

# PME3453 Máquinas de fluxo e sistemas fluidodinâmicos



EPUSP / Engenharia Mecânica



**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



## PARTE 2

### 4.3 Turbinas hidráulicas

#### 4.3.1 Introdução

#### 4.3.2 Formas construtivas

Turbinas Pelton, Francis, Kaplan e bulbo

Formas construtivas adicionais

Partes componentes de turbinas

Caixa espiral e pré-distribuidor, distribuidor e acionamento das palhetas diretrizes, tubo de sucção, mancais

Análise das formas construtivas

### 4.4 Transformação de energia em turbinas



## PARTE 3

### 4.3.2.12 &13 Triângulos de velocidade em turbinas Francis



Serão abordadas apenas as formas construtivas principais: Pelton, Francis e Kaplan.

Sempre que disponíveis serão seguidas as normas brasileiras da ABNT.

Parâmetro de escolha

Rotação específica

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{H^{0,75}}$$

Número-tipo

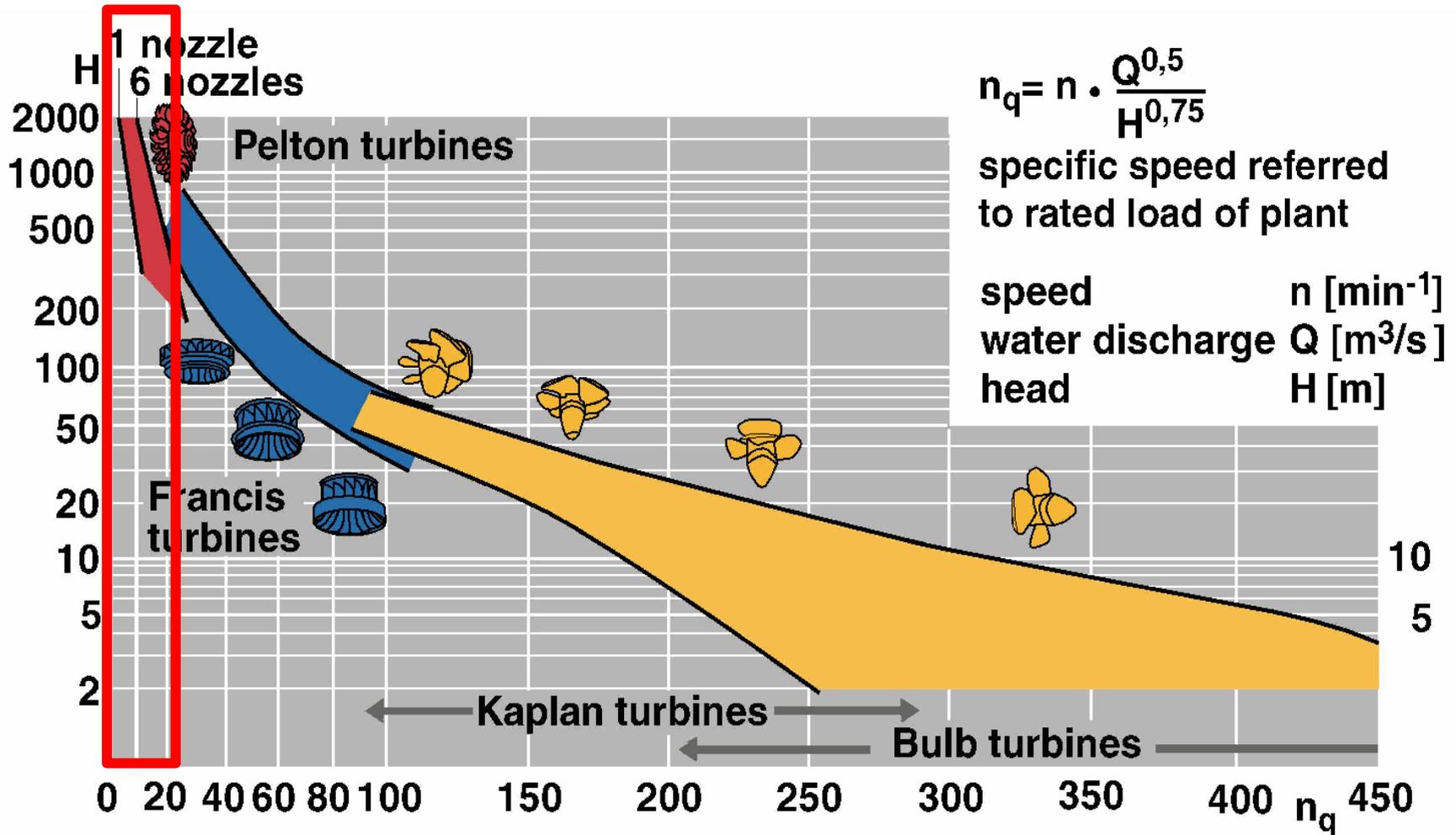
$$K = \frac{2\pi n\sqrt{Q}}{60 (g H)^{0,75}}$$

K e  $n_q$  oferecem a mesma informação

# Turbinas Pelton

$$K \leq 0,36$$

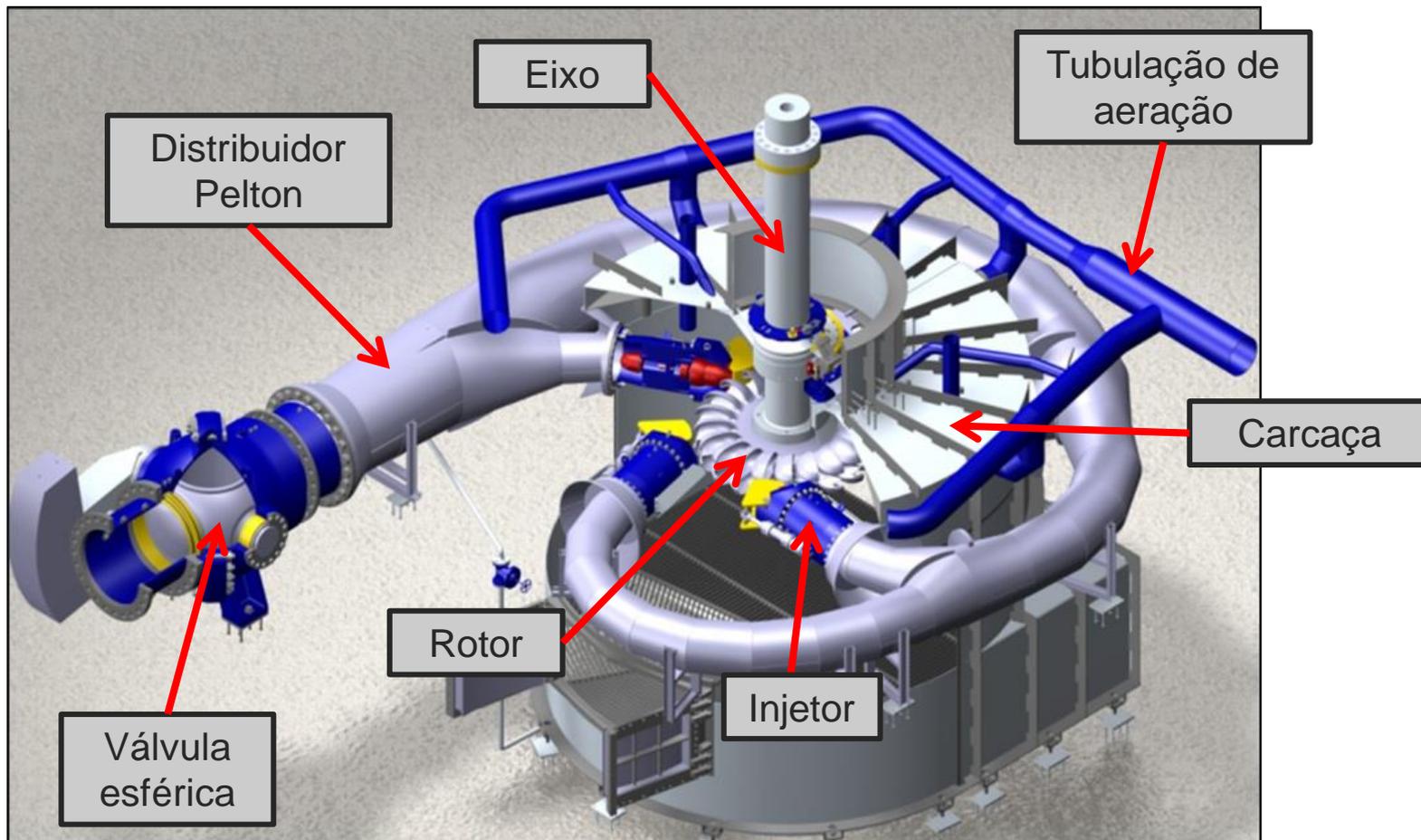
$$n_q \leq 20$$



# Turbinas Pelton

$$K \leq 0,36$$

$$n_q \leq 20$$



Turbinas Pelton

$$K \leq 0,36$$

$$n_q \leq 20$$



**VOITH**

Pelton turbine

# Turbinas Pelton

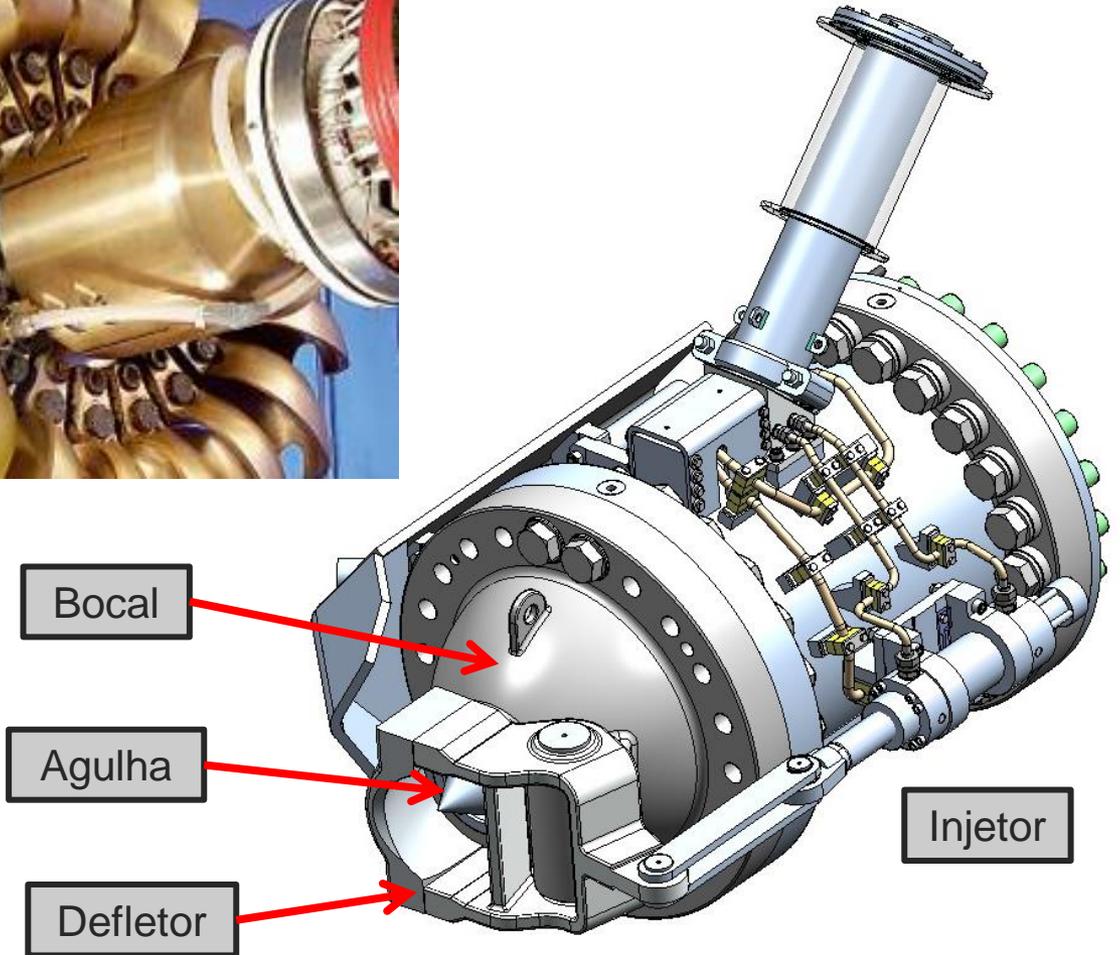
$$K \leq 0,36$$

$$n_q \leq 20$$



Rotor Pelton

Injetor



Bocal

Aguilha

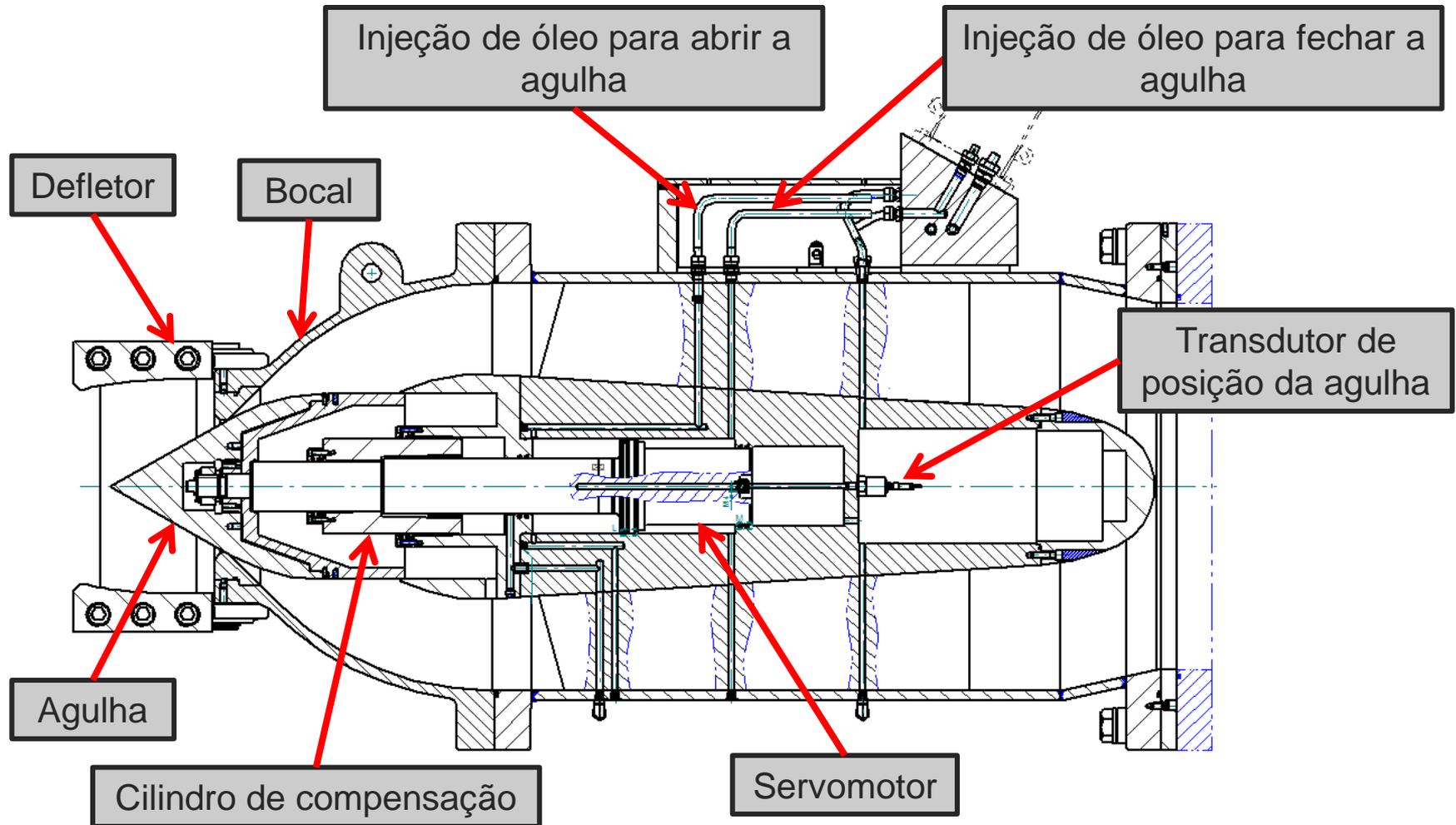
Defletor

Injetor

# Turbinas Pelton

$$K \leq 0,36$$

$$n_q \leq 20$$





Caso ideal

Velocidade absoluta da água ( $c$ )

