

**A expansão de energia elétrica**

**Escola Politécnica da UFRJ**

**16 de março de 2007**

**Jerson Kelman**



# PRINCIPES D'HYDRAULIQUE, VÉRIFIÉS

Par un grand nombre d'Expériences faites par  
ordre du Gouvernement.

**OUVRAGE** dans lequel on traite du mouvement uniforme & varié de l'eau dans les Rivières, les Canaux, & les Tuyaux de conduite; de l'origine des Fluves, & de l'établissement de leur lit; de l'effet des Eclufes, des Ponts & des Reverfoirs; des Jets-d'eau; de la Navigation tant sur les Rivières que dans des Canaux étroits; de la résistance des Fluides en général; & de celle de l'Air & de l'Eau en particulier.

Par M. le Chevalier DU BUAT, ancien Chevalier de l'Ordre de Saint Jean de Jérusalem, Chevalier de l'Ordre Royal & Militaire de Saint Louis, Lieutenant-Colonel au Corps Royal du Génie.

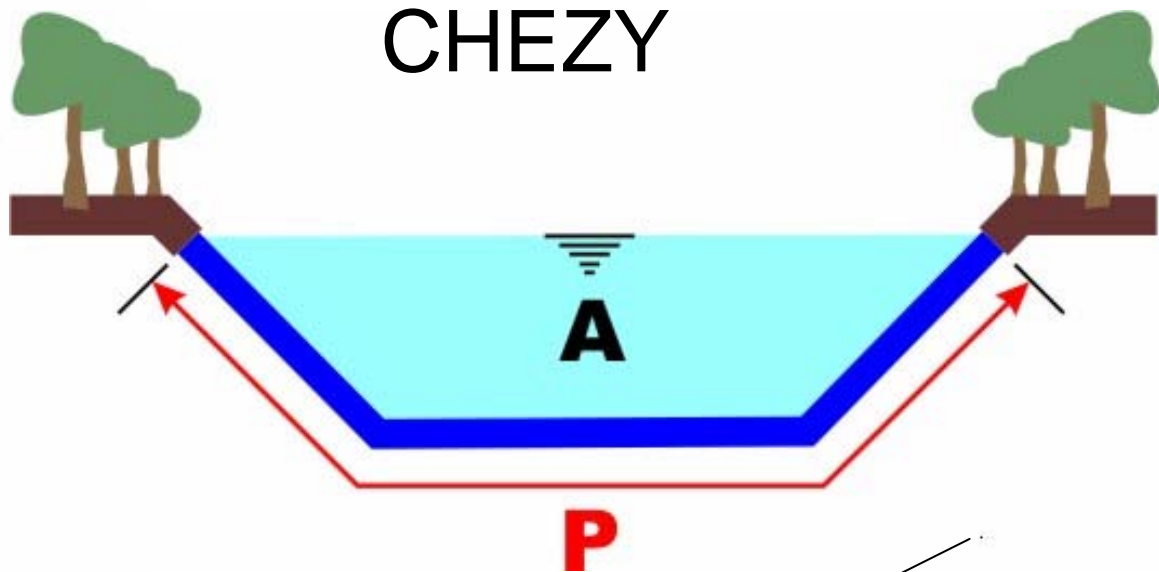
Ut tandem Philosophia & Scientia solidis experientia nitantur  
fundamentis. (BACON.)

NOUVELLE ÉDITION, revue, & considérablement augmentée.

TOME PREMIER.



A PARIS,  
DE L'IMPRIMERIE DE MONSIEUR.  
M. DCC. LXXXVI.

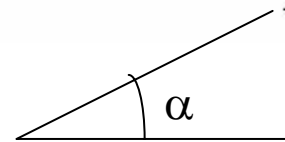


$$F1 \propto AS$$

$$F2 \propto V^2 P$$

$$\frac{F1}{F2} = \frac{V^2 P}{AS} = C^2$$

$$V = C \sqrt{\frac{AS}{P}} = C \sqrt{RS}$$



$$S = \tan \alpha$$

# Enchentes Urbanas

Ocupação desordenada → lixo e erosão das encostas

+

Aumento da área impermeável

=

A mesma chuva intensa que no passado causava  
uma perturbação moderada, pode hoje  
causar uma grande enchente



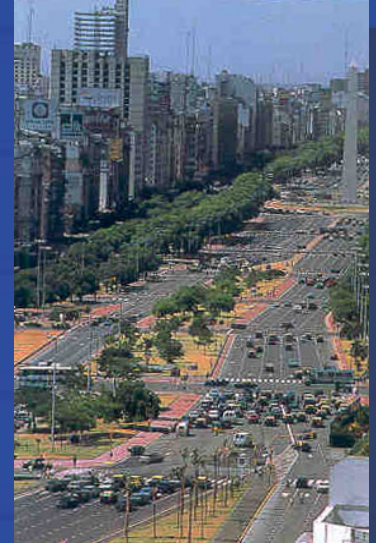
# Por que ocorre escassez hídrica?

- a água disponível nos rios e lagos seria suficiente para atender à demanda, mas não chega às casas das pessoas por falta de um sistema de abastecimento
- a quantidade de água que flui pelos rios ou está estocada nos reservatórios é insuficiente para atender ao consumo doméstico e à produção agrícola, industrial e energética
- a quantidade de água nos rios é suficiente, mas de tão má qualidade, que não pode ser utilizada



# Conflitos pela água

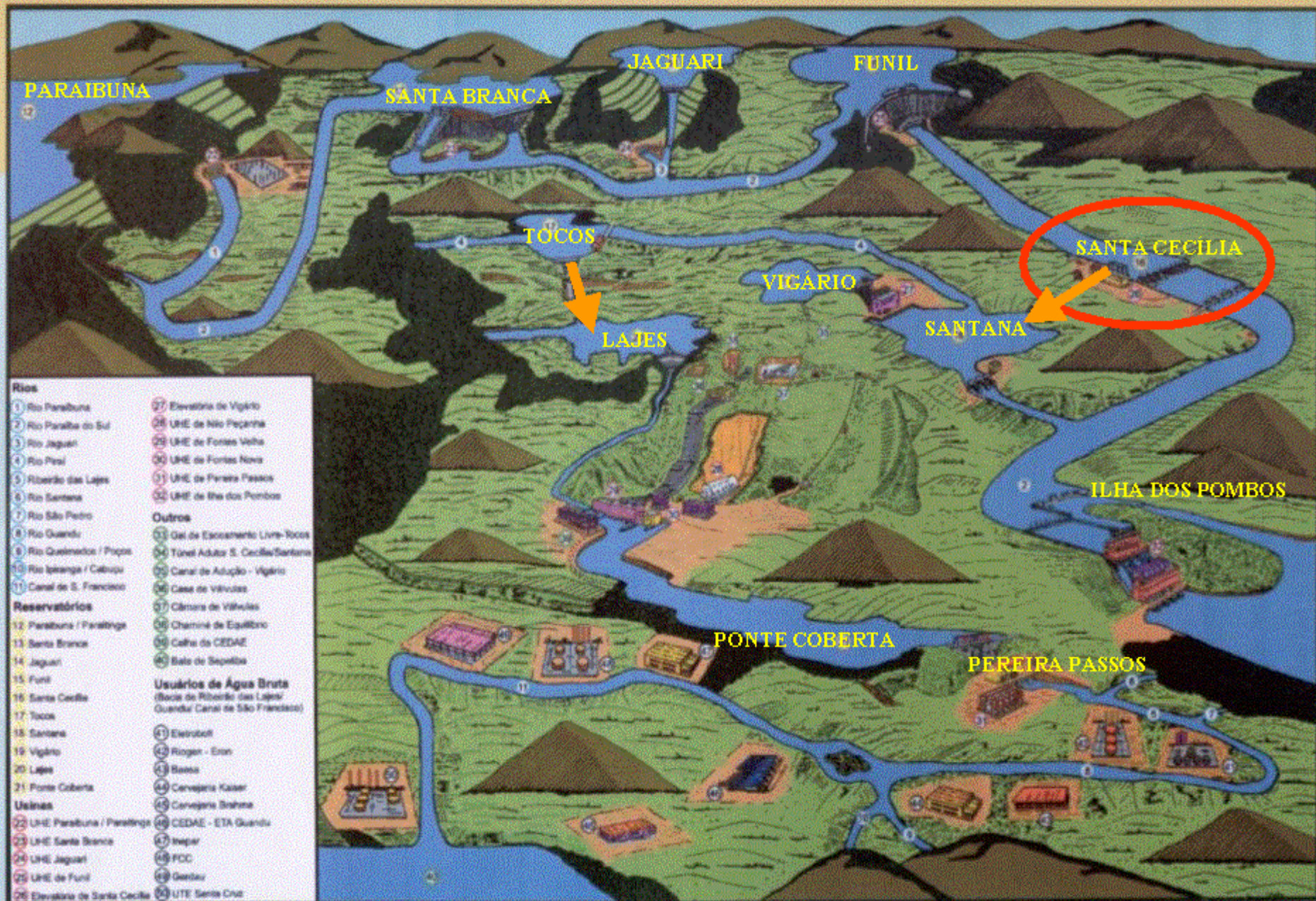
idades montante x cidades jusante  
irrigantes montante x irrigantes jusante  
recreação x produção energética  
uso na bacia x uso fora da bacia



