

PEA - 3560 : Engenharia de Energia Hidroeletrica

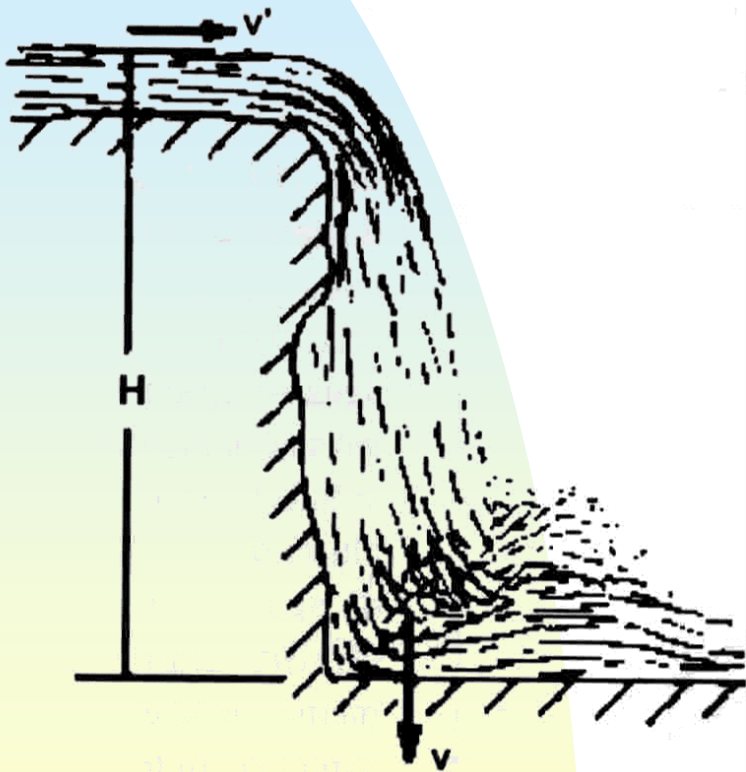


Classificação das fontes de energia elétrica

□ **Convencionais e não-convencionais
(alternativas)**

□ **Renováveis e não-renováveis**

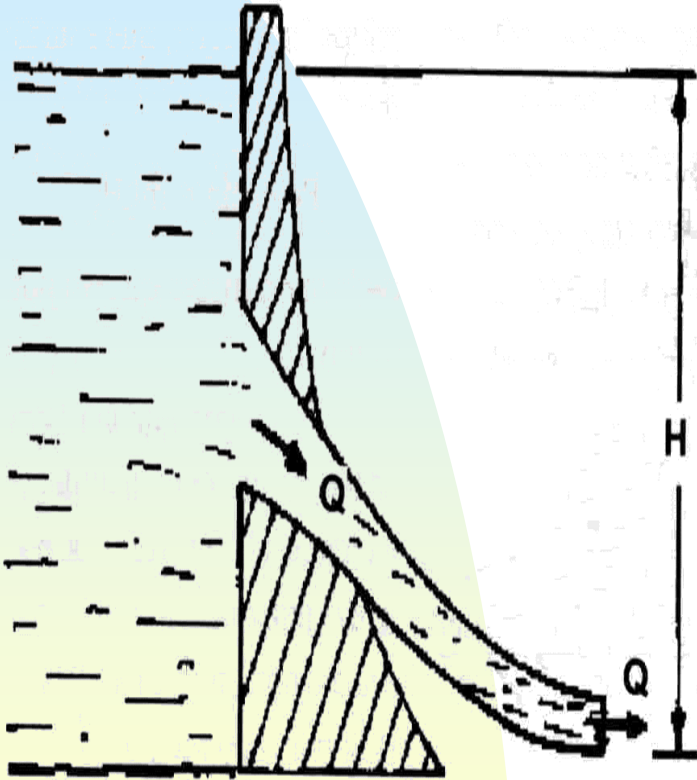
Princípio de Funcionamento



- Potência = $m.g.H_Q$
- m = massa que cai por seg
- g = aceleração da gravidade
- H_Q = queda bruta
- Se a água que cai, vem de um rio com velocidade v'
- $P = m.g.H + 1/2 m.v'^2$
- Obs: $1/2 m.v'^2$ em geral pode ser desprezada pois v' é muita pequena

Função de Produção

Usina de
Reservatório



$$E = m g H$$

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

$$m/\text{tempo} = \rho Q$$

$$E/\text{tempo} = P = g.H. m/\text{tempo} =$$

$$P = g H \rho Q$$

Onde : g = aceleração da gravidade - 9,81m/s² e $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$

$$\text{Potência} = 9,81 H Q \text{ (kW)}$$

sendo H - metros e Q - m³/s

$$Pg = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_H \cdot g \cdot \rho \cdot 10^{-3} \cdot Q \cdot h \text{ [kW]}$$

Hidrelétrica - Características

Rendimento ou eficiência: $\eta_{TOT} = \eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_g$ onde

η_H - Rendimento do sistema hidráulico

η_T - Rendimento da turbina

η_g - Rendimento do gerador

Valores típicos são: $0,76 \leq \eta_{TOT} \leq 0,87$ com $\eta_H \geq 0,96$
 $0,94 \geq \eta_T \geq 0,88$
 $0,97 \geq \eta_g \geq 0,90$

$$P = \eta_{TOT} \cdot g \cdot QH$$

$$E = P \times FC \times 8760 \text{ horas} \quad \text{onde}$$

E - Energia produzida no ano

FC - Fator de capacidade da usina

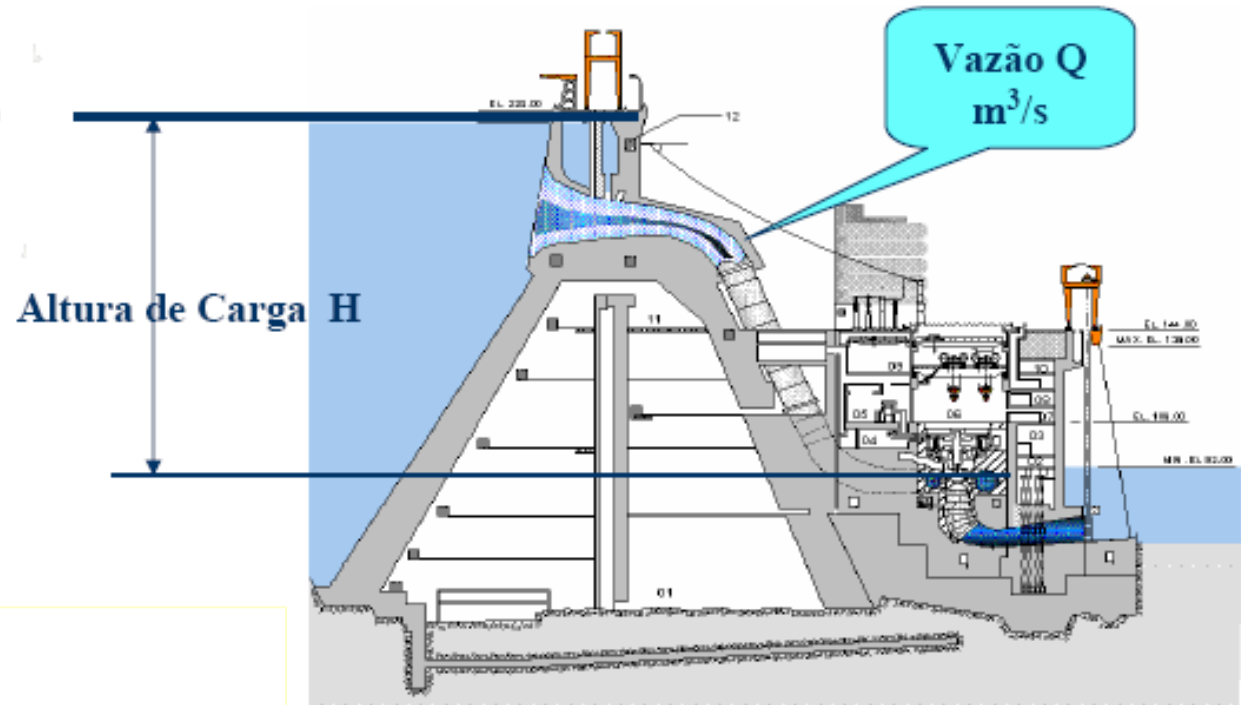
Então, a energia gerada depende:

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 10m ;
- Rendimento hidráulico de 95%
- Rendimento da turbina de 90%
- Rendimento do gerador elétrico de 95%

Energia gerada



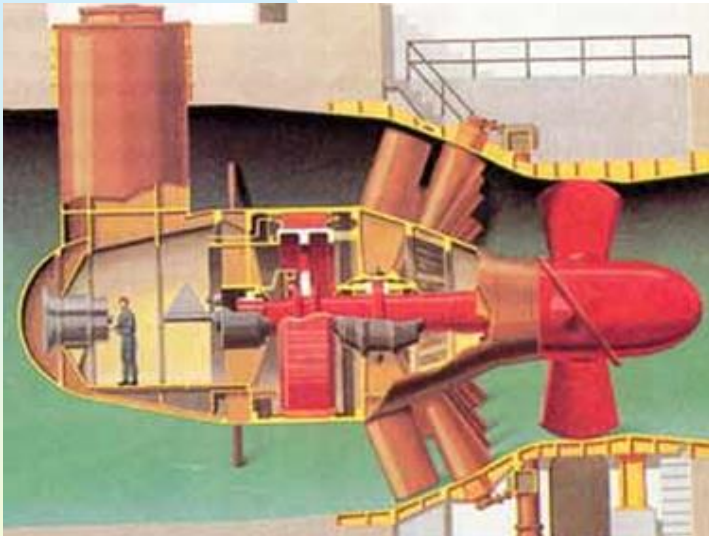
Energia diária

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

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

Função de Produção

Usina de Vazão



Q = volume de água que escoar por segundo através do tubo (vazão) (m^3/s)

$E = \frac{1}{2} m v^2$ logo

$P = E/\text{tempo} = \frac{1}{2} (m/\text{tempo}) v^2$

v = velocidade (m/s)

A = área (m^2) e ρ água = $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$

Se $m/\text{tempo} = \rho Q$ e $Q = v A$

$E/\text{tempo} = P(W) = \frac{1}{2} \rho Q v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$

$$P_g = \frac{1}{2} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot v^3 \text{ [kW]}$$

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

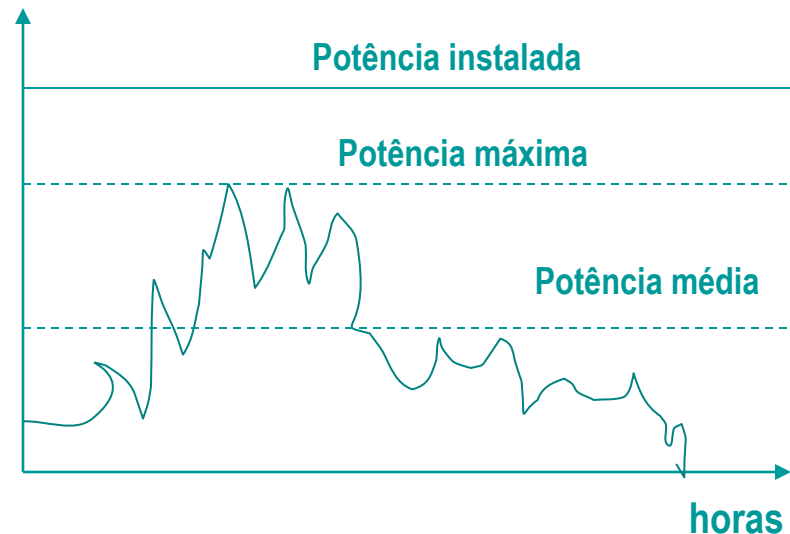
FC = energia efetivamente gerada

Máxima energia possível de ser gerada

= $P_{m\acute{e}dia} / P_{m\acute{a}xima}$

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

Curva diária de geração

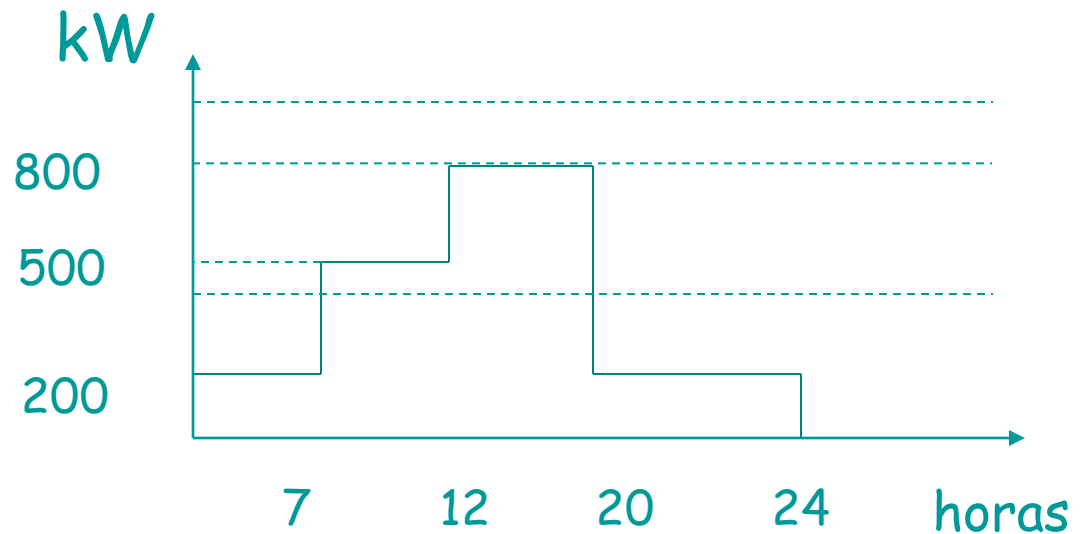


$$= \frac{\int_{i=0}^{i=24} P_{e_i} \times dt_i}{P_{max} \times 24 / dia}$$

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

• **Calcule:**

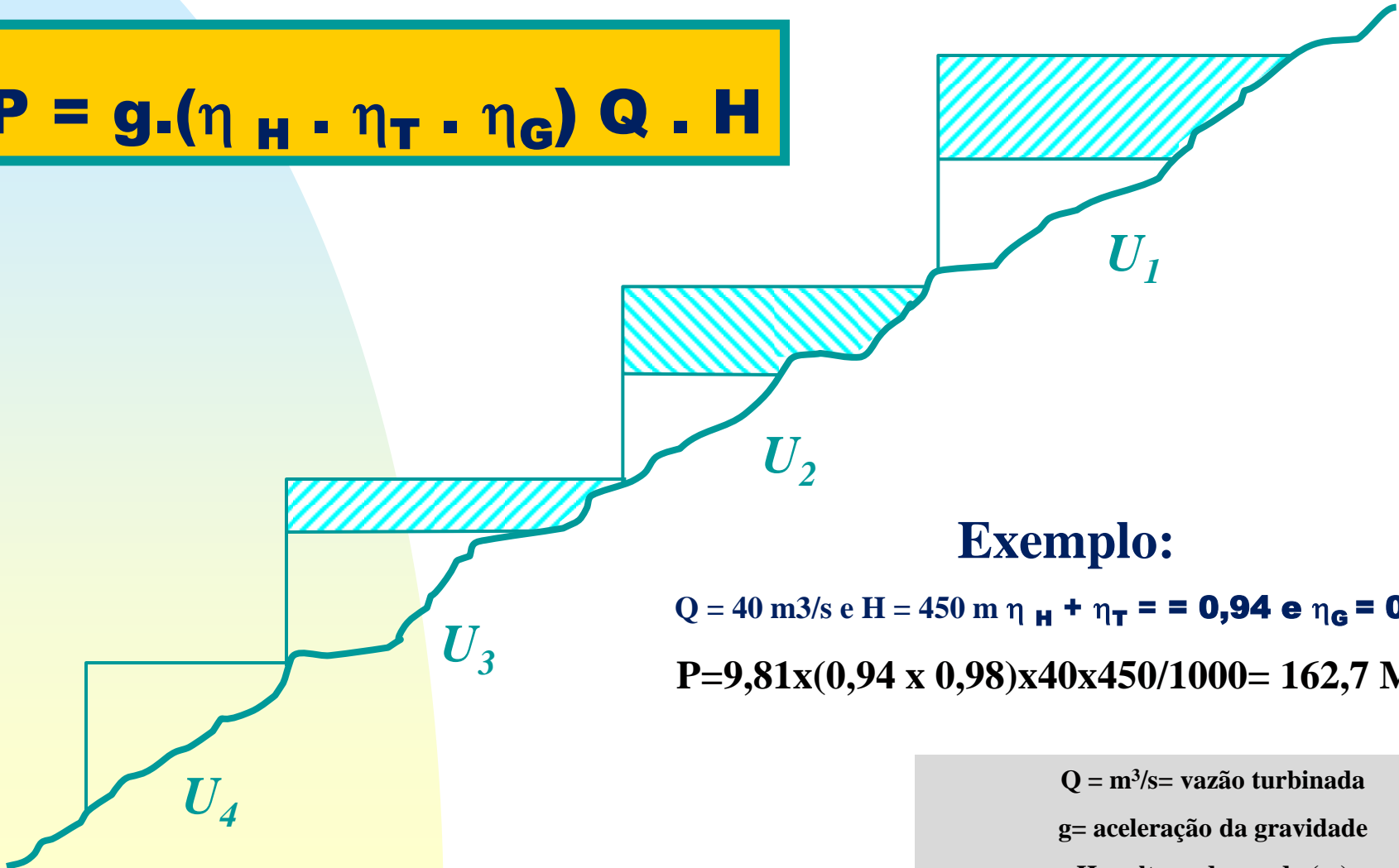
- Potência instalada
- Potência máxima
- Potência média
- Fator de capacidade diário



- Qual a diferença entre capacidade ou potência instalada e potência máxima ?
capacidade ou potência instalada = 1 MW
potência máxima = 800 kW
- A potência máxima instantânea pode ser igual à potência ou capacidade instalada? Quando isto acontece?
Sim, quando ela gerar a potencia instalada

Prioridades de Enchimento e Deplecionamento

$$P = g \cdot (\eta_H \cdot \eta_T \cdot \eta_G) \cdot Q \cdot H$$



Exemplo:

$Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ e $H = 450 \text{ m}$ $\eta_H + \eta_T = \mathbf{0,94}$ e $\eta_G = \mathbf{0,98}$

$P = 9,81 \times (0,94 \times 0,98) \times 40 \times 450 / 1000 = 162,7 \text{ MW}$

$Q = \text{m}^3/\text{s} =$ vazão turbinada
 $g =$ aceleração da gravidade
 $H =$ altura de queda (m)

Energia Firme

- Do sistema: é o maior valor de energia suprida pelo sistema continuamente, considerando constantes as características do mercado, sem a ocorrência de déficits.

PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A produção de energia elétrica, dependerá, dentre outros fatores, da vazão de água efetivamente usada para produzir a energia mecânica que acionará o gerador elétrico

Esta vazão recebe o nome de **vazão turbinável** (ou turbinada), pois deverá acionar a turbina que transmitirá energia ao gerador

O valor dessa vazão turbinável e suas características ao longo do tempo estarão relacionadas com o tipo de aproveitamento (fio d'água ou com reservatório), com sua regularização e com o tipo de uso que se fará da vazão regularizada

Sistema Elétrico Brasileiro - Estrutura Regional



Sistema Interligado Nacional

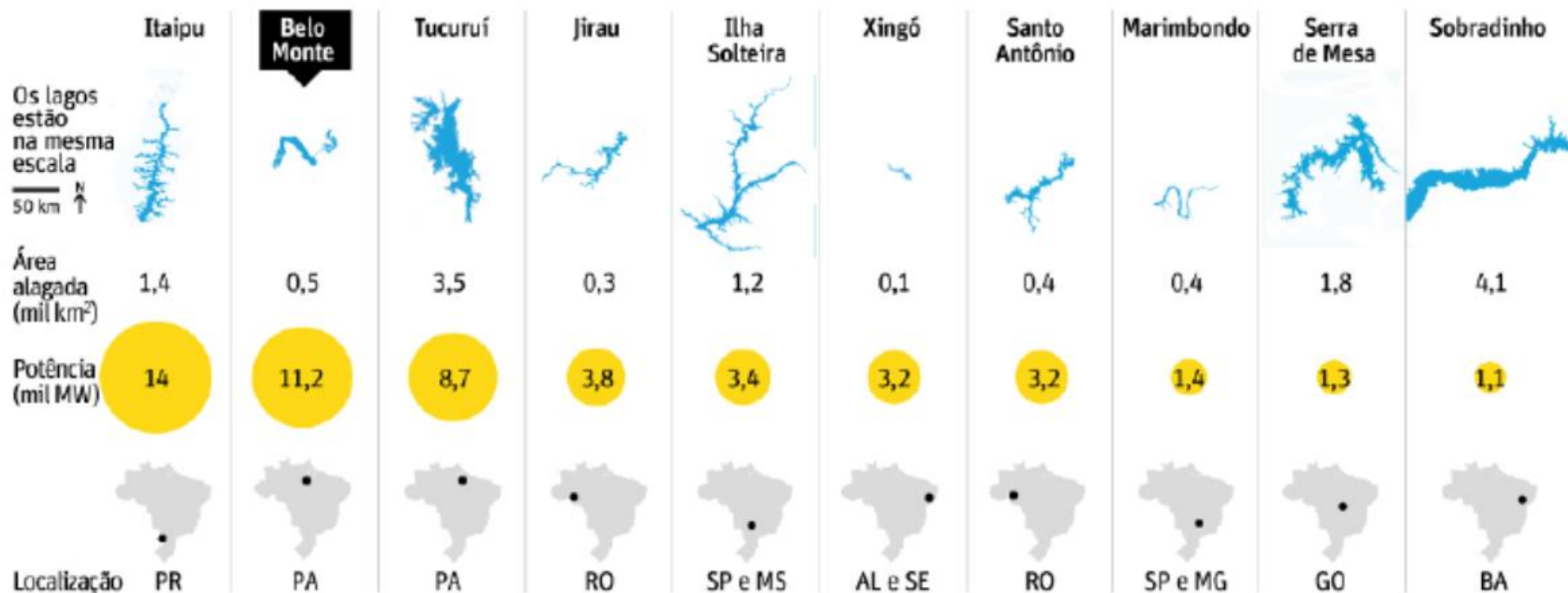
- 4 grandes Subsistemas Interligados
- 110.000 MW de capacidade instalada, com cerca de 100 usinas com mais de 30 MW (além de quase toda parcela paraguaia de Itaipú)
- ~ 82 % hidrelétrico
- 43 grandes reservatórios em 12 Bacias Hidrográficas
- Produção superior a 482.000 GWh ano (55.0 GWm)
- Demanda Máxima de quase 80.000 MW
- 70.000 km de linhas de transmissão (230 kV e acima)
- Faturamento anual estimado em mais de 30 bilhões de Reais
- 55 % do mercado da América do Sul

em dez anos

- praticamente dobra capacidade instalada
- triplica participação térmica
- forte integração dos subsistemas - interligações entre regiões e bacias
- novas interligações internacionais

RANKING DA EFICIÊNCIA

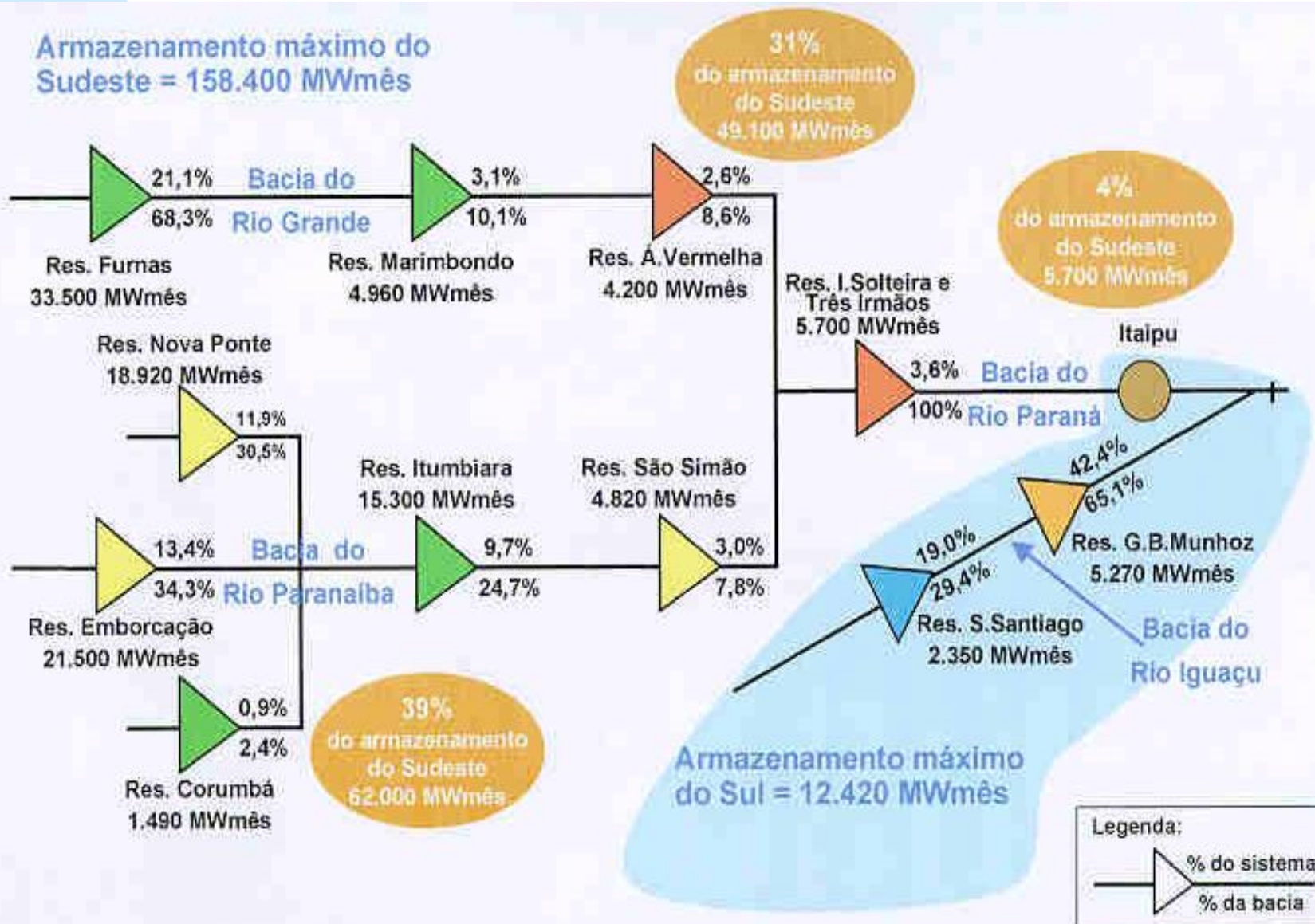
Compare a energia e o alagamento das dez maiores usinas do Brasil



Fonte: Aneel, Furnas, Eletronorte, Itaipu Binacional, Chesf, Norte Energia, Energia Sustentável e Santo Antonio Energia

Subsistemas Sul / Sudeste - Energia Armazenada

Armazenamento máximo do Sudeste = 158.400 MWmês



Quadrilátero dos Grandes Reservatórios



Neste quadrilátero concentram-se as áreas de drenagem dos principais reservatórios do país



