

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. Instalações termelétricas
6. Sistemas de recalque



PARTE 1

2.1. Introdução

2.2. Quadro temporal

2.3. Tipos de máquinas de transformação de energia

2.4. Grandezas associadas às máquinas de fluxo

2.5. Análise energética

2.5.2, 2.5.3 (parciais)

2.6. Modelo para as máquinas de fluxo

2.6.1, 2.6.3

2.7. Características das máquinas de fluxo

2.8. Parâmetros de definição das máquinas de fluxo



PARTE 2

2.9. Representação das características das máquinas de fluxo

2.10. Máquina de fluxo associada à instalação

2.11. Equação fundamental das máquinas de fluxo

2.12. Equacionamento complementar

2.13. Teoria de semelhança aplicada às máquinas de fluxo

Tipos de máquinas



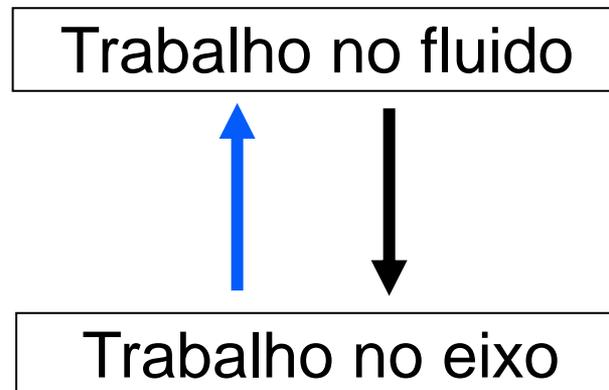
Máquina: equipamento que modifica forças e movimentos *

Geradores ou bombas:

Transformam energia recebida de fonte externa em energia mecânica, transferindo-a a um fluido.

Motores ou turbinas:

Transformam energia recebida de um fluido em energia mecânica, para realização de trabalho.



* Norton, R. L. *Machine Design, an integrated approach* Prentice Hall, N J, 1998

Tipos de máquinas (segundo princípio de operação)

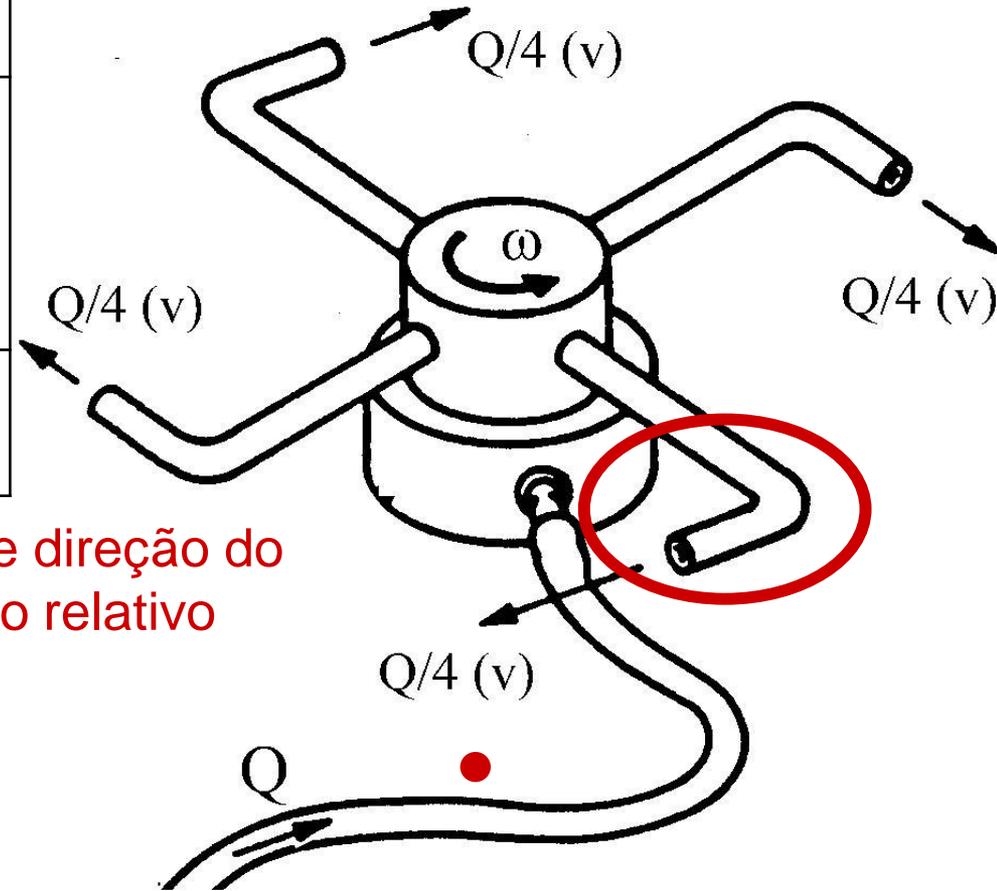


TIPO	FLUXO	VOLUMÉTRICAS	ESPECIAIS
MOTOR (turbina)	Turbinas Hidráulicas; a vapor; a gás; eólicas	Motores de automóvel	Rodas d'água
GERADOR (bomba)	Bombas Centrífugas	Bombas Alternativas	Ejetores

Máquinas de fluxo



TIPO	FLUXO
MOTOR (turbina)	Turbinas Hidráulicas; a vapor; a gás; eólicas
GERADOR (bomba)	Bombas Centrífugas



Variação de direção do escoamento relativo

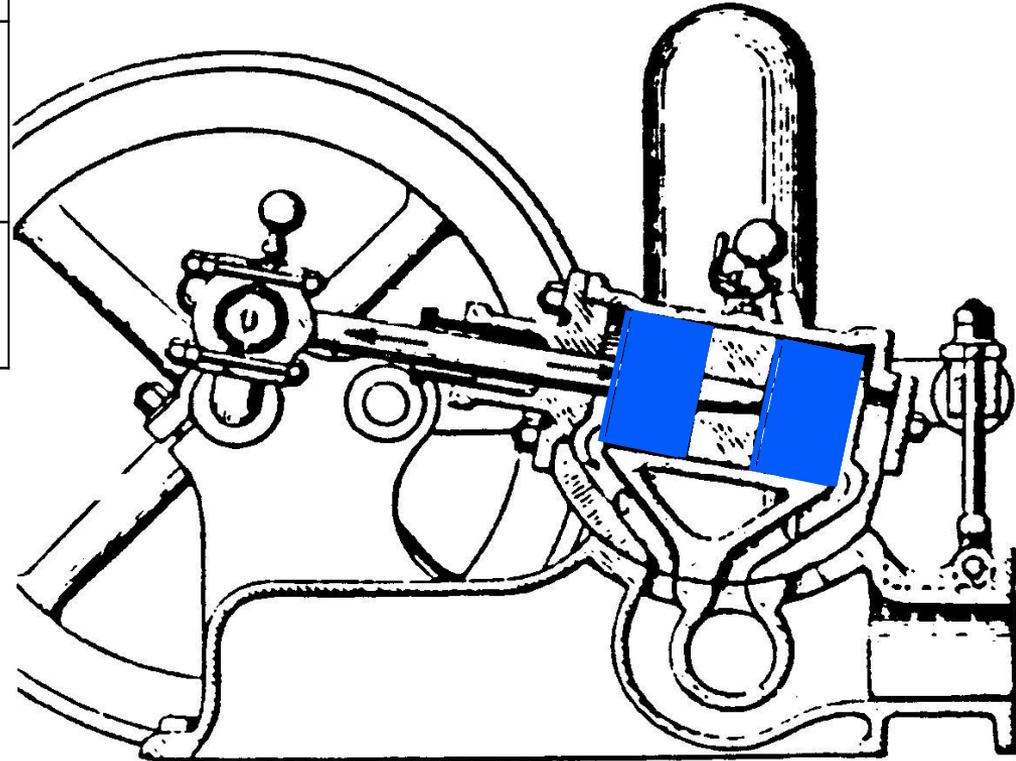
Aspersor de jardim = máquina de fluxo

O trabalho envolvido (recebido ou cedido) é consequente à **variação do escoamento relativo** nas pás do rotor da máquina.

Máquinas volumétricas



TIPO	VOLUMÉTRICAS
MOTOR (turbina)	Motores de automóvel
GERADOR (bomba)	Bombas Alternativas



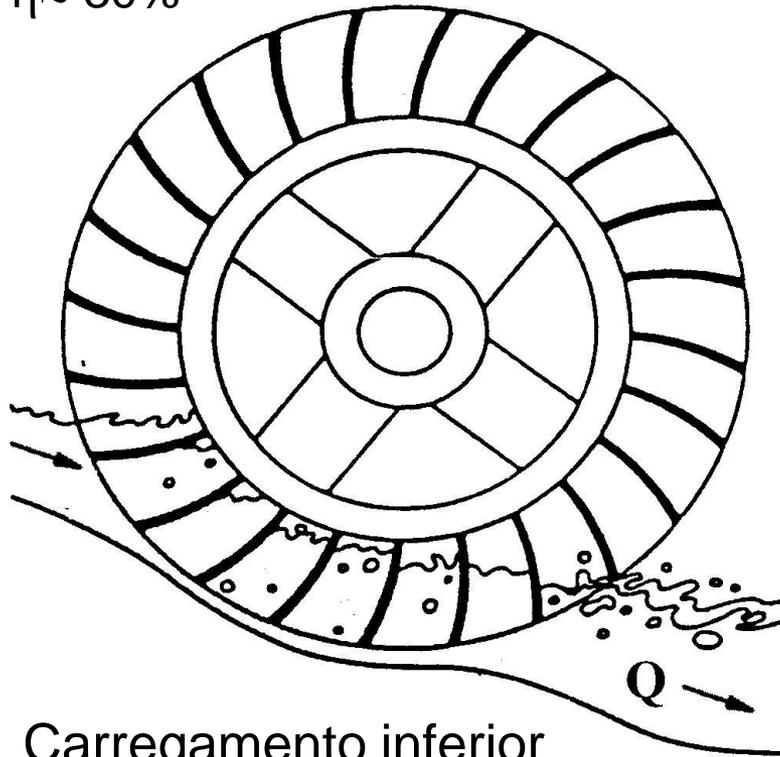
Realizam sobre ou recebem trabalho de um **volume definido de fluido**, sem a ocorrência de escoamento no seu interior.