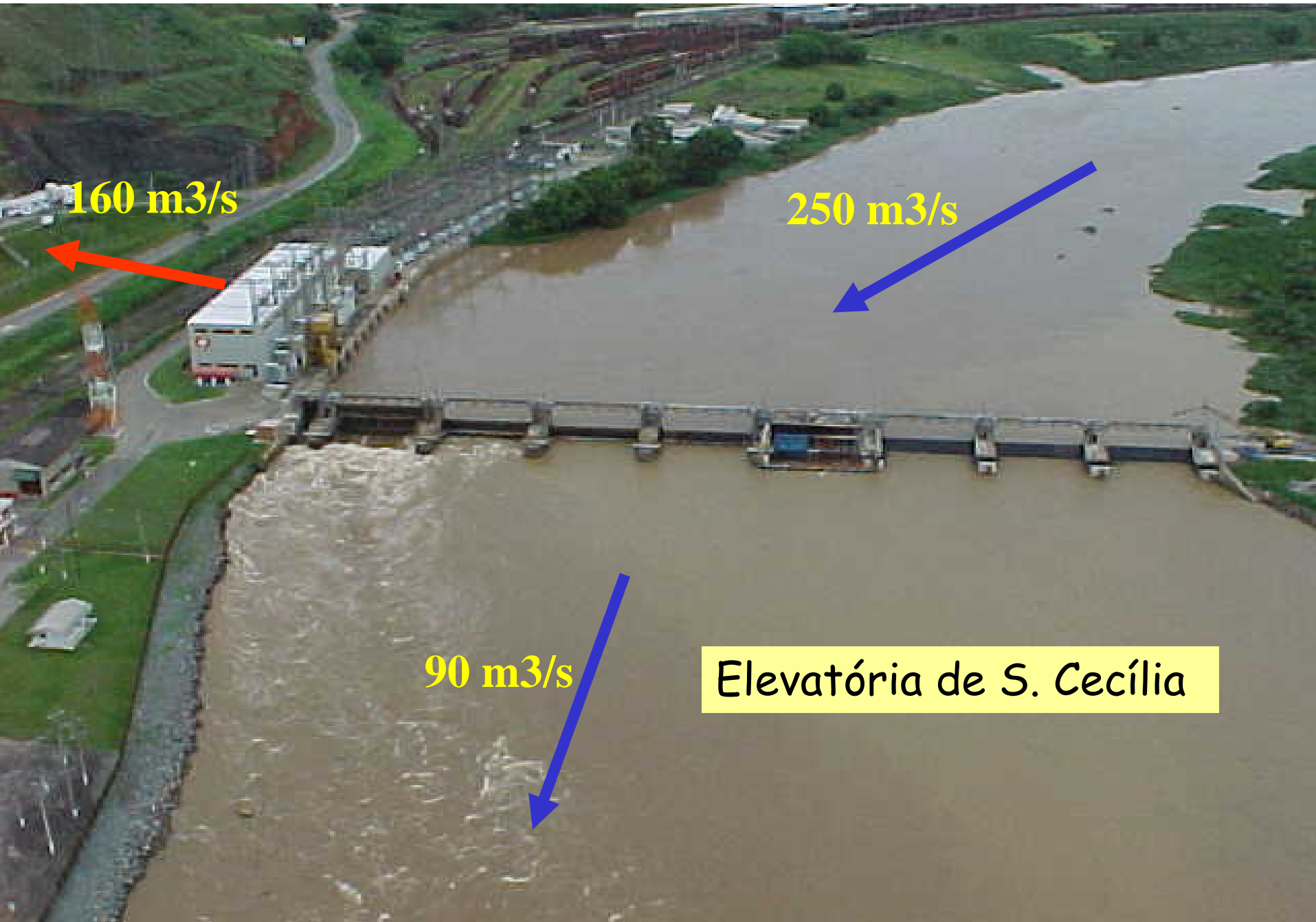




# Representação Esquemática do Complexo Hidrelétrico do Paraíba do Sul/Lajes







160 m<sup>3</sup>/s

250 m<sup>3</sup>/s

90 m<sup>3</sup>/s

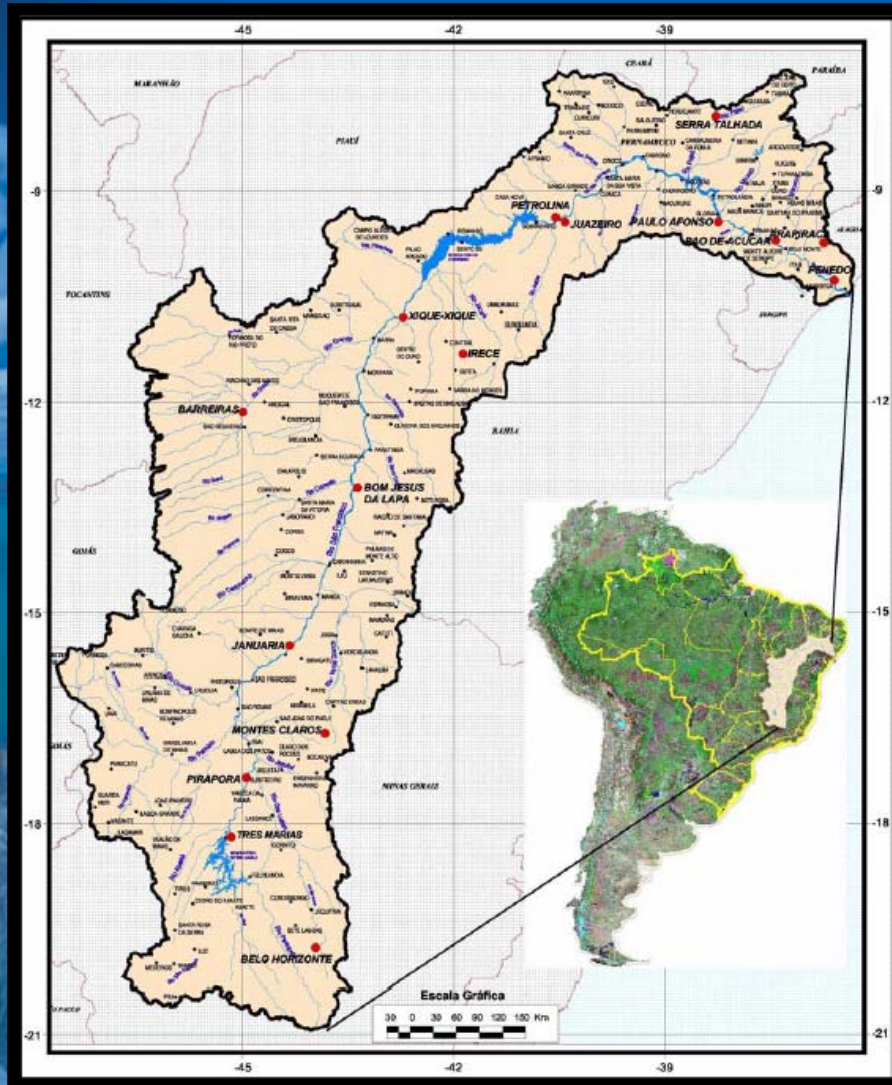
Elevatória de S. Cecília



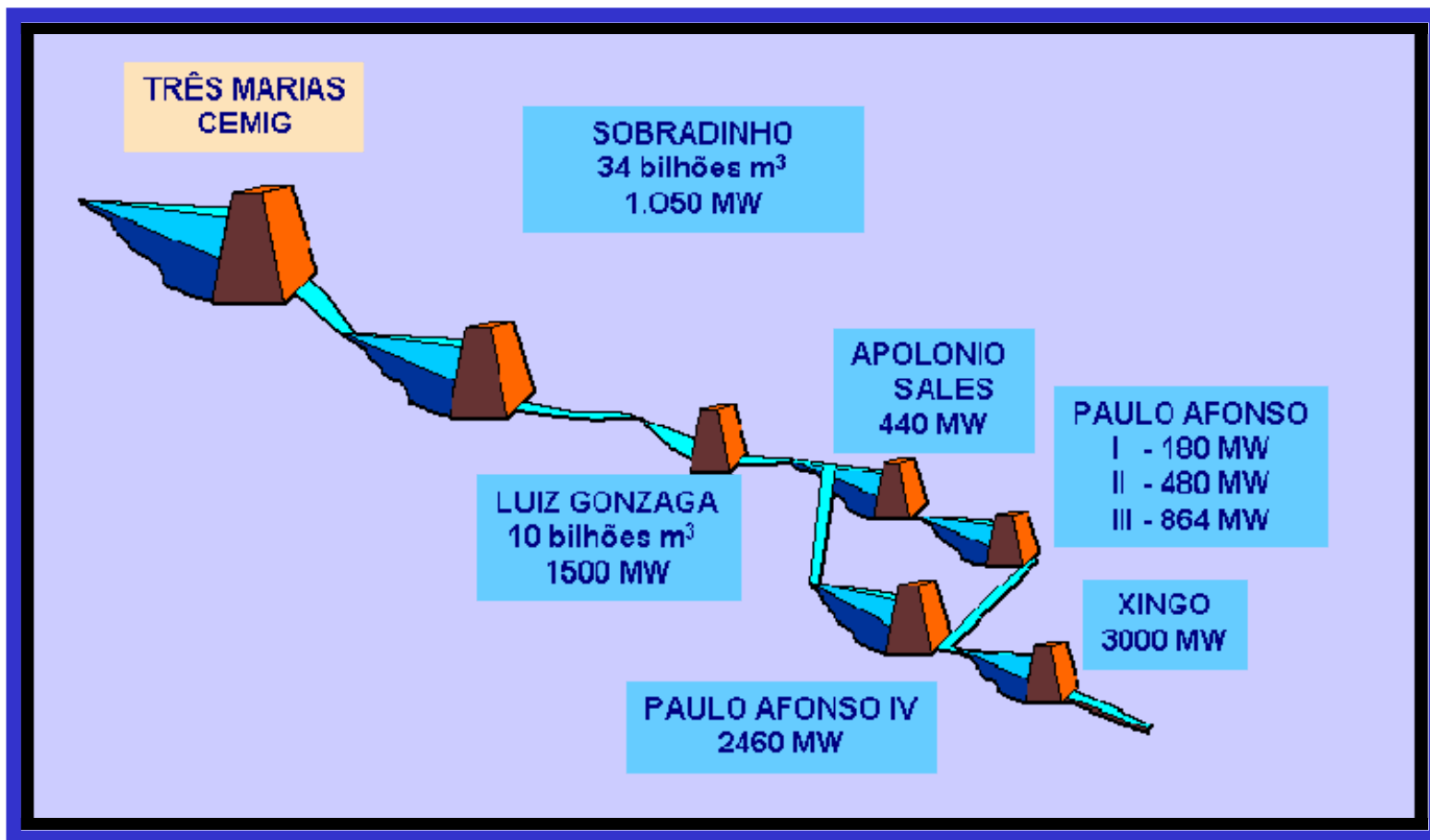




# A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO



## HIDRELÉTRICAS DO RIO SÃO FRANCISCO



Potencial energético: 10.356 MW = 17% energia do país



# **CHESF – UHE Sobradinho**

## **Rio São Francisco – BA/PE**

**Potência: 1050 MW**



**UHE Sobradinho - 1979**

# **CHESF – UHE Itaparica**

## **Rio São Francisco – BA/PE**

**Potência: 1479 MW**



**UHE Itaparica - 1988**

# **CHESF – CHE Paulo Afonso**

## **Rio São Francisco – BA/PE/AL**

**Potência: 4.729 MW**



**UHE Moxotó - 1977**



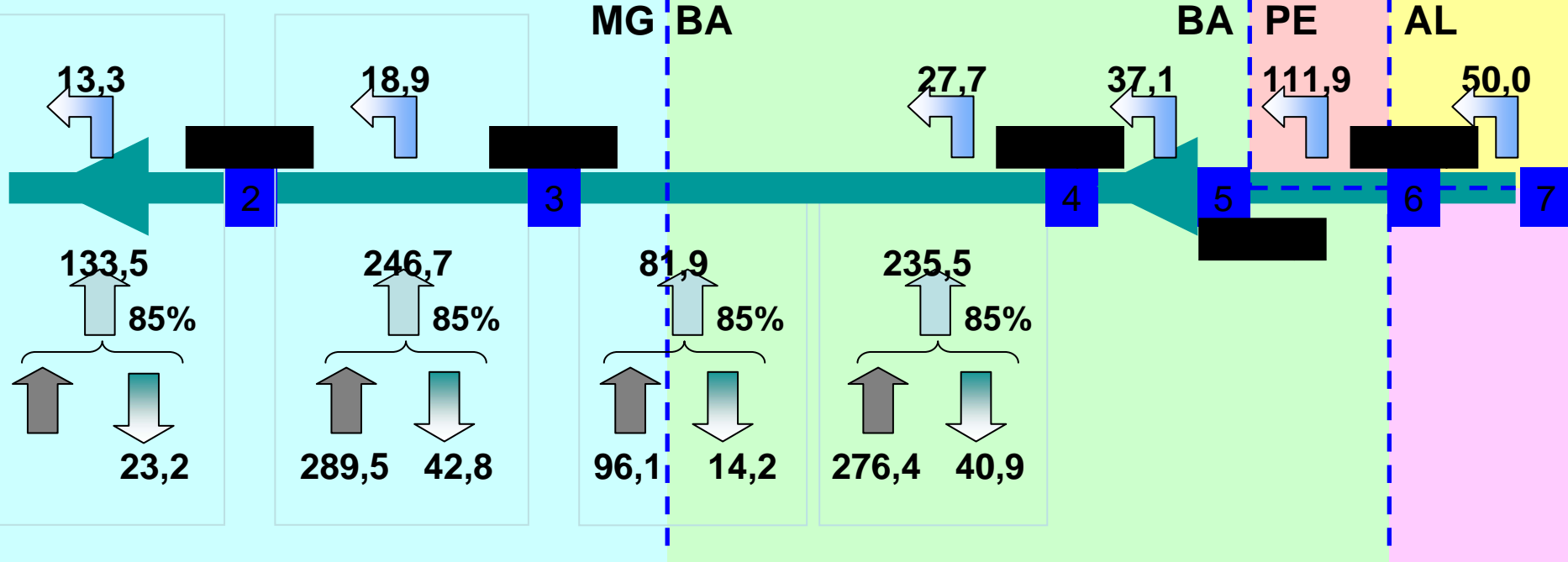
# **CHESF – UHE Xingó**

## **Rio São Francisco – AL/SE**

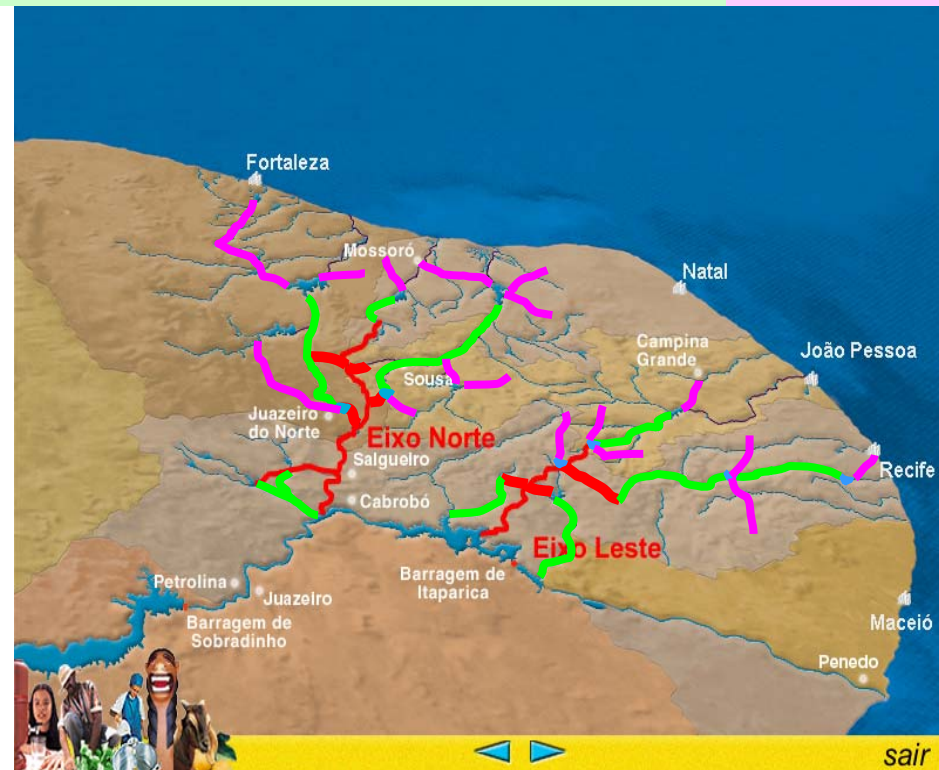
**Potência: 3.162 MW**



**UHE Xingó - 1994**



## Alocação de água na bacia do rio São Francisco



1. Transposição resolve o problema das populações esparsas?

Resp: Não

O que fazer?

Cisternas e Programa Água Doce





## TERMO DE RECEBIMENTO DA CISTERNA

UF	Nº 35.374
PE	da cisterna

Convênio ANA/DIACONIA/UNICEF Nº 019/2001

Unidade Executora: **CAATINGA**

Localização do Projeto Demonstrativo

Município: GRANITO

Estado: PE

Localidade: CONTRA SECA

Nome do Beneficiário: **MARIA HELENA GONÇALVES DOS SANTOS**

Nº de pessoas na família: 07      Adultos: 02      Crianças: 05

CUSTO FINANCEIRO R\$: 600,00

CUSTO NÃO FINANCEIRO: MÃO-DE-OBRA FAMILIAR – R\$ 120, 00

Período de Construção: Início: 09/02/02      Término: 12/02/02



Declaro que recebi Do Projeto Demonstrativo de 01 (uma) Cisterna de Placas de 16.000 litros na localidade acima referida.

*Maria Helena Gonçalves dos Santos*

CPF ~~983894594~~-34

983.894.594-34

2. Transposição resolve o problema das populações urbanas?

Resp: Parcialmente

O que falta?

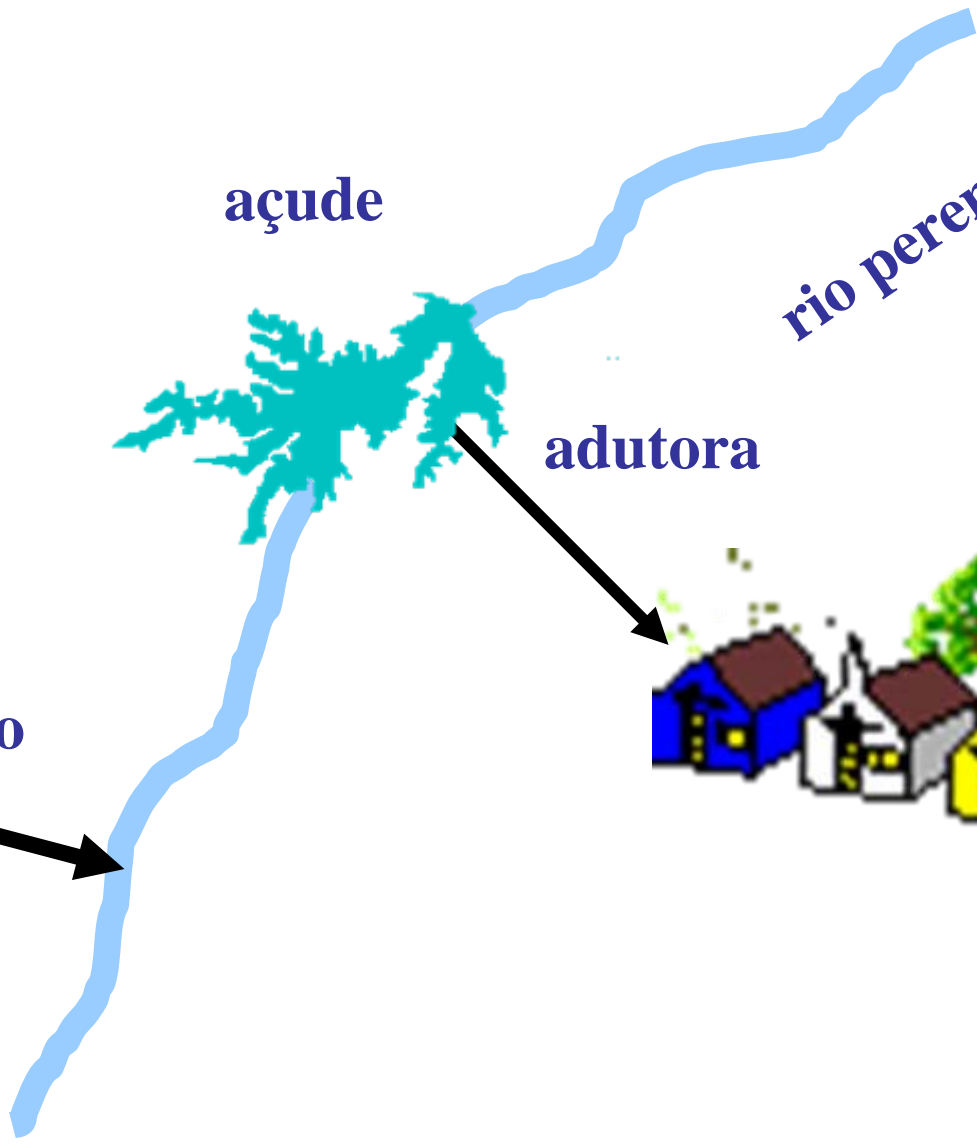
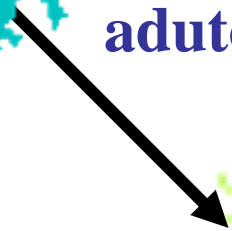
Adutoras e canais para “fazer a água caminhar” dos açudes para onde as pessoas vivem e trabalham

**açude**

**rio perenizado**

**adutora**

**transposição**





3. Transposição resolve o problema da má utilização da infra-estrutura hídrica existente (por exemplo, poços e dessalinizadores)?

Resp: Não

O que falta?

Parceria Público Privada com os Pequenos: pagar a pequenos empreendedores locais por metro cúbico de água disponibilizada para a população

4. Transposição resolve o problema do saneamento ambiental (abastecimento de água, esgotamento sanitário, lixo, controle de enchentes)?

Resp: Não

O que falta?

Programa de revitalização de bacias hidrográficas

Se a Transposição não resolve nenhum destes problemas, por que fazê-la?

a) para aumentar a garantia de abastecimento das populações urbanas

b) para guardar água excedente do rio São Francisco nos açudes existentes na região receptora, para uso futuro; existe “excesso” quando Sobradinho estiver quase cheio, na iminência de jogar água fora pelo “ladrão”



Duas falácias:

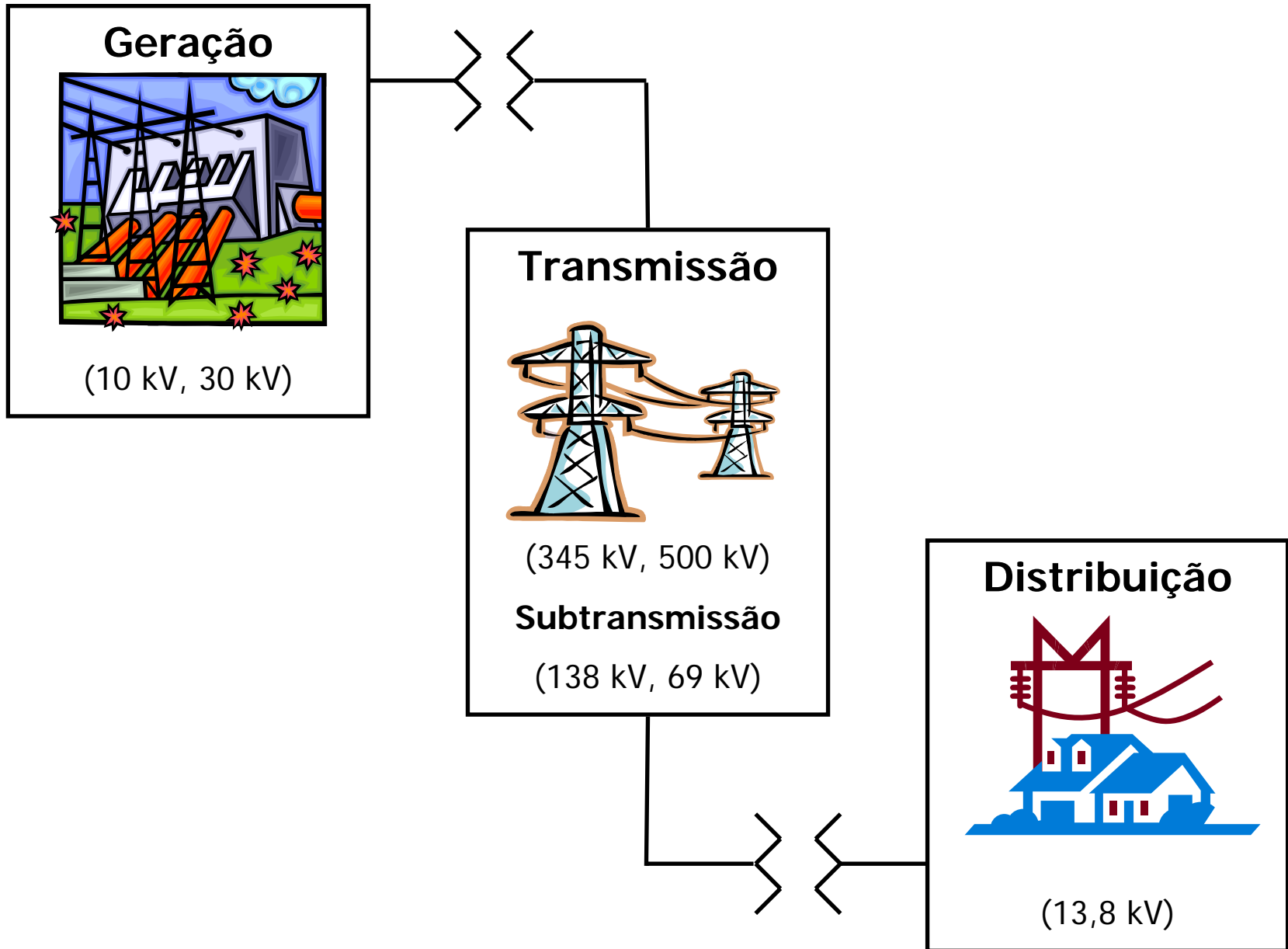
1) A água hoje existente na região receptora seria suficiente para abastecer toda a população.

É verdade, desde que se proibisse a utilização de água para outro uso (indústria e irrigação). Ou seja, estrangular o desenvolvimento da região.

2) A retirada de água secará o rio São Francisco.

Não é verdade: o efeito da transposição na disponibilidade hídrica do rio São Francisco é insignificante.

# Segmentos do setor elétrico



# Modelos setoriais

---

- O modelo de organização de um setor elétrico pode ser caracterizado pelas respostas às seguintes perguntas:
  - A quem pertencem os ativos de geração, transmissão e distribuição?
  - Quem decide preço e quantidade na operação do sistema?
  - Quem decide os reforços da infra-estrutura de produção e transporte?
  - Como são remunerados os investimentos?



