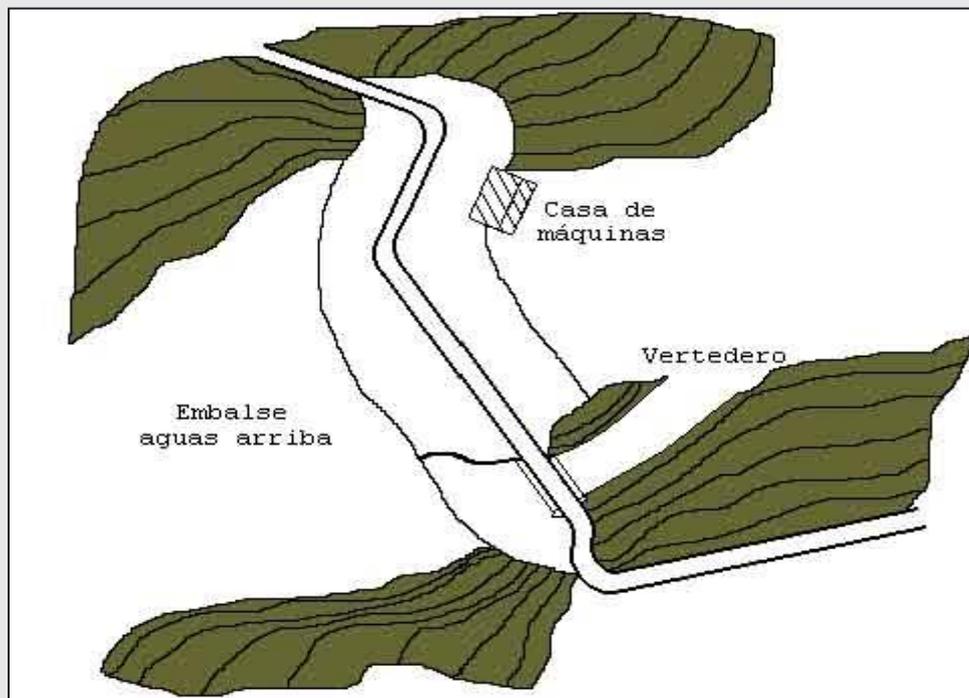
Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de pasada, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir kilovatios-hora más baratos.

*Pueden existir dos variantes de estas centrales hidroeléctricas:*

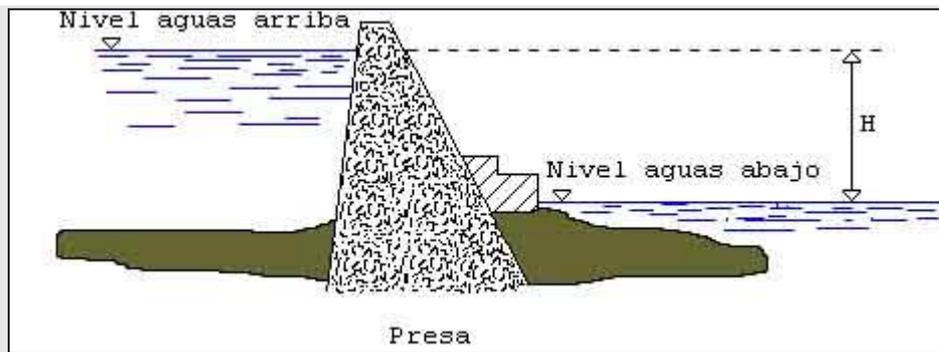
1. La de casa de máquina al pie de la presa:

En las figuras siguientes observamos en PLANTA y CORTE el esquema de una central de este tipo:

PLANTA



CORTE

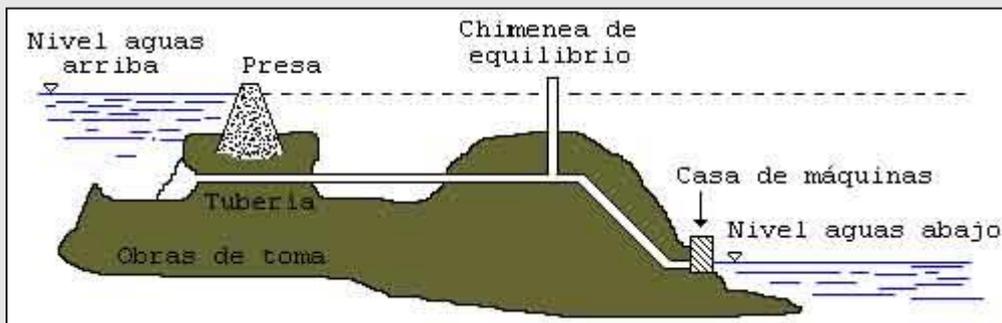
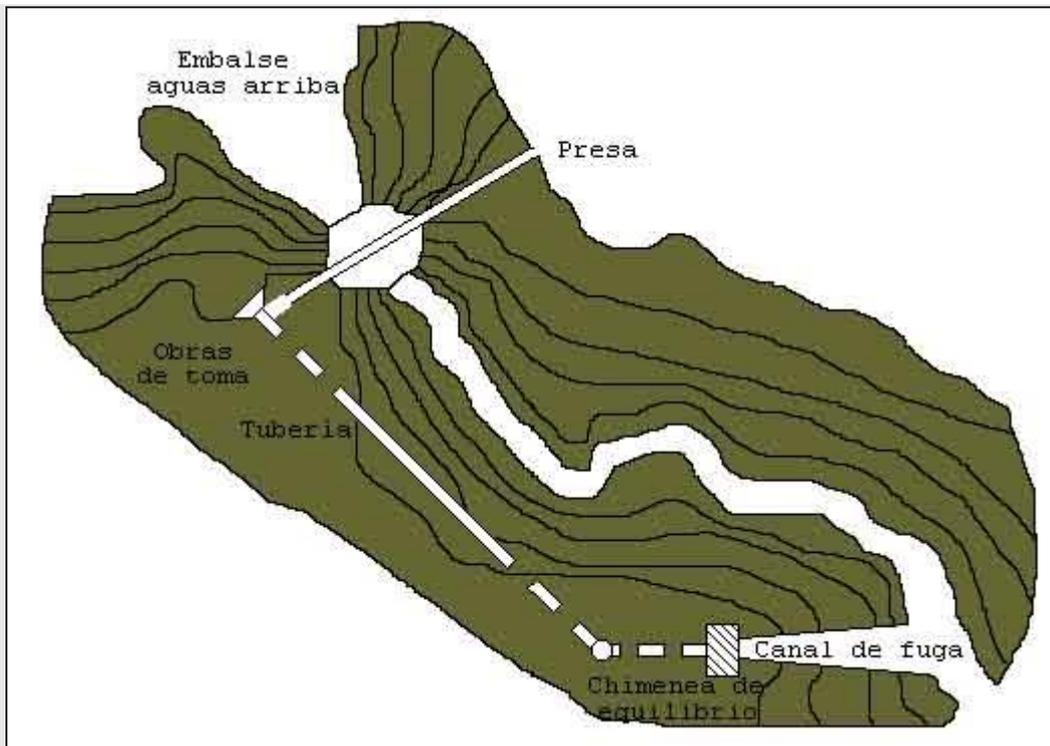


La casa de máquinas suele estar al pie de la presa, como ilustra el dibujo, en estos tipos de central, el desnivel obtenido es de carácter mediano.



2. Aprovechamiento por derivación del agua:

En las figuras siguientes tenemos un esquema en PLANTA y CORTE de una central de este tipo:



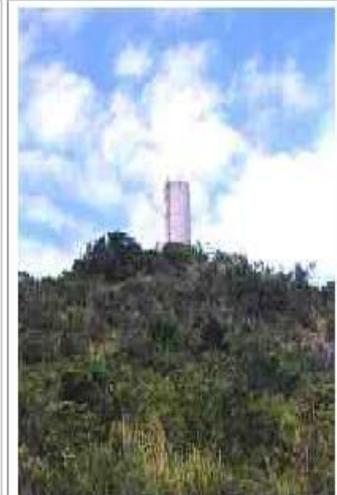
En el lugar apropiado por la topografía del terreno, se ubica la obra de toma de agua, y el líquido se lleva por medio de canales, o tuberías de presión, hasta las proximidades de la casa de máquinas.



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.



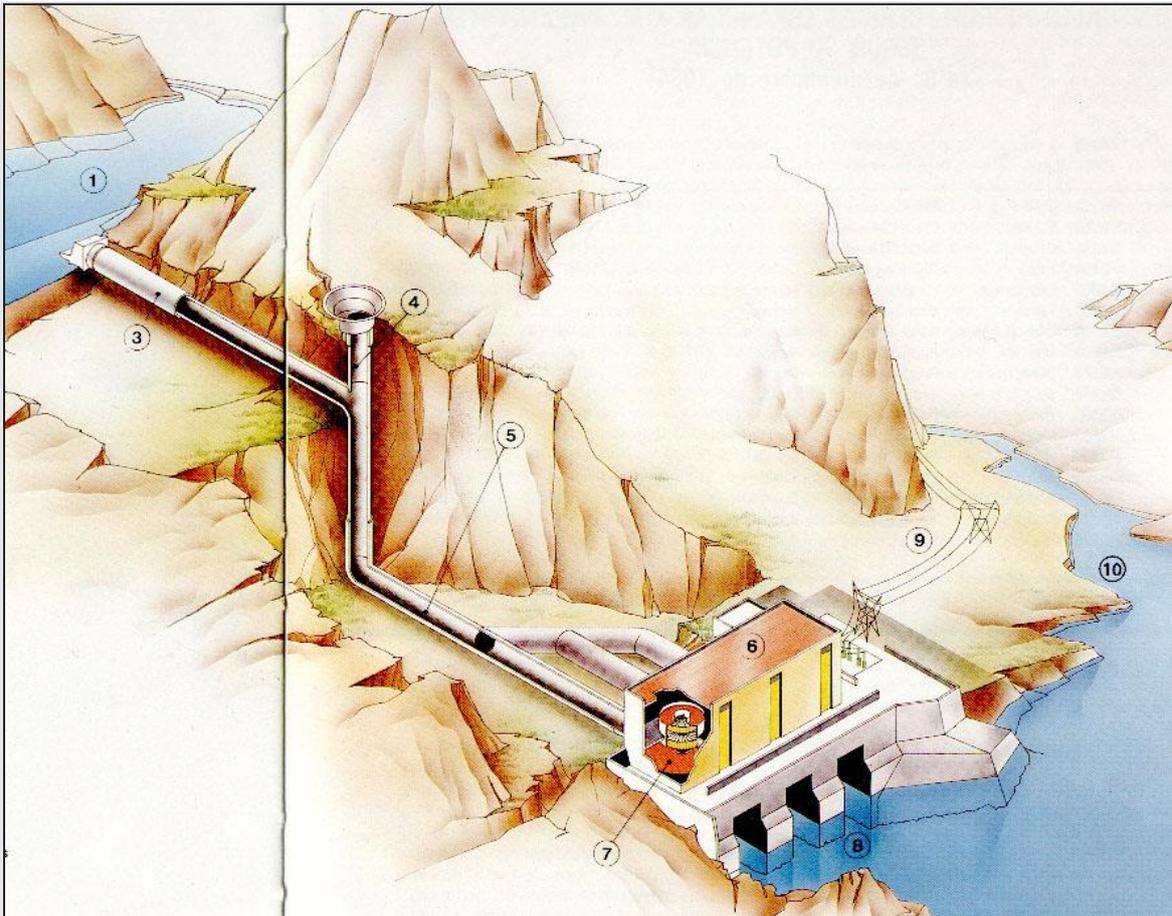
La chimenea de equilibrio es un simple conducto vertical que asegura al cerrar las válvulas de la central, que la energía cinética que tiene el agua en la conducción, se libere en ese elemento como un aumento de nivel y se transforme en energía potencial.