Máquinas especiais



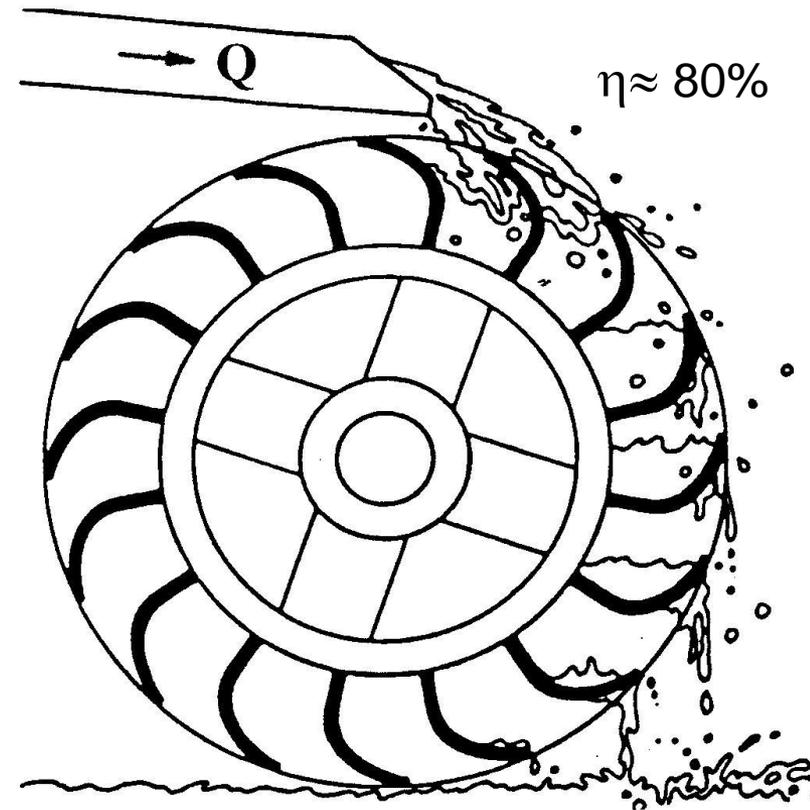
TIPO	ESPECIAIS
MOTOR (turbina)	Rodas d'água
GERADOR (bomba)	Ejetores

$\eta \approx 30\%$



Carregamento inferior

RODAS
D'ÁGUA



Carregamento superior

Modelo para as máquinas de fluxo



Fenômeno físico complexo:

- Dificuldade de pleno entendimento,
- Impossibilidade de representação plena do fenômeno.

➡ Modelagem física e/ ou matemática.

Modelo: representação mais completa possível do fenômeno.

Modelo mais comum para máquinas de fluxo:

- Volume de controle (sistema aberto),
- Escoamento em regime permanente,
- Máquina adiabática.

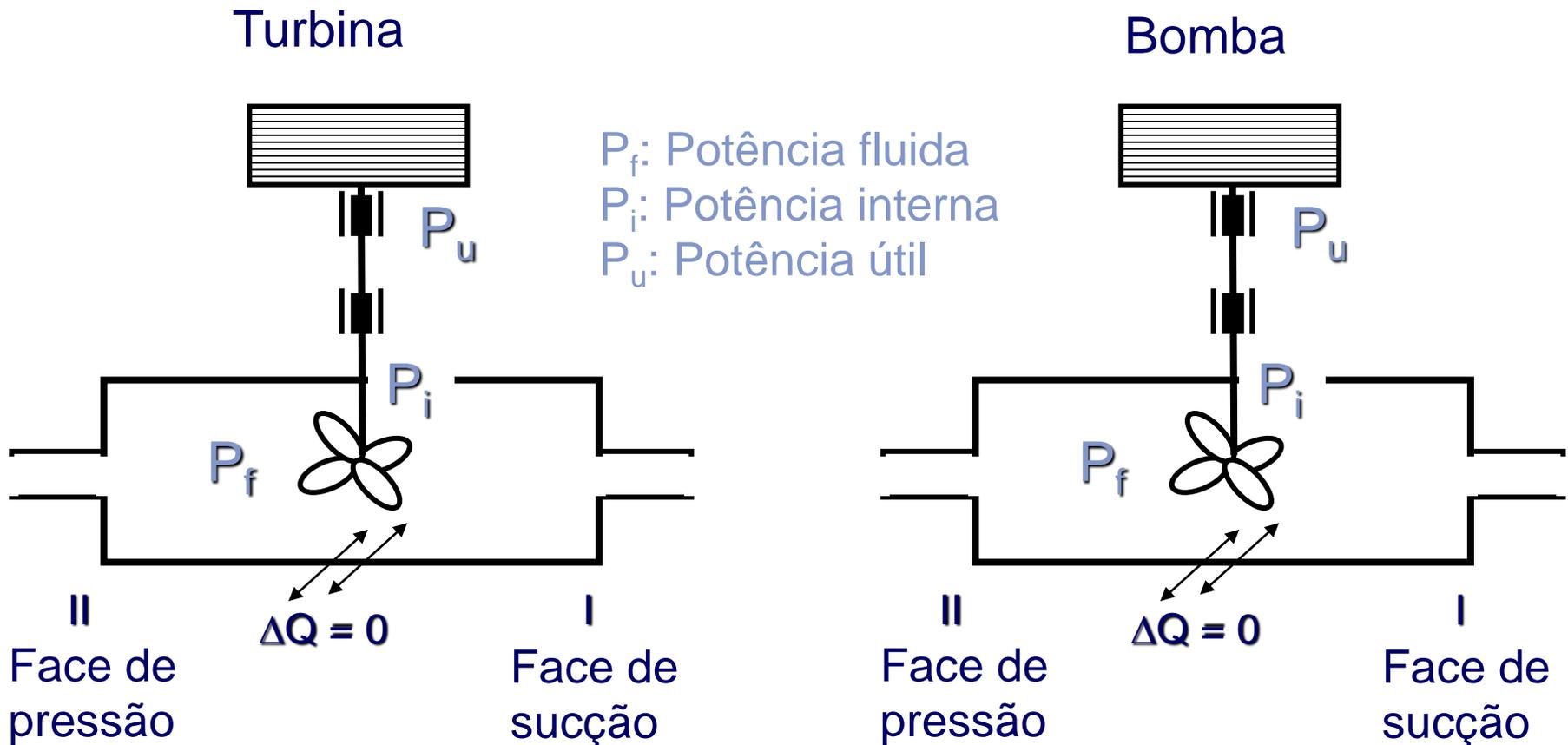
Modelo aplicável tanto a máquinas hidráulicas quanto a térmicas.



Modelo para as máquinas de fluxo

Configurações idênticas para ambas as máquinas.

Índices e denominações não se alteram.



Modelo para as máquinas de fluxo



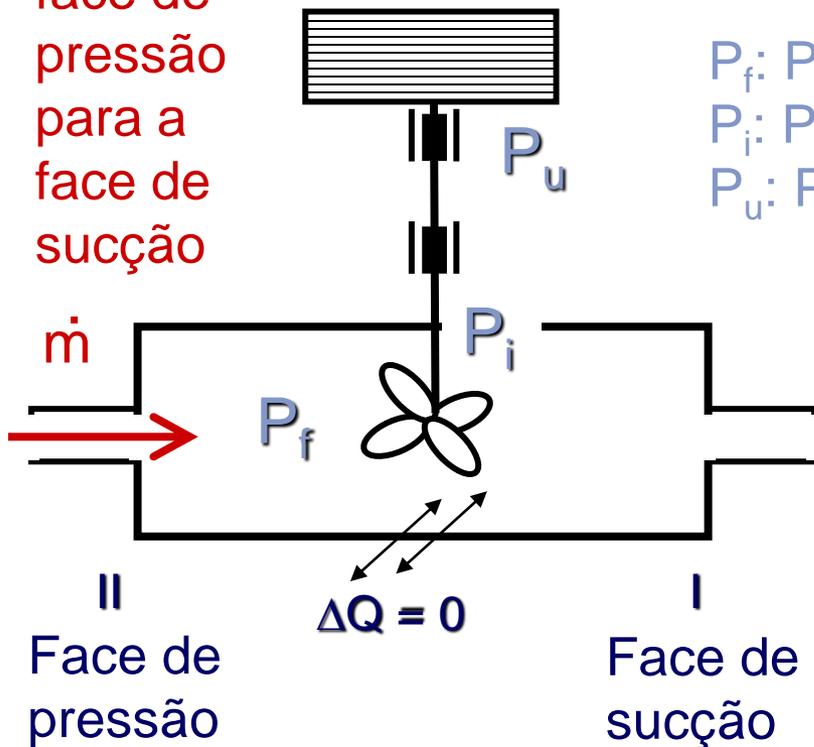
Turbina: recebe energia do fluido

→ Escoamento ocorre do maior para o menor nível de energia →

Bomba: transfere energia ao fluido

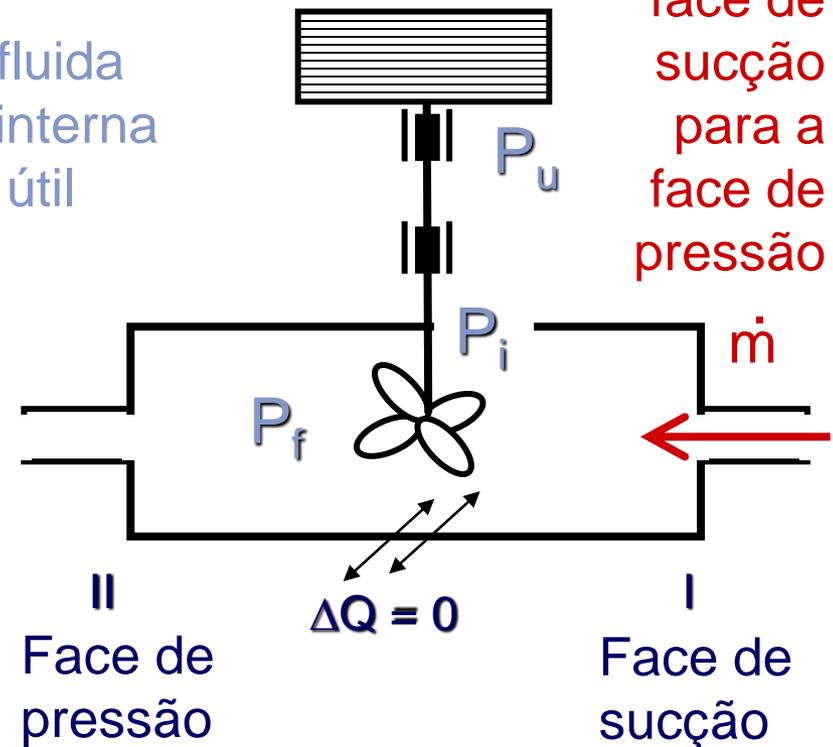
← Escoamento ocorre do menor para o maior nível de energia ←

Fluxo da Turbina



Bomba

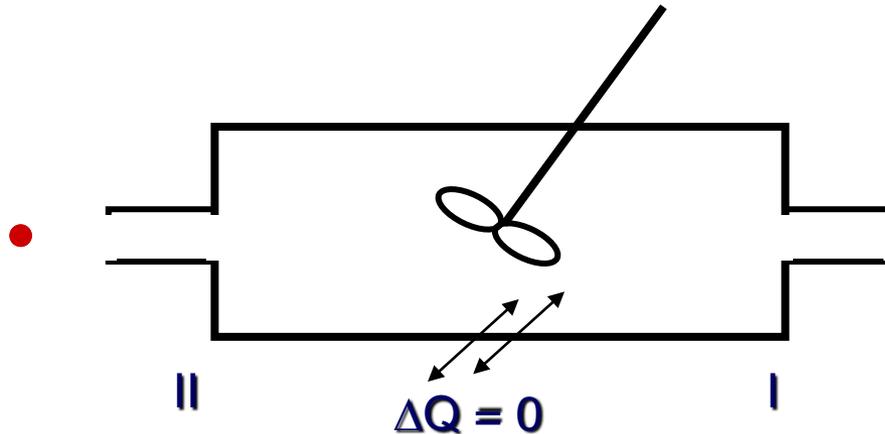
Fluxo da face de sucção para a face de pressão