Velocidade tangencial do rotor ( $u$ )

Velocidade relativa da água ( $\omega$ )

$$c_2 = \sqrt{2gH}$$

$$\omega_2 = (c_2 - u)$$

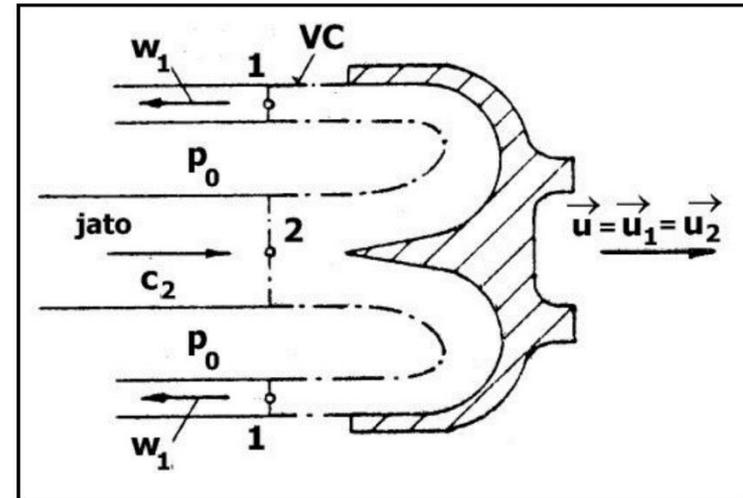
$$\omega_1 = (c_1 - u) \rightarrow c_1 = \omega_1 + u$$

$$\omega_1 = -(c_2 - u) \quad (\text{Bernoulli})$$

$$c_1 = -c_2 + u + u \rightarrow c_1 = -c_2 + 2u$$

Para máxima transferência de energia cinética  $c_1 \rightarrow 0$  e

$$u = c_2/2$$

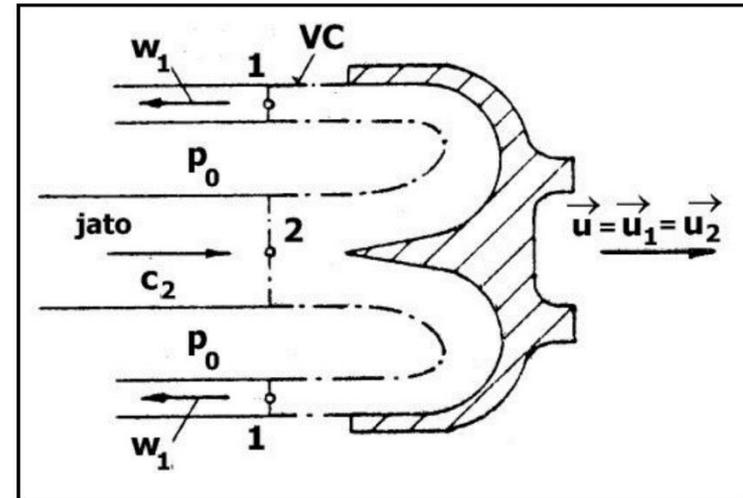




$$F = -m \frac{(c_2 - c_1)}{t}$$

$$F = -\rho Q(c_2 + c_2 - 2u)$$

$$F = -2\rho Q(c_2 - u)$$



Se  $D$  é diâmetro de incidência do jato (medida do diâmetro do rotor)

$$T = \rho Q D (c_2 - u)$$

E

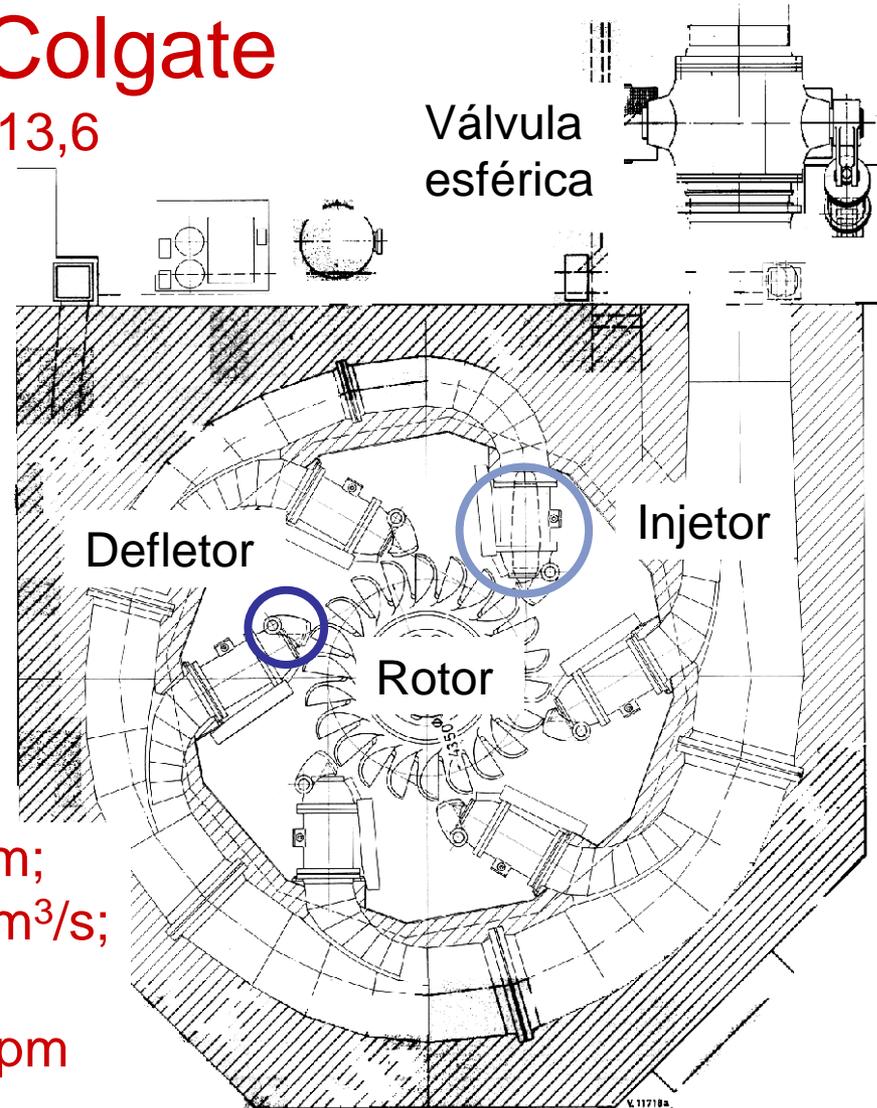
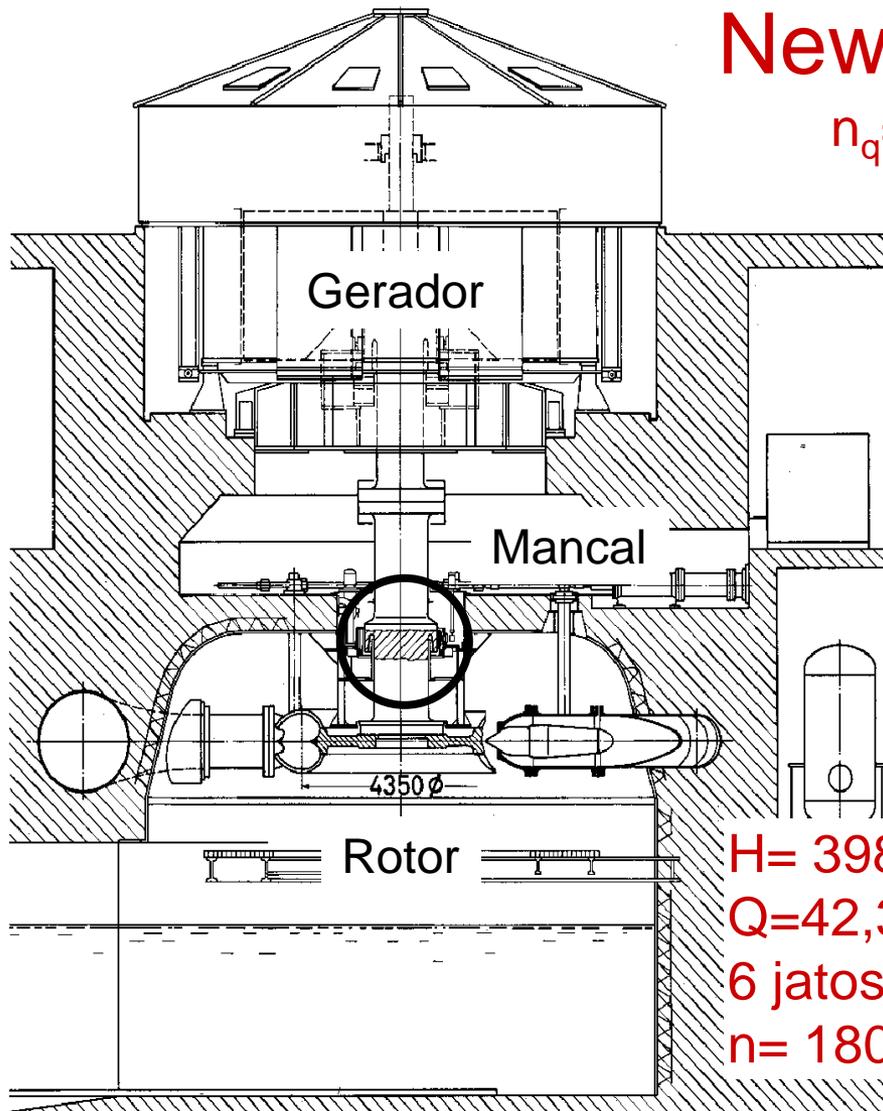
$$P = 2\rho Q (c_2 - u)u$$

Como  $u = c_2/2$  e  $c_2 = \sqrt{2gH}$

$$P = \rho Q \frac{c_2^2}{2} = \rho g Q H$$



## New Colgate

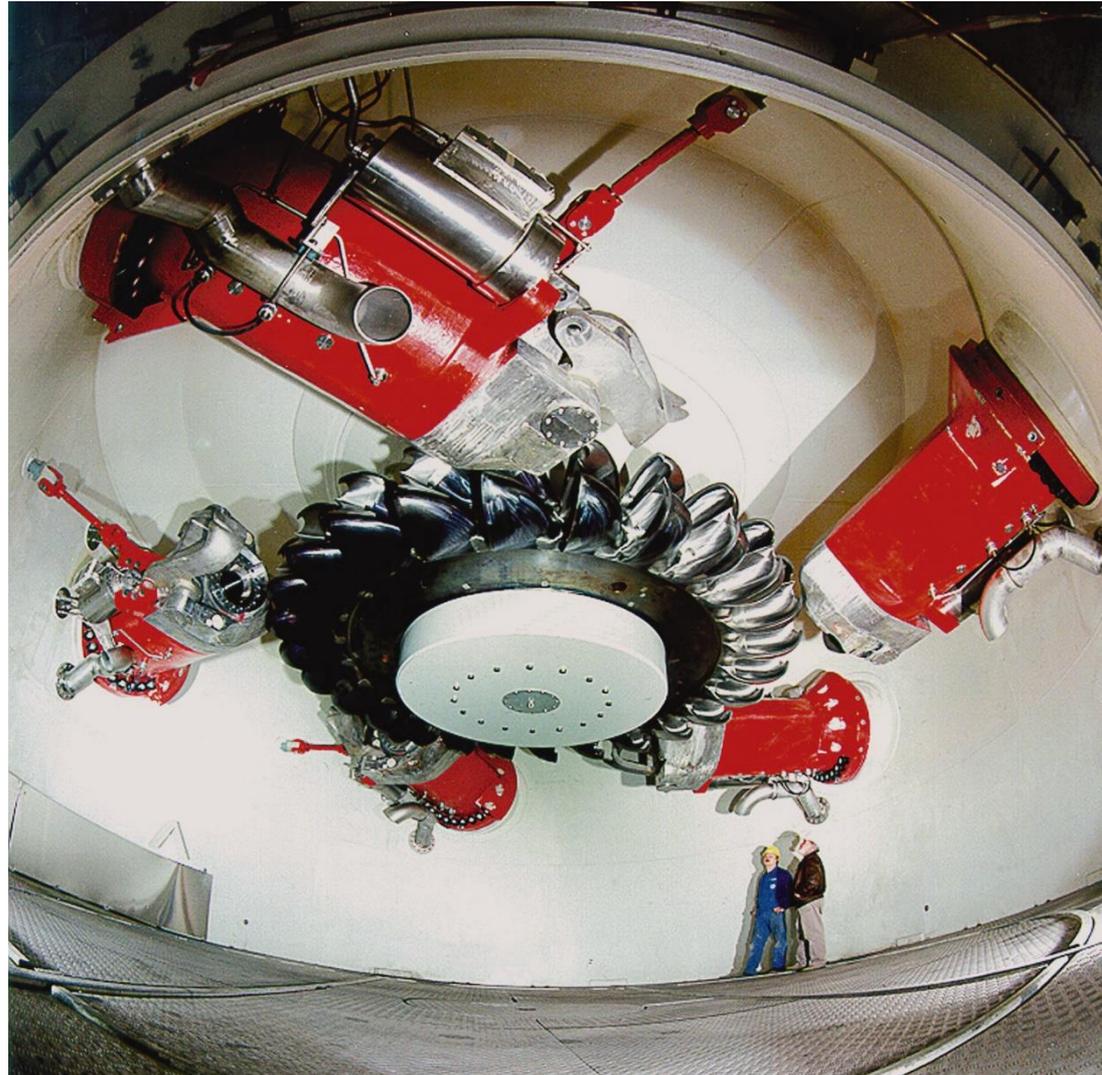
 $n_q = 13,6$ 

$H = 398 \text{ m};$   
 $Q = 42,3 \text{ m}^3/\text{s};$   
6 jatos;  
 $n = 180 \text{ rpm}$

# Usina de Bieudron



$H = 1869 \text{ m};$   
 $P = 423 \text{ MW};$   
 $Q = 25,0 \text{ m}^3/\text{s};$   
5 jatos;  
 $\eta = 92,2\%$

