

# PEA 3100 - Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

## Aula 12 - Fontes Convencionais Geração Hidráulica

- Conceitos básicos
- A usina hidrelétrica
- Tipologia
- Energia hidráulica no Brasil

# Geração hidrelétrica



UHE de Itaipú - 14 GW - Brasil/Paraguai

Fonte: EPE

# Conceitos básicos da hidrologia: **Ciclo hidrológico**



Fonte: USGS

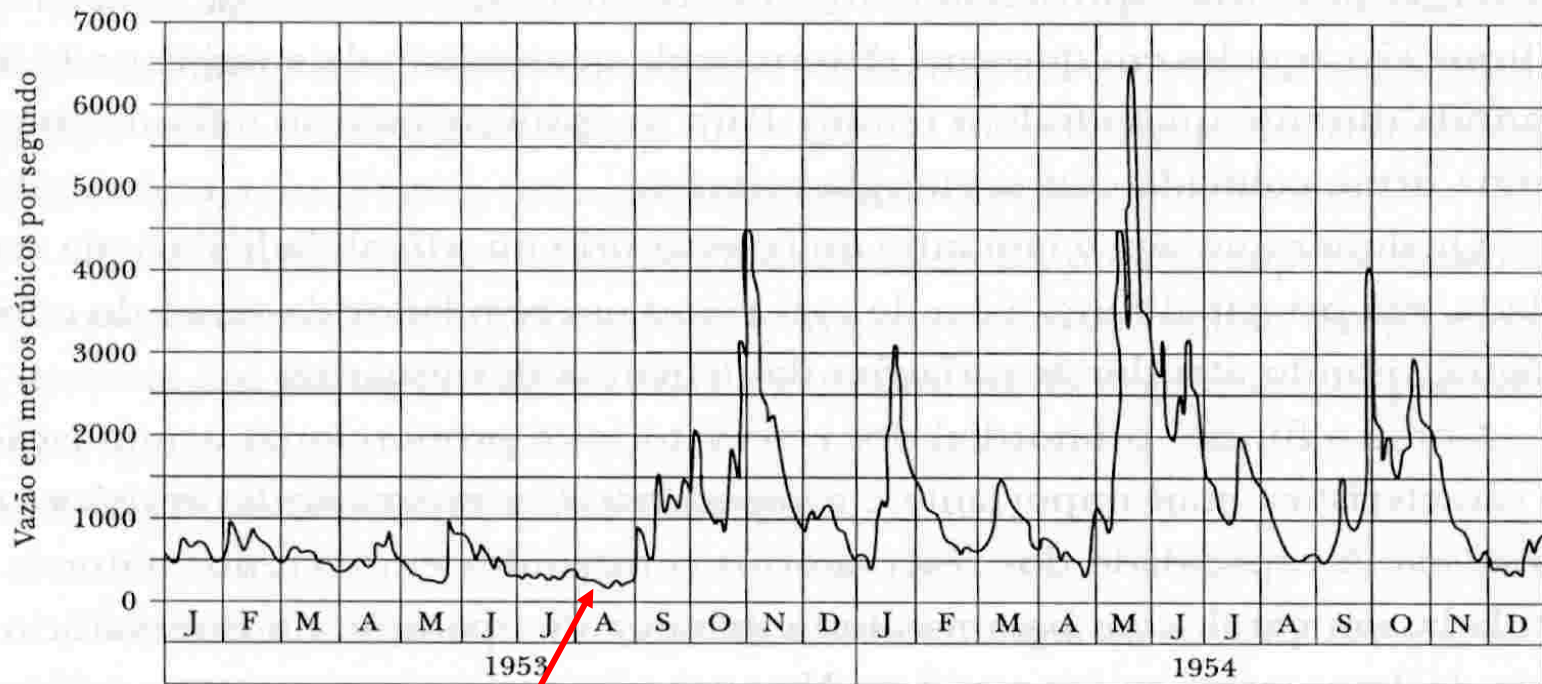
# Conceitos básicos de Hidrologia: **Bacia hidrográfica**

Área da superfície do solo capaz de coletar a água das precipitações meteorológicas e conduzi-las ao curso d'água.



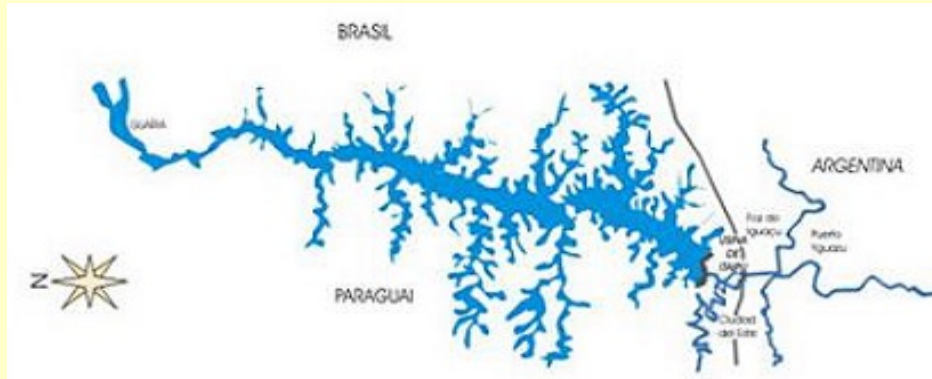
# Conceitos básicos de Hidrologia: **Vazão em um curso d'água.**

Exemplo de um **fluviograma** típico:



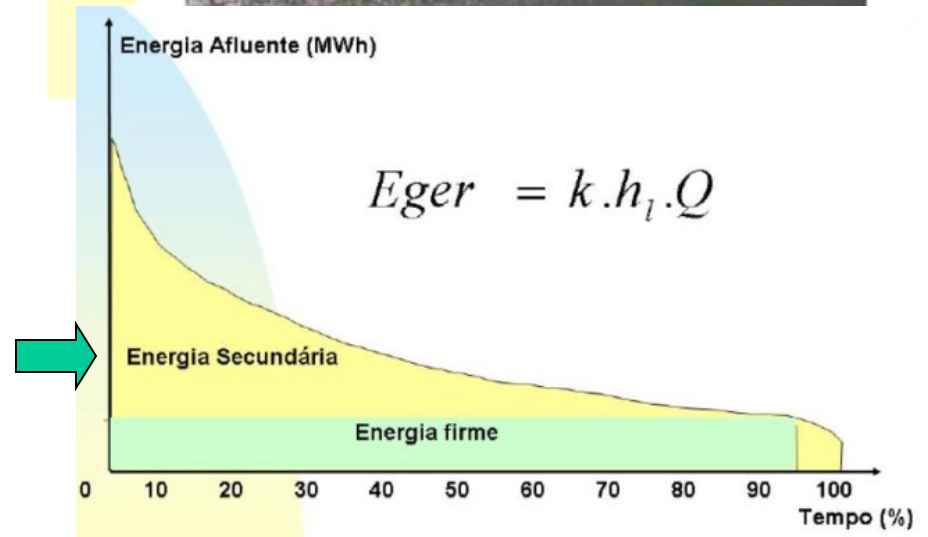
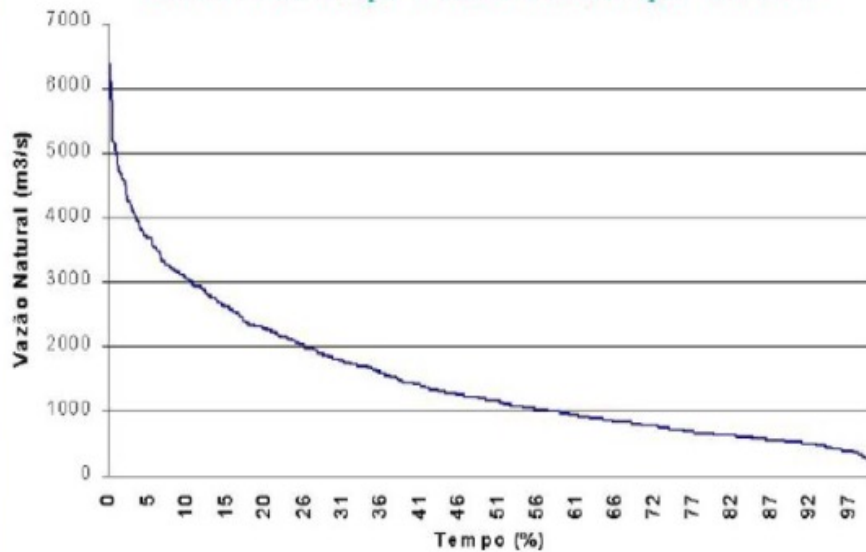
**Vazão mínima** – presente 95 a 100% do tempo