# Modelo centralizado

---

- A quem pertencem os ativos?
  - Governo (federal e estadual) - Exemplo: Eletrobrás, Furnas, Cemig
- Quem decide a operação do sistema?
  - O agente de planejamento (GCOI)
- Quem decide os reforços da infra-estrutura?
  - O agente de planejamento (GCPS); o investimento é feito pelas empresas estatais
- Como são remunerados os investimentos?
  - Tarifa para o consumidor calculada pelo governo

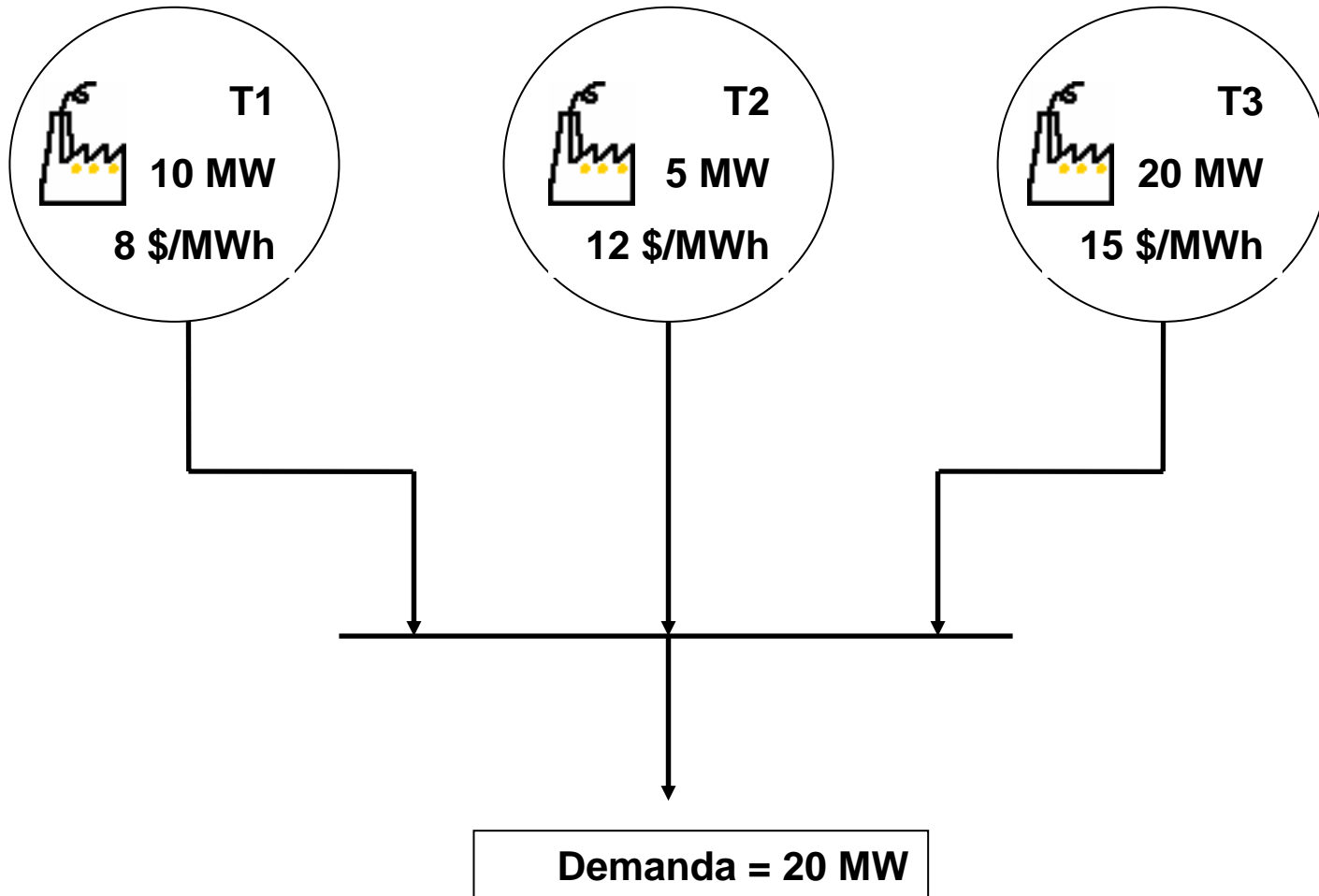
# **Despacho econômico**

---

- Operar o sistema é definir, a cada etapa do tempo, quais usinas serão acionadas para atender a demanda de energia elétrica
- Entretanto os recursos disponíveis (usinas) possuem custos de operação distintos
- Critério: atender a demanda ao menor custo operativo possível