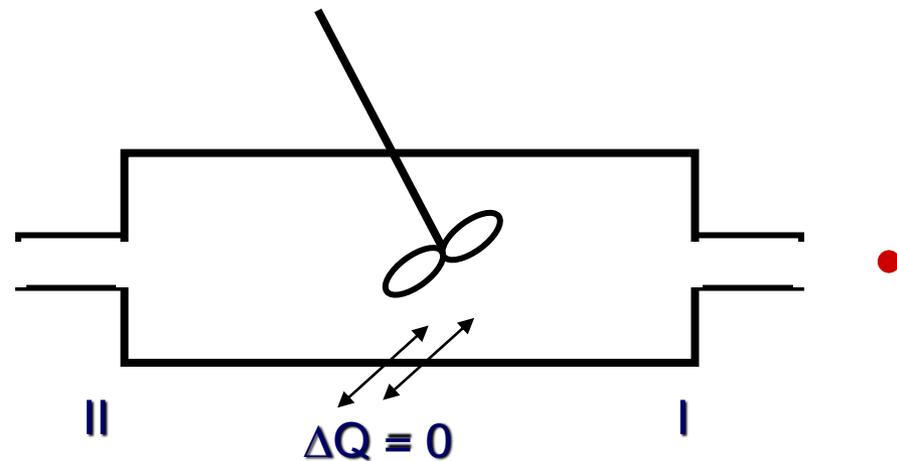
Modelo para as máquinas de fluxo



Fluxo da face de pressão para a face de sucção → TURBINA



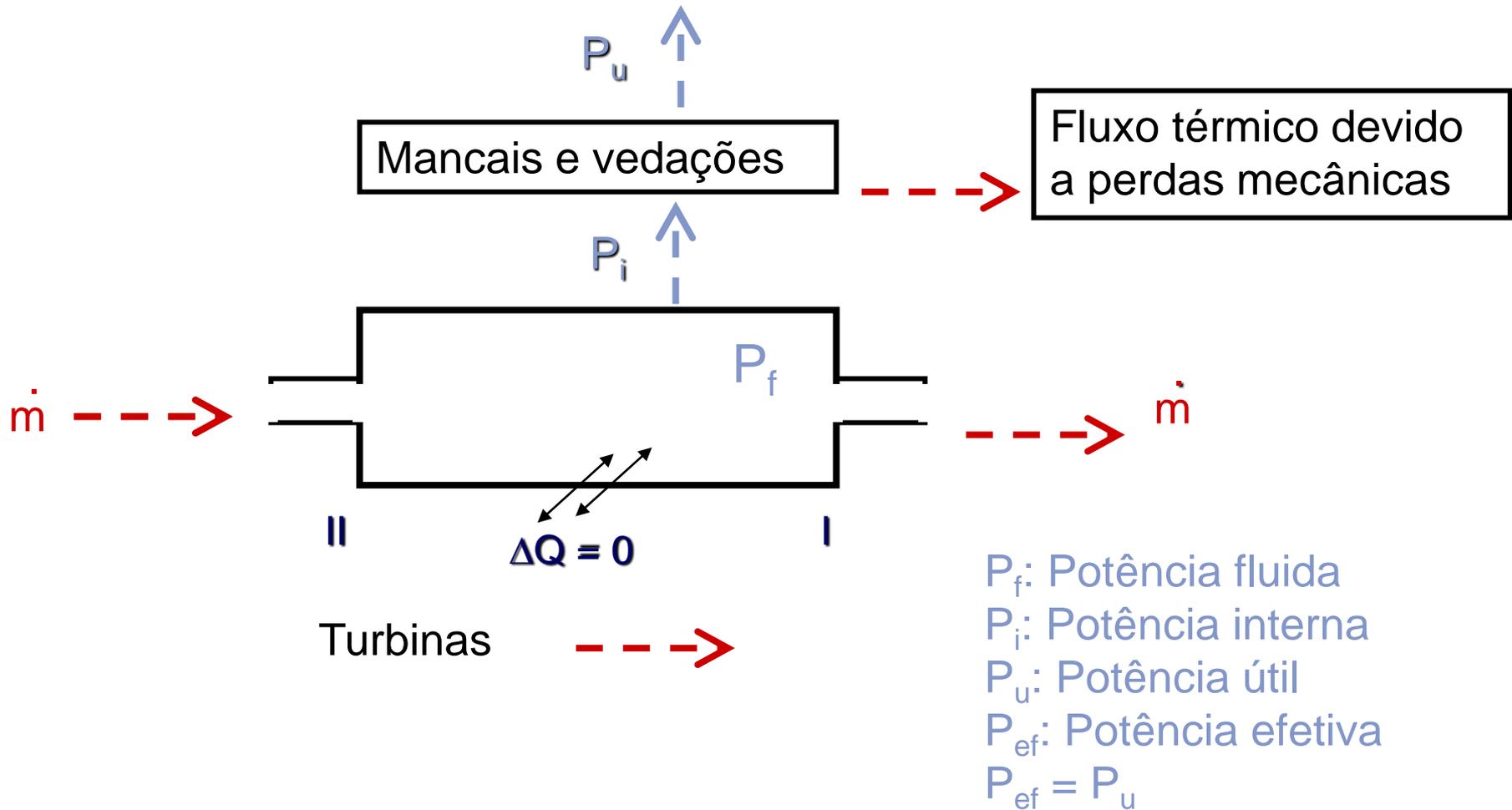
BOMBA ← Fluxo da face de sucção para a face de pressão