# Conceitos básicos da hidrologia: Regularização de vazões



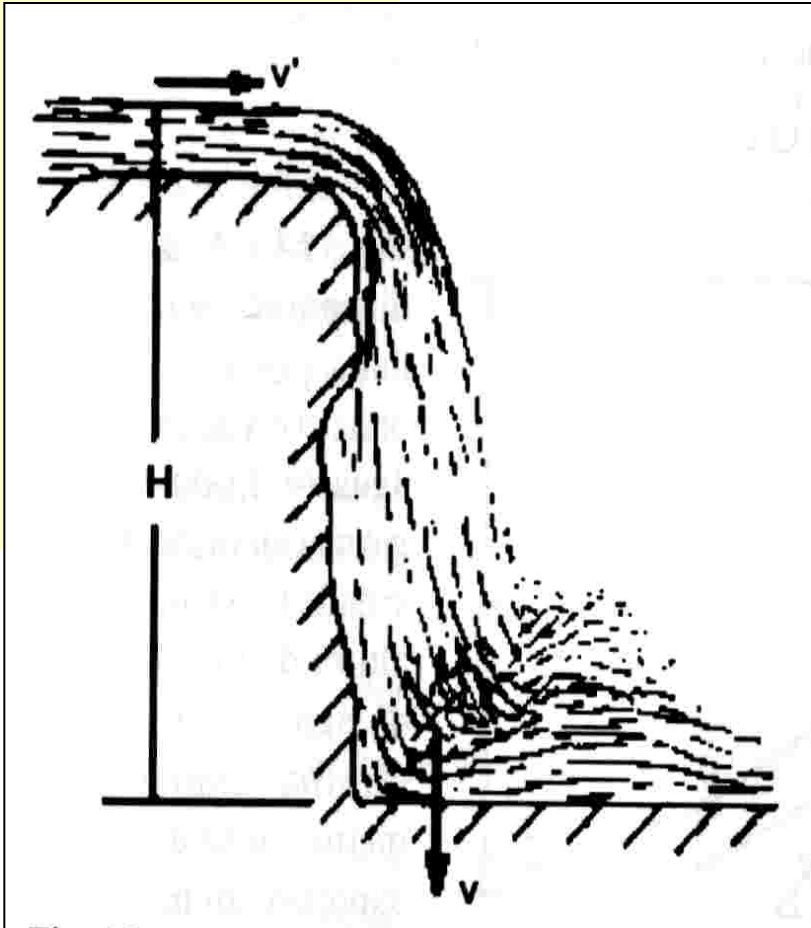
Curva de Permanência das Vazões  
Posto Itumbiara - Rio Paranaíba (1931/1992)

Em 95% do tempo a vazão é maior que 436 m<sup>3</sup>/s



# Hidrelétricas

## Princípio básico de funcionamento



Energia/tempo = Potência =  $mgH$

$m$  = massa que cai / seg

$g$  = aceleração da gravidade

$H$  = queda bruta

Se a água que cai vem de um rio tem velocidade  $\underline{v'}$  constante:

$$P = mgH + 1/2 mv'^2$$

obs:  $1/2 mv'^2$  em geral pode ser desprezada pois  $v'$  é muito pequena

P: Potência

$m$ : "Vazão de massa"

$M$ : massa  $\Rightarrow m = dM/dt$

# Função de Produção

Troca-se  $m/\text{seg}$  ( $\dot{m}$ ) por  $Q$  (vazão)  $\rightarrow m^3/s$   $\rho \rightarrow$  Densidade da

água

$$\rho = \frac{\dot{m}}{Q} \rightarrow \dot{m} = \rho \times Q$$

$Q$  = volume de água que escoar por segundo através do tubo (vazão)

$$P = \dot{m} \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

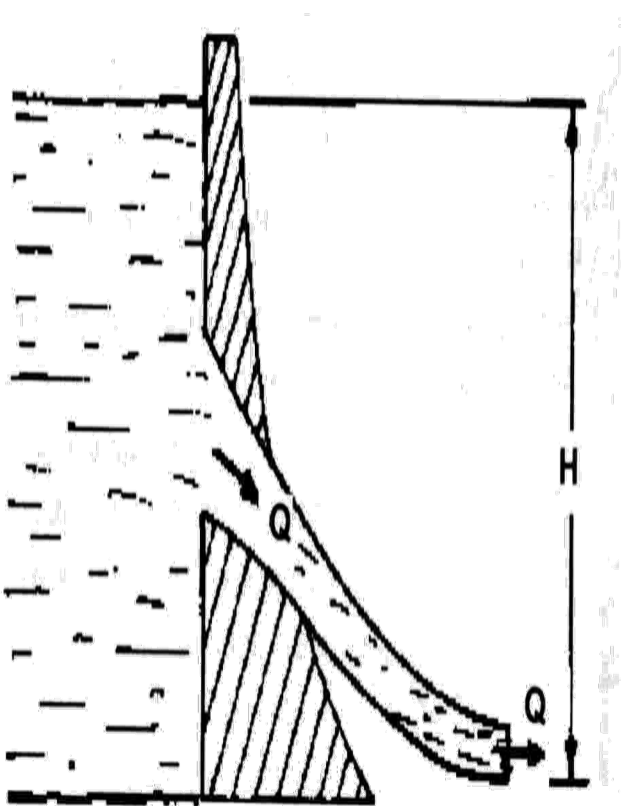
$g$  = aceleração da gravidade -  $9,81 \text{ m/s}^2$

$$\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$$

$$P = g \times \rho \times 10^{-3} \times H \times Q \text{ [kW]}$$

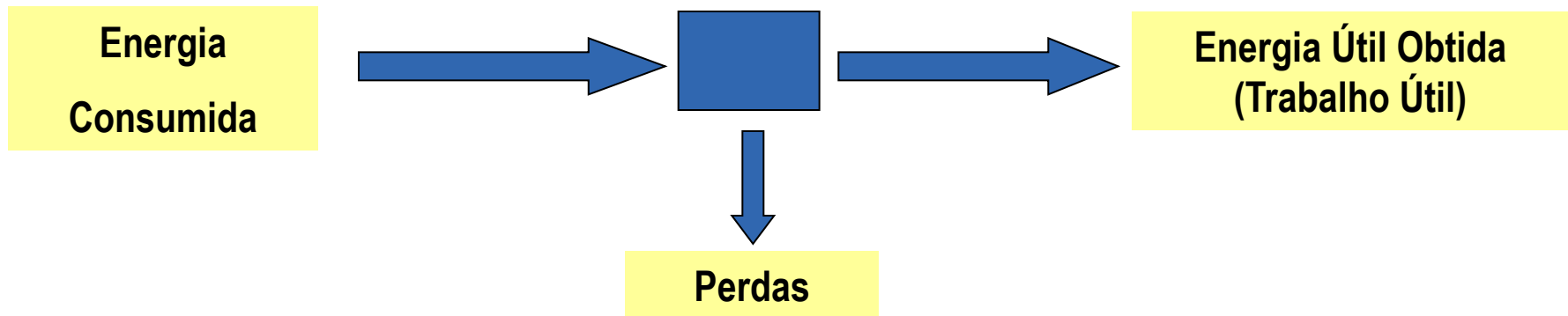
Potência hidráulica =  $9,81 H \cdot Q$  (kW)

sendo  $H$  - metros e  $Q$  -  $\text{m}^3/\text{s}$





❑ **Rendimento ou eficiência:** Indica a eficiência da conversão de energia. É a relação entre a energia útil obtida ( trabalho útil) e a energia total consumida.



