

# PME3453 Máquinas de fluxo e sistemas fluidodinâmicos



Apresentação do curso - 2023



**Humberto Gissoni**



1. Energia
2. Máquinas de transformação de energia
3. Cavitação
- 4. Instalações hidrelétricas**
5. Sistemas de recalque
6. Instalações termelétricas



## PARTE 1

### 4.1 Instalações Hidrelétricas

#### 4.1.1 Introdução

#### 4.1.2 Tipos de aproveitamentos

#### 4.1.3 Estudos hidrológicos e energéticos

#### 4.1.4 Potência Instalada

#### 4.1.5 Potência instalada de uma usina

#### 4.1.6 Componentes principais de uma usina

#### 4.1.7 Fases de construção de uma usina hidrelétrica brasileira

### 4.2 Instalações hidrelétricas reversíveis

#### 4.2.1 Introdução

#### 4.2.2 Configurações de máquinas para usinas reversíveis

#### 4.2.3 Exemplo de um complexo reversível

# Instalações hidrelétricas

---



Abordados apenas os aspectos gerais: topográficos, hidrológicos e energéticos.

Sequência de projeto

Hidrografia  
Topografia     $\Rightarrow$  Definição do local     $\Rightarrow$  Vazão  
Carga (altura de queda)

Barragem

Volume do reservatório

Máquinas hidráulicas e elétricas



# Tipos de aproveitamentos – Potência instalada

---

Segundo:

- **Potência instalada**
- Produção de energia
- Operação

## **Potência instalada**

- Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)

Europa  $\leq 5$  MW      Brasil  $\leq (10; 20) 30$  MW

Incentivos fiscais e planos de financiamento diferenciados

Centrais hidrelétricas  $> 30$  MW

Potência instalada: 22500 MW (3 Gargantas – China)



# Tipos de aproveitamentos – Produção de energia

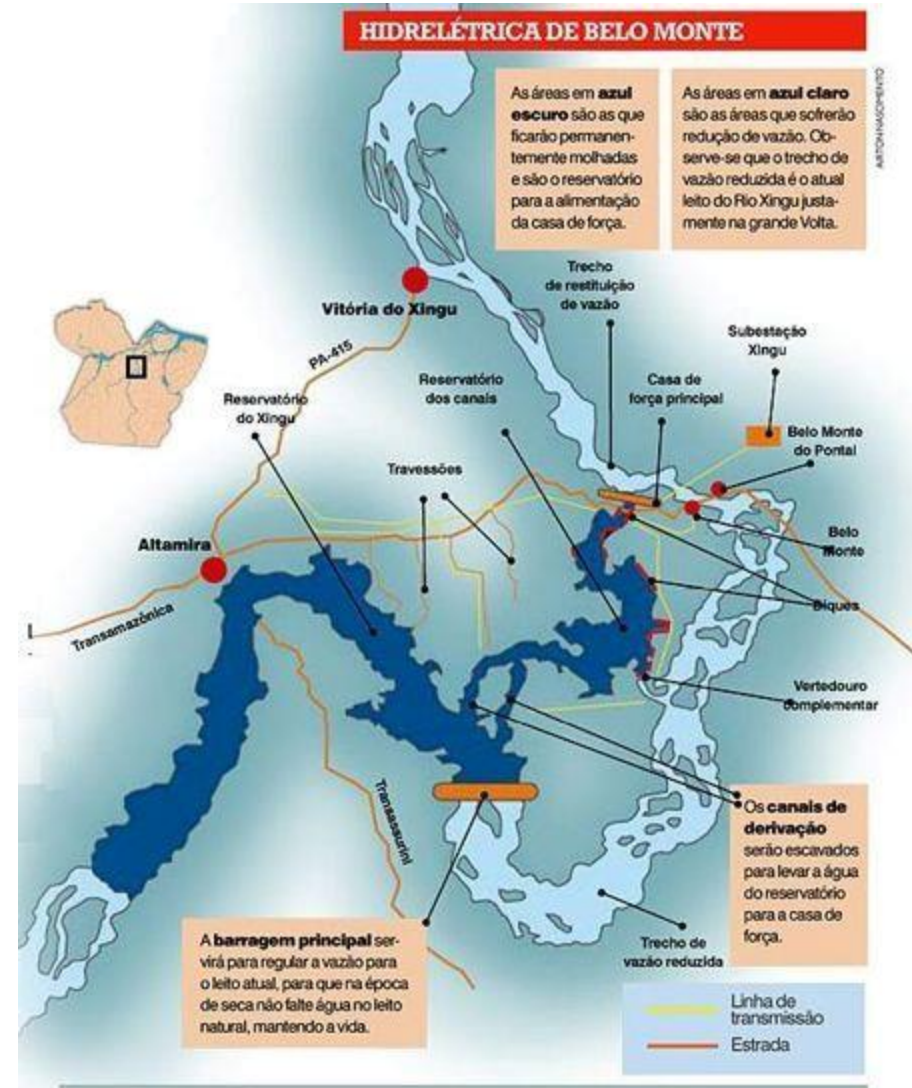


## Usina Belo Monte (Pará)



### Usinas a fio d'água

- Inexiste bacia de acumulação, com o fluxo d'água escoando diretamente pelas turbinas.
- A bacia de acumulação existente armazena volumes inexpressivos de água.
- Geração depende do fluxo do rio.
- Não há segurança energética.





## Usinas de acumulação

### Bacia de acumulação:

- Armazena energia e regulariza a sua produção durante os períodos de seca.
- Suas dimensões dependem do regime do rio e da localização geográfica do aproveitamento.
- Nas proximidades do equador há maior regularidade de chuvas e o volume armazenado varia entre 50% a 70% da descarga média anual.
- Nas regiões temperadas o volume armazenado pode superar 170% da descarga média anual.



# Tipos de aproveitamentos - Operação

---

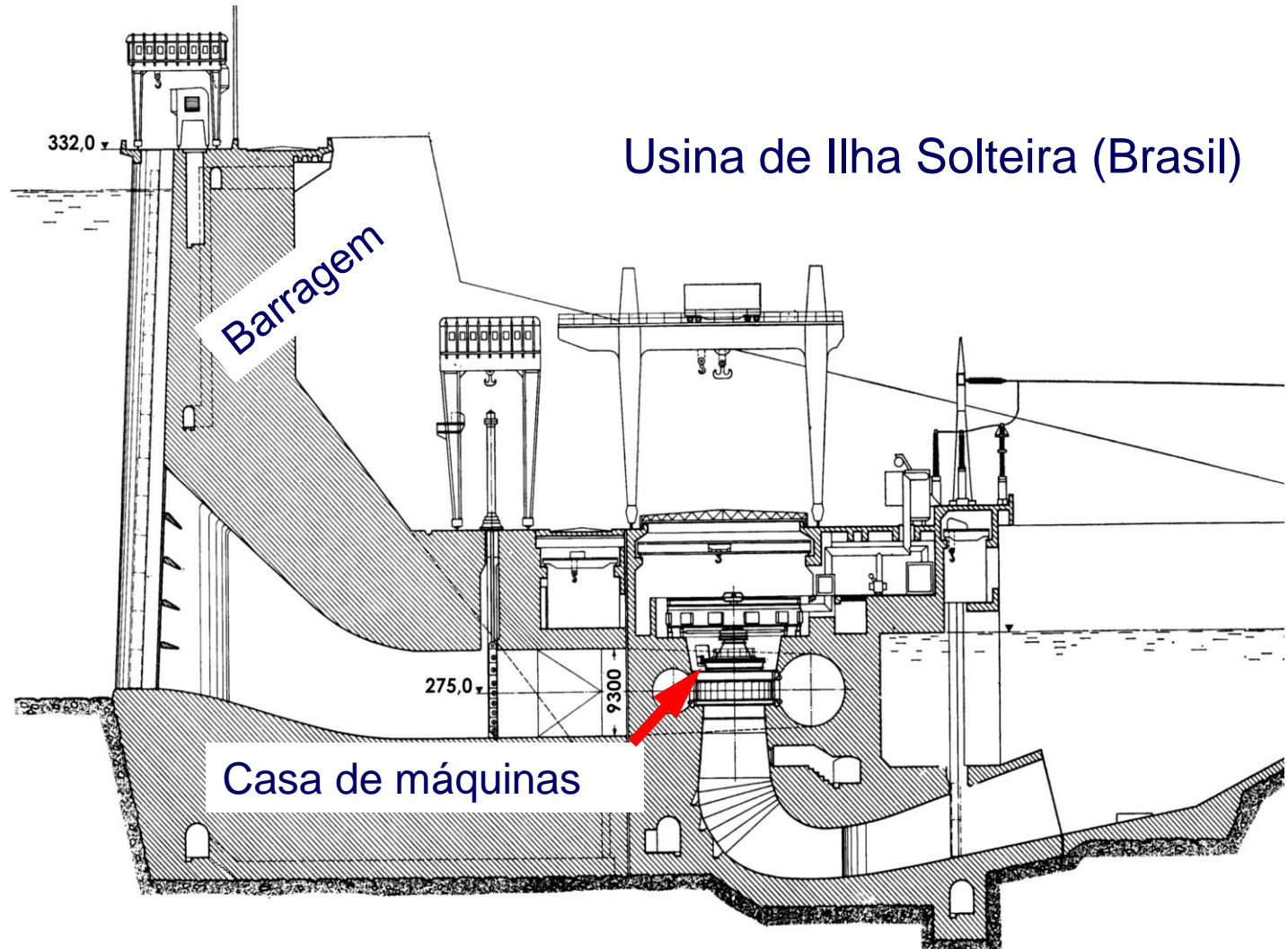
## **Operação na base:**

- Usinas operam ininterruptamente durante 24 horas por dia, com paradas regulares para manutenção sempre em longos intervalos.
- Condição obrigatória em usinas térmicas a vapor devido à operação em temperaturas muito elevadas ( $> 500^{\circ}\text{C}$ ).

## **Operação na ponta:**

- Usinas operam de forma intermitente, poucas horas ou muitos minutos por dia.
- Características operacionais naturais de turbinas hidráulicas ou térmicas a gás.



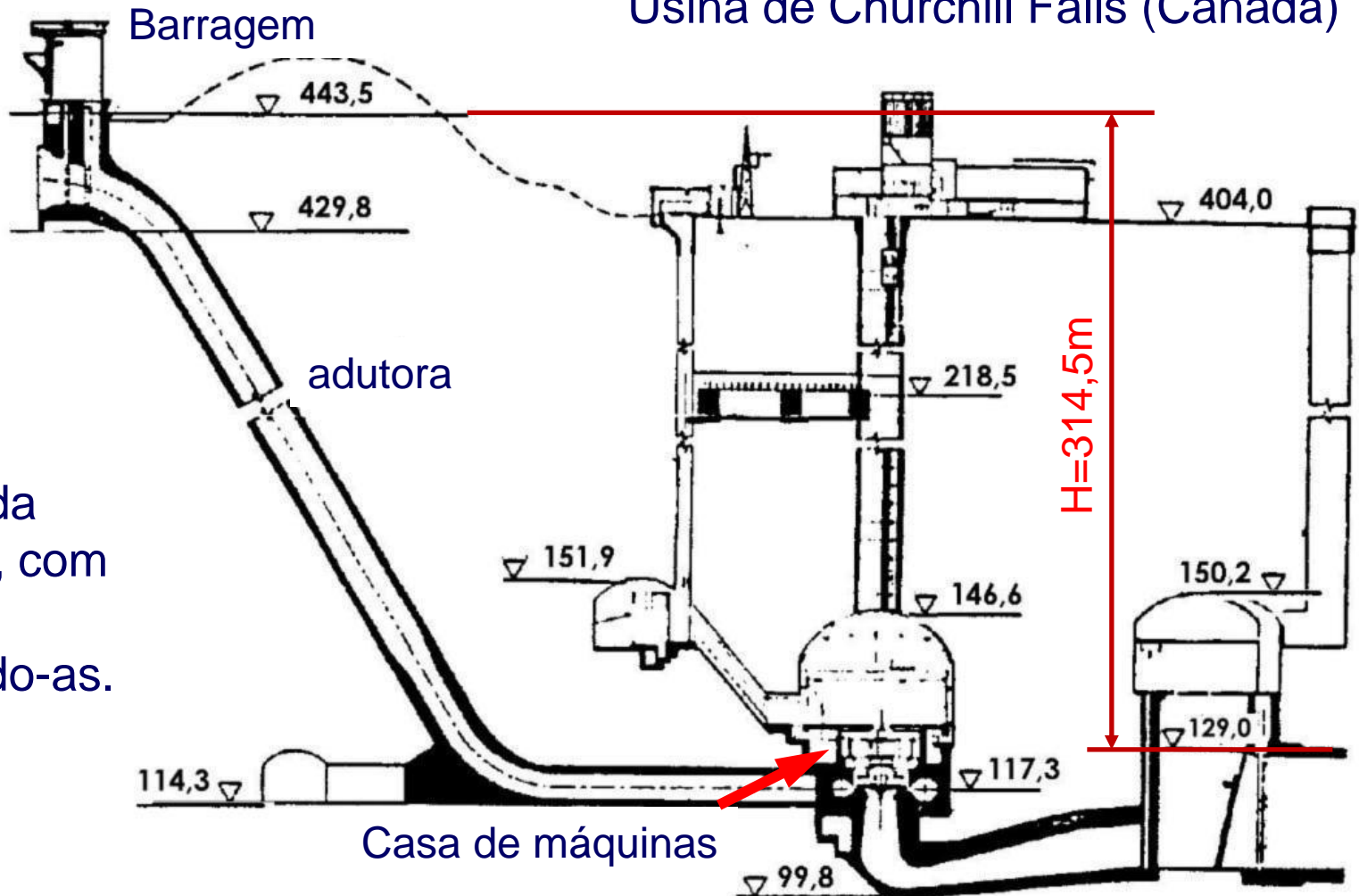


A casa de máquinas localiza-se ao pé da barragem.



