

# PEA 3100 - Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade

## Aula 6 - 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

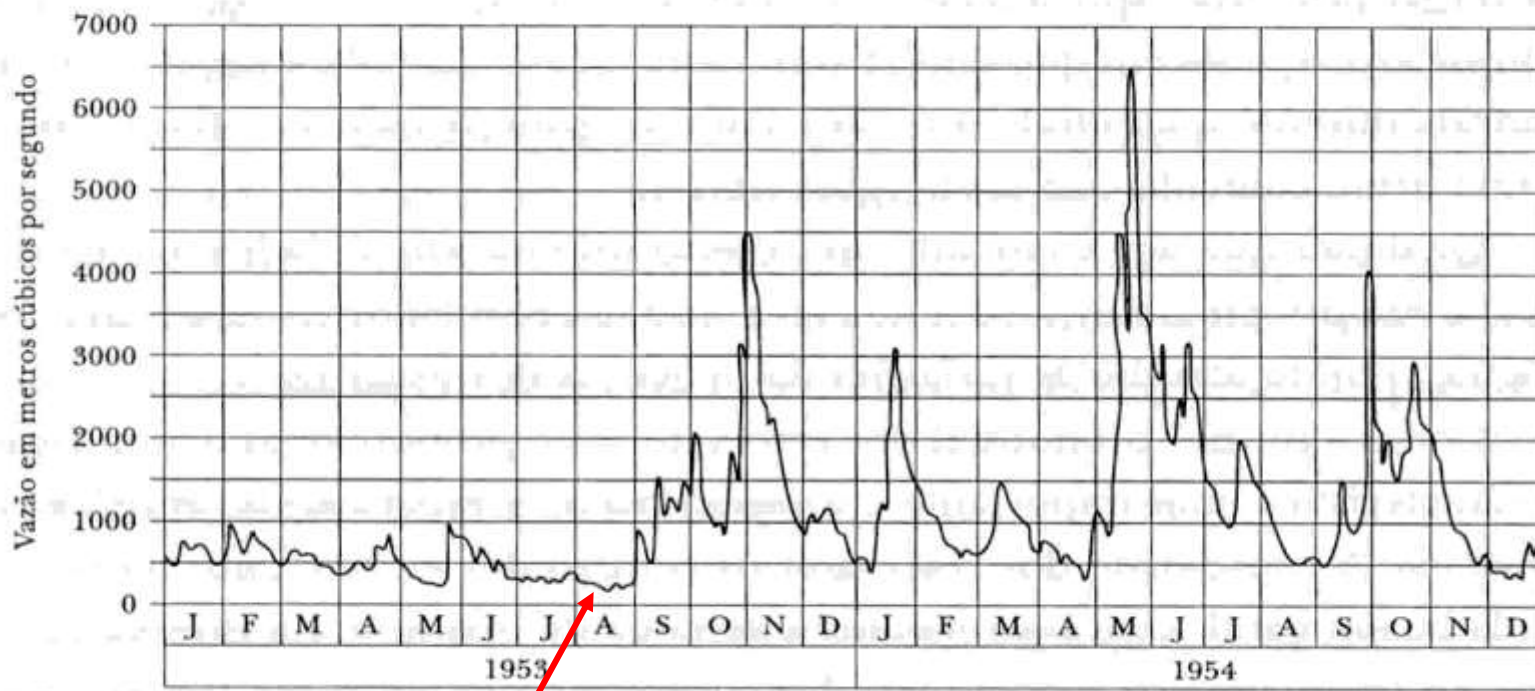
# Conceitos básicos de Hidrologia: **Bacia hidrográfica**

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



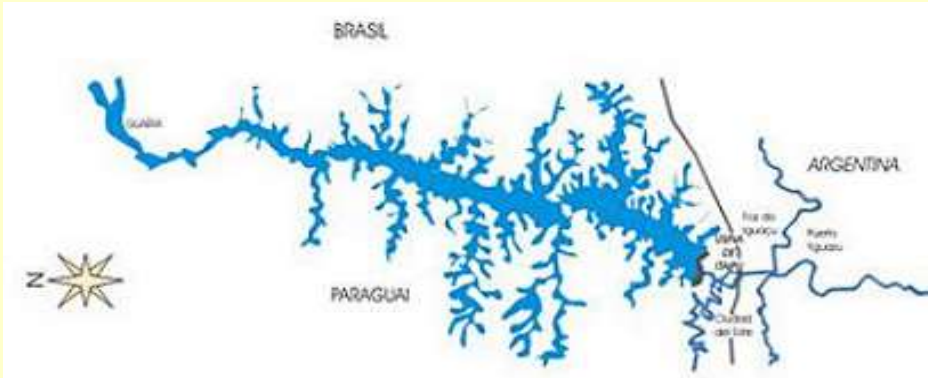
# Conceitos básicos de Hidrologia: **Vazão em um curso d'água.**

Exemplo de um **fluviograma** típico:

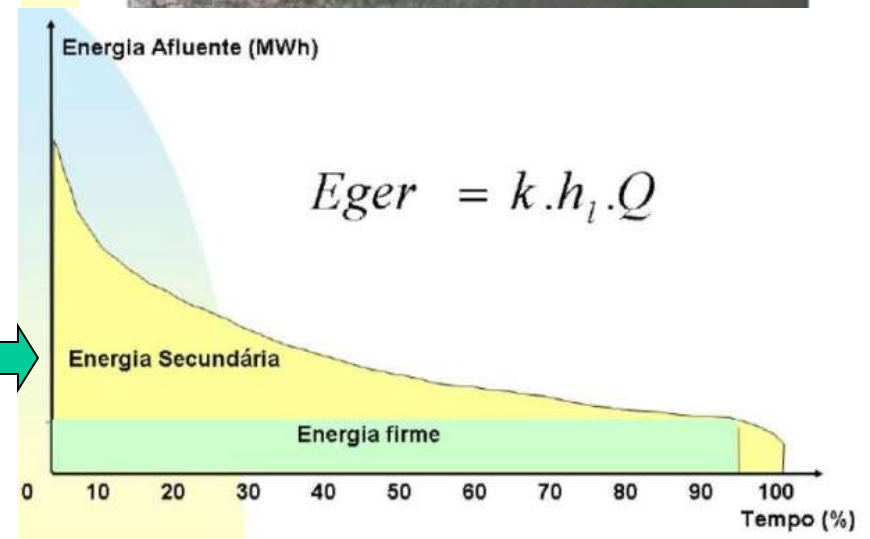
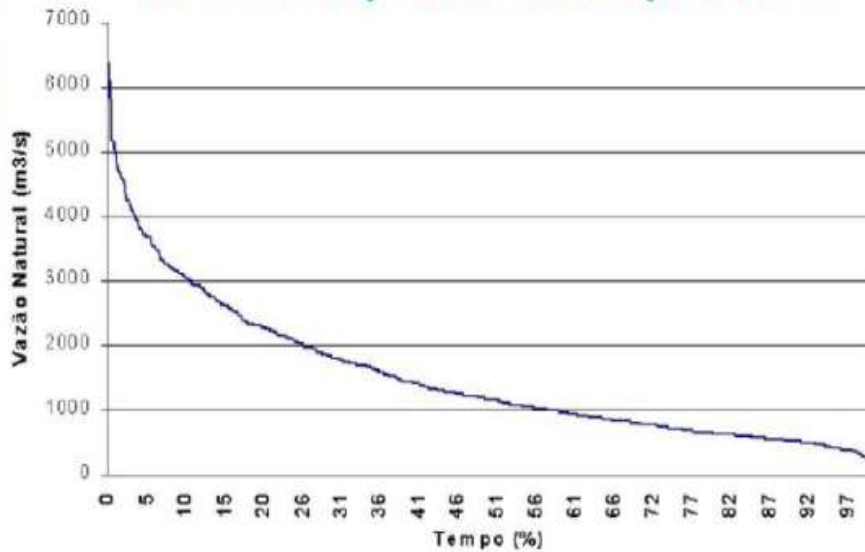


**Vazão mínima** – presente 95 a 100% do tempo

# Conceitos básicos da hidrologia: Regularização de vazões

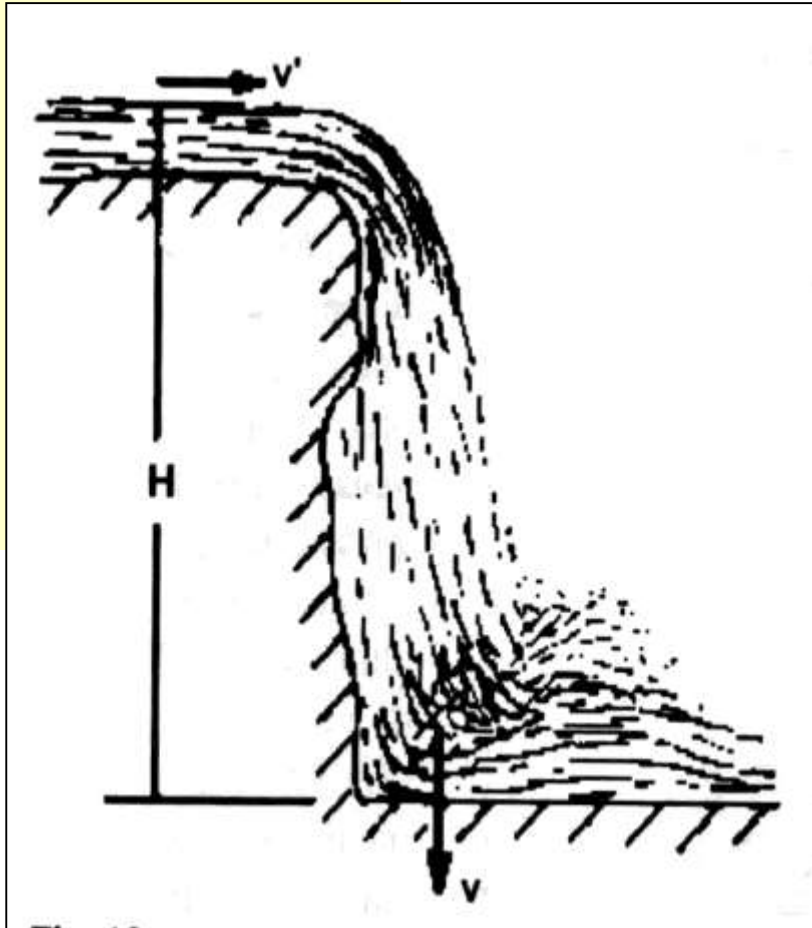


Curva de Permanência das Vazões  
Posto Itumbiara - Rio Paranaíba (1931/1992)  
Em 95% do tempo a vazão é maior que 436 m<sup>3</sup>/s