61%
da Capacidade
de Armazenamento
do País

Características dos Subsistemas



Hidrelétrica - Principais componentes

Barragens

Vertedouros



- Comporta
- Soleira Livre
- Tulipa
- Descarregador de Fundo

Bacia de Dissipação

Comportas

Stop logs

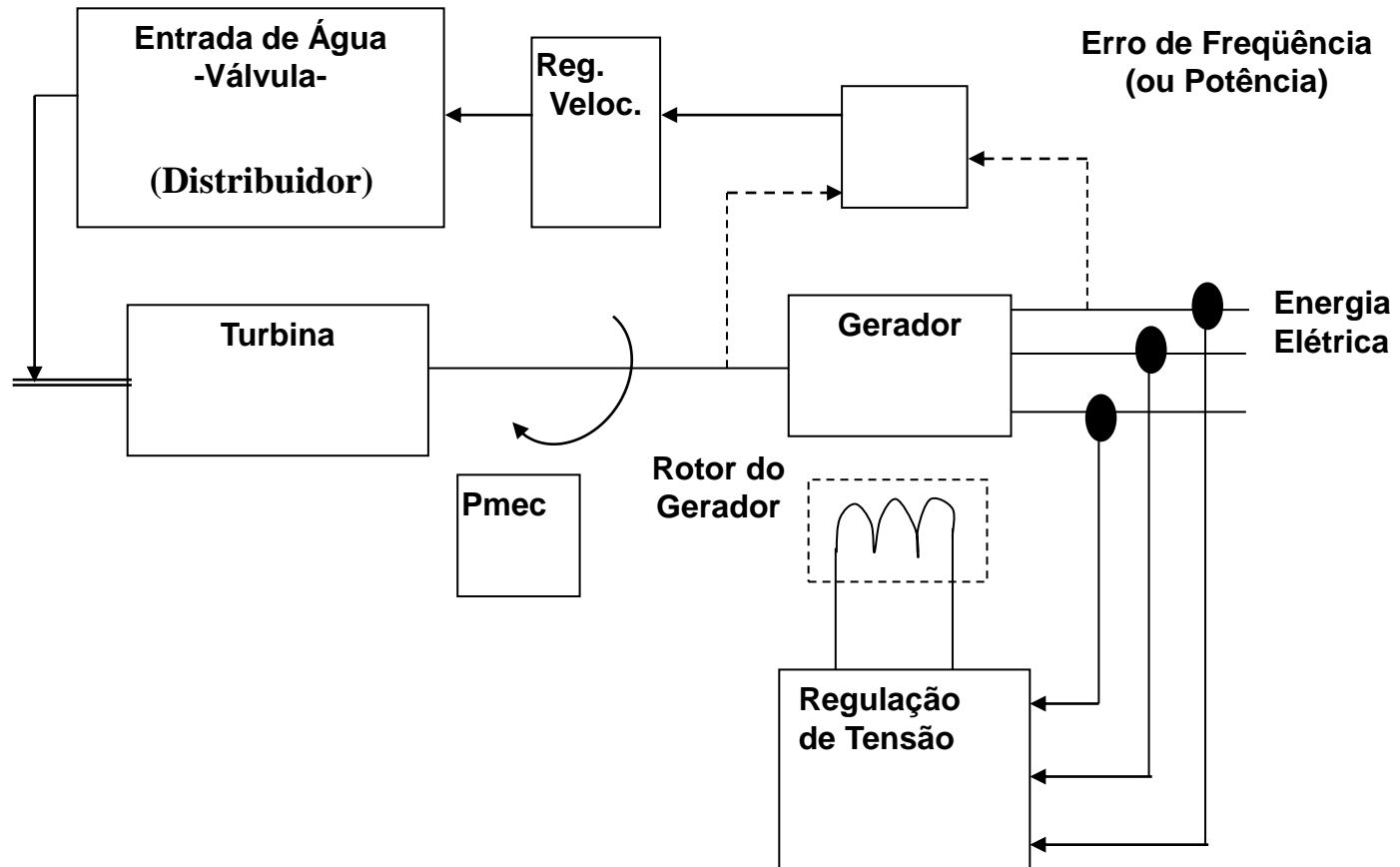
Conduitos Forçados

Tubos de Sucção

Chaminés de equilíbrio ou câmara de descarga

Casas de força

Diagrama Geral de uma Hidrelétrica



Hidrelétricas

Principais componentes

Barragens - represa

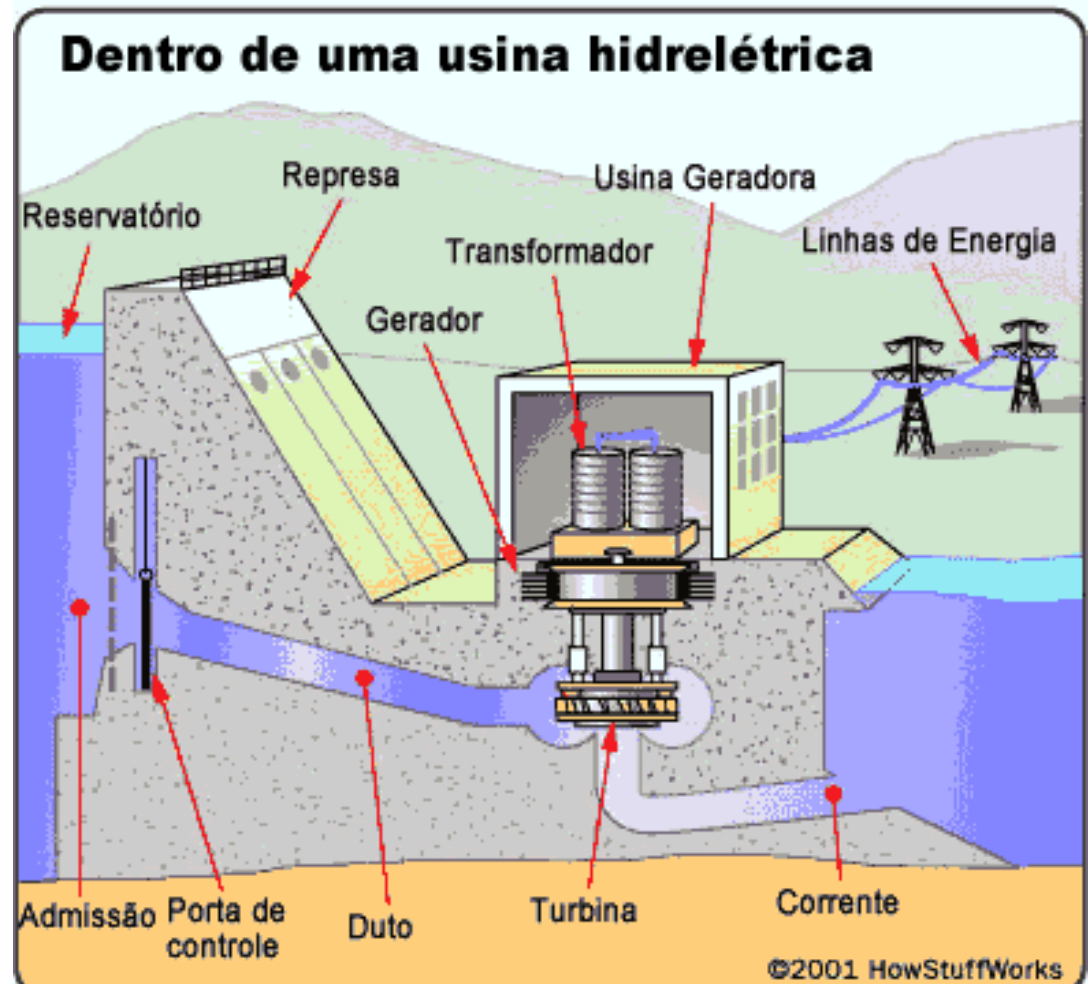
Vertedouro

□ Comportas – porta de controle

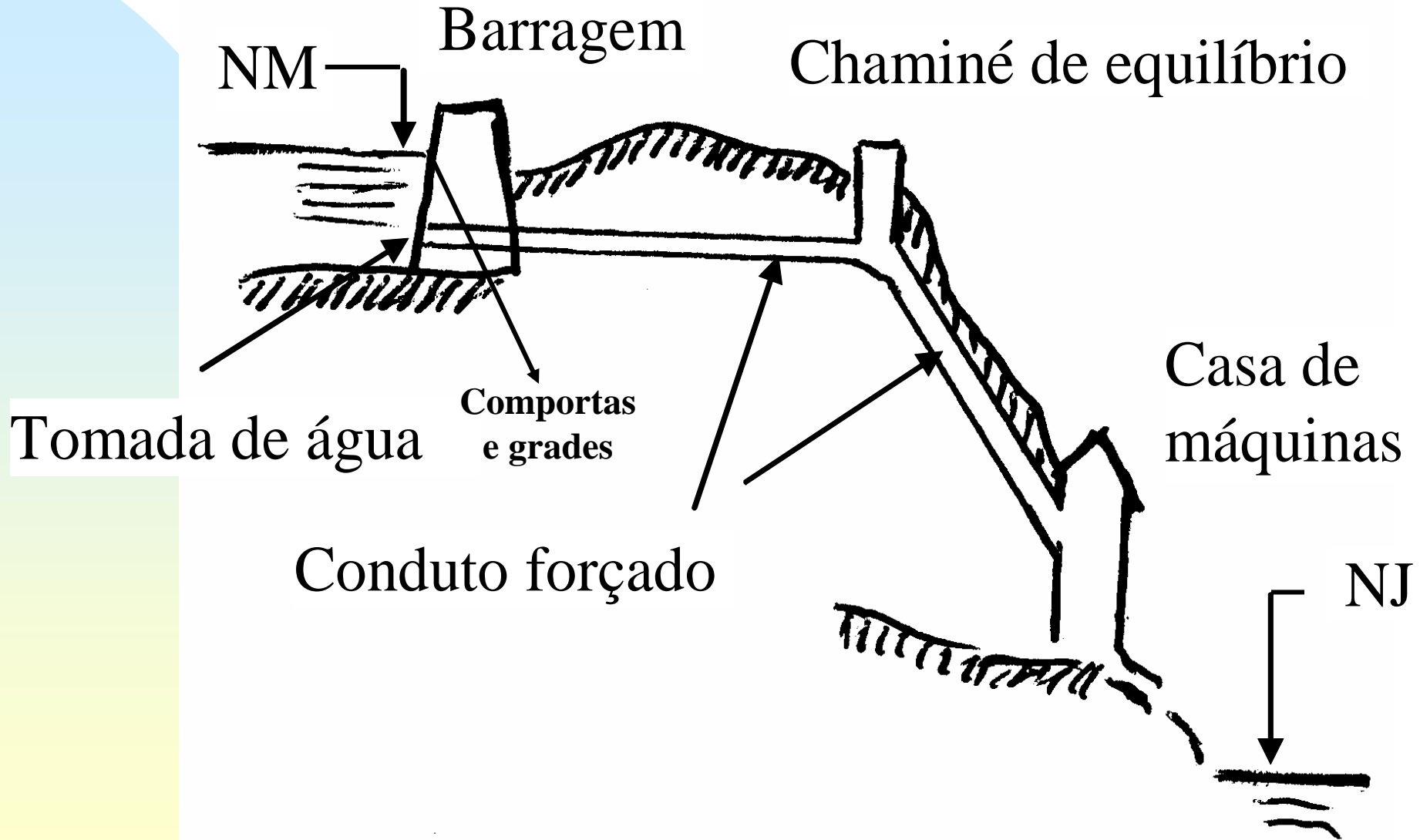
□ Conduitos (duto)

□ Chaminés de equilíbrio ou câmara de descarga

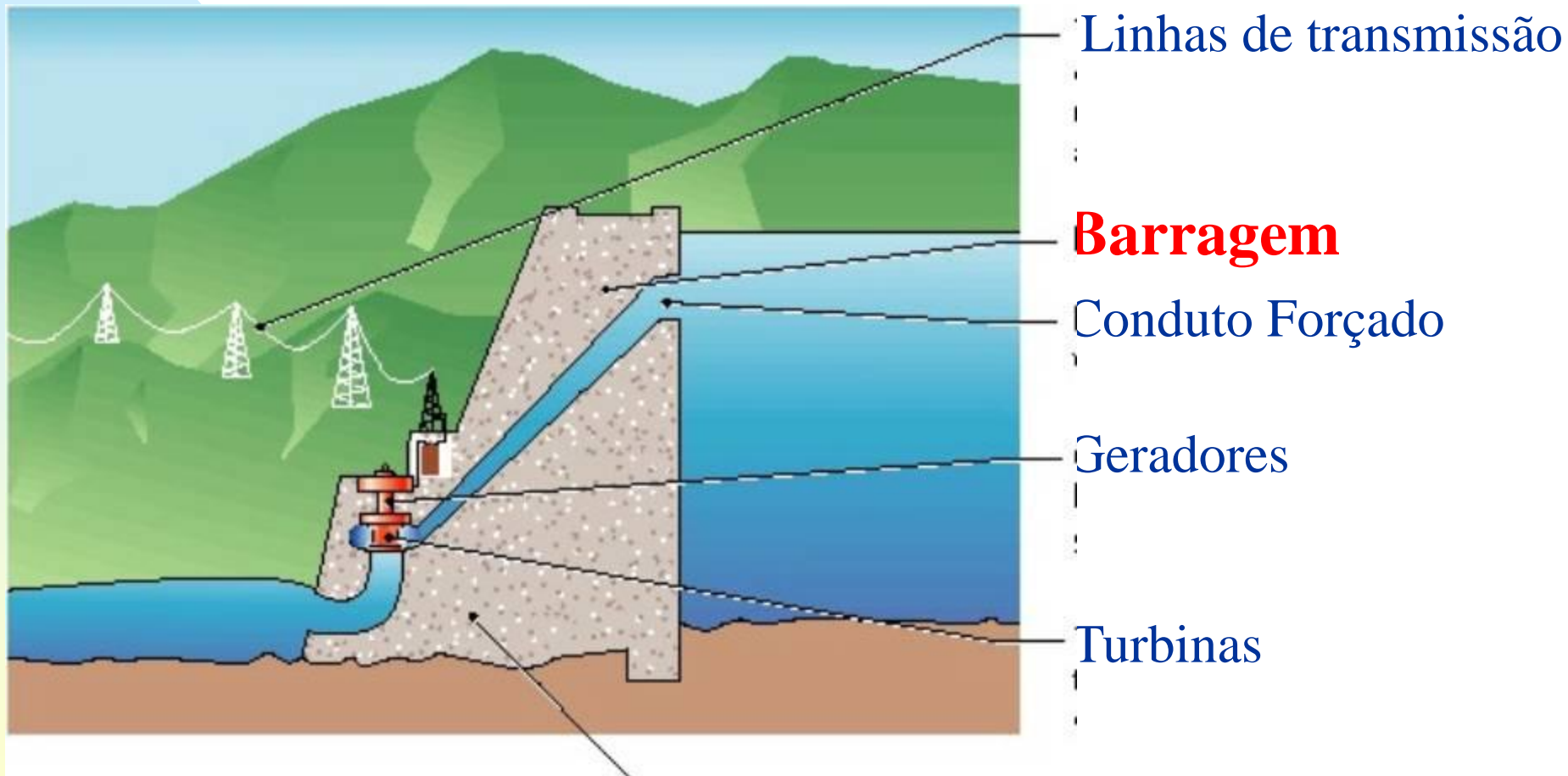
□ Casas de força : turbina, gerador, válvulas, e demais equipamentos do sistema elétrico



Principais Componentes



Usina Hidrelétrica



Seção Transversal de uma Usina Hidrelétrica Típica

Vista área da Usina de Itaipú



barragem

vertedouro

Potência Instalada

14000 MW

ou 14 GW

BARRAGEM DE TRÊS GARGANTAS - CHINA

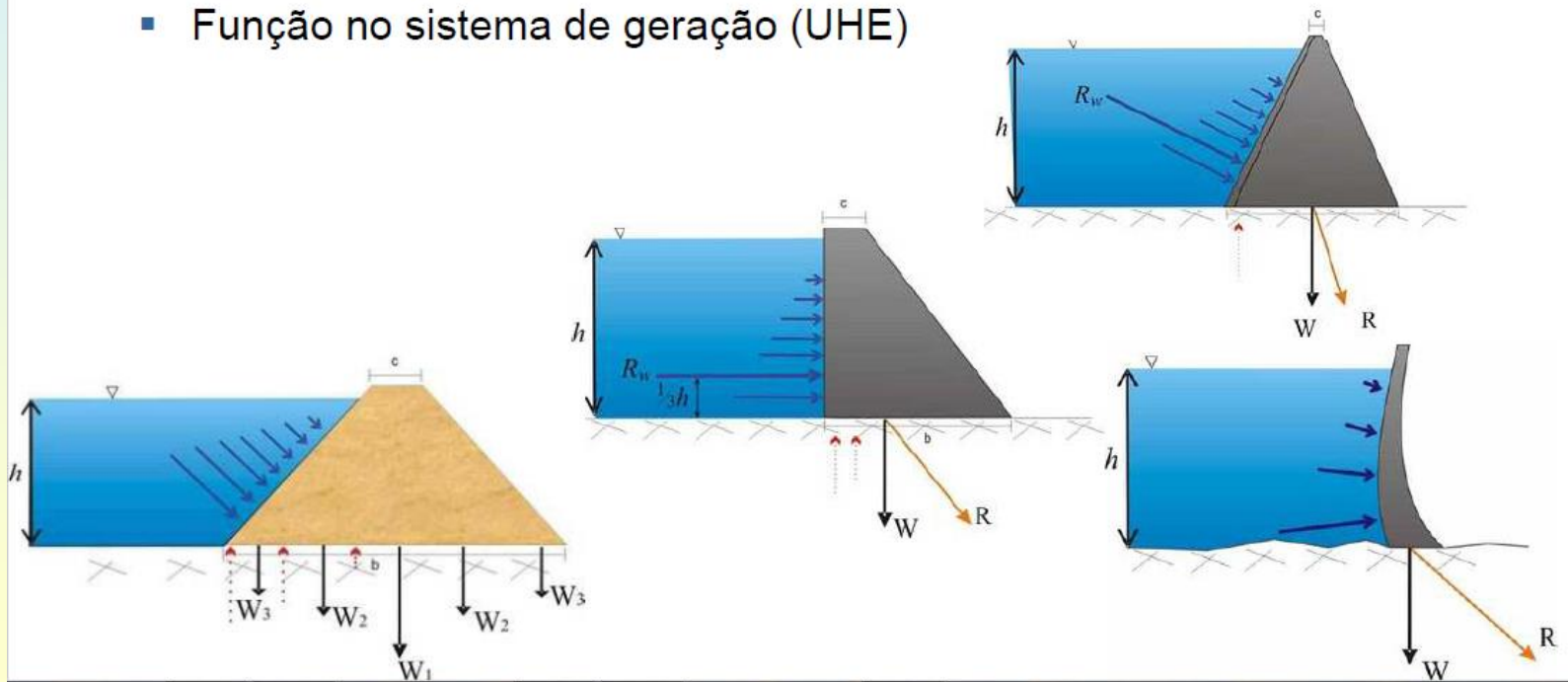


Finalidade:

- 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 cheias

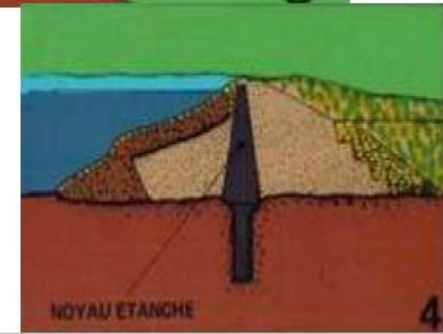
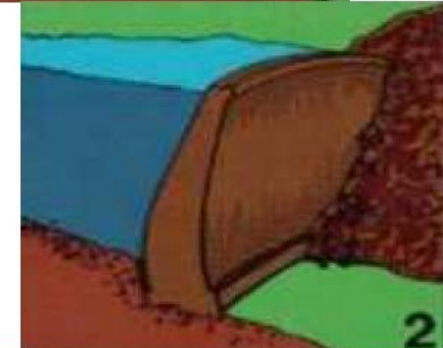
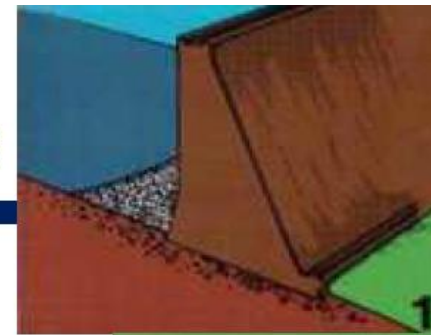
Classificação das Barragens e UHE

- A classificação das barragens pode ser feita em função dos seguintes **condicionantes**:
 - **Tipologia da estrutura de retenção**
(materiais e processos construtivos)
 - Função no sistema de geração (UHE)



Classificação quanto a Tipologia das estruturas

- Barragens de **Terra**
 - Solo compactado: homogêneas ou zonadas
- Barragens de **Enrocamento**
 - Núcleo argiloso; Núcleo asfáltico e Face de concreto
- Barragens de **Gravidade**
 - Alvenaria (antigas); concreto Massa e CCR
- Barragens de **Gravidade Aliviada**
- Barragens de **Contrafortes**
 - Lajes planas e muros em concreto armado
- Barragens em **Arco ou Abóbada**
 - Arco em concreto armado (compressão)
- Barragens **Mistas e Aterros hidráulicos**



- 1 – Barragem de Gravidade
- 2 – Barragem em arco
- 3 – Barragem de contra-fortes
- 4 – Barragem de terra

Componentes básicos de uma Central Hidrelétrica

- **Barragem de concreto**

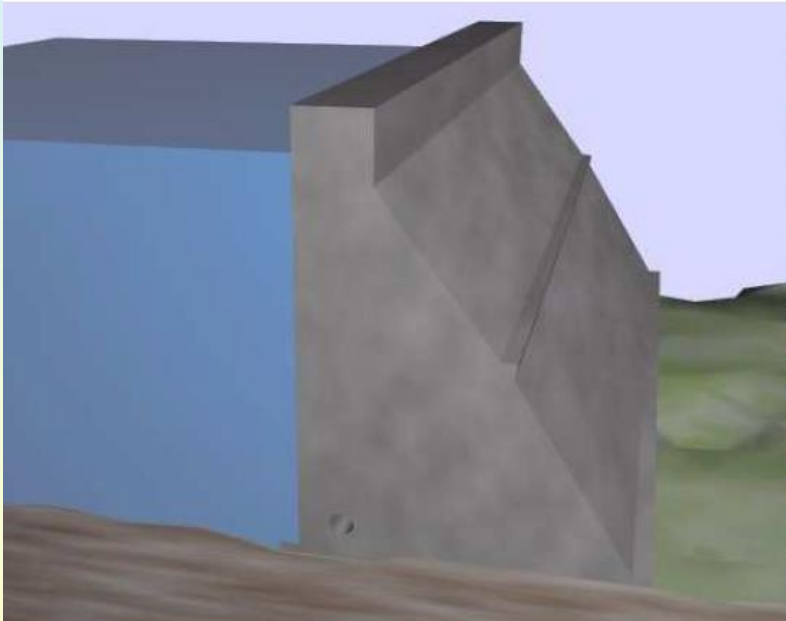
- **de gravidade** - constituídas por uma parede de concreto que resiste pelo próprio peso à impulsão da água e transmite as solicitações à fundação



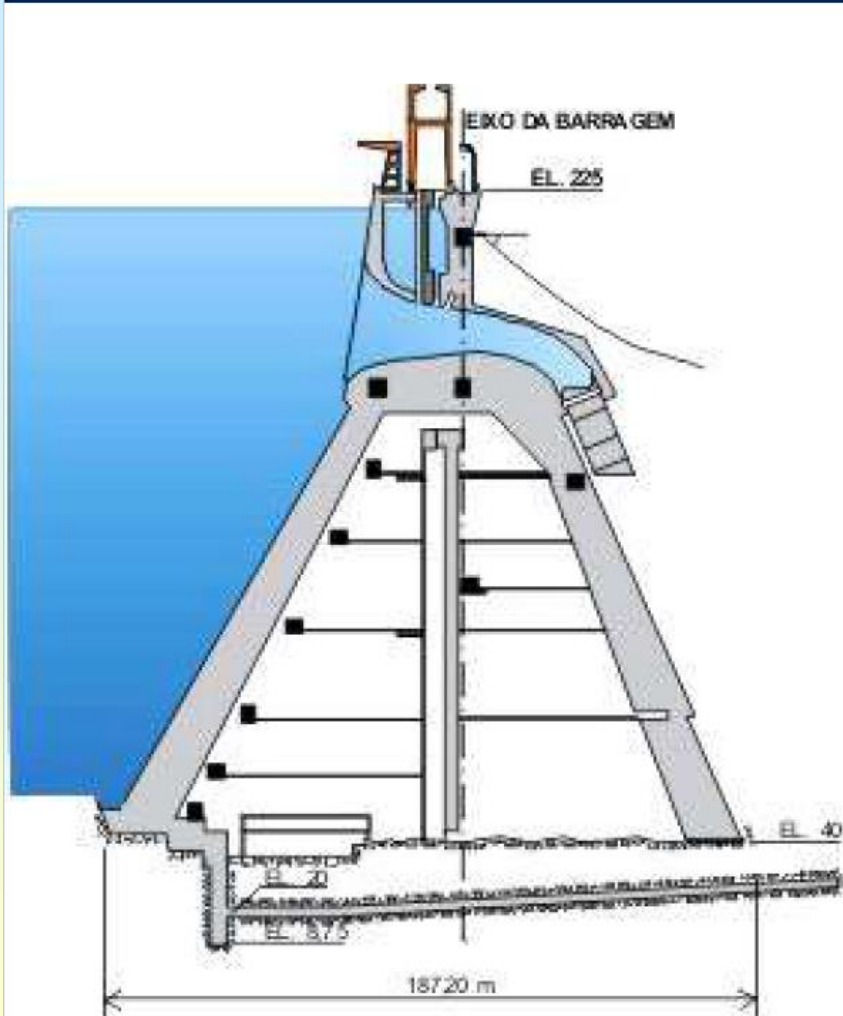
- **em arco ou em abóbada** – construídas em vales apertados, podendo ter altura maior que largura. Podem apresentar dupla curvatura, vertical e horizontal. Curvatura horizontal permite transmitir a força da impulsão da água para as margens.