## Usina de Churchill Falls (Canadá)

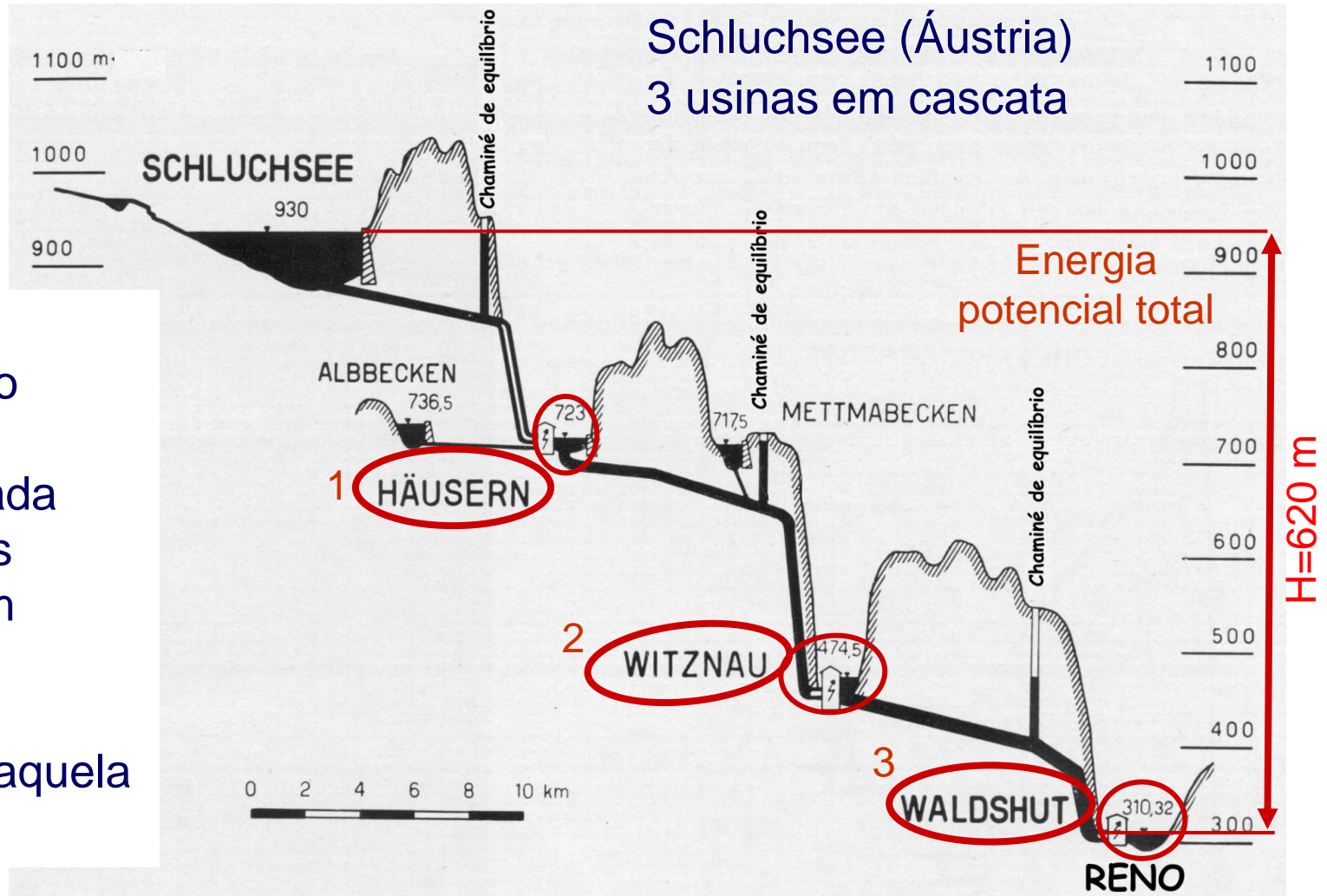
Casa de máquinas afastada da barragem, com adutora interligando-as.



# Usinas de derivação

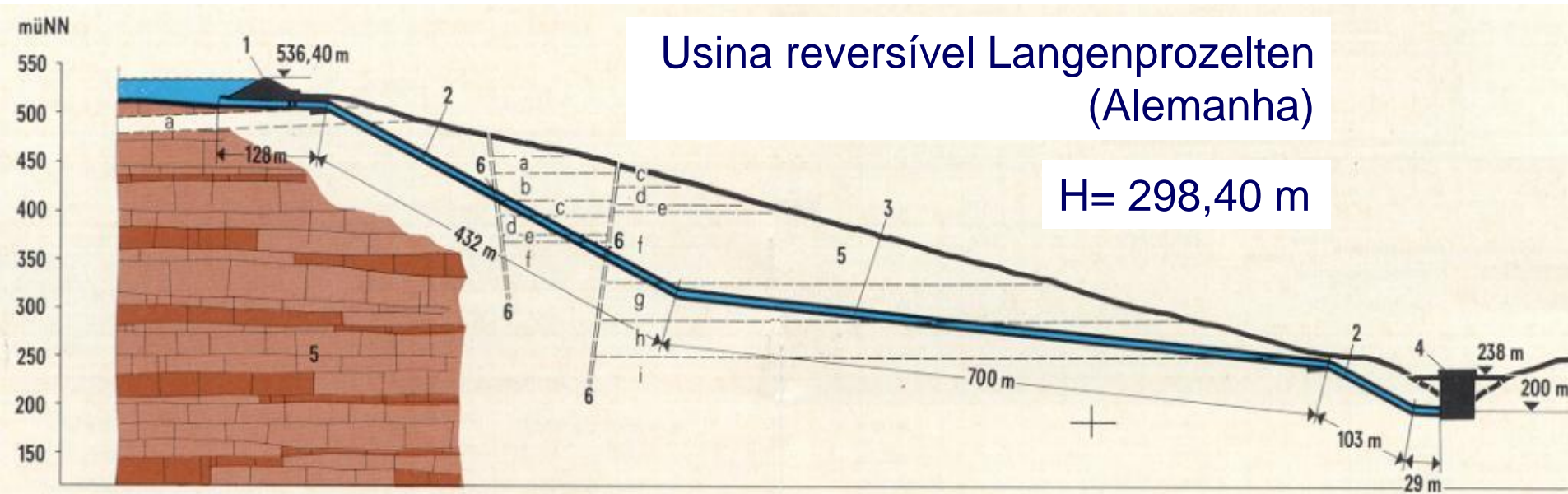


Água do reservatório superior é descarregada através das turbinas em estrutura hidráulica diferente daquela de origem.





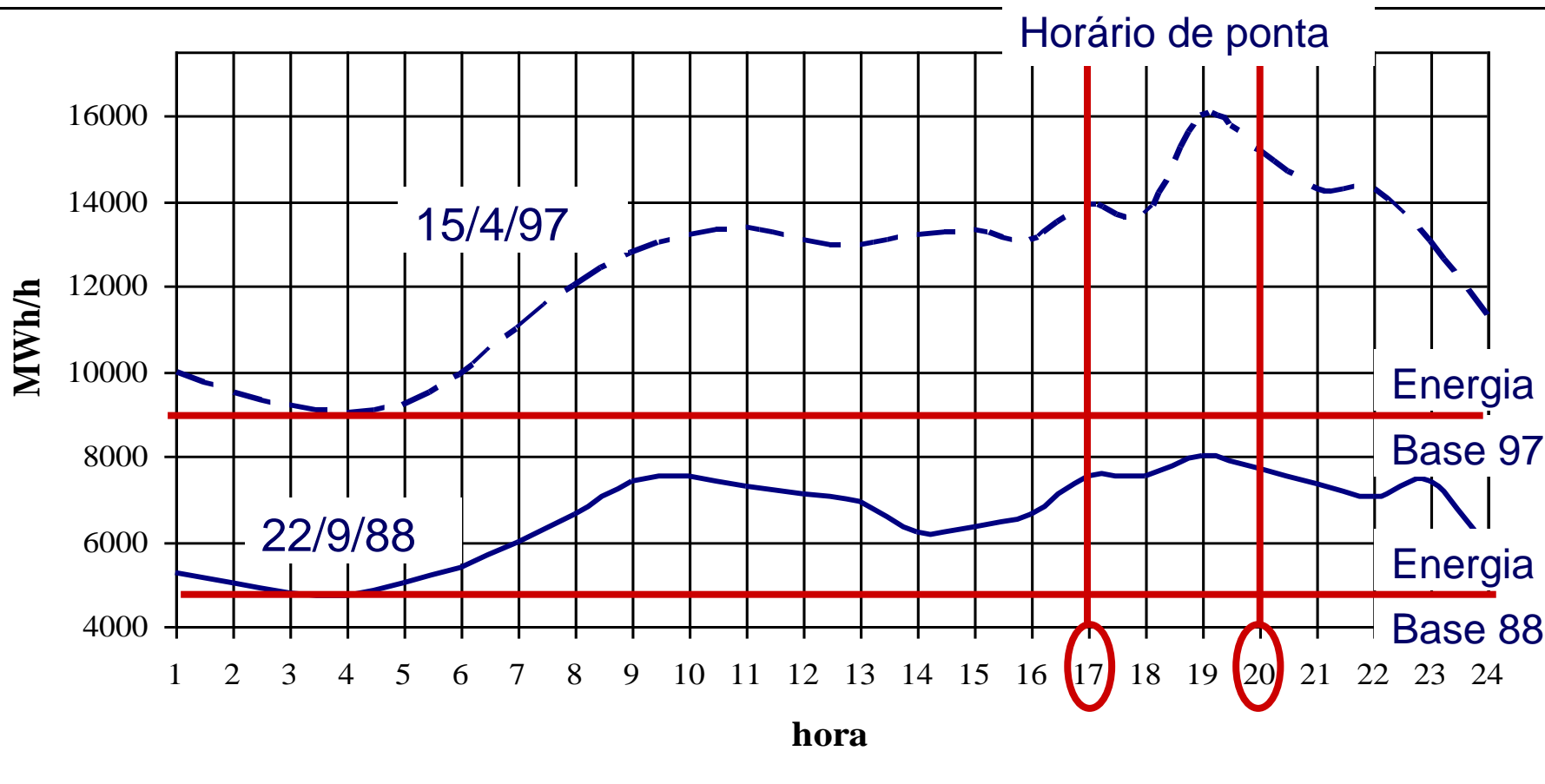
# Usinas de bombeamento ou reversíveis



Parte ou toda a água turbinada é retornada ao reservatório superior para posterior reaproveitamento.