# 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 muita pequena

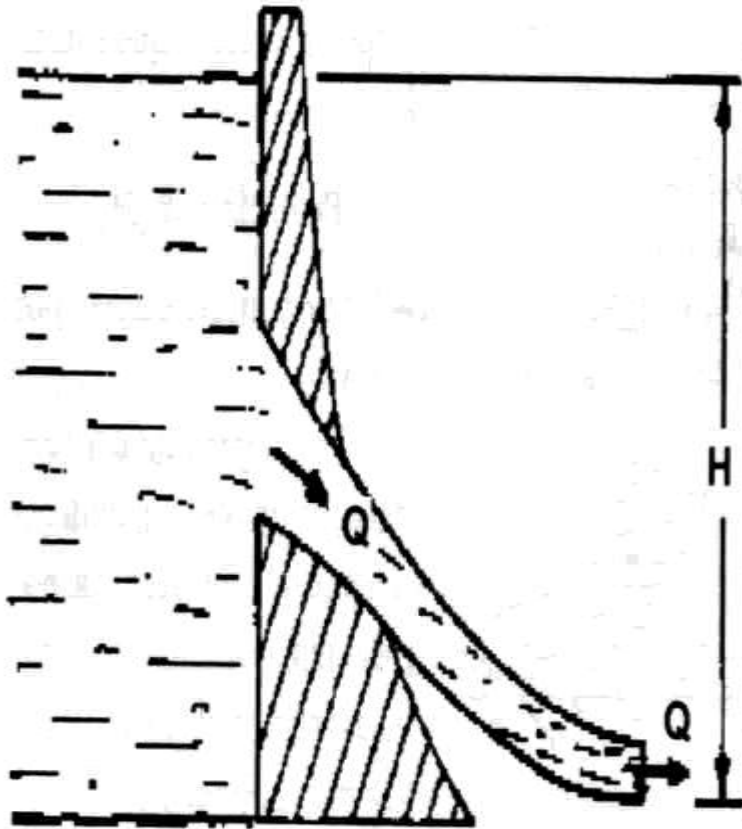
P: Potência

$m$ : "Vazão de massa"

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

# Hidrelétricas

## Princípio básico de funcionamento



$$\rho = \frac{m}{Q}$$

$Q$  = volume de água que escoou através do tubo / seg

$$PH = \rho g H Q$$

$g$  = aceleração da gravidade (9,81m/s<sup>2</sup>)

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Potência hidráulica (PH)} = 9,81 \cdot 1000 \text{ HQ (W)}$$

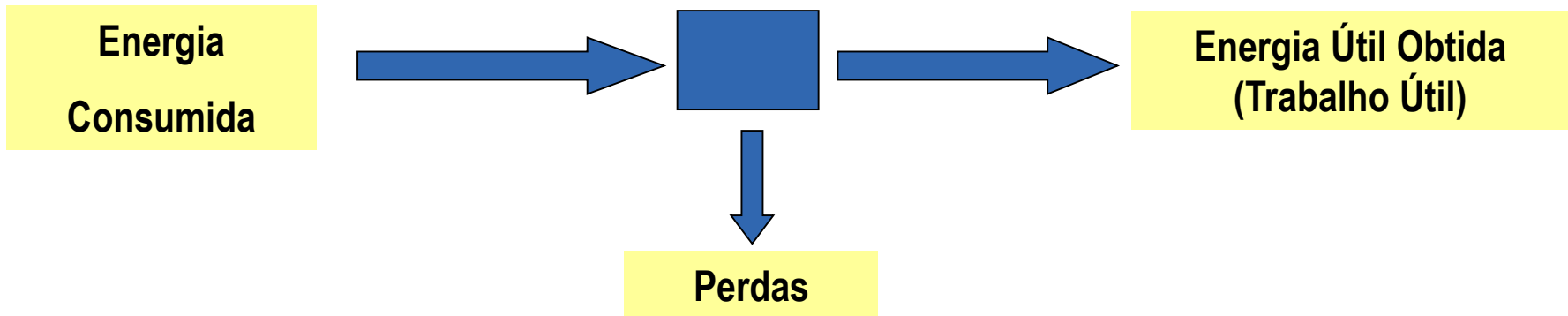
$$\text{Ou PH} = 9,81 \text{ HQ (kW)}$$

Sendo:

- $H$  em metros
- $Q$  em m<sup>3</sup>/s
- $P$  em kW



□ **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:

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

com  $\eta_H \geq 0,96$

$$\begin{cases} 0,97 \geq \eta_g \geq 0,90 \\ 0,94 \geq \eta_T \geq 0,88 \\ 0,76 \leq \eta_{TOT} \leq 0,87 \end{cases}$$

onde

$\eta_H$  - Rendimento do sistema hidráulico

$\eta_g$  - Rendimento do gerador

$\eta_T$  - Rendimento da turbina

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

Potência elétrica

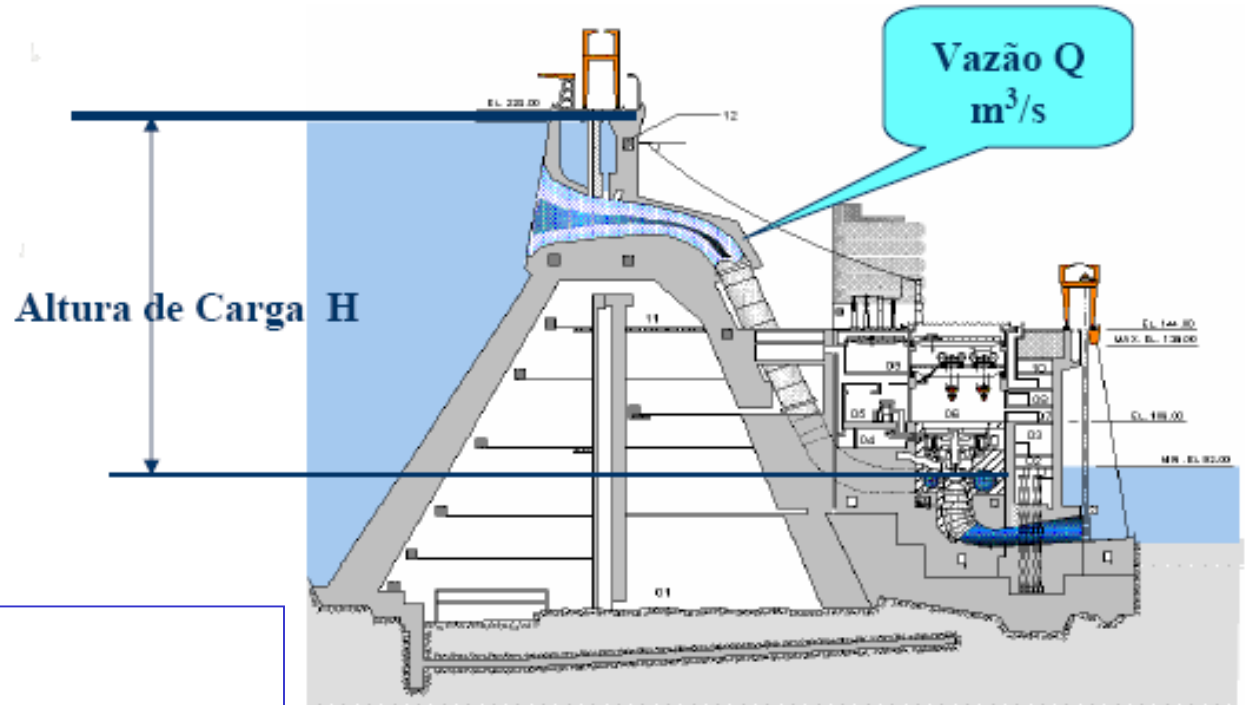
Então, a energia gerada depende:

Da altura de carga  $H$ ; 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  $10\text{m}$ ;
- 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