Modelo para as máquinas de fluxo



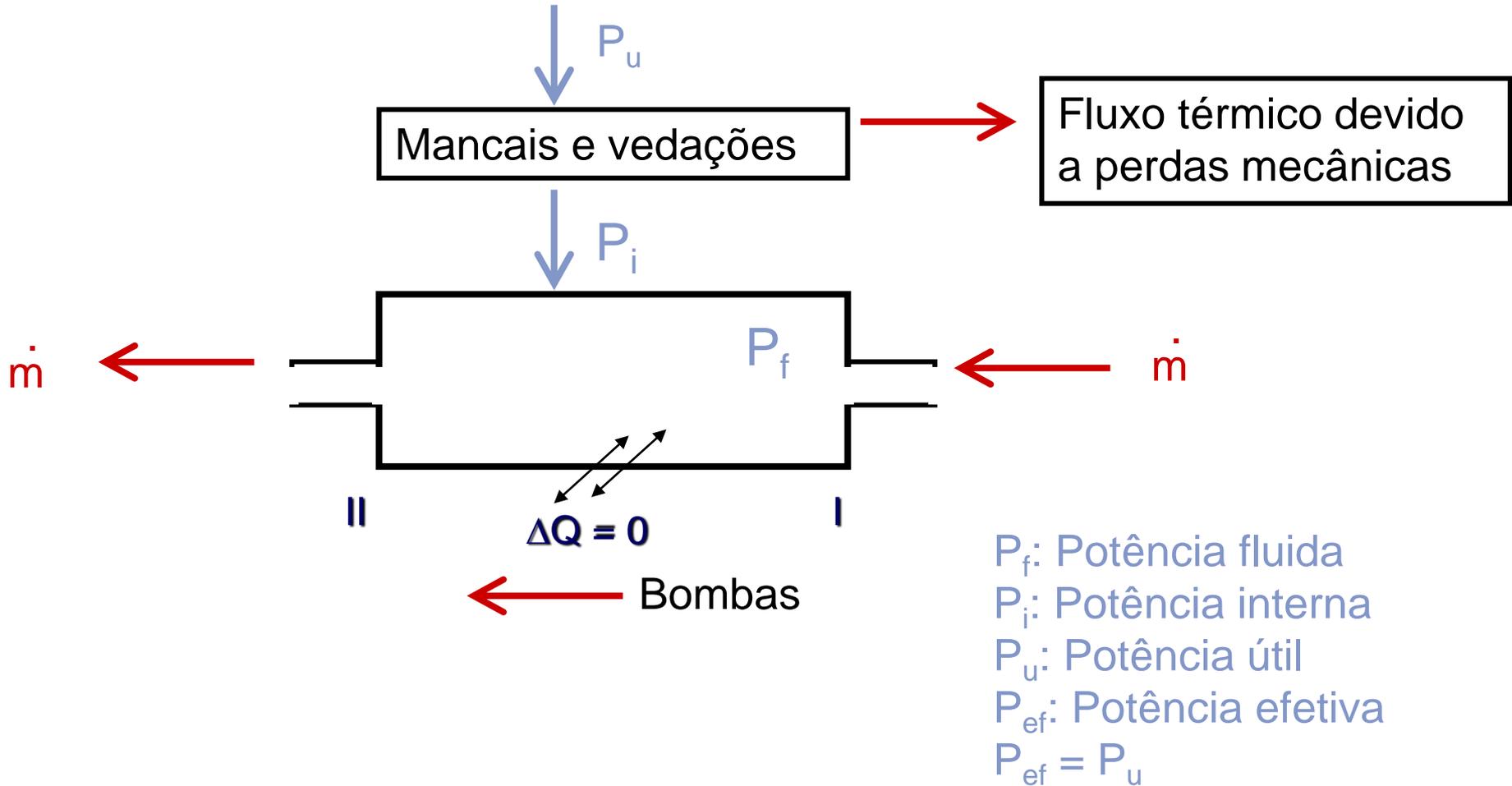
Representação esquemática



Modelo para as máquinas de fluxo



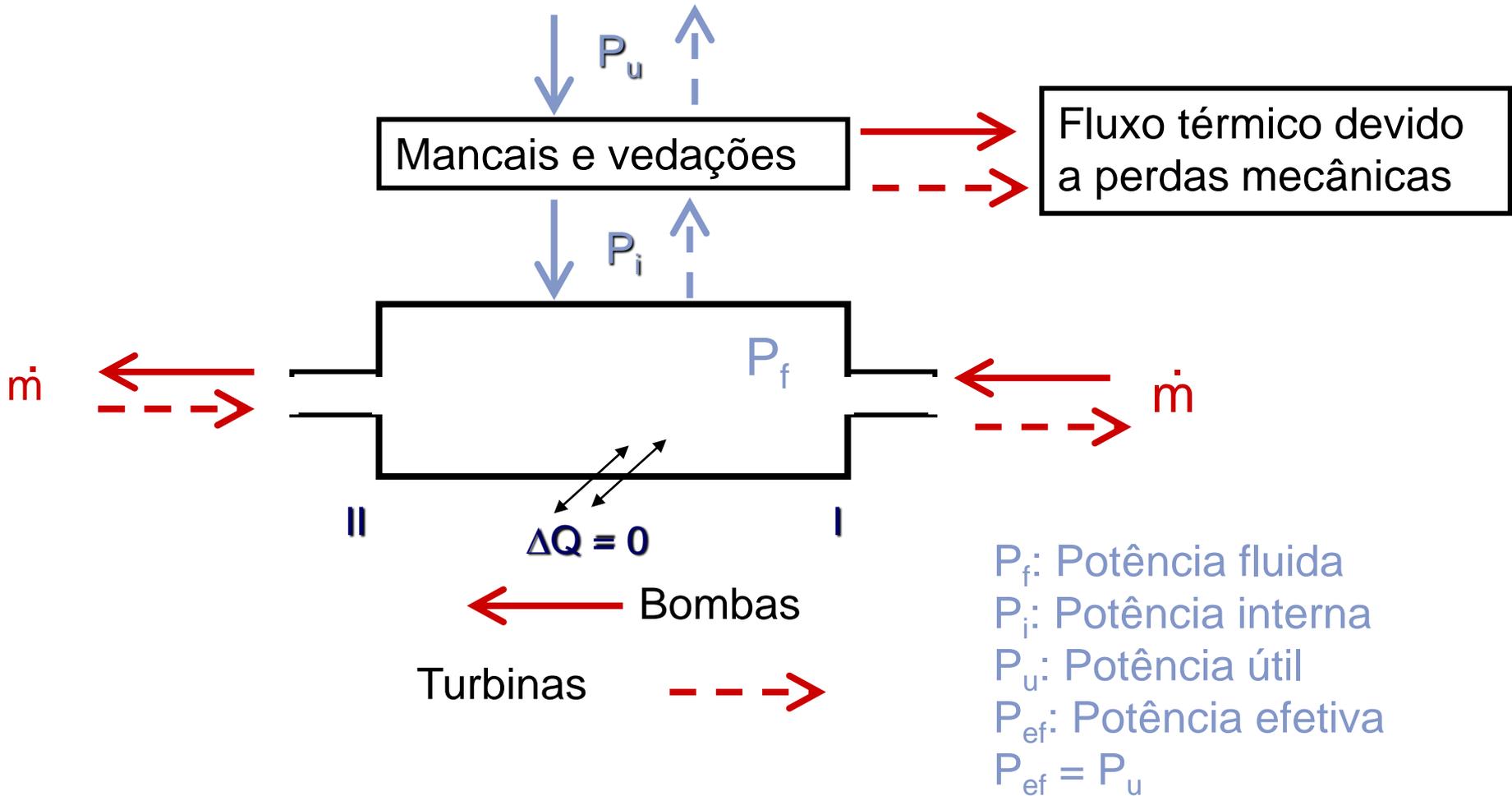
Representação esquemática



Modelo para as máquinas de fluxo



Representação esquemática



Energia específica I



Energia específica I do escoamento (em J / kg) é a razão entre a energia do escoamento e a massa fluida, o que é equivalente à razão entre a potência do escoamento e a vazão mássica.



Para um motor ou turbina o trabalho específico Y (em J / kg) é definido como a relação entre o máximo trabalho ou potência, por unidade de massa de fluido ou vazão mássica, recebido do fluido em escoamento por uma máquina ideal, sem perdas, sob condições de contorno definidas.

Em motores ou turbinas o trabalho é realizado pelo fluido sobre a máquina.

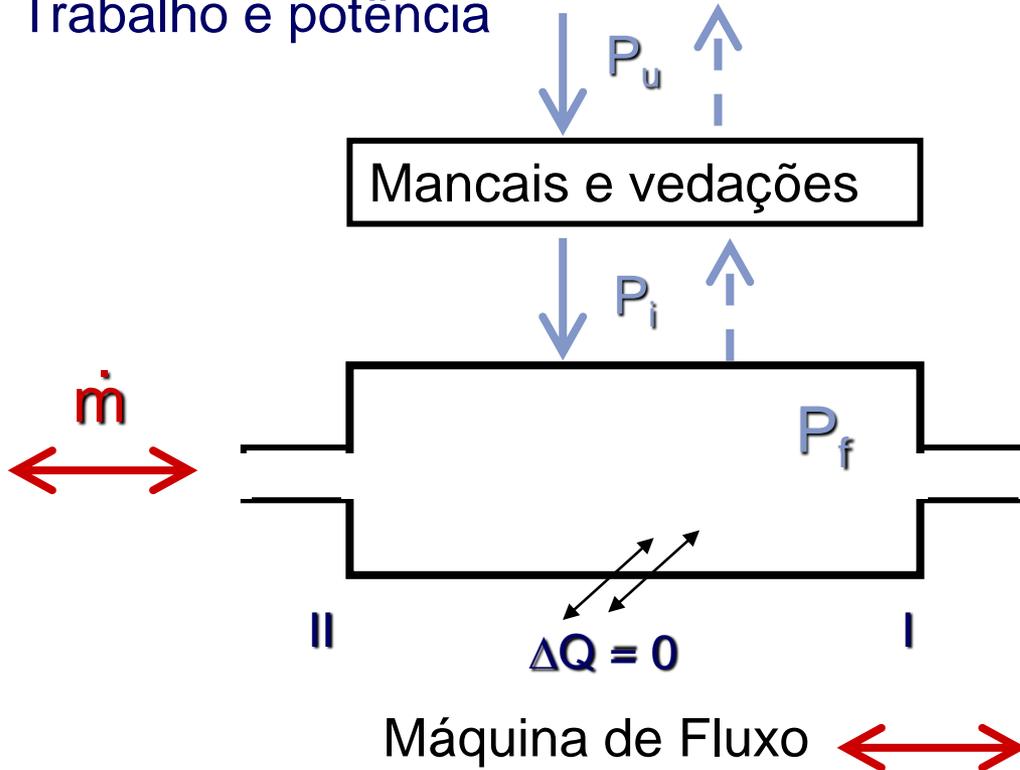
Para um gerador ou bomba o trabalho específico Y (em J / kg) é definido como a relação entre o mínimo trabalho ou potência, por unidade de massa de fluido ou vazão mássica, transferido ao fluido em escoamento por uma máquina ideal, sem perdas, sob condições de contorno definidas.

Em geradores ou bombas o trabalho é realizado pela máquina sobre o fluido.

Modelo para as máquinas de fluxo



Trabalho e potência



- P_f : Potência fluida
- P_i : Potência interna
- P_u : Potência útil
- P_{ef} : Potência efetiva
- $P_{ef} = P_u$

Máquina ideal

$$Y_m = [I_{II} - I_I]_{rev.ad.}$$

$$P_f = \dot{m} [I_{II} - I_I]_{rev.ad.} = \dot{m} Y_m$$

$$P_f = P_i = P_u$$

Máquina real

$$Y_m = [I_{II} - I_I]$$

$$P_f = \dot{m} [I_{II} - I_I] = \dot{m} Y_m$$

$$P_f < P_i < P_u \quad P_f > P_i > P_u$$

Bombas

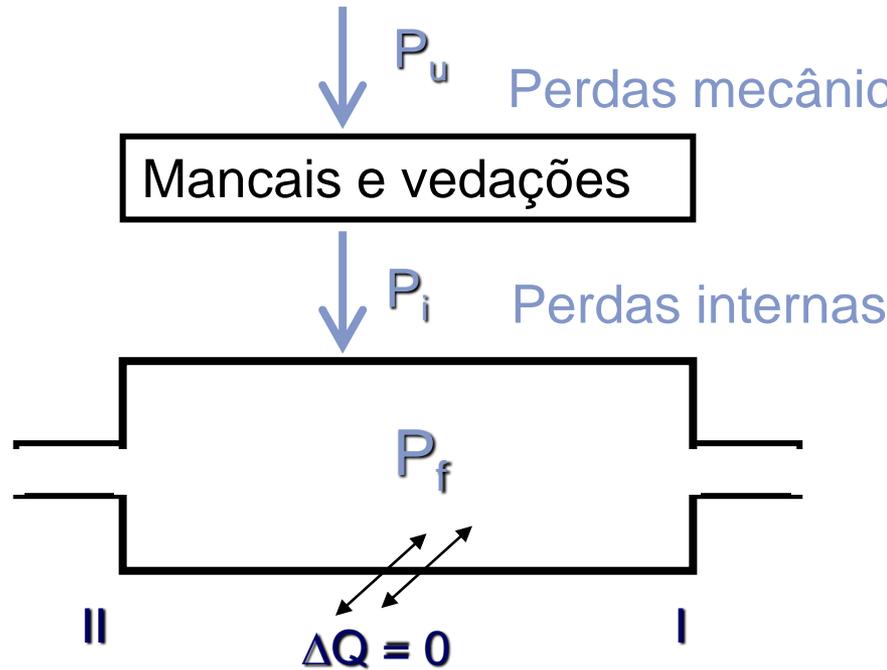
Turbinas

Modelo para as máquinas de fluxo



Trabalho e potência

Rendimentos em bombas



Rendimento mecânico $\eta_m = \frac{P_i}{P_u}$

Rendimento interno $\eta_i = \frac{P_f}{P_i}$

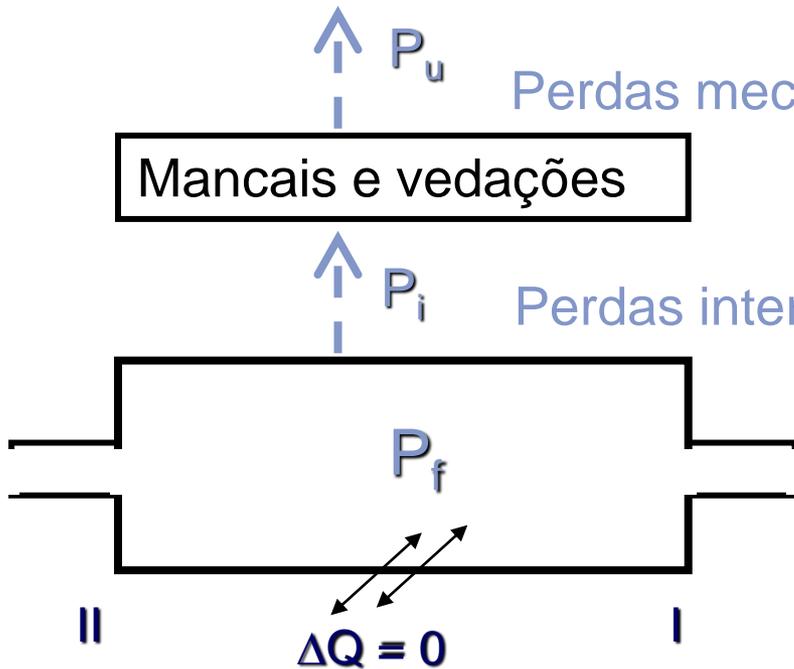
Rendimento útil ou efetivo $\eta_{u(ef)} = \frac{P_f}{P_u}$

Modelo para as máquinas de fluxo



Trabalho e potência

Rendimentos em turbinas



Perdas mecânicas

Rendimento mecânico

$$\eta_m = \frac{P_u}{P_i}$$

Perdas internas

Rendimento interno

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_f}$$

Rendimento útil ou efetivo

$$\eta_{u(ef)} = \frac{P_u}{P_f}$$

Parâmetros de definição das máquinas de fluxo



Rotação específica referida à potência; n_s

Rotação de uma máquina de referência, geometricamente semelhante a outras, porém operando sob potência igual a 1 (um) cavalo vapor e 1 (um) metro de carga.

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

n: Rotação nominal (rpm)

P: Potência (cv)

H: Carga - altura de queda ou altura manométrica total (m)

Valores do ponto ótimo de operação

Em desuso por referir-se a uma grandeza extensiva e
dificulta a comparação de máquinas operando com
fluidos diferentes

NÃO DEVE SER USADA NO CURSO

Por estar referida a valores tabelados, o cálculo da rotação específica deve ser feito nas unidades indicadas, usadas para gerar as tabelas de referência.