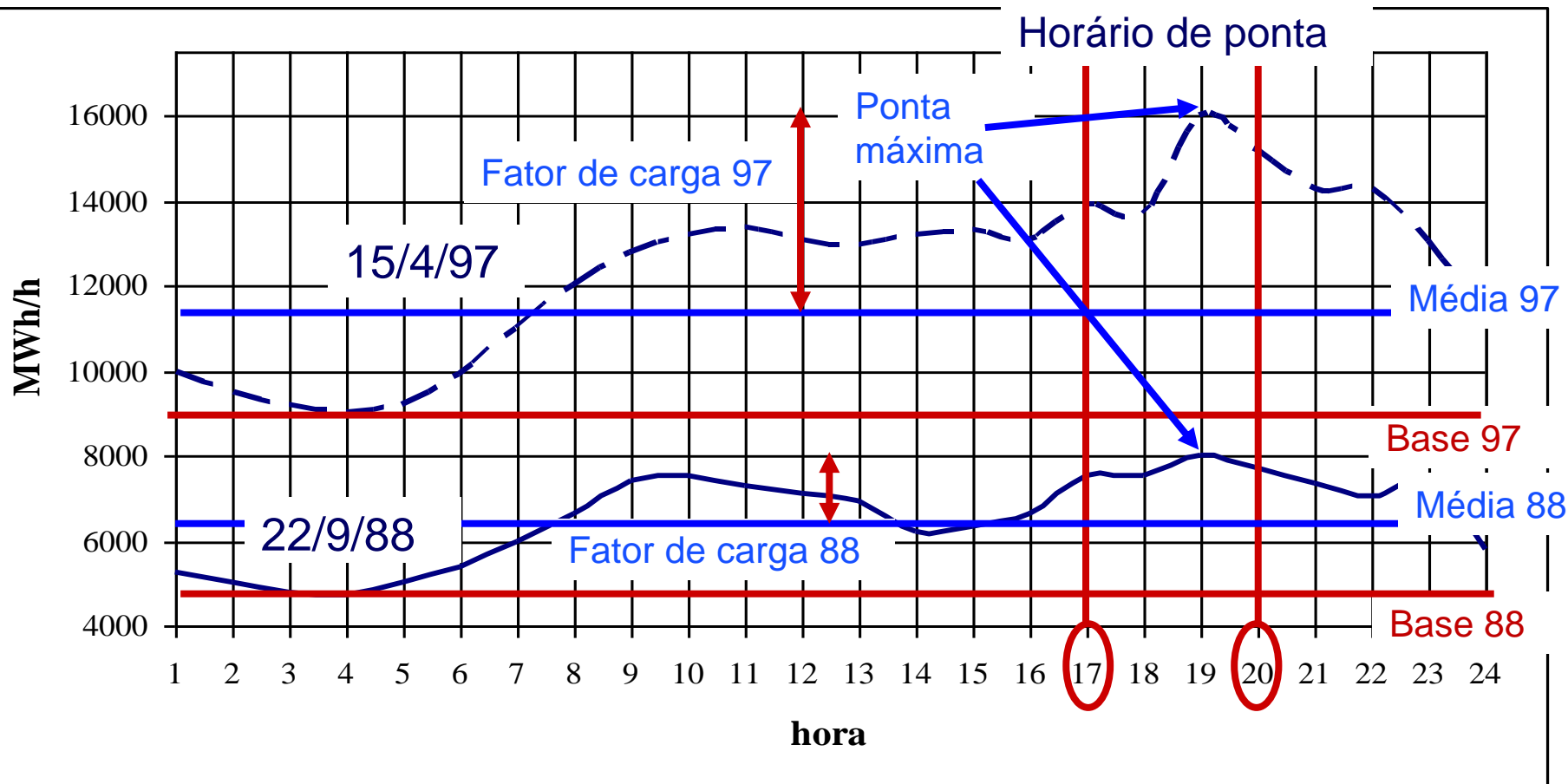
O projeto viabiliza-se economicamente por adquirir energia aos menores preços (noite) e vendê-la aos maiores (ponta).

# Diagrama de carga



Identificação das condições de demanda de energia na região a ser servida. Curvas reais para a Grande São Paulo

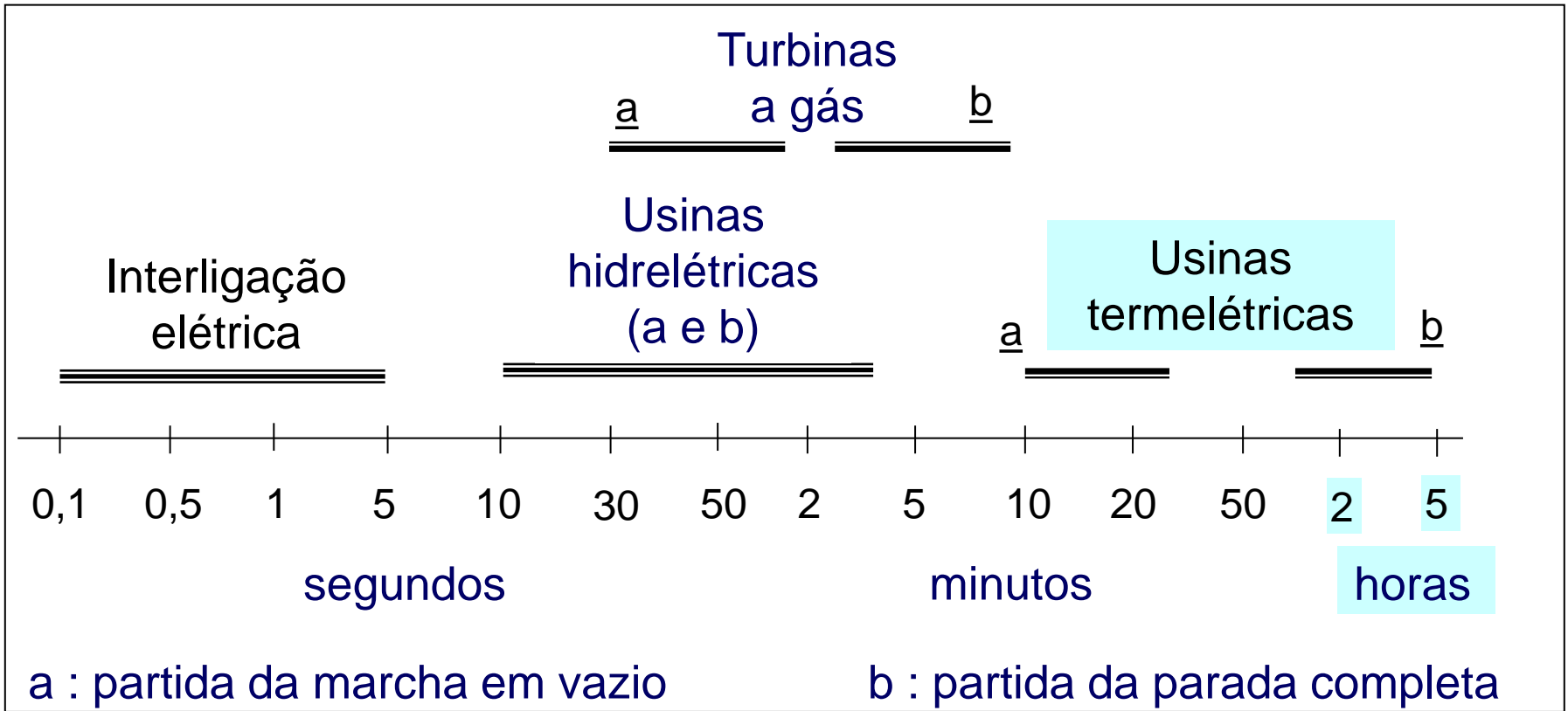
# Diagrama de carga



Identificação das condições de demanda de energia na região a ser servida. Curvas reais para a Grande São Paulo



# Tempos de entrada em operação

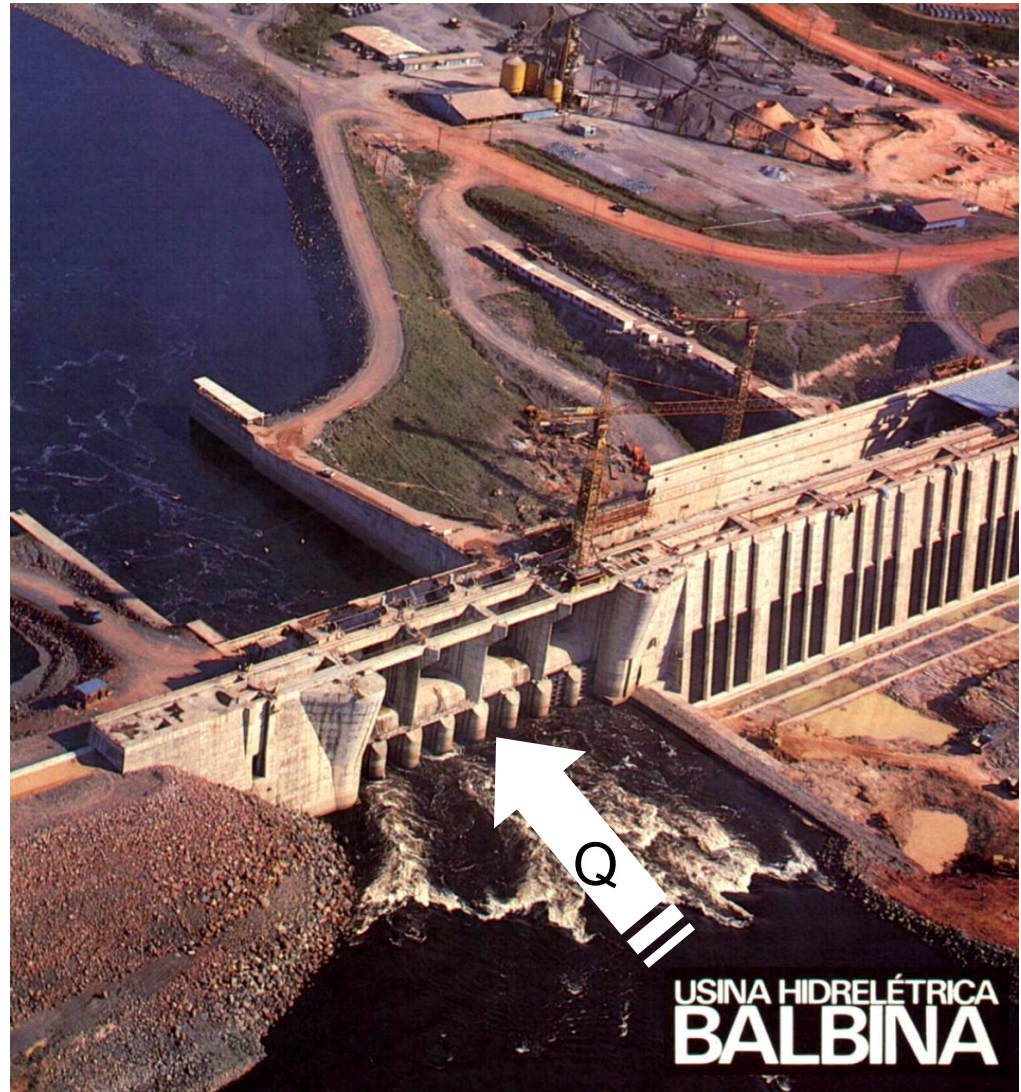


Marcha em vazio: máquina mantida aquecida abaixo das condições operacionais.  
Parada completa: máquina mantida fria.

# Componentes principais de uma usina hidrelétrica

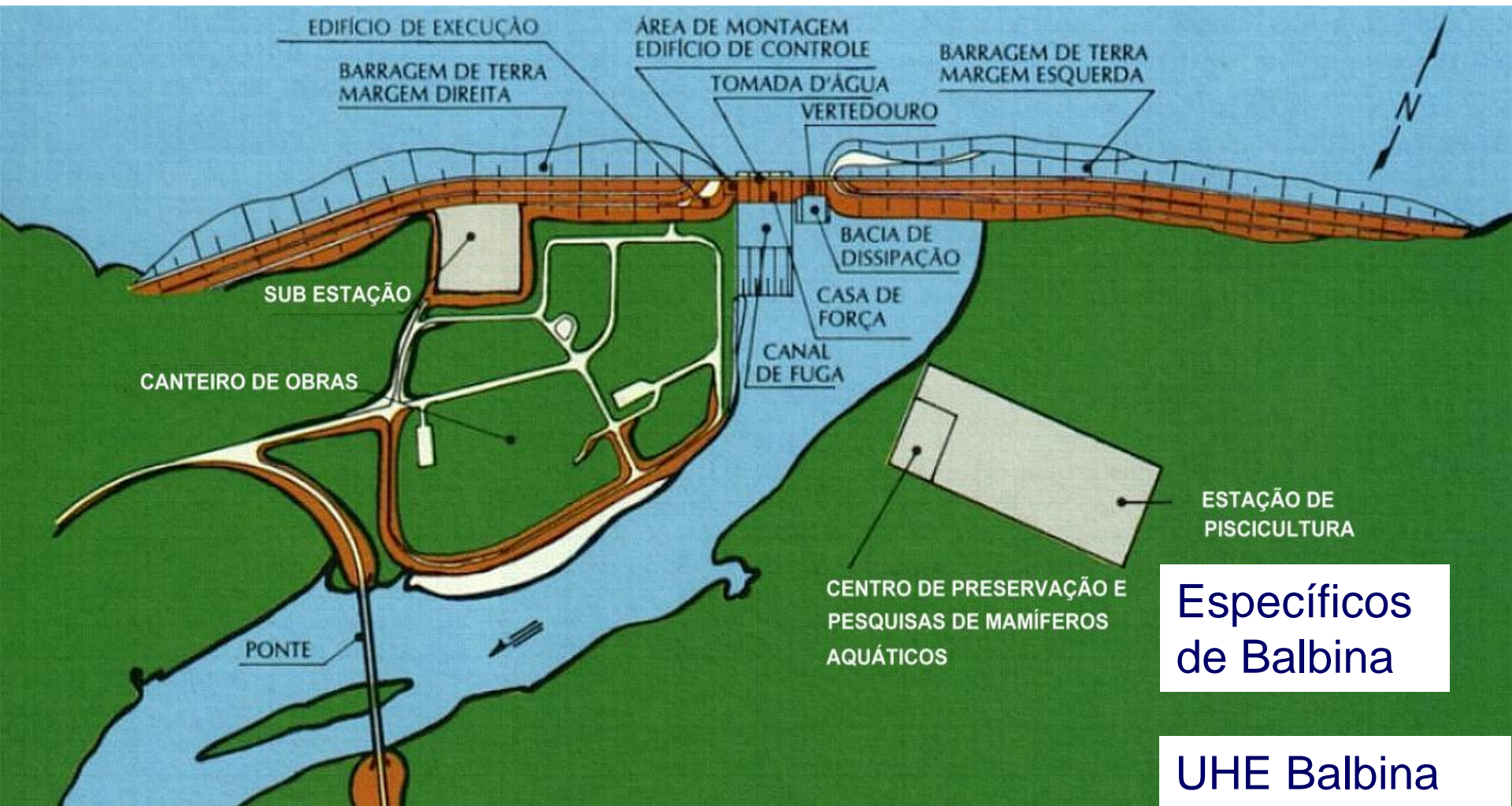


- Concessionária: Eletronorte
- Situada a 150 km em linha reta ao norte de Manaus
- Volume total acumulado:  $12.831 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Volume útil:  $5.499 \times 10^6 \text{ m}^3$  (43% do volume total)
- Altura máxima de queda: 25,5 m
- Vazão média:  $678,0 \text{ m}^3/\text{s}$
- Potência instalada: 250 MW
- Número de máquinas: 5