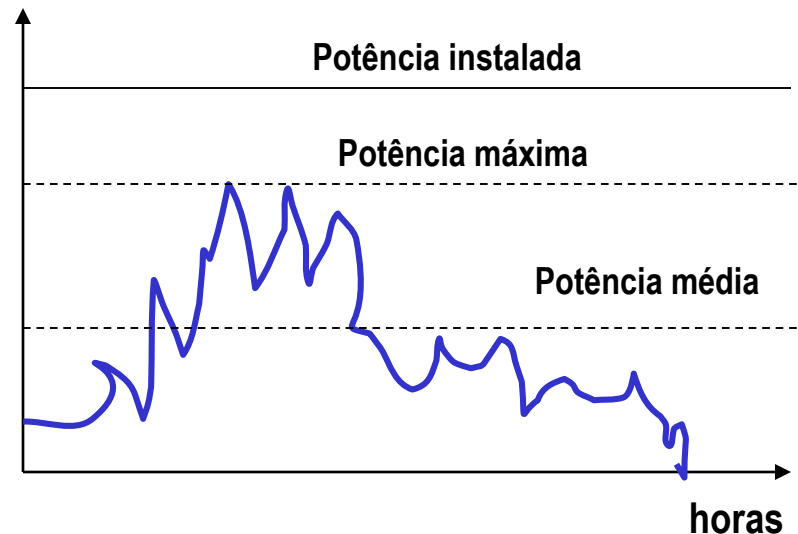
FC = energia efetivamente gerada

Máxima energia possível de ser gerada

=  $P_{média} / P_{máxima}$

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

Curva diária de geração

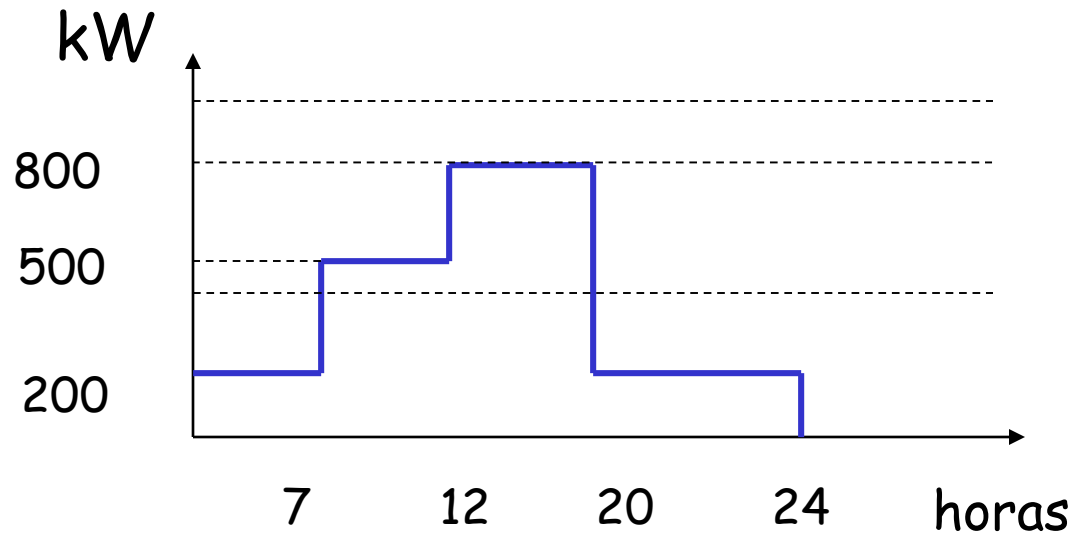


$$= \frac{\int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i}{P_{max} \times 24 / dia}$$

**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

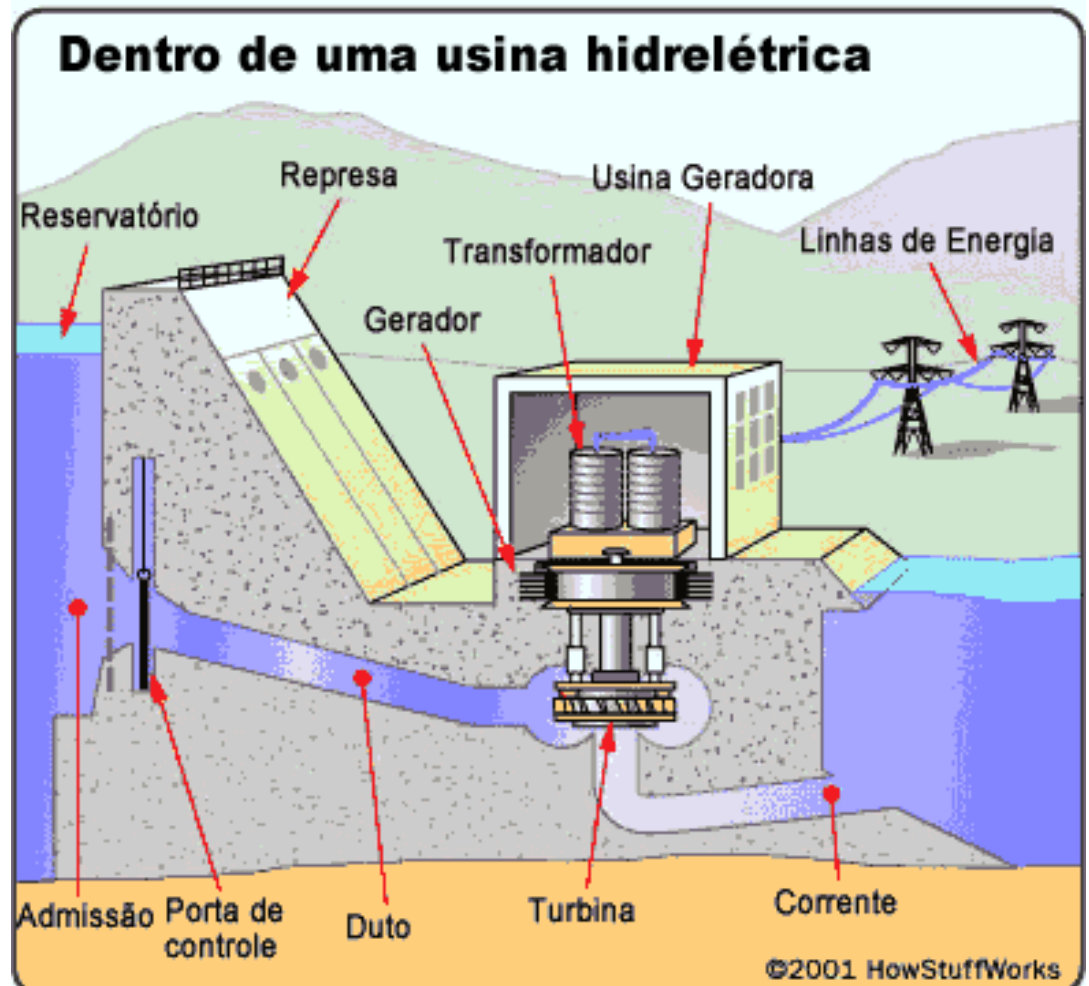


- Qual a diferença entre capacidade ou potência instalada e potência máxima ?
- A potência máxima instantânea pode ser igual à potência ou capacidade instalada? Quando isto acontece?