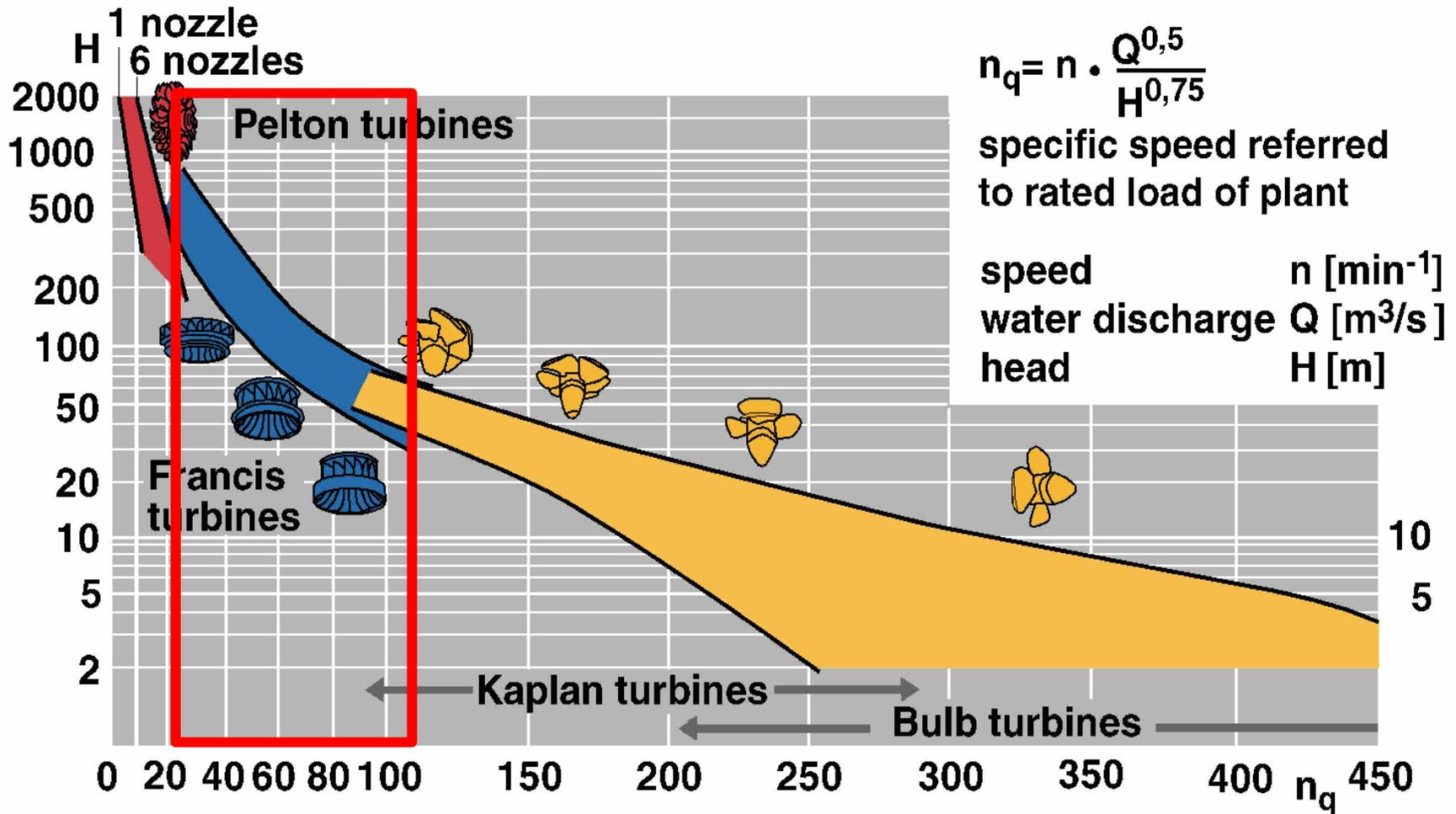


<https://www.andritz.com/hydro-en/references>

# Turbinas Francis

$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

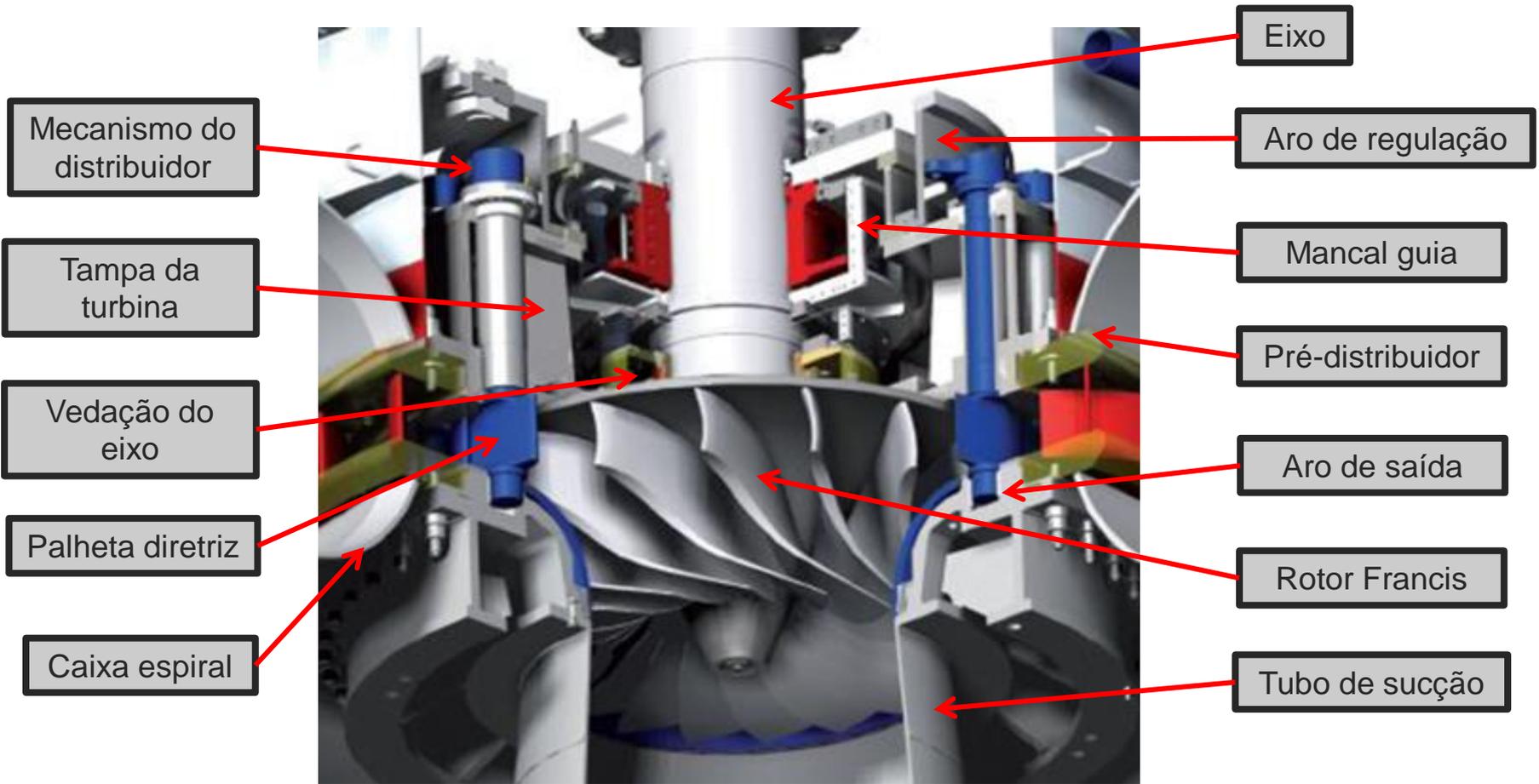
$$20 \leq n_q \leq 110$$



# Turbinas Francis

$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

$$20 \leq n_q \leq 110$$



Turbinas Francis

$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

$$20 \leq n_q \leq 110$$



**VOITH**

Francis turbine



- Massa 320 ton;
- Altura 5.000 mm;
- Diâmetro 9.000 mm;
- Potência 620,4 MW.

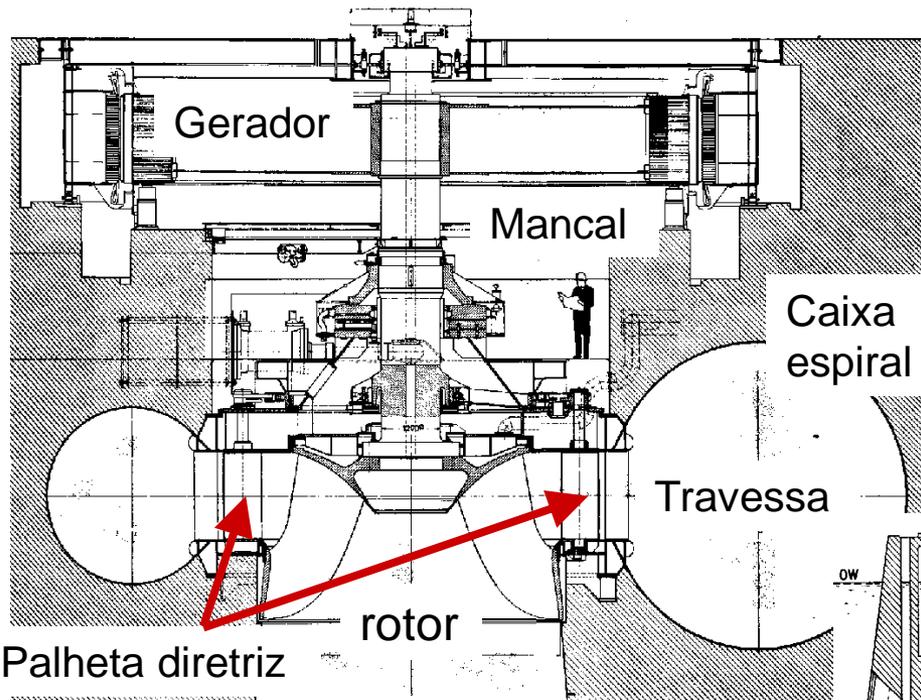
## Rotores Francis



# Turbinas Francis

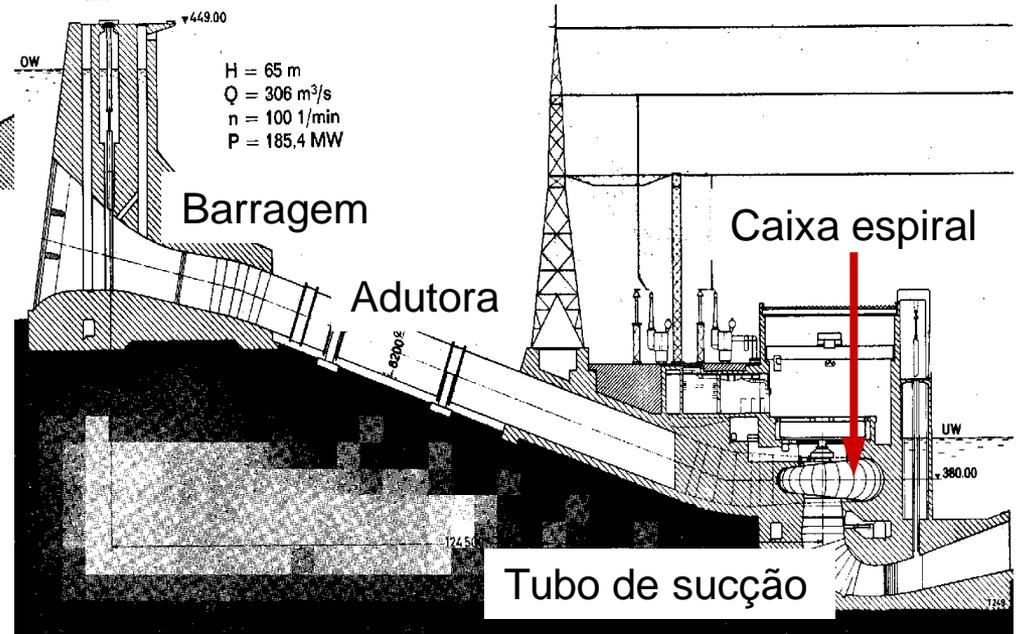
$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

$$20 \leq n_q \leq 110$$



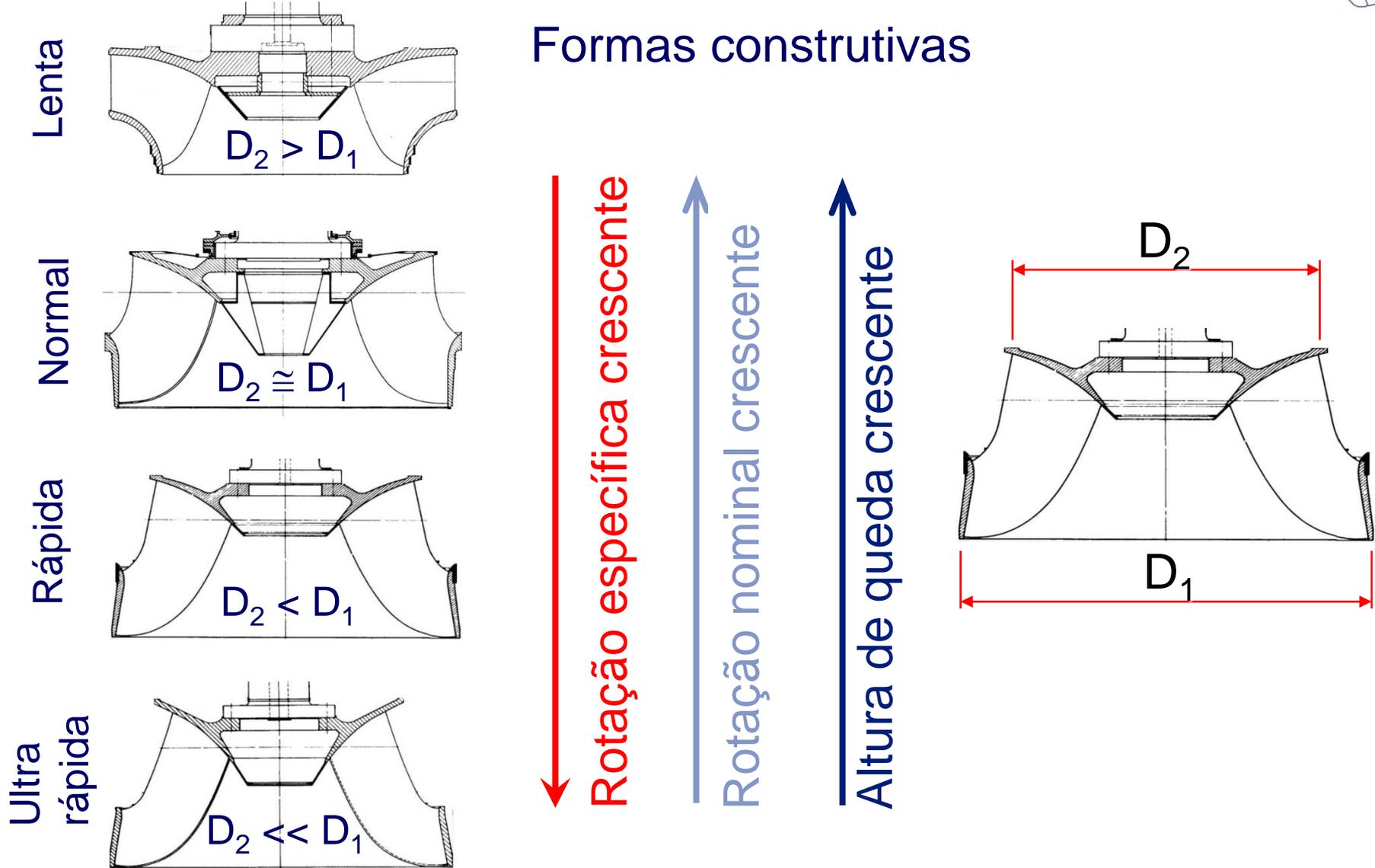
H= 65 m;  
Q=306,0 m<sup>3</sup>/s;  
n= 100 rpm  
n<sub>q</sub>= 76

## Marimbondo





## Formas construtivas



# Usina de Baihetan



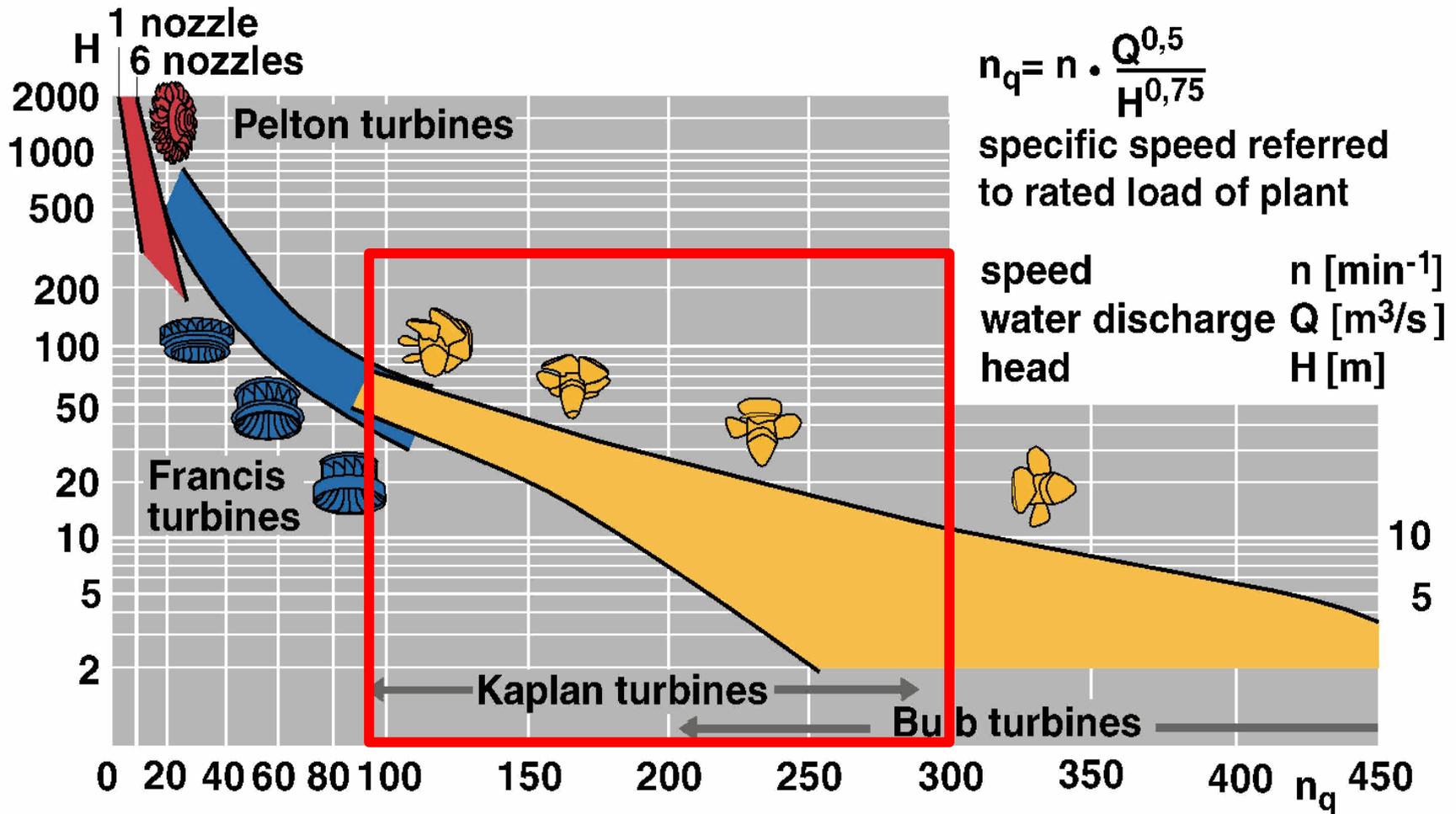
H= 279 m (?);  
P = 1000 MW;