Parâmetros de definição das máquinas de fluxo



Rotação específica referida à vazão; n_q

Rotação de uma máquina de referência, geometricamente semelhante a outras, porém operando sob vazão igual a 1 (um) metro cúbico por segundo e 1 (um) metro de carga.

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

n: Rotação nominal (rpm)

Q: Vazão em volume (m³/s)

H: Carga - altura de queda ou altura manométrica total (m)

Valores do ponto
ótimo de operação

De larga aplicação, apresenta o inconveniente de usar unidades estranhas ao Sistema Internacional. Tende a ser substituída pelo número-tipo K.

Por estar referida a valores tabelados, o cálculo da rotação específica deve ser feito nas unidades indicadas, usadas para gerar as tabelas de referência.

Parâmetros de definição das máquinas de fluxo



Número-tipo; K (ABNT NBR-10131)

Velocidade angular de uma máquina de referência, geometricamente semelhante a outras, porém operando sob vazão igual a 1 (um) metro cúbico por segundo e trabalho específico igual a 1 (um) Joule por quilo.

$$K = \frac{\omega \sqrt{Q}}{Y^{3/4}} = K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 (g H)^{3/4}}$$

$$K = 1,82 \cdot 10^{-2} n_q$$

Valores do ponto
ótimo de operação

n: Rotação nominal (rpm)

Q: Vazão em volume (m³/s)

Y: Trabalho específico (J/kg) ou (m²/s²)

H: Carga - altura de queda ou altura manométrica total (m)

g: Aceleração da gravidade (m/s²)

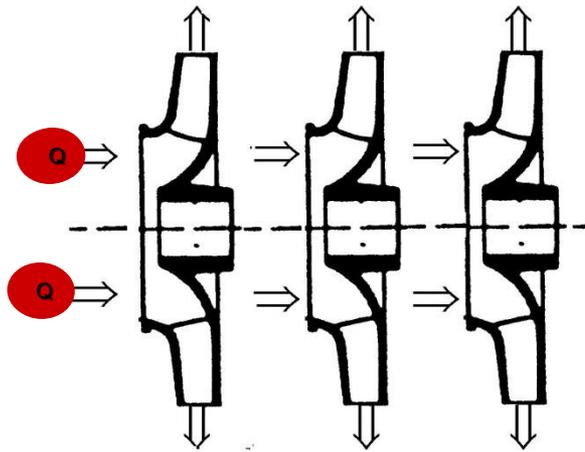
Proporcional à rotação específica referida à vazão, tende a substituí-la ao longo do tempo.

Por estar referida a valores tabelados, o cálculo da rotação específica deve ser feito nas unidades indicadas, usadas para gerar as tabelas de referência.

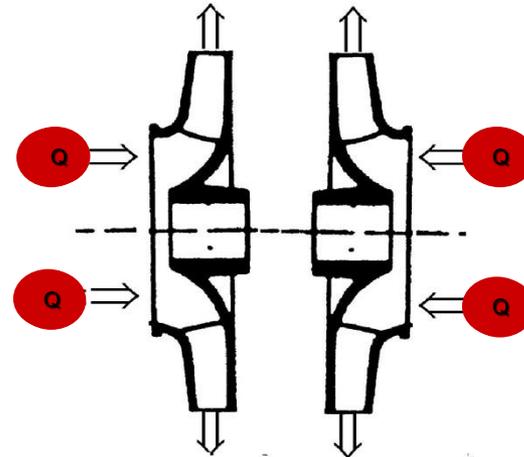
Escoamento no interior de rotores associados



Associação em série de rotores



Associação em paralelo de rotores



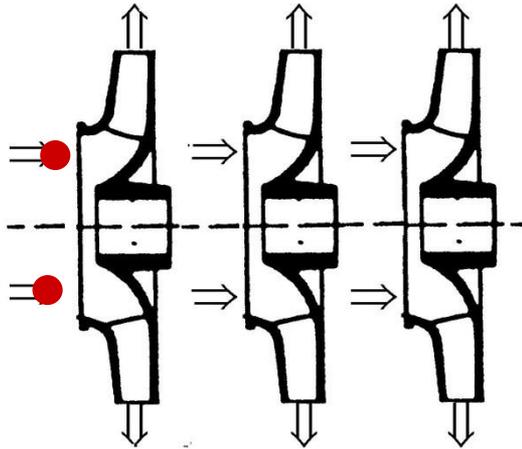
A vazão é a mesma em cada rotor e igual à vazão da associação.
A carga é igual em cada rotor e a somatória das cargas de cada rotor é igual à carga da associação.

A carga é a mesma em cada rotor e igual à carga da associação.
A vazão é igual em cada rotor e a somatória das vazões de cada rotor é igual à vazão da associação.

Rotações específicas para rotores associados



em série



$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_j = Q_{\text{ass}}$$

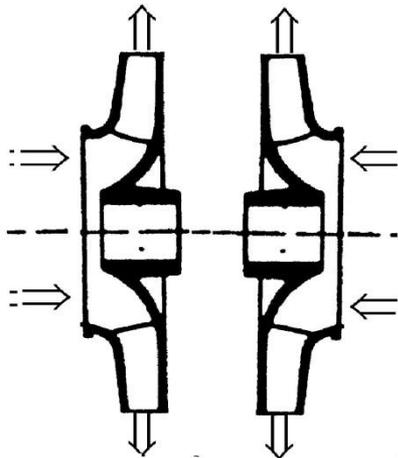
$$H_1 = H_2 = \dots = H_j$$

$$H_{\text{ass}} = j \cdot H_j$$

$$n_{q_j} = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

$$n_{q_j} = j^{0,75} n_{q_{\text{ass}}}$$

em paralelo



j rotores associados

$$H_1 = H_2 = \dots = H_j = H_{\text{ass}}$$

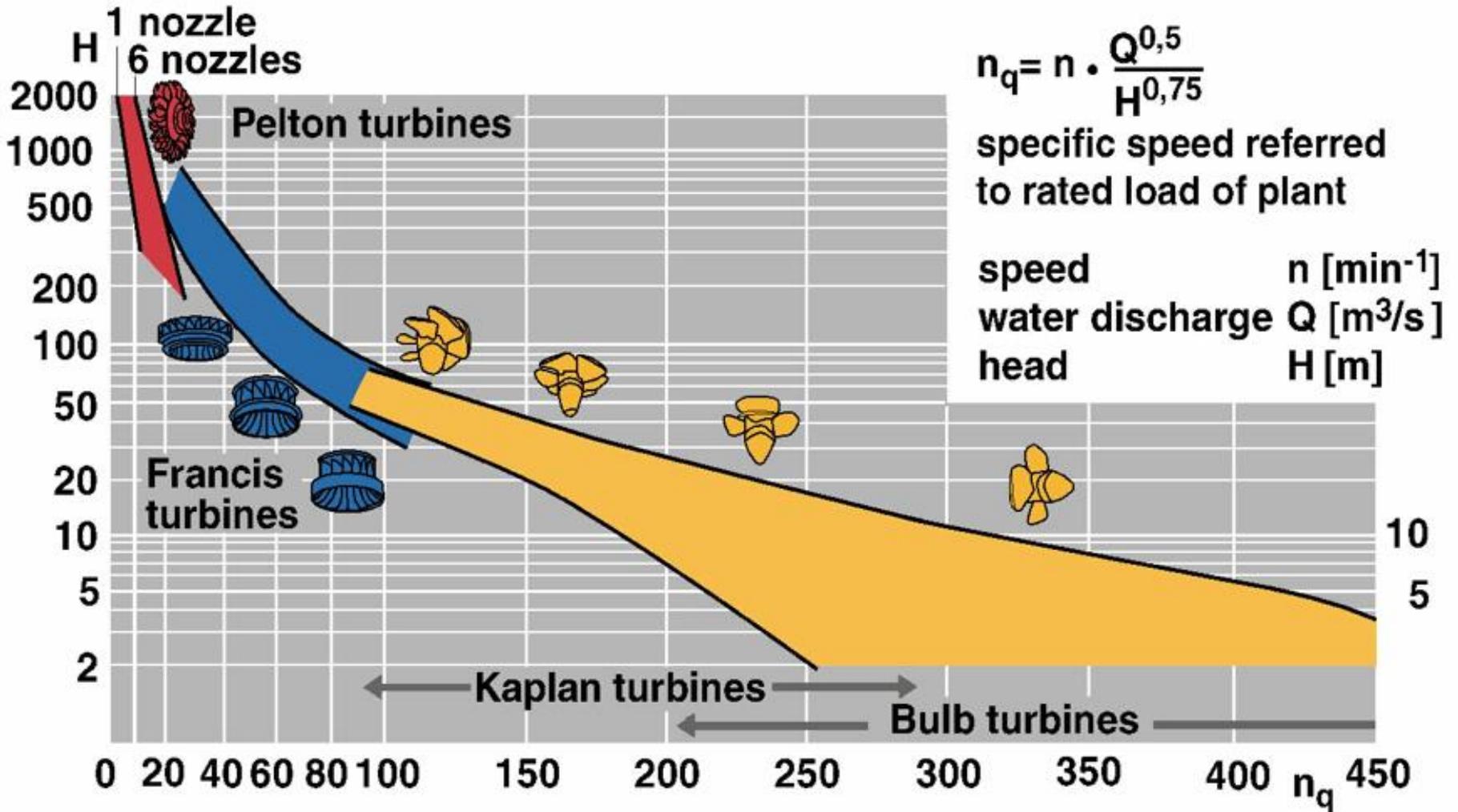
$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_j$$