# Hidrelétricas

## Principais componentes

- 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



# Vista área da Usina de Itaipú



barragem

vertedouro

**Potência Instalada**

**14000 MW**

**ou 14 GW**

# Turbinas hidráulicas



**Pelton – Henry Borden**



**Francis – Itaipú**



**Kaplan – Andritz Hydro**



**Bulbo (desenho) – Jirau**

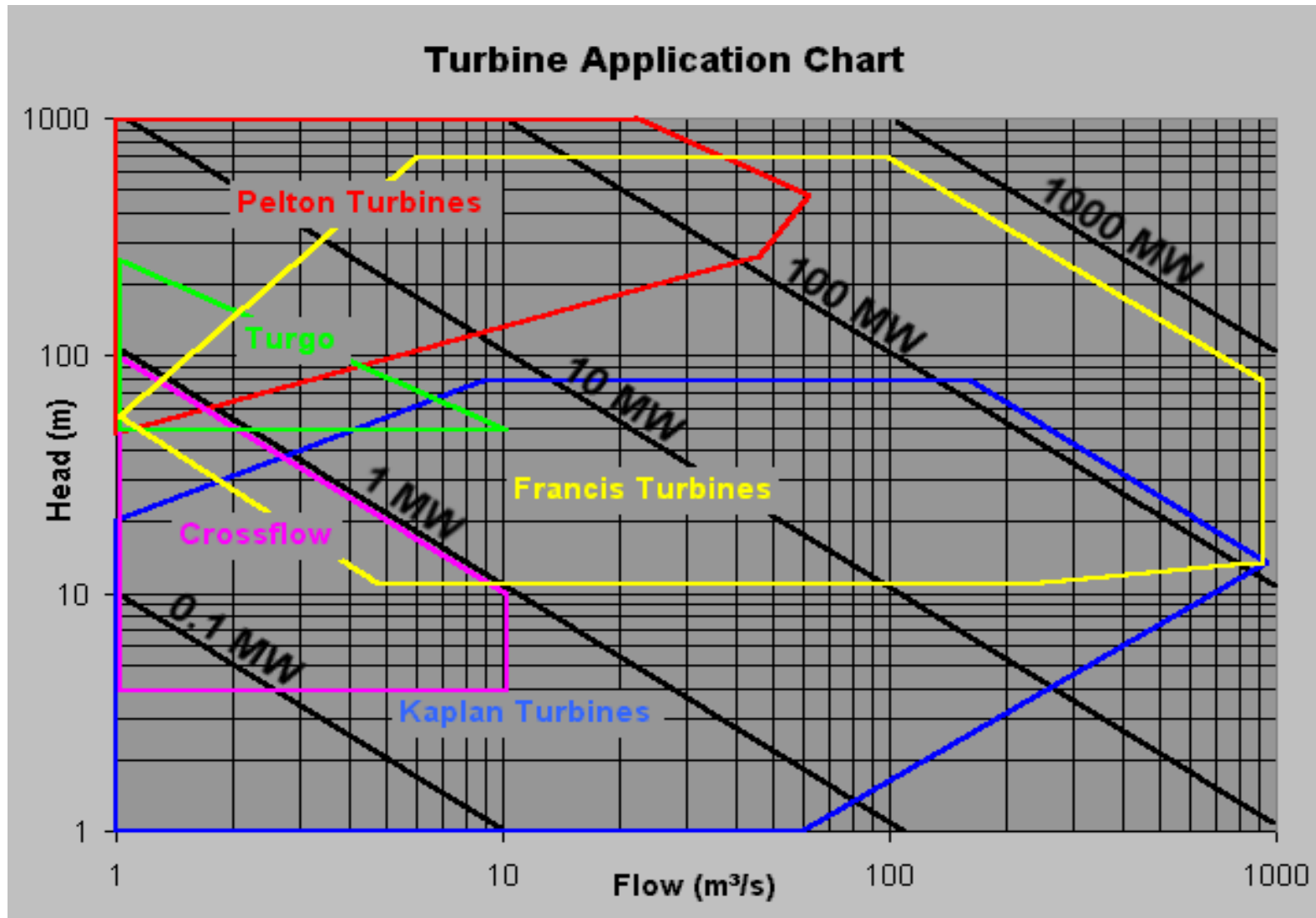


**Usina Henry Borden:  
720m de queda 157m<sup>3</sup>/s  
889 MW**



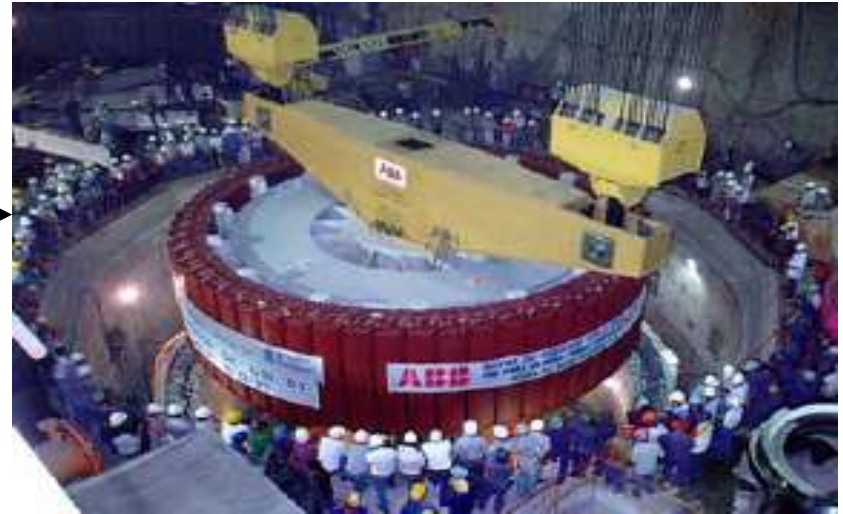
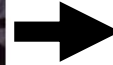


# Aplicação de Turbinas hidráulicas



# Turbina

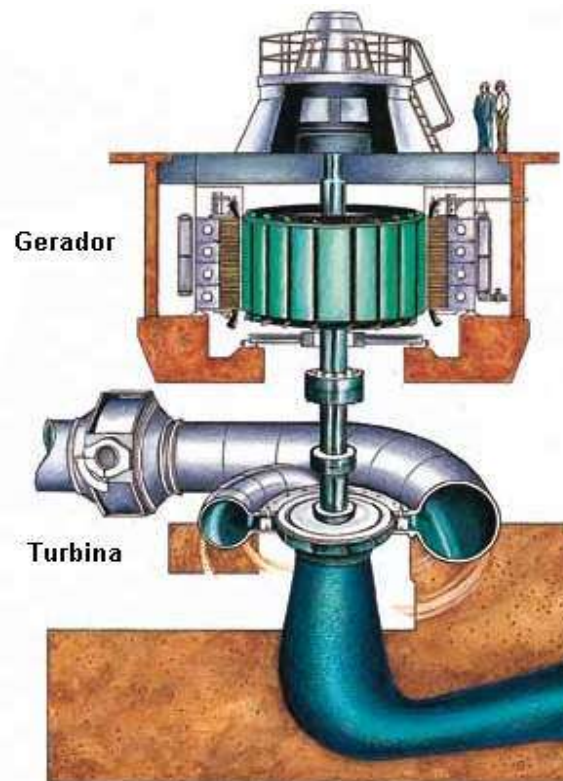
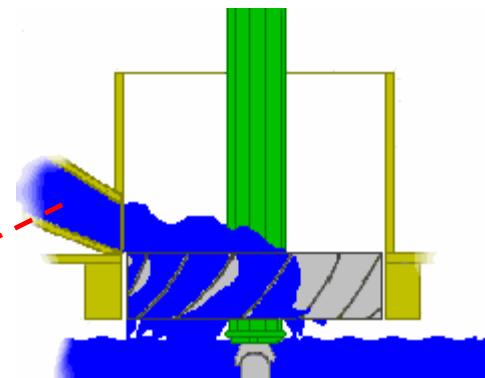
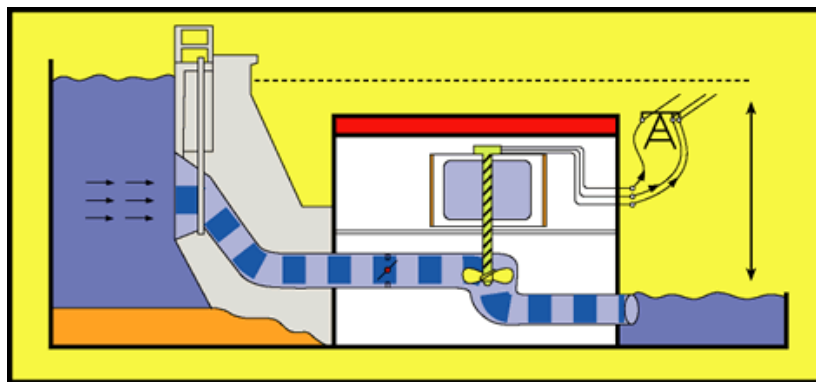
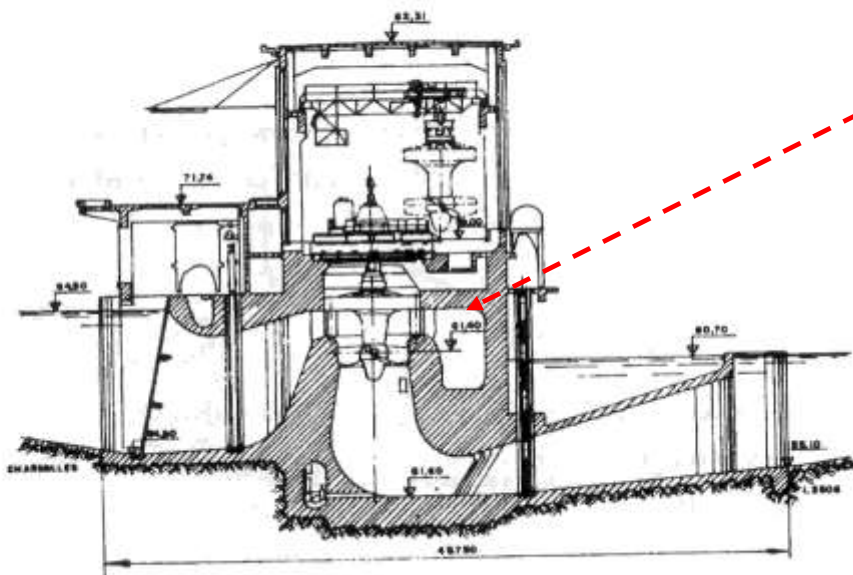
# Acoplamento do gerador na turbina