# Turbinas Kaplan

$$1,73 \leq K \leq 5,46$$

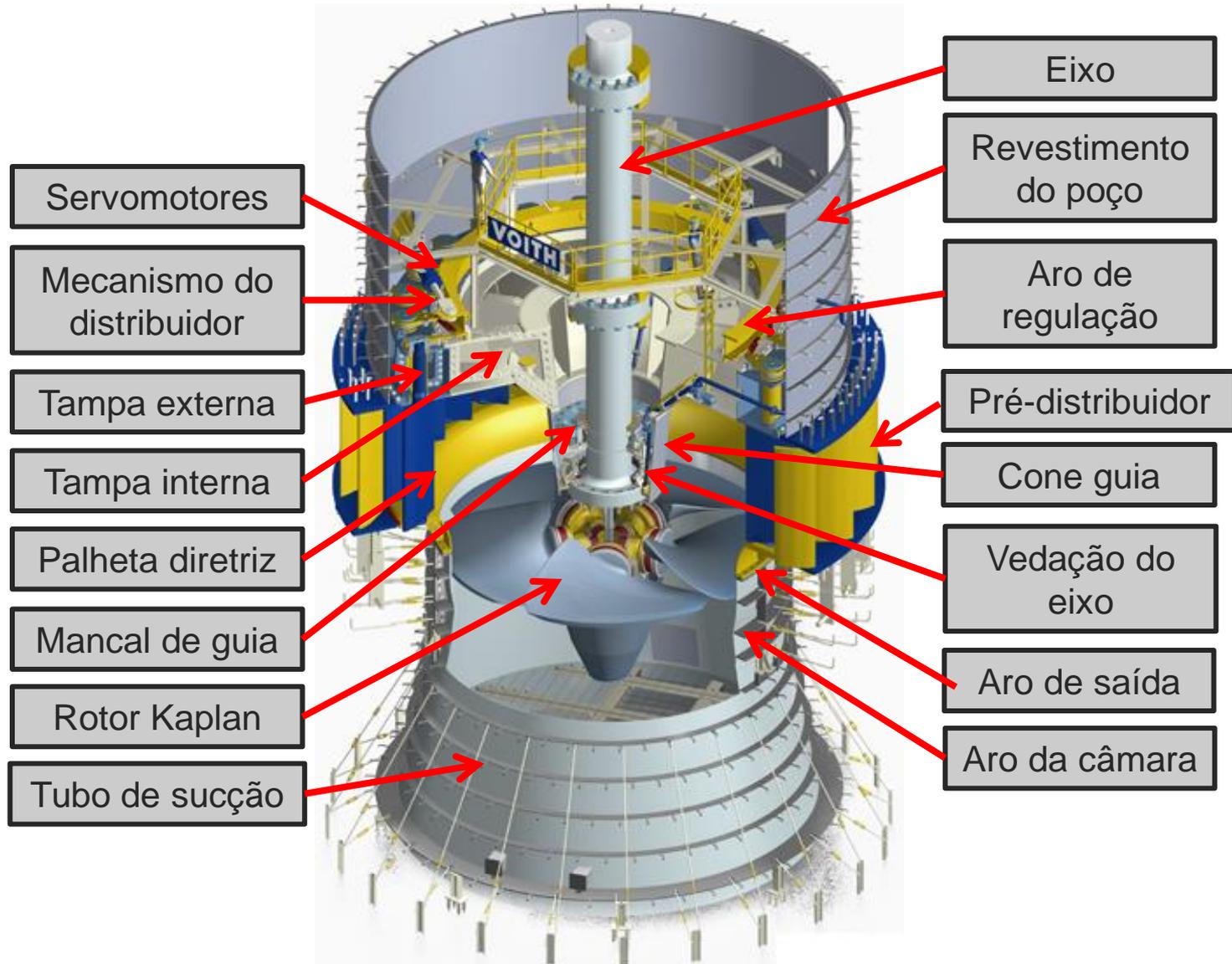
$$95 \leq n_q \leq 300$$



# Turbinas Kaplan

$$1,73 \leq K \leq 5,46$$

$$95 \leq n_q \leq 300$$



Turbinas Francis

$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

$$20 \leq n_q \leq 110$$



**VOITH**

Kaplan turbine



# Turbinas Kaplan

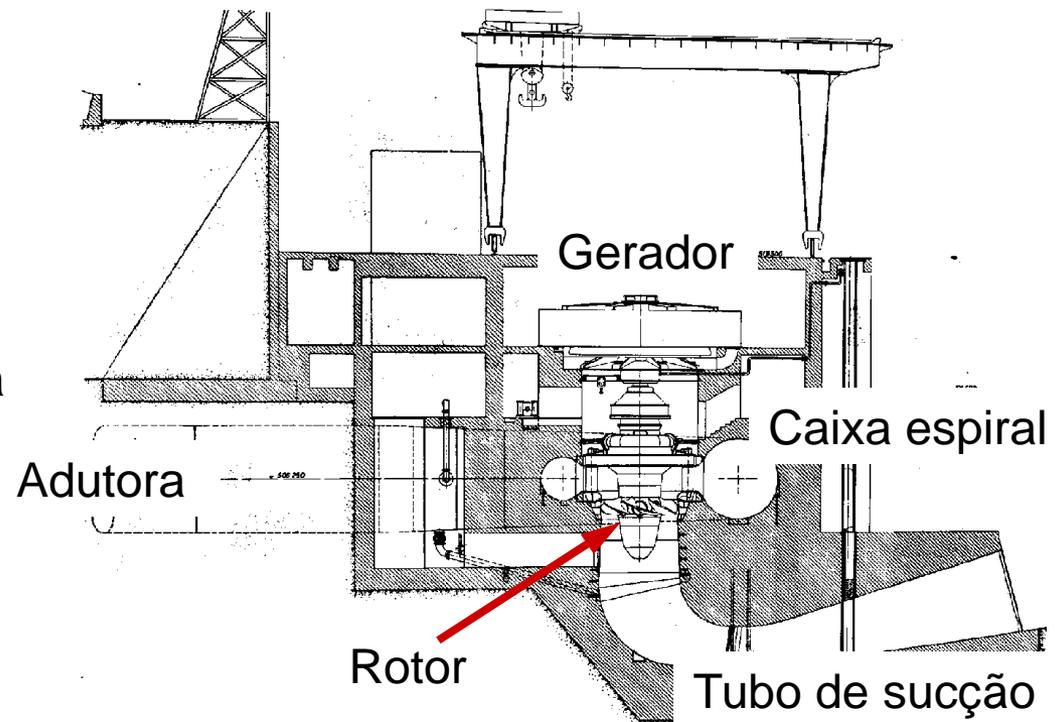
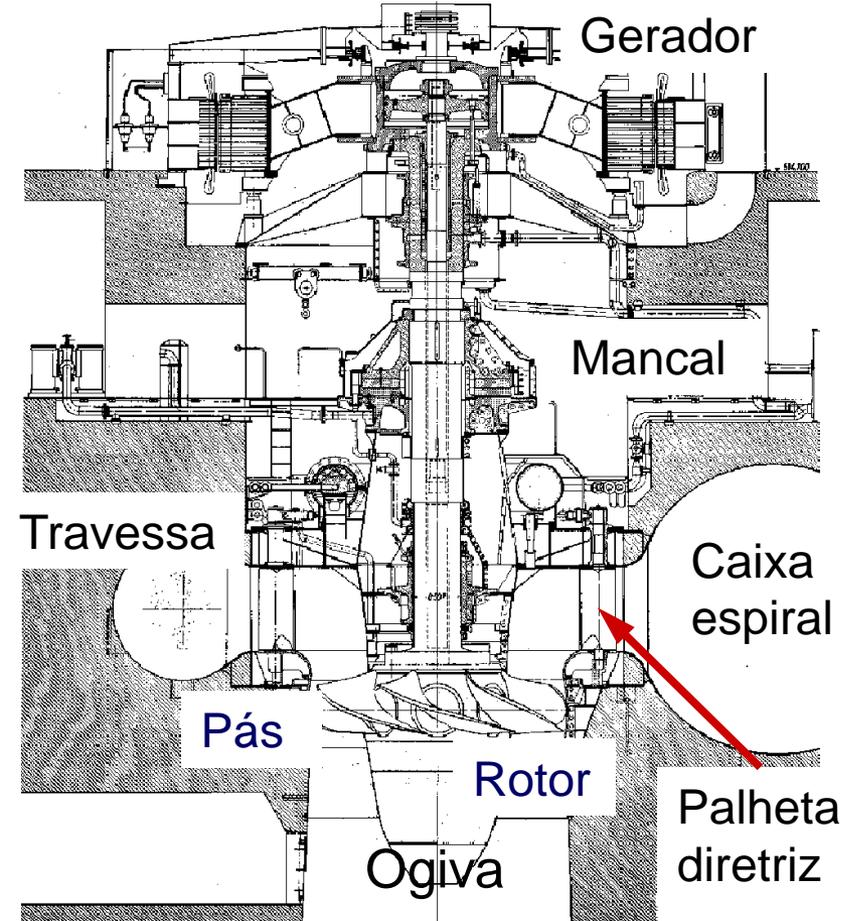
$$1,73 \leq K \leq 5,46$$

$$95 \leq n_q \leq 300$$



$H = 50 \text{ m};$   
 $Q = 150,0 \text{ m}^3/\text{s};$   
 $n = 163,6 \text{ rpm}$   
 $n_q = 106$

## Três Marias



# Usina de Tocomá (Manuel Piar)



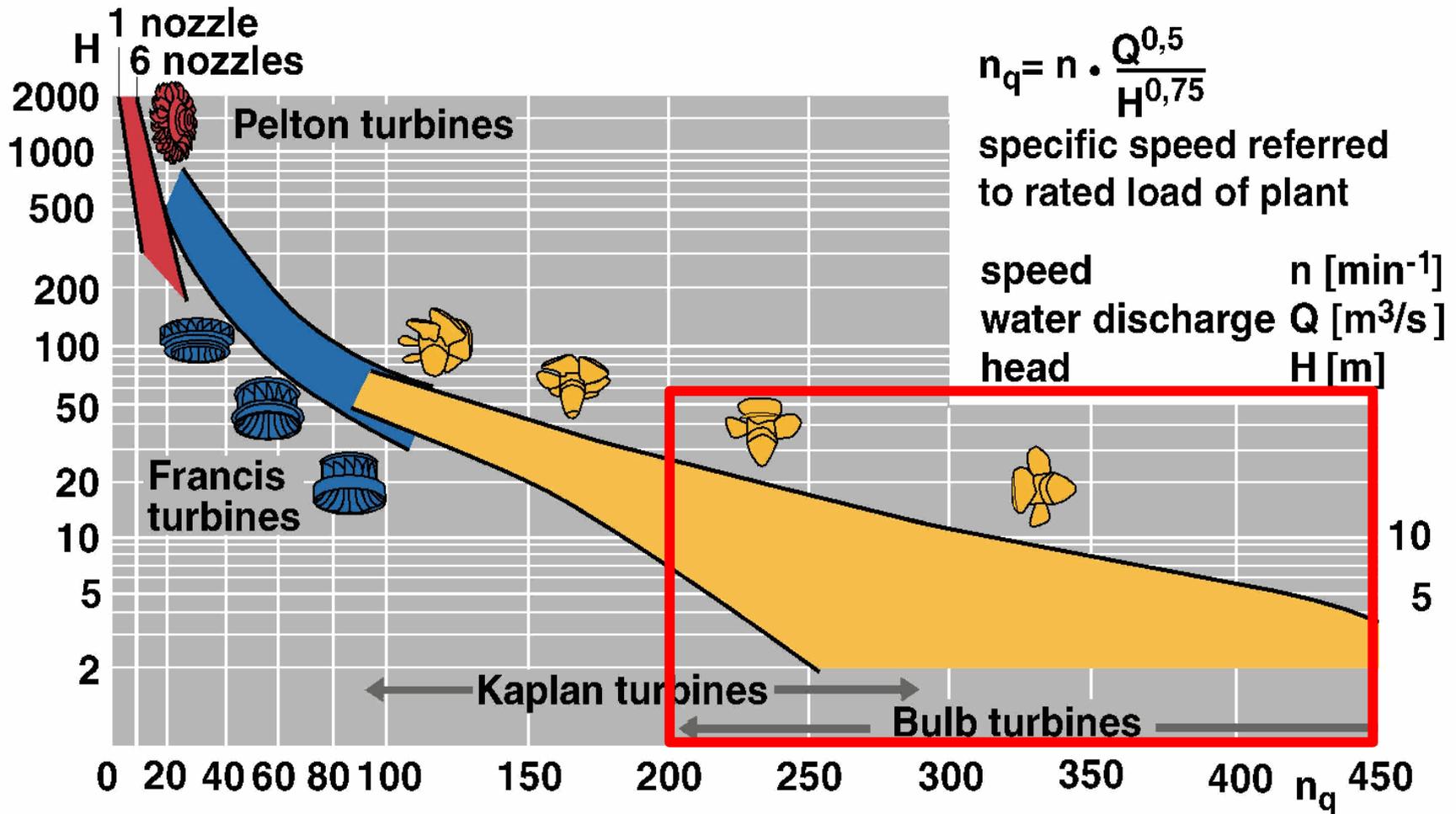
H= 34 m;  
P = 230 MW;