Los desniveles en este tipo de central suelen ser mayores comparados con los que se encuentran en los tipos anteriores de centrales.

## Centrales Hidroeléctricas de Bombeo

*Esquema*



1. Embalse superior
2. Presa
3. Galería de conducción
4. Tubería forzada
5. Central
6. Turbinas y generadores
7. Desagües
8. Líneas de transporte de energía eléctrica
9. Embalse inferior o río

Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que posibilitan un empleo más racional de los recursos hidráulicos 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.

Al caer el agua, almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador.

Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. 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.

### Principales componentes de una Central Hidroeléctrica

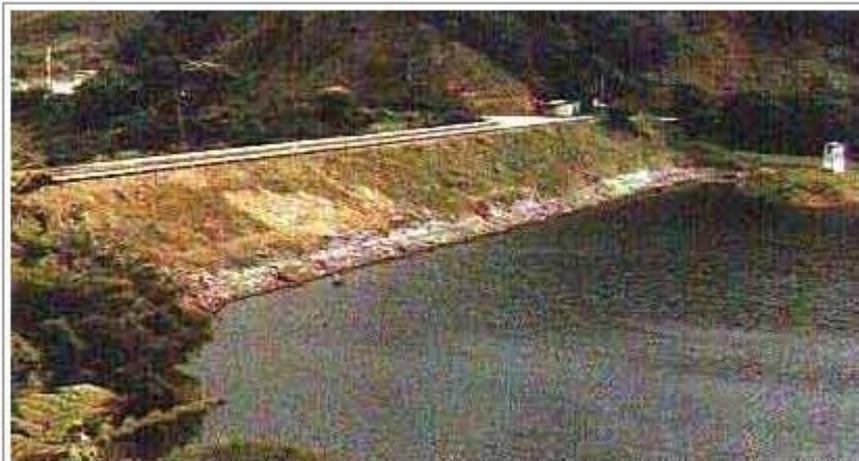
#### La Presa

El primer elemento que encontramos en una central hidroeléctrica es la presa o azud, que se encarga de atajar el río y remansar las aguas.

Con estas construcciones se logra un determinado nivel del agua antes de la contención, y otro nivel diferente después de la misma. Ese desnivel se aprovecha para producir energía.

Las presas pueden clasificarse por el material empleado en su construcción en:

- Presa de tierra



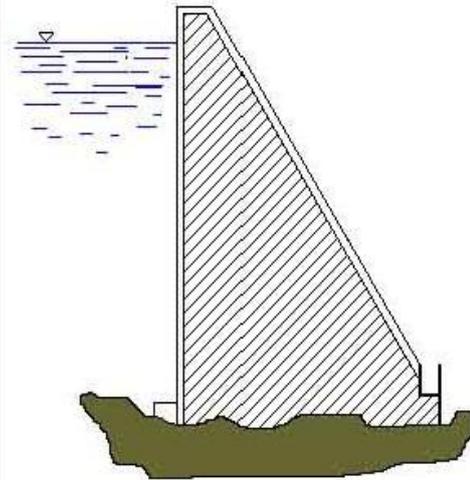
- Presa de hormigón



Las presas de hormigón son las más utilizadas y se puede a su vez clasificar en:

De gravedad:

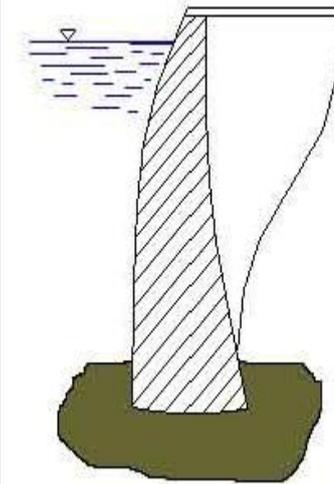
Como se muestra en la figura tienen un peso adecuado para contrarrestar el momento de vuelco que produce el agua



De bóveda:

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.



## Los 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.

La misión de los aliviaderos es la 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 que el agua salga por los aliviaderos existen grandes compuertas, de acero que se pueden abrir o cerrar a voluntad, según la demanda de la situación.

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.



El canal de derivación se utiliza para conducir agua desde la presa hasta las turbinas de la central. Generalmente es necesario hacer la entrada a las turbinas con conducción forzada siendo por ello preciso que exista una cámara de presión donde termina el canal y comienza la turbina. Es bastante normal evitar el canal y aplicar directamente las tuberías forzadas a las tomas de agua de las presas.



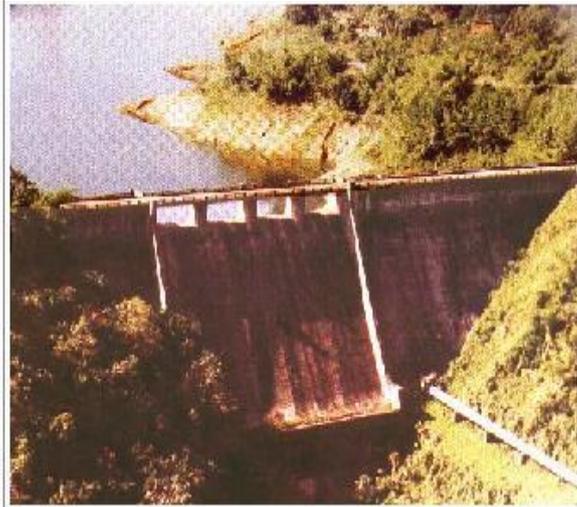
Debido a las variaciones de carga del alternador o a condiciones imprevistas se utilizan las chimeneas de equilibrio que evitan las sobrepresiones en las tuberías forzadas y álabes de las turbinas. A estas sobrepresiones se les denomina "golpe de ariete". Cuando la carga de trabajo de la turbina disminuye bruscamente se produce una sobrepresión positiva, ya que el regulador automático de la turbina cierra la admisión de agua.

La chimenea de equilibrio consiste en un pozo vertical situado lo más cerca posible de las turbinas. Cuando existe una sobrepresión de agua esta encuentra menos resistencia para penetrar al pozo que a la cámara de presión de las turbinas haciendo que suba el nivel de la chimenea de equilibrio. En el caso de depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajará. Con esto se consigue evitar el golpe de ariete.

Actúa de este modo la chimenea de equilibrio como un muelle hidráulico o un condensador eléctrico, es decir, absorbiendo y devolviendo energía.



Las estructuras forzadas o de presión, suelen ser de acero con refuerzos regulares a lo largo de su longitud o de cemento armado, reforzado con espiras de hierro que deben estar ancladas al terreno mediante solera adecuadas.