Classificação das Barragens e UHE: Barragens de gravidade

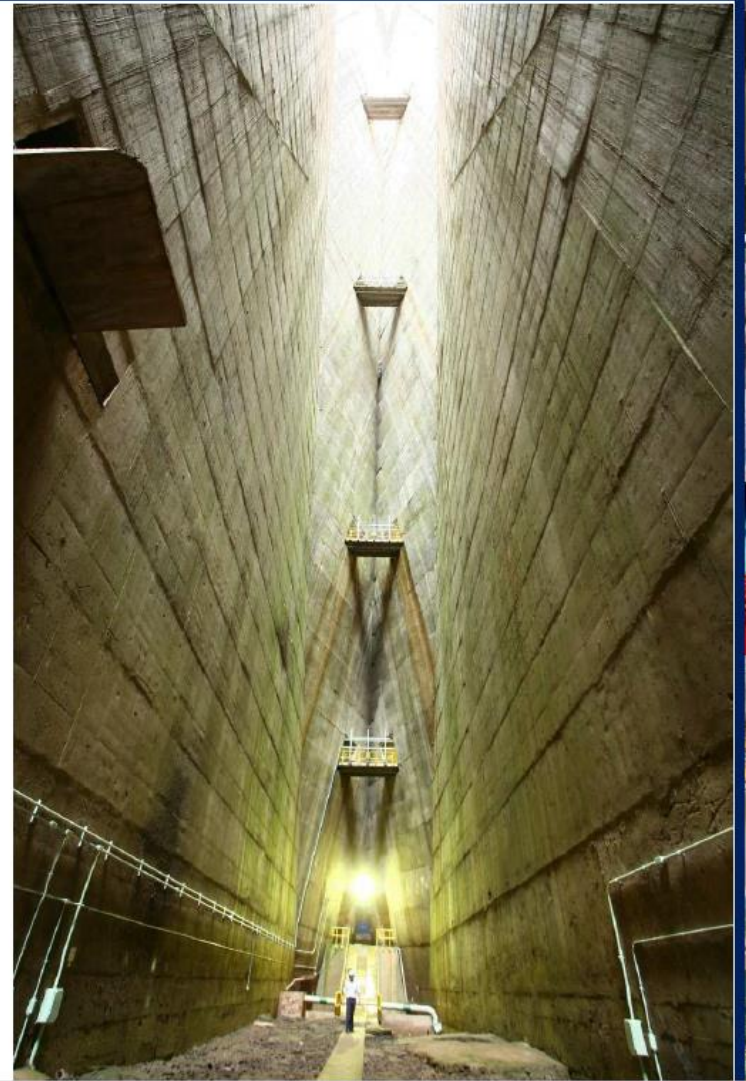
- Barragens de **gravidade** são aquelas cuja estabilidade é garantida principalmente pelos esforços de gravidade (**peso próprio**);



Classificação das Barragens e UHE: Barragem de gravidade aliviada



UHE Itaipu – PR, Rio Paraná (14.000 MW)

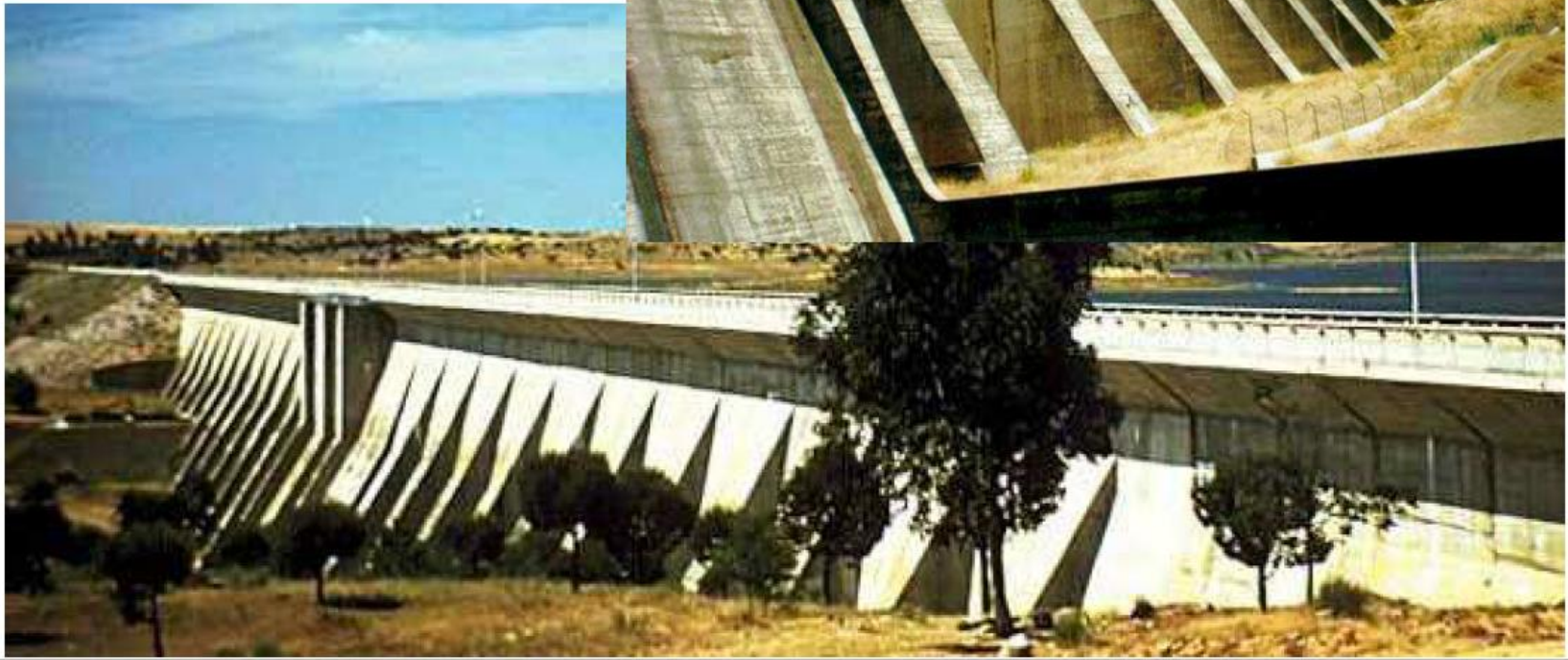
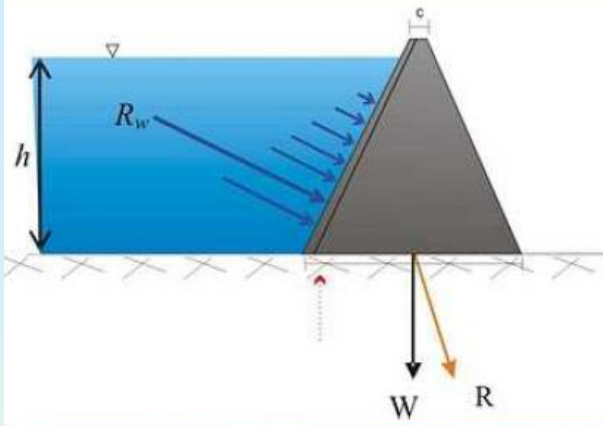


Classificação das Barragens e UHE: Barragens Mistas

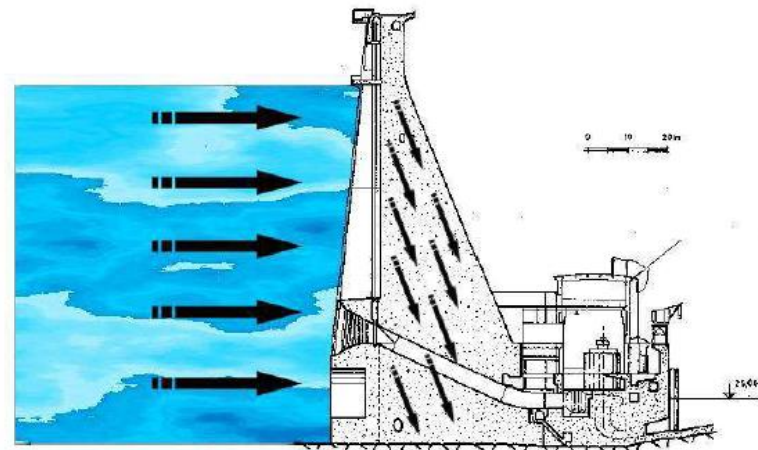
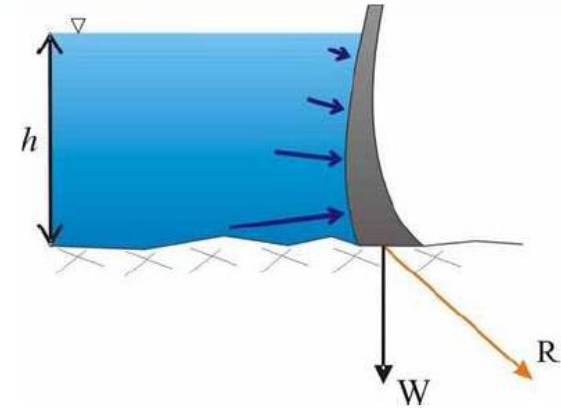
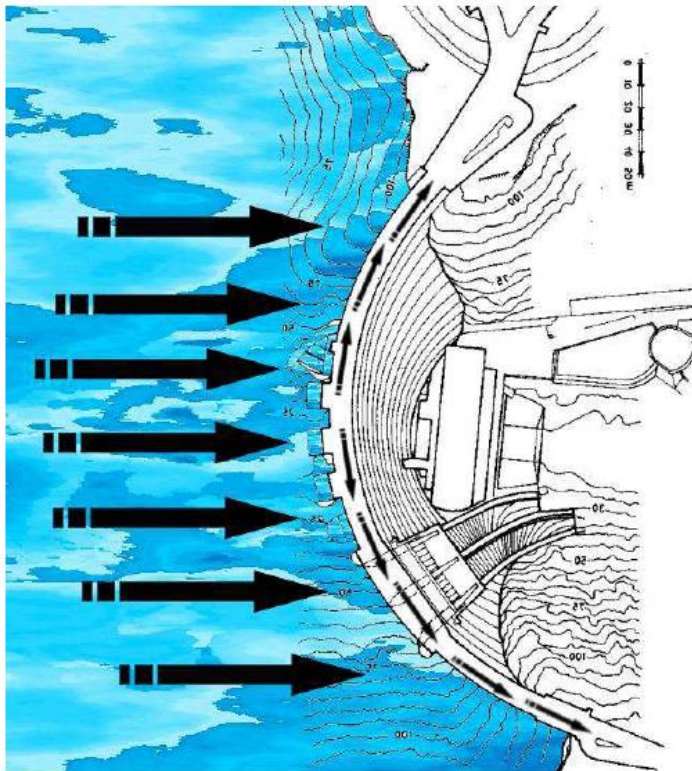


UHE Itaipu – PR, Rio Paraná (14.000 MW)

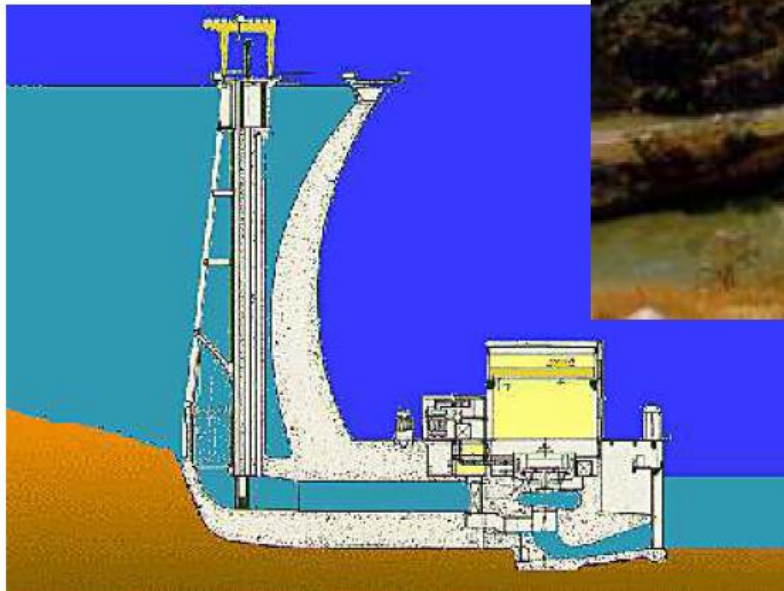
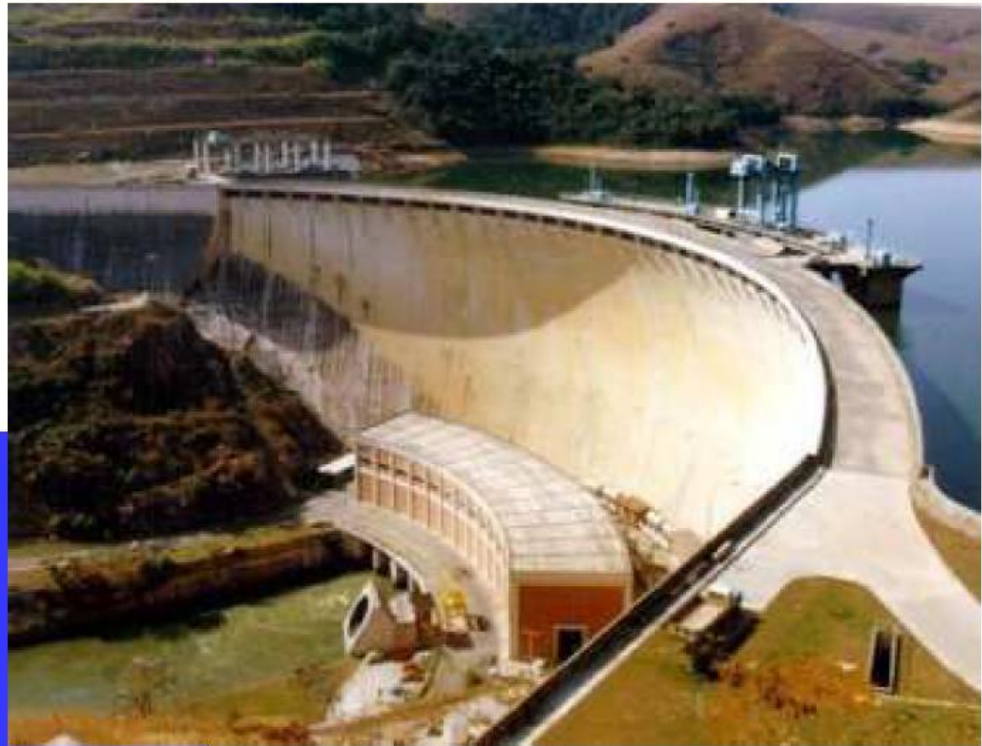
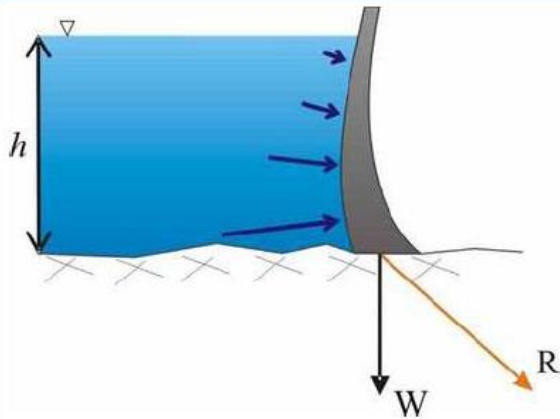
Classificação das Barragens e UHE: Barragem de contrafortes



Classificação das Barragens e UHE: Barragem em Arco

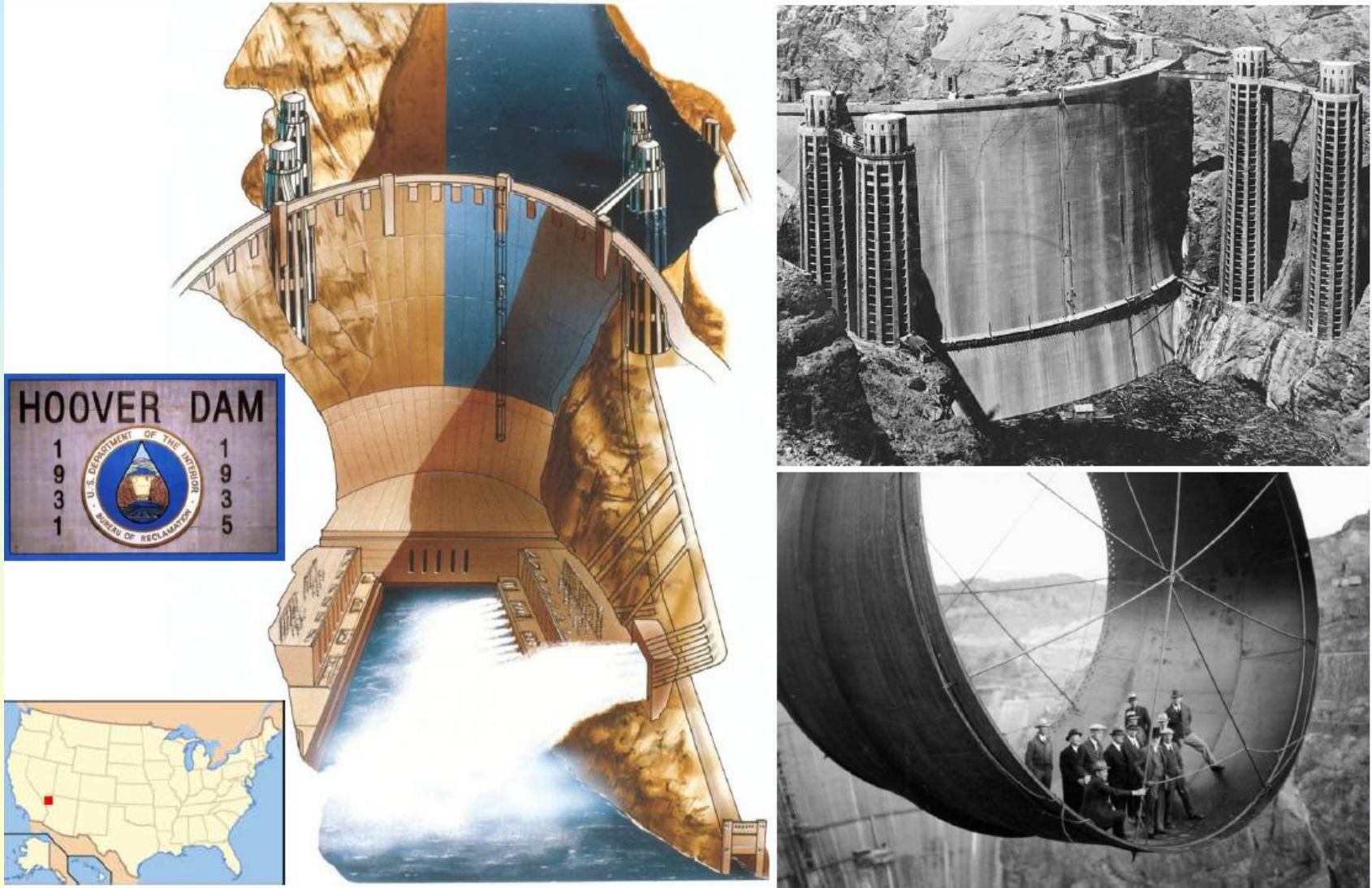


Classificação das Barragens e UHE: Barragem em Arco Dupla Curvatura



UHE Funil – RJ, Rio Paraíba do Sul (216 MW)