# Turbinas Bulbo

$$3,64 \leq K \leq 8,19$$

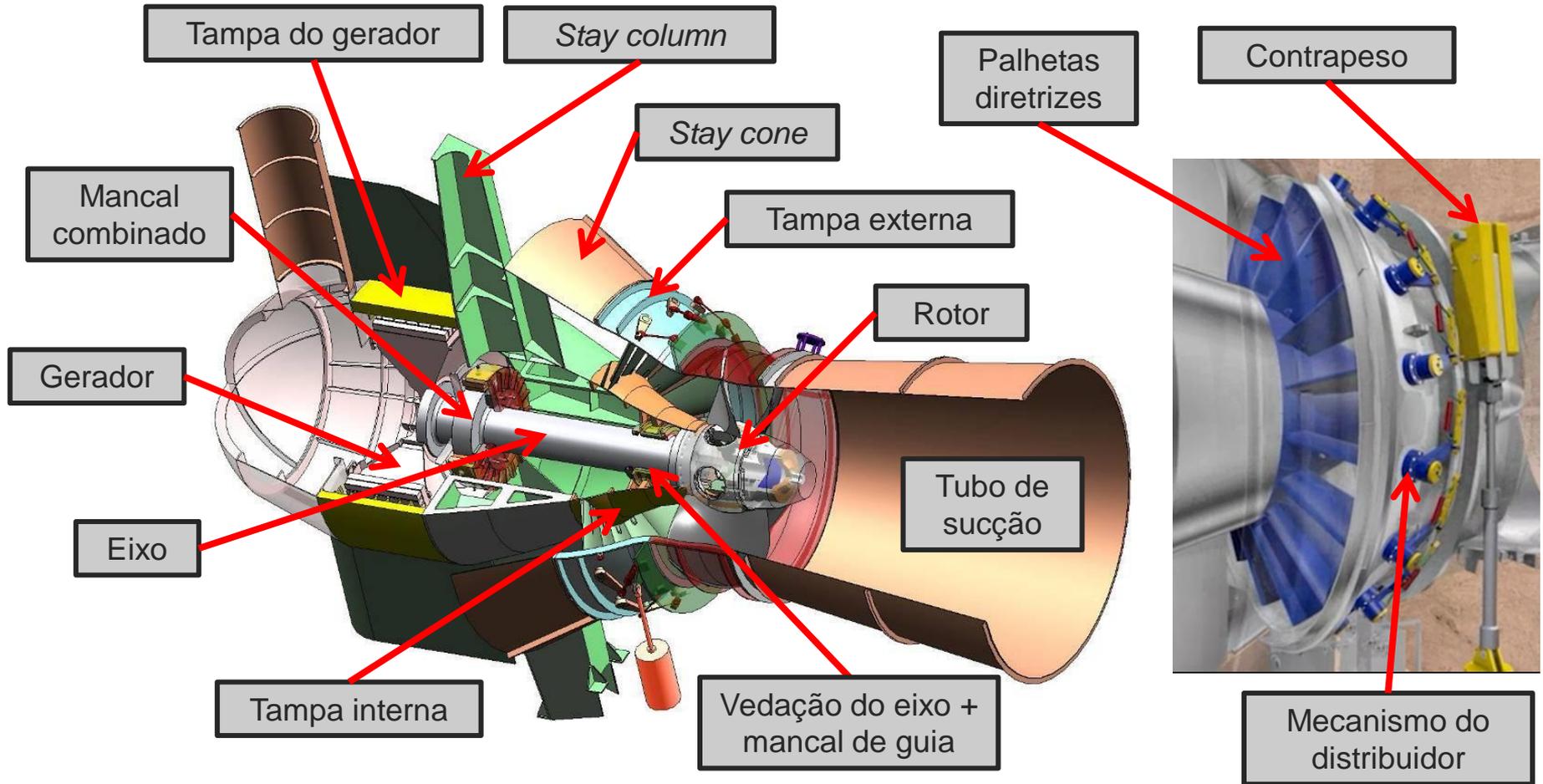
$$200 \leq n_q \leq 450$$



# Turbinas Bulbo

$$3,64 \leq K \leq 8,19$$

$$200 \leq n_q \leq 450$$



Turbinas Francis

$$0,36 \leq K \leq 2,00$$

$$20 \leq n_q \leq 110$$



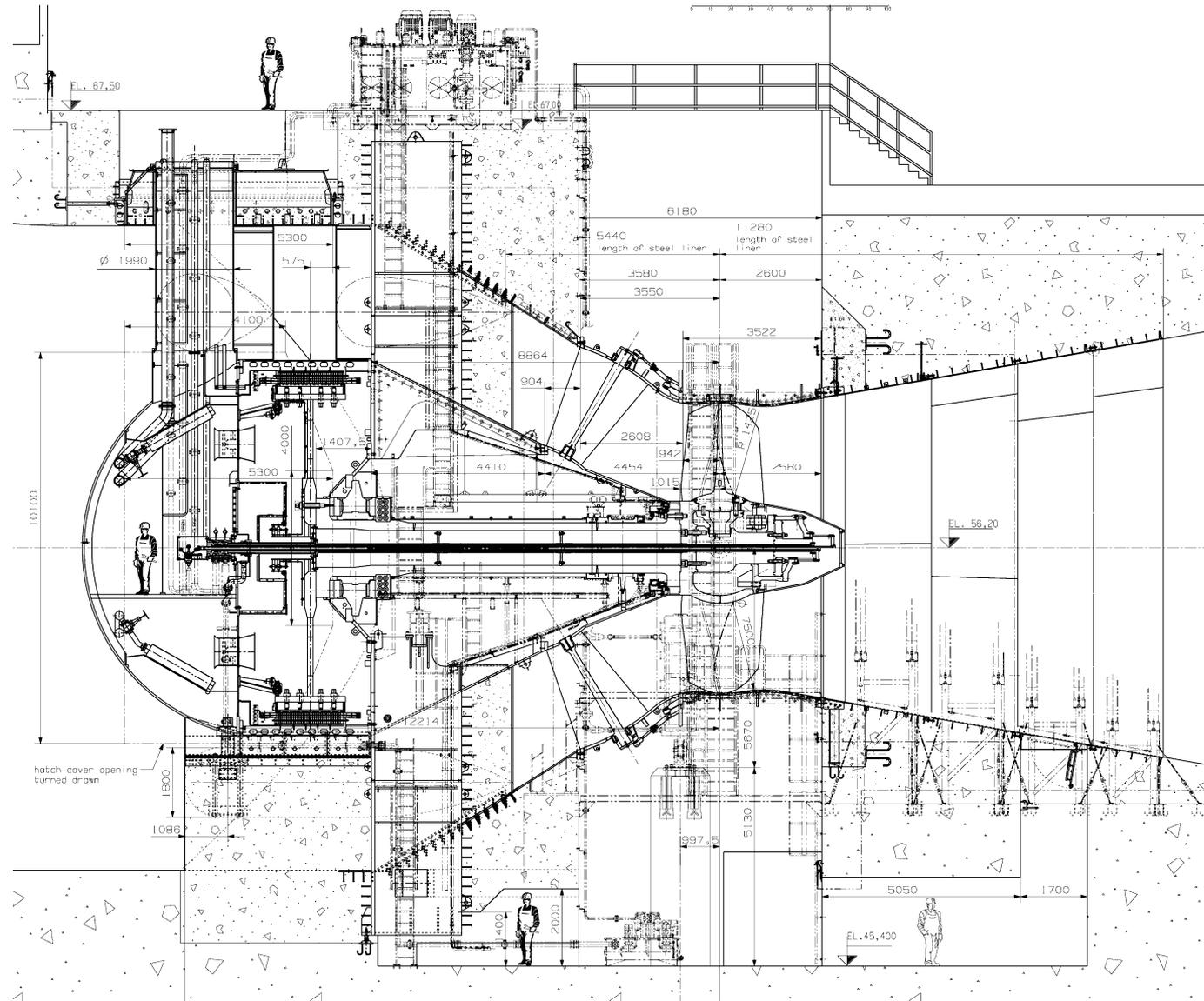
**VOITH**

Bulb turbine

# Turbinas Bulbo

$$3,64 \leq K \leq 8,19$$

$$200 \leq n_q \leq 450$$



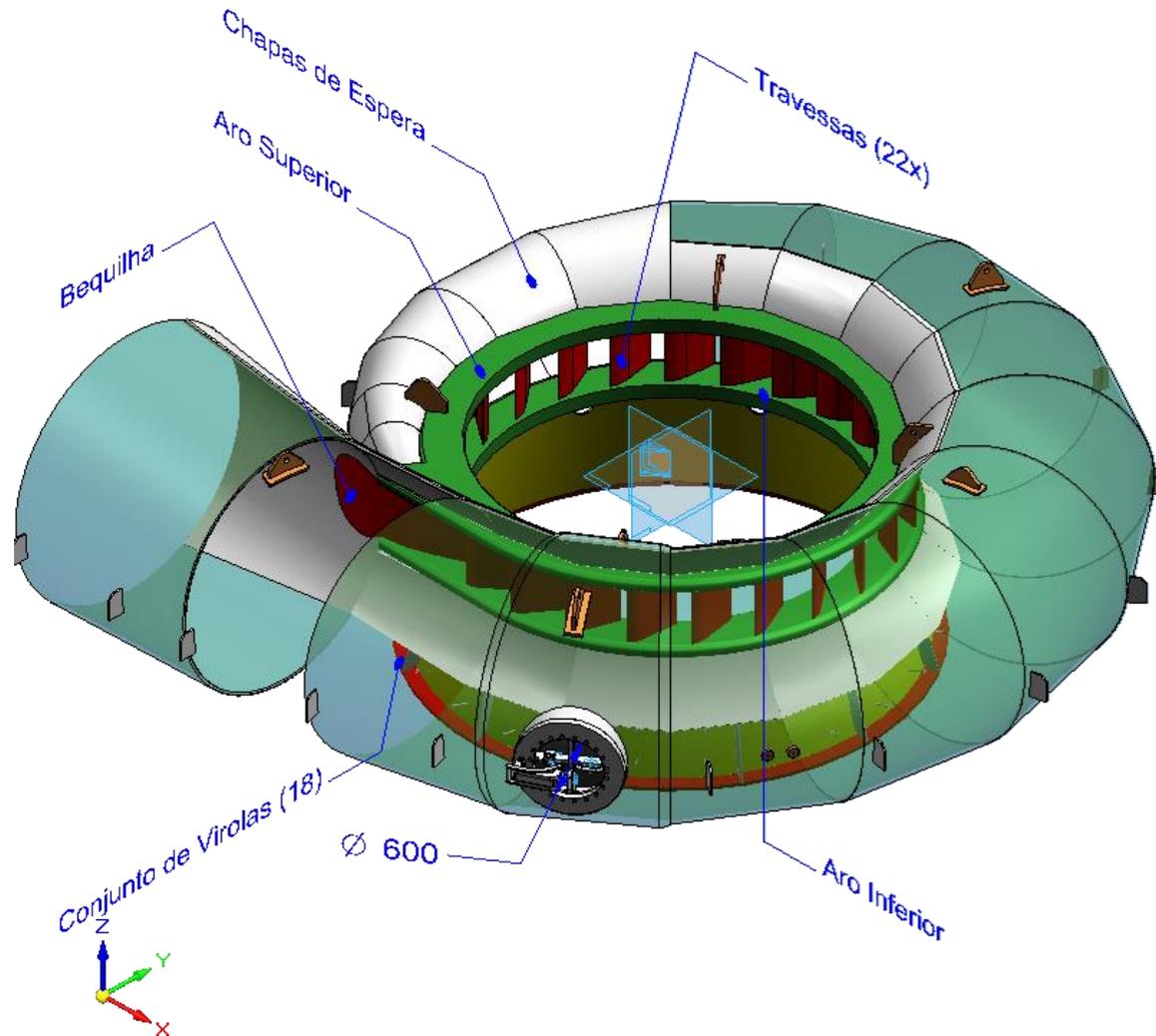
# Usina de Jirau



$H_{\max} = 19,6 \text{ m};$   
 $P_{\max} = 80,3 \text{ MW}$



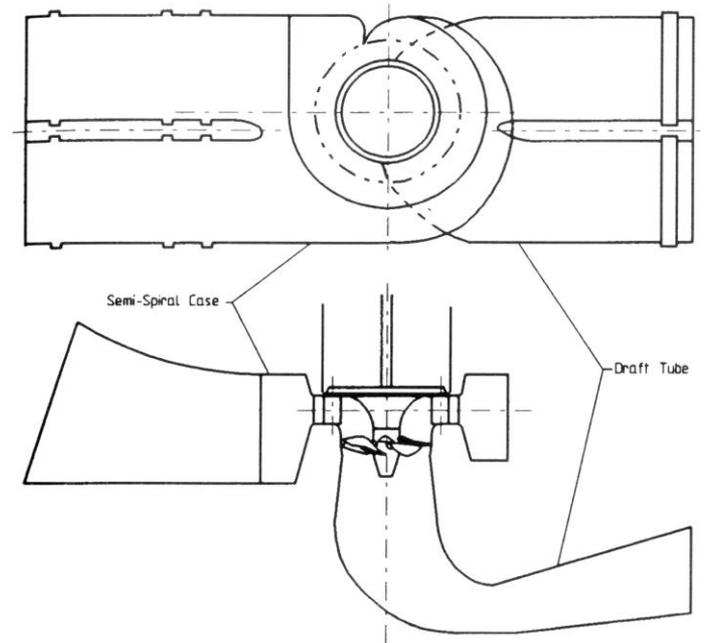
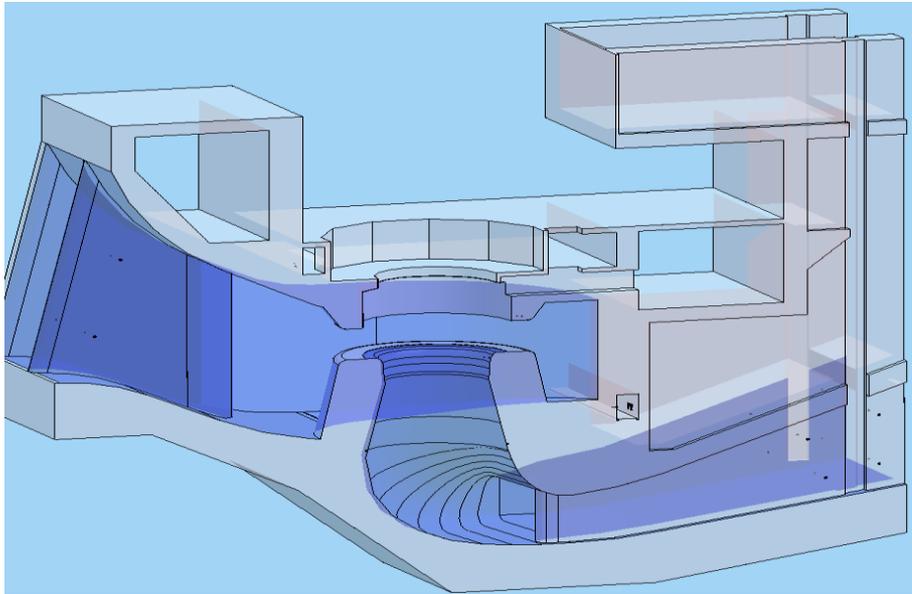
# Caixa espiral e pré-distribuidor



# Caixa semiespiral



Aplicadas em turbinas de baixa queda (abaixo de 45 m).