# Componentes principais de uma usina hidrelétrica



Específicos de Balbina

UHE Balbina

# Componentes principais de uma usina hidrelétrica





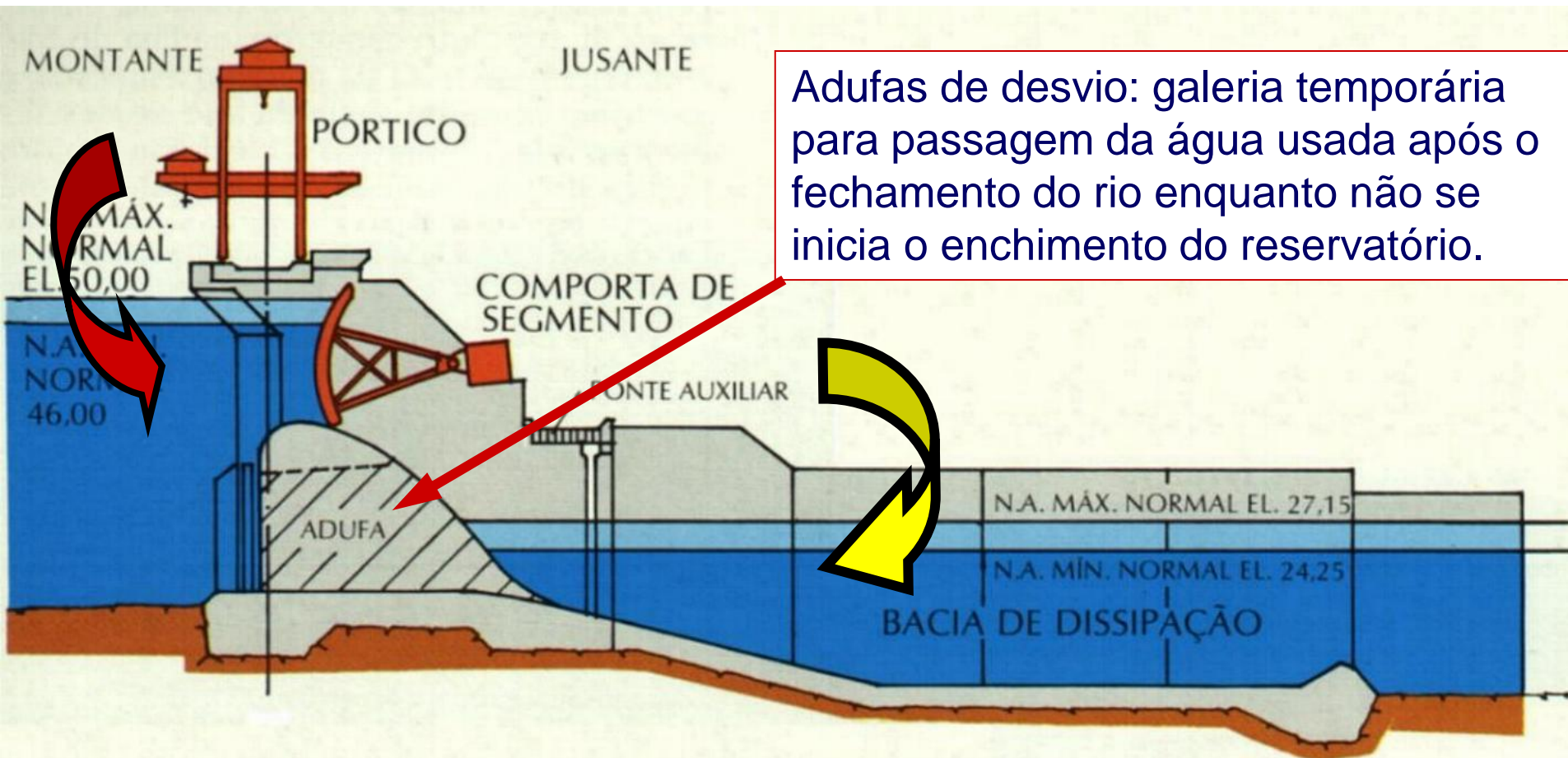


# Componentes principais de uma usina hidrelétrica





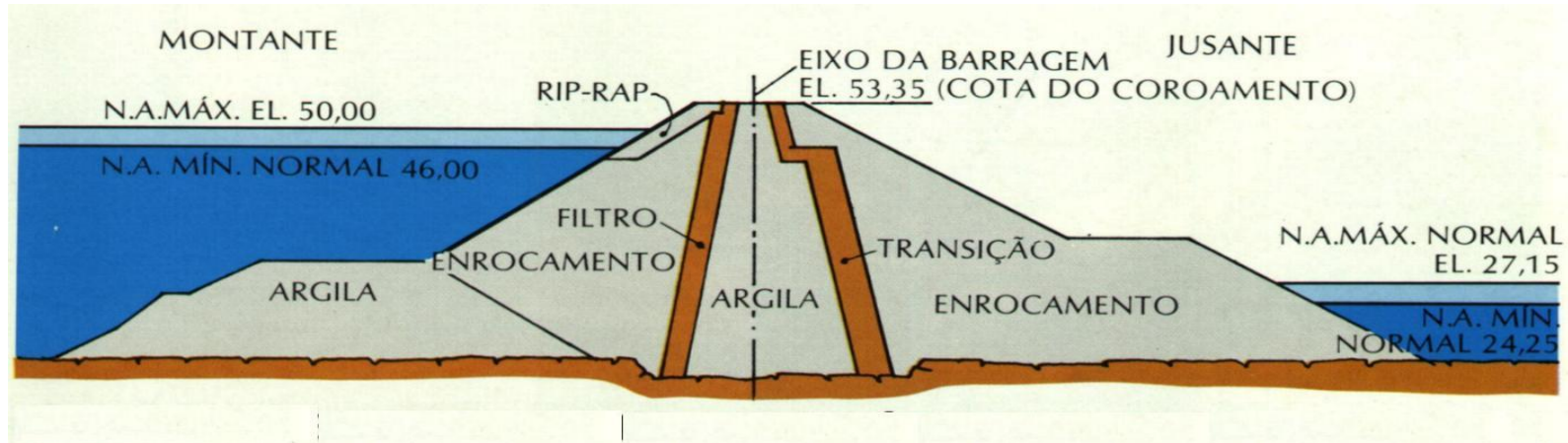
# Componentes principais de uma usina hidrelétrica



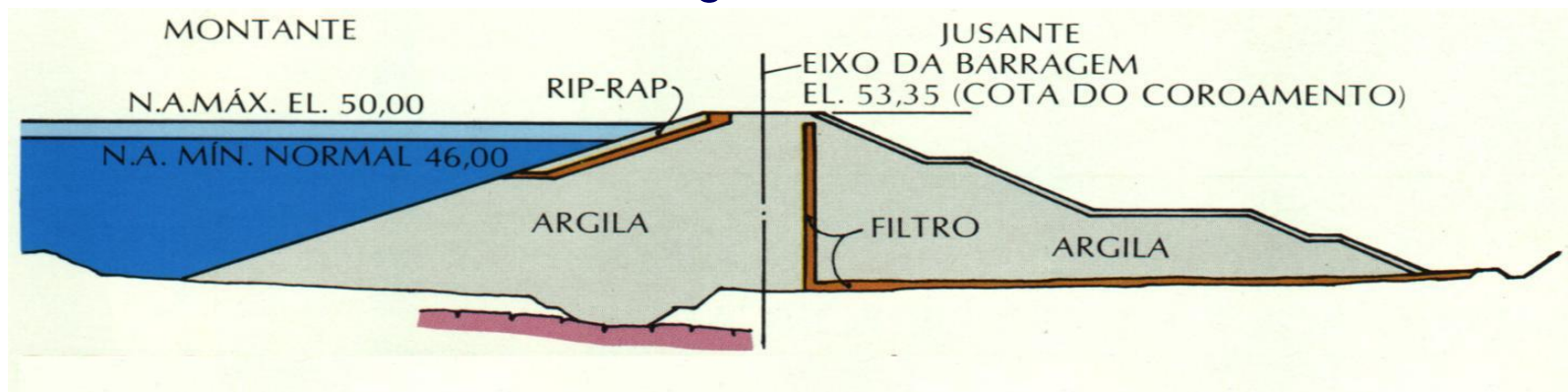
# Componentes principais de uma usina hidrelétrica



Barragem de enrocamento: pedra, brita e argila, postada entre a barragem de concreto (central) e a de terra (margens).