# Usina de Itaipu - Conduto Forçado



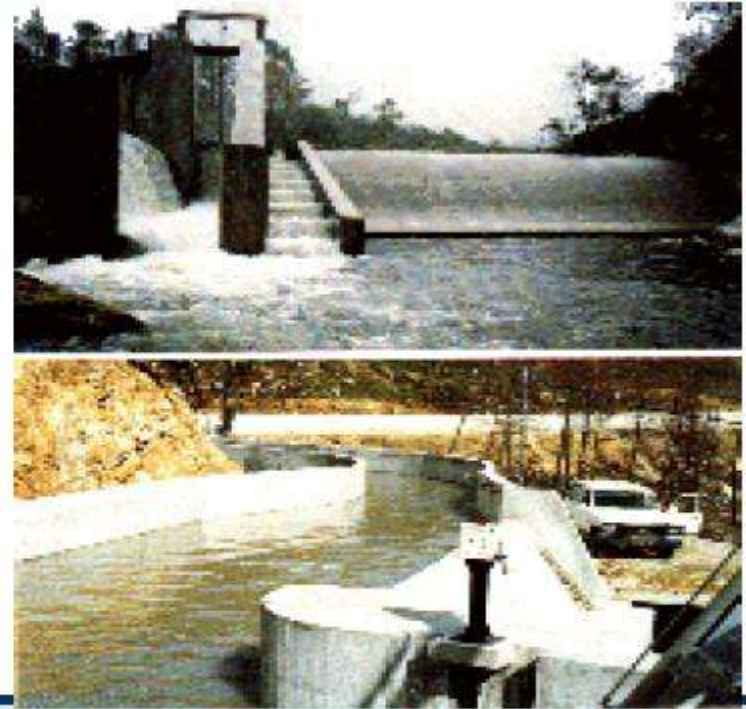
# Configuração de uma casa de força



# ☐ Tipos de centrais hidrelétricas

## ☐ Quanto ao uso das vazões naturais

### 1- Central a fio d'água

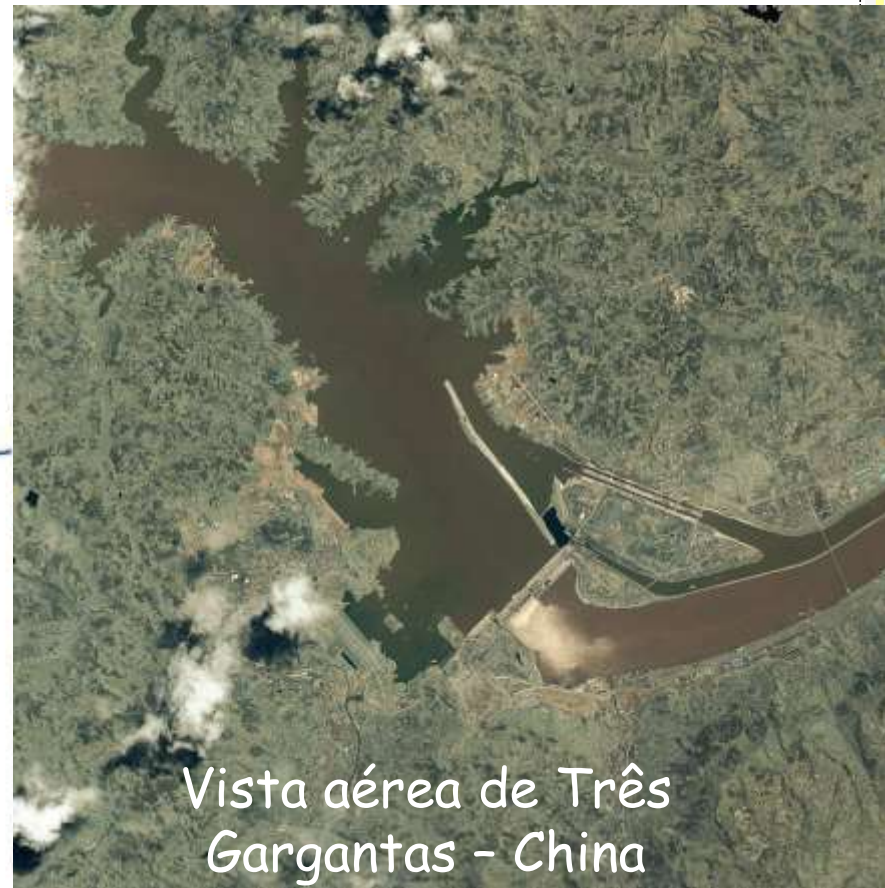
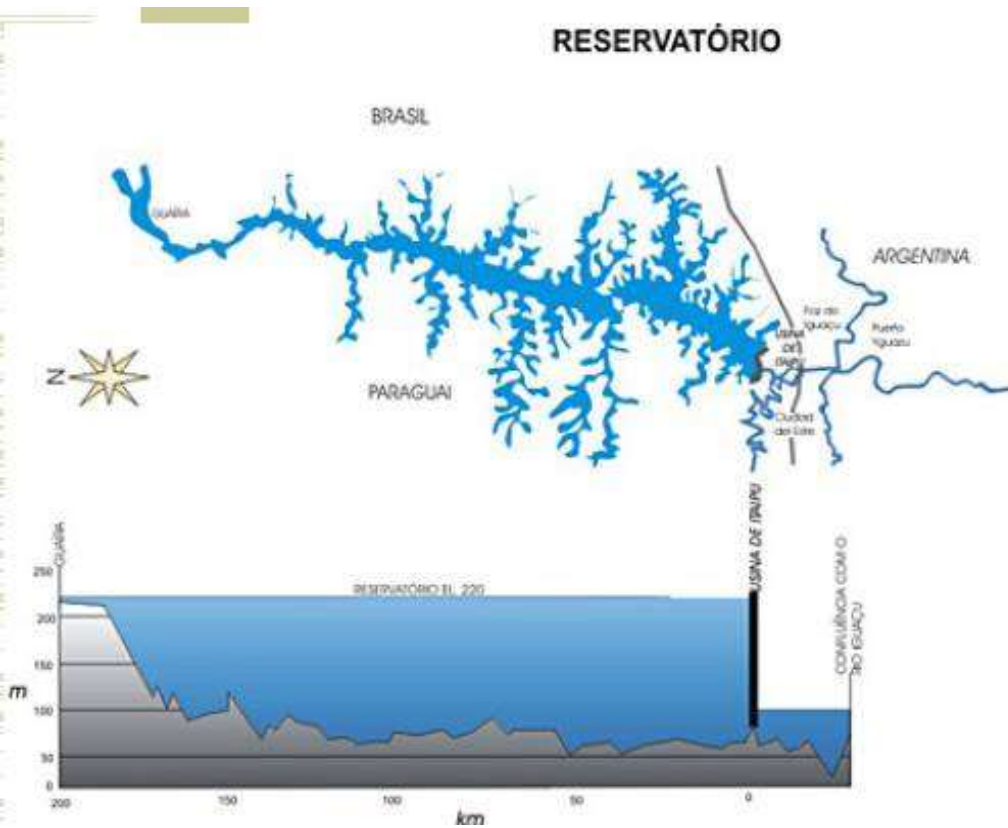


Queda de 89,23 m, vazão de projeto  $6,75 \text{ m}^3/\text{s}$   
turbinas Francis de 3 640 kW e 1 740 kW