Se consideramos a energia ou o trabalho por unidade de tempo, temos:

**Rendimento ou eficiência = Potência útil / Potência consumida**

Rendimento total de uma UHE:

$$\eta_{TOT} = \eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_g$$

onde

$\eta_H$  - Rendimento do sistema hidráulico

$\eta_g$  - Rendimento do gerador

$\eta_T$  - Rendimento da turbina

**Potência elétrica**

$$0,76 \leq \eta_{TOT} \leq 0,87 \text{ com } \eta_H \geq 0,96$$

$$0,88 \leq \eta_t \leq 0,94$$

$$0,90 \leq \eta_g \leq 0,97$$

$$Pe = 9,81 \times H \times Q \times \eta_{TOT} \text{ (kW)}$$

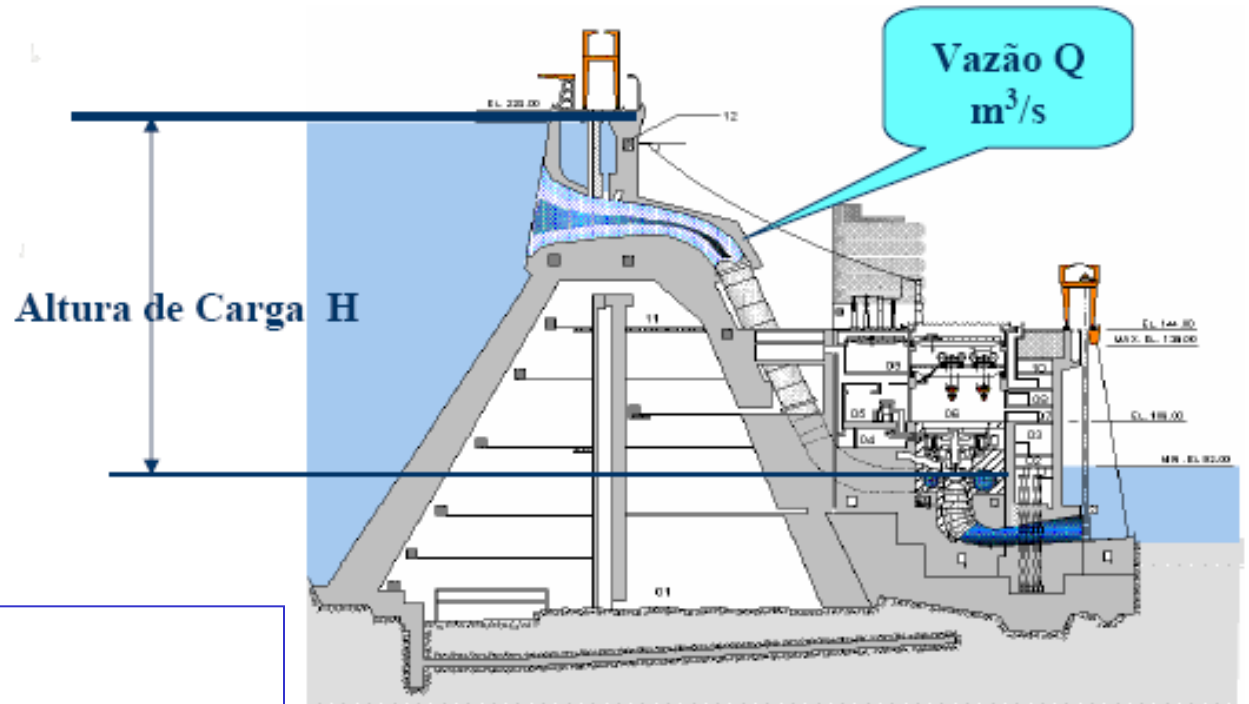
Então, a energia gerada depende:

Da altura de queda  $H$ ; da vazão de água  $Q$ ; da eficiência dos diversos componentes.

Por exemplo:

- Para uma **vazão constante** de  $3\text{m}^3/\text{seg}$  ;
- altura de 10m;
- Rendimento hidráulico de 95%
- Rendimento da turbina de 90%
- Rendimento do gerador elétrico de 95%

## Energia gerada



## Energia diária

$$Ed = 9,81 \times H \times Q \times \eta_H \times \eta_T \times \eta_g \times 24h / dia$$

$$Ed = 5737,23 \text{ kWh/dia}$$

# Fator de Capacidade (FC) de uma UHE

Não sendo constante a vazão instantânea:

Potência elétrica instantânea ←  $P_e$  (kW)

## Energia diária gerada

$$Ed = \int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i$$

## Fator de capacidade - FC

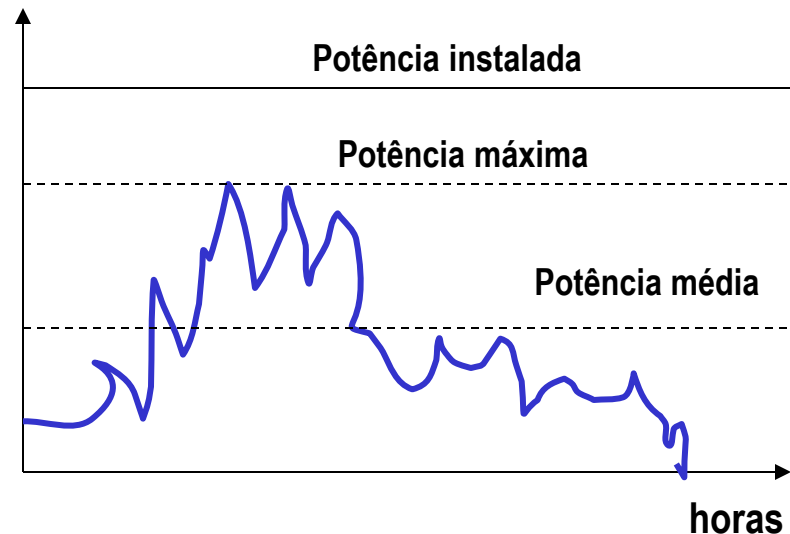
FC = energia efetivamente gerada

Máxima energia possível de ser gerada

=  $P_{média} / P_{máxima}$

Então:  $Ed = P_{max} \times FC \times 24h / dia$

## Curva diária de geração

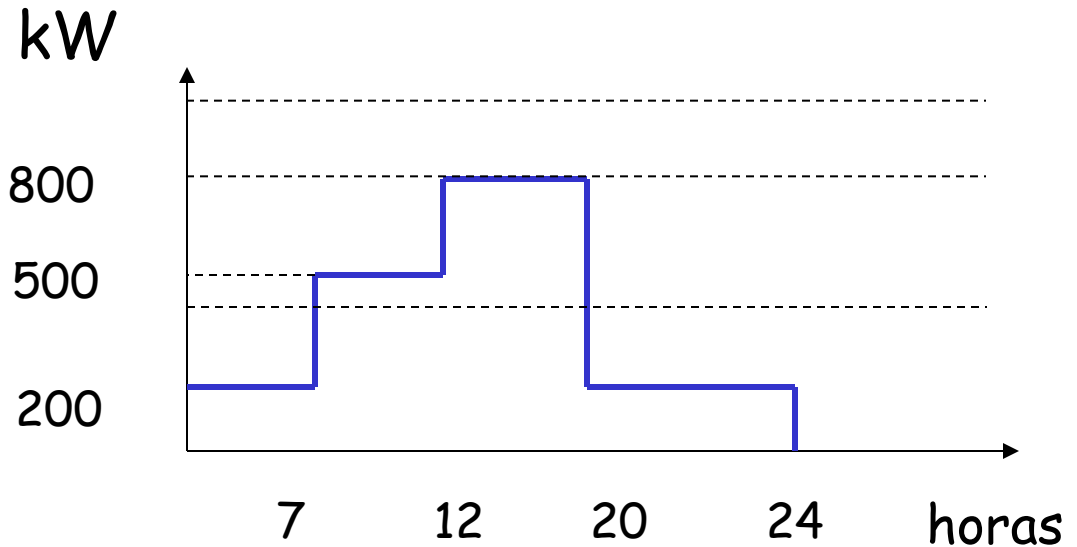


$$= \frac{\int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i}{P_{max} \times 24 / dia}$$

**Exemplo:** Uma usina hidrelétrica de 1 MW apresenta a seguinte **curva** diária de geração:

**Calcule:**

- Potência instalada
- Potência máxima
- Potência média
- Fator de capacidade diário



- Qual a diferença entre capacidade ou potência instalada e potência máxima ?
- A potência máxima instantânea pode ser igual à potência ou capacidade instalada? Quando isto acontece?