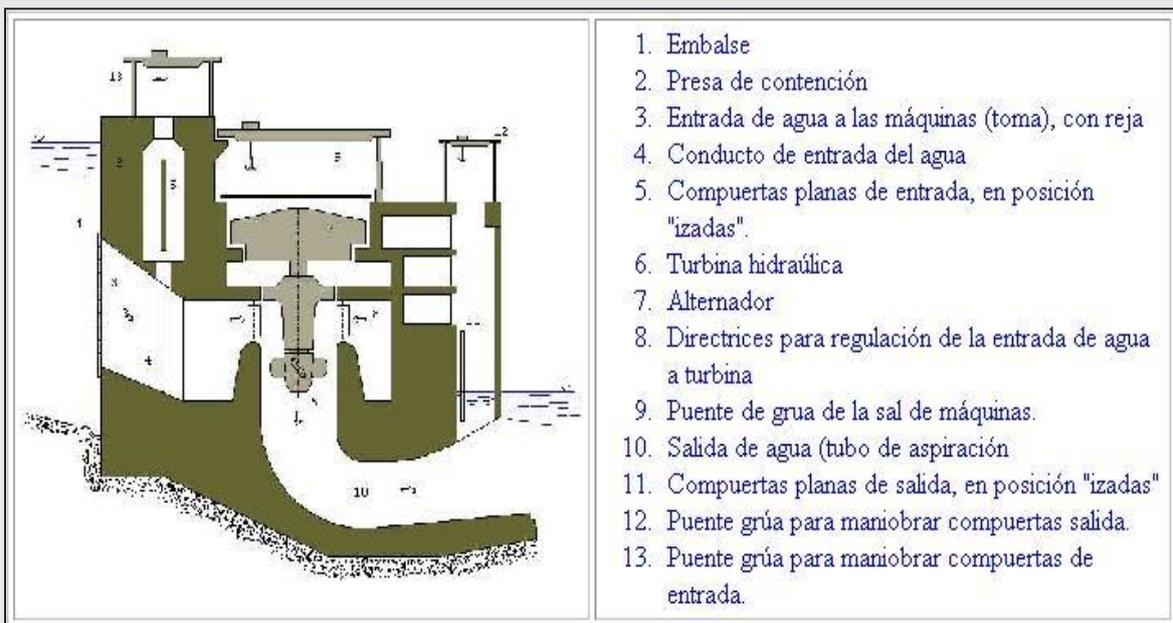


### Casa de máquinas

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

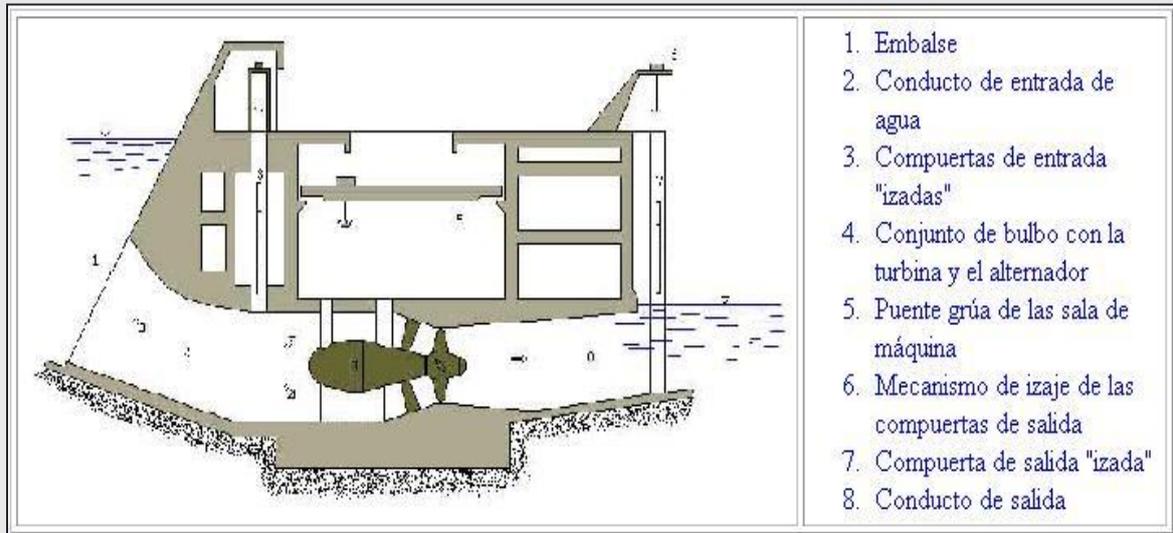
En la figura siguiente tenemos el corte esquemático de una central de caudal elevado y baja caída. La presa comprende en su misma estructura a la casa de máquinas.

Se observa en la figura que la disposición es compacta, y que la entrada de agua a la turbina se hace por medio de una cámara construida en la misma presa. Las compuertas de entrada y salida se emplean para poder dejar sin agua la zona de las máquinas en caso de reparación o desmontajes.



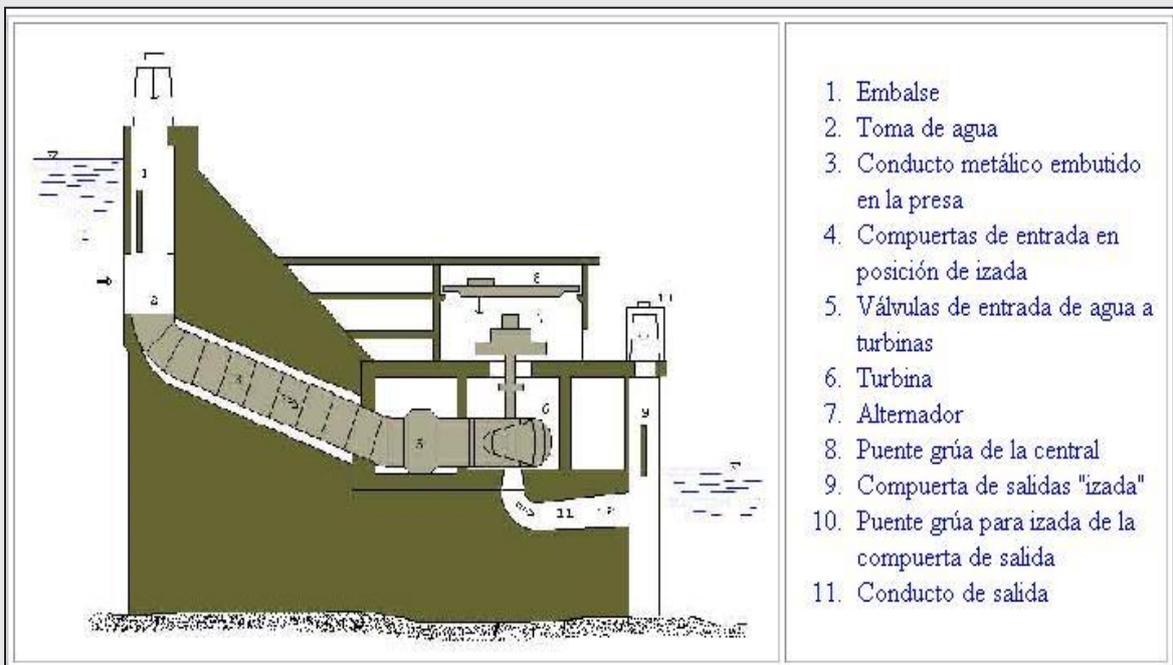
En la figura siguiente mostramos el croquis de una central de baja caída y alto caudal, como la

anterior, pero con grupos generadores denominados "a bulbo", que están totalmente sumergidos en funcionamiento.



En la figura que sigue se muestra el corte esquemático de una central de caudal mediano y salto también mediano, con la sala de máquinas al pie de la presa.

El agua ingresa por las tomas practicadas en el mismo dique, y es llevada hasta las turbinas por medio de conductos metálicos embutidos en el dique.

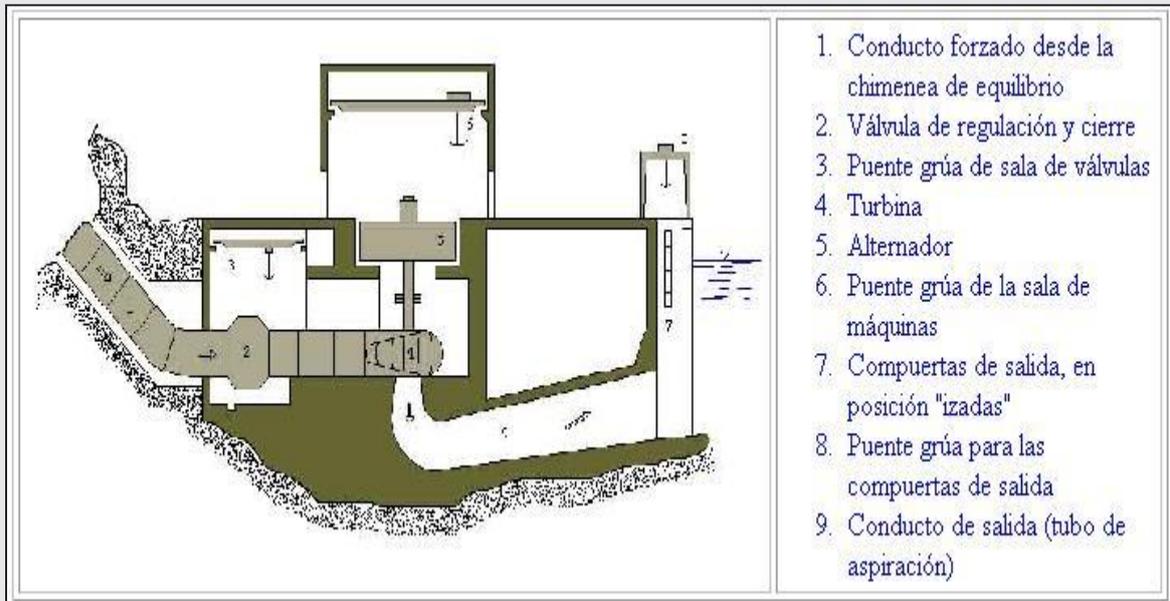


En la figura siguiente tenemos el esquema de una central de alta presión y bajo caudal. Este tipo de sala de máquinas se construye alejadas de la presa.

El agua llega por medio de una tubería a presión desde la toma, por lo regular alejada de la central,

y en el trayecto suele haber una chimenea de equilibrio.

La alta presión del agua que se presenta en estos casos obliga a colocar válvulas para la regulación y cierre, capaces de soportar el golpe de ariete.



## Turbinas Hidráulicas

Hay tres tipos principales de turbinas hidráulicas:

*La rueda Pelton*

*La turbina Francis*

*La de hélice o turbina Kaplan*

El tipo más conveniente dependerá en cada caso del salto de agua y de la potencia de la turbina. En términos generales:

La rueda Pelton conviene para saltos grandes.

La turbina Francis para saltos medianos.

La turbina de hélice o turbina Kaplan para saltos pequeños.

### Rueda PELTON:

En la figura se muestra un croquis de la turbina en conjunto para poder apreciar la distribución de los componentes fundamentales.

Un chorro de agua convenientemente dirigido y regulado, incide sobre las cucharas del rodete que

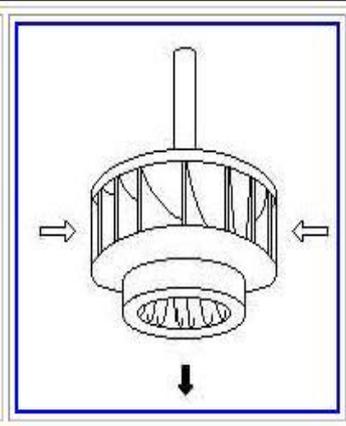
se encuentran uniformemente distribuidas en la periferia de la rueda. Debido a la forma de la cuchara, el agua se desvia sin choque, cediendo toda su energía cinética, para caer finalmente en la parte inferior y salir de la máquina. La regulación se logra por medio de una aguja colocada dentro de la tubera.

Este tipo de turbina se emplea para saltos grandes y presiones elevadas.

	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rodete</li> <li>2. Cuchara</li> <li>3. Aguja</li> <li>4. Tobera</li> <li>5. Conducto de entrada</li> <li>6. Mecanismo de regulación</li> <li>7. Cámara de salida</li> </ol>
<p>Rodete y cuchara de una turbina Penton</p>	<p>Turbina Penton y alternador</p>

Para saltos medianos se emplean las turbinas Francis, que son de reacción.

En el dibujo podemos apreciar la forma general de un rodete y el importante hecho de que el agua entre en una dirección y salga en otra a  $90^\circ$ , situación que no se presenta en las ruedas Pelton.  
Las palas o álabes de la rueda Francis son alabeadas.