$$Q_{\text{ass}} = j \cdot Q_j$$

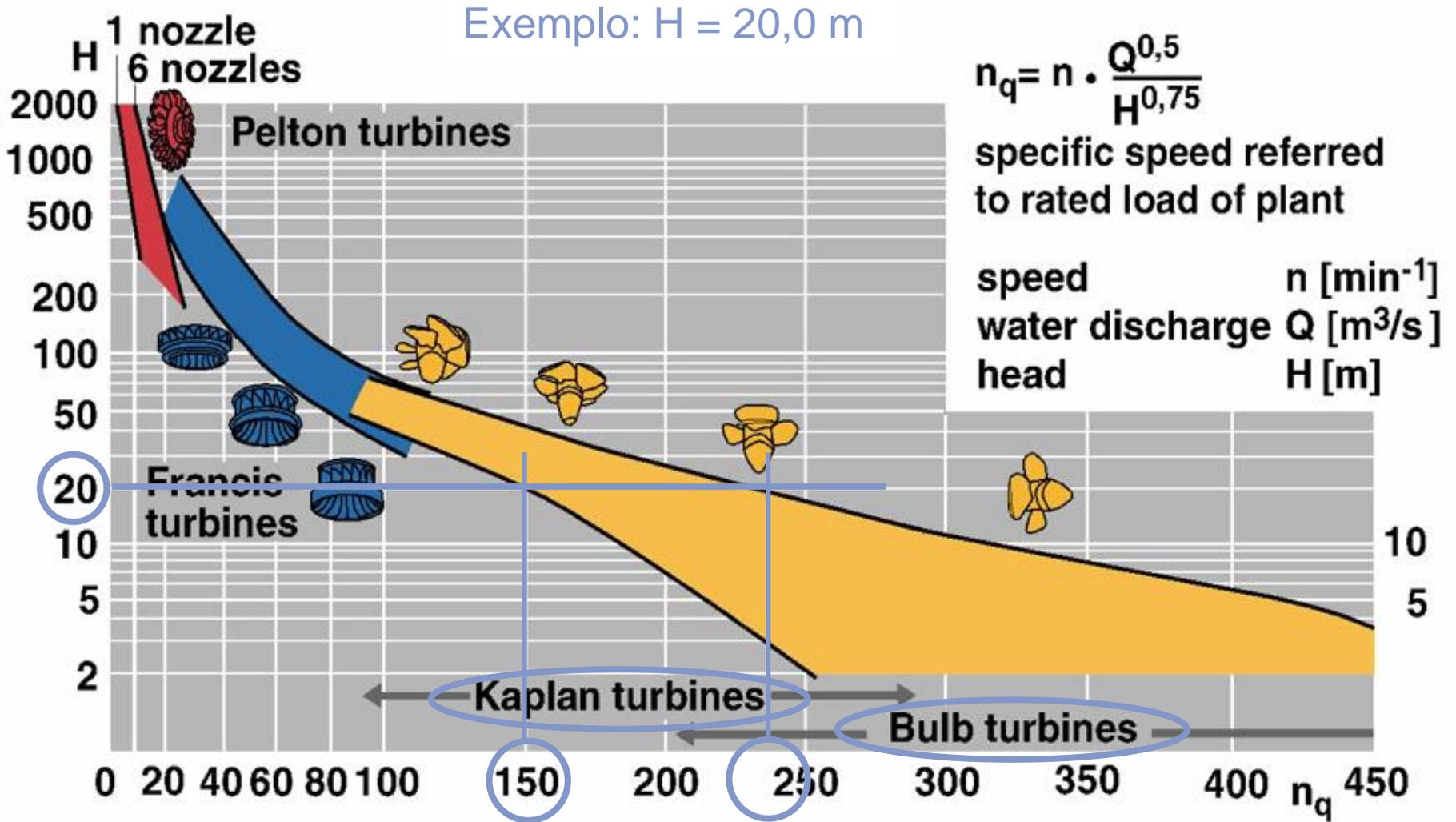
$$n_{q_j} = j^{-0,5} n_{q_{\text{ass}}}$$