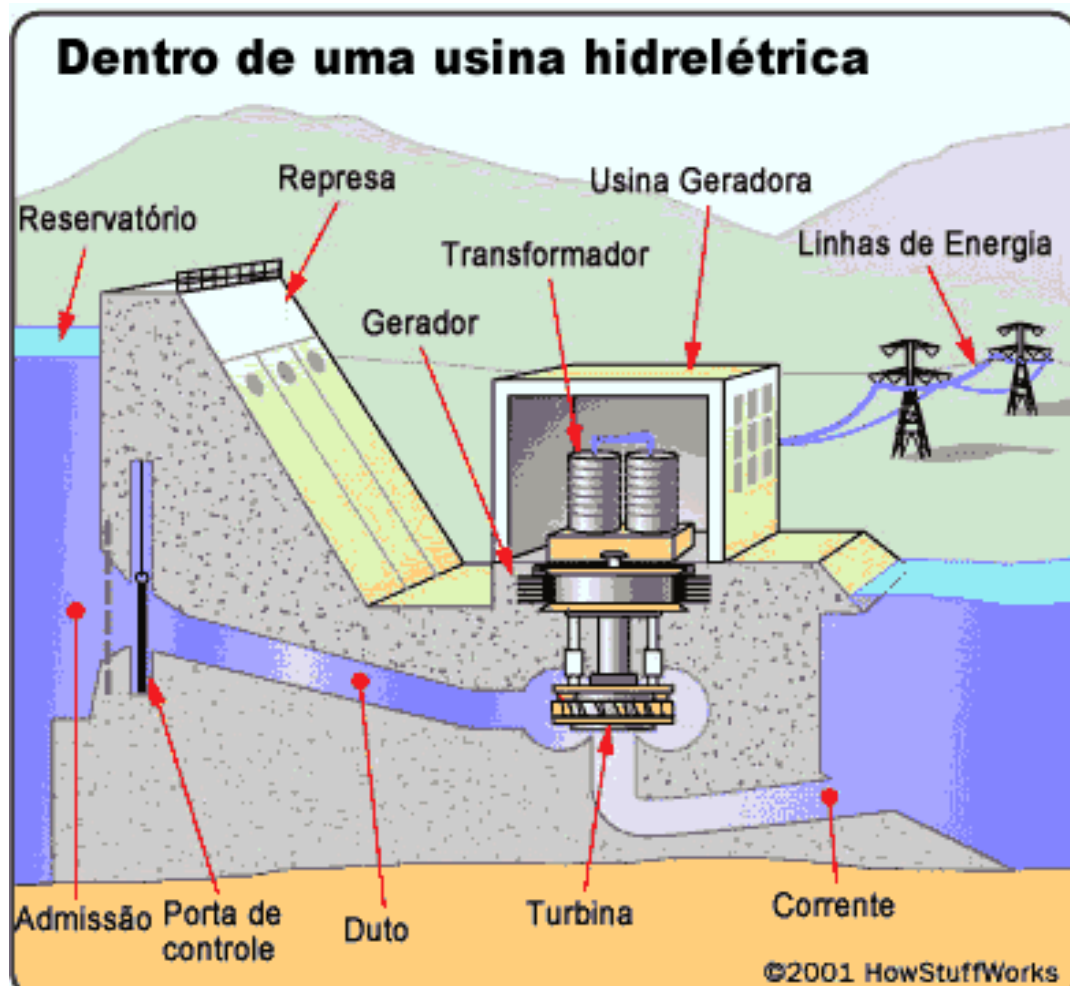
$$FC = P_{\text{média}} / P_{\text{máxima}}$$

$$P_{\text{média}} = EG (\text{diário}) \times 24\text{h}/\text{dia}$$

# Hidrelétricas

- ❑ Barragens - represa
- ❑ Vertedouro
- ❑ Comportas – porta de controle
- ❑ Conduitos (duto)
- ❑ Chaminés de equilíbrio ou câmara de descarga
- ❑ Casas de força : turbina, gerador, válvulas, e demais equipamentos do sistema elétrico

## Principais componentes



# BARRAGEM DE TRÊS GARGANTAS - CHINA



## Finalidade:

- Represar a água para captação e desvio
- Elevar o nível da água para aproveitamento elétrico e navegação
- Represar a água para regularização de vazões e amortecimentos de ondas de enchentes

# VERTEDOUROS OU EXTRAVASORES

Ilha Solteira



São necessários  
para descarregar as  
cheias e evitar que a  
barragem seja  
danificada



# COMPORTAS E TOMADA D'ÁGUA

**Comportas:** permitem isolar a água do sistema final de produção de energia elétrica, tornando possível por exemplo, trabalhos de manutenção.

**Tomada d'água:** permitir a retirada de água do reservatório e proteger a entrada do conduto de danos e obstruções.

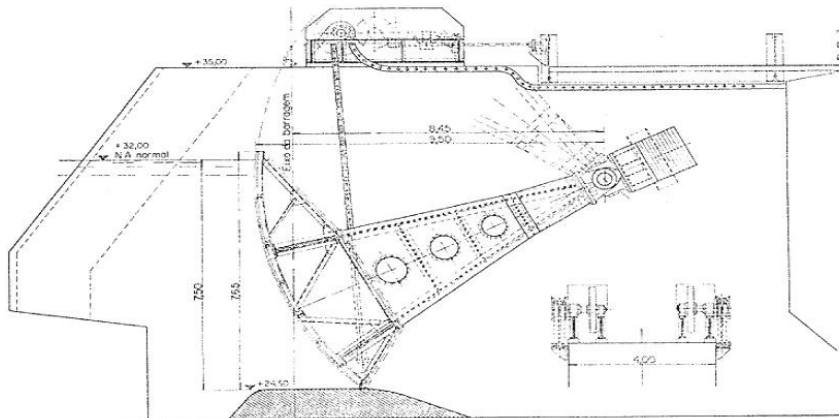
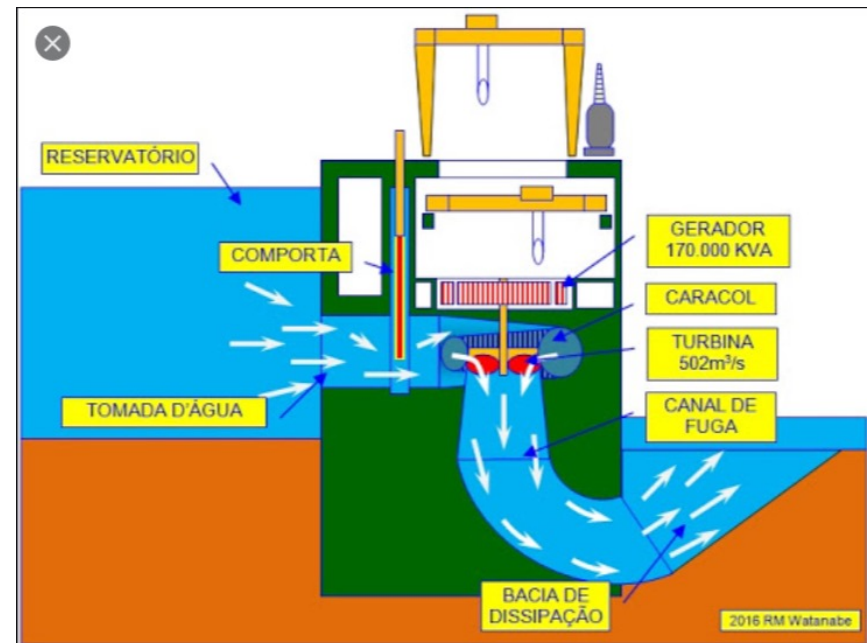


Figura 6.75 Comporta de segmento movimentada por guinchos, por meio de correntes tipo Galf