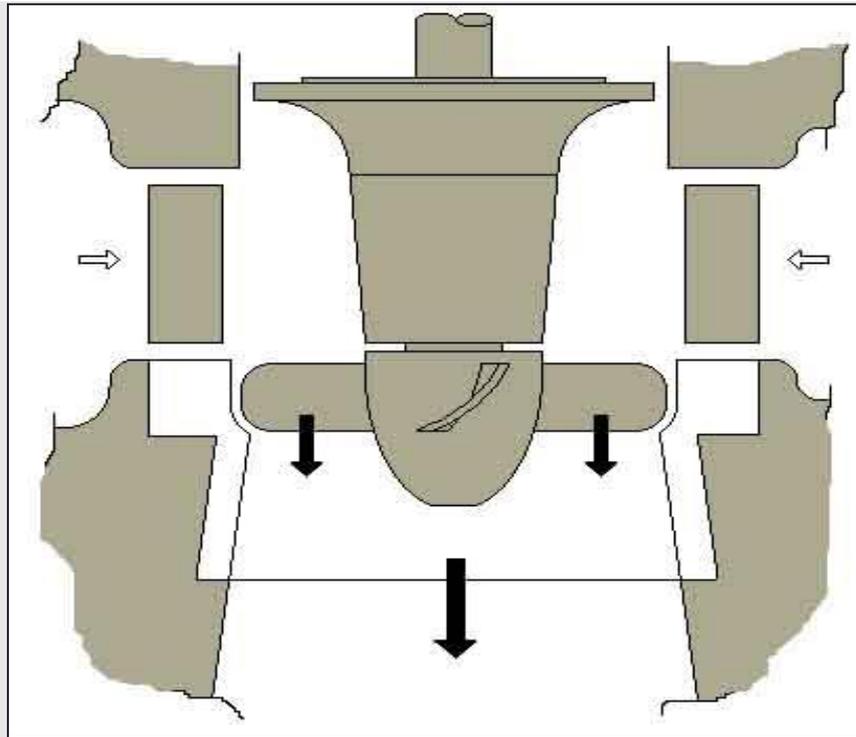


Un hecho también significativo es que estas turbinas en vez de toberas, tienen una corona distribuidora del agua. Esta corona rodea por completo al rodete. Para lograr que el agua entre radialmente al rodete desde la corona distribuidora existe una cámara espiral o caracol que se encarga de la adecuada dosificación en cada punto de entrada del agua. El rodete tiene los álabes de forma adecuada como para producir los efectos deseados sin remolinos ni pérdidas adicionales de carácter hidrodinámico.

### 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. La figura muestra un croquis de turbina a hélice o Kaplan.



## Desarrollo de la energía hidroeléctrica

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 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.



Presa de Itaipú En esta fotografía aérea puede observarse la presa de Itaipú, proyecto conjunto de Brasil y Paraguay sobre las aguas del río Paraná, y su central hidroeléctrica, la mayor del mundo, de la que se obtienen importantes recursos energéticos para ambos países y el conjunto regional. Con una altura de 196 m, y 8 km. de largo, cuenta con 14 vertederos que actúan como cataratas artificiales. Como referencia, la presa Grand Coulee, en Estados Unidos, genera unos 6.500 Mw y es una de las más grandes. En algunos países se han instalado centrales pequeñas, con capacidad para generar entre un kilovatio y un megavatio. En muchas regiones de China, por ejemplo, estas pequeñas presas son la principal fuente de electricidad. Otras naciones en vías de desarrollo están utilizando este sistema con buenos resultados.

VIDEOS RELACIONADOS AL TEMA:

Tipos de Centrales Hidroeléctricas

[https://youtu.be/Xx\\_Lxg4hCjc](https://youtu.be/Xx_Lxg4hCjc)

Funcionamiento Central Hidroeléctrica

<https://youtu.be/G8tEnikzud4>

Central de Pasada

<https://youtu.be/hw5z4zSA4ZY>

Central de Embalse

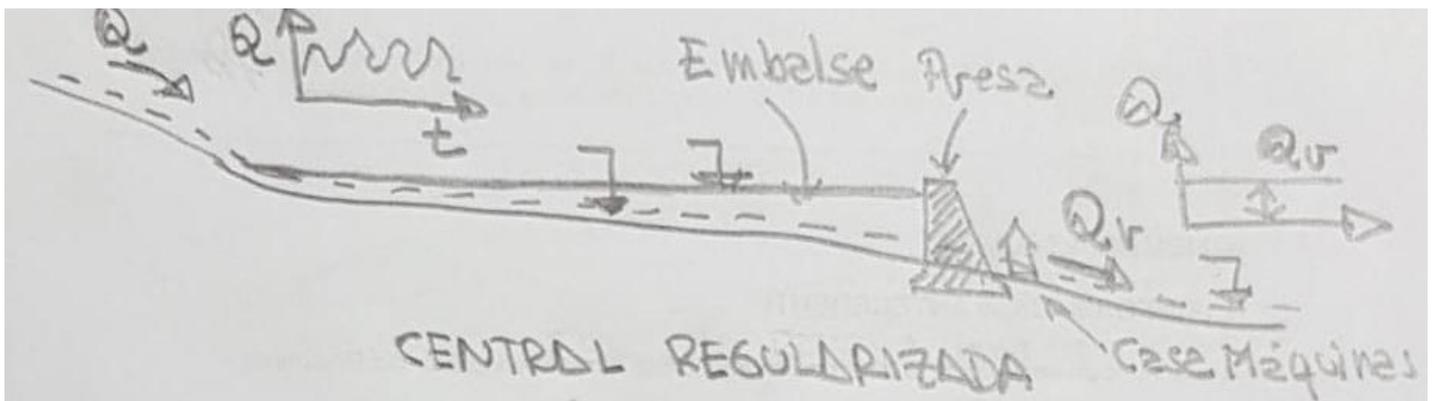
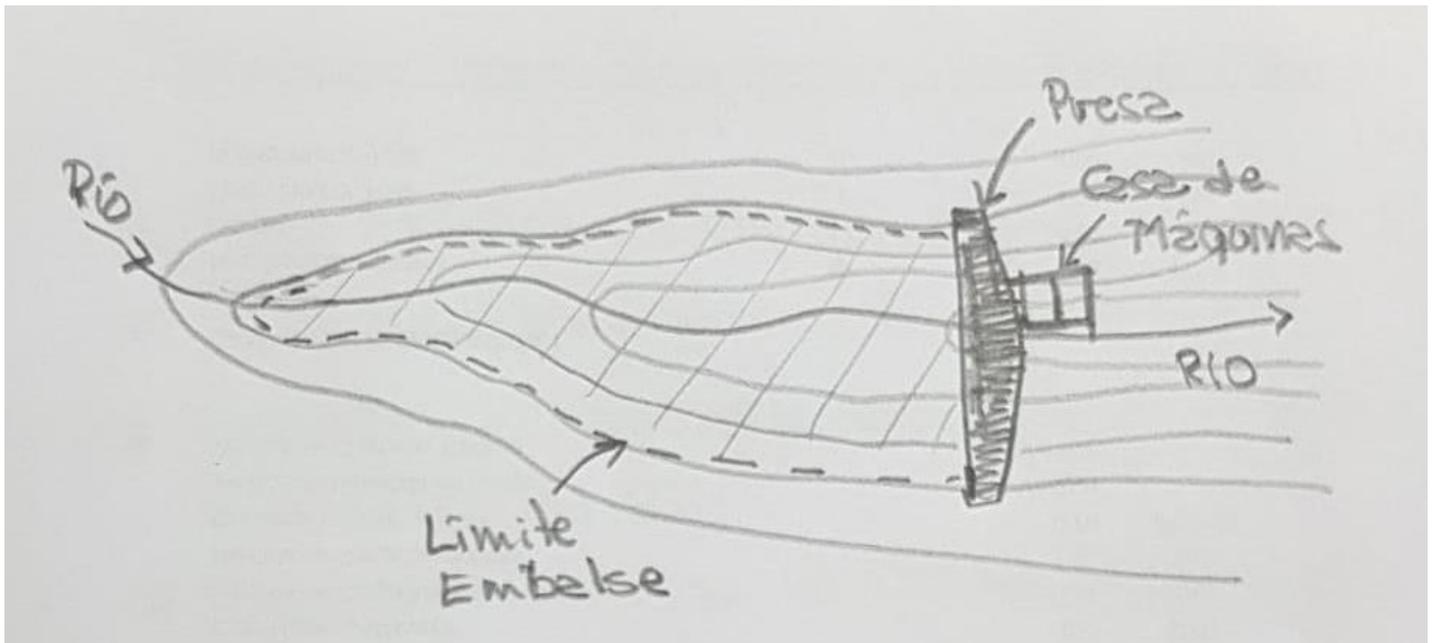
<https://youtu.be/41zISBnhFmk>