$$n_{q_j} = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

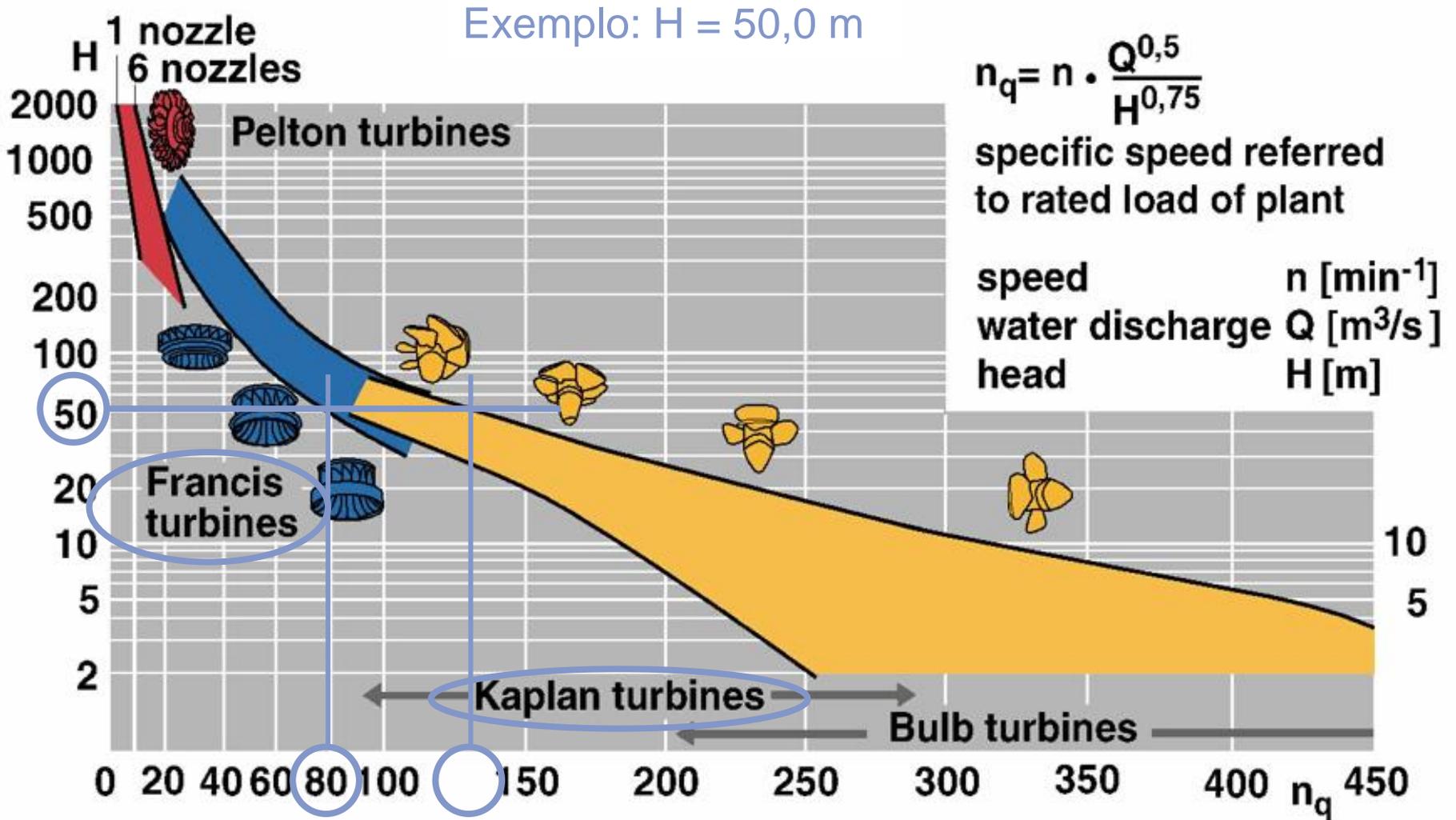
Seleção de turbinas hidráulicas



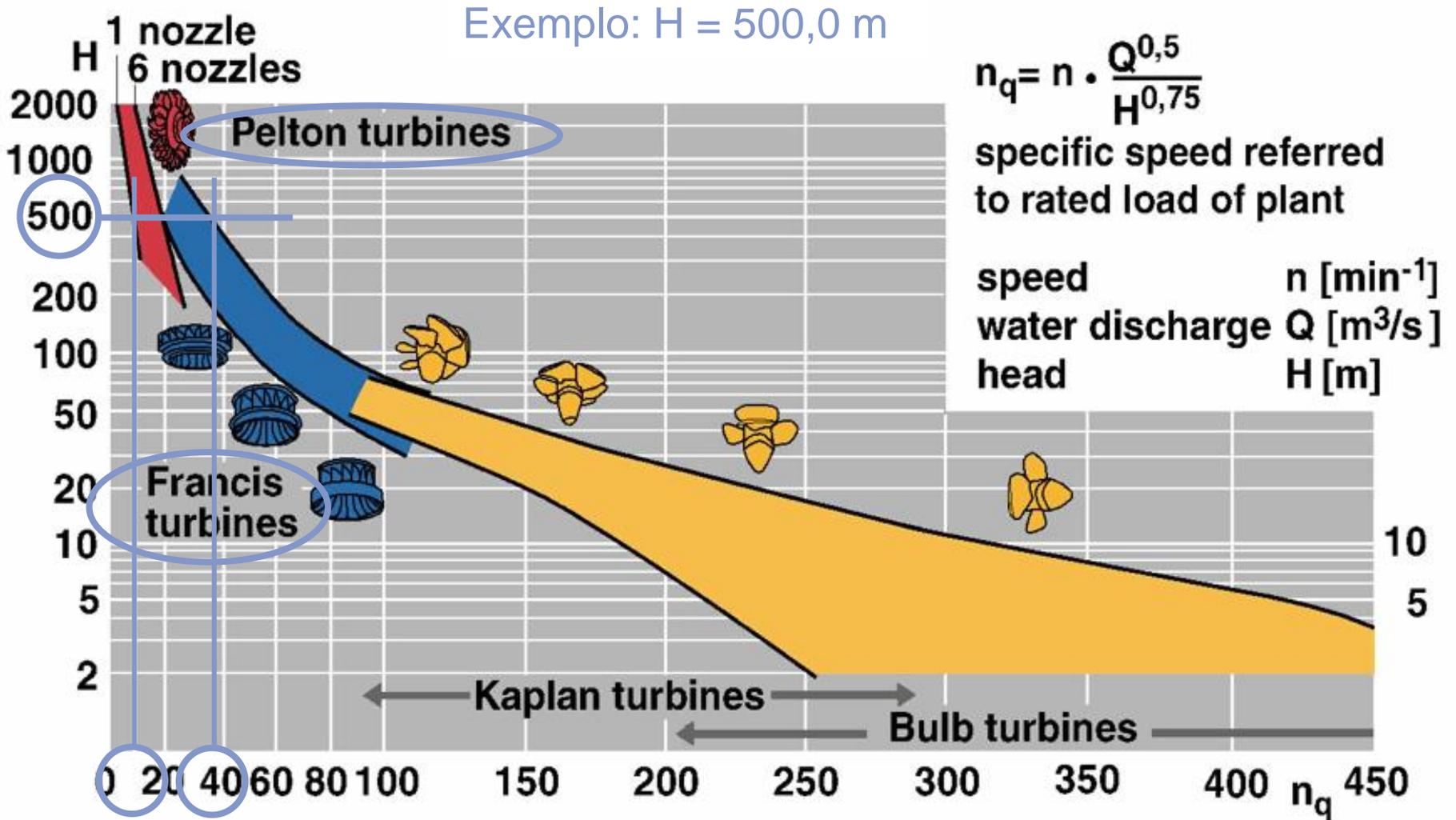
Seleção de turbinas hidráulicas



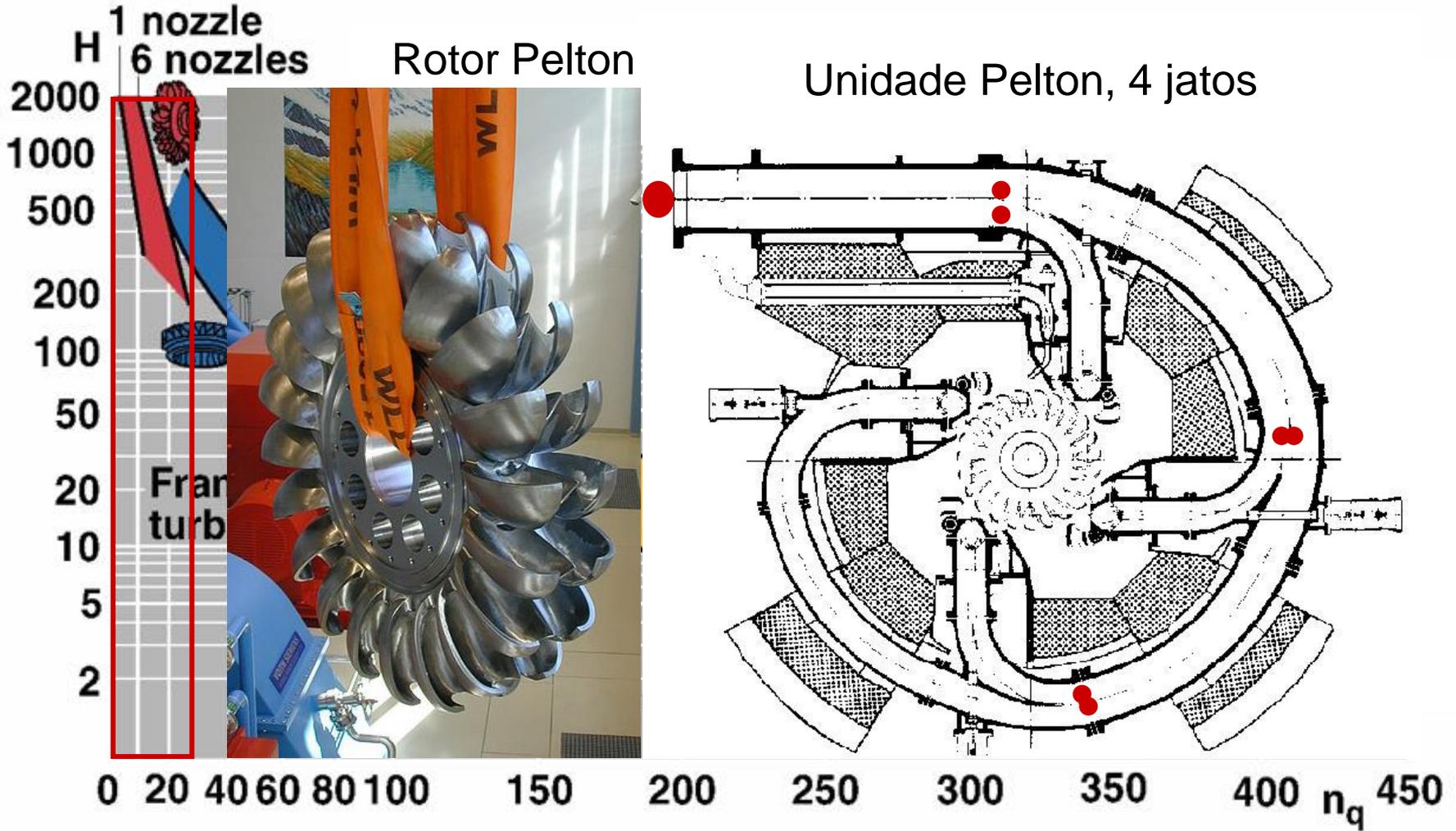
Seleção de turbinas hidráulicas



Seleção de turbinas hidráulicas



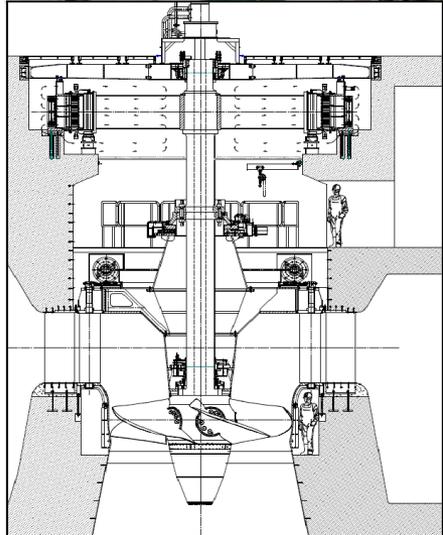
Seleção de turbinas hidráulicas – Rotores Pelton



Seleção de turbinas hidráulicas – Rotores Kaplan



Conjunto Kaplan

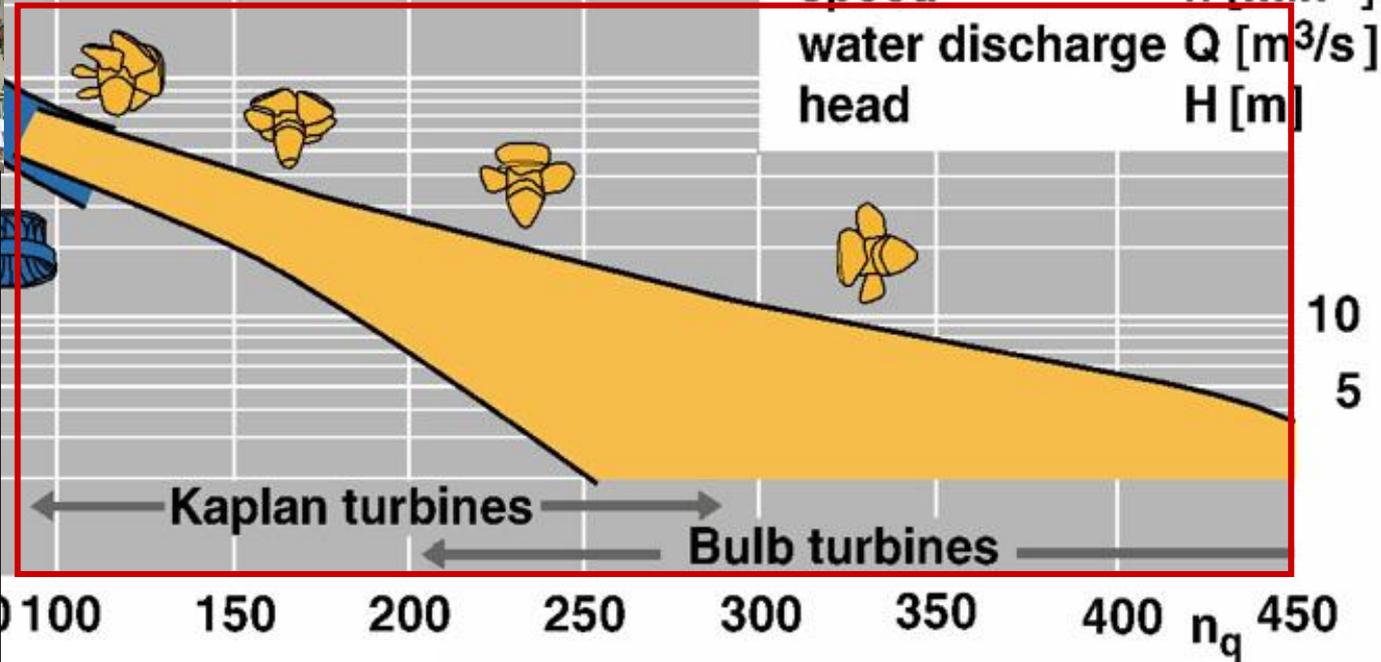


turbines

$$n_q = n \cdot \frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}}$$

specific speed referred to rated load of plant

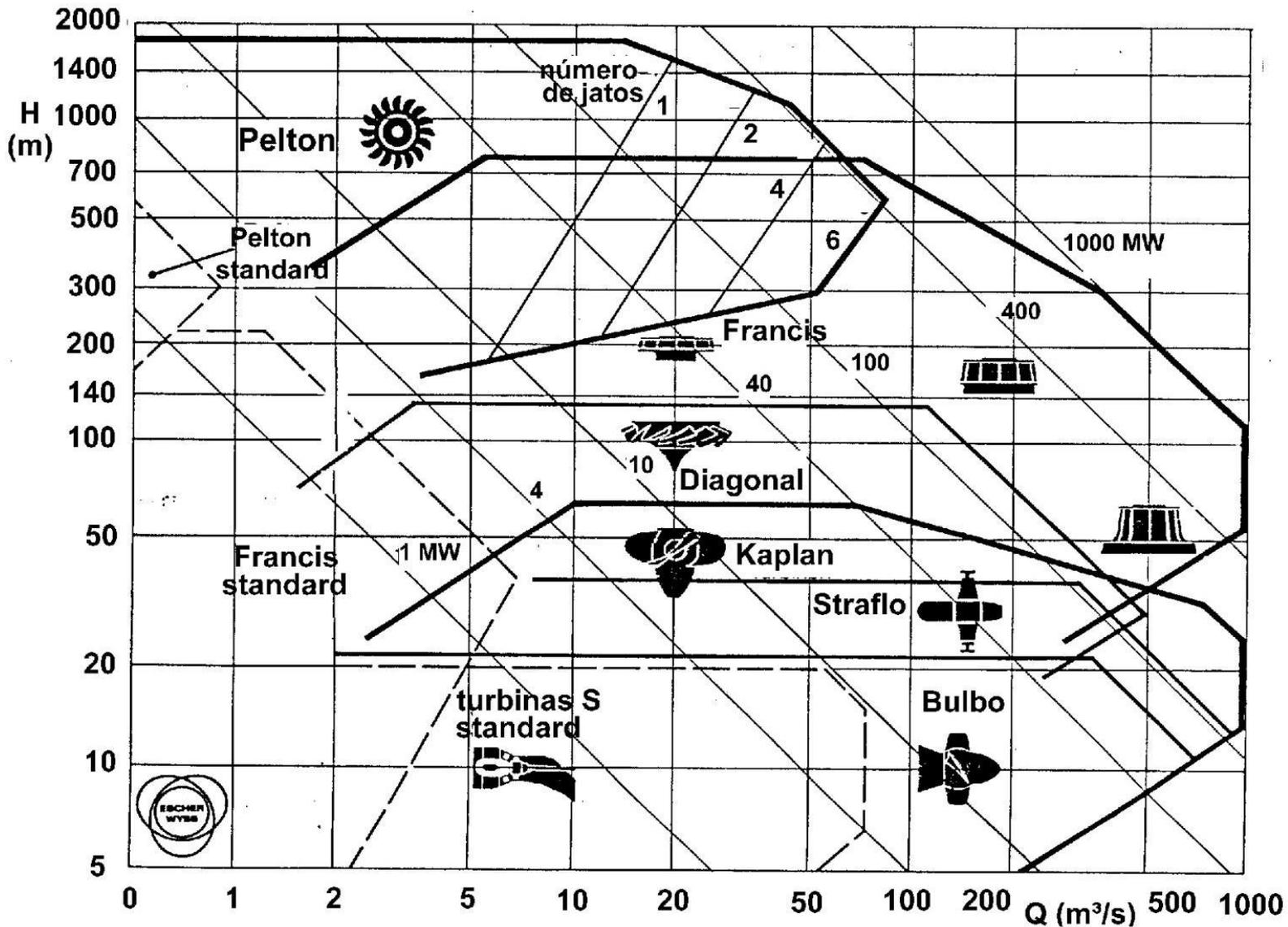
speed n [min⁻¹]
 water discharge Q [m³/s]
 head H [m]