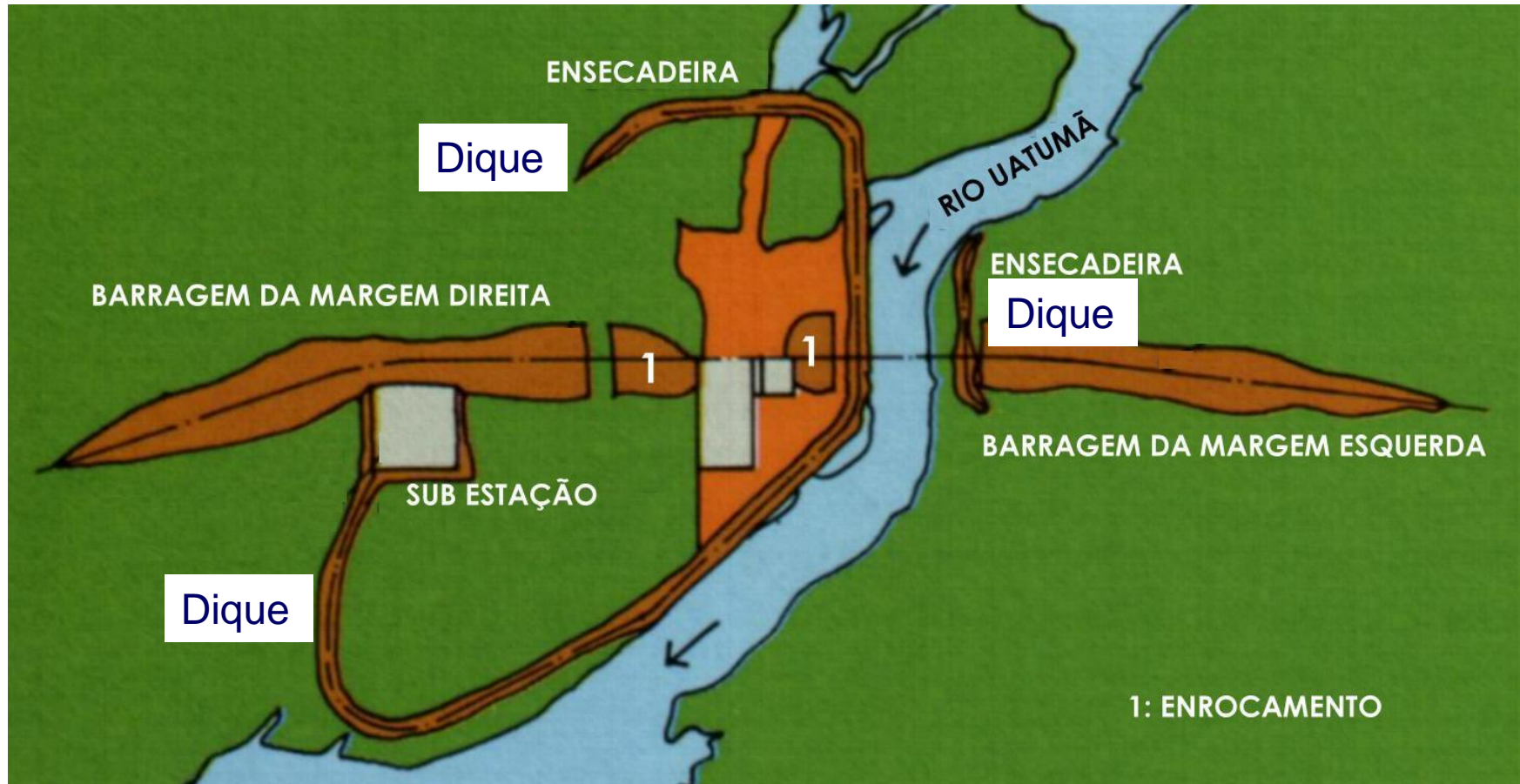
## Barragem de terra



# Fases de construção de uma usina



## Construção de diques e ensecadeiras.



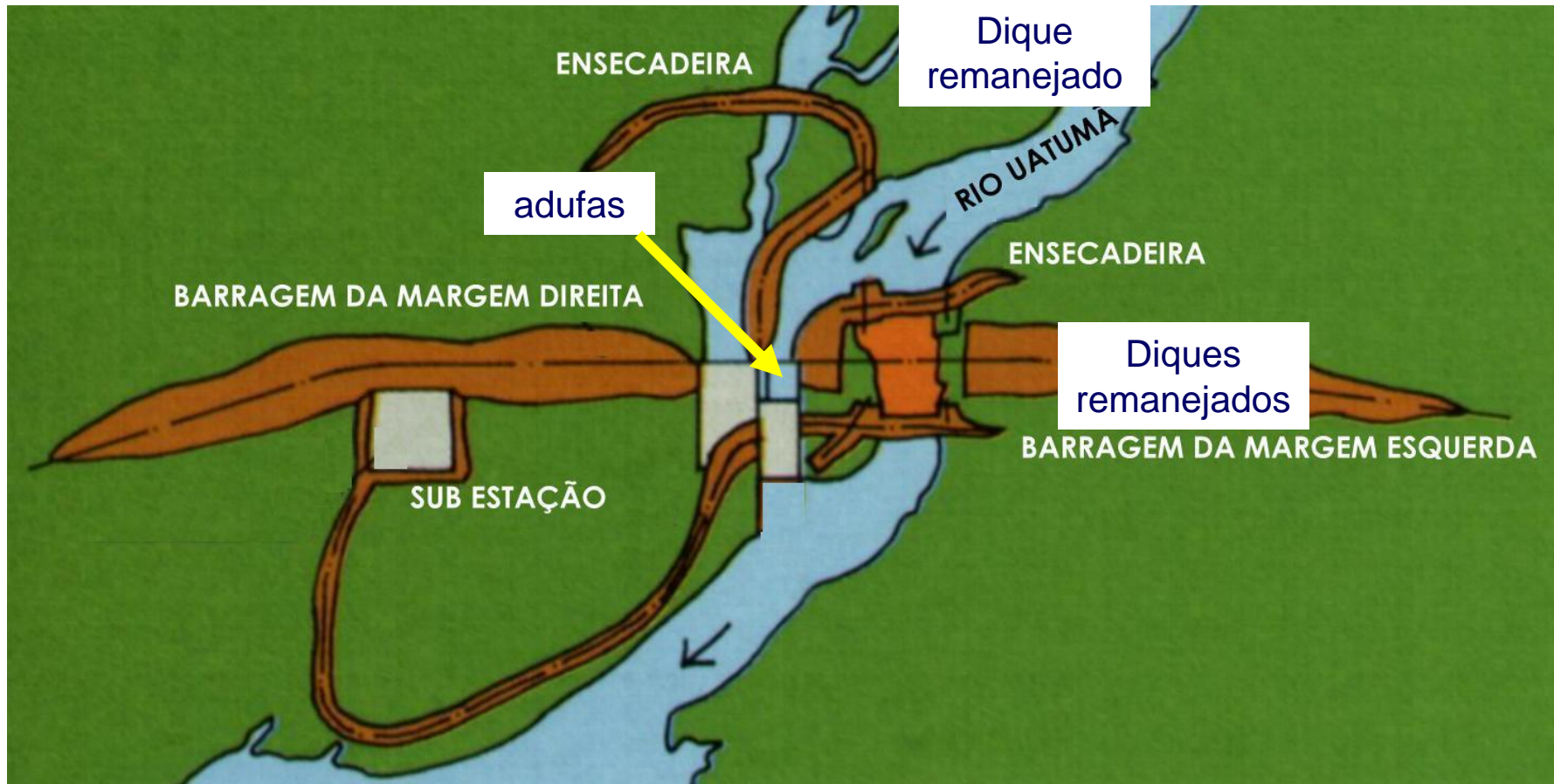
Ensecadeira (obra temporária): área mantida seca por meio de diques para possibilitar obras no seu interior.



# Fases de construção de uma usina



## Remanejamento de diques e ensecadeiras.

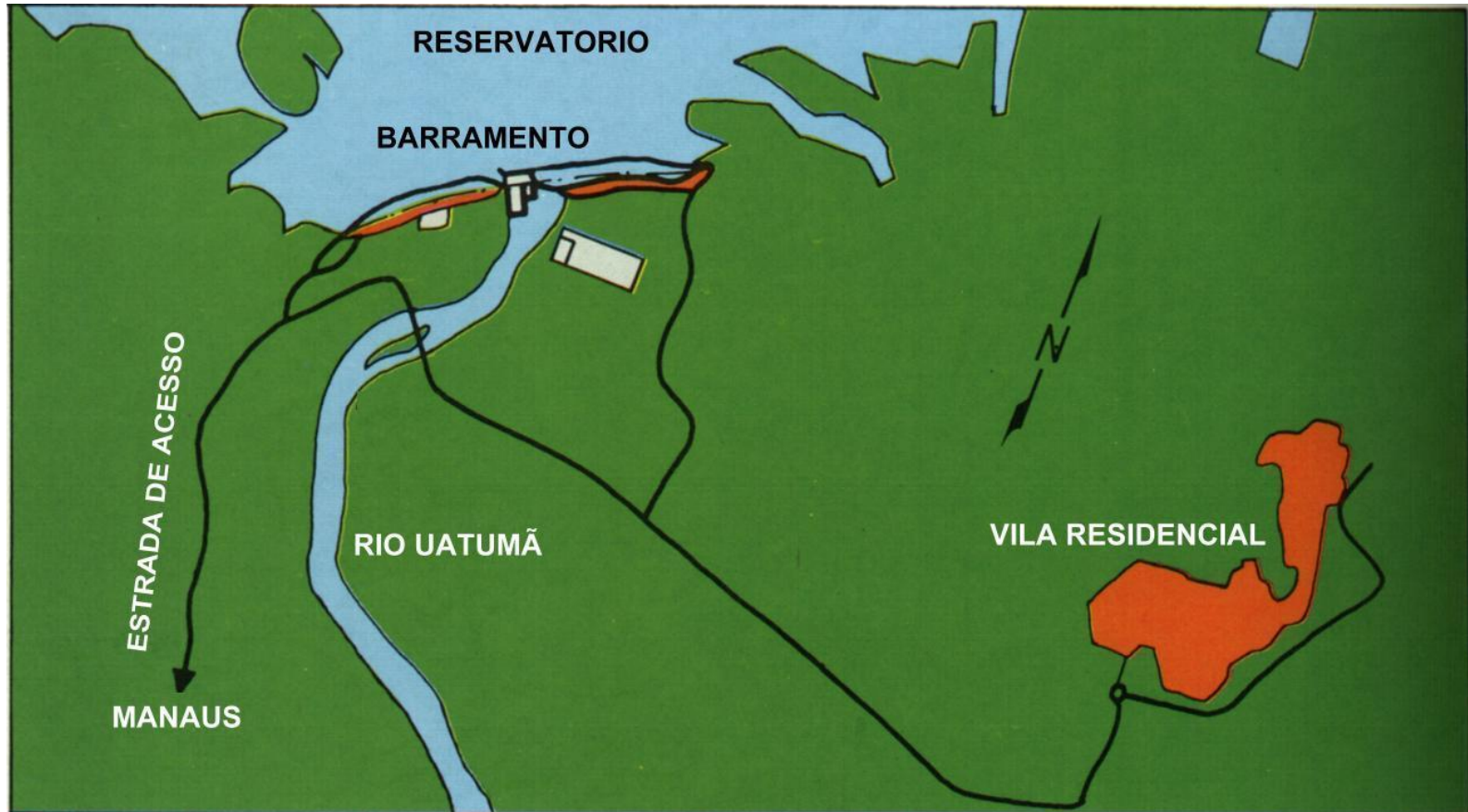


O rio é bloqueado e o dique impede a chegada da água na casa de máquinas desviando-a para as adufas.

# Fases de construção de uma usina



## Enchimento do reservatório



As adufas são fechadas e os diques removidos, ou abandonados sob a água. Início de enchimento do lago.

# Fases de construção de uma usina



## Cronograma de construção de Balbina

		1981			1982				1983				1984				1985				1986	1987
USINA		2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Assinatura do contrato		↓																				
Canteiro e vila residencial		████████████████████																				
Obras civis		████████████████████			████████████████████				████████████████████				████████████████████									
Montagem eletro-mecânica									████████████████████				████████████████████									
GERAÇÃO	máquina 1																			31/1		
	máquina 2																			31/5		
	máquina 3																			31/10		
	máquina 4																				31/1	
	máquina 5																				31/5	

O cronograma não foi cumprido, com o ensaio de recepção da máquina 1 tendo sido realizado em janeiro de 1989.





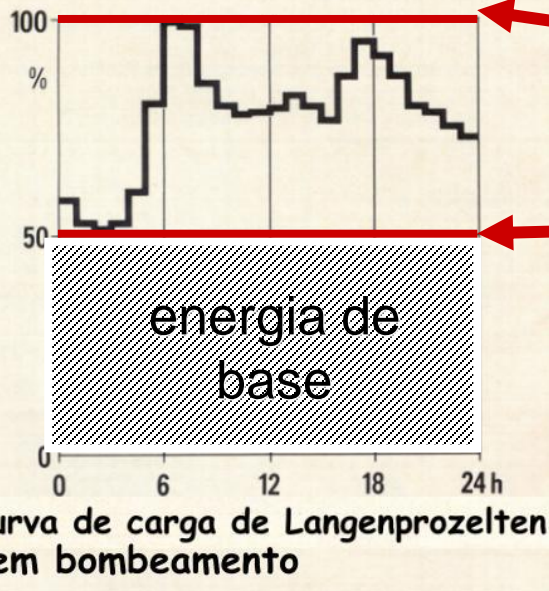
- Operam tanto como usinas hidrelétricas quanto como instalações de bombeamento (não simultaneamente).
- Parte ou toda a água turbinada é retornada ao reservatório superior para posterior reaproveitamento.
- O projeto é viabilizado economicamente ao adquirir energia pelos menores preços (noite) e vender pelos maiores (ponta).
- Energia de base (todo o dia) fornecida por termelétricas.
- Operação em ponta permite equalizar demanda nas termelétricas ao longo de todas as 24 horas de operação

# Instalações hidrelétricas reversíveis



- Operação em ponta permite equalizar demanda nas termelétricas ao longo de todas as 24 horas de operação.

Diagramas de carga de Langenprozelten

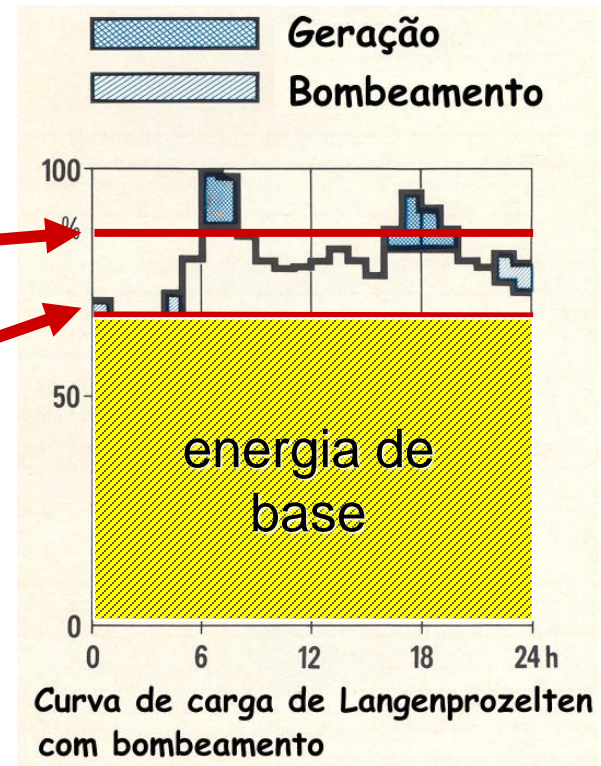


Sem bombeamento  
Grandes discrepâncias entre demanda diurna e noturna.

Diurno

Noturno

Energia de base (todo o dia) fornecida por termelétricas.



Com bombeamento  
Discrepância entre demanda diurna e noturna é reduzida.



## Formas construtivas comparadas

- **4 máquinas:** Solução convencional com uma turbina hidráulica acionando um gerador e uma bomba hidráulica de fluxo acionada por um motor elétrico.
  - A configuração de quatro máquinas não se justifica economicamente frente às outras duas alternativas.
- **3 máquinas:** Solução com duas máquinas hidráulicas, uma turbina e uma bomba acionadas por uma única máquina elétrica; o moto-gerador.
  - Custos reduzidos pela eliminação de uma máquina elétrica e pela redução das proporções da casa de máquinas.
- **2 máquinas:** Solução com uma única máquina hidráulica; bomba-turbina e uma única máquina elétrica; moto-gerador.
  - Custos reduzem-se ainda mais.