Itaipu

<https://youtu.be/4830xAGomEw>

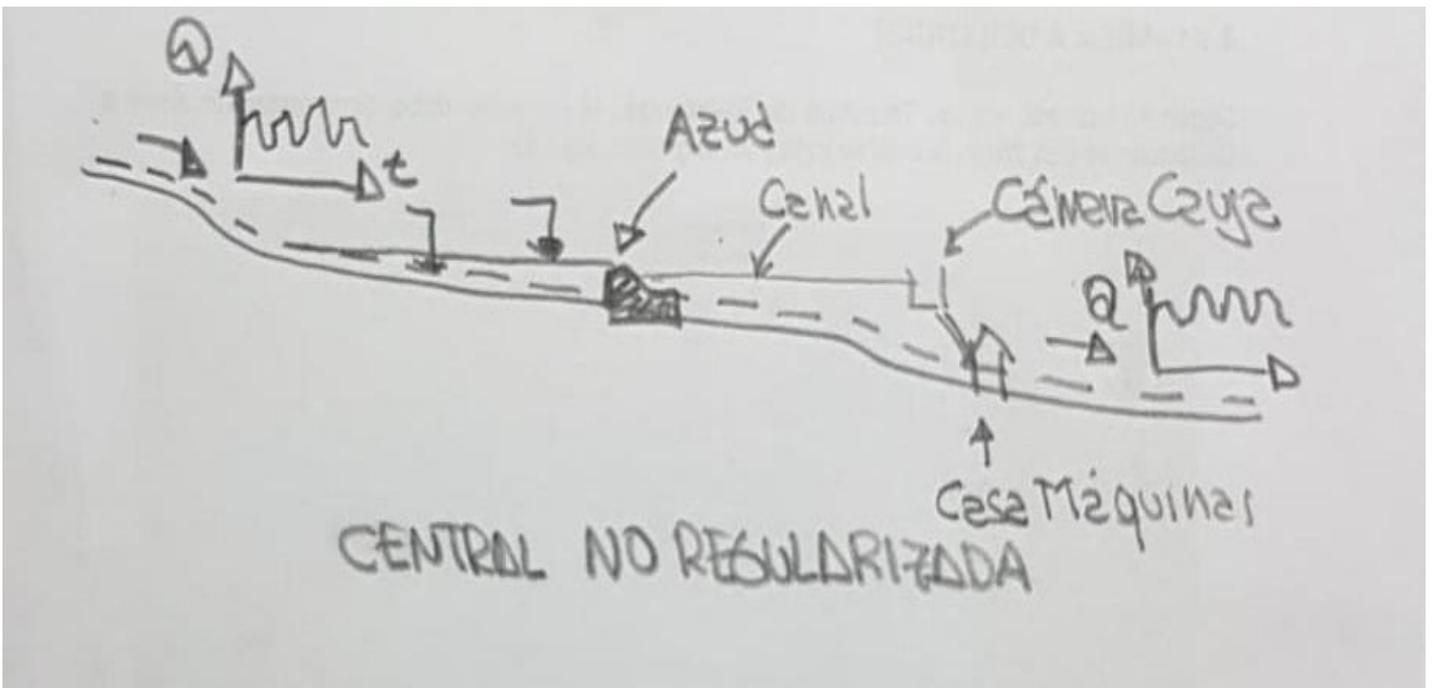
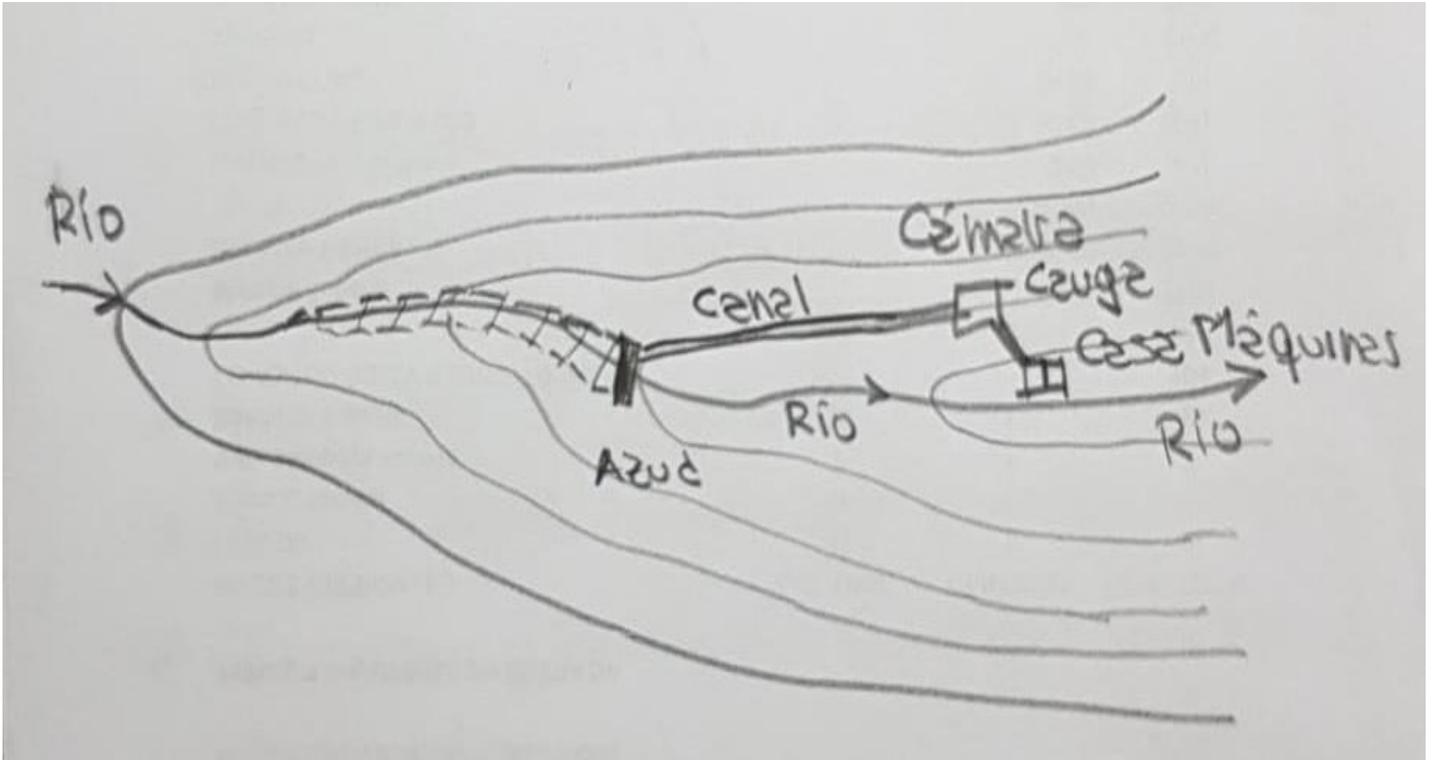
## CENTRAL REGULARIZADA (DE EMBALSE)

- \* Posee Embalse con Capacidad p/ Regularizar Q
- \* Posee Presa para generar Embalse
- \* Ingresan al Embalse los Caudales variables Naturales del Río
- \* Sale del Embalse el Caudal Regularizado  
( $Q_U = Cte \leq M$ )
- \* Salto Hidráulico Variable ( $H \neq cte$ )

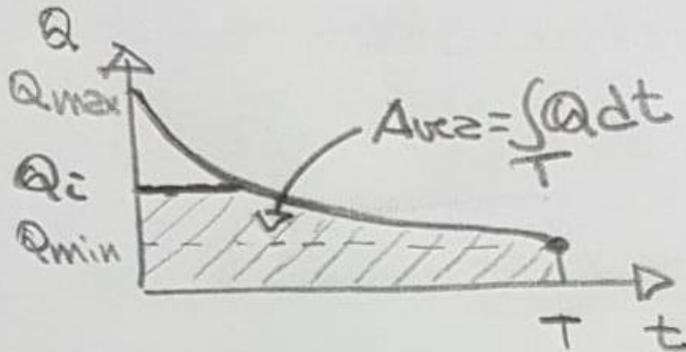


### CENTRAL NO REGULARIZADA (DE PASADA)

- \* No posee Embalse
- \* Posee Azud Nivelador para Derivar  $Q$
- \* Ingresan y Salen los Caudales variables Naturales del Río ( $Q \neq \text{cte}$ )
- \* Salto Hidráulico Constante ( $H = \text{cte}$ )



CENTRAL DE PASADA (NO REGULARIZADA)



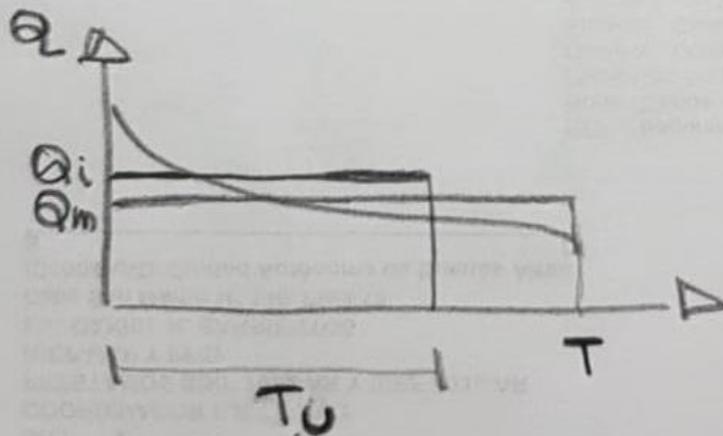
$$N_e = \rho Q H_u$$

$$H_u = H_b - \sum H_R$$

$$E_z = \int_0^T N_e dt = \int_0^T \rho Q H_u dt$$

$$H_u \approx \text{cte} \Rightarrow E_z = \rho H_u \int_0^T Q dt$$

$$Q_{\max} = Q_i$$



$$\int_0^T Q dt = Q_m T = Q_i T_f = A_{vez}$$

$$E_z = \rho H_u \int_0^T Q dt = \rho H_u Q_m T = \rho H_u Q_i T_u$$

$Q_i$  = Máximo Caudal Turbinable con Eficiencia

$Q$  = caudal turbinado en un determinado instante cualquiera

$Q \leq Q_i$  = Caudal de Instalación

$Q_m$  = Caudal Medio =  $\frac{\int Q dt}{T}$

$Q_i$  = Máximo Caudal Turbinable  $\times$  Eficiencia

$T_u$  = Tiempo de Utilización

$$\int_Q dt = Q_m T = Q_i T_u \Rightarrow \frac{T_u}{T} = \frac{Q_m}{Q_i}$$

$$F_u = \frac{T_u}{T} = \frac{Q_m}{Q_i} \quad (\text{Factor de Utilización o Factor de Planta})$$

### Determinación del Gasto de Instalación de una Central a Pelo Libre.

En los aprovechamientos pueden presentarse dos situaciones generales.

- 1) Con Regulación. Mediante embalse se fija el gasto y las alturas varían con los niveles de embalse (caso del trabajo siguiente).
- 2) Sin Regulación. A las centrales hidráulicas de este tipo, corresponde el presente trabajo.

En este caso queda fijada la altura al quedar determinada la ubicación de las obras por razones topográficas, geológicas y fluviales, pero no sucede lo mismo con el gasto de instalación y de aprovechamiento económico ya que dadas las características constructivas de las centrales no reguladas o a pelo libre., funcionan siempre con el caudal que escurre diariamente por el río. Se contará para determinarlo con los datos de aforos que deben abarcar un período de años suficientemente amplio. Con ellos se construye la curva cronológica y en base a ésta, la de gastos clasificados o de duración de gastos. Esto último ya se dijo y se hizo en el primer trabajo.