# Tipos de centrais hidrelétricas

Quanto ao uso das vazões naturais

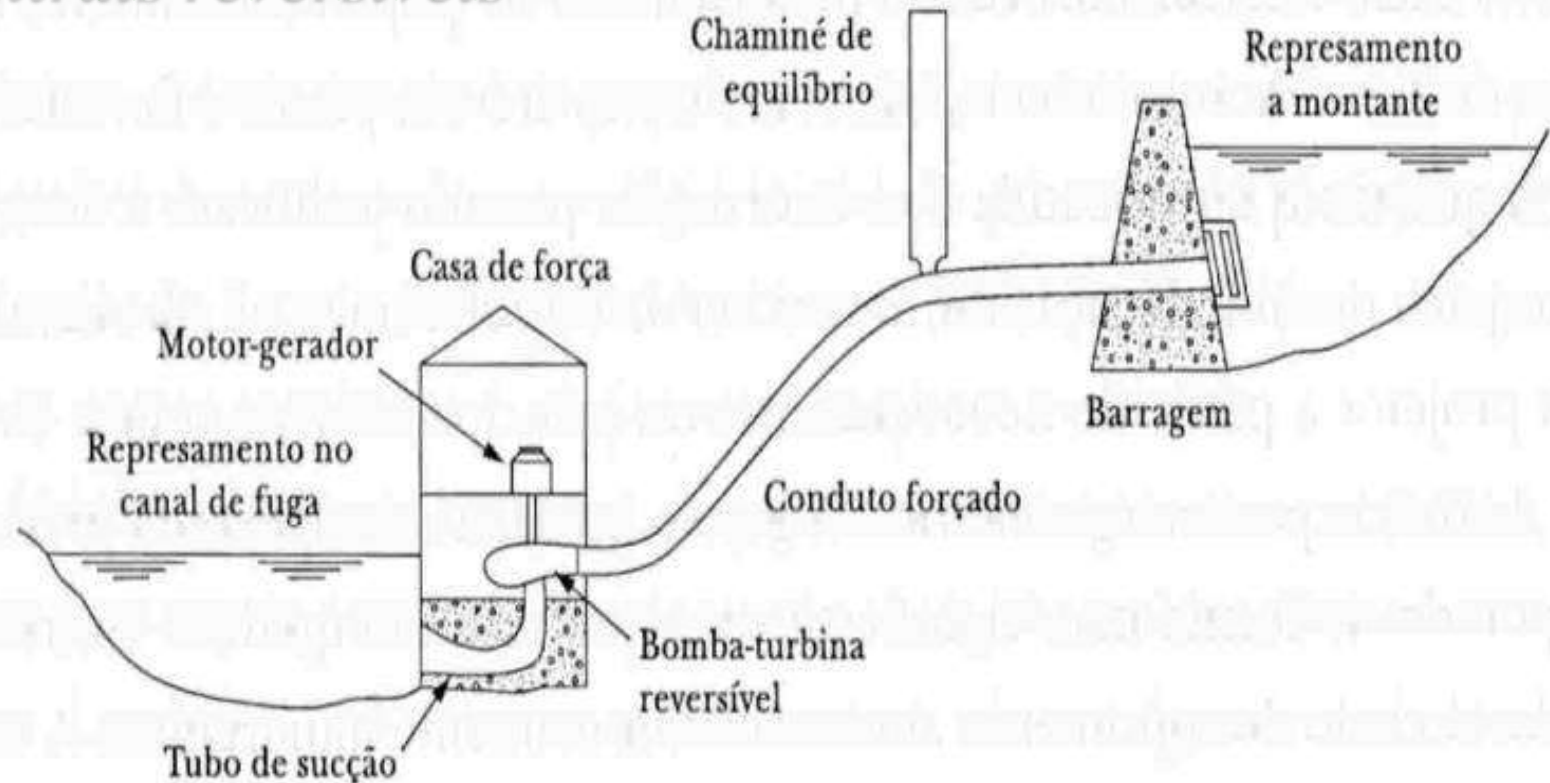
## 2- Centrais de acumulação



# Tipos de centrais hidrelétricas

## Quanto ao uso das vazões naturais

### 3- Centrais reversíveis



# Centrais Hidrelétricas - Reversíveis

24



Espanha

13.836MW +-  
3.460MW

Iberdrola: 650  
p/ 852MW em  
2012

+ 3 plantas de  
1640MW -para  
armazenar  
energia Eólica



# □ Tipos de centrais hidrelétricas

## □ Quanto à potência

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

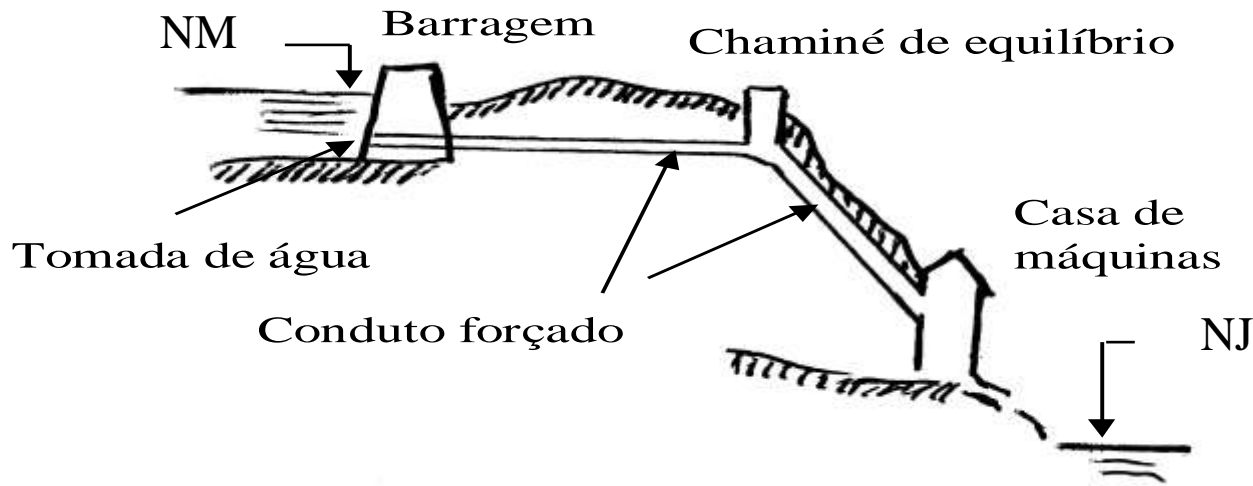
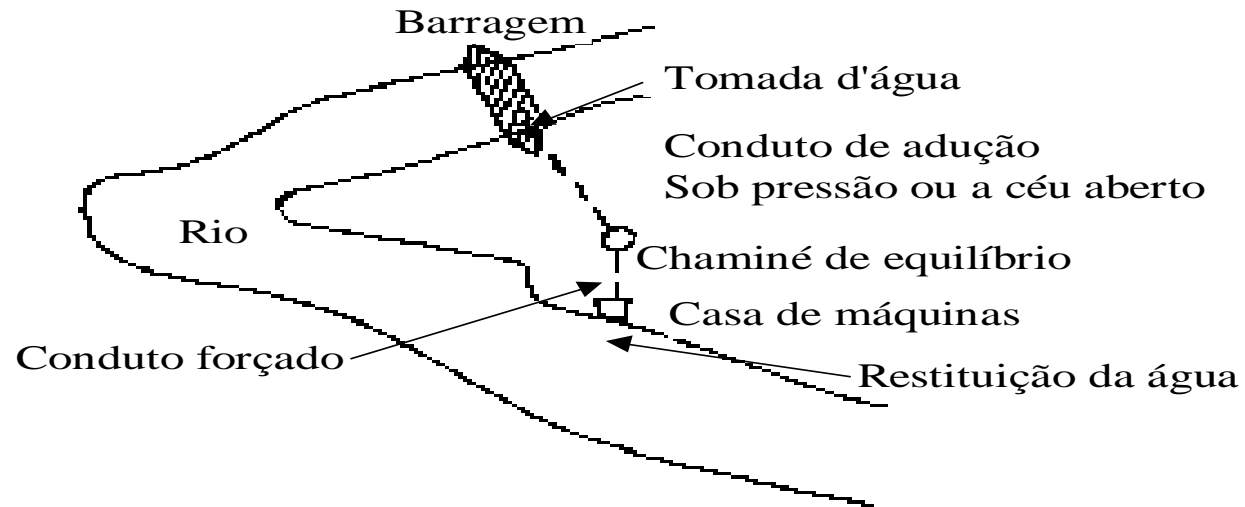
## □ Quanto à altura de queda d'água

- ◆ baixíssima  $H < 10 \text{ metros}$
- ◆ baixa  $10 < H < 50 \text{ metros}$
- ◆ média  $50 < H < 250 \text{ metros}$
- ◆ alta  $H > 250 \text{ metros}$