Classificação das Barragens e UHE: Barragem em Arco Gravidade



Hoover Dam – Arizona/Nevada, EUA, Rio Colorado (2.080 MW)

Classificação das Barragens e UHE: Barragem em Arco Gravidade



Hoover Dam – Arizona/Nevada, EUA, Rio Colorado (2.080 MW)

Classificação das Barragens e UHE: Barragens em abóbadas



**Reservoir surface area (Manicouagan):
1,973 km²**

- 5th largest reservoir in the world

Height: 214 metres

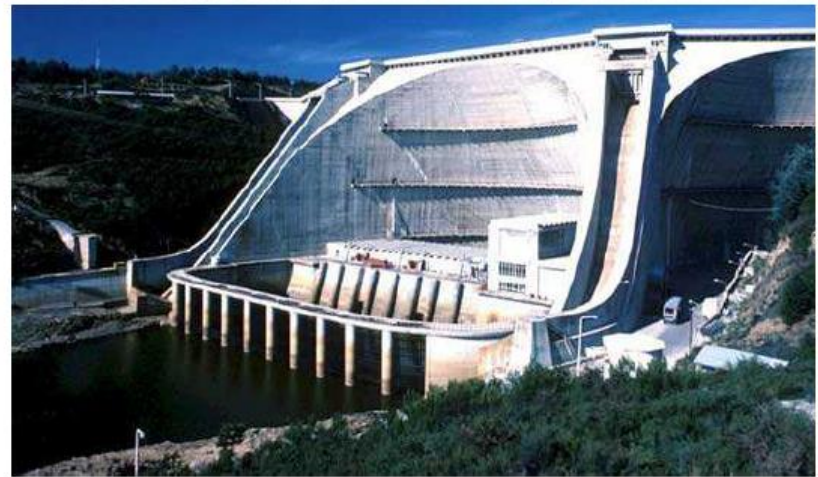
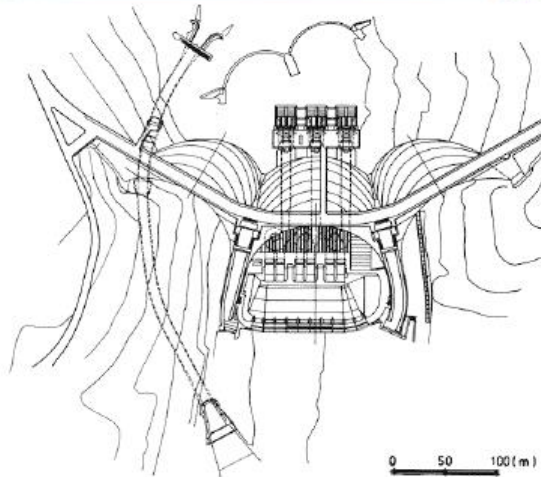
- Highest multiple-arch-and-buttress dam in the world
- 28th highest dam in the world (all categories)
- 2nd highest dam in Canada

Crest length: 1.3 kilometres



Daniel- Johnson, Quebec, Canadá, Rio Manicouagan (2.656 MW)

Classificação das Barragens e UHE: Barragens em abóbadas



Barragem da **Aguieira** – Coimbra, Portugal, Rio Mondego (270 MW)

Classificação das Barragens e UHE: Barragens Mistas



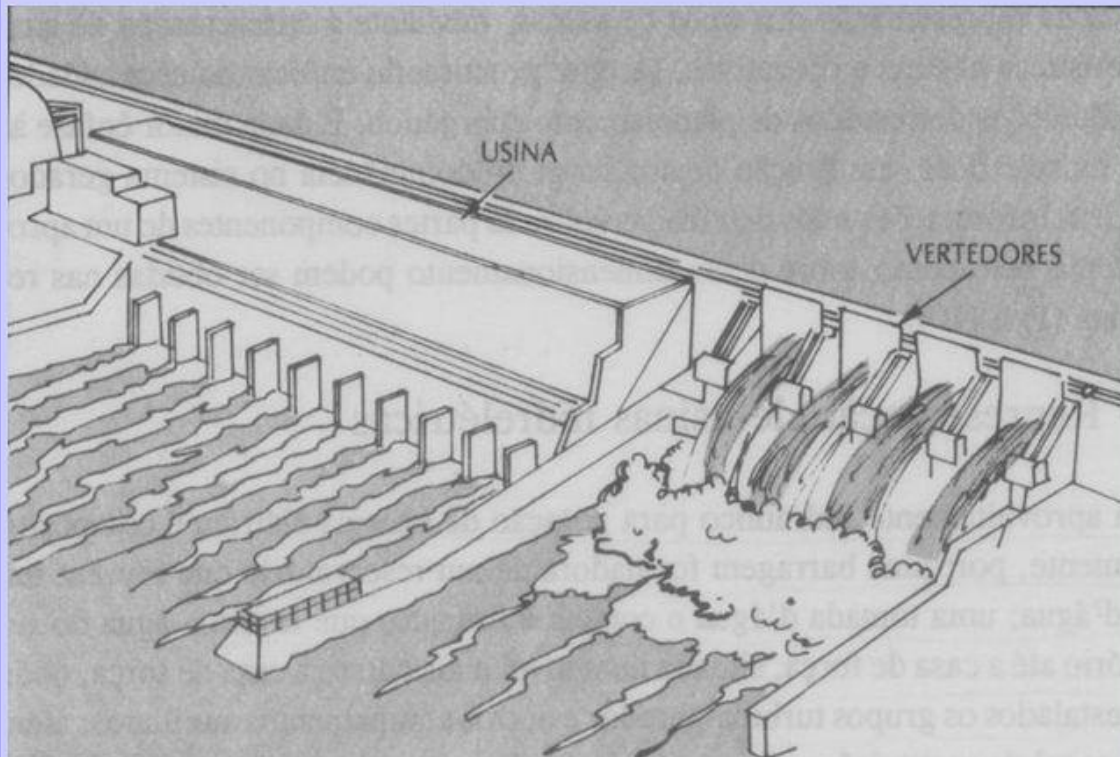
- ① Barragem de terra esquerda
- ② Barragem de enrocamento
- ③ Barragens de ligação
- ④ Estrutura de desvio
- ⑤ Barragem principal
- ⑥ Casa de Força e Áreas de Montagem
- ⑦ Barragem lateral direita
- ⑧ Vertedouro
- ⑨ Barragem de terra direita
- ⑩ Dique de Hemandarias

Dados Principais

Escavação comum (m ³)	23.628 x 10 ³
Escavação em rocha (m ³)	31.962 x 10 ³
Escavação submersa (m ³)	858 x 10 ³
Escavação subterrânea (m ³)	33 x 10 ³
Argila compactada (m ³)	6.482 x 10 ³
Enrocamento (m ³)	15.000 x 10 ³
Concreto estrutural com refrigeração (m ³)	12.600 x 10 ³ (31.500.000t)
Concreto compactado a rolo (m ³)	25 x 10 ³
Cimento (kg)	2.501 x 10 ³ (2.501.233t)
Aço (kg)	478.270 x 10 ³ (478.270t)

UHE Itaipu – PR, Rio Paraná (14.000 MW)

Componentes básicos de uma Central Hidrelétrica



1. Barragem
2. Tomada d'água e condutos forçados
3. Casa de força
4. Vertedouro
5. Subestação elevadora

VERTEDOUROS OU EXTRAVASORES

Ilha Solteira



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

Itaipú



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.

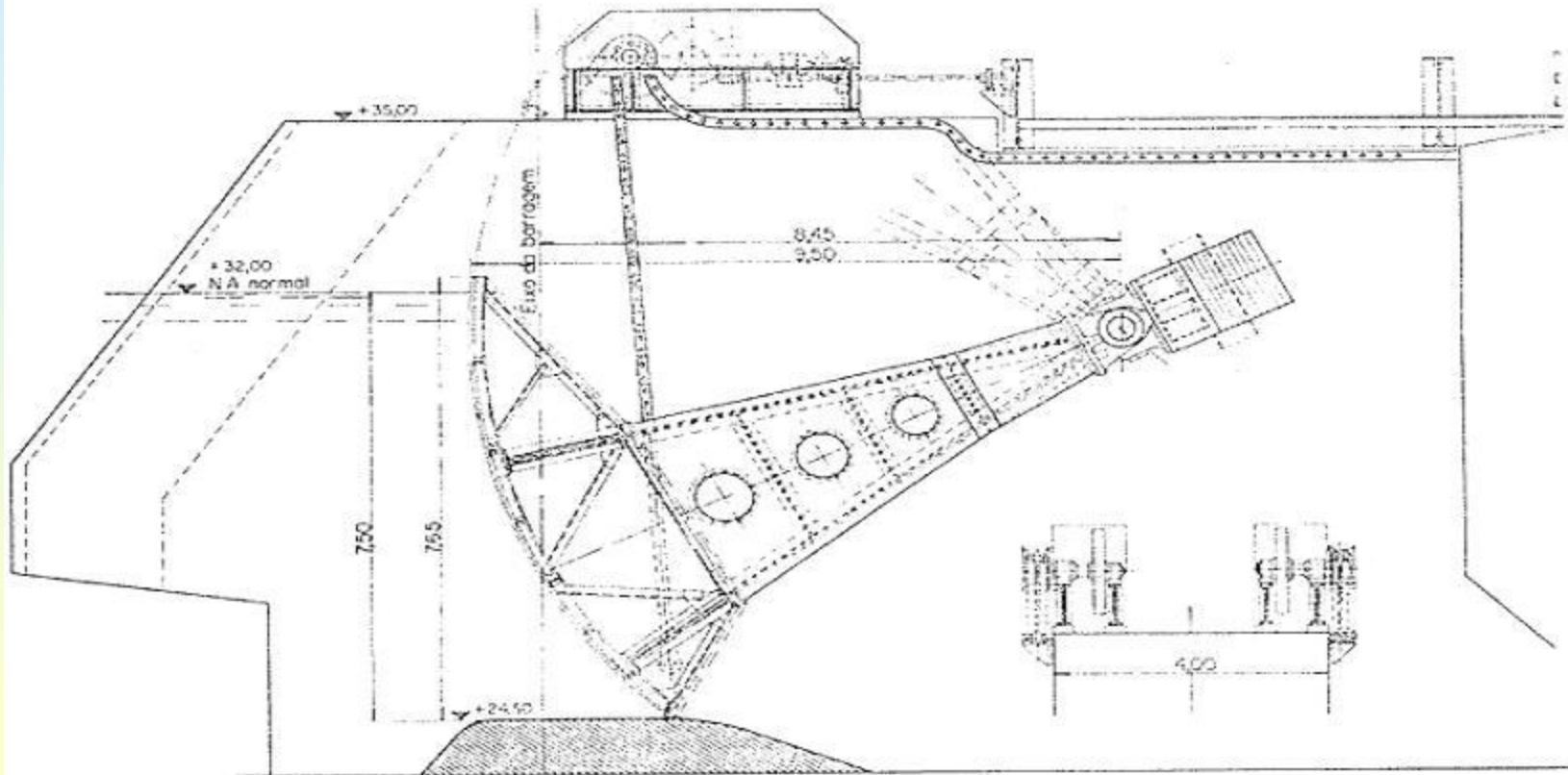


Figura 6.75 Comporta de segmento movimentada por guinchos, por meio de correntes tipo Gall

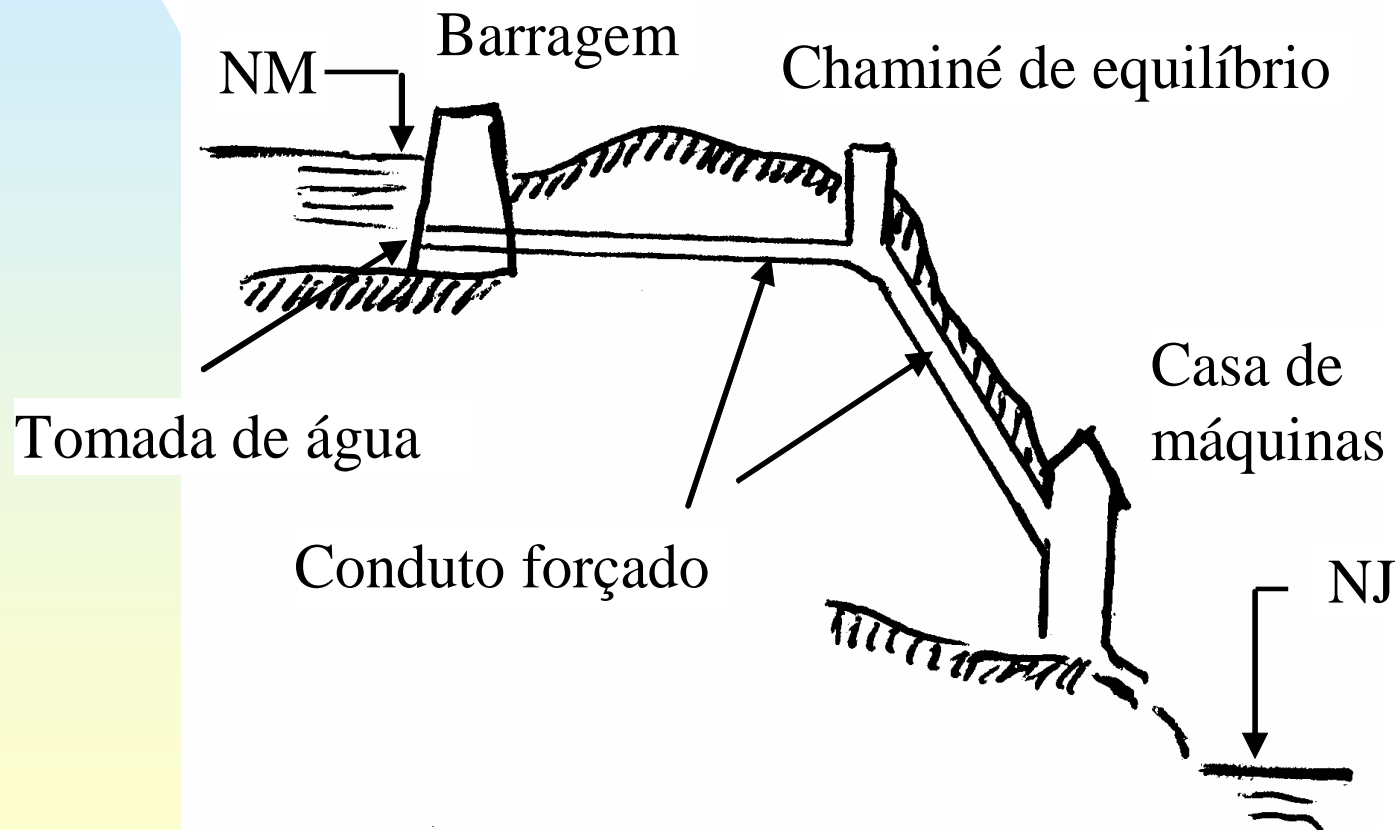
CONDUTOS

Podem ser livres ou forçados

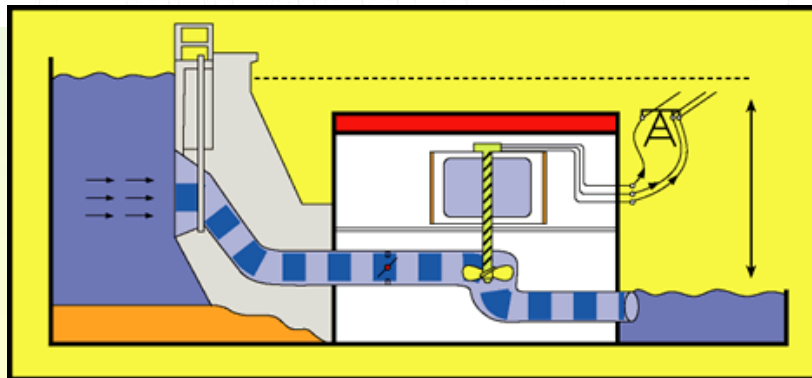
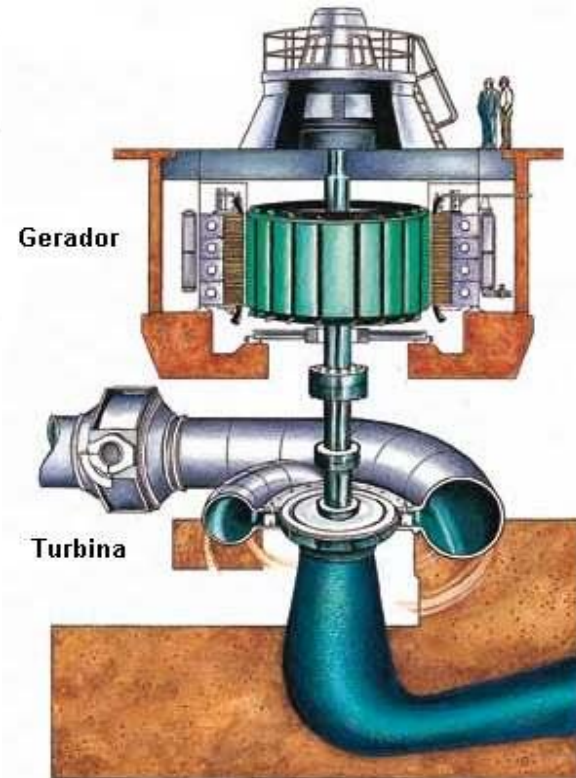
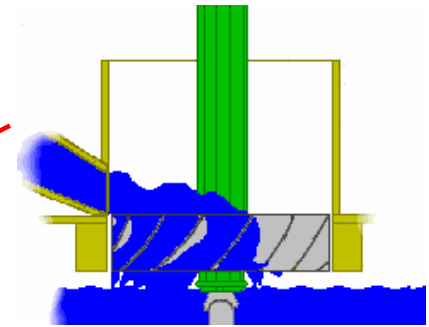
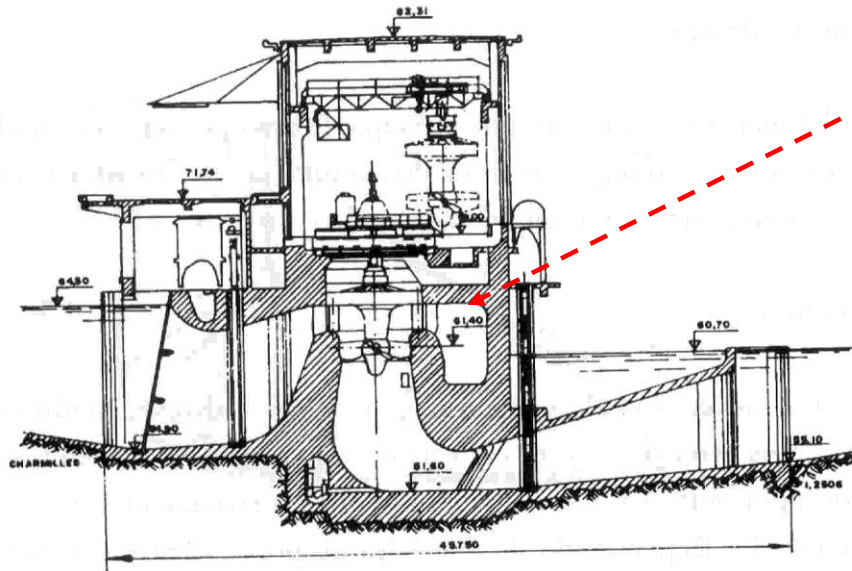


CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO OU CÂMARA DE DESCARGA

Função principal : aliviar o excesso de pressões causado pelo golpe de aríete

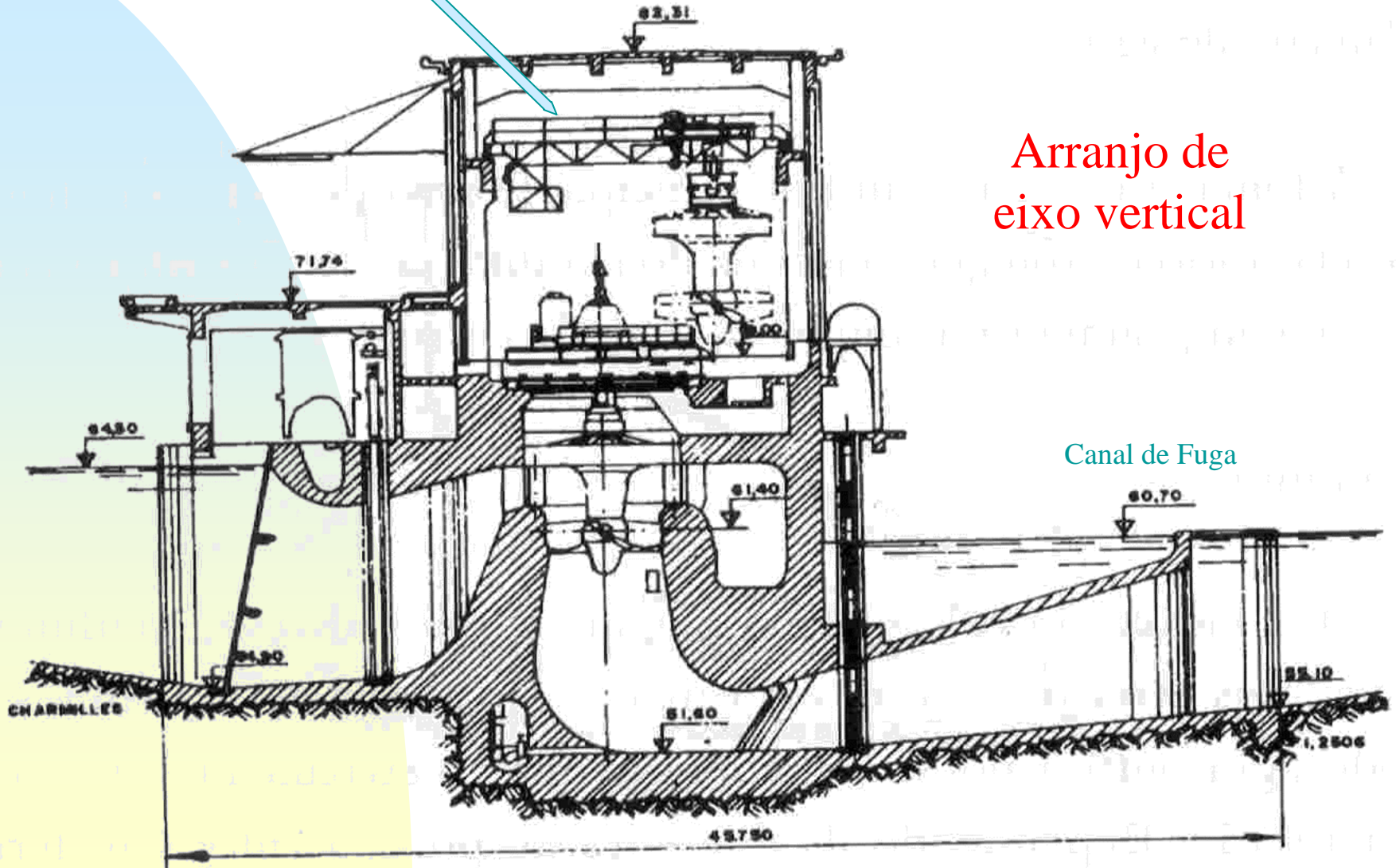


Configuração de uma casa de força



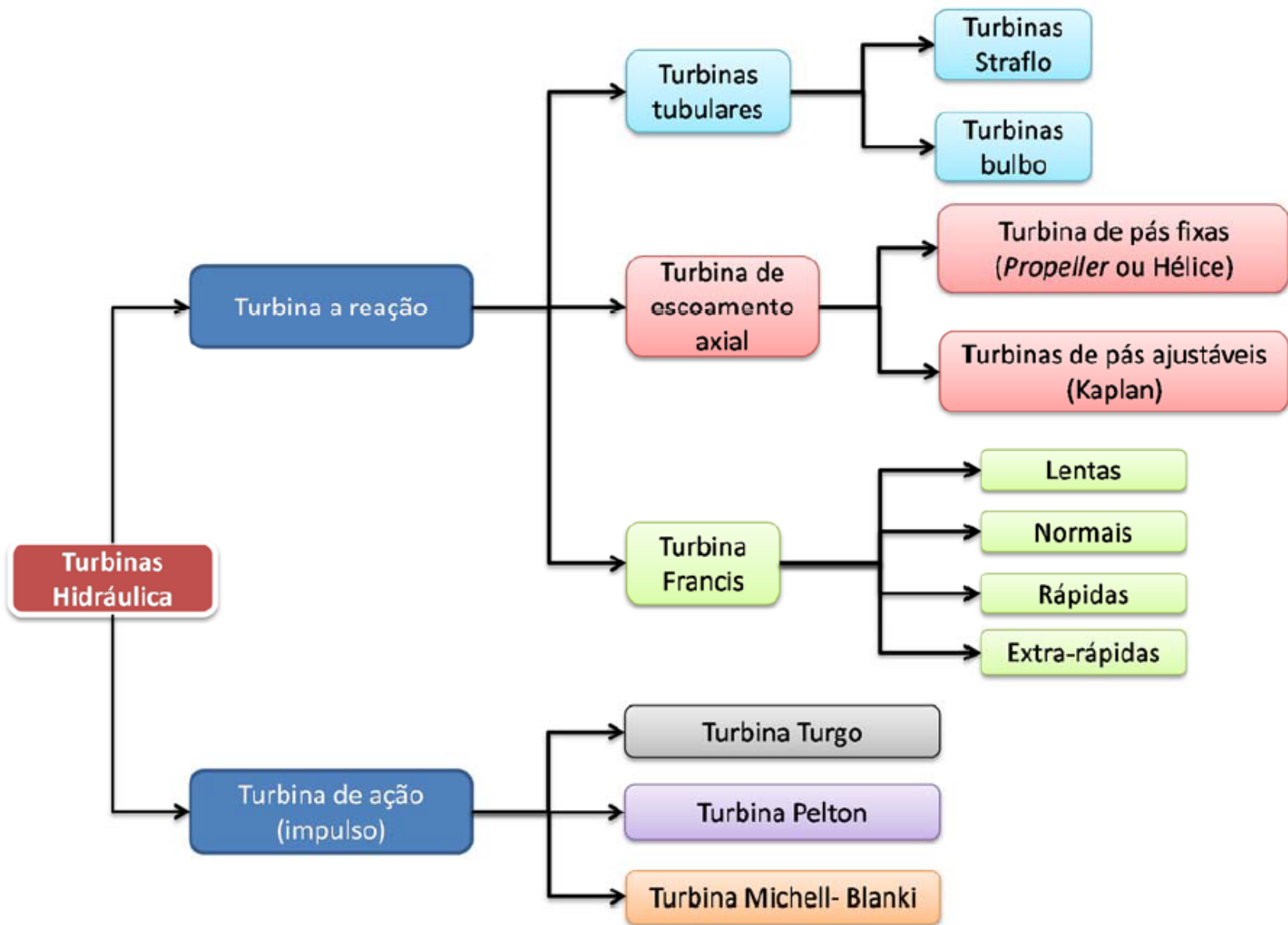
Configuração de uma Casa de Força

Ponte Rolante

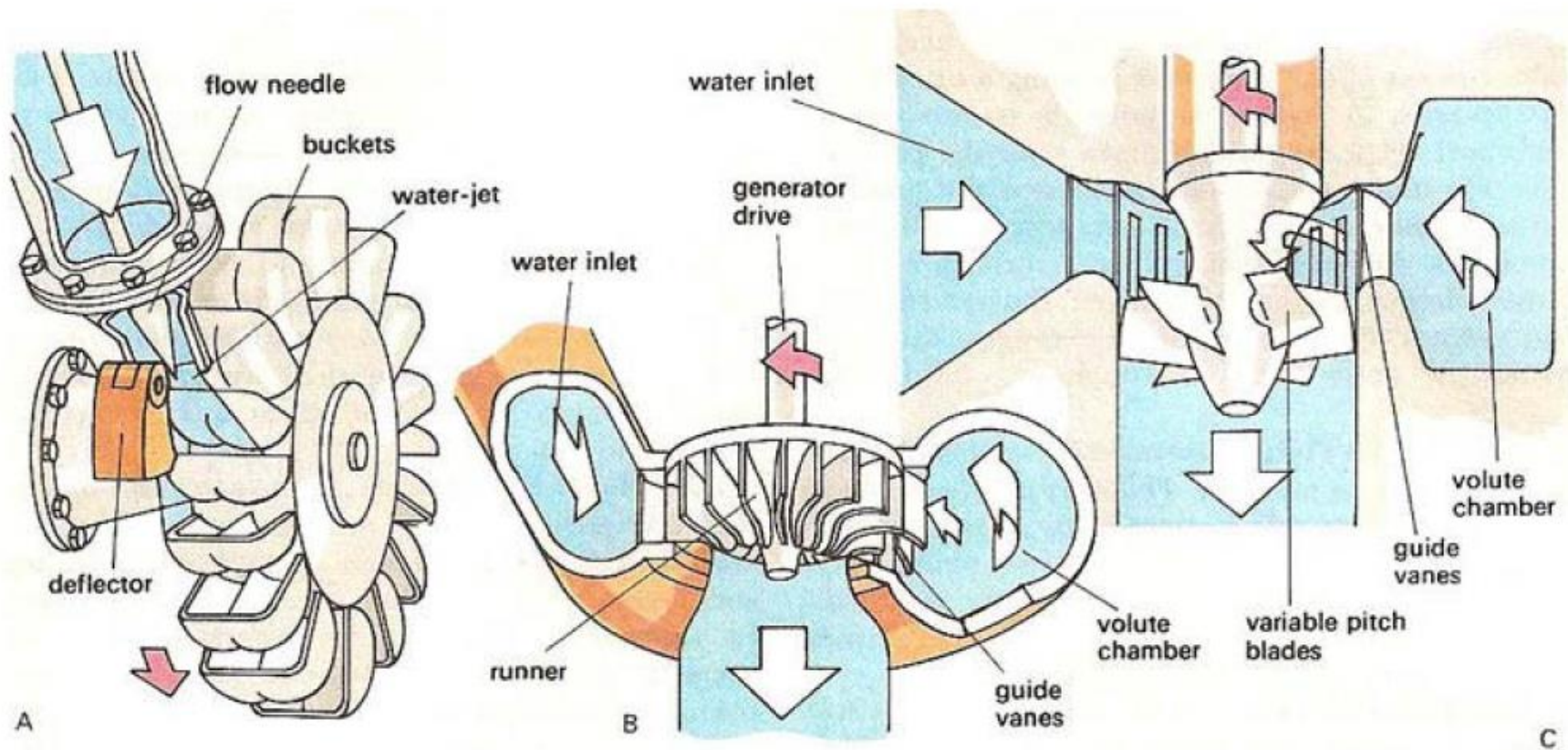


Arranjo de eixo vertical

Canal de Fuga



Classificação das turbinas hidráulicas



Turbinas Pelton (A), Francis (B) e Kaplan (C)