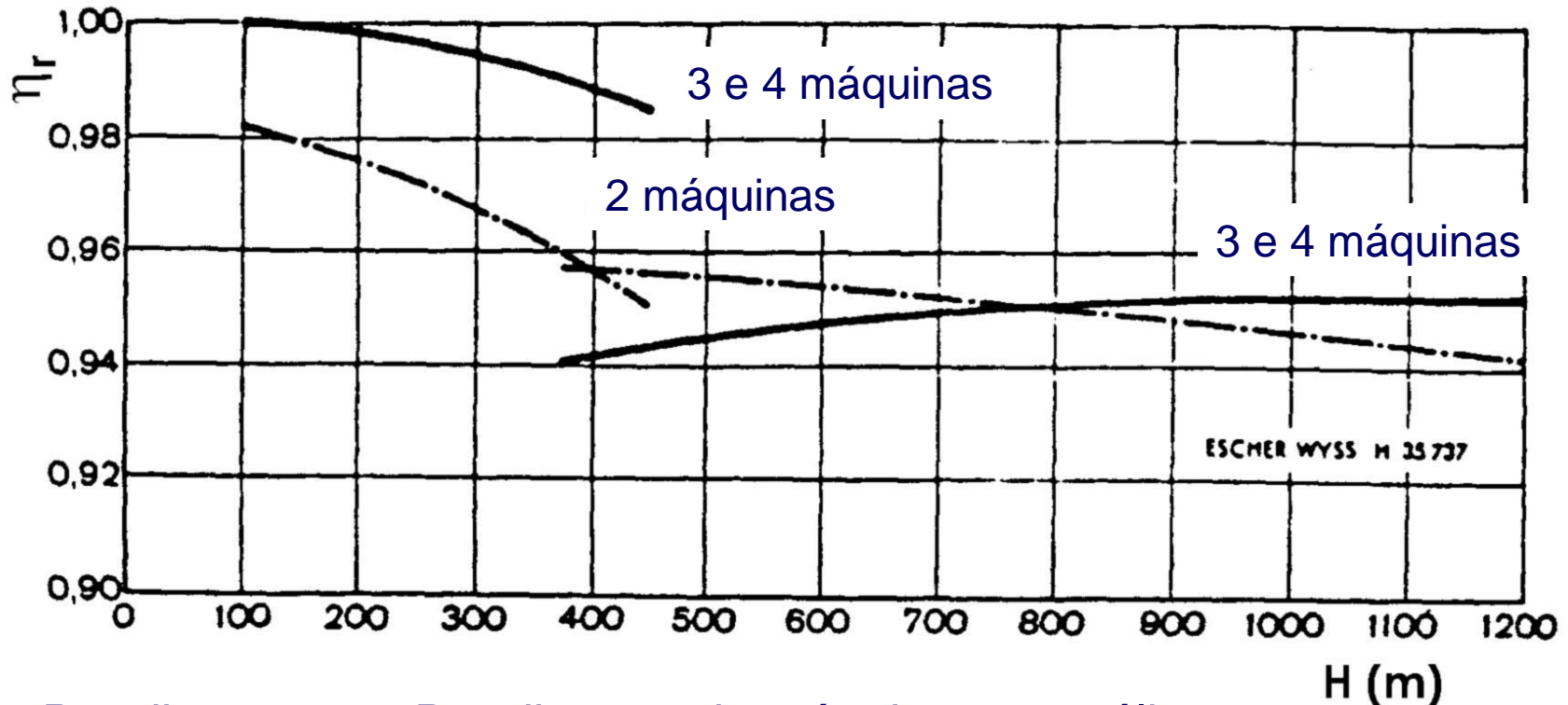
# Instalações hidrelétricas reversíveis



## Formas construtivas comparadas

Rendimentos relativos comparados

Referência: configuração de 4 máquinas, H = 100 m; P = 300 MW



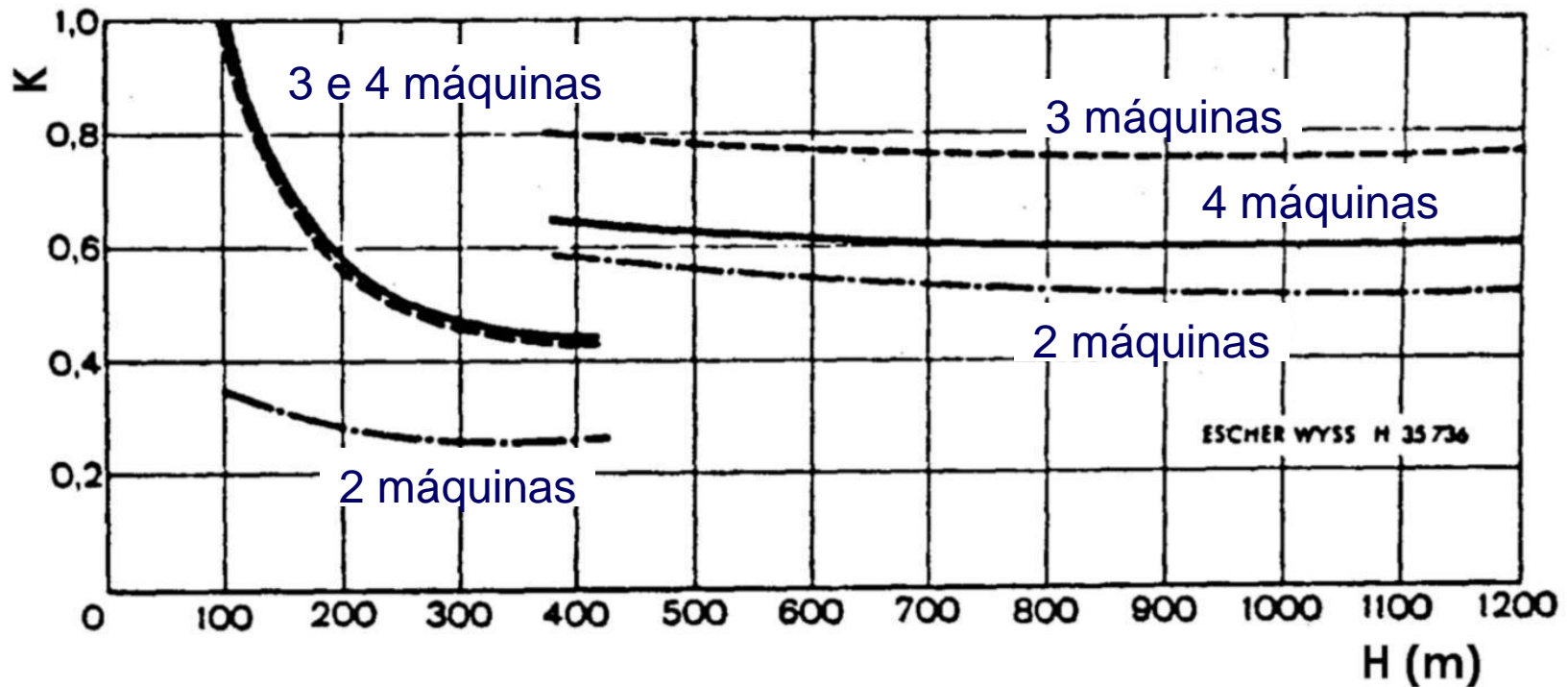
$$\text{Rendimento relativo} = \frac{\text{Rendimento da máquina em análise}}{\text{Rendimento da máquina de referência}}$$

# Instalações hidrelétricas reversíveis



## Formas construtivas comparadas

Custos relativos comparados (apenas equipamentos hidráulicos)  
Referência: configuração de 4 máquinas,  $H = 100$  m;  $P = 300$  MW



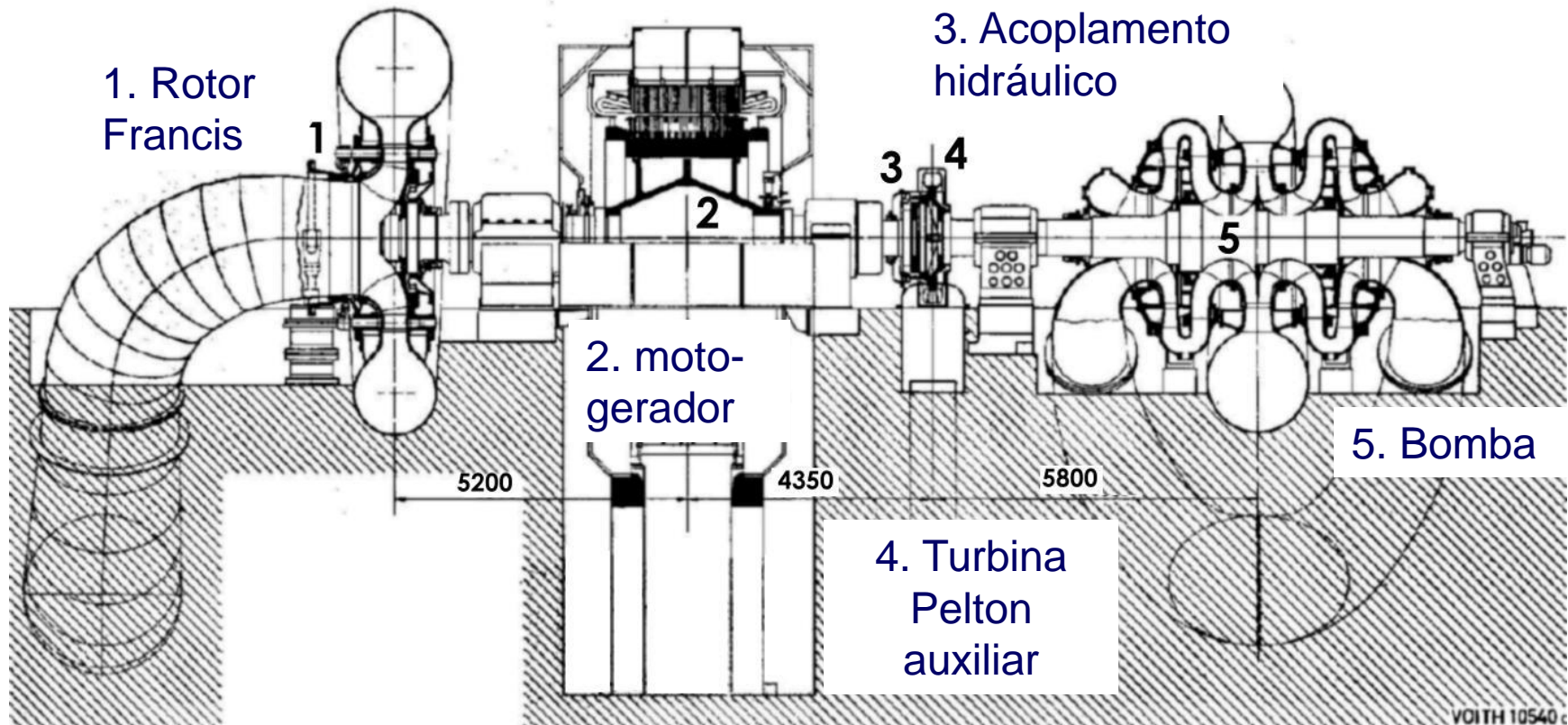


# Configuração de 3 máquinas



$P = 105 \text{ MW}$   
 $H = 290 \text{ m}$

3. Desacopla a bomba do eixo quando da operação da turbina



Vianden I a IX  
(Luxemburgo)