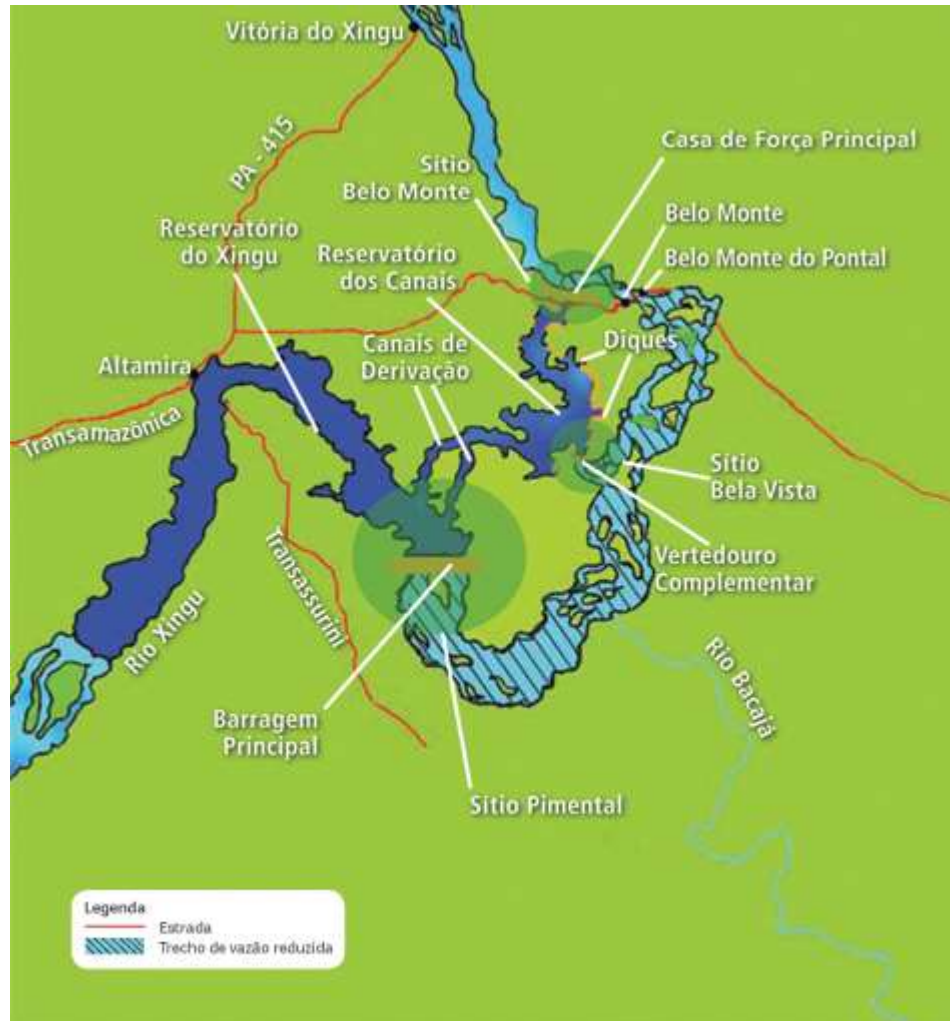
## □ Quanto à forma de captação de água

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

# Central Hidrelétrica em Desvio

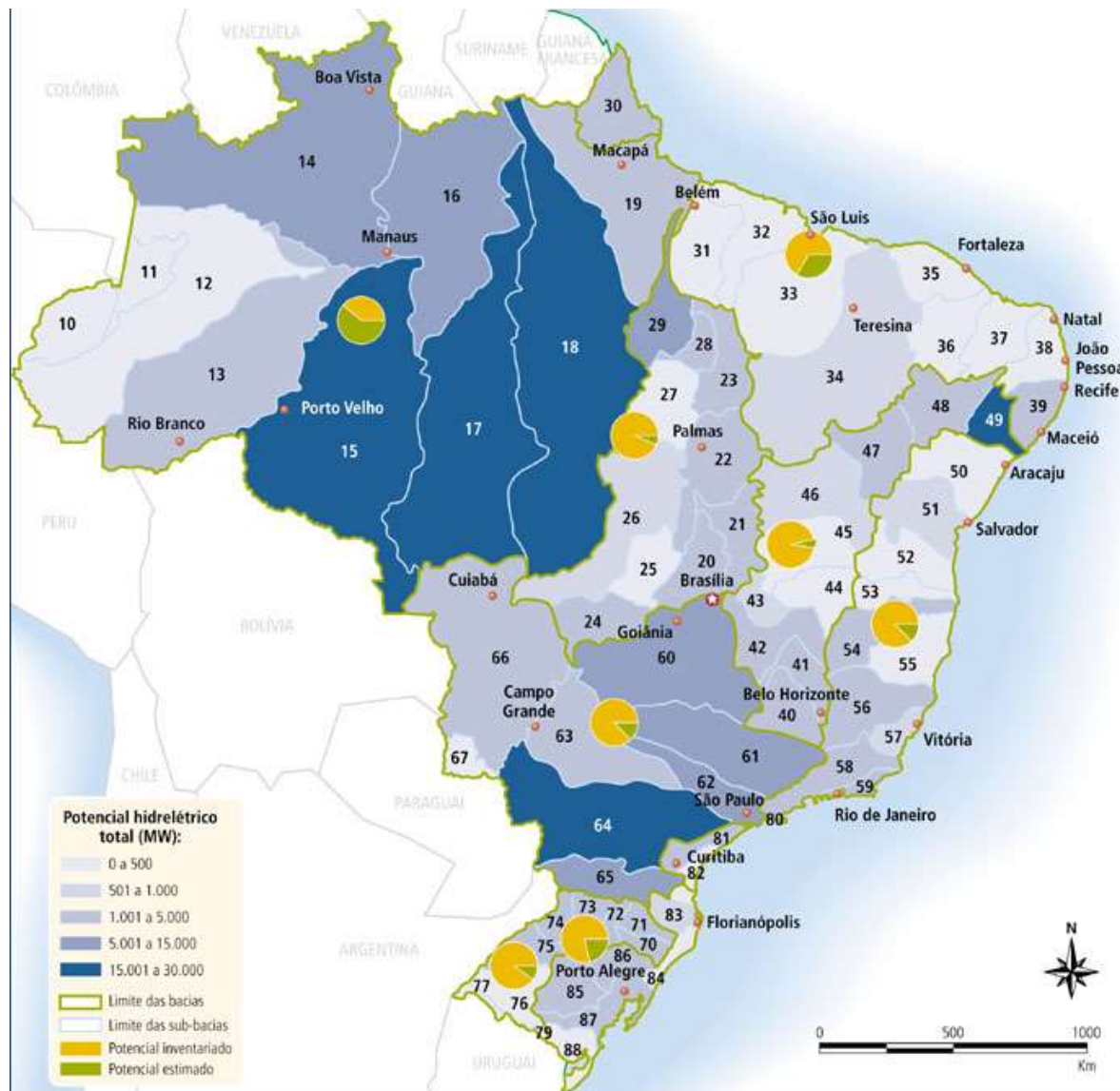


# Central Hidrelétrica em Desvio - Belo Monte



# Energia Hidráulica no Brasil

## Potencial Hidráulico Brasileiro - 2012



Fonte: EPE



# Usinas Hidrelétricas no Brasil

## As 15 Maiores UHE Brasileiras

| Nome                            | Potência (MW) | Rio           | UF    |
|---------------------------------|---------------|---------------|-------|
| Belo Monte (em construção)      | 11.233        | Xingú         | PA    |
| São Luiz do Tapajós (projetada) | 8.381         | Tapajós       | PA    |
| Tucuruí                         | 8.370         | Tocantins     | PA    |
| Itaipú (parte brasileira)       | 7.000         | Iguaçu        | PR    |
| Jirau (em construção)           | 3.750         | Madeira       | RO    |
| Ilha Solteira                   | 3.444         | Paraná        | SP    |
| Xingó                           | 3.162         | São Francisco | AL/SE |
| Santo Antônio (em construção)   | 3.150         | Madeira       | RO    |
| Foz do Areia                    | 2.511         | Iguaçu        | PR    |
| Paulo Afonso                    | 2.462         | São Francisco | BA    |
| Itumbiara                       | 2.280         | Paranaíba     | GO/MG |
| São Simão                       | 1.710         | Paranaíba     | GO/MG |
| Jupia                           | 1.551         | Paraná        | SP    |
| Porto Primavera                 | 1.540         | Paraná        | SP    |
| Itaparica                       | 1.480         | São Francisco | BA    |

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

**Total de UHEs em operação = 196**

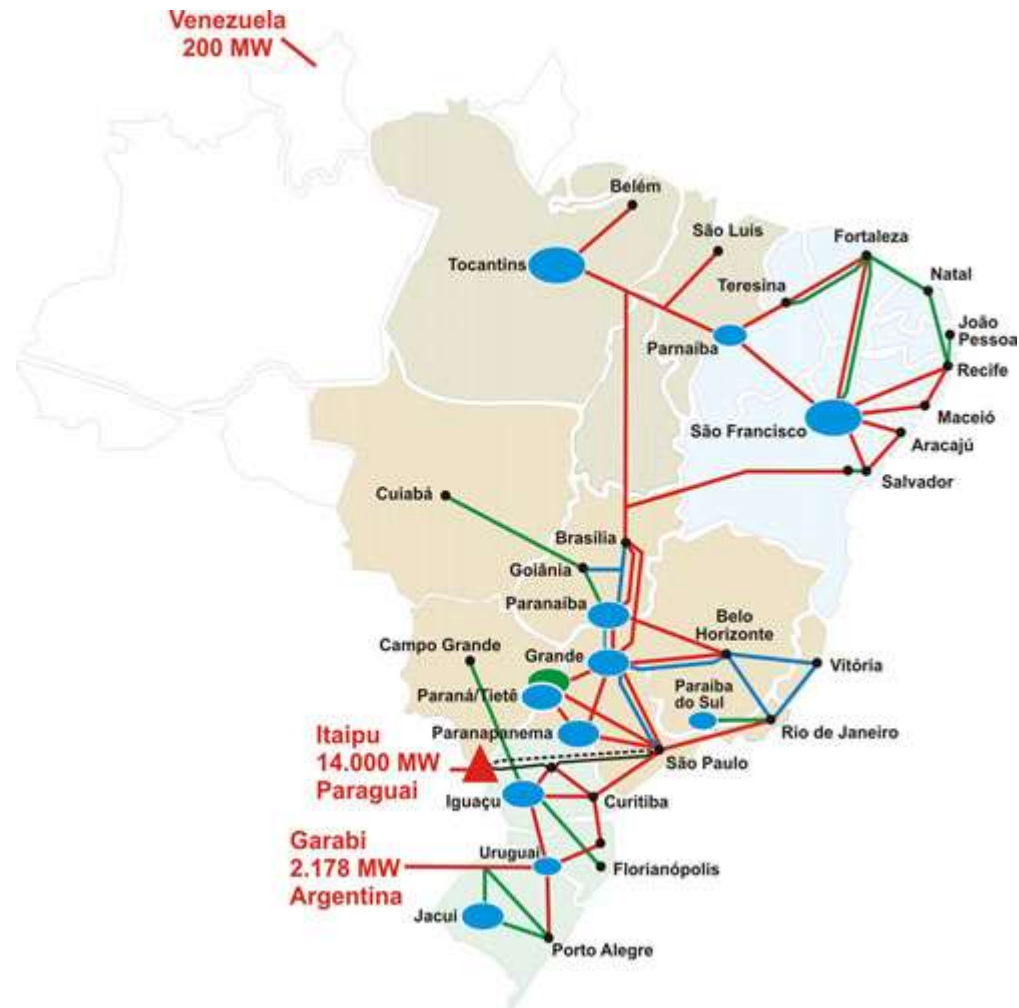
**Capacidade instalada em UHE: 81,23 GW**