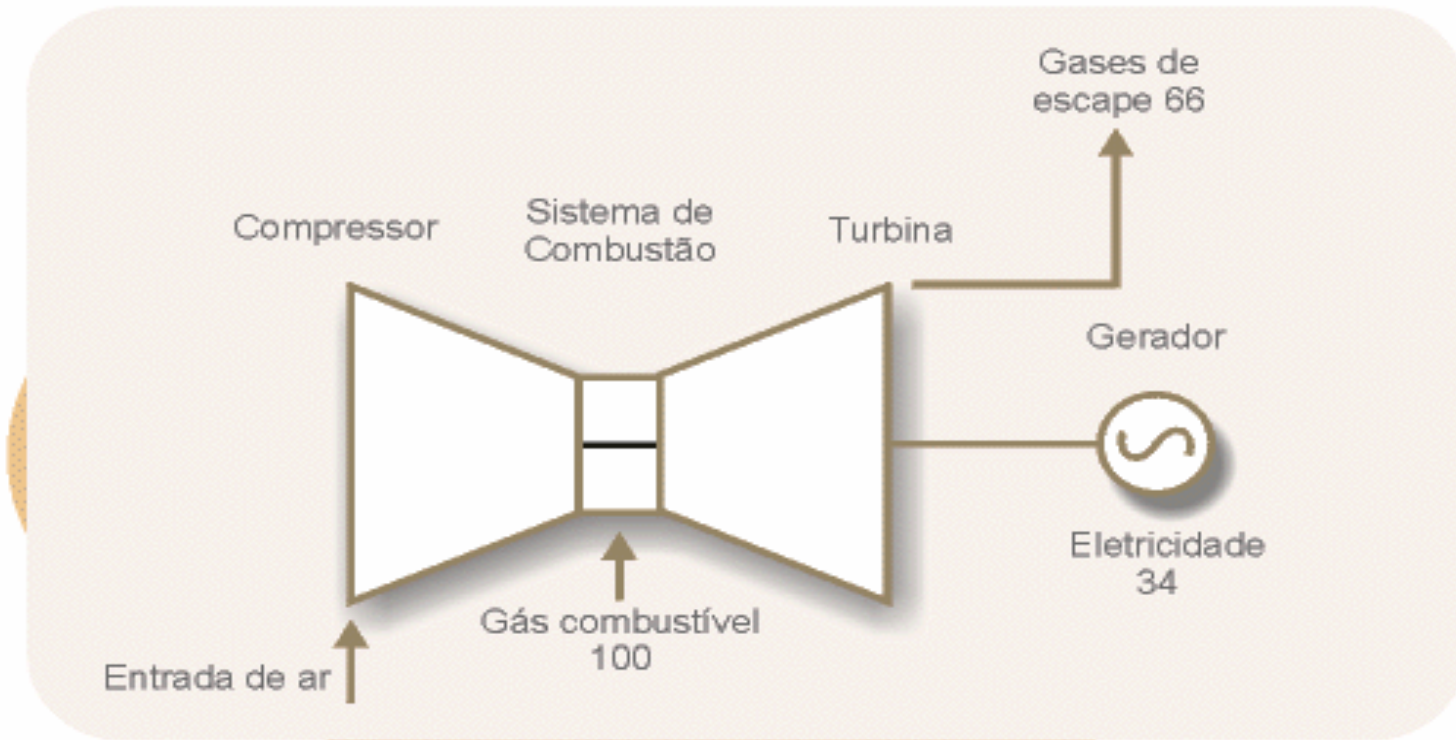
# Exemplo 1: Despacho térmico

---



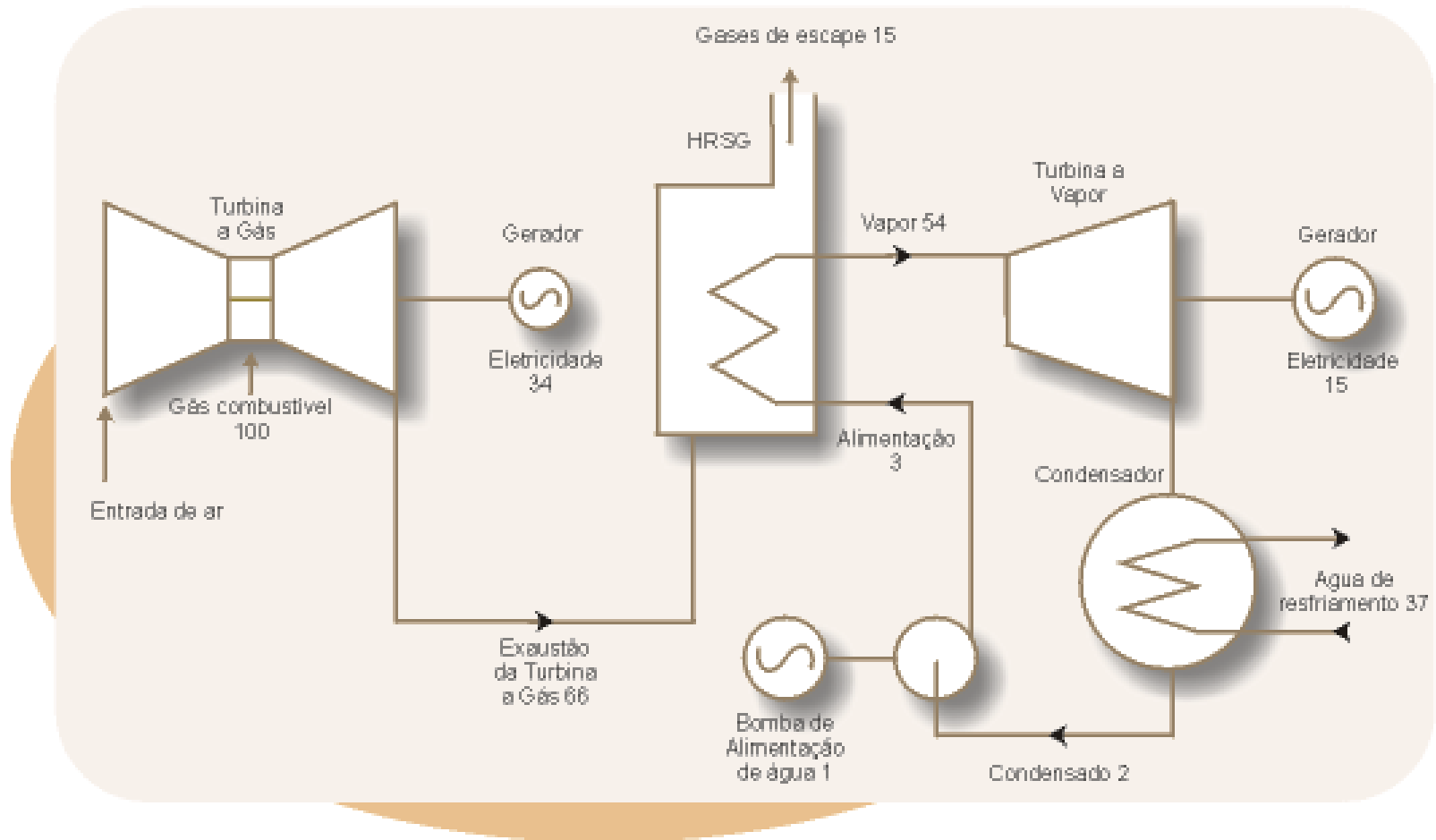
# Usina térmica a gás ciclo simples

---



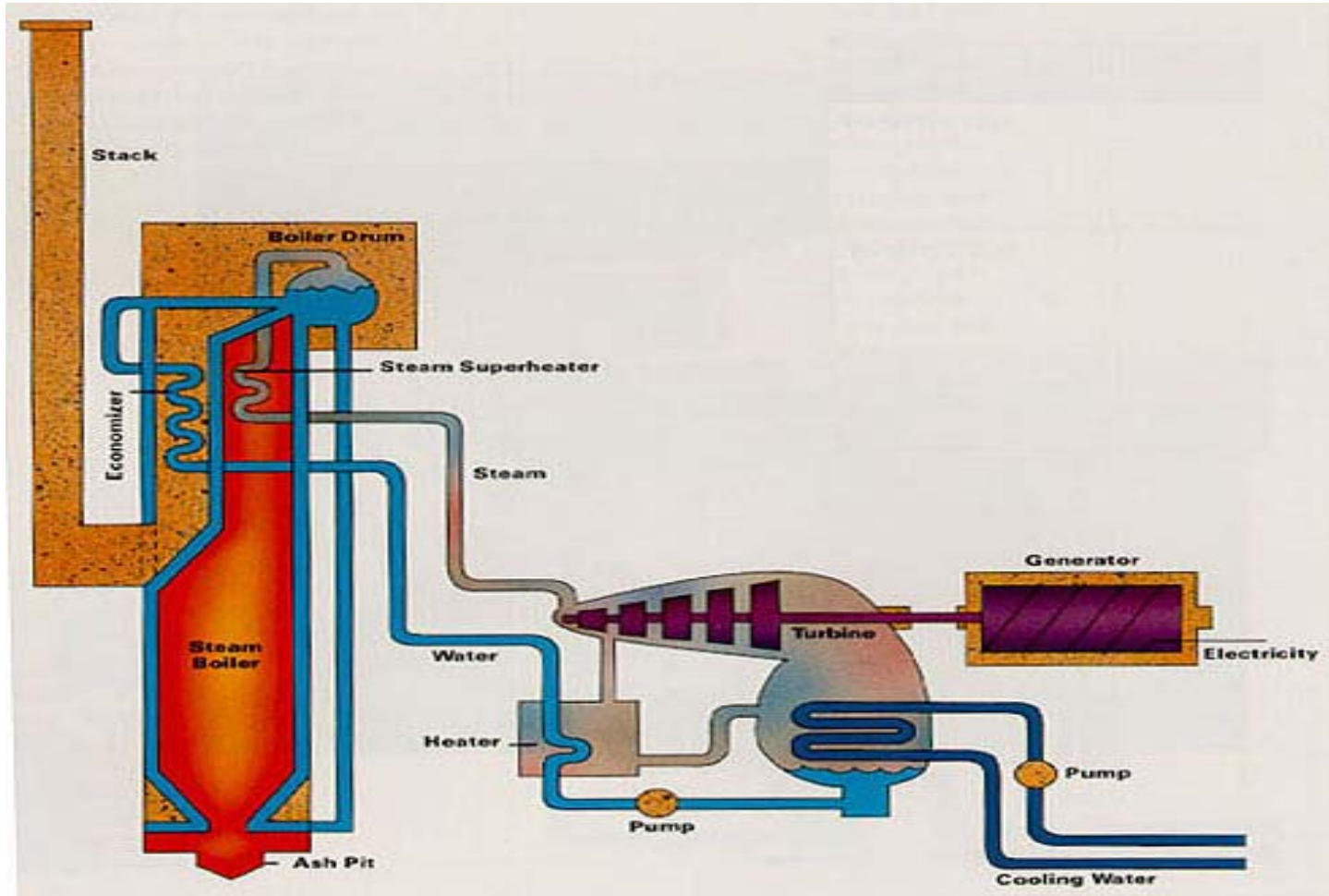


# Usina térmica a gás com ciclo combinado

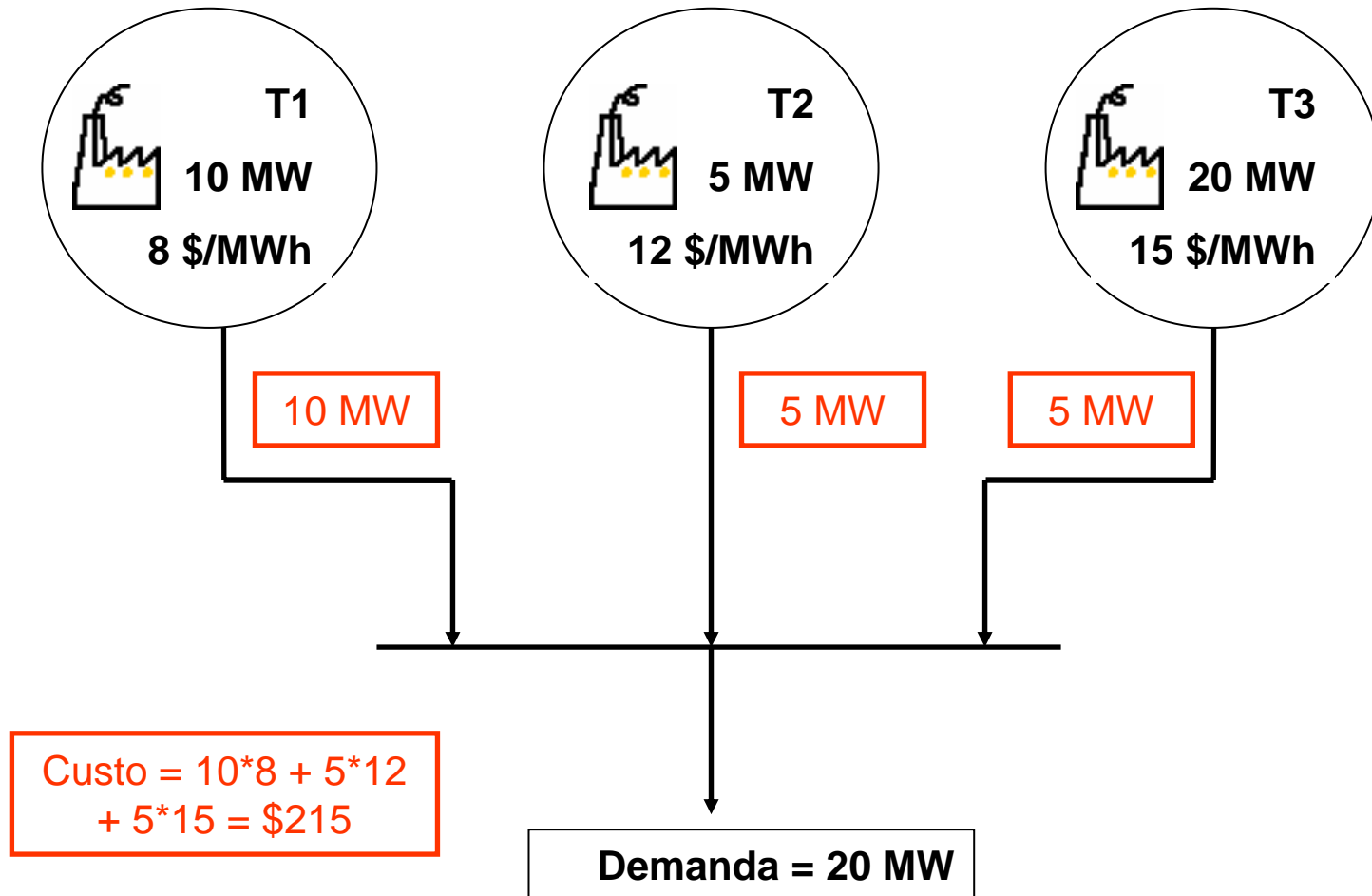


## 2. Usina térmica a óleo

---

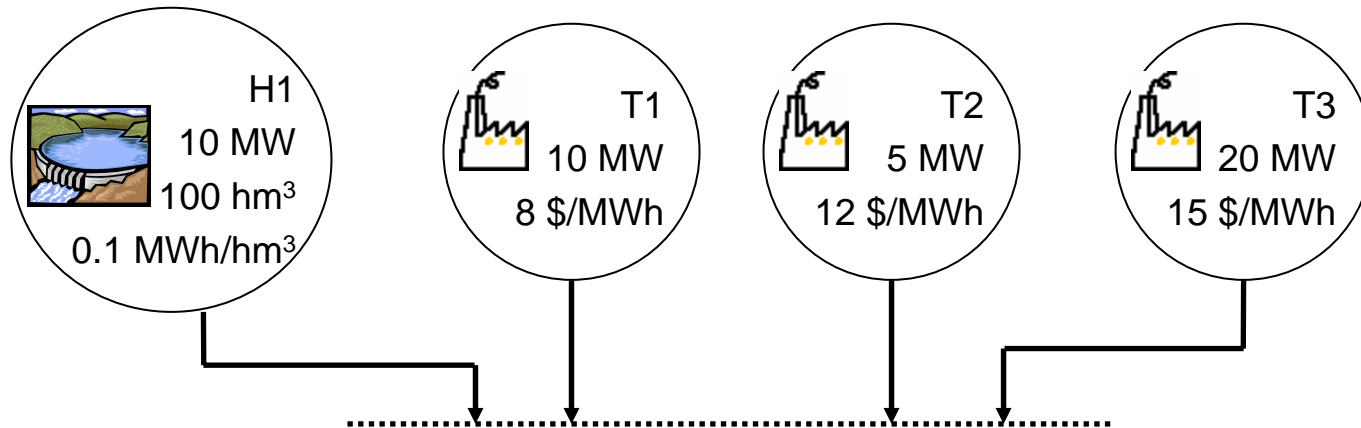


# Exemplo 1: Despacho térmico - solução



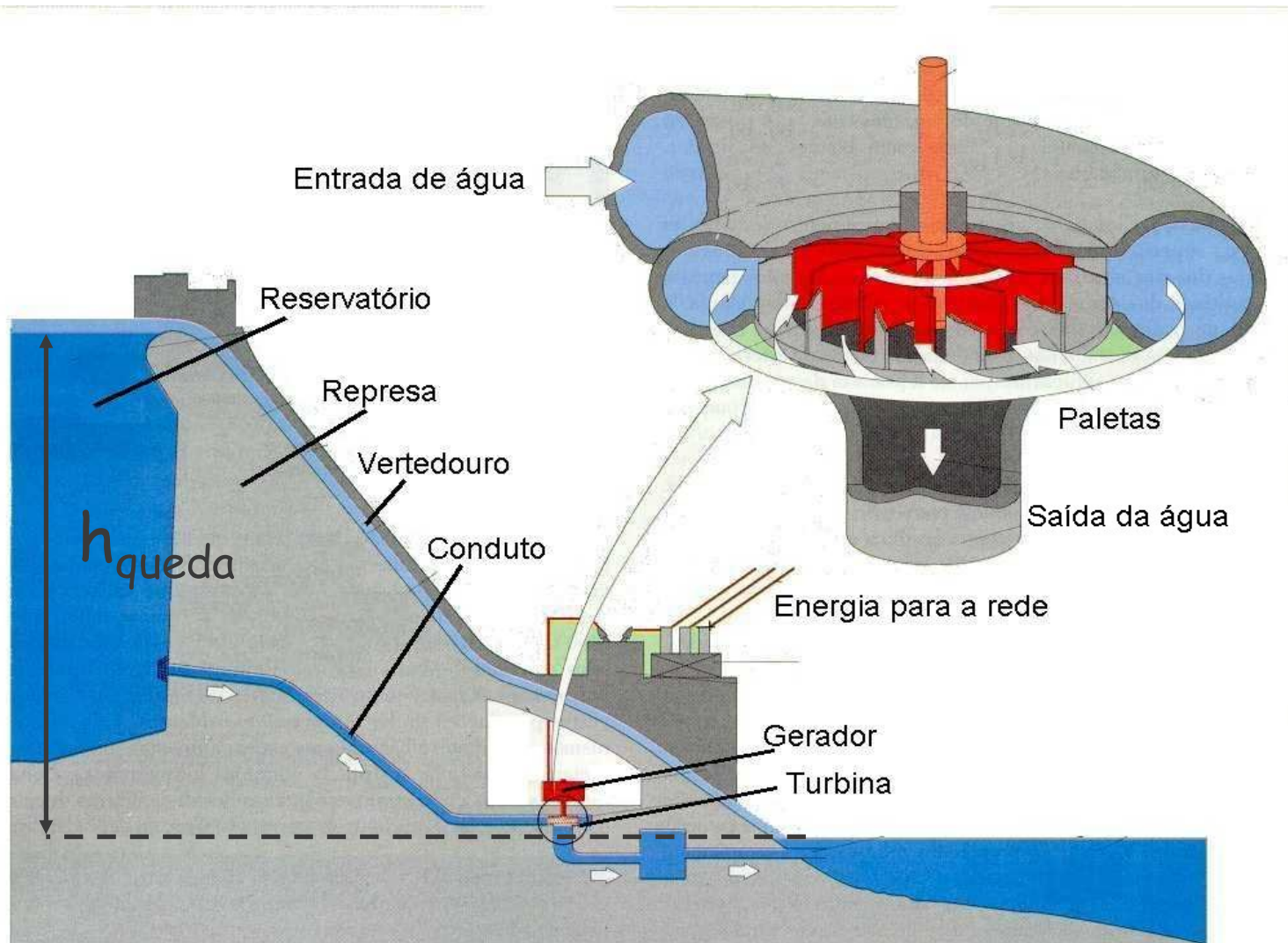
# Ex. 2: Despacho hidrotérmico - 1 estágio

---





# Usinas hidrelétricas



# Função de produção de energia

---

A produção de energia elétrica  $E$  (MW) é proporcional ao produto da vazão turbinada  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) pela altura de queda líquida  $h_{\text{liq}}$  (m)

$$E = k \eta(Q) h_{\text{liq}} Q$$

Onde:

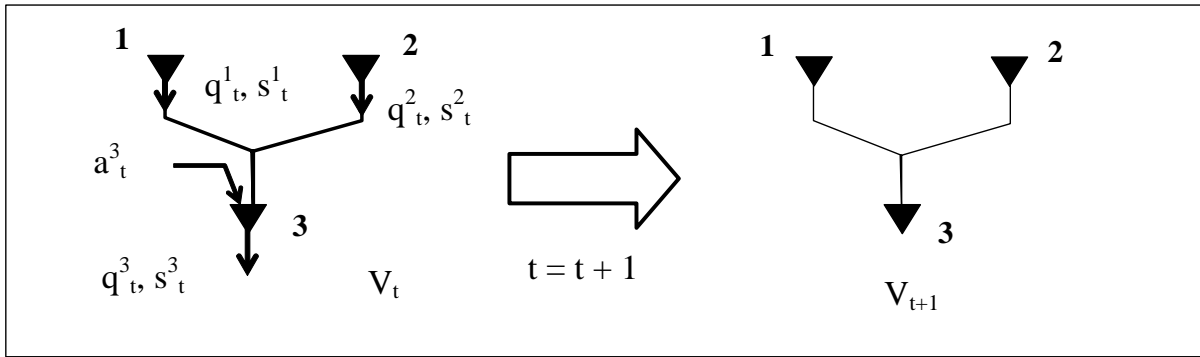
$k$  = aceleração da gravidade  $\times 10^{-3}$

$\eta(Q)$  é a eficiência do conjunto turbina-gerador (em p.u)

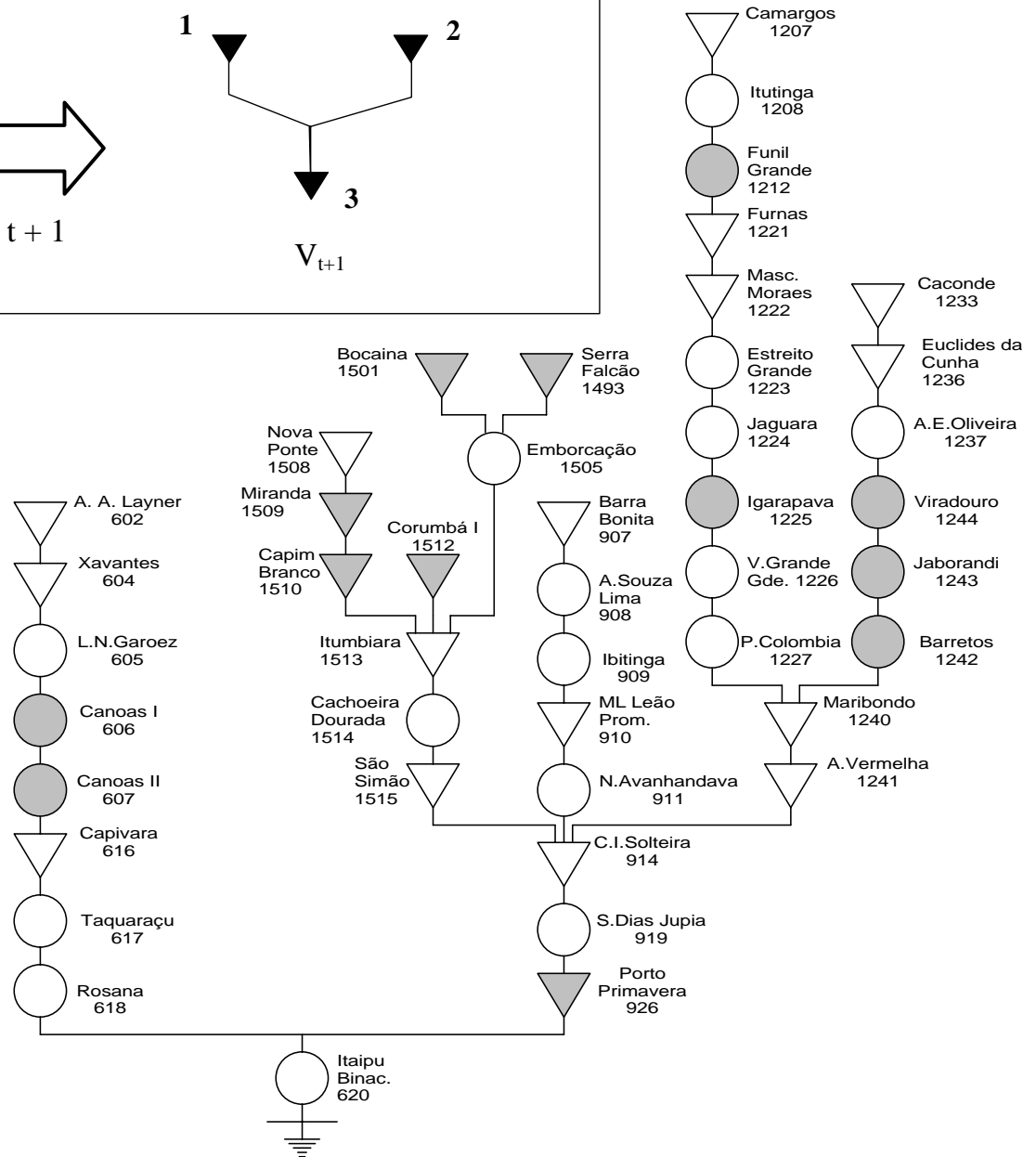
$h_{\text{liq}}$  é descrita a seguir

# Limites de armazenamento

- Volume máximo
  - Se o volume máximo é excedido, a barragem pode ser destruída; o excesso é desviado para os vertedores
- Volume mínimo
  - Volume abaixo do qual não se pode – ou não se deve – operar a usina
- Obs.: usina a fio d'água: volume máximo = mínimo



# Usinas em Cascata

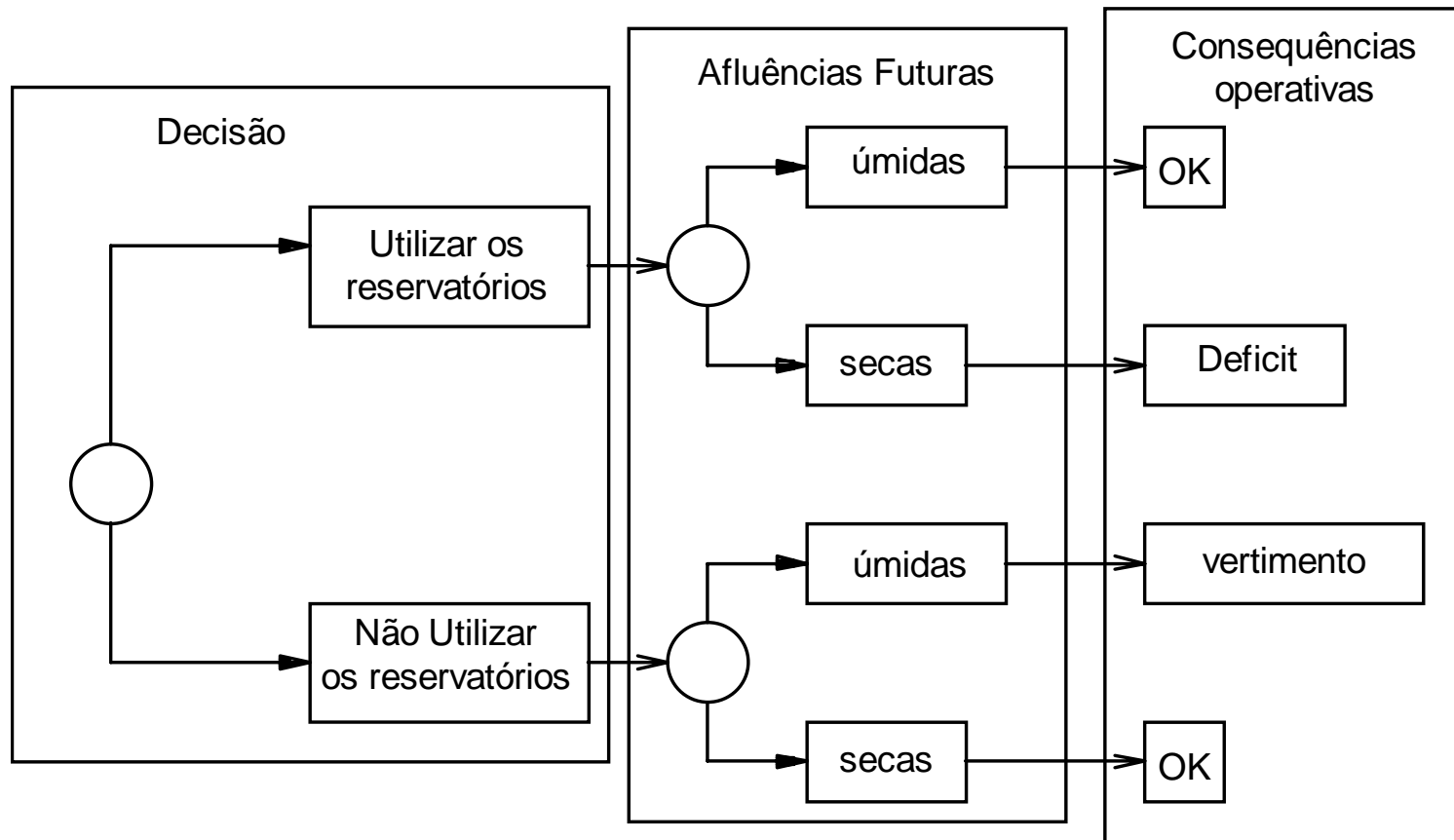




# Características do despacho hidrotérmico

- O despacho hidrotérmico ótimo é o que minimiza a soma do custo total = custo imediato + custo futuro (que depende da decisão do custo imediato)
- A solução ótima não é gerar toda a hidrelétrica logo no primeiro estágio, embora ela tenha custo operativo = zero. Por quê?