**CONDUTOS** – por onde escoa a água até as turbinas

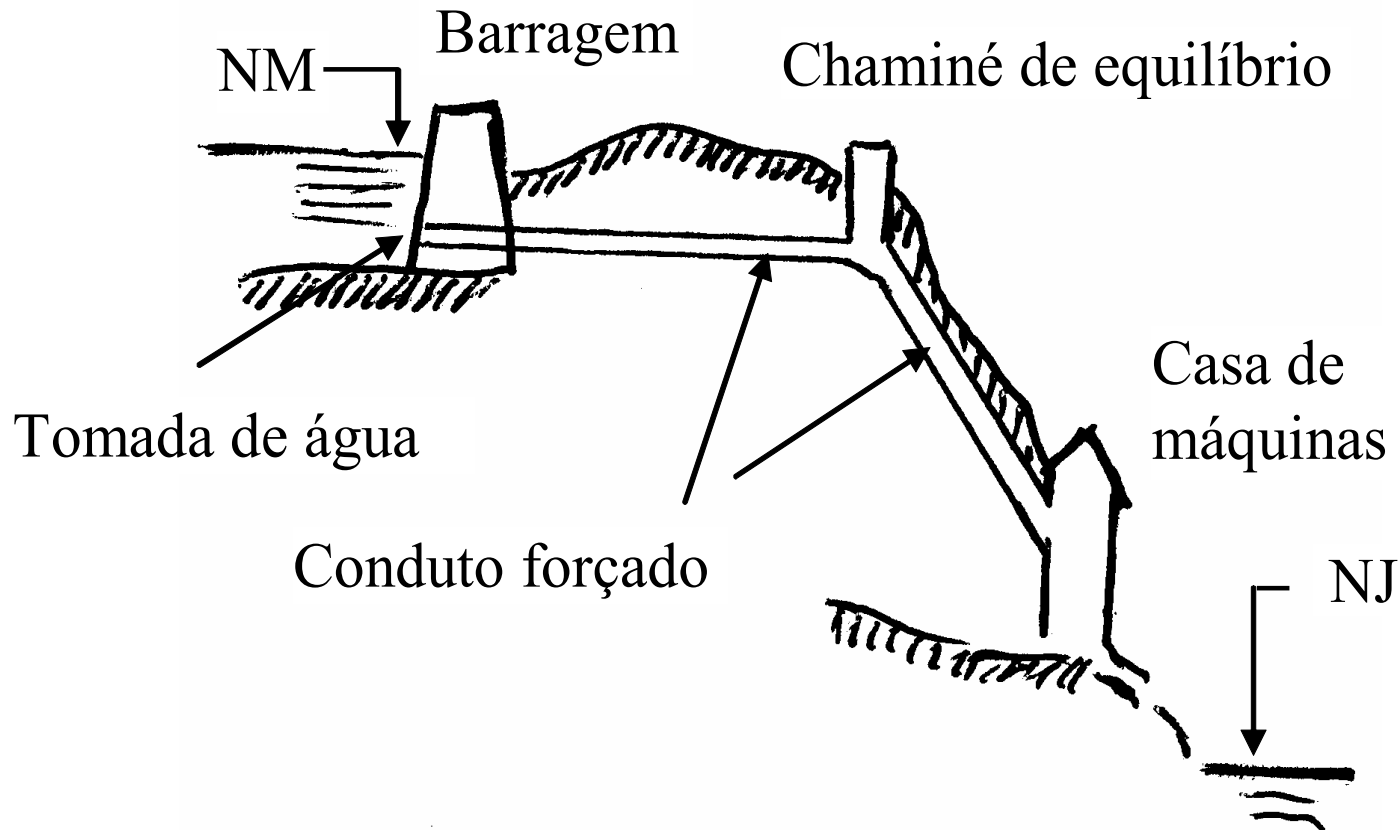
Podem ser **livres**: canais a céu aberto ou aquedutos

**forçados**: escoamento se faz com a água a plena seção



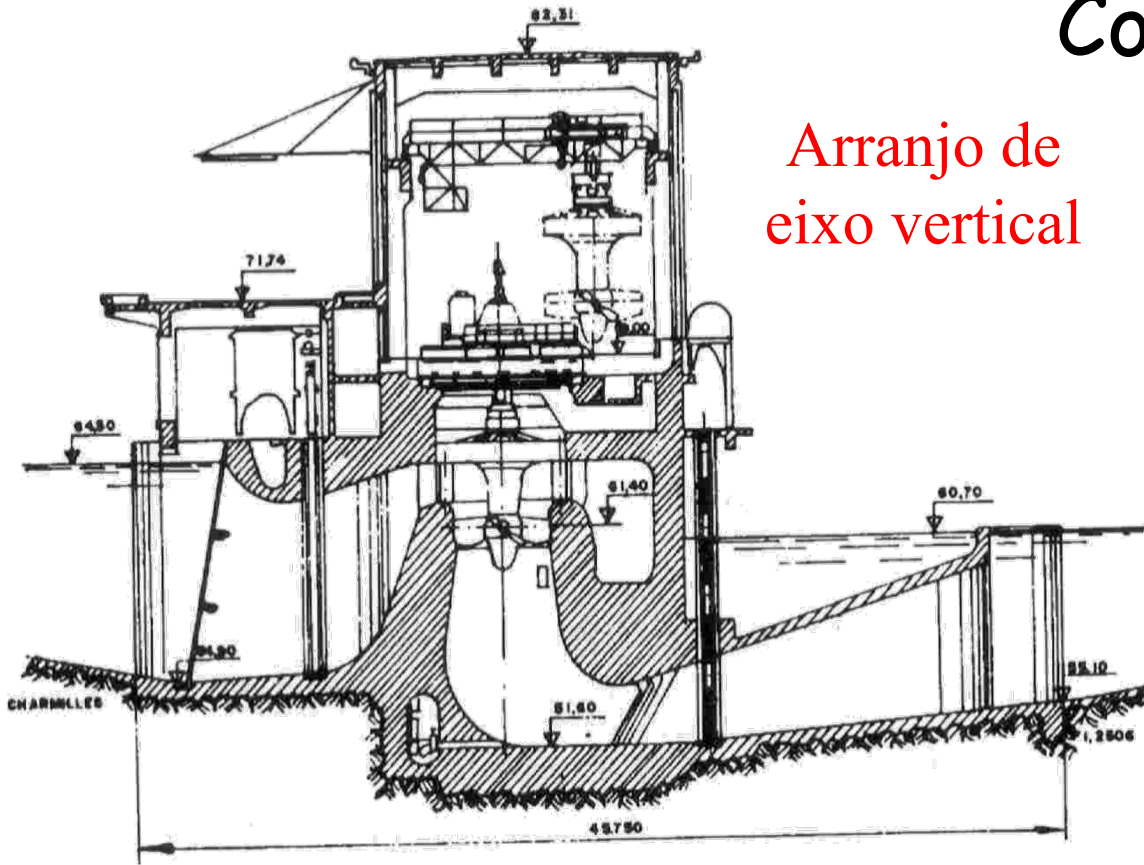
# CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO OU CÂMARA DE DESCARGA

**Função principal** : aliviar o excesso de pressões causado pelo golpe de aríete que ocorre quando o escoamento de um líquido por uma tubulação é abruptamente interrompido pelo fechamento de uma válvula.

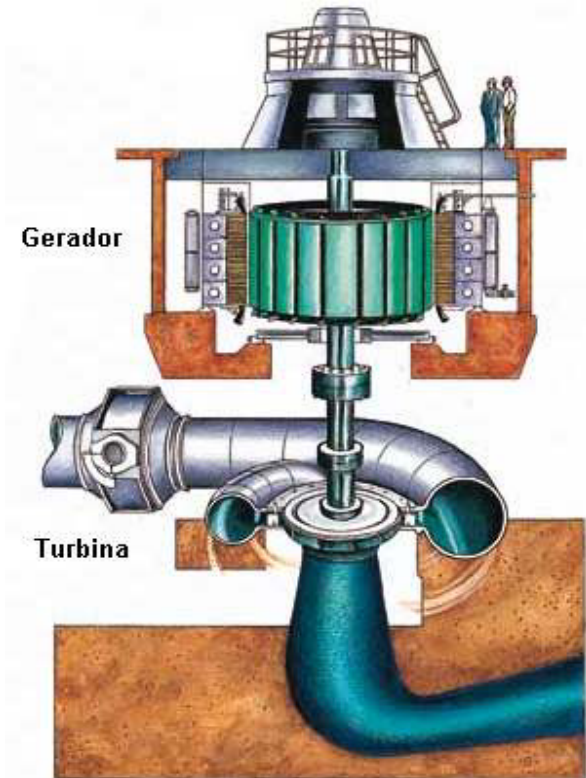
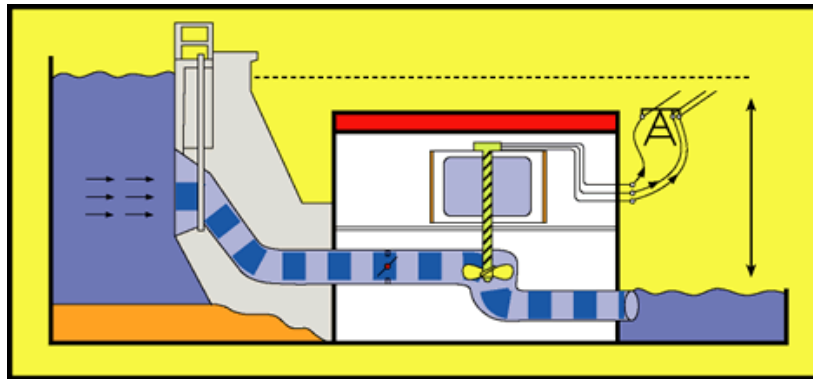


# Configuração de uma Casa de Força

Arranjo de eixo vertical



Um aspecto importante no projeto de UHEs, que influencia o arranjo da casa de força, é a determinação da **turbina** mais apropriada



# Turbinas hidráulicas

**Turbinas hidráulicas:** Em função das variáveis básicas dos aproveitamentos , altura de queda (H) e vazão (Q), há um tipo mais apropriado de turbina. Existem variações, mas os principais tipos de turbinas são as **Pelton, Francis e Hélice** ( com ênfase as Kaplan).