**Total de PCHs em operação : 461**

**Capacidade instalada em PCHs: 4,60 GW**



# Sistema Interligado Nacional



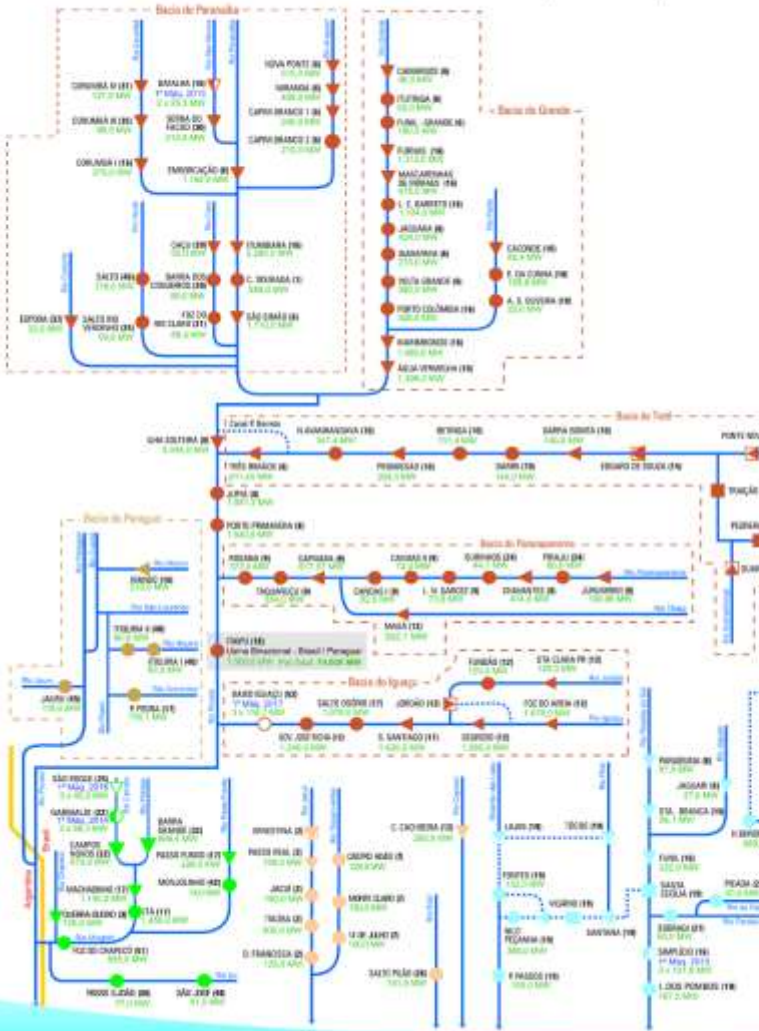
# Usinas Hidrelétricas no Brasil



## Diagrama Esquemático das Usinas Hidroelétricas do SIN

Usinas Hidroelétricas Despachadas pelo DNS na Otimização da Operação Eletroenergética do Sistema Interligado Nacional

Horizonte: 2013 - 2017



**Agentes**

|                   |                       |                          |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| CDSEA - 1         | GERALDO - 30          | Aguaí - 39               |
| CESE - 2          | Foz do Rio Claro - 21 | Aracaju - 49             |
| CEC - 3           | ITP - 23              | J. Maluf - 81            |
| CELPA - 4         | Raposo - 23           | Maricá - 63              |
| CEEC - 5          | COB - 24              | Palmeira - 43            |
| CEBRG - 6         | Diamante - 25         | Pará - 44                |
| CERRAN - 7        | CECAP - 36            | Queiroz Galvão - 45      |
| CEOP - 8          | Vol. Energia - 27     | Rio Verde - 44           |
| ELUNE - 9         | Wassong - 29          | São Valentim - 47        |
| AGS, TAP - 10     | Paulo Estrela - 38    | Tocantins - 46           |
| CHESP - 11        | DEASP - 38            | Votucaia - 46            |
| COPT - 12         | Corumbá IV - 21       | Alpina - 50              |
| Electron - 13     | SDFE - 22             | Foz do Chapecó - 51      |
| EMAE - 14         | CVRD - 32             | NE Energia - 52          |
| Enargem - 15      | Estrela - 44          | Santa Antônia - 53       |
| Furios - 16       | Corumbá II - 25       | Energia Sustentável - 54 |
| Trabalho - 17     | Aguaí de Paulo - 26   | Eletragem - 56           |
| Bacia Itaipu - 18 | CELGT - 37            | América Energia - 56     |
| Logis - 19        | Imbituba - 35         | Amepá - 57               |

**Potência Instalada**

| 31 Dez | Normaliza(*) (MW) | Percentual do SIN (%) |
|--------|-------------------|-----------------------|
| 2012   | 78.521            | 72,2                  |
| 2013   | 79.937            | 68,7                  |
| 2014   | 84.600            | 67,4                  |
| 2015   | 88.893            | 67,9                  |
| 2016   | 92.123            | 68,3                  |
| 2017   | 96.358            | 68,4                  |



(\*) Valores equívocos a referência em função da avaliação do cronograma de expansão do sistema.



**Legenda**

- Usina com Reservatório
- Usina com Reservatório
- Usina a Fio d'Água
- Usina a Fio d'Água
- Usina em Construção
- Reservatório
- Usina de Bombeamento

**Legenda**

- Aproveitamentos Existentes
- com reservatório
- 35 a fio d'água
- 4 bombeamento
- Usinas Futuras em Construção
- com reservatório
- 12 a fio d'água

**161 aproveitamentos**

**Fontes das Informações**

- Agentes de Cessão associados ao DNS
- ANEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANE - Ministério de Minas e Energia
- EP - Empresa de Pesquisa Energética

OCEANO ATLÂNTICO

30 Jun 2013



# Utilização da Energia das Marés

## Energia das Marés

Origem no enchimento e esvaziamento alternados das baías e estuários.

Usinas reversíveis podem ser usadas para bombear a água do mar para a baía ou vice e versa dependendo do tipo de usina.



# Energia das Marés

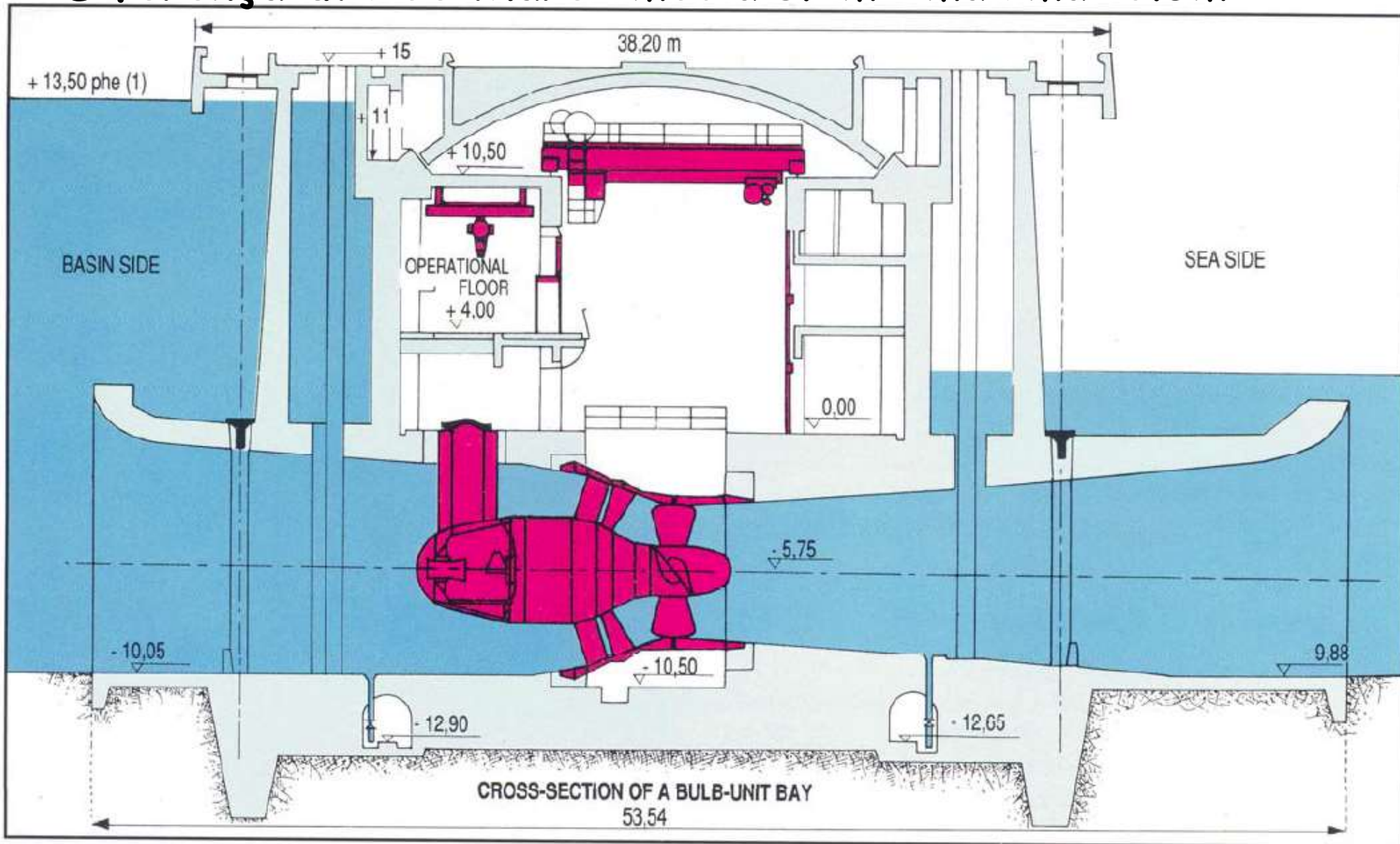
## Usina La Rance - França

740 m de comprimento,  
24 turbinas  
perfazendo 240MW;  
Concluída em 1967;  
480GWh/ano (FC=25%)



# Usina Maremotriz Usina La Rance - França

Diferença útil de Maré: média 8.2m - máxima 13.5m



# Impactos ambientais

## Usina Maremotriz Usina La Rance - França



**Especialistas ainda divergem quanto a problemas ambientais - Sedimentação**