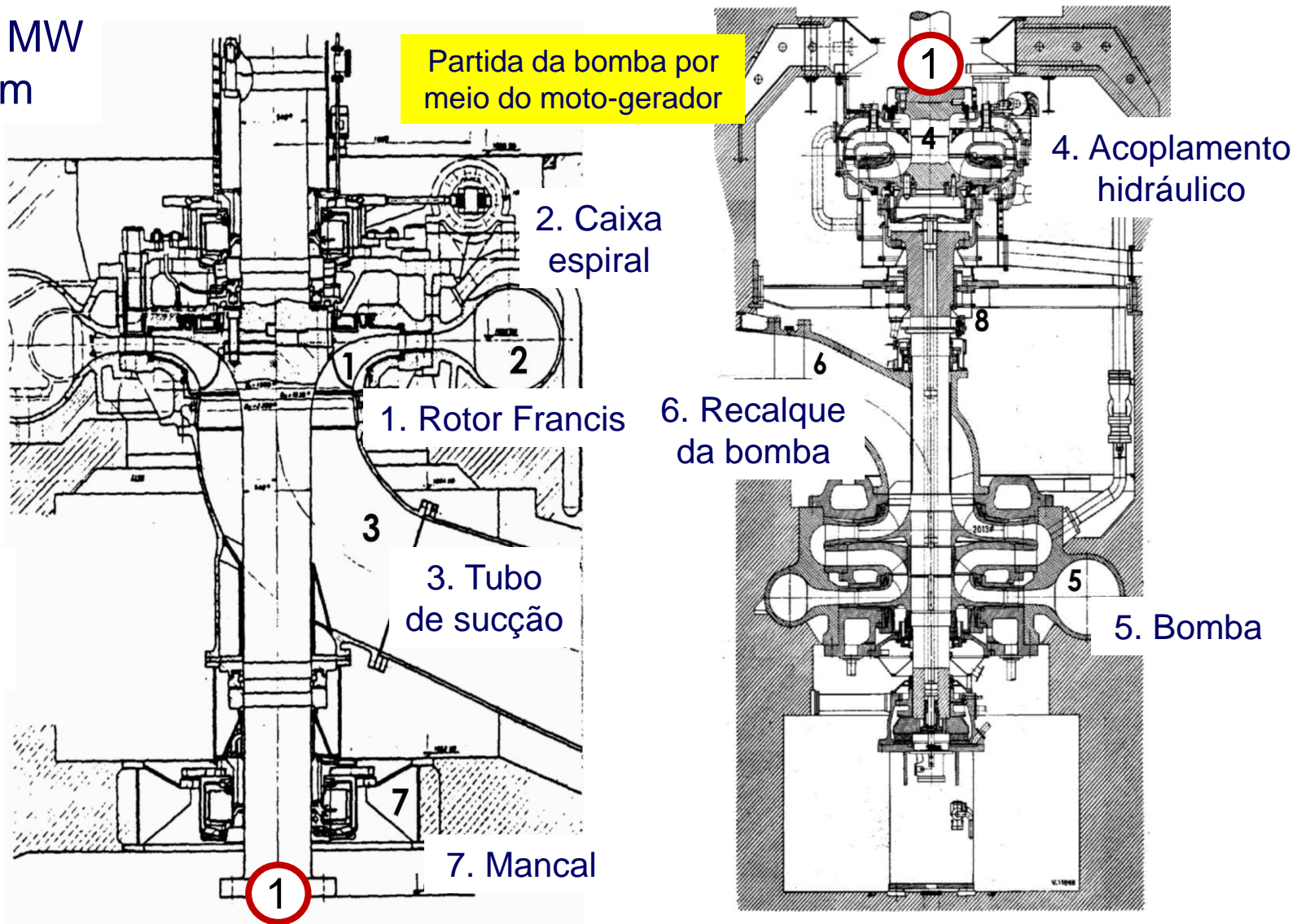
4. Inicia rotação do sistema para bombeamento. Desconectada quando o conjunto atinge determinada rotação mínima. Operação minimiza sobrecarga elétrica no motor quando em baixas rotações.



# Configuração de 3 máquinas



$P = 58,5 \text{ MW}$   
 $H = 672 \text{ m}$



Rosshag  
(Áustria)

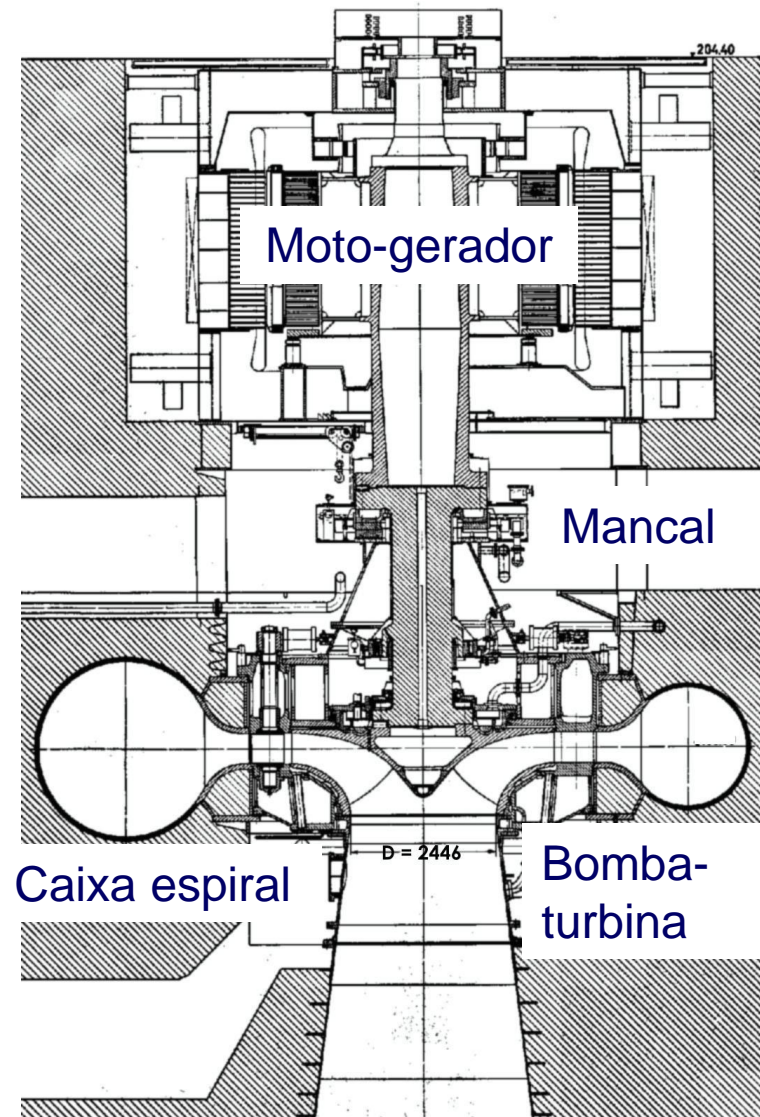
# Configuração de 2 máquinas



$P = 195,8 \text{ MW}$

$H = 286 \text{ m}$

Vianden X  
(Luxemburgo)



# Formas construtivas comparadas



## Rendimento comparado

1. Turbina 2

2. Turbina 5

$H_T = 280,0 \text{ m}$

3. Bomba-turbina X

$H = 266,0 \text{ m}$

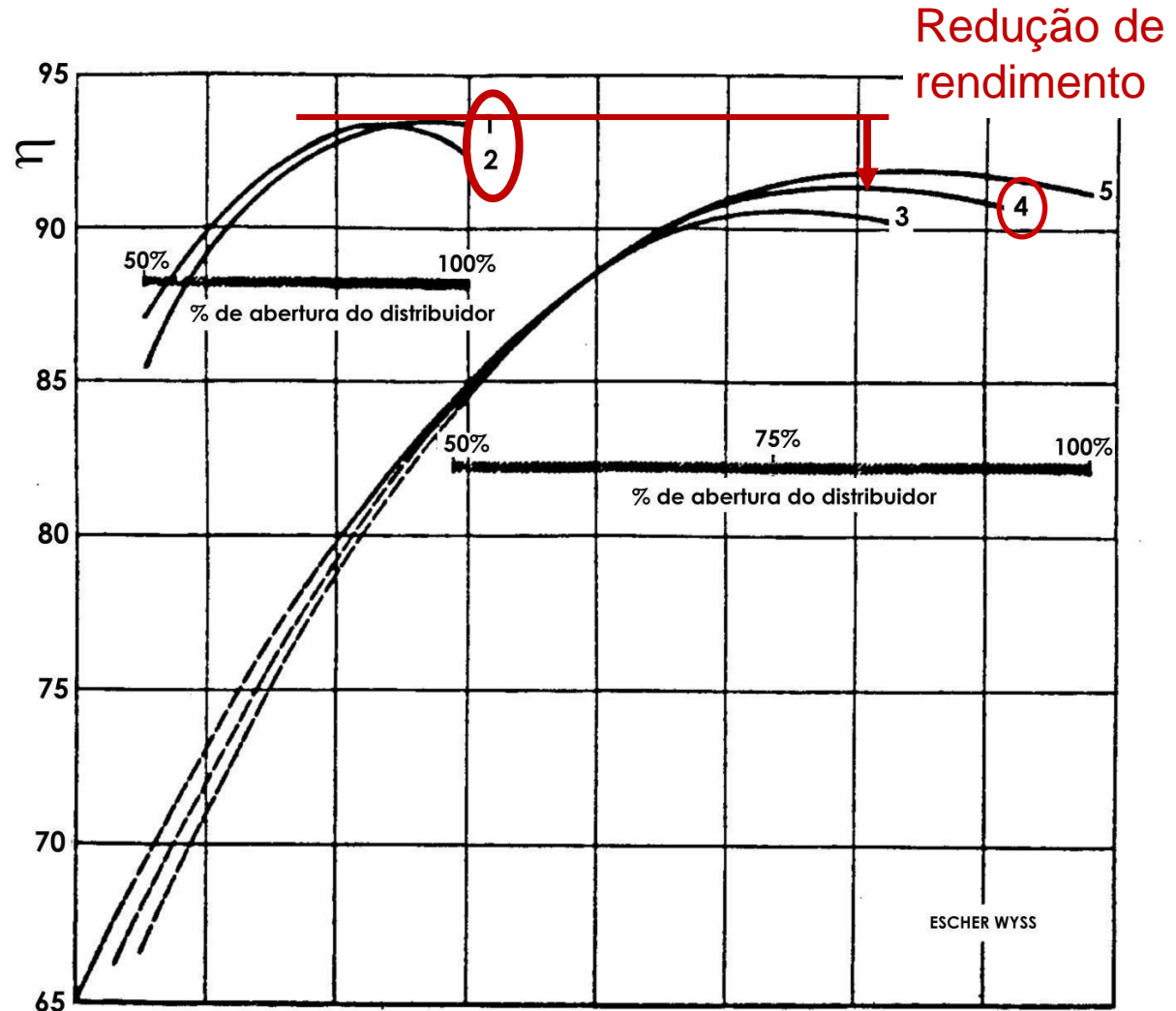
4. Bomba-turbina X

$H = 280,0 \text{ m}$

5. Bomba-turbina X

$H = 290,8 \text{ m}$

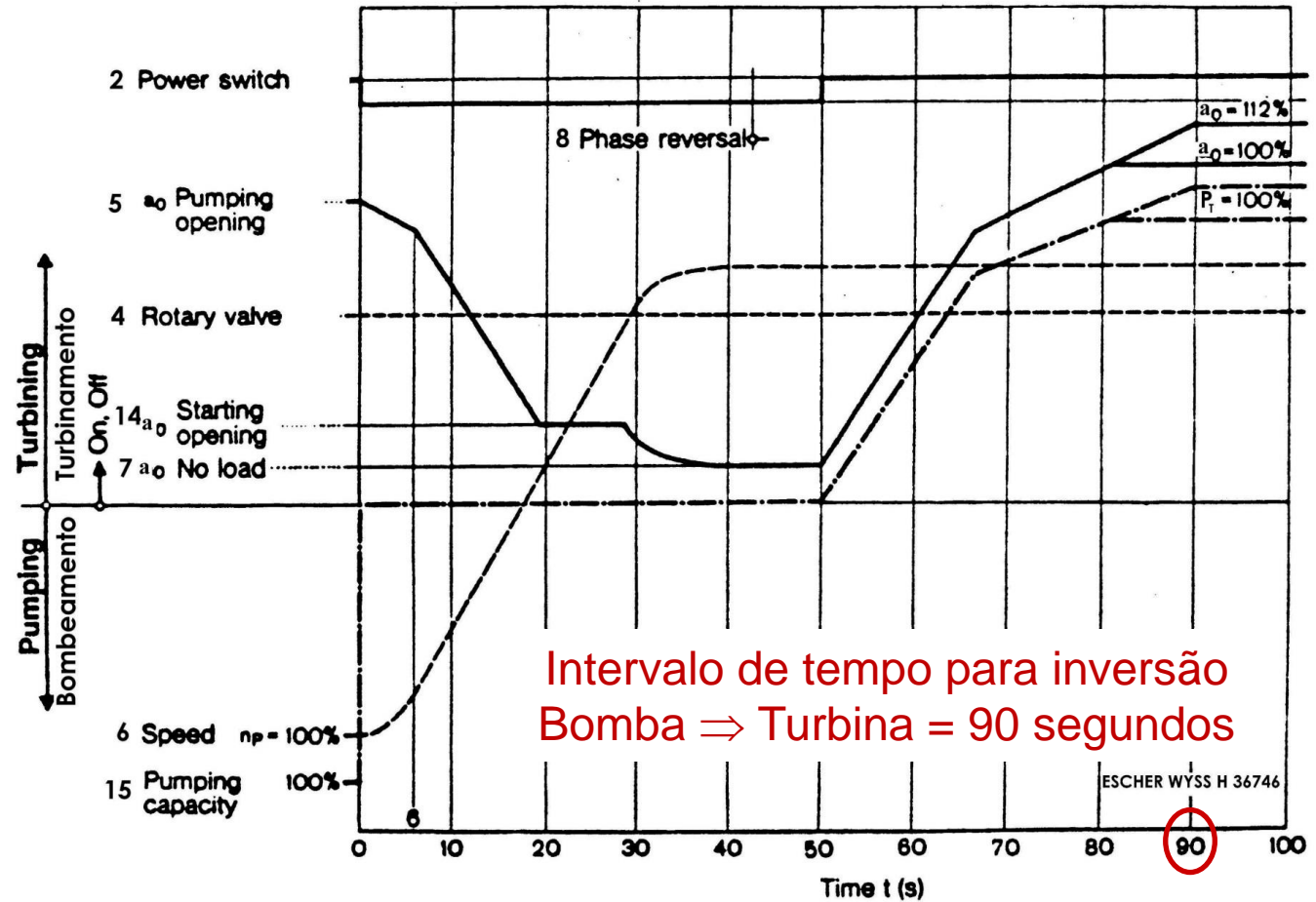
Vianden



# Alteração de bombeamento para turbinamento



2. Chave elétrica
4. Válvula esférica
5. Palhetas diretrizes
6. Rotação
7. Marcha em vazio
8. Reversão de fase
14. Início de abertura
15. Condição de bombeamento