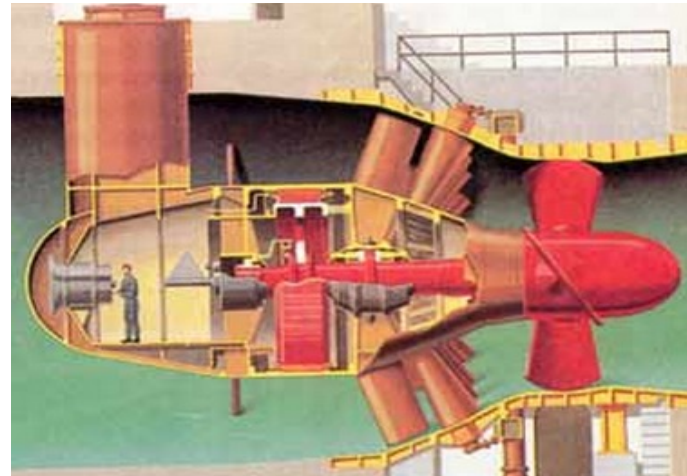
Pelton – Henry Borden



Francis – Itaipú



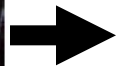
Kaplan – Andritz Hydro



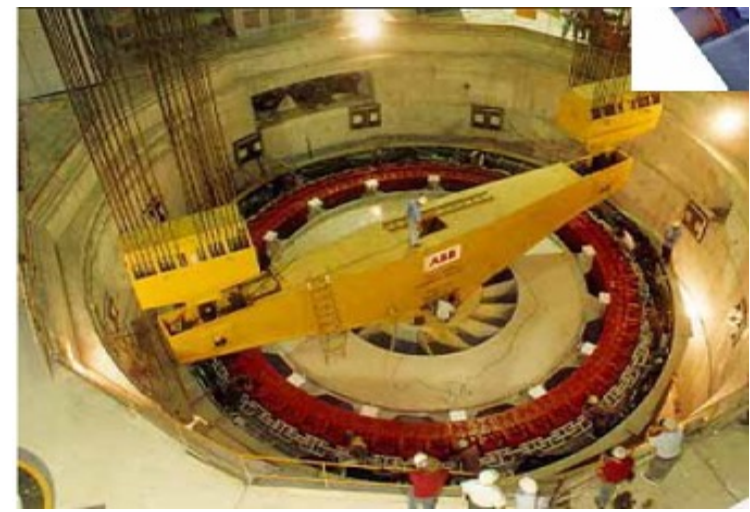
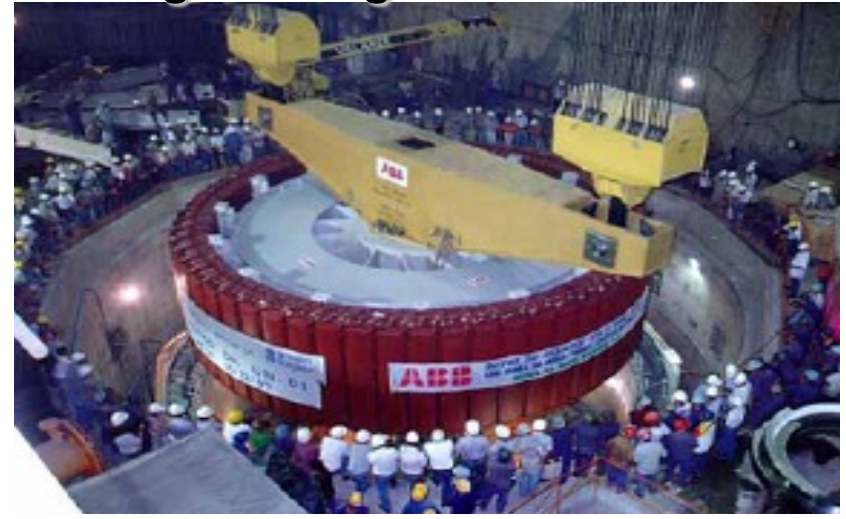
Bulbo (desenho) – Jirau

# Gerador - transforma a potencia mecânica rotacional em potência elétrica

## Colocação da Turbina hidráulica



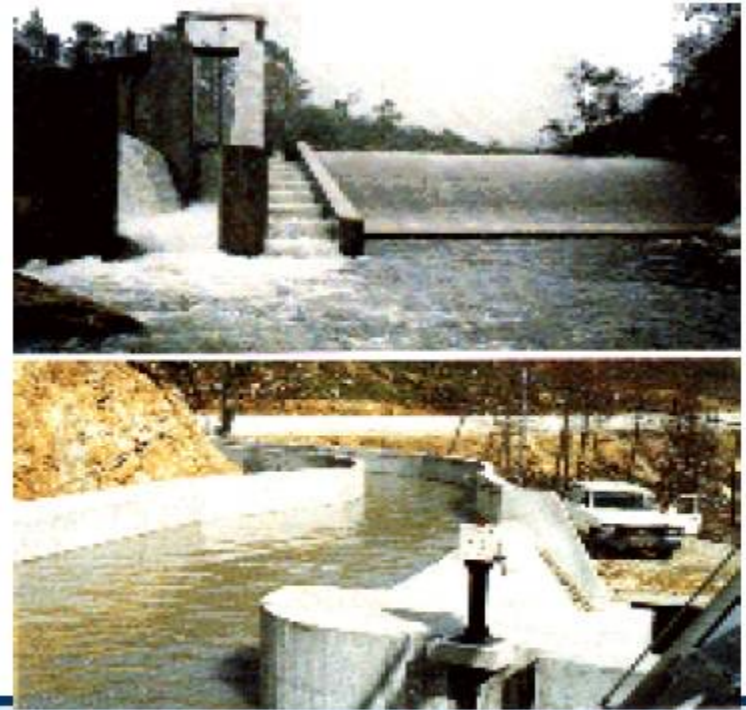
## Montagem do gerador elétrico



# Tipos de centrais hidrelétricas

Quanto ao uso das vazões naturais

## 1- Central a fio d'água

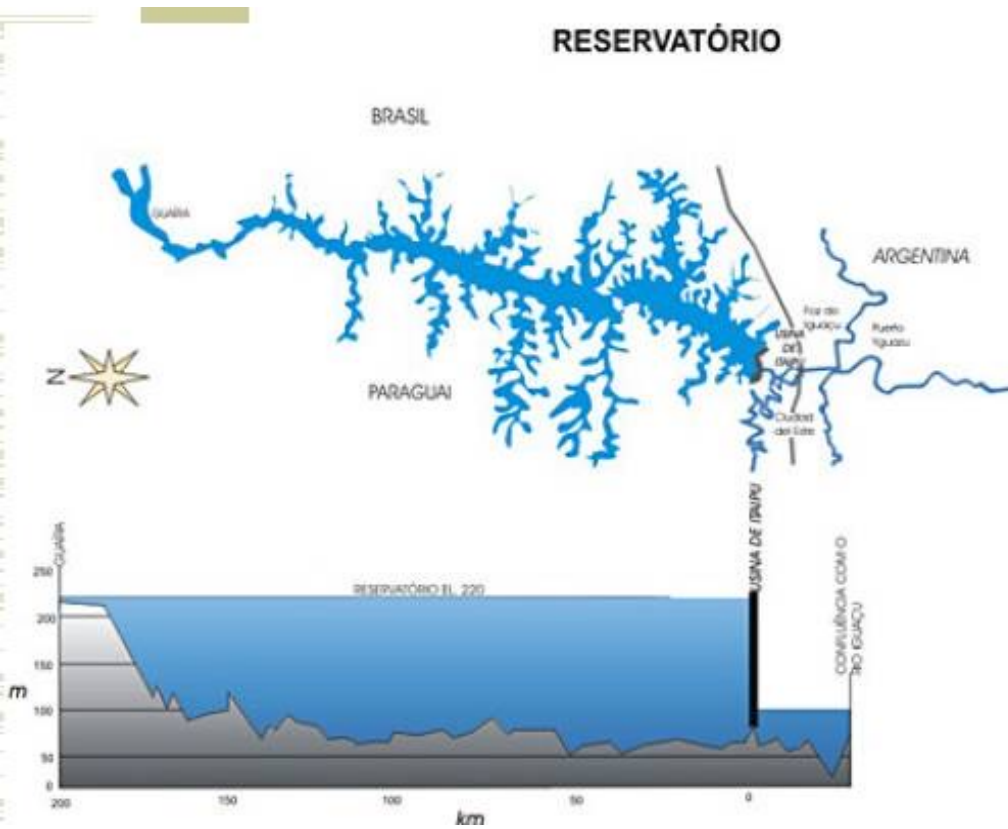


Queda de 89,23 m, vazão de projeto 6,75 m<sup>3</sup>/s  
turbinas Francis de 3 640 kW e 1 740 kW