# Caixa espiral e pré-distribuidor



- Massa 266 ton
- Altura 4.100 mm
- Diâmetro 12.700 mm

# Distribuidor



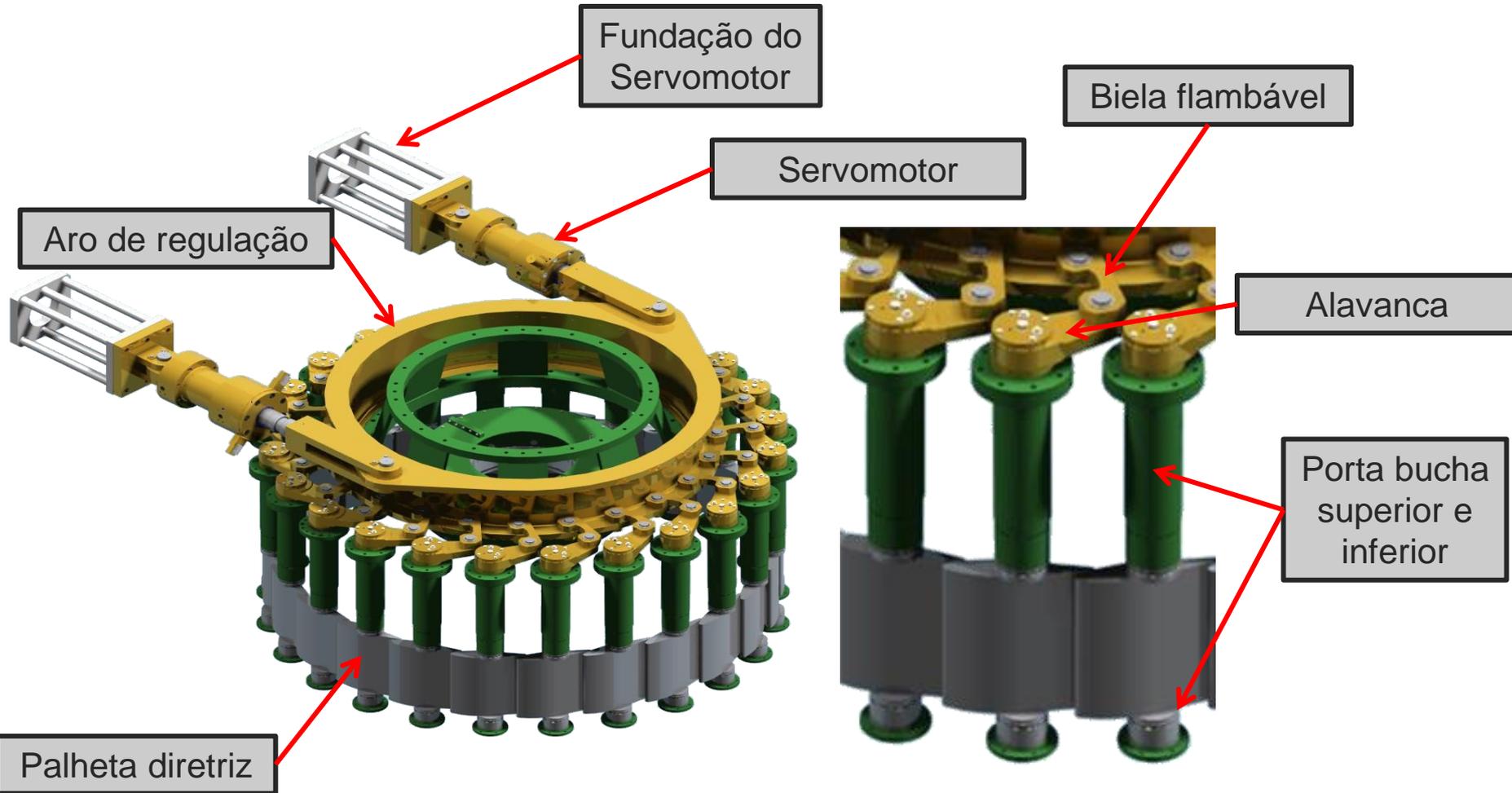
A Voith Hydro agradece a todos os colaboradores por mais esta importante etapa concluída no projeto Belo Monte.

**Belo Monte - Distribuidor**  
Massa total 450 t  
Altura 12 m  
Diâmetro 10,9 m  
Potência 620,4 / 679 MW / MVA

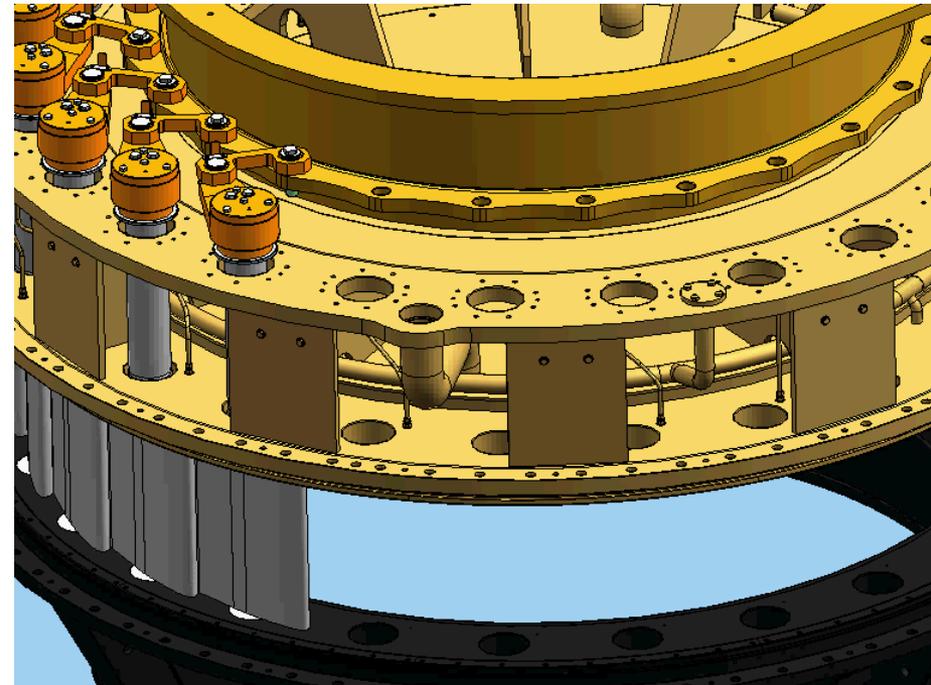
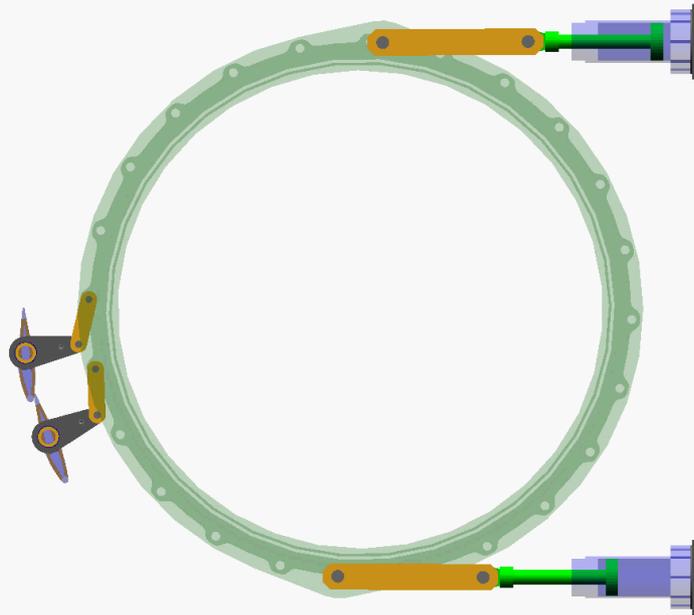
**VOITH**