# Porque a hidrologia é incerta

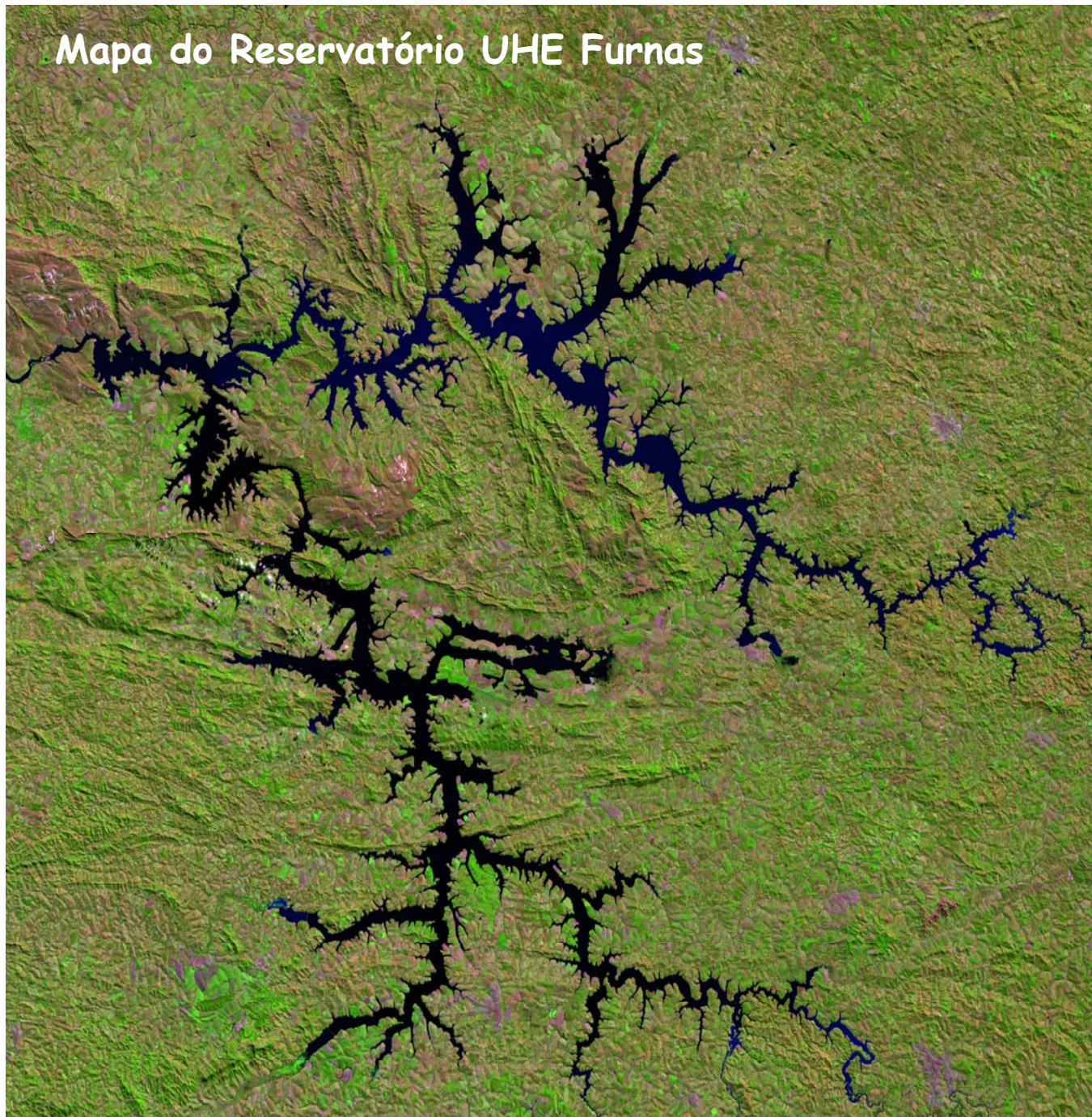


# RESERVATÓRIO DE FURNAS





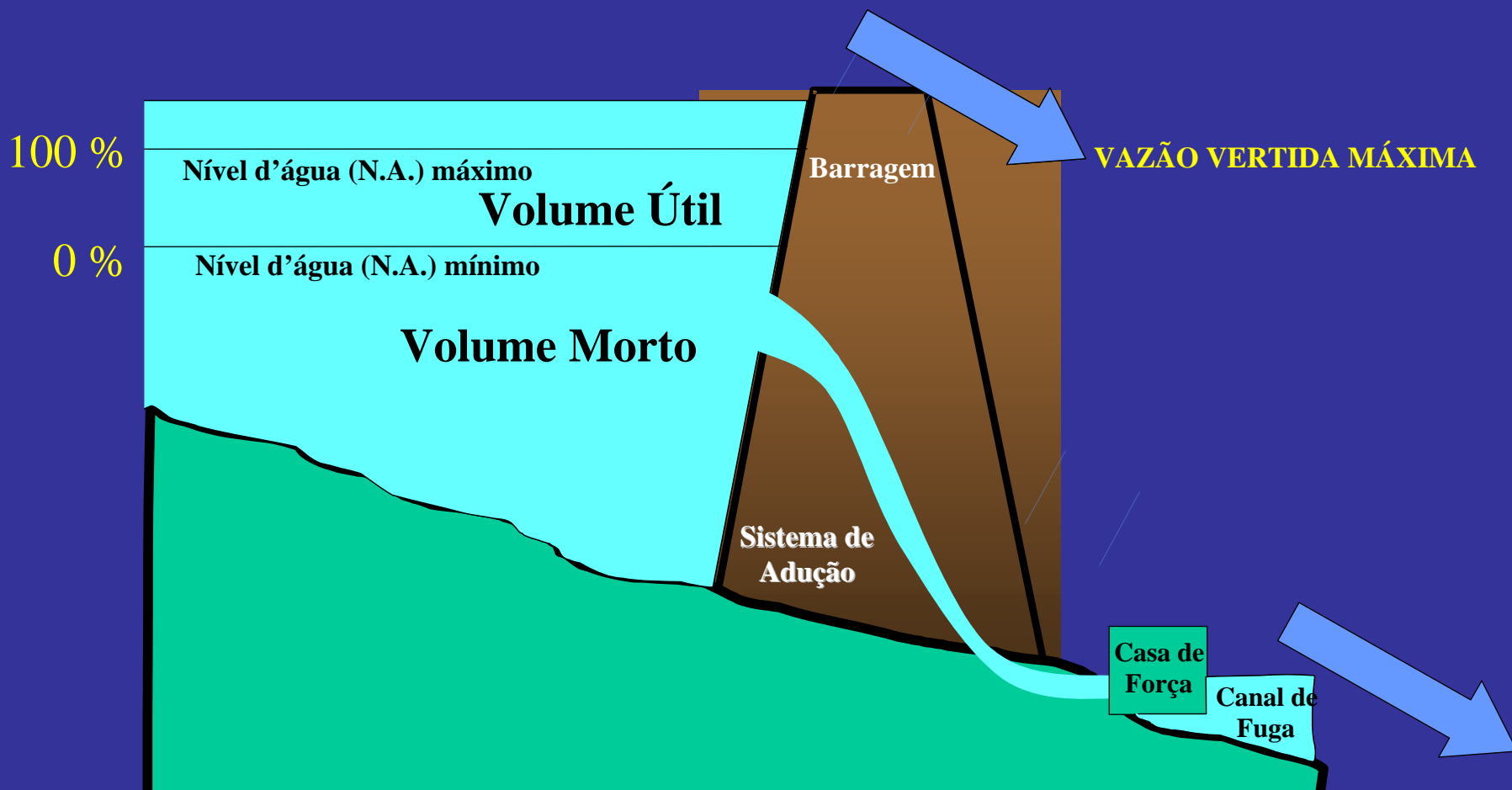
# Mapa do Reservatório UHE Furnas





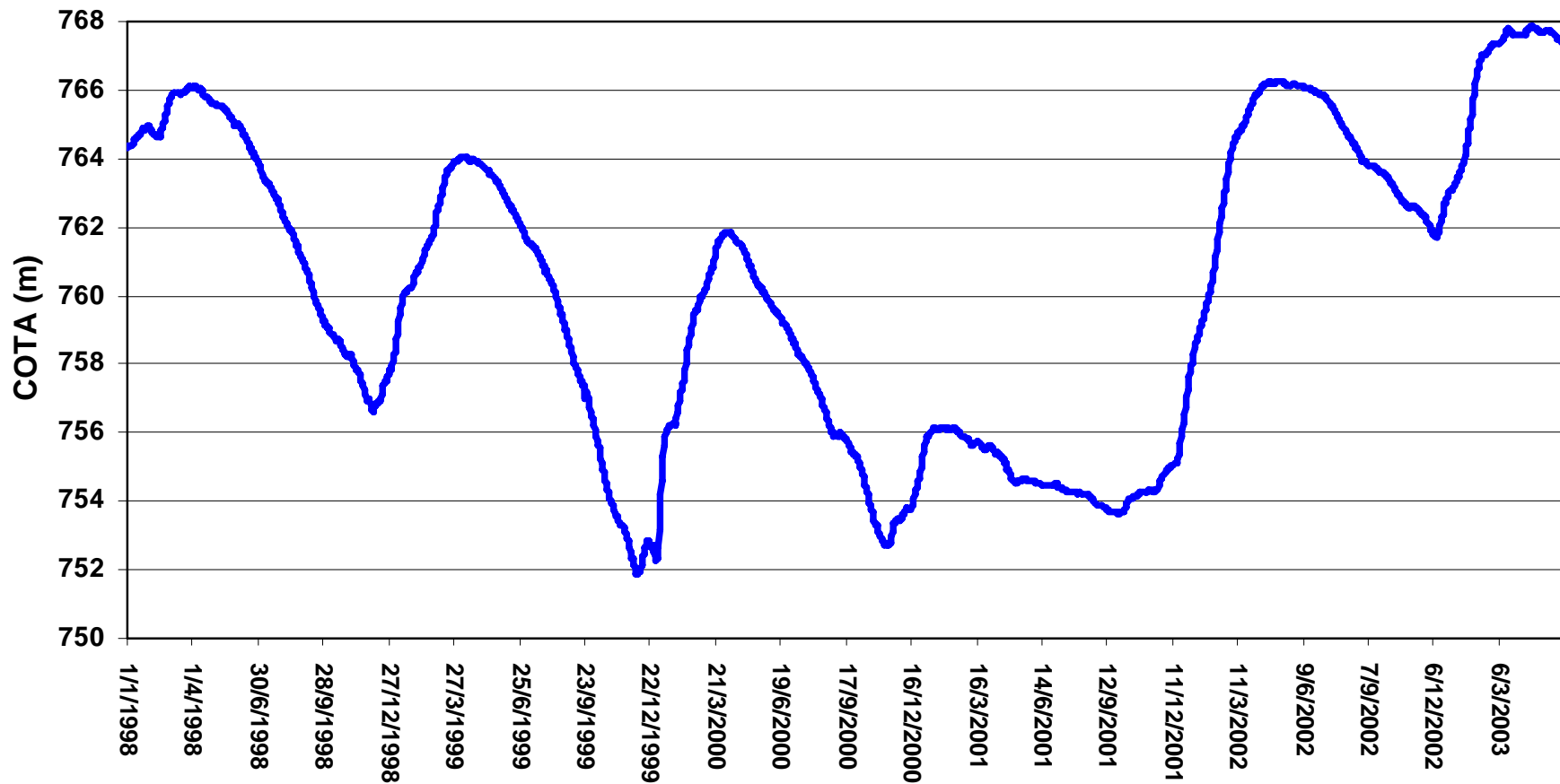
# RESERVATÓRIO FURNAS

**C max : 768 m    Vmax : 22,95 bi de m<sup>3</sup>    Amax: 1.440 km<sup>2</sup>**  
**C min : 750 m    Vmin : 5,73 bi de m<sup>3</sup>    Amin: 530 km<sup>2</sup>**  
**H : 18 m    Vutil : 17,22 bi de m<sup>3</sup>**

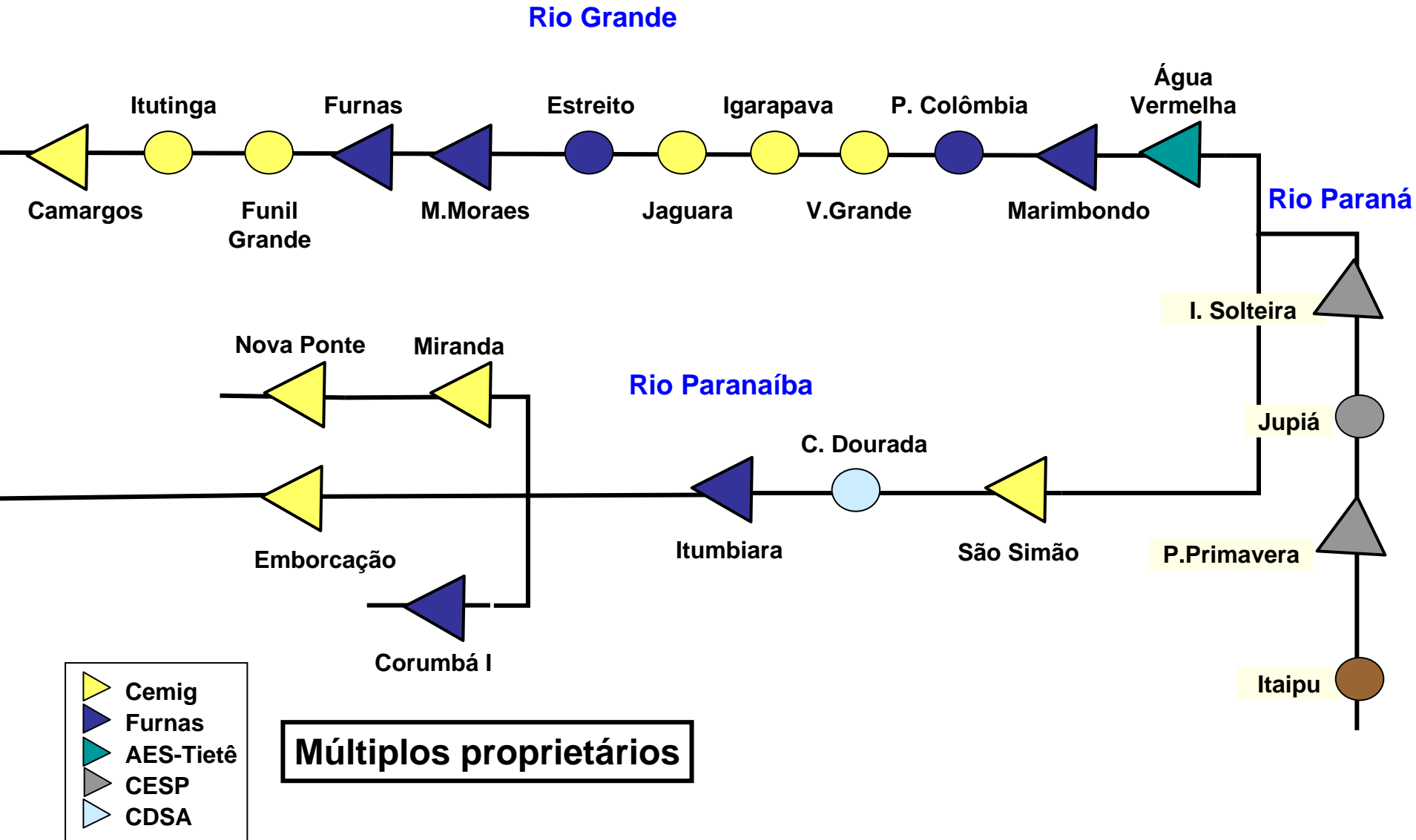


# RESERVATÓRIO DE FURNAS

## EVOLUÇÃO DO NÍVEL



# Características do SIN - Interdependência de Usinas em Cascata



# FURNAS – UHE Estreito Rio Grande – MG/SP

Potência: 1050 MW



**UHE Estreito – 1969**

# FURNAS – UHE Marimbondo

## Rio Grande – MG/SP

Potência: 1440 MW



**UHE Marimbondo – 1975**



# **CESP – UHE Porto Primavera**

## **Rio Paraná – SP/MS**

**Potência: 1540 MW**



**UHE Porto Primavera - 2003**

# **CESP – UHE Ilha Solteira**

## **Rio Paraná – SP/MS**

**Potência: 3444 MW**



**UHE Ilha Solteira - 1978**

# ITAIPÚ BINACIONAL – UHE Itaipú

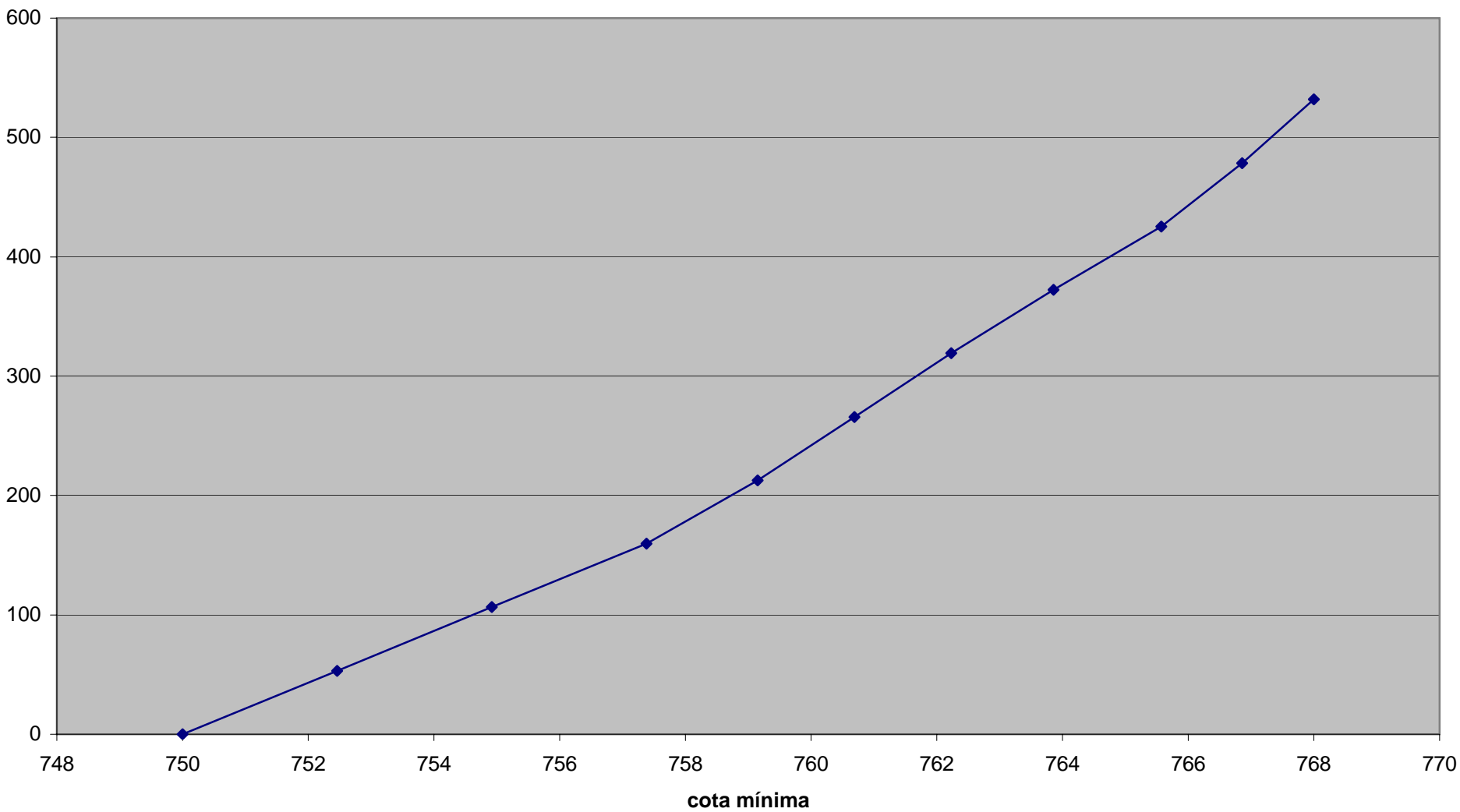
## Rio Paraná - Brasil/Paraguai

Potência: 14.000 MW



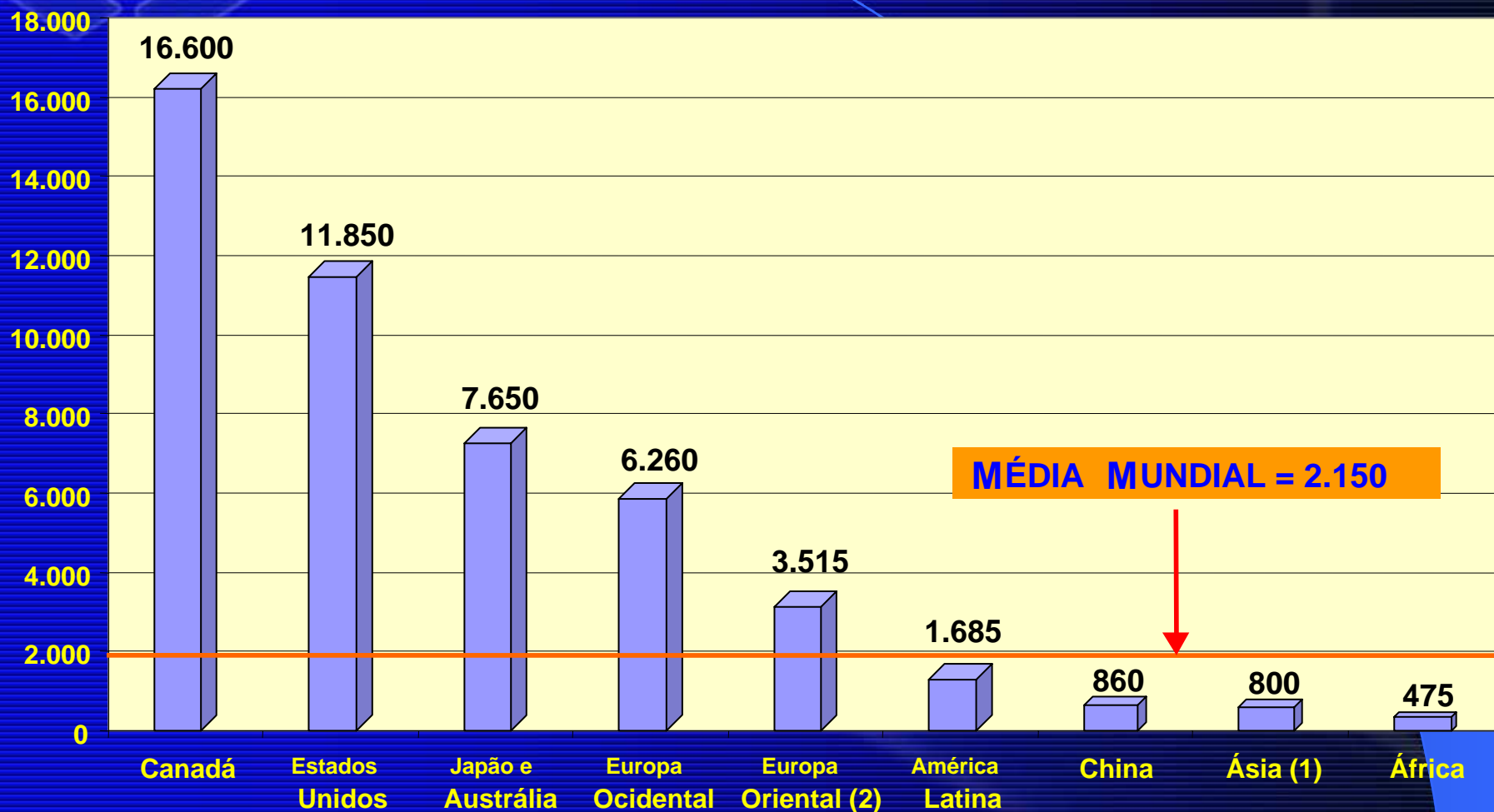
**UHE Itaipú - 1984**

Custo annual (milhões R\$/ano)