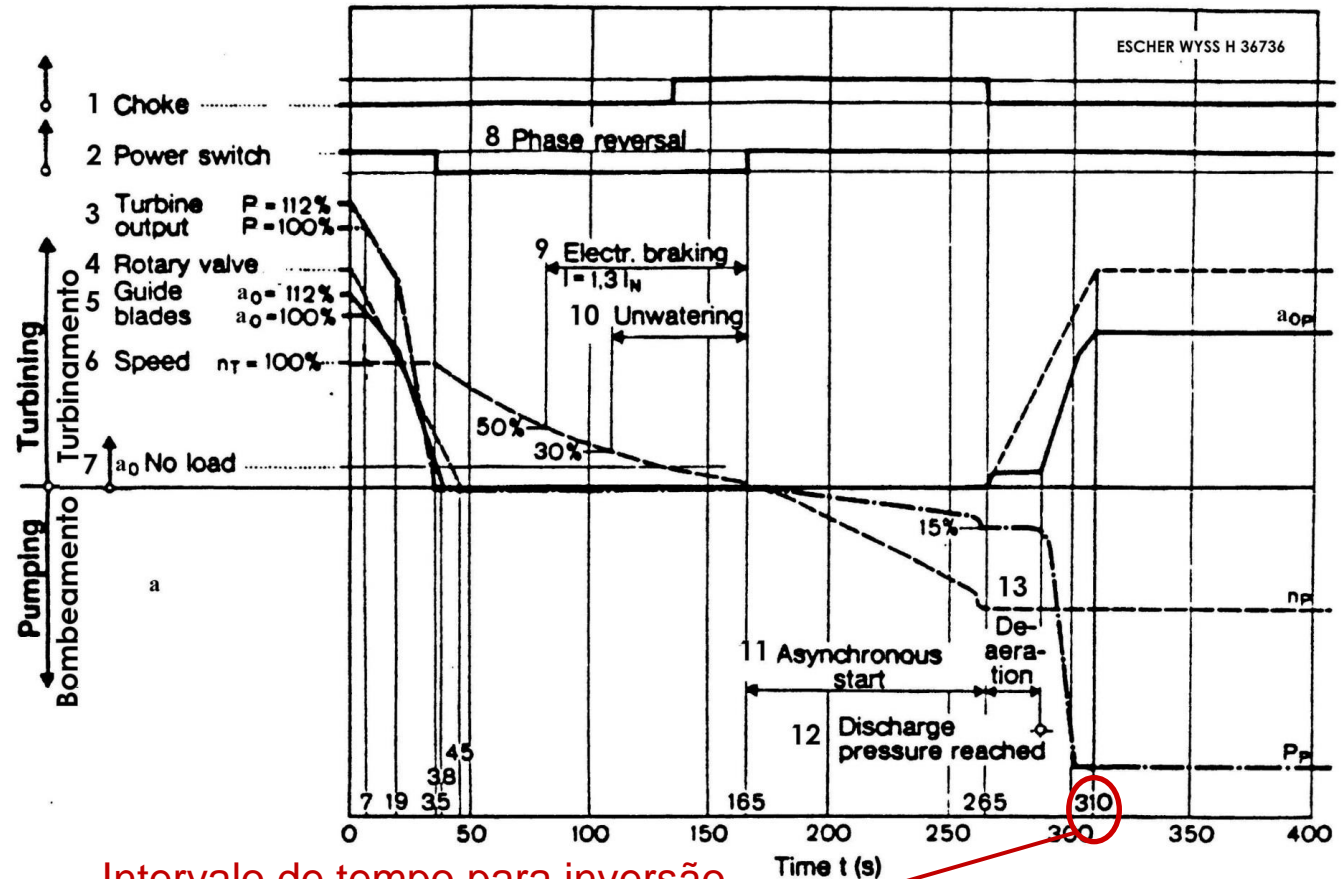
Vianden X  
(Luxemburgo)



# Alteração de turbinamento para bombeamento



1. Carga de saturação
2. Chave elétrica
3. Potência elétrica
4. Válvula esférica
5. Palhetas diretrizes
6. Rotação
7. Marcha em vazio
8. Reversão de fase
9. Frenagem elétrica
10. Interrupção de escoamento
11. Partida assíncrona
12. Alcance da pressão de descarga
13. Desaeração



Intervalo de tempo para inversão  
Turbina  $\Rightarrow$  Bomba = 310 segundos

Vianden X  
(Luxemburgo)

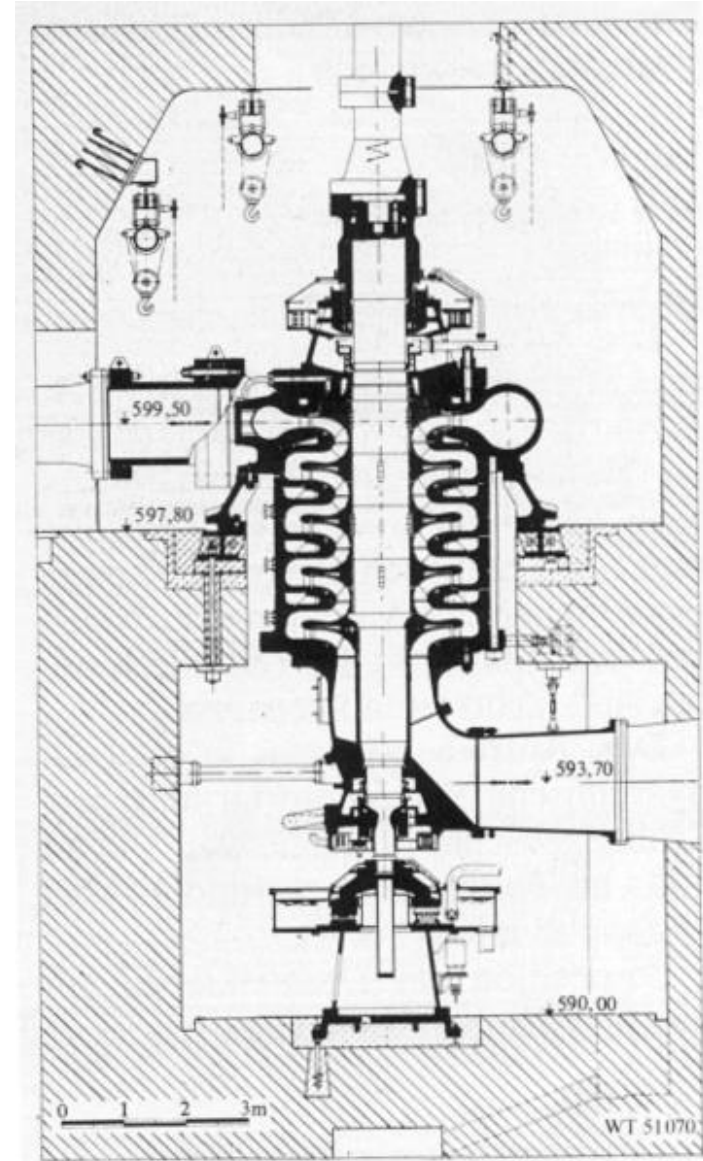


# Alternativas à limitação de altura de queda

Para alturas de queda cuja única alternativa de rotor convencional é o rotor Pelton, a bomba-turbina precisa ser composta por rotores associados em série.

**Edolo  
(Itália)**

**$P = 130 \text{ MW}$   
 $H = 1256 \text{ m}$   
5 rotores em série**



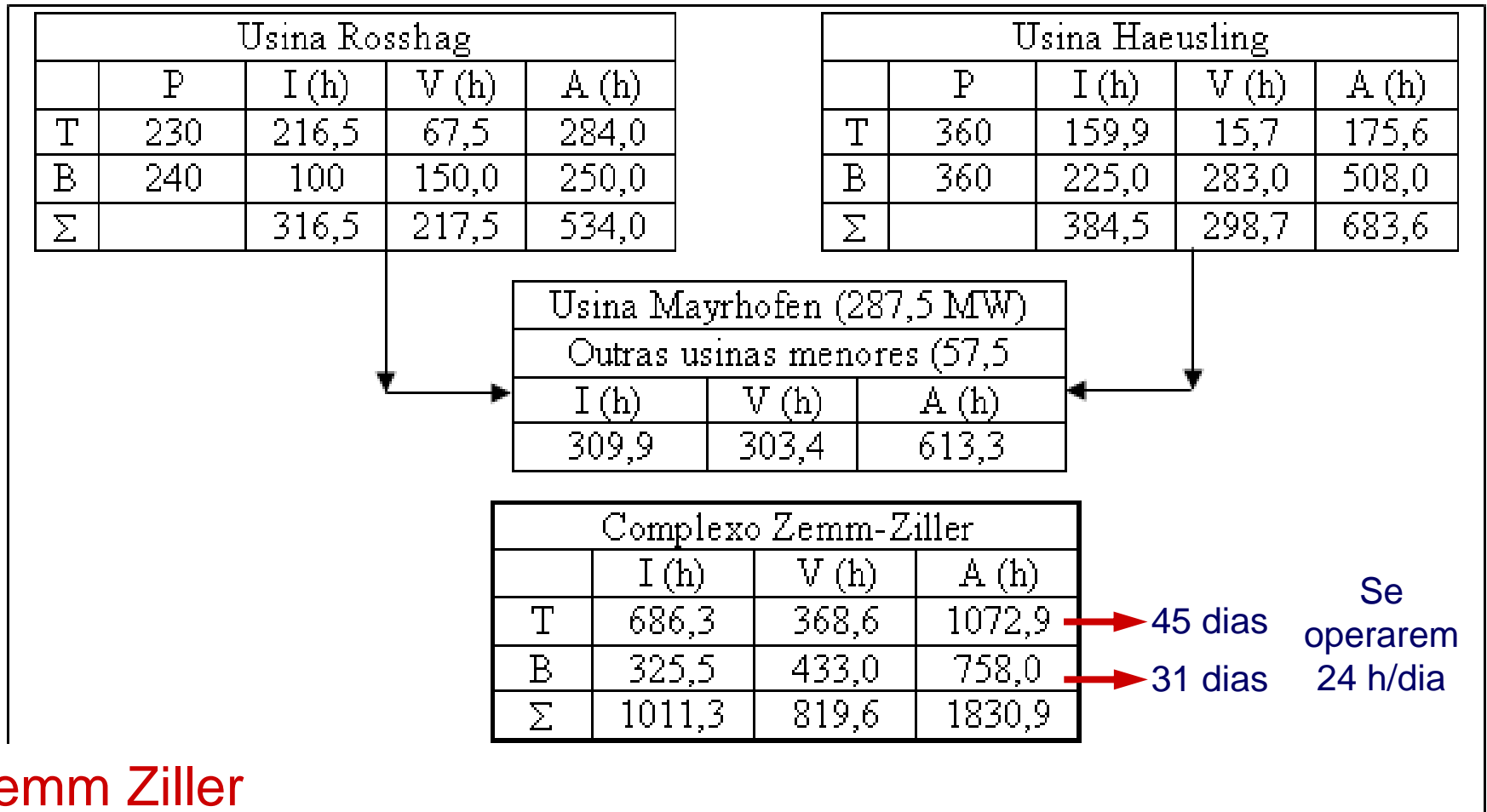


# Exemplo de um complexo reversível



## Condições operacionais

I: inverno; V: Verão; A: Ano



Zemm Ziller



# Exemplo de um complexo reversível



## Condições operacionais

<b>Rosshag</b>	Operação como bomba				Turbina
H (m)	561,9	600,0	678,5	686,5	672,0
Q (m <sup>3</sup> /s)	9,04	8,28	6,45	6,10	12,51
P (MW)	58,45	55,73	48,98	47,41	58,50
n (rpm)	750	750	750	750	750

Bomba:  $Q_{\text{médio}} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 250 horas/ano  $\rightarrow 17,3 \times 10^7 \text{ m}^3$

Turbina:  $Q_{\text{médio}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 284 horas/ano  $\rightarrow 24,5 \times 10^7 \text{ m}^3$

Cerca de 70% da água turbinada deve ser bombeada para o reservatório superior.

---

Dúvidas?

Obrigado.



**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**