¹ Fonte: <http://rivers.bee.oregonstate.edu/book/export/html/35>

Turbinas hidráulicas



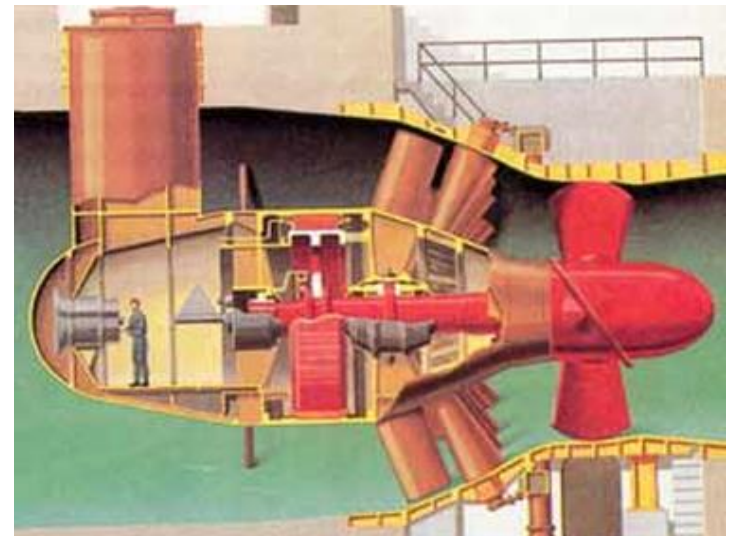
Pelton – Henry Borden



Francis – Itaipú



Kaplan – Andritz Hydro

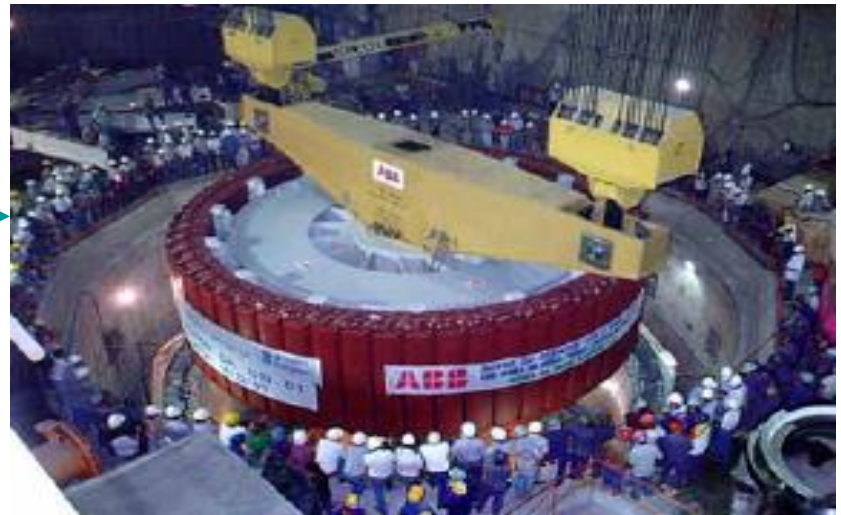


Bulbo (desenho) – Jirau

Turbina



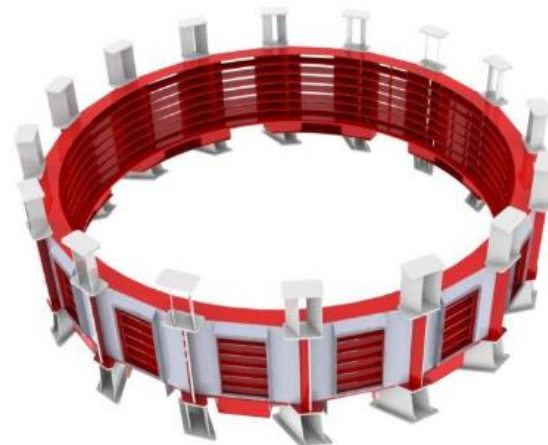
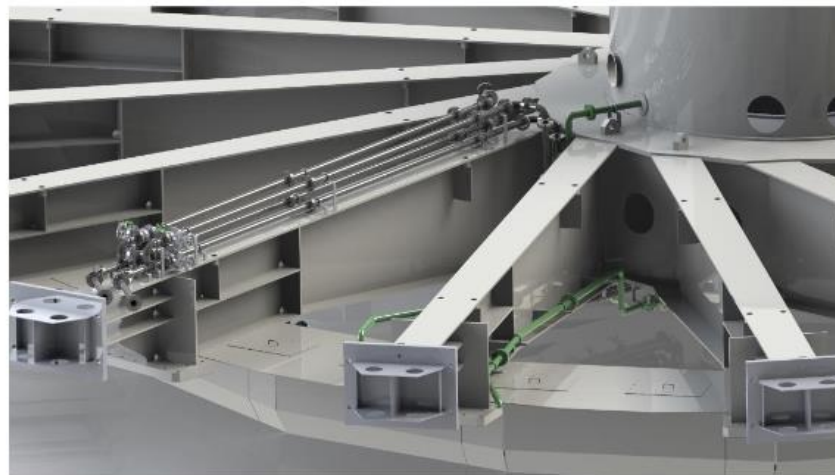
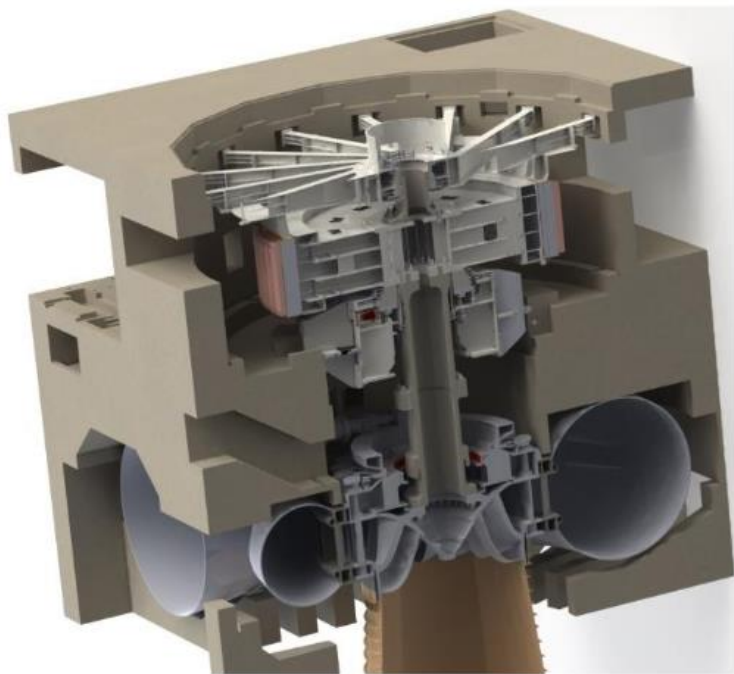
Acoplamento do gerador na turbina



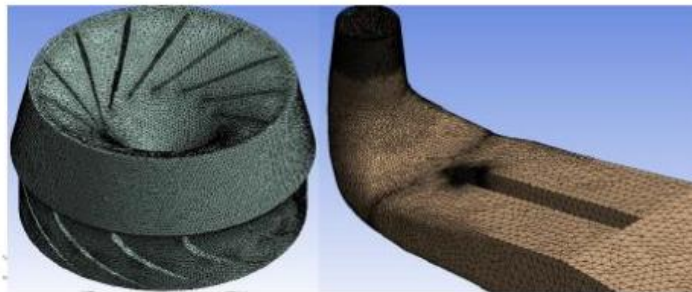
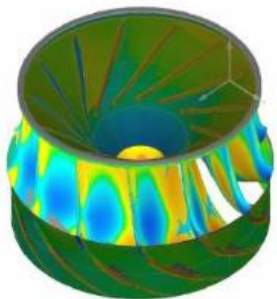
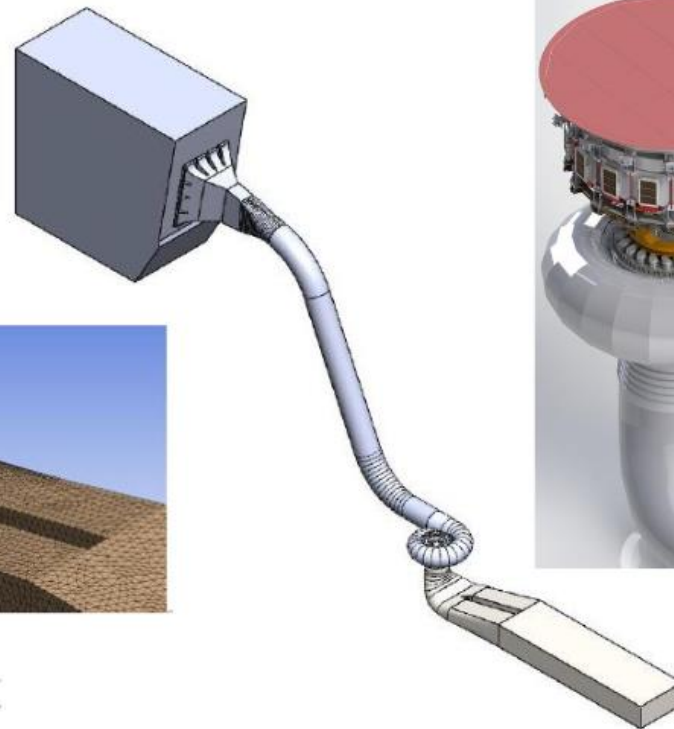
TURBINA DE ITAIPÚ



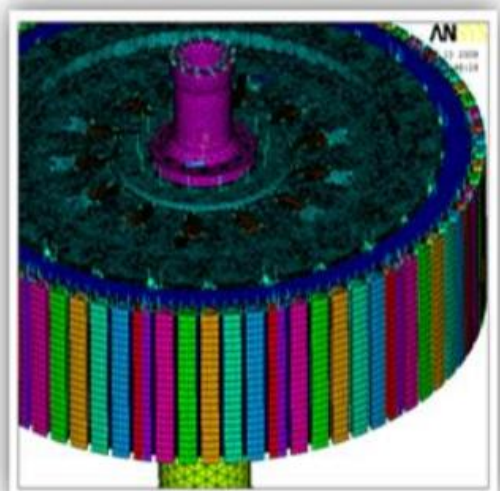
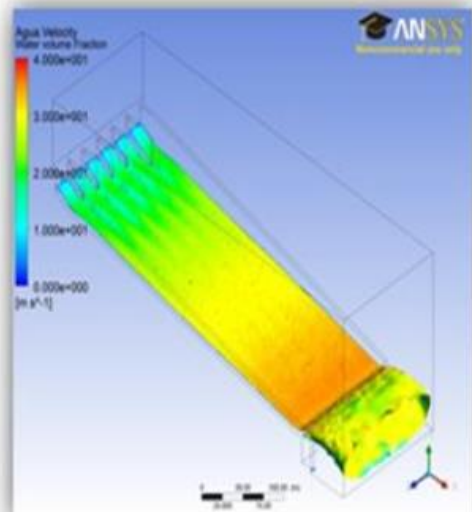
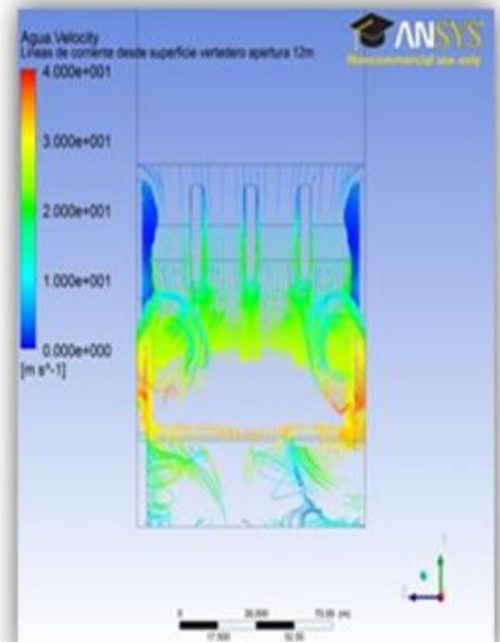
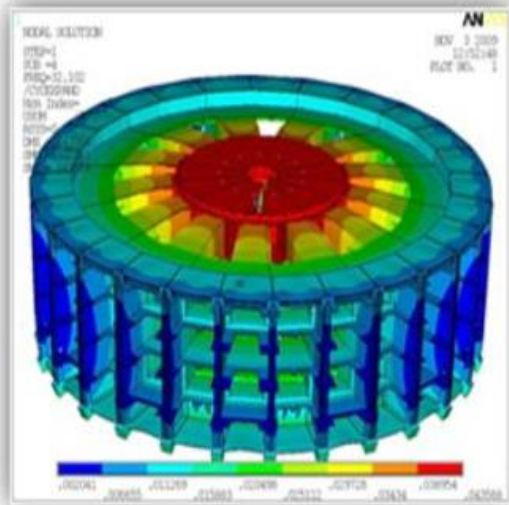
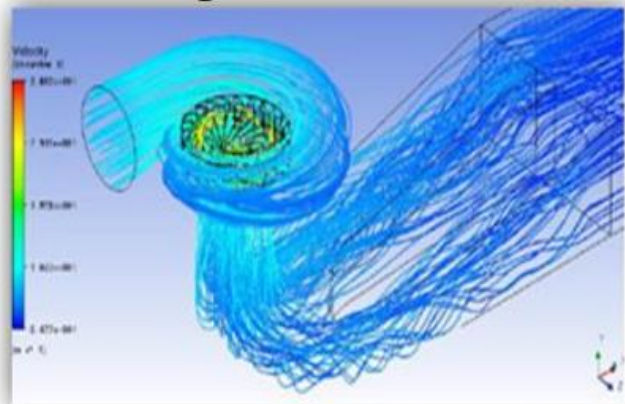
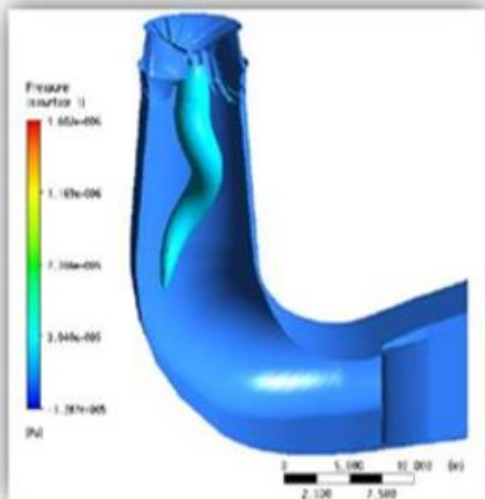
Modelagem Tridimensional Unidade Geradora



Modelagem Tridimensional Unidade Geradora



Simulações Estruturais



TIPOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Classificação:

- Quanto ao uso das vazões naturais
- À potência
- À forma de captação de água
- Função no sistema

Tipos de Centrais Hidrelétricas

- Quanto ao uso das vazões naturais
 - ◆ Centrais a fio d'água
 - ◆ Centrais de acumulação
 - ◆ Centrais reversíveis

Central a Fio d'água

Tem uma capacidade de armazenamento muito pequena e, em geral, dispõe somente da vazão natural do curso d'água



☐ *Tipos de centrais hidrelétricas*

☐ *Quanto ao uso das vazões naturais*

1- Central a fio d'água

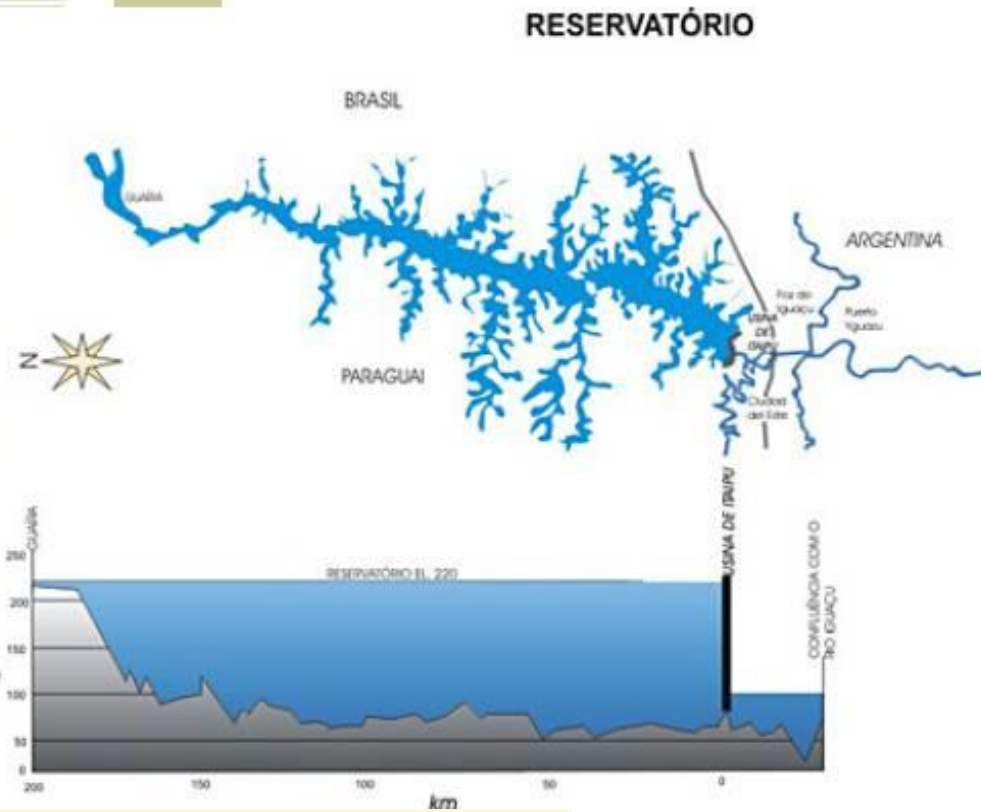


Queda de 89,23 m, vazão de projeto 6,75 m³/s
turbinas Francis de 3 640 kW e 1 740 kW

Tipos de centrais hidrelétricas

Quanto ao uso das vazões naturais

2- Centrais de acumulação



Central de Acumulação



Usinas com reservatório

ATE DIA 9/1

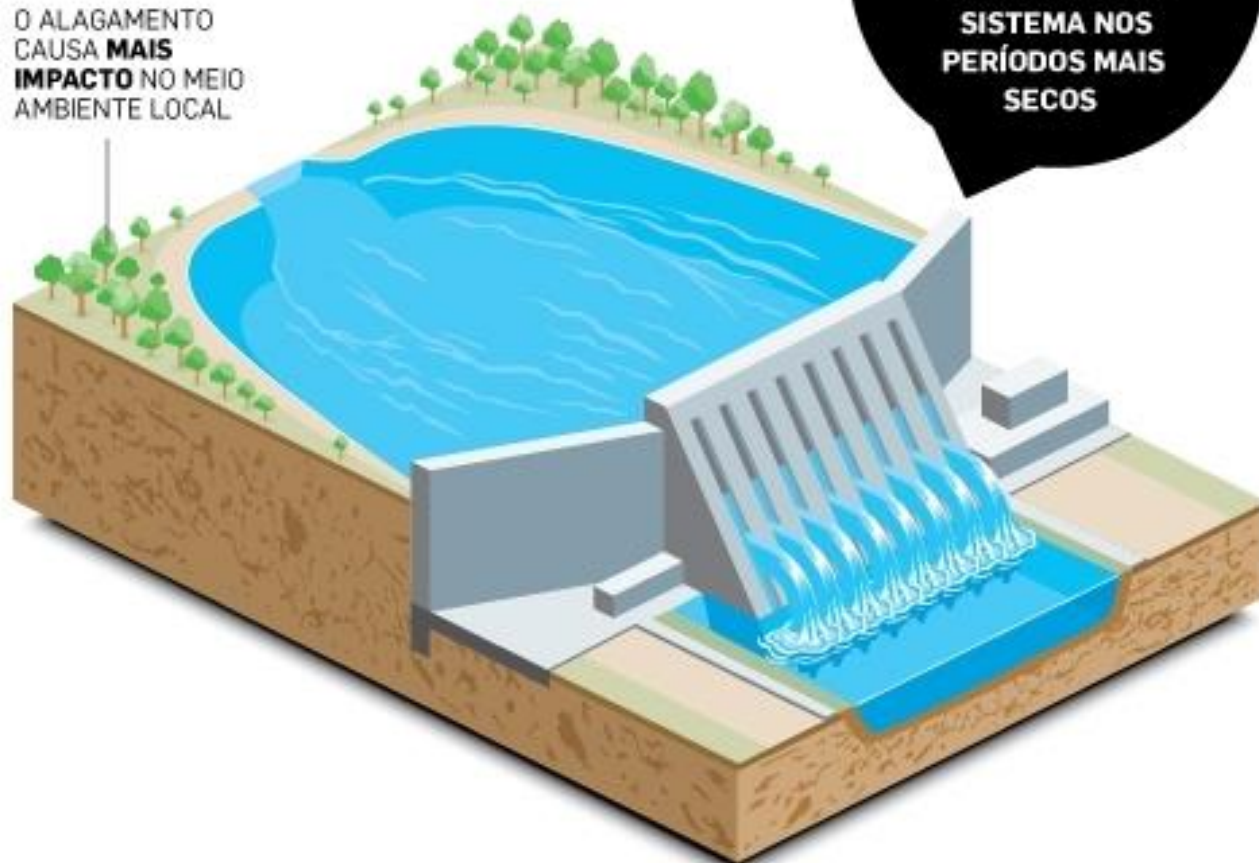
MODELO HIDRELÉTRICO

Usinas com reservatório

Até a década de 90, quase todas as hidrelétricas brasileiras eram construídas com reservatórios, que alagavam grandes áreas

Em 2001, a capacidade de armazenamento dos reservatórios era suficiente para abastecer seis meses de energia de todo o sistema. em 2009, esse número caiu para 5 meses