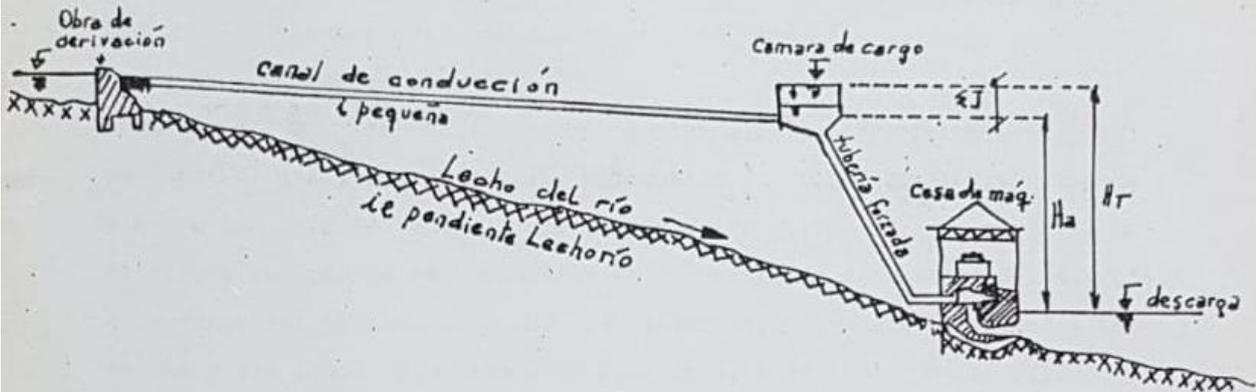
De todos los valores del gasto se determinará el más conveniente en base a dos criterios como se verá mas adelante.

En consecuencia al instalar una central se podrá hacerlo teniendo en cuenta el gasto máximo pero esto tras como inconveniente que en un tiempo muy largo durante el año las máquinas están sin funcionar; por el contrario si se instala con el gasto mínimo absoluto, que entregará una potencia uniforme en todo el año, ahora con el inconveniente que no será aquella económicamente aprovechable.

En un lugar apropiado del río y siempre que la topografía y constitución geológica del terreno lo permitan, como se mencionó más arriba, se construye lo que en términos generales constituye este tipo de aprovechamiento a saber. Obra de derivación que puede ser dique móvil, toma parrilla etc. un canal de conducción que acompaña al río en su descenso aguas abajo, pero con una pendiente menor que la de aquel con el fin de ganar cierta altura, la cámara de carga que entre otras funciones enlaza el canal con la tubería forzada y finalmente la turbina con su dispositivo de descarga que forman par-

te de la casa de máquina.

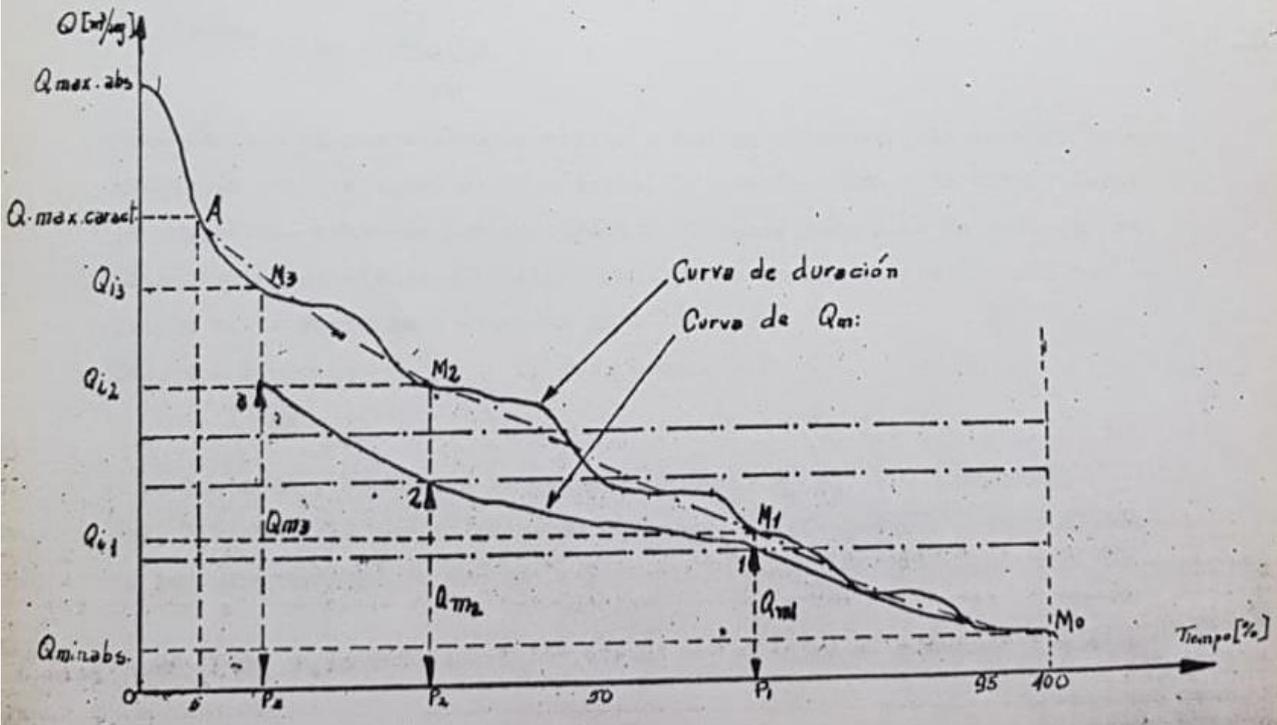
Esquemas de instalaciones



La altura  $H_t$ , llamada topográfica, disminuida de las pérdidas de carga debidas a embocadura, frotamiento, (canal tubería), cambio de dirección, estrechamiento, etc. permite obtener la altura útil  $H_u$ ; término de la potencia que se considera constante, pero que en rigor es función de  $Q$ , porque estableciendo la relación entre pérdida de energía local y energía cinética se puede escribir:

$$H_u = H_t - J = H_t - \left( K \frac{v^2}{2g} \right) = H_t - \left( K \frac{Q^2}{2g} \right)$$

Ahora, para determinar el  $Q_i$  mas conveniente se trabaja con la curva de duración de gastos.



Como se observa, entre el  $Q_{\min}$  abs. y el  $Q_{\max}$  abs. existe una posibilidad infinita de potencias de instalación que dependen naturalmente del gasto de instalación elegido.

A partir del  $Q_{\min}$  abs. que se puede enviar a la central durante todo el período OT, se suponen sucesivos valores:  $Q_{11}, Q_{12}, Q_{13}, \dots$  etc. posibles de enviar a la central solo una fracción  $P_1, P_2, P_3$  del período. En el resto, los gastos son menores y en consecuencia se obtiene una energía a lo largo del período OT menor que la correspondiente a la potencia instalada y que puede obtenerse si se reemplaza, a los efectos del cálculo solamente, el gasto variable, por un gasto uniforme promedio. Para esos valores llamados gastos medios y para trazar la curva correspondiente se puede establecer desde ya que:

$$Q_{\min \text{ abs}} = Q_{\text{m}} M$$

y por otro lado, sabiendo que: energía = Potencia x Tiempo, la energía real del período considerado es:

$$Ea K_{wh} = 8 Hu \int_0^t Q_i dt = 8 Hu \cdot \int_0^t Q_i dt$$

pero en función del gasto ficticio medio

$$Ea K_{wh} = 8 Hu Q_m OT$$

expresado el segmento OT en horas del período.

igualando:

$$Q_m = \frac{\int_0^t Q_i dt}{OT}$$

Equación que se puede conocer midiendo con un planímetro la superficie encerrada por los ejes, el  $Q_i$  elegido, la vertical  $T M_0$  y la curva. Luego la superficie dividida por el segmento OT base, determina  $Q_m$  buscado, en dimensiones del dibujo e interpretado en la escala de gastos. Así por ejemplo si la curva está dibujada en:

Esc.  $Q = X \frac{m^3/seg}{cm}$  y Esc. Durac. =  $Y \frac{1}{cm}$

y se busca  $Q_{m2}$ , se medirá la superficie  $OQ_{12}, M_2 M_0$  T.O llamándola  $S_2 - cm^2$ . Dividiéndola por la longitud del segmento OT es decir  $L$  cm y afectado de las escalas será:

$$Q_{m2} = \frac{S_2}{OT} \times \frac{X \frac{m^3/seg}{cm}}{Y \frac{1}{cm}}$$

Si se lleva en la ordenada  $M_2$  el valor  $Q_{m2}$  se obtiene el punto 2. Análoga

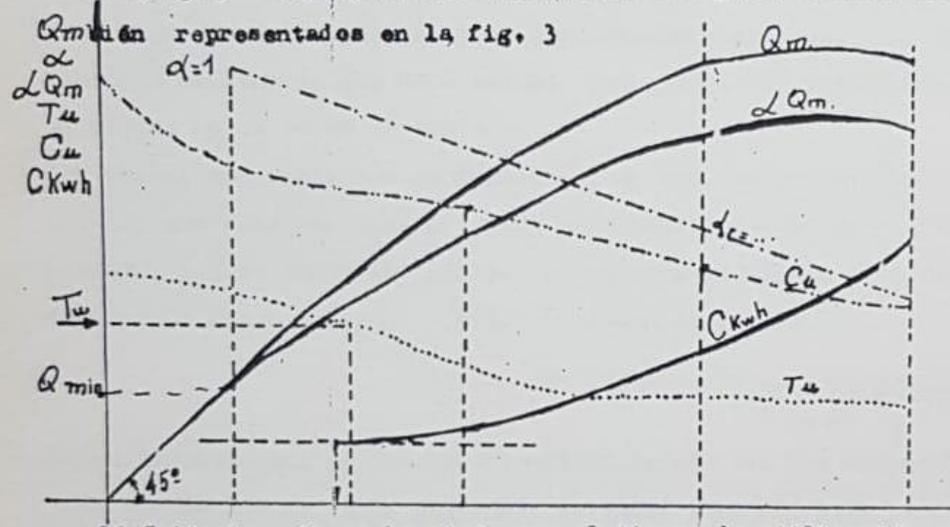
4  
mente para otros  $Q_1$  de una manera que uniendo  $M_0, 1, 2, 3$  etc se obtiene la curva de gastos medios.