- Massa 450 ton
- Altura 12.000 mm
- Diâmetro 10.900 mm

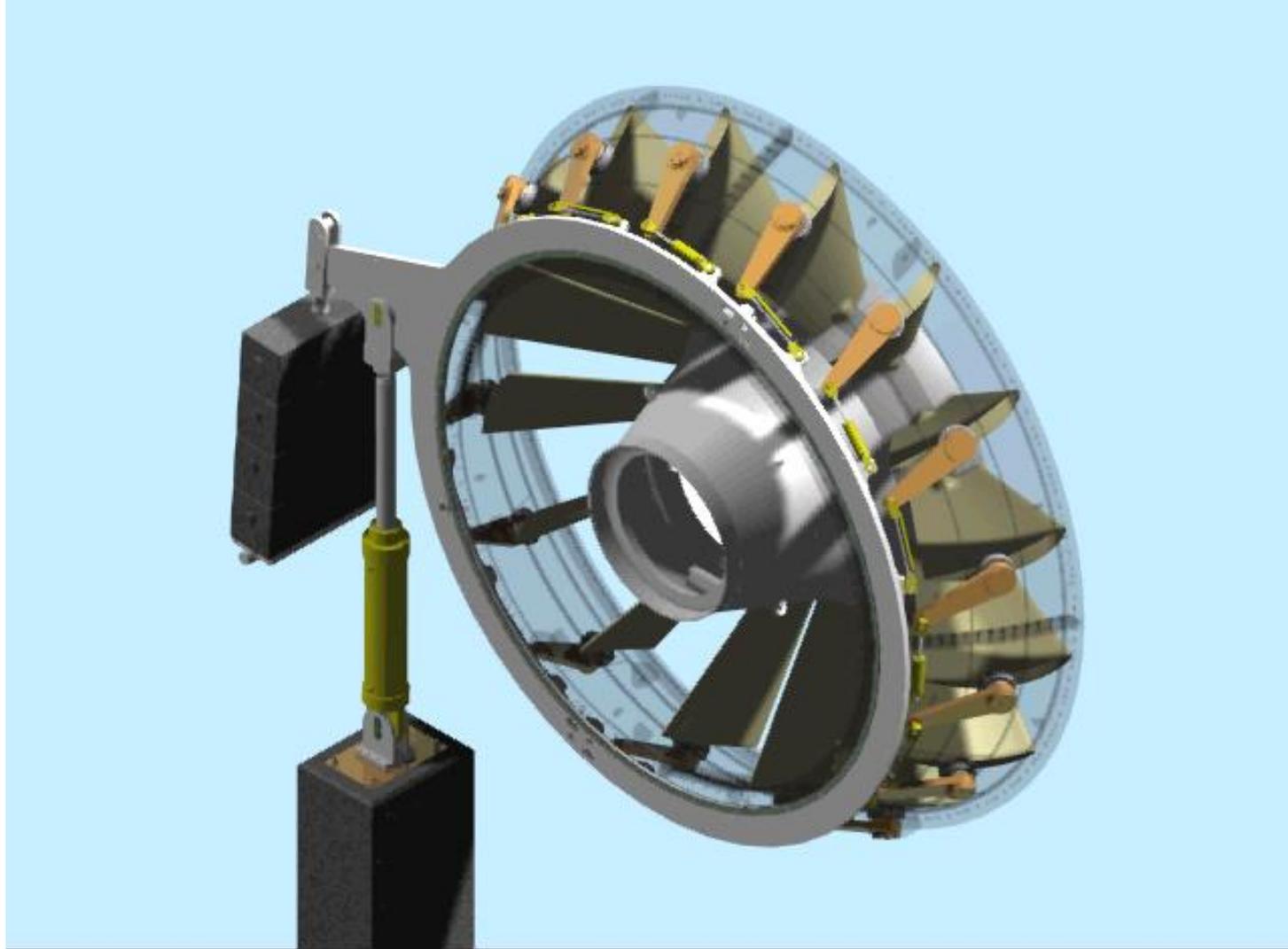
# Acionamento das palhetas diretrizes



# Acionamento das palhetas diretrizes



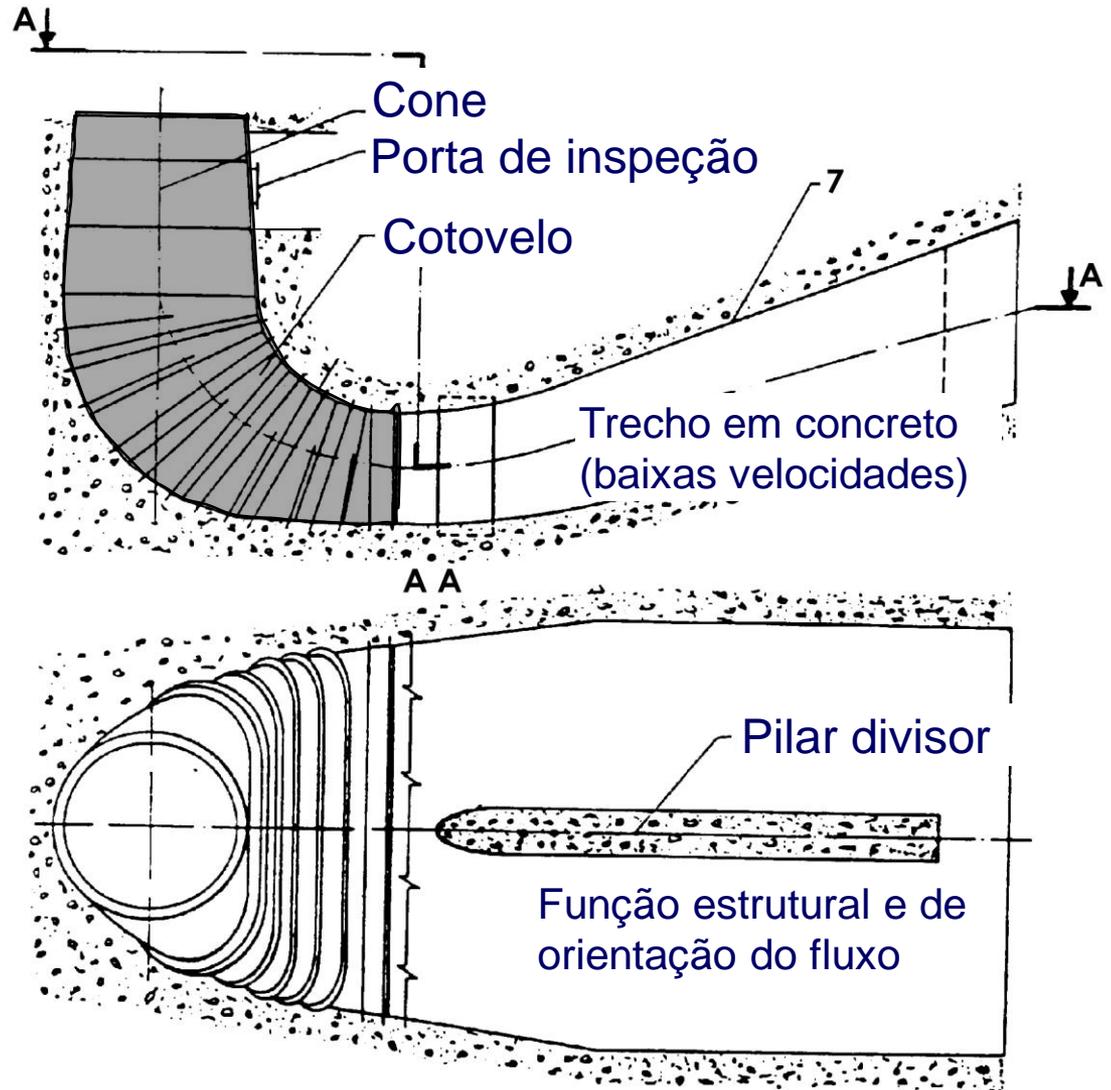
# Acionamento das palhetas diretrizes



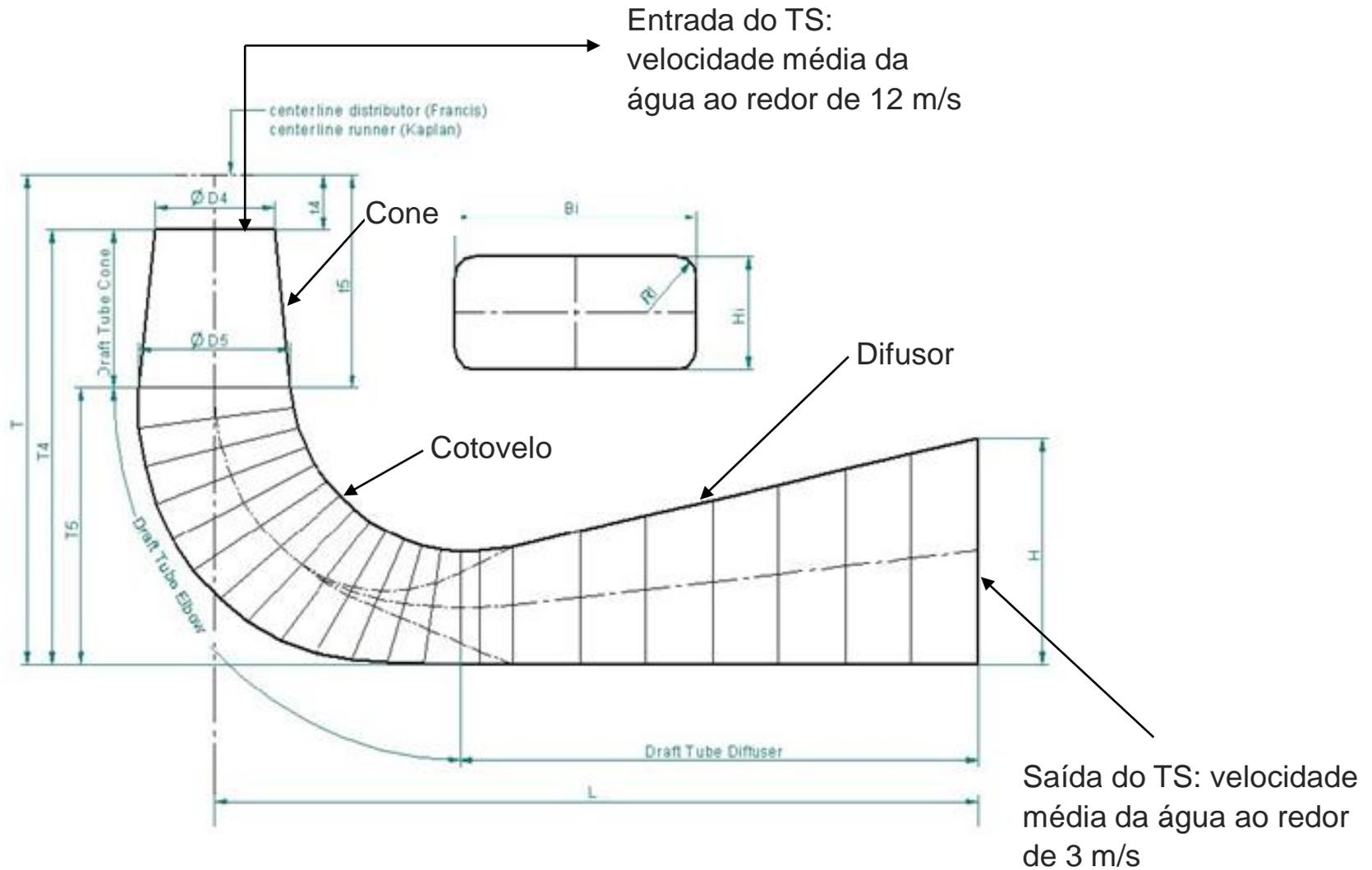
# Tubo de sucção



Trecho em chapas de aço



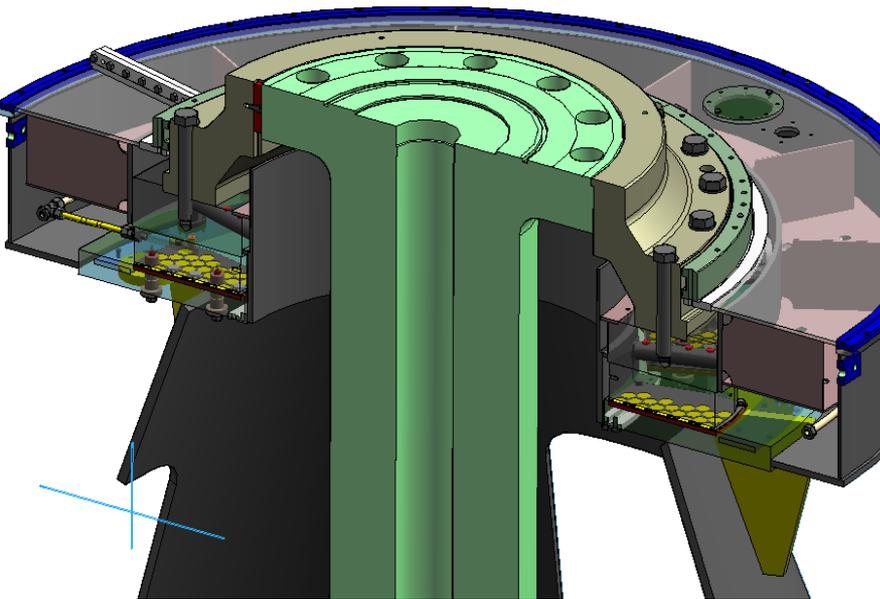
# Tubo de sucção



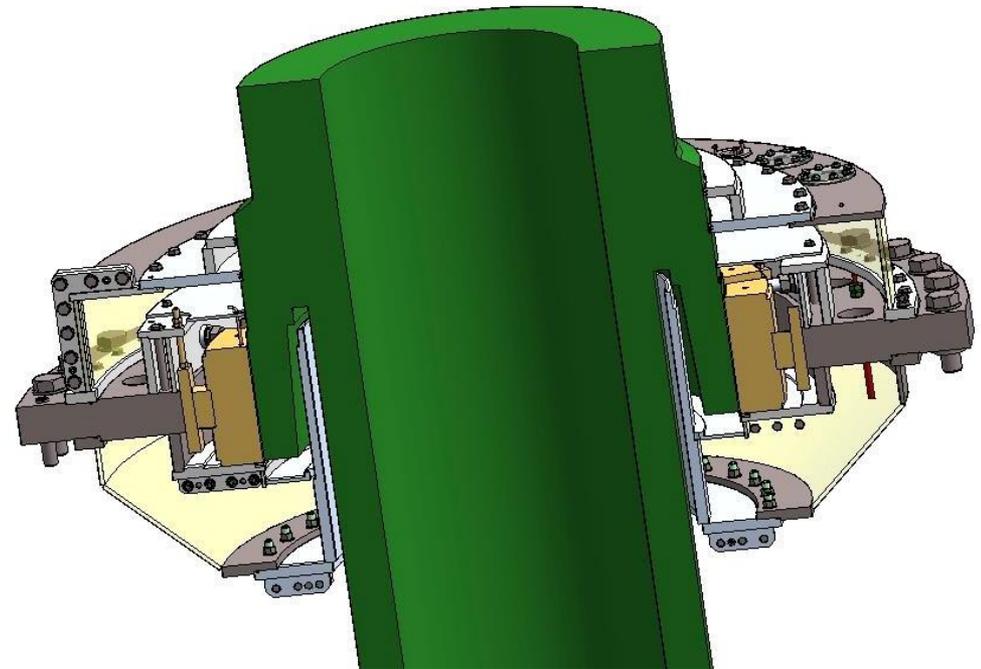
# Tubo de sucção



# Mancais de deslizamento

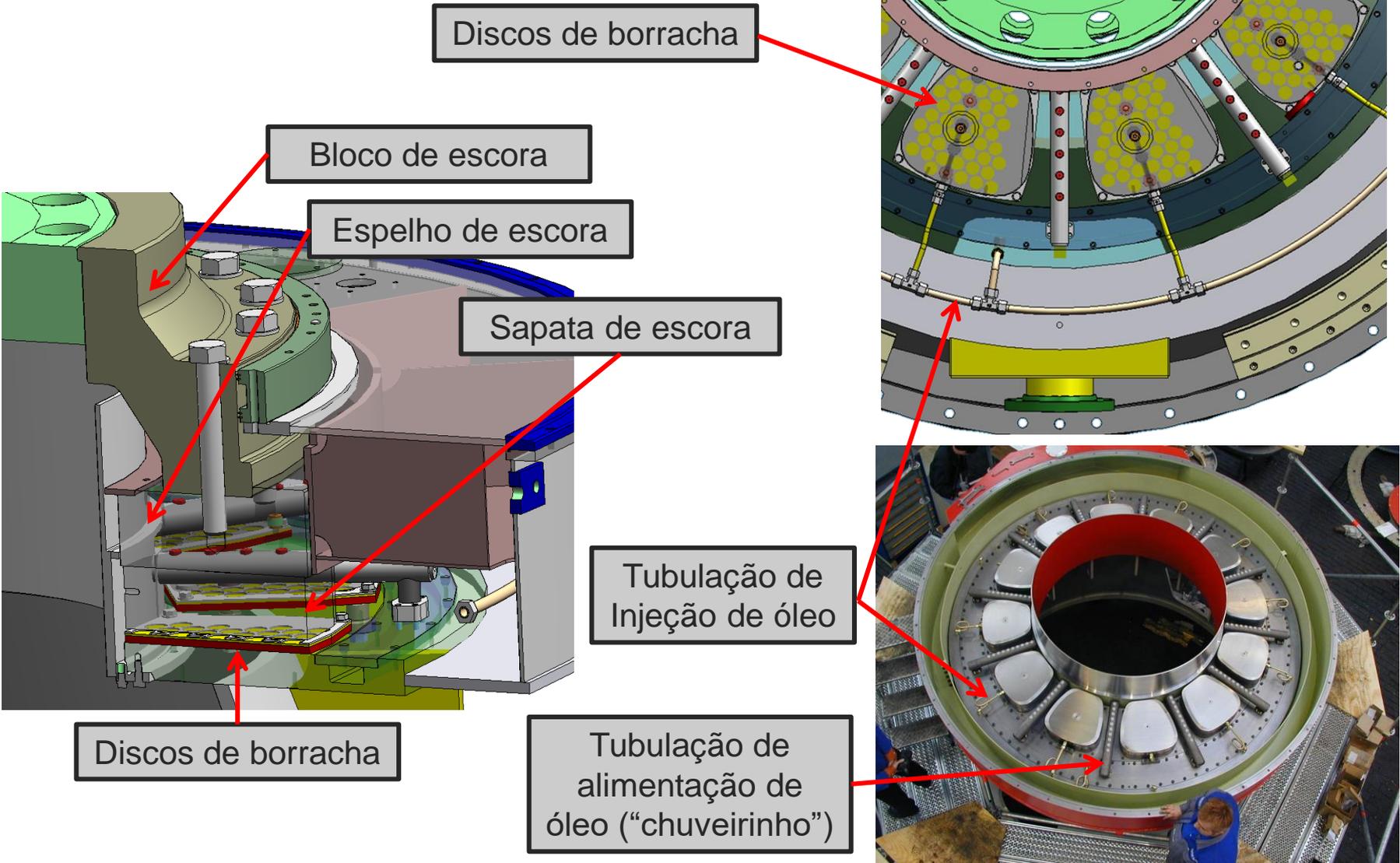


**Mancal escora**

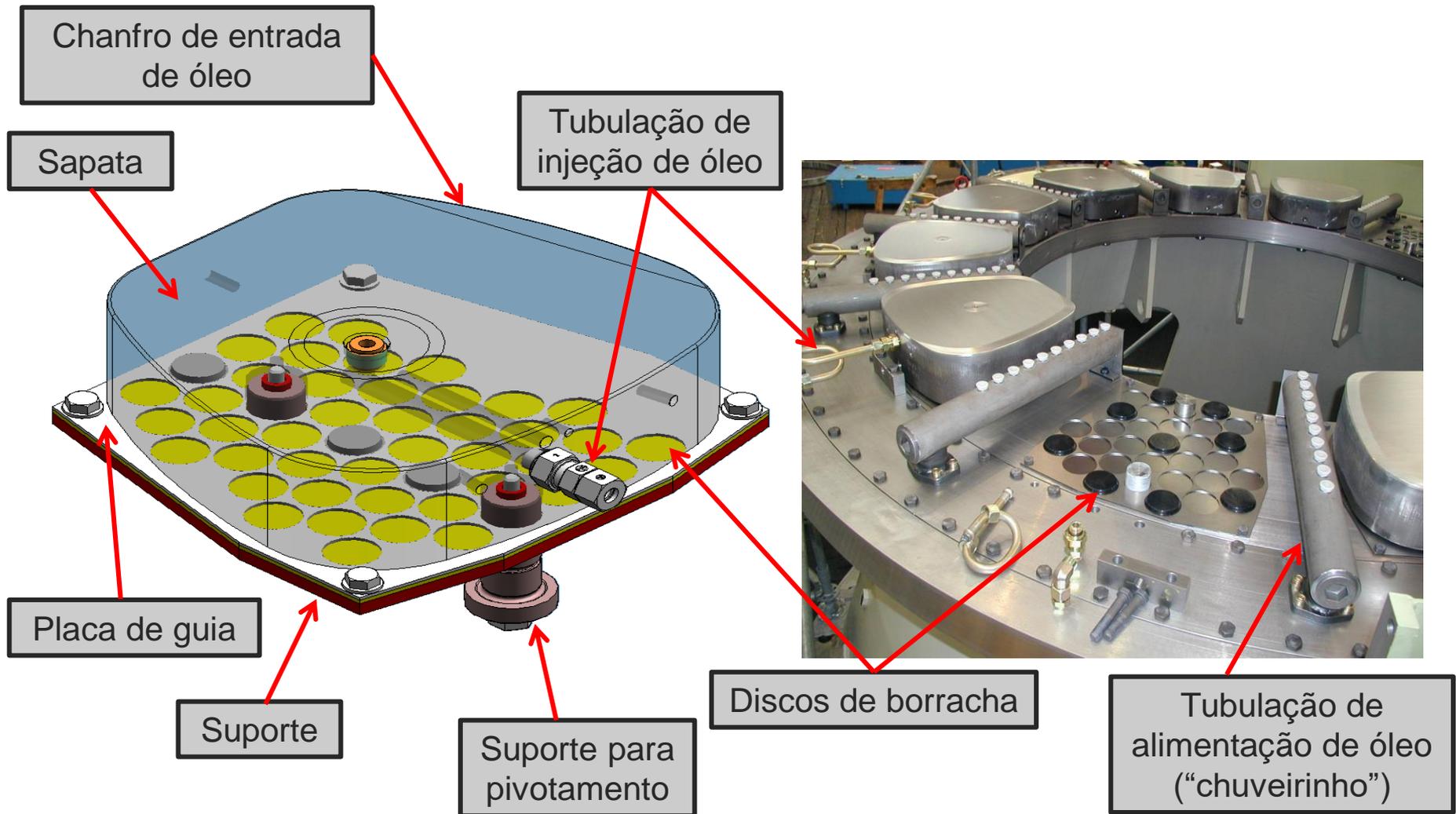


**Mancal guia**

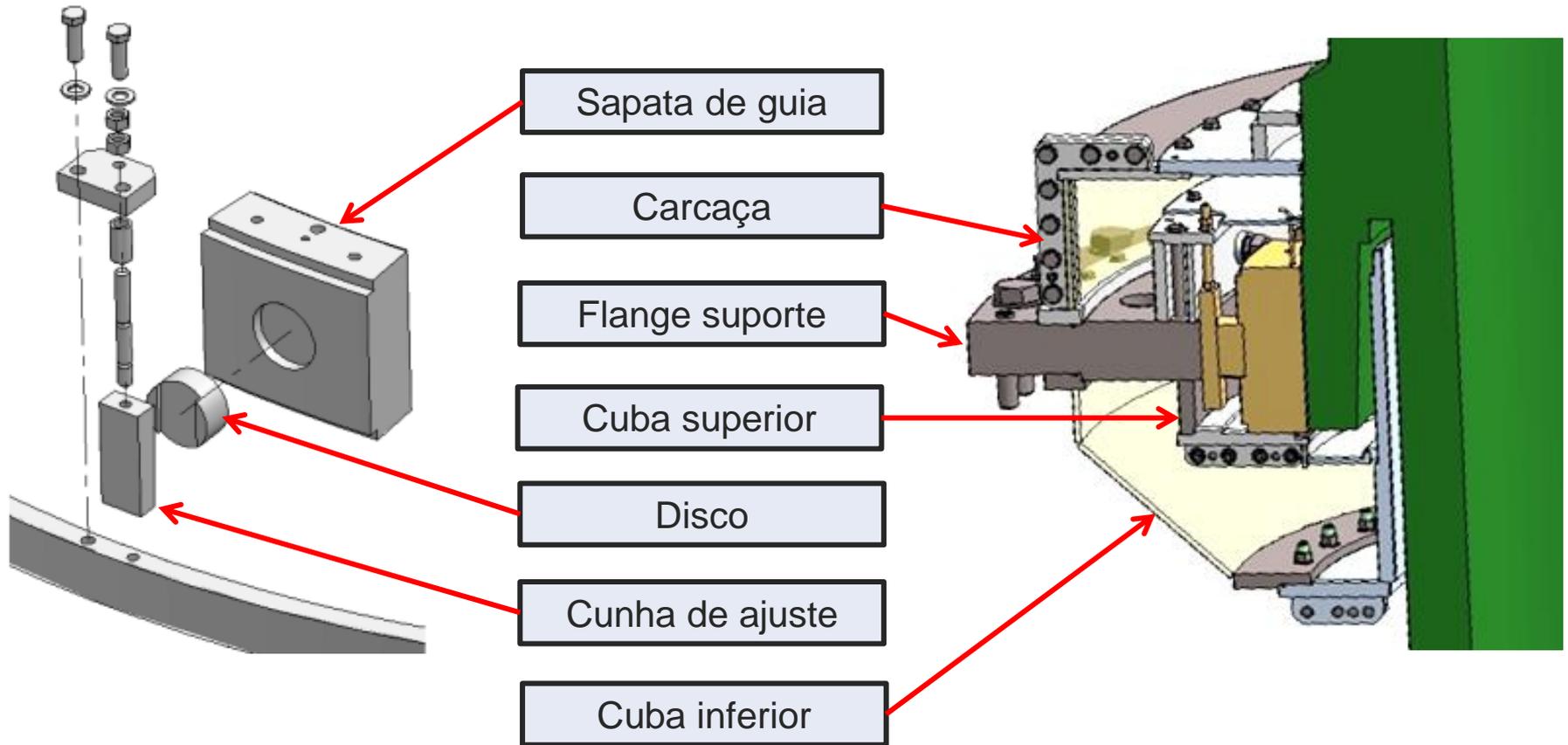
# Mancal escora



# Mancal escora



# Manca guia

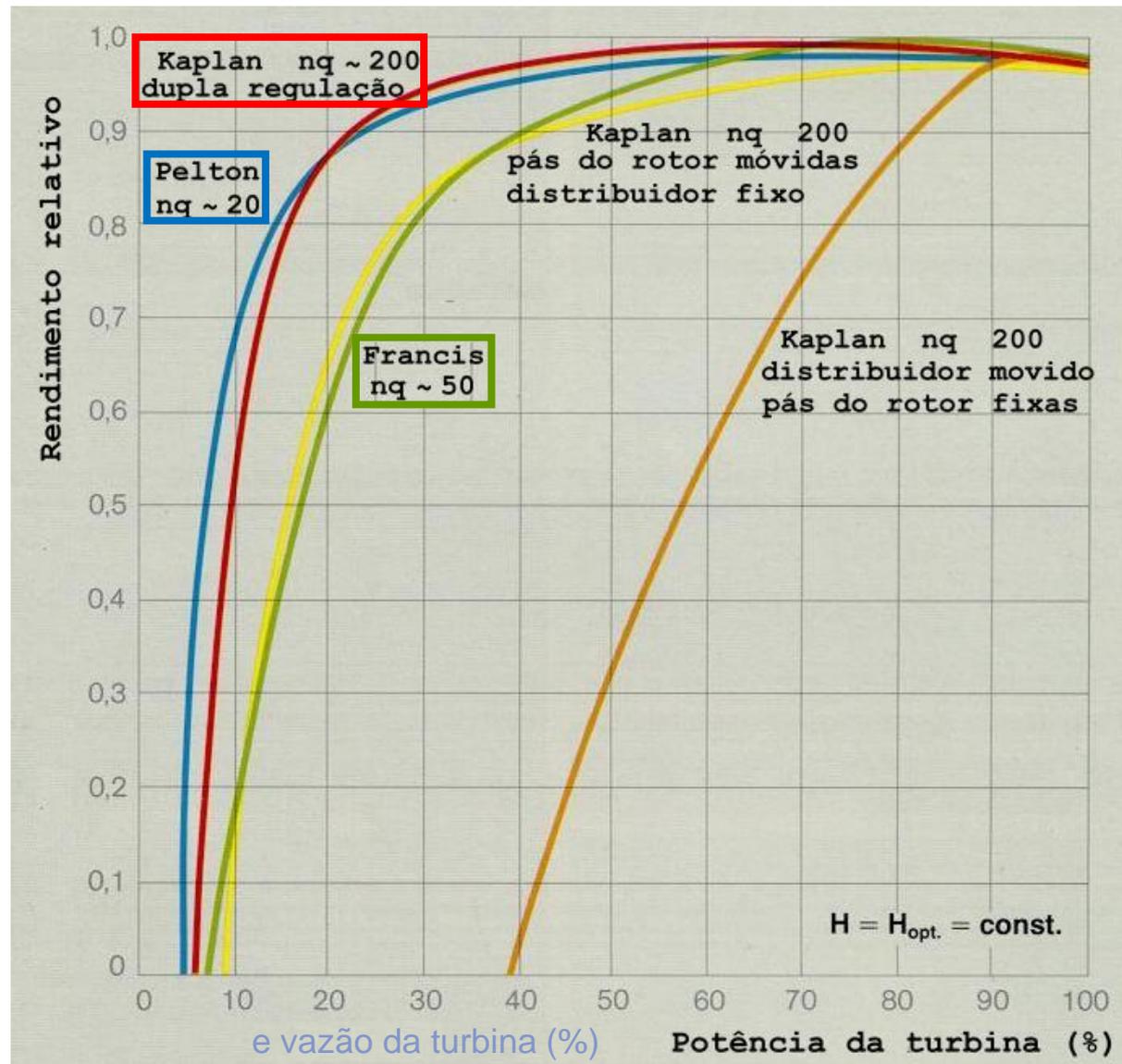