# Tipos de centrais hidrelétricas

Quanto ao uso das vazões naturais

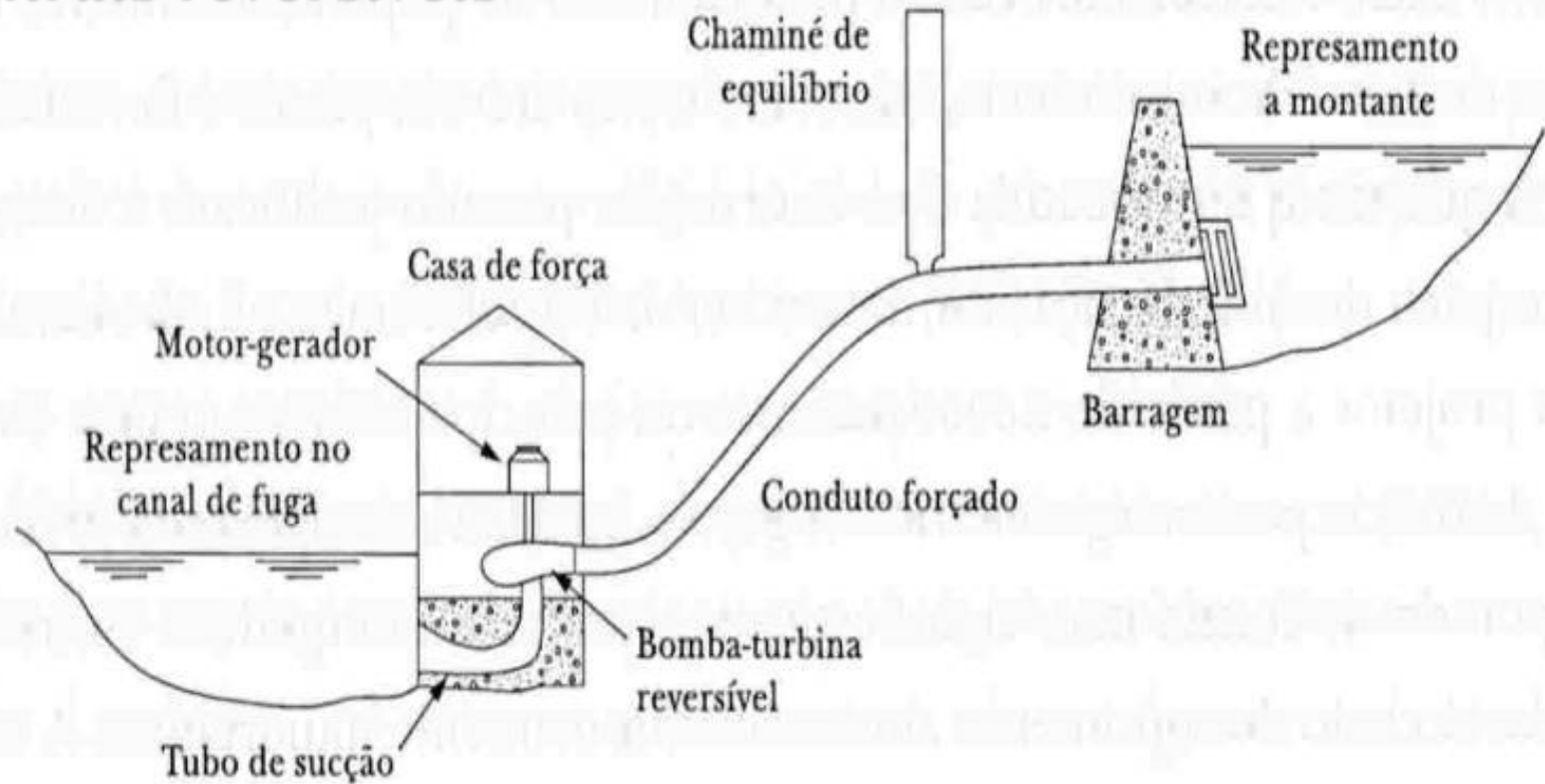
## 2- Centrais de acumulação



# Tipos de centrais hidrelétricas

## Quanto ao uso das vazões naturais

### 3- Centrais reversíveis





# Tipos de centrais hidrelétricas

## Quanto à potência

- ◆ micro  $P < 100$  kW
- ◆ mini  $100 < P < 1000$  kW
- ◆ pequenas  $1000 < P < 30\ 000$  kW
- ◆ médias  $30\ 000 < P < 100\ 000$  kW
- ◆ grandes  $\geq P \geq 100\ 000$  kW

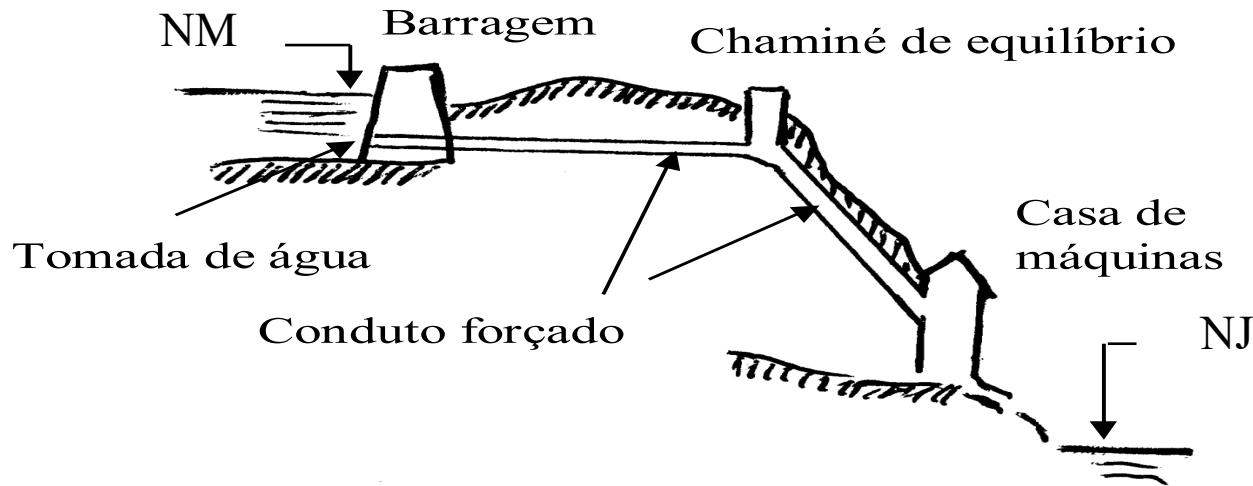
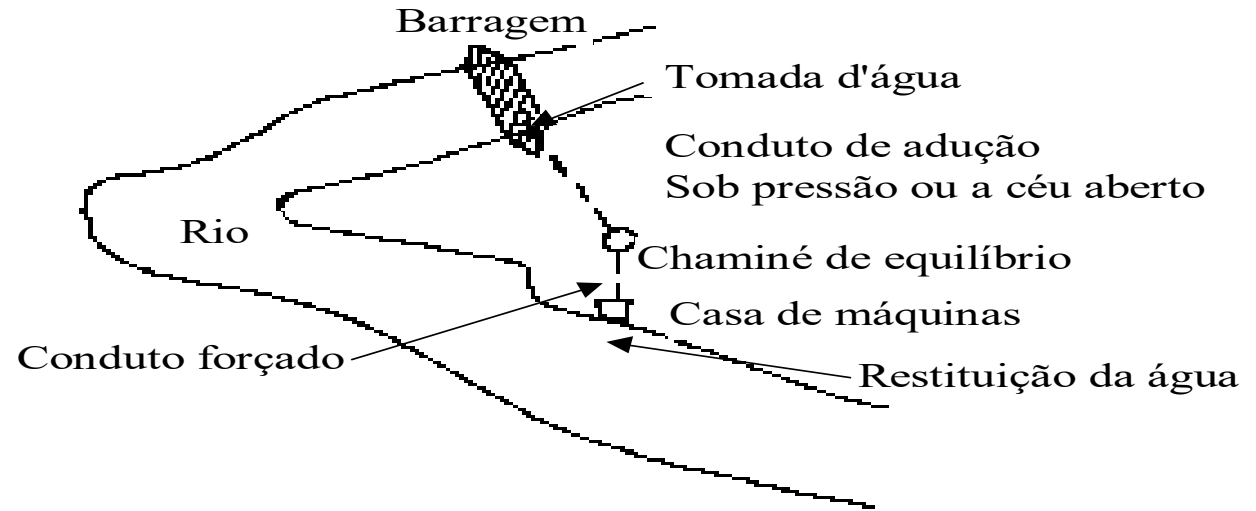
## Quanto à altura de queda d'água