Sin embargo, estos valores de  $Q_n$  son teóricos, pues estos significaría aceptar que en los días en que el gasto del río permanece inferior al  $Q_1$  la derivación se adapta exactamente a dichos valores y que se deriva íntegramente el aporte del río, lo que en realidad no es cierto porque hay pérdidas por ej. en las compuertas por entre las juntas, por infiltración, evaporación, etc., y además significaría suponer que la producción del a central en esas épocas, variables con el gasto del río se adecúa con un diagrama variable de consumos, cosa difícil de conseguir en la práctica. Así observando la curva de duración, si el gasto varía en poco tiempo entre  $Q_{\min \text{ abs.}}$  y  $Q_{\min \text{ caract.}}$  maniobrando todo el sistema de derivación de gastos y abastecimientos a la red lo aprovechado realmente será el trazado en punteado  $AM_0$ . Es decir que para cada instante no hay concordancia entre el aporte del río y el diagrama de carga que debe abastecer la central con lo que se reduce el  $Q_n$  en un valor a definir.

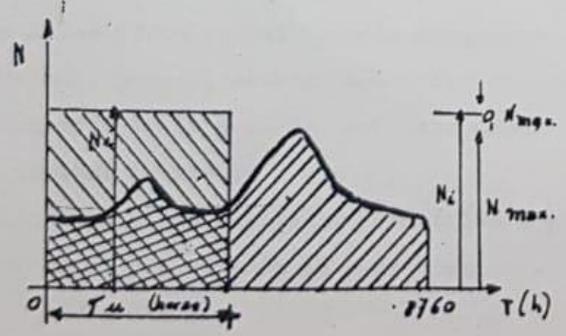
Por ello corresponde afectar a cada  $Q_i$  de un coeficiente  $\alpha$  de rendimiento <sup>5</sup> de las instalaciones hidráulicas tal que partiendo de la unidad para el caso de instalar el gasto correspondiente al <sup>mínimo</sup> término absoluto varíe en forma que se pueda suponer lineal hasta un cierto valor  $Q_m$  a establecer en cada caso para el máximo característico. Esta variación es lógica si se piensa que al aumentar los gastos de instalación crece en proporción la zona del período en que los gastos son inferiores y por consiguiente difíciles de aprovechar en su totalidad por su variabilidad.

El valor de  $\alpha$  a elegir, dependerá de la irregularidad del río (torrencial uniforme, etc) A curvas cronológicas muy regulares corresponden mayores  $\alpha$  tendiendo a la unidad.

Hasta ahora se cuenta con dos series de valores a representar en función de  $Q_i$  y  $Q_m$  cuyo producto determinara los gastos medios utilizables también representados en la fig. 3



1° Criterio. Ya se ha visto que al tiempo de utilización es el número de horas del período, en que trabajando la central a plena carga, entrega toda la energía que puede producir, como indica esquemáticamente la figura siguiente.



Entonces se fija el tiempo de utilización aconsejado por la práctica y se procede a determinar el gasto de instalación más conveniente previo trazado de la curva en base a lo siguiente

$$E_n = \int_0^{T_u} Q_i \alpha \, dt \quad Q_m \cdot T_u = N_i \cdot T_u$$

$$E_n = \int_0^{T_u} Q_m \alpha \, dt =$$

El segmento OT representa las 8760 horas del año

$$Tu = OT \frac{Q_1}{Q_1} = 8760 \cdot Pu$$

Es decir que se calculan los tiempos de utilización en función de los gastos de instalación. Luego se señala gráficamente el  $Q_1$  más conveniente para el  $Tu$  más usual. En la planilla N°2 está dispuesto este cálculo para obtener la curva  $Tu = F(Q_1)$ , hasta la columna 5.

2° Criterio. Estudio Económico. La determinación anterior no se basa en los costos de producir la energía obtenida, por lo cual se señalará el criterio siguiente basado en la determinación de los costos de la energía obtenida en cada gasto de instalación y determinar de entre todos ellos el mismo valor en cuya correspondencia se encontrará el  $Q_1$  económicamente más conveniente.

De la misma forma que para el trabajo anterior, el costo de la energía estará influenciado por dos grandes rubros: explotación y construcción. Para una misma central hidroeléctrica los gastos de explotación varían muy poco dentro de límites — bastante amplios en que solo varían los gastos de instalación  $Q_1$  y sobre todo en el mínimo de la curva de costos.

Los que si son variables en función de  $Q_1$  son los gastos de construcción, para los que hay que elaborar tres o cuatro anteproyectos debidos a tres o cuatro  $Q_1$ , obteniéndose así un costo por unidad de potencia instalada para cada  $Q_1$ , que permite dibujar la curva  $Ca (\$/Kw) = f(Q_1)$  (columna de planilla 2)

$$Cu (\$/Kw) = \frac{\text{Presup. de las obras}}{8 Hu Q_1}$$

Por interpolación, esta curva permitirá determinar los costos de construcción de cada uno de los  $Q_1$  ( $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{13}$ , ....etc) elegidos para la determinación del gasto de instalaciones más conveniente.

Multiplicando estos  $Cu$  por las potencias instaladas:  $8HuQ_{11}$ ,  $8HuQ_{12}$ ...etc., se obtiene el monto del Capital C utilizado para la construcción. Este capital invertido exige un interés y un servicio de amortización anual que puede determinarse en base a las fórmulas del interés compuesto. La tasa unitaria para la amortización se calcula para 25 años de amortización por:  $a = \frac{1}{(1+i)^{25}-1}$  que suada a la tasa del interés da la tasa del servicio anual

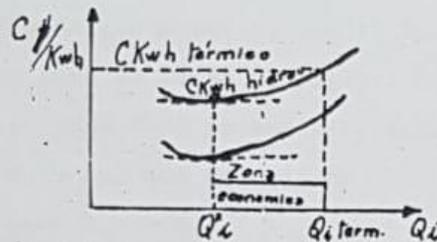
$$\text{del capital invertido } r = a + i$$

Multiplicando los capitales invertidos C por esta tasa se obtiene el servicio o - gasto anual que demanda la construcción.

$$Sa = C \times r$$

Dividiendo estos valores por las respectivas energías anuales  $Ea = Ni Tu$  se obtiene.

los costos de la energía  $C \frac{\$}{Kwh} = \frac{Sa}{Ea}$  correspondiente a cada gasto de instalación, cuyo mínimo determina el gasto de instalación más económico. Como en general, el valor mínimo puede representar el más económico pero no el más conveniente desde el punto de vista del costo de producción térmica, sumando a la curva anterior  $C \frac{\$}{Kwh}$  los demás costos fijos (explotación y mantenimiento) para cada  $Q_i$ , divididos por la energía anual, se obtienen una curva de costos total de producción del Kwh hidráulico que limitada por el costo del Kwh térmico define con el mínimo una zona donde podrá elegirse el gasto de instalación en situación conveniente frente al costo del Kwh térmico.



La planilla de cálculo se dispone así: teniendo en cuenta la altura de utilización const. e igual a : 100 m.

$Q_i$	$Q_n$	$\alpha$	$\alpha Q_n$	$P_u$	$T_u$	$N_i$	$E_a$	$C_u$	$C$	$S_a$	$C/Kwh$ (\$/Kwh)		
m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s		m <sup>3</sup> /s		h/años	Kw	Kwh	\$/Kw	\$	\$	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			

Columna 1: datos de las observaciones sacado de la curva de caudales clasificados

Columna 2: Obtenidos por cálculo en función de  $Q_i$  planimetrando las superficies y teniendo en cuenta que la longitud  $OT = (cm)$ .

Columna 3: Valores elegidos según el tipo de río. En este caso

Columna 4: Es el gasto medio utilizable.

Columna 5: El valor  $\frac{\alpha Q_n}{Q_i} = F_u$  se le llama factor de utilización. Da una idea del grado de utilización de la potencia instalada en una central pues:

$$F_u = \frac{\alpha Q_n}{Q_i} = \frac{8 H_u \alpha Q_n}{8 H_n Q_i} = \frac{N_{med}}{N_i}$$

de manera que si  $F_u = 1$  resulta  $N_{med} = N_i$  obteniéndose en este caso el máximo aprovechamiento de la instalación.

Columna 6: Tiempo de utilización ya definido  $T_u = 8760 F_u$

Columna 7: Potencia instalada para  $H_u \dots$  su valor elegido es decir  $N_i = 8 H_n Q_i$

Columna 8: Energía anual en Kw h:  $E_a = N_i T_u$

Columna 9: Coste unitario de construcción, Curva dibujada con los tres o cuatro anteproyectos de las  $Q_i$ .

Columna 10: Interpolando en la curva anterior para los  $q_{i1}$ ,  $q_{i2}$ ,  $q_{i3}$ ...etc y multiplicando por las correspondientes  $N_i$ , se obtienen los costos totales de construcción.

Columna 11: Elegido  $i = 3\%$ ,  $n = 25$  años

será:  $a = \frac{i}{(1+i)^n - 1} = \dots \dots \dots$ .  $r = a + i = \dots$  y multiplican

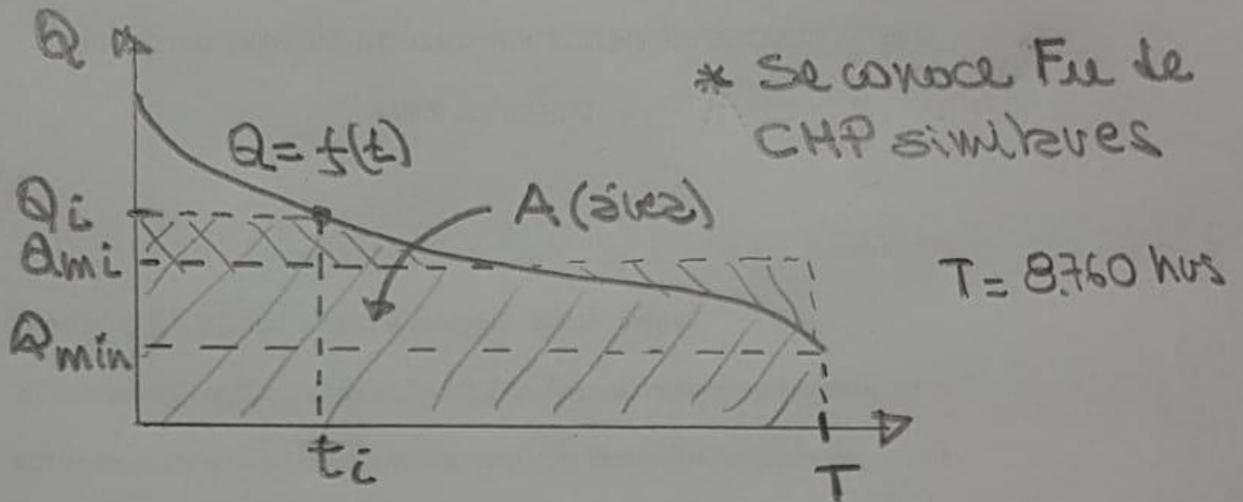
do  $r$  por los valores de la columna anterior se tendrá el servicio anual del capital invertido en la construcción.