# A América Latina no Mundo

## Consumo per capita anual de Energia Elétrica (kWh)

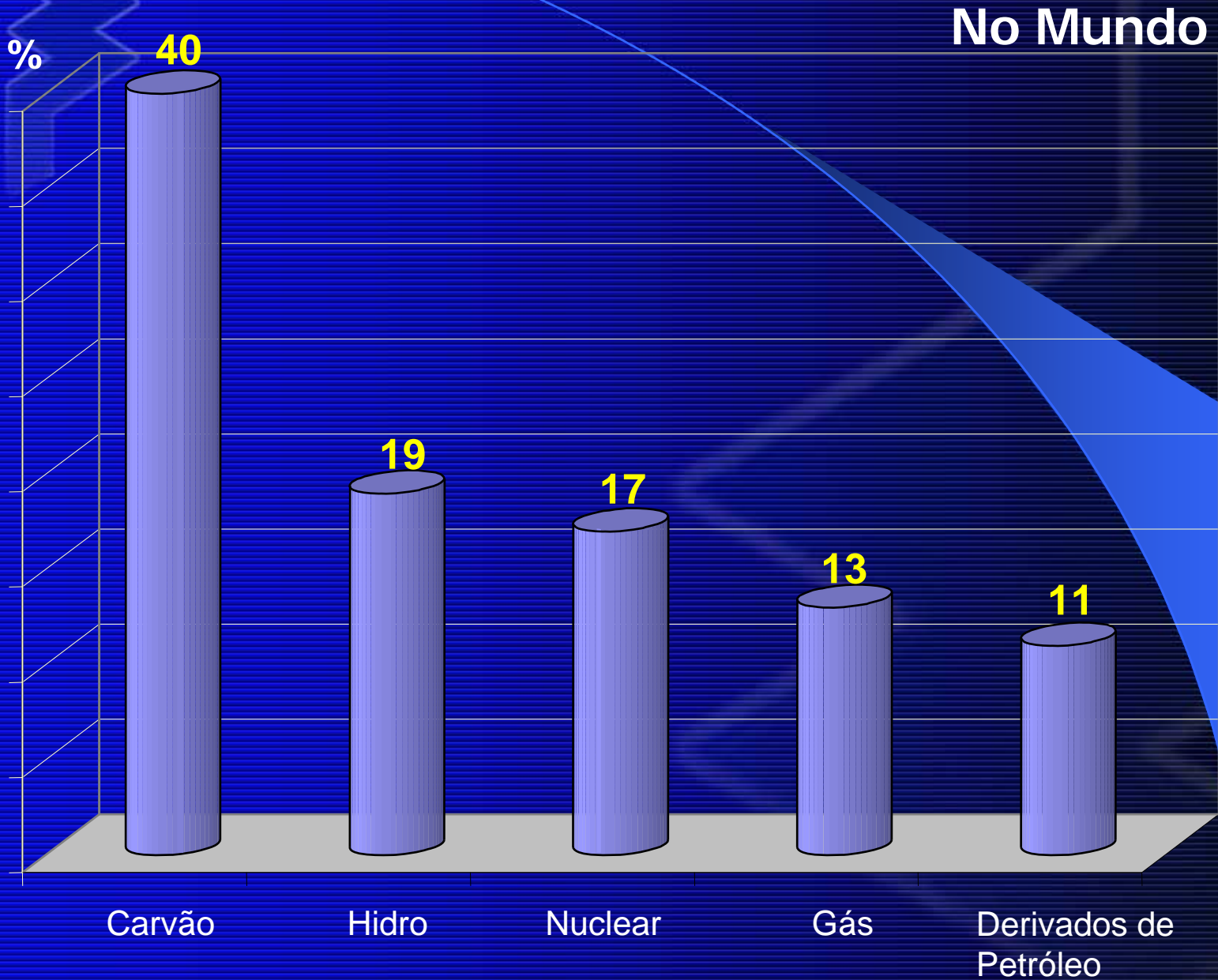


(1) Ásia em desenvolvimento, exclusive China  
 (2) inclusive ex-URSS

Fonte: Energy Information Administration, Department of Energy, USA

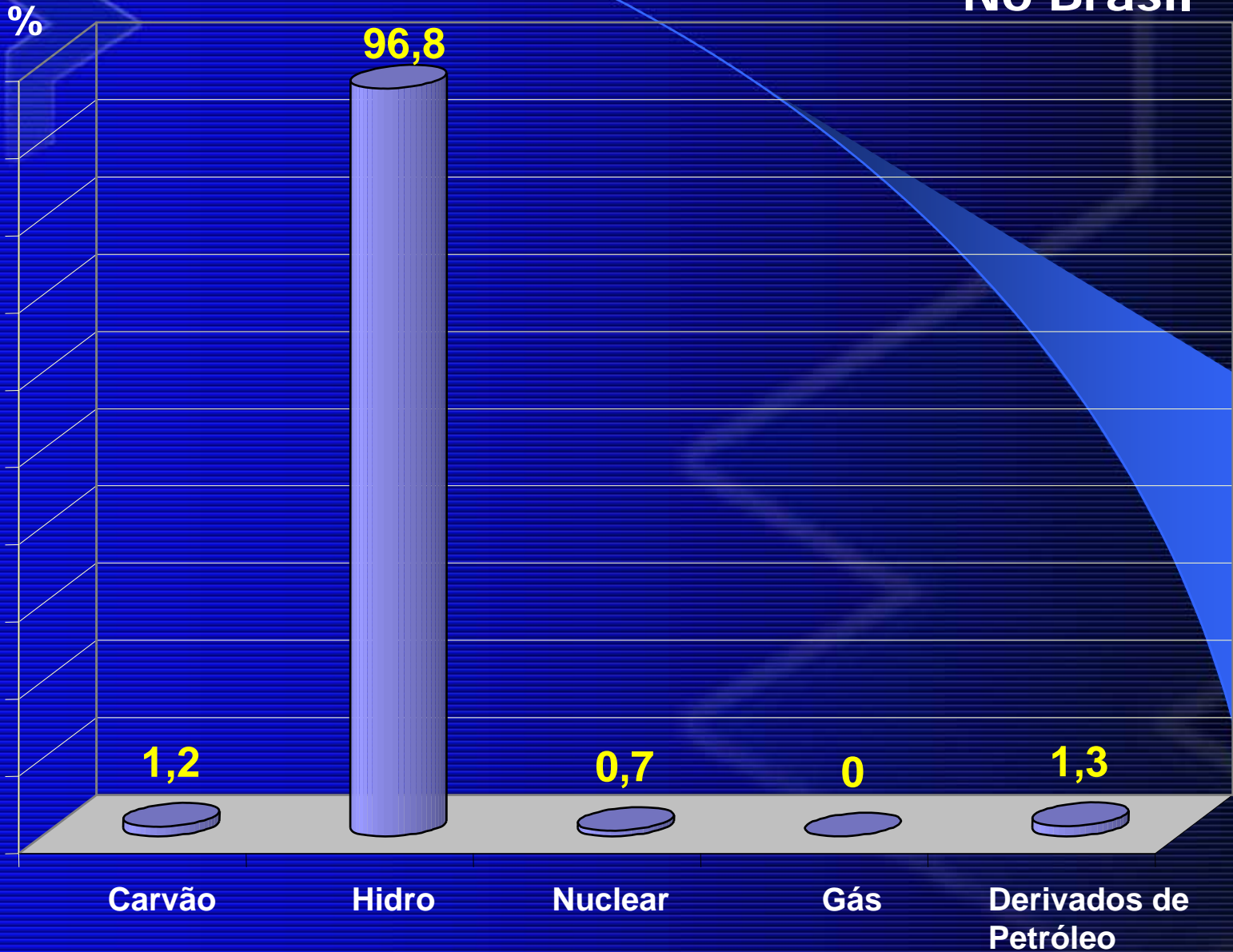


# Geração de Energia Elétrica



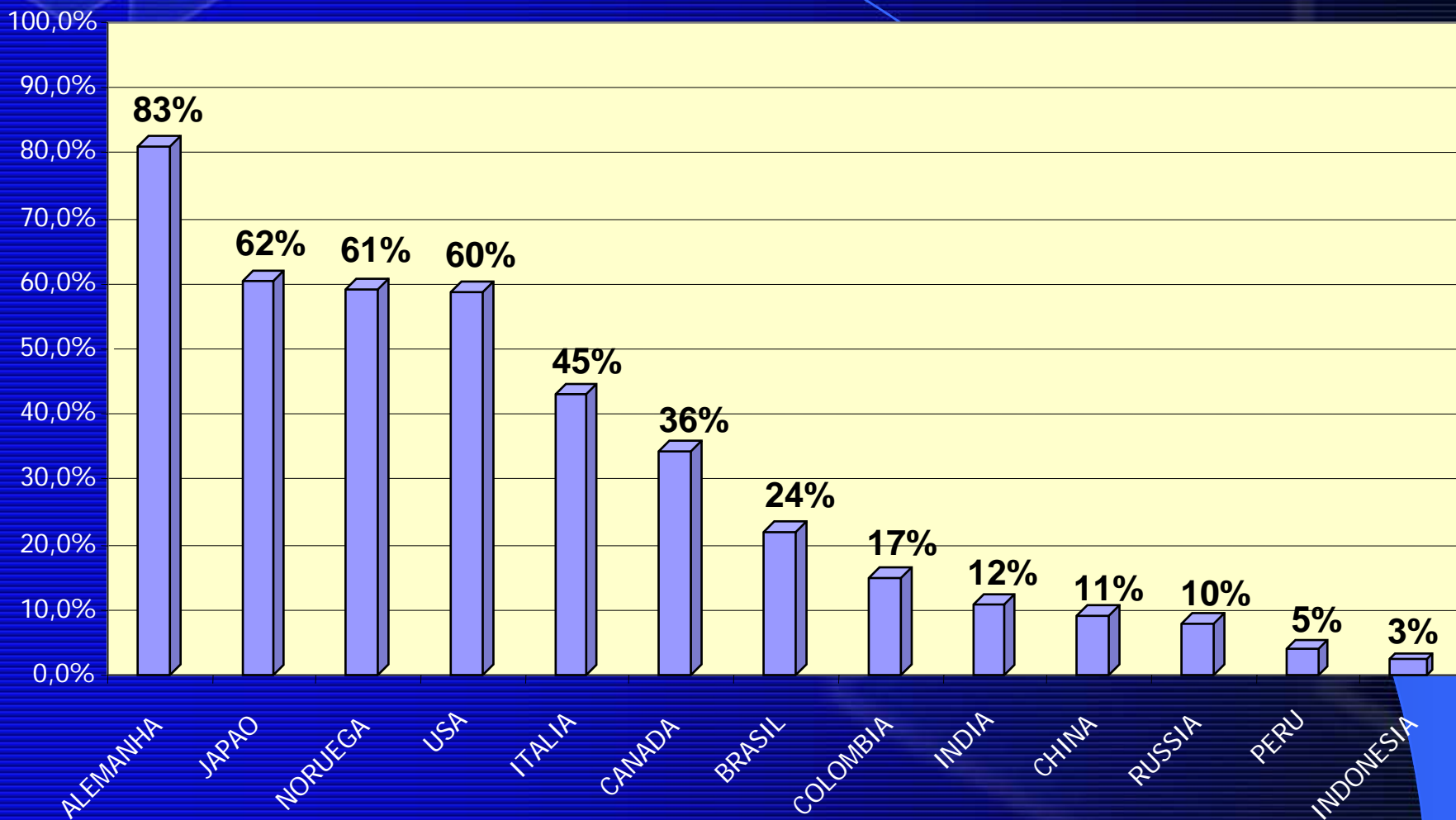
# Geração de Energia Elétrica

No Brasil



# Hidreletricidade

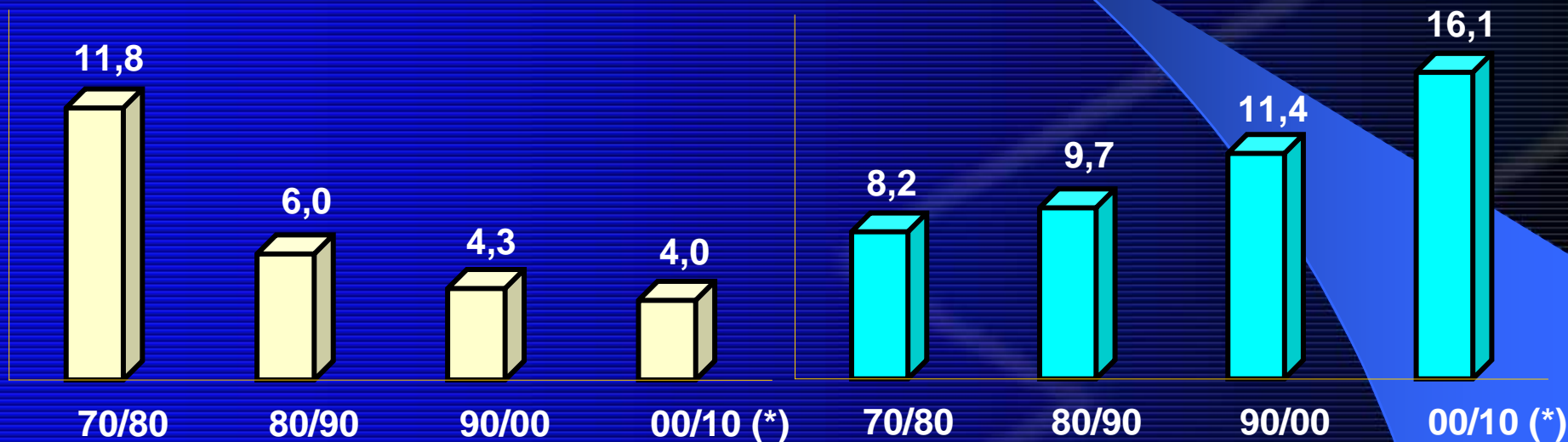
## Percentual Utilizado do Potencial Hidrelétrico



## Crescimento do Consumo de Energia Elétrica

### Crescimento Anual Médio (%)

### Incremento Anual Médio (TWh)



Mesmo taxas menores de crescimento do consumo irão significar incrementos maiores e, portanto, maiores investimentos na expansão do parque gerador.