- ◆ baixíssima  $H < 10$  metros
- ◆ baixa  $10 < H < 50$  metros
- ◆ média  $50 < H < 250$  metros
- ◆ alta  $H > 250$  metros

## Quanto à forma de captação de água

- ◆ leito de rio ou de barramento
- ◆ desvio e em derivação

# Central Hidrelétrica em Desvio



# Usinas Hidrelétricas no Brasil

## As 15 Maiores UHE Brasileiras

Nome	Potência (MW)	Rio	UF
Belo Monte	11233	Xingú	PA
Tucuruí	8535	Tocantins	PA
Itaipu (parte brasileira)	7000	Iguaçu	PR
São Luíz do Tapajós (construção)	6356	Tapajós	PA
Jirau	3750	Madeira	RO
Santo Antônio	3568	Madeira	RO
Ilha Solteira	3444	Paraná	SP
Xingó	3162	São Francisco	AL/SE
Paulo Afonso IV	2462	São Francisco	AL/BA
Itumbiara	2082	Paranaíba	GO/MG
Teles Pires	1820	Teles Pires	PA/MT
São Simão	1710	Paranaíba	MG/GO
Foz do Areia	1676	Iguaçu	PR
Jupiá	1554	Paraná	SP/MS
Porto Primavera	1540	Paraná	MS/SP

## Situação em 2021

Capacidade instalada das Hidrelétricas em operação = 109.270 MW

Capacidade em construção = 478 MW

# POTÊNCIA GERADA E ENERGIA PRODUZIDA POR UMA USINA HIDROELÉTRICA

$$P = \eta_{\text{Tot}} \times g \times Q \times H$$

Onde:

**P = Potência em KW**

**$\eta_{\text{Tot}}$  = Rendimento total da usina =  $\eta_h \times \eta_T$**

**g = aceleração da gravidade 9,8 m/s<sup>2</sup>**

**Q = Vazão m<sup>3</sup>/s**

**H = queda bruta (m)**

**H = hidráulico ; t = turbina ; g = gerador**

**E = P x PCU x 8.760 horas**

**E = energia anual**

**PCU = Fator de capacidade da usina. Relação entre a Potência média no ano e a Potência Máxima da usina.**



<http://wille.wordpress.com/2008/03/10/fotos-hidroeletrica-e-canions-de-xingo/>

**EXERCÍCIO (LINEU)** Em um aproveitamento hidráulico, o nível a montante encontra-se na cota de 890 m e o a jusante na de 750 m. A vazão é de 60 m<sup>3</sup>/s. O comprimento equivalente da tubulação de 4,5 m de diâmetro é de 1000 m. O rendimento total da turbina é 0,92 e do alternador (gerador) é 0,94. Determine a potência elétrica da usina. (Tubulação de aço soldado com coeficiente  $\lambda = 115$ )

Obs.  $H_p$  (perda de carga na tubulação) (Fórmula empírica)

$$H_p = 10,643 (Q / \lambda)^{1,85} D^{4,87} L$$

**Cálculo do rendimento do encanamento (Rendimento Hidráulico):**

$$H_p = 10,643 (60 / 115)^{1,85} \times 4,5^{4,87} \times 1000 = 2,1 \text{ m}$$

$$\eta_h = (140 - 2,1) / 140 = 0,985$$

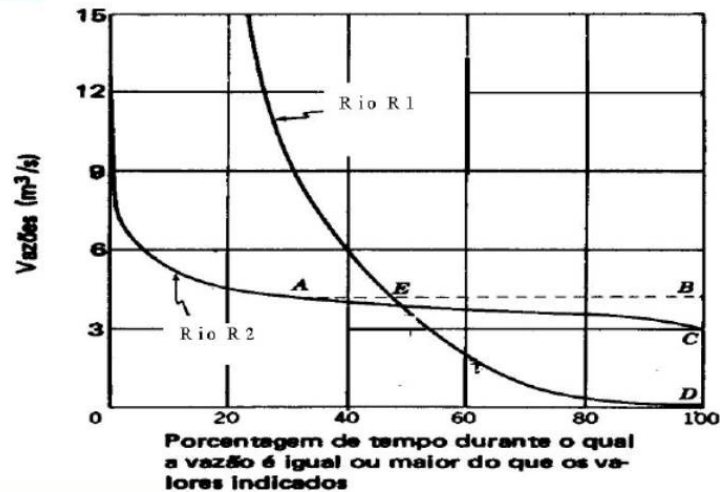
$$\text{Portanto } \eta_{\text{total}} = \eta_h \times \eta_T \times \eta_g = 0,985 \times 0,92 \times 0,94 = 0,852$$

$$P \text{ elétrica} = \eta_{\text{Tot}} \times g \times Q \times H = 0,852 \times 9,8 \times 60 \times 140 = 70.137 \text{ Kw}$$

# Exercício

Considerando a instalação de uma UHE na seção reta de cada um dos rios abaixo, responda as seguintes perguntas

## Curvas de Duração ou Persistência



- Para obtenção de uma energia firme, em qual dos rios abaixo a UHE necessitará de reservatório? Explique sua resposta.
- Considerando uma altura de barragem de 100 metros e a instalação de uma Usina a fio d'água no Rio 2 com potência máxima definida pela vazão firme. Qual será o valor anual da energia firme (MWh) e sua potência máxima? Considere um rendimento total de 70% da usina.
- Caso a mesma Usina instalada no Rio 2 seja instalada no Rio 1 por quanto tempo ela produzirá energia na sua potência máxima?

# Solução:

A UHE instalada no rio 1 não possui uma vazão significativa por um longo período. Ou seja, uma UHE sem reservatório irá funcionar com uma geração insuficiente.

Energia diária

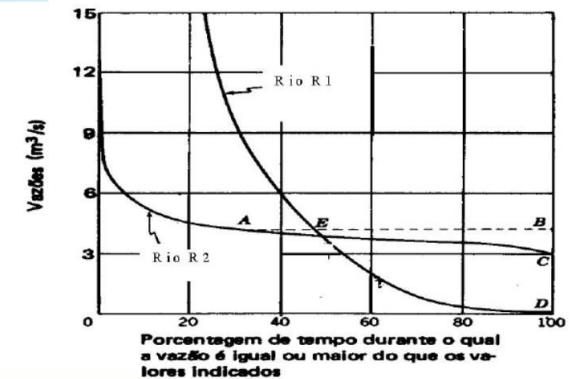
$$E = 9,8 * H * \eta * Q * 8760 \text{ h/dia}$$

$$Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}; H = 100 \text{ m}; \eta = 0,7$$

$$E = 18028,08 \text{ kWh}$$

$$P = P_{\text{máx}} = \frac{18028,08 \text{ kWh}}{8760 \text{ h}} = 2,058 \text{ kW}$$

## Curvas de Duração ou Persistência



Qualquer usina com a mesma potência instalada, no rio1 irá fornecer sua potência máxima 53,3% do tempo de operação.