Columna 12: El cociente entre Ser. anual del cap. invierte en la construcción (variable para  $Q_i$ ) y la energía anual producida o sea  $\frac{S_i}{E_a}$  da el costo por Kw h producido.

Columna 13: Igual cociente que anterior con la única diferencia que en el numerador se pone el costo de explot. constante para todos los  $Q_i$ . Se elige en este caso un costo de explotación de \$lay 18188 3000000.

Columna 14: Es la suma de las dos anteriores y da como resultado la curva CKw h con su mínimo buscado.

DETERMINACION CAUDAL INSTALACION  
S/ MÉTODO DE COMPARACION

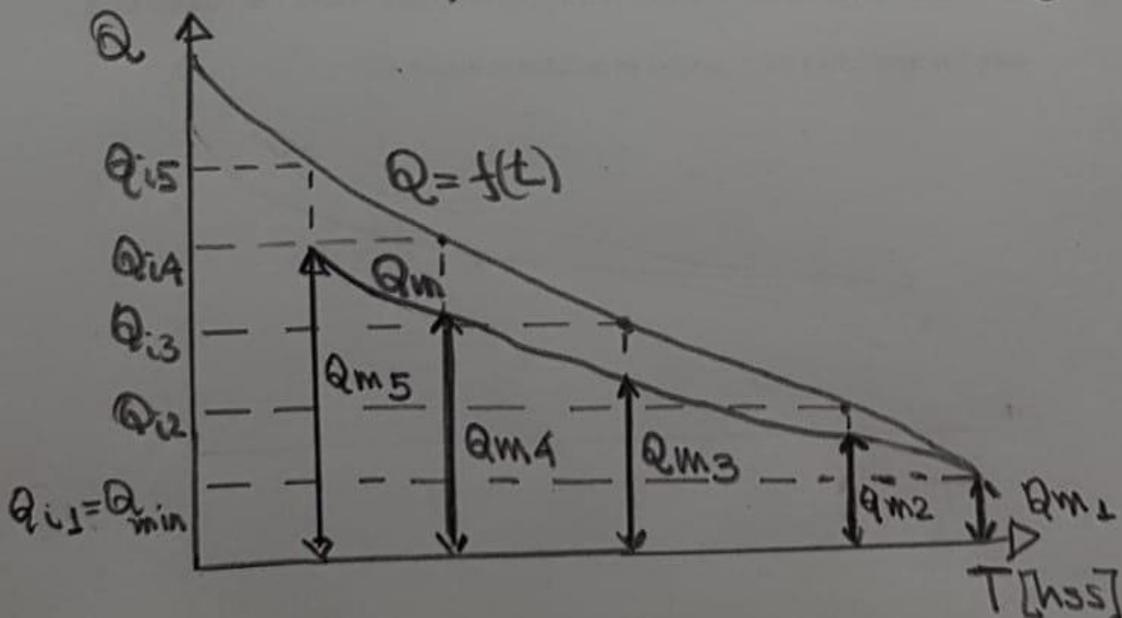


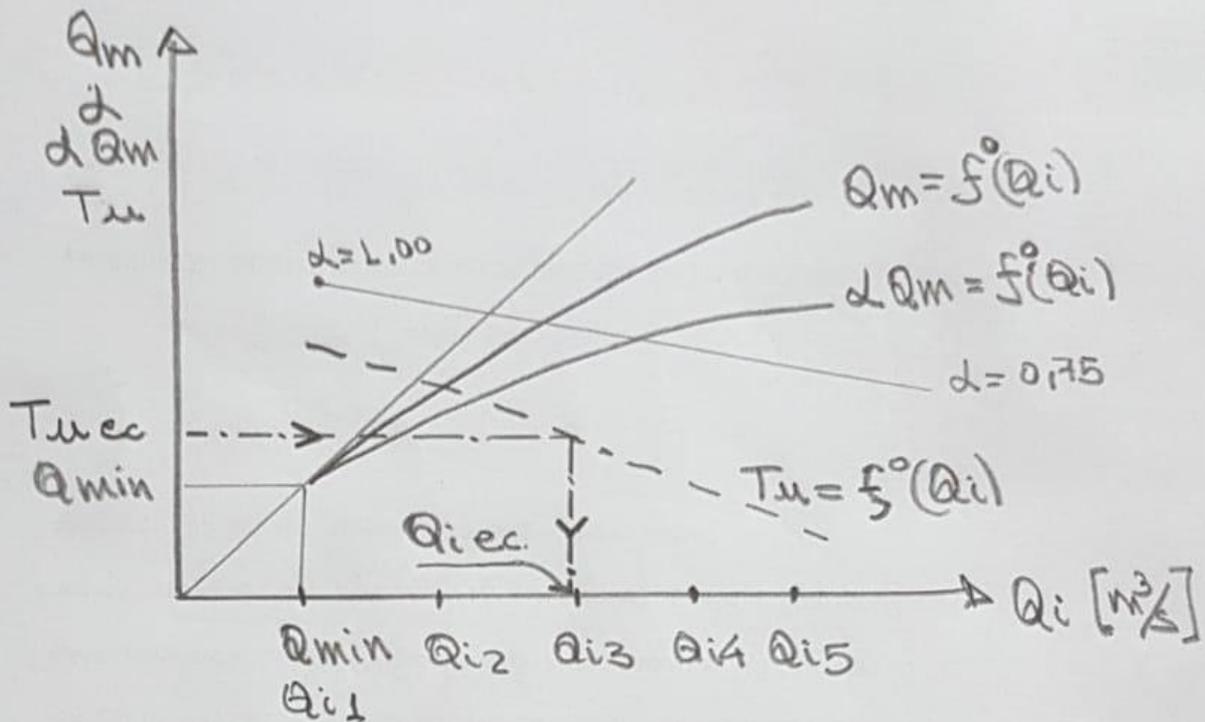
$$A = \int_0^T Q dt = \int_0^{t_i} Q dt + \int_{t_i}^T Q dt$$

$$A = Q_i t_i + \int_{t_i}^T Q dt = Q_{m_i} T$$

$$Q_{m_i} = \frac{A}{T}$$

$$F_u = \frac{T_u}{T} = \frac{Q_m}{Q_i}$$





$$F_u = \frac{dQ_m}{Q_i} \leq \frac{Q_m}{Q_i}$$

$$T_u = F_u T = F_u \times 8760$$

METODO DEL COSTO MINIMIZADO

$$F_u = \frac{dQ_m}{Q_i} = \frac{\partial H_u}{\partial H_u} \frac{dQ_m}{Q_i} = \frac{N_m}{N_i} \left[ \frac{1}{i} \right]$$

$$E_2 = N_m T = N_i T_u \left[ \text{Kwh/año} \right]$$

$$\text{Costo Unitario Construcción} = \frac{\text{Costo Constr.} \left[ \frac{\$}{\text{kw}} \right]}{N_i}$$

(para dos o tres Anteproyectos)

$CC = \text{Costo Construcción} = \text{Costo Unit. Const.} \times N_i [\$]$

$CE = \text{Costo Explotación} = C_{te} P / \text{todas } Q_i [\$/\text{año}]$

Reazón:  $v = z + i [\%]$

Amortización:  $z = \frac{i}{(1+i)^{n-1}} [\%]$

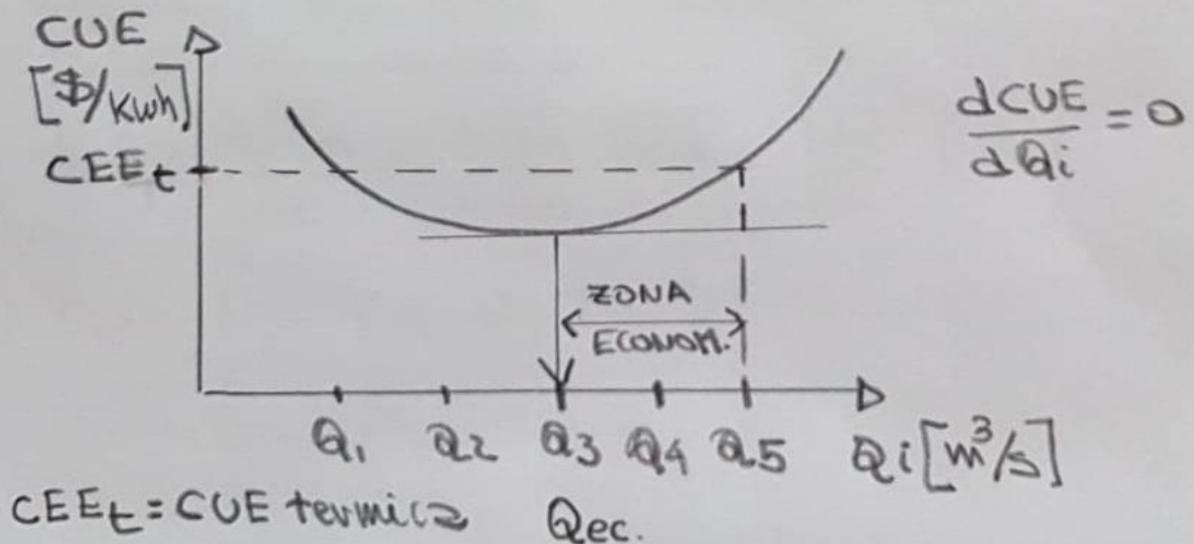
Tasa Anual:  $i [i]$

Servicio Anual:  $S_2 = v \times CC [\$/\text{año}]$

Costo Total Anual:  $S_2 + CE [\$/\text{año}]$

Costo Unitario Energía:  $CUE = \frac{S_2 + CE}{E_2}$

$CUE = \frac{S_2 + CE}{E_2} [\$/\text{kwh}]$



#### COMPILADO DE:

- Clases de Hidráulica Aplicada - FI - UNaM
- "Clases de Maquinas Hidráulicas y Aprovechamiento Hidroeléctrico" - Roberto Cotta – CEILP
- Videos Youtube