(\*) cenário baixo de crescimento



# Distância entre AHE da Amazônia e Mercados do NE e SE





# O sistema elétrico brasileiro

➤ Capacidade instalada = 92,865 MW

- Hidroelétrica = 71,060 MW - 76.5 %
- Térmica convencional = 19,798 MW - 21.3 %
- Nuclear = 2,007 MW - 2.2 %

➤ Unidades consumidoras = 56,3 milhões

➤ Produção = 415 TWh/ano  
(55% da América do Sul)

➤ Rede de transmissão = 84,512 km

➤ Geração: ~ 2000 usinas  
15% privadas

➤ Transmissão: 26 concessionárias  
60% privadas

➤ Distribuição: 64 distribuidoras  
80% privadas



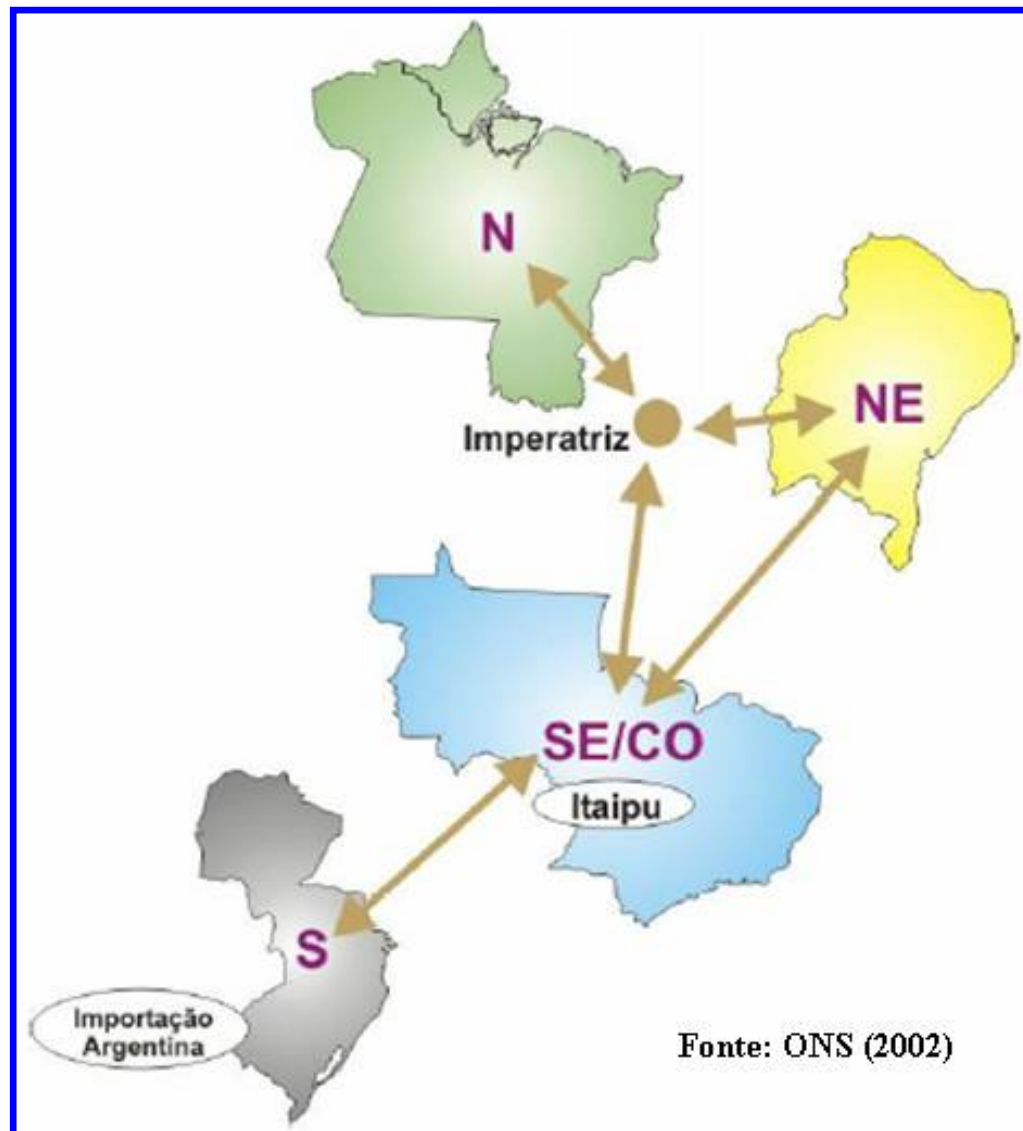
# Sistema Interligado Nacional - SIN

Sistema Hidrotérmico de grande porte

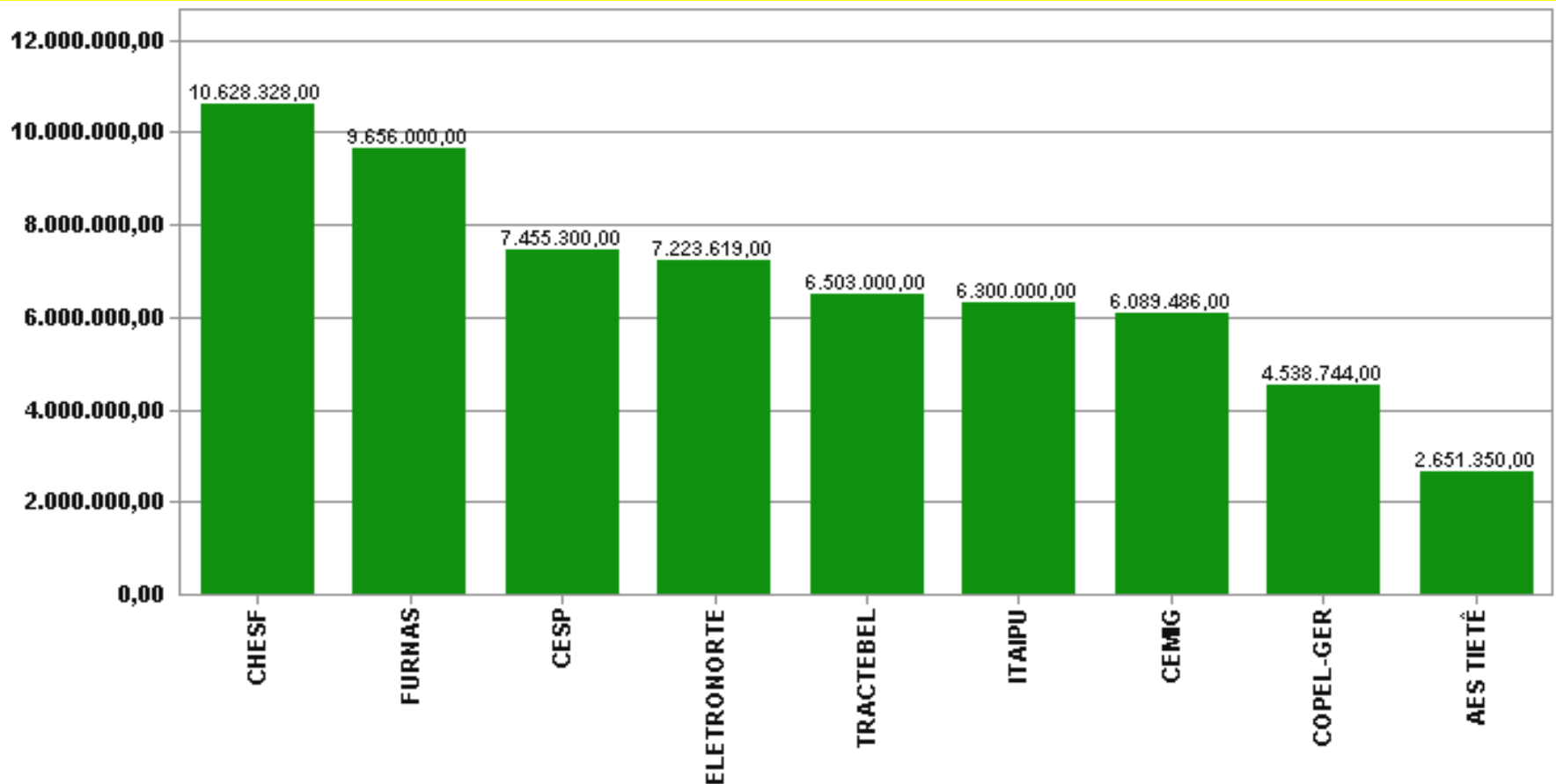
Aproveita a diversidade hidrológica em função da operação coordenada dos reservatórios

Transmissão de grandes blocos de energia e a continuidade de suprimento

96% da geração no país faz parte do SIN

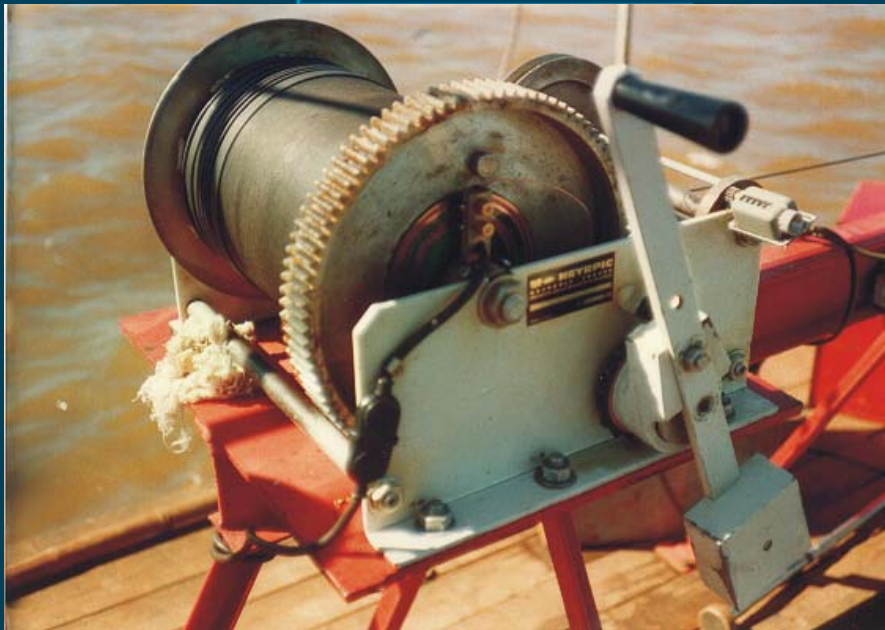


## 10 Maiores Agentes de Geração (Capacidade Instalada)



- **Monitoramento dos rios**
- **Estudos de Inventário**
- **Estudos de Viabilidade**
- **Projeto Básico**
- **Projeto Executivo**



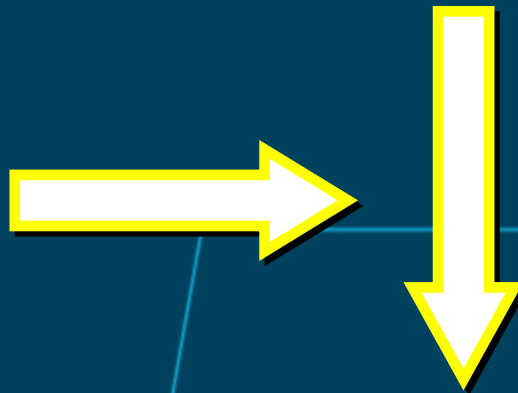




Inventário:  
**Estudos Energéticos;**

**Avaliação técnico-econômica  
comparativa entre  
alternativas de eixo**

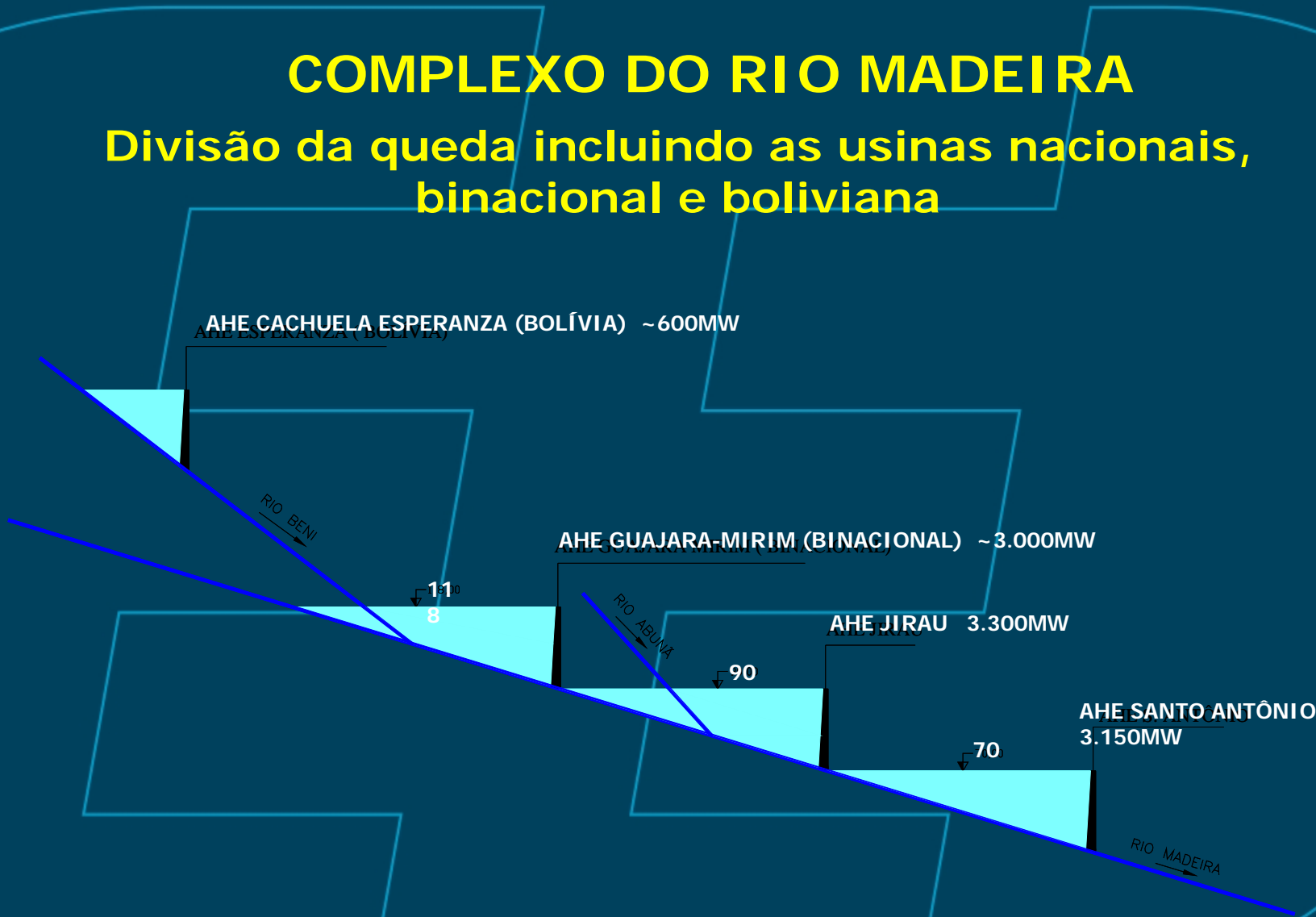
**Critério de  
aproveitamento(s)  
ótimo(s)**



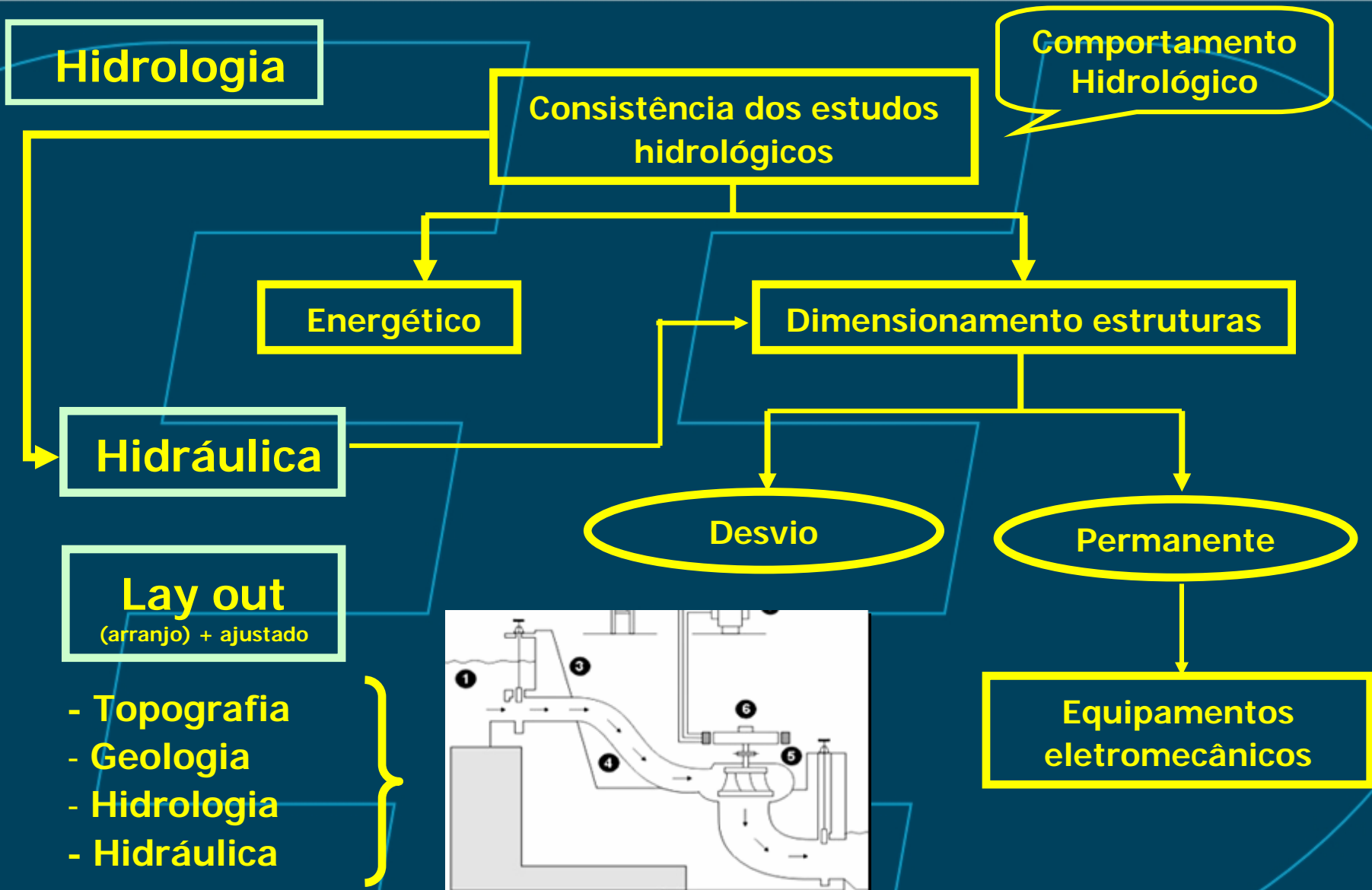
**Eixo(s) escolhido(s)**

## COMPLEXO DO RIO MADEIRA

Divisão da queda incluindo as usinas nacionais, binacional e boliviana



# Viabilidade



## Projeto Básico

**Detalhamento**

- Desvio
- Barragem
- CHG
- Equipamentos

**Dimensionamento**

- Geomecânico
- Hidráulico
- Estrutural
- Mecânico
- Elétrico
- Montagem

**Critérios de projeto**

**Termos de Referência**

**Especificações Técnicas**

**Relatório Aneel**

**Relatório Contratação EPC**

# Projeto Executivo:

- E a fase na qual o projeto básico é detalhado para possibilitar a construção.
- Trata-se, portanto, de um detalhamento refinado dos estudos anteriores.