O ALAGAMENTO CAUSA **MAIS IMPACTO** NO MEIO AMBIENTE LOCAL



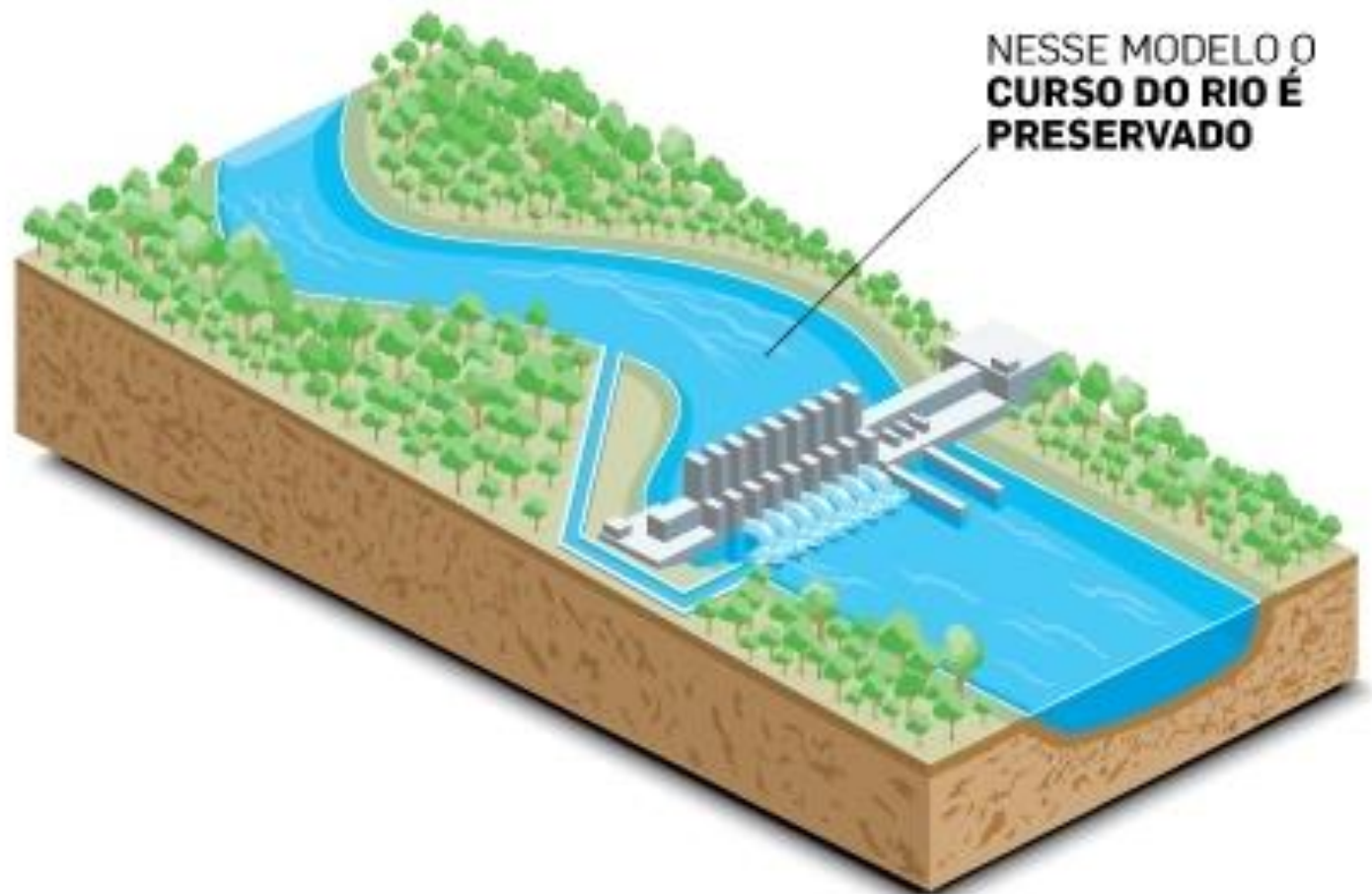
APESAR DO IMPACTO AMBIENTAL, O MODELO COM RESERVATÓRIO AJUDAVA A REGULARIZAR O SISTEMA NOS PERÍODOS MAIS SECOS

Usinas a fio d'água

Usinas a fio d'água

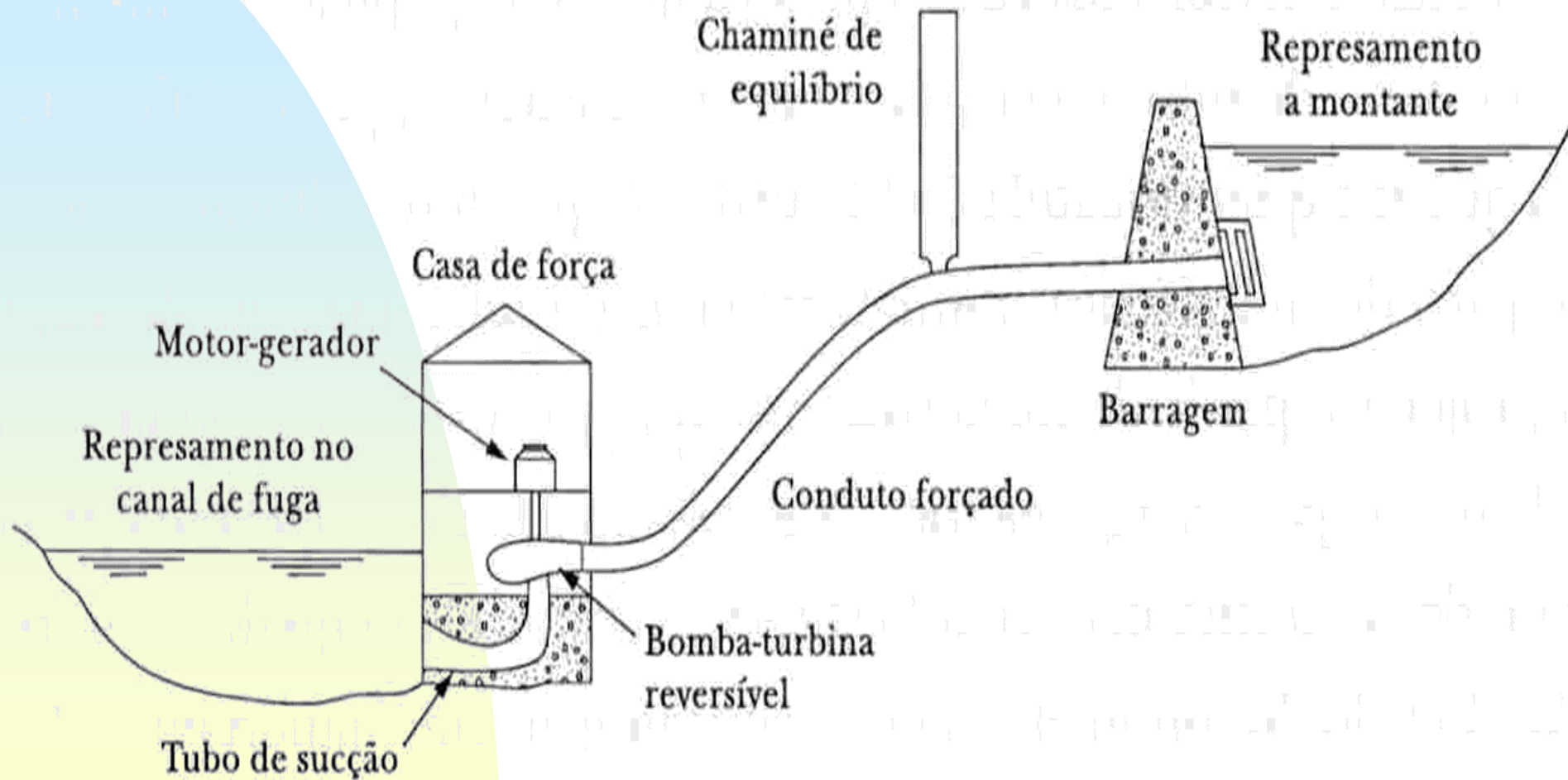
Com o maior rigor dos órgãos ambientais e pressão de ambientalistas do mundo inteiro, as hidrelétricas passaram a ser construídas sem reservatórios e grandes alagamentos

A exigência se tornou uma regra em todas as novas usinas, especialmente porque a maioria está localizada na Região Norte do País, em área de Floresta Amazônica



Central Reversível

3 - Centrais Reversíveis



Usinas Hidrelétricas Reversíveis

- A primeira UHR foi construída na década de 1890 na Itália e Suíça.
 - Na década de 1930 a primeira turbo-bomba foi construída.
- Função: Armazenar a geração de fontes inflexíveis como Nuclear e Carvão, e geração de fontes intermitentes como Eólica e Solar.

Exemplos de UHR



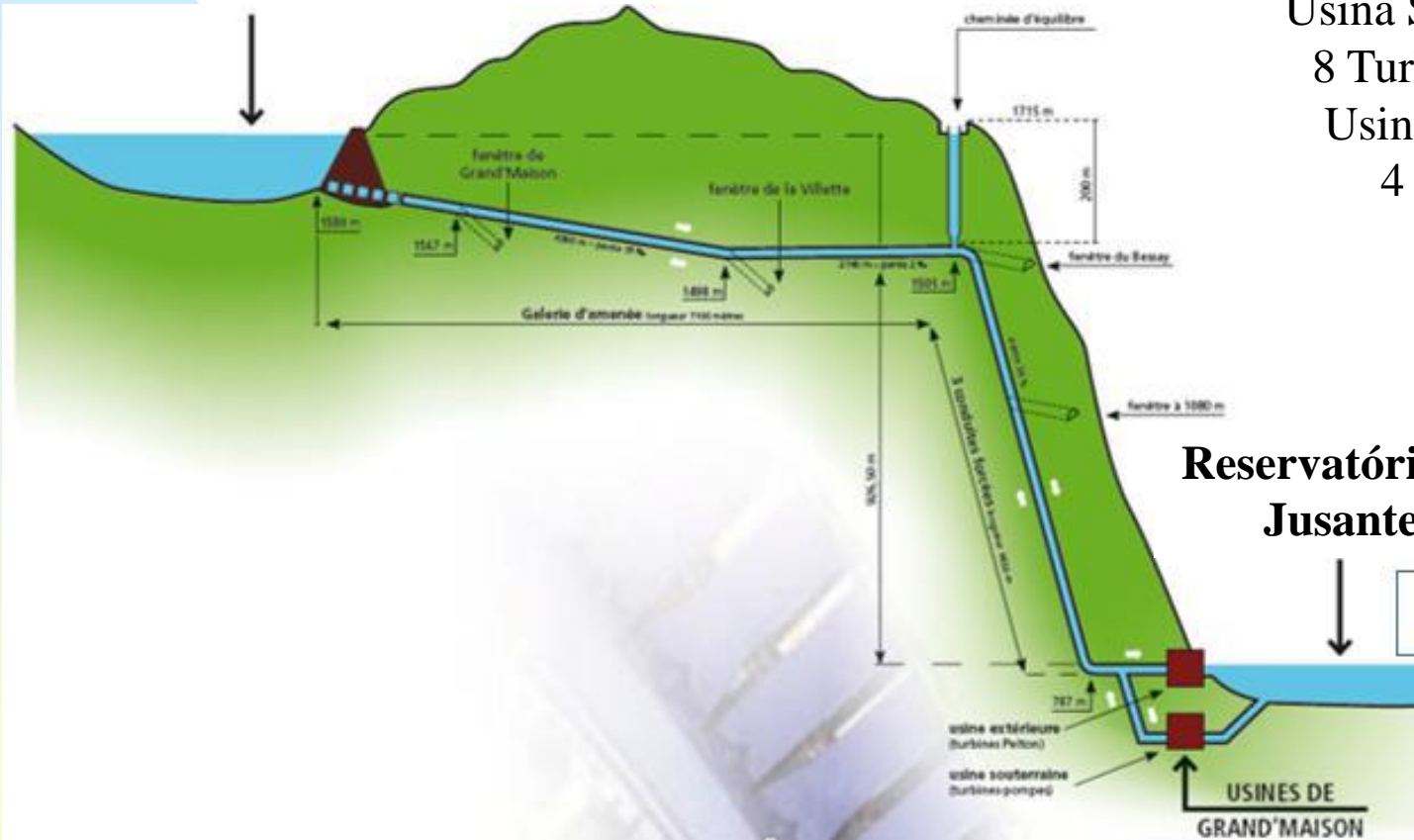
Goldisthal – Alemanha



Limberg II – Áustria

Usina Reversível Grand Maison (nos Alpes Franceses)

Reservatório de Montante



Potência – 1.800 MW

Usina Subterrânea

8 Turbo-bomba

Usina Externa

4 Pelton

Tipos de Centrais Hidrelétricas

- ◆ Quanto à potência
 - ◆ micro $P < 100$ kW
 - ◆ mini $100 < P < 1.000$ kW
 - ◆ pequenas $1.000 < P < 30.000$ kW
 - ◆ médias $30.000 < P < 150.000$ kW
 - ◆ grandes $P > 150.000$ kW

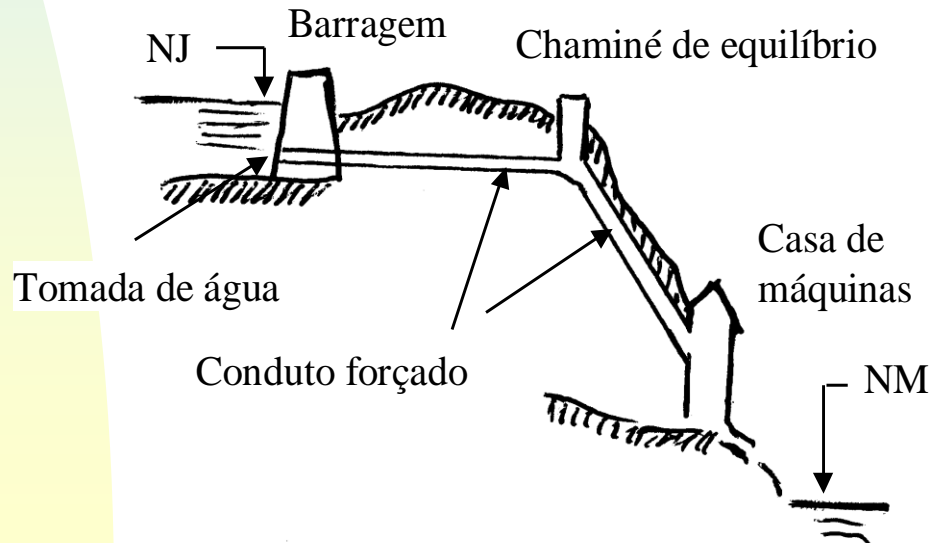
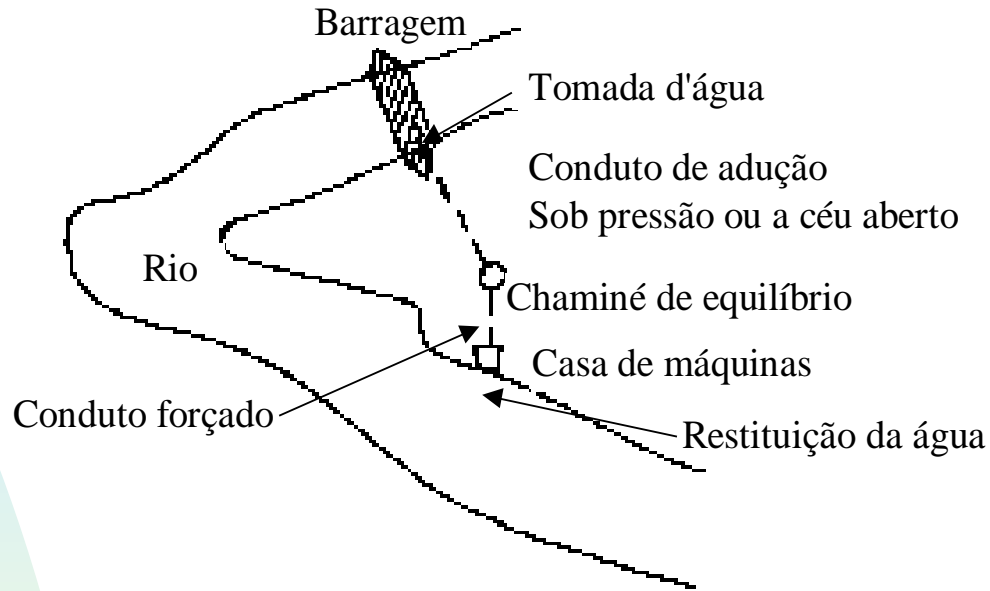
Tipos de Centrais Hidrelétricas

- ◆ 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

Tipos de Centrais Hidrelétricas

- Quanto à forma de captação da água
 - ◆ leito de rio ou de barramento
 - ◆ desvio ou em derivação

Central hidrelétrica em desvio



Classificação das Barragens

UHE: Função no sistema de geração

- Usinas de geração em base
 - ◆ Usinas de acumulação: Grandes reservatórios
- Usinas de geração em ponta
 - ◆ Usinas de derivação
 - ◆ Usinas a fio d'água
- Usinas reversíveis

Pontos a serem analisados quando da instalação de uma Central Hidrelétrica

- Potência mecânico –hidráulica disponível
- Potência utilizável
- Possibilidade de transporte dos componentes ao parque gerador
- Custo das obras civis
- Custos dos equipamentos de ação direta e dos equipamentos auxiliares
- Custo de manutenção
- Rendimento dos equipamentos de ação direta (turbina e gerador)
- Custo das áreas inundáveis
- Valores da áreas no entorno do reservatório
- Aspectos ligados à geologia e à localização do reservatório e da barragem

Referencias

- **Classificação das Barragens e UHE - Prof. M.Sc. Ricardo Ferreira – PUC-Goias**
- **EVOLUÇÃO DOS PROJETOS 3D APLICADOS A SEGURANÇA DE BARRAGENS - MSc.**
Eng.º Dimilson Pinto Coelho - Itaipu Binacional
- **Usinas Hidrelétricas Reversíveis Sazonais: Benefícios para o Brasil - IVIG/COPPE/UFRJ - Julian Hunt HEDAIDI – Mírian Adelaide**
- **Centrais Hidrelétricas - Prof. Luis S. B. Marques-IFSC**