# Rendimento comparado

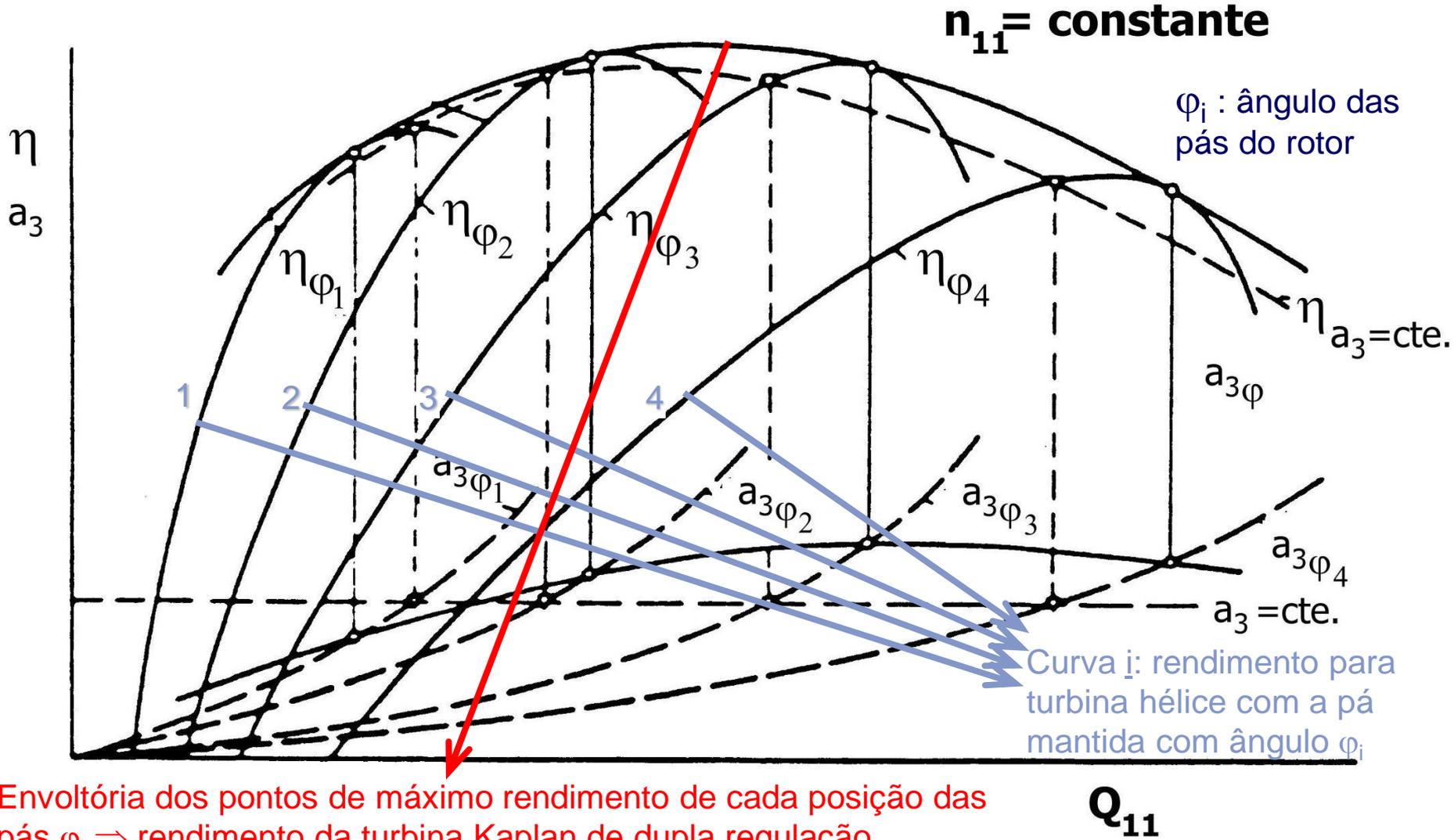


Referência  
de maior  
rendimento:  
Francis,  
nq~50

máx.  $\eta_{\text{ótimo}} \cong 96\%$   
(ano 2004)

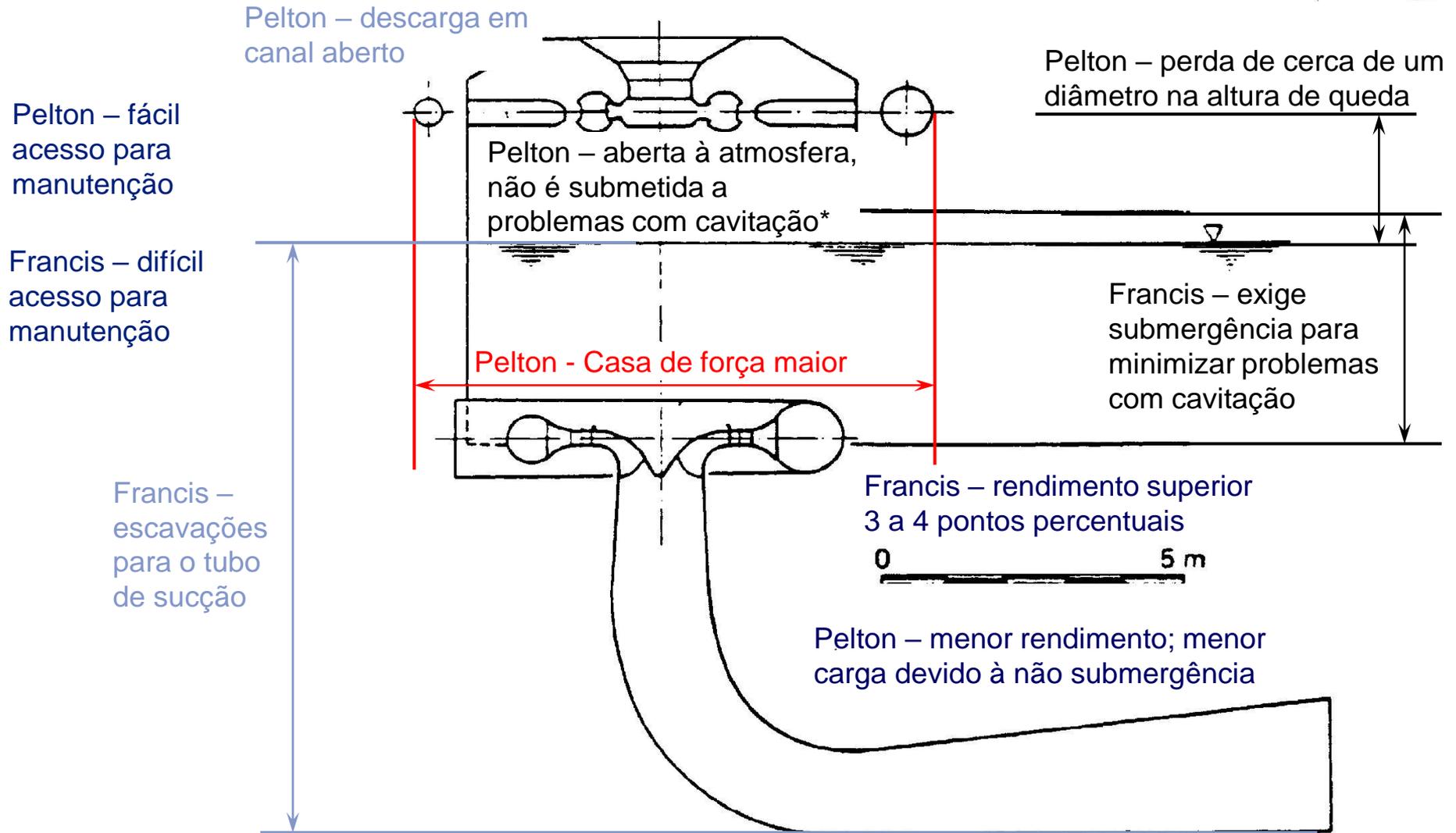


# Curva de rendimento de turbinas Kaplan



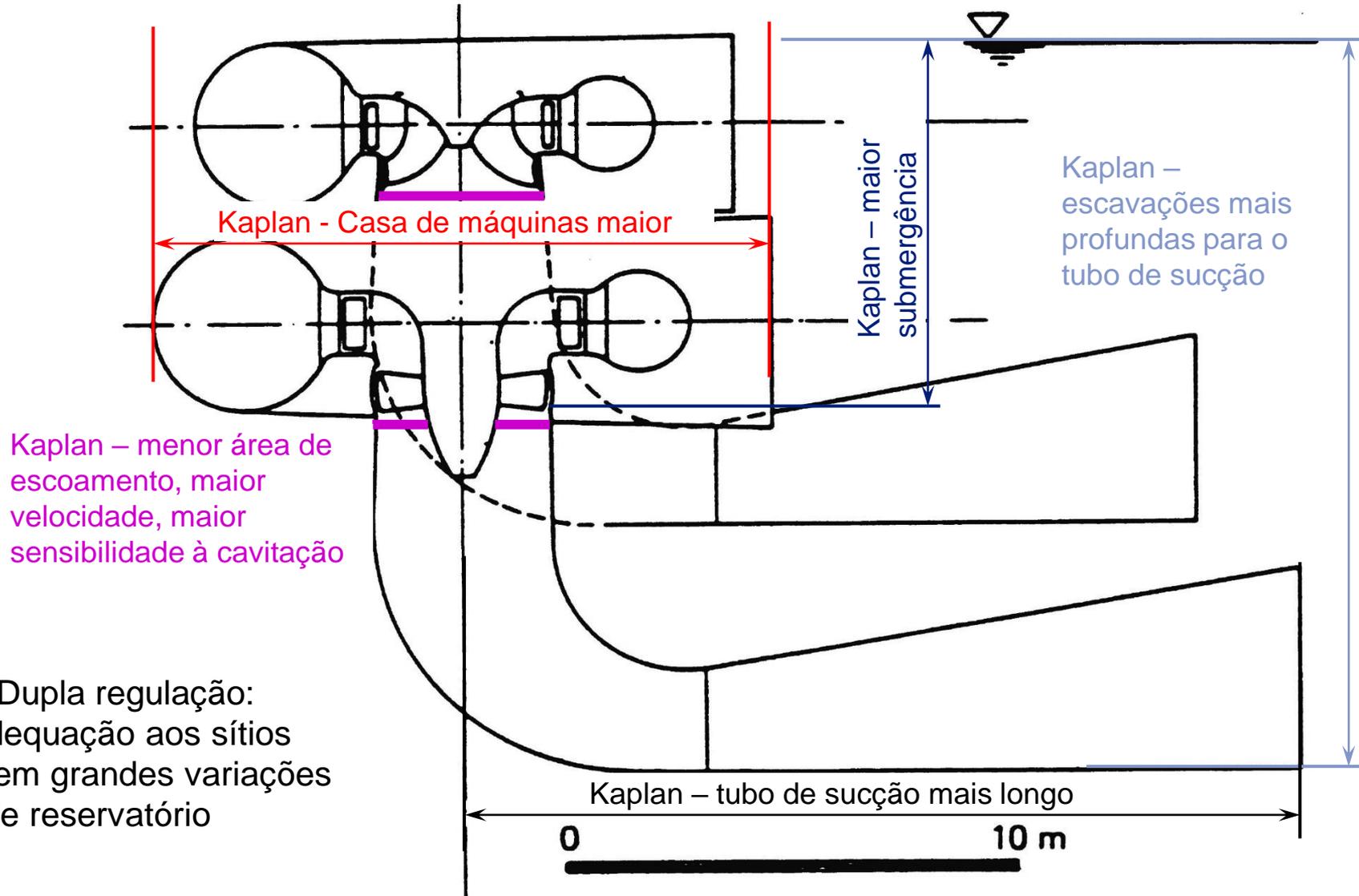
Envoltória dos pontos de máximo rendimento de cada posição das pás  $\varphi_i \Rightarrow$  rendimento da turbina Kaplan de dupla regulação

# Superposição de formas construtivas Pelton - Francis



\* Exceto por problemas com os perfis das conchas

# Superposição de formas construtivas Francis - Kaplan



Kaplan – Dupla regulação:  
melhor adequação aos sítios  
onde se tem grandes variações  
de nível de reservatório

---

Dúvidas?

Obrigado.



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