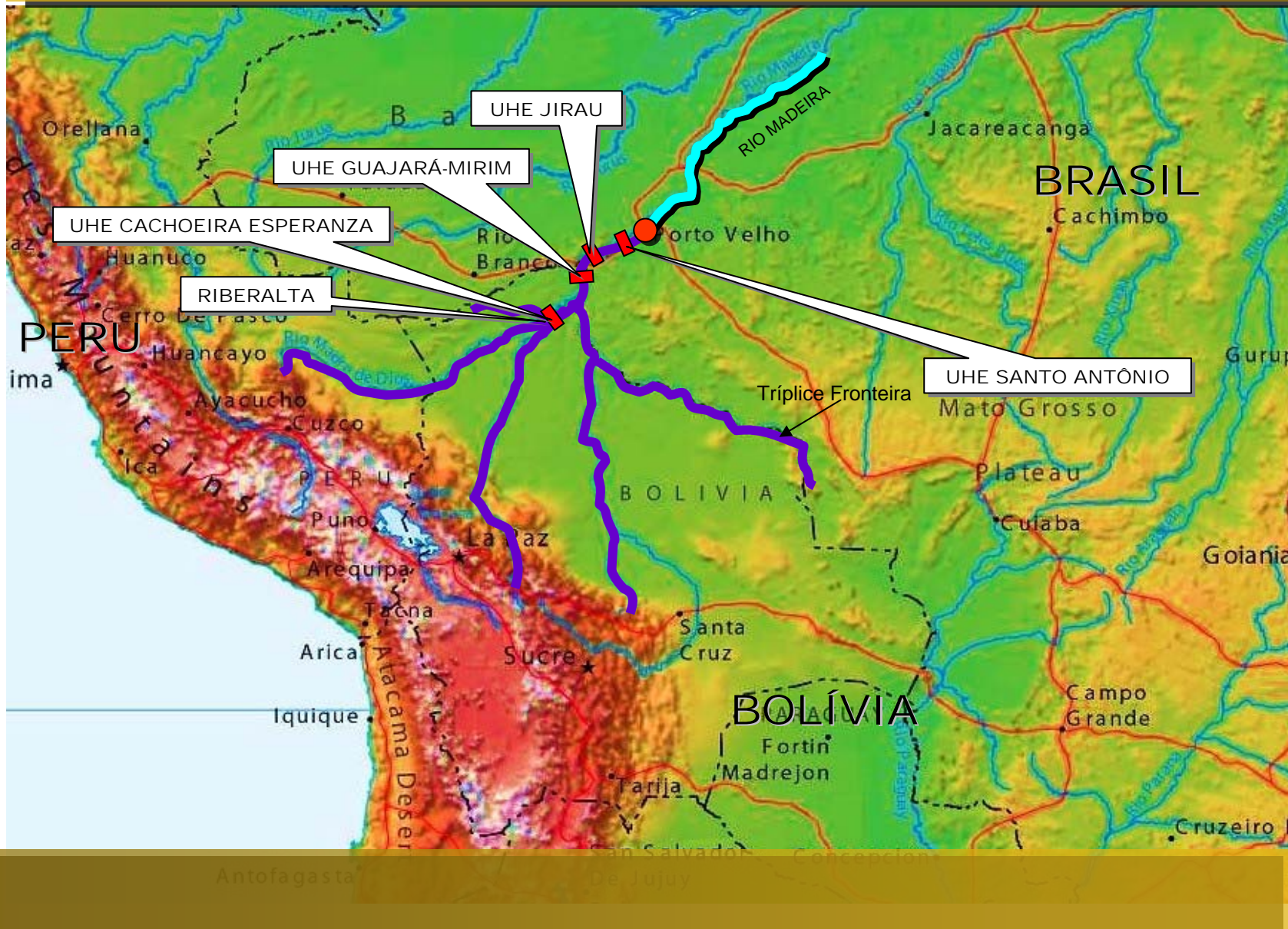


**UHE 14 de Julho - 2003**



**UHE 14 de Julho – Ago/07**





## COMPLEXO DO RIO MADEIRA CARACTERÍSTICAS DAS USINAS

	AHE JIRAU	AHE SANTO ANTÔNIO
POTÊNCIA INSTALADA	3.300 MW Com 44 unidades Bulbo de 75 MW	3.150 MW Com 44 unidades Bulbo de 71,6 MW
ENERGIA FIRME	2.152 MW	2.144 MW
FATOR DE CAPACIDADE	0,65	0,68
CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DA USINA (base 08/2004)	US\$ 3.360 X 10 <sup>6</sup>	US\$ 3.200 X 10 <sup>6</sup>

## COMPLEXO DO RIO MADEIRA IMPACTO DO RESERVATÓRIO

### Relação entre área do reservatório e potência instalada

USINAS NA REGIÃO AMAZÔNICA	ÁREA DO RESERVATÓRIO (km <sup>2</sup> )	POTÊNCIA (MW)	ÁREA DO RESERVATÓRIO / POTÊNCIA DA USINA (km <sup>2</sup> / MW)
BALBINA	2.360	250	9,44
SAMUEL	584	217	2,69
MANSO	387	210	1,84
TUCURUÍ 1ª ETAPA 2ª ETAPA	2.414	4.000	0,61
		8.000	0,30
SANTO ANTÔNIO	271	3.150	0,09
	107 (*)		0,03
JIRAU	258	3.300	0,08
	140 (**)		0,04

(\*) Descontada a área do rio, a qual representa 61% da área do reservatório.

(\*\*) Descontada a área do rio, a qual representa 46% da área do reservatório.

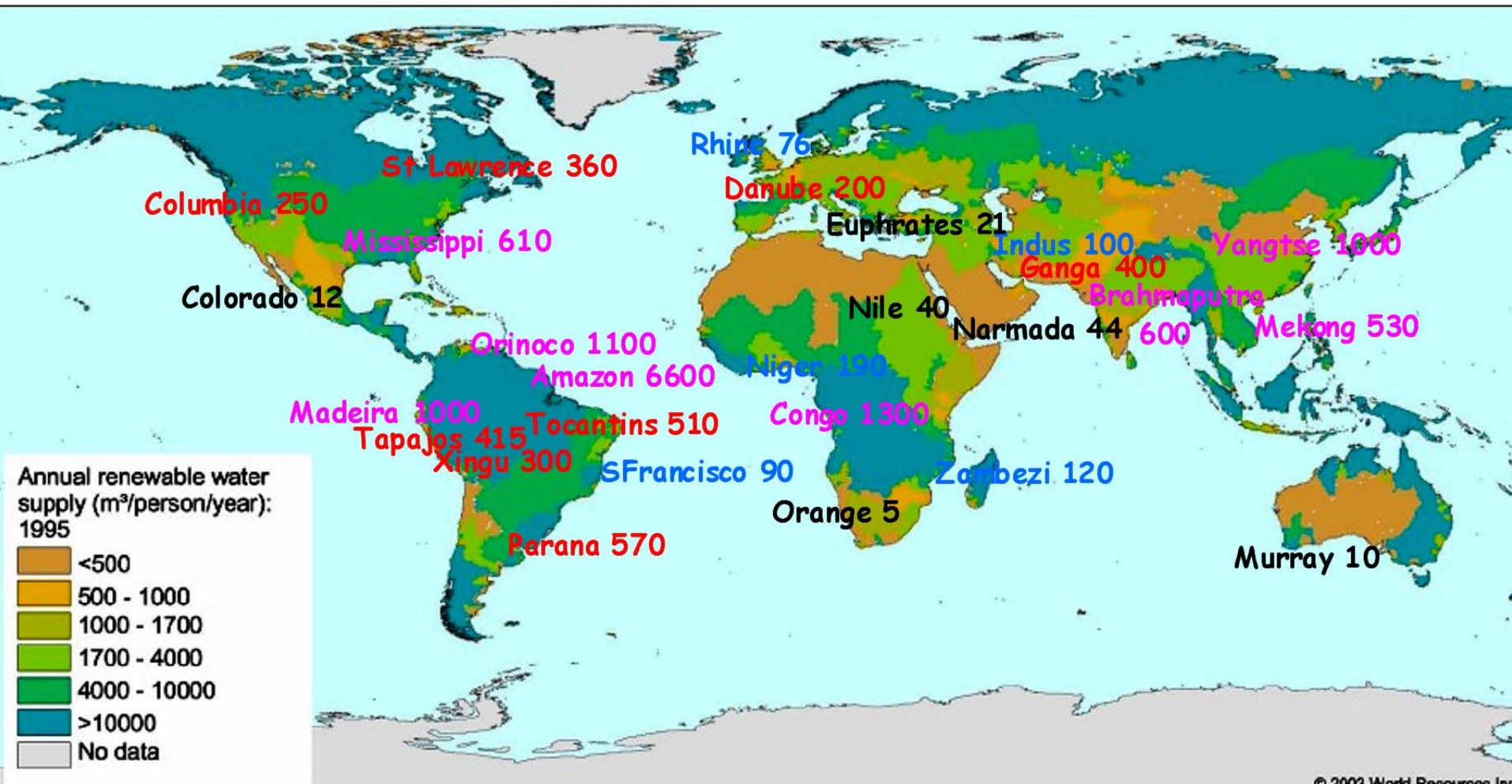




15 12 2006



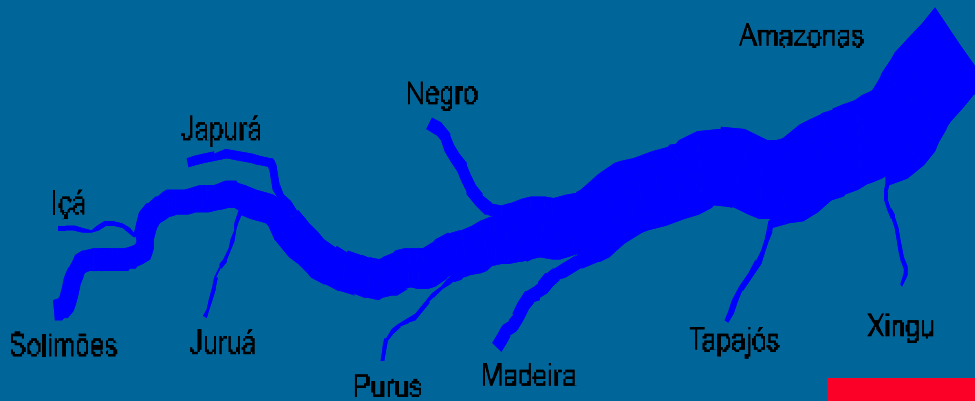
# Flows of Major Rivers of the World in BCM/year



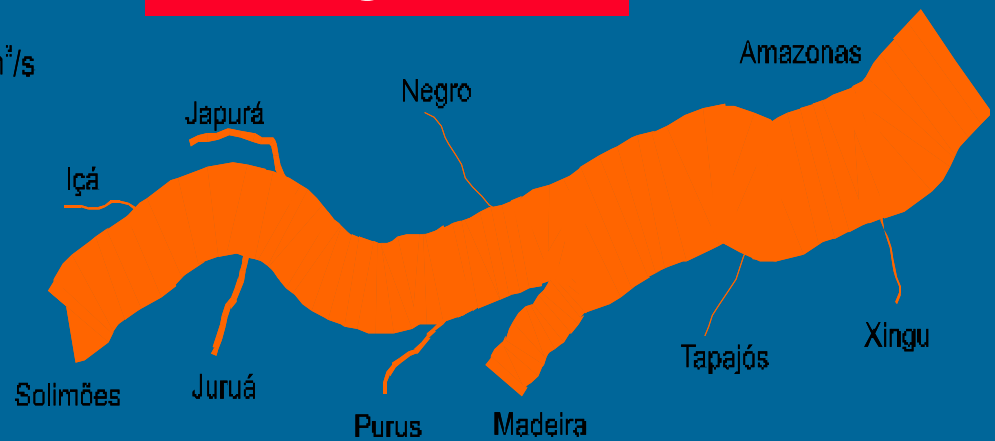
© 2003 World Resources Institute

FLOW LEGEND: >500 bcm/yr; 200-500 bcm/yr; 50-200 bcm/yr; < 50 bcm/yr

## Descarga líquida

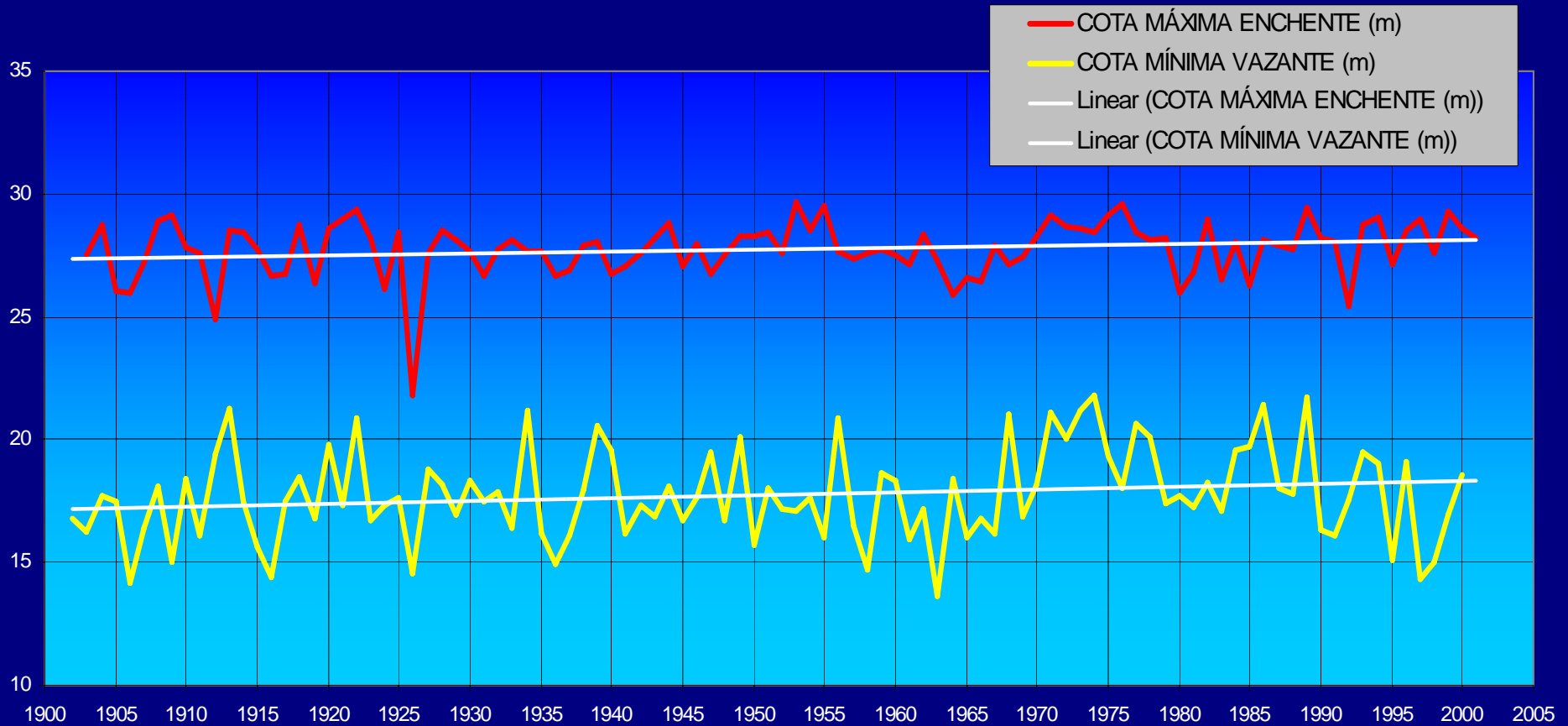


## Descarga sólida

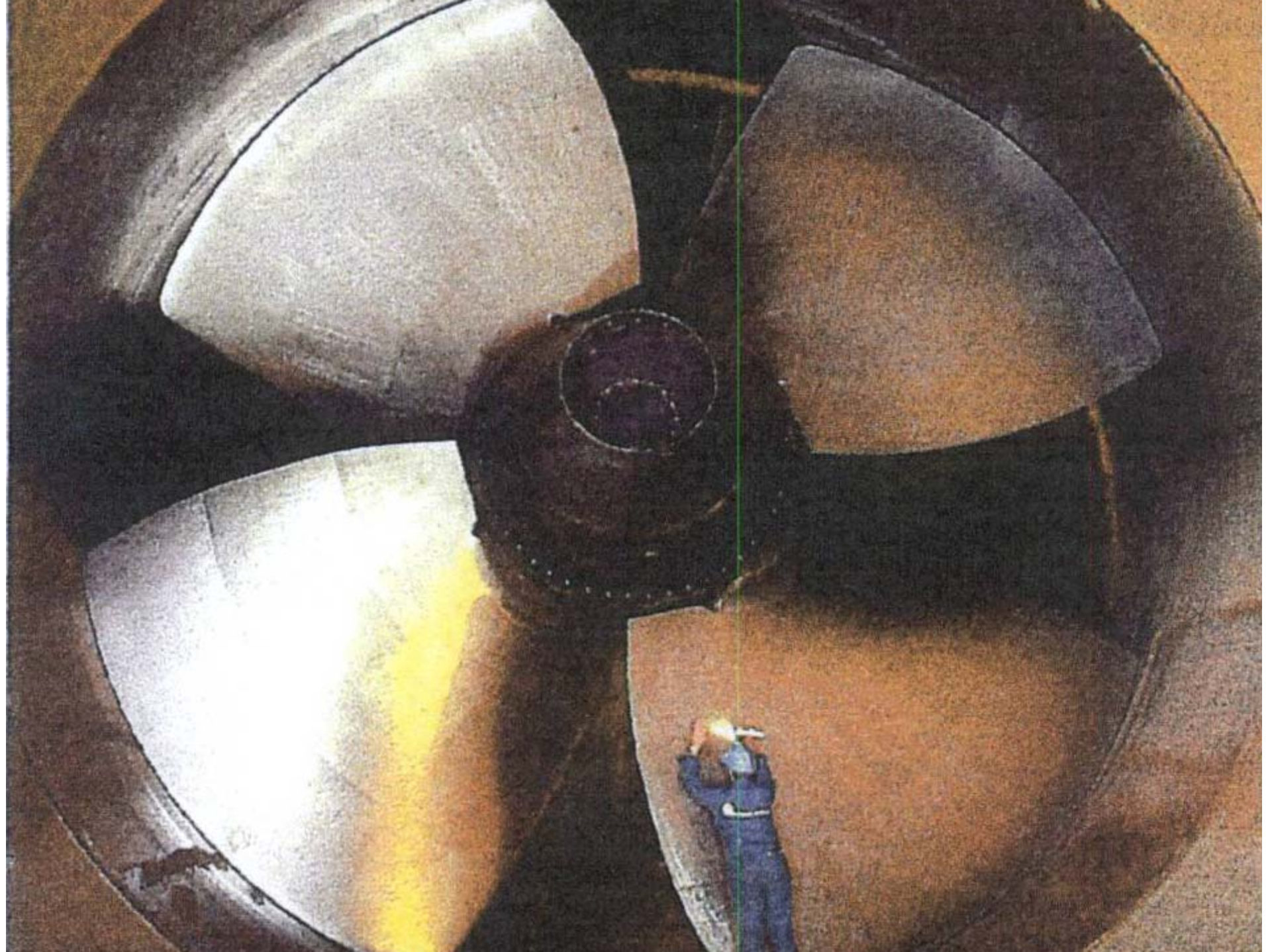


200 10<sup>6</sup> t/an

## NÍVEIS DO RIO NEGRO NO PORTO DE MANAUS









Um Estado é bem regrado quando:

- tem poucas leis e elas são rigorosamente observadas (Descartes)
- o trabalho é valorizado