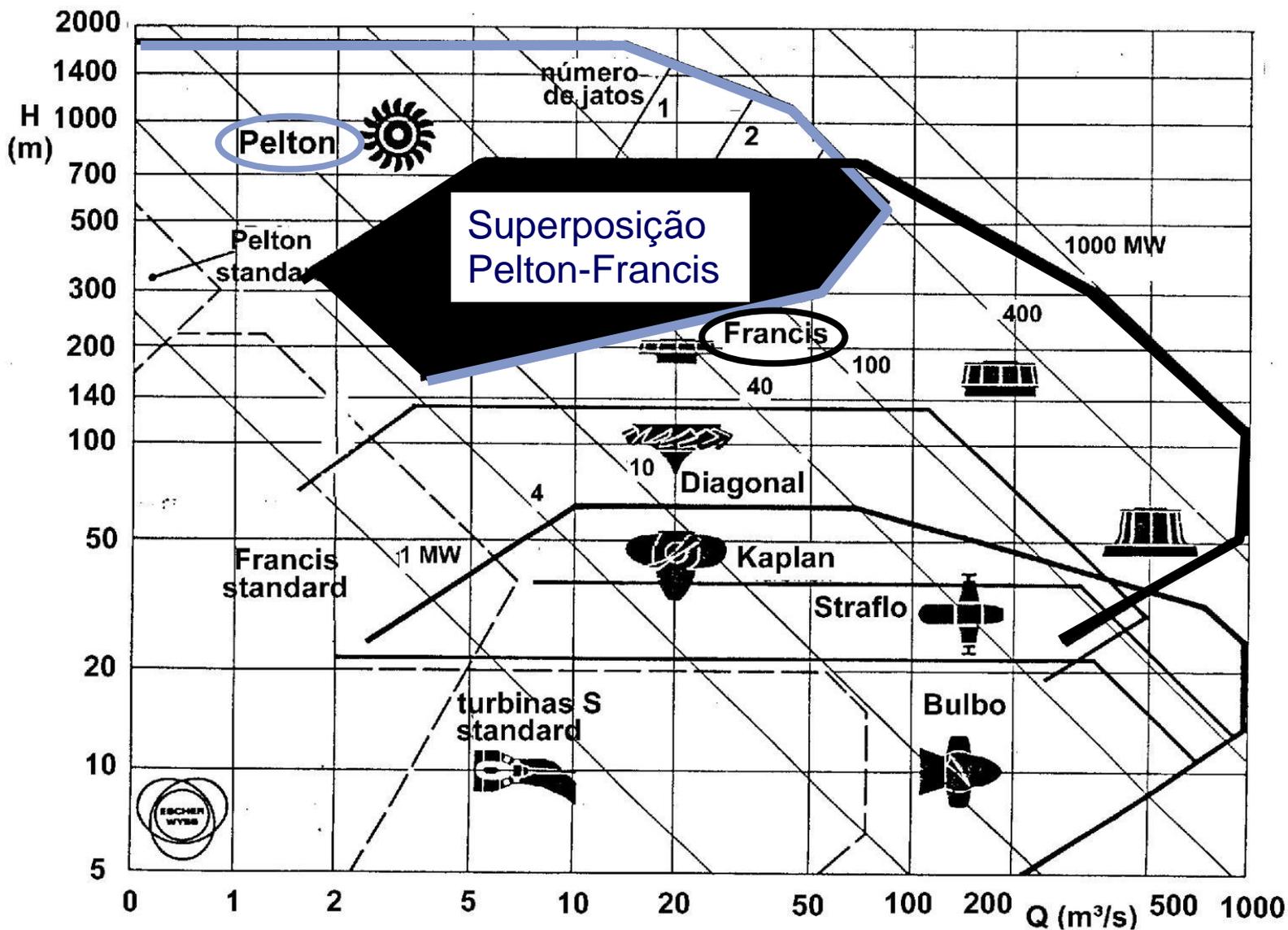
Unidade Kaplan



Pré-seleção de turbinas hidráulicas

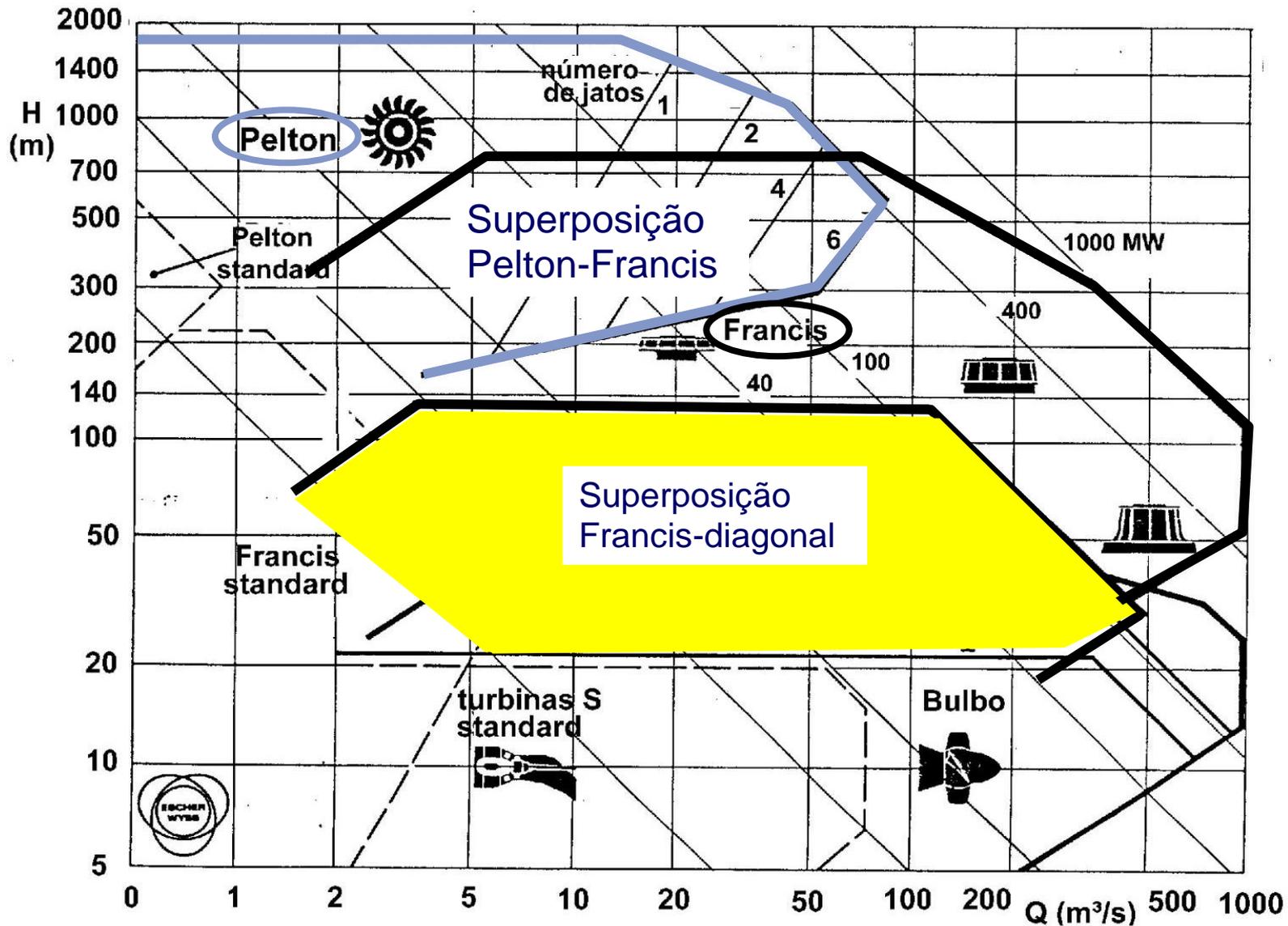


Pré-seleção de turbinas hidráulicas



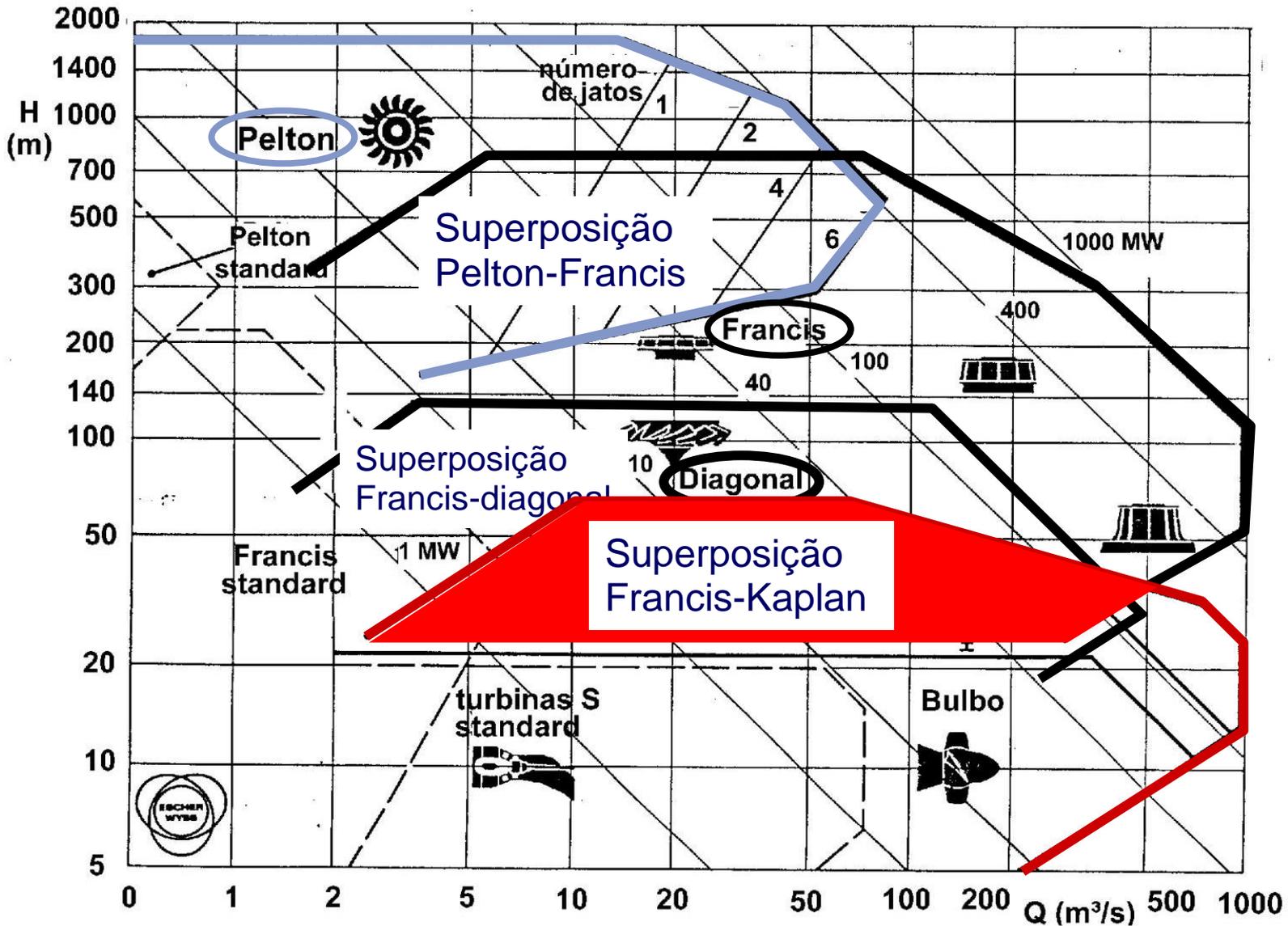


Pré-seleção de turbinas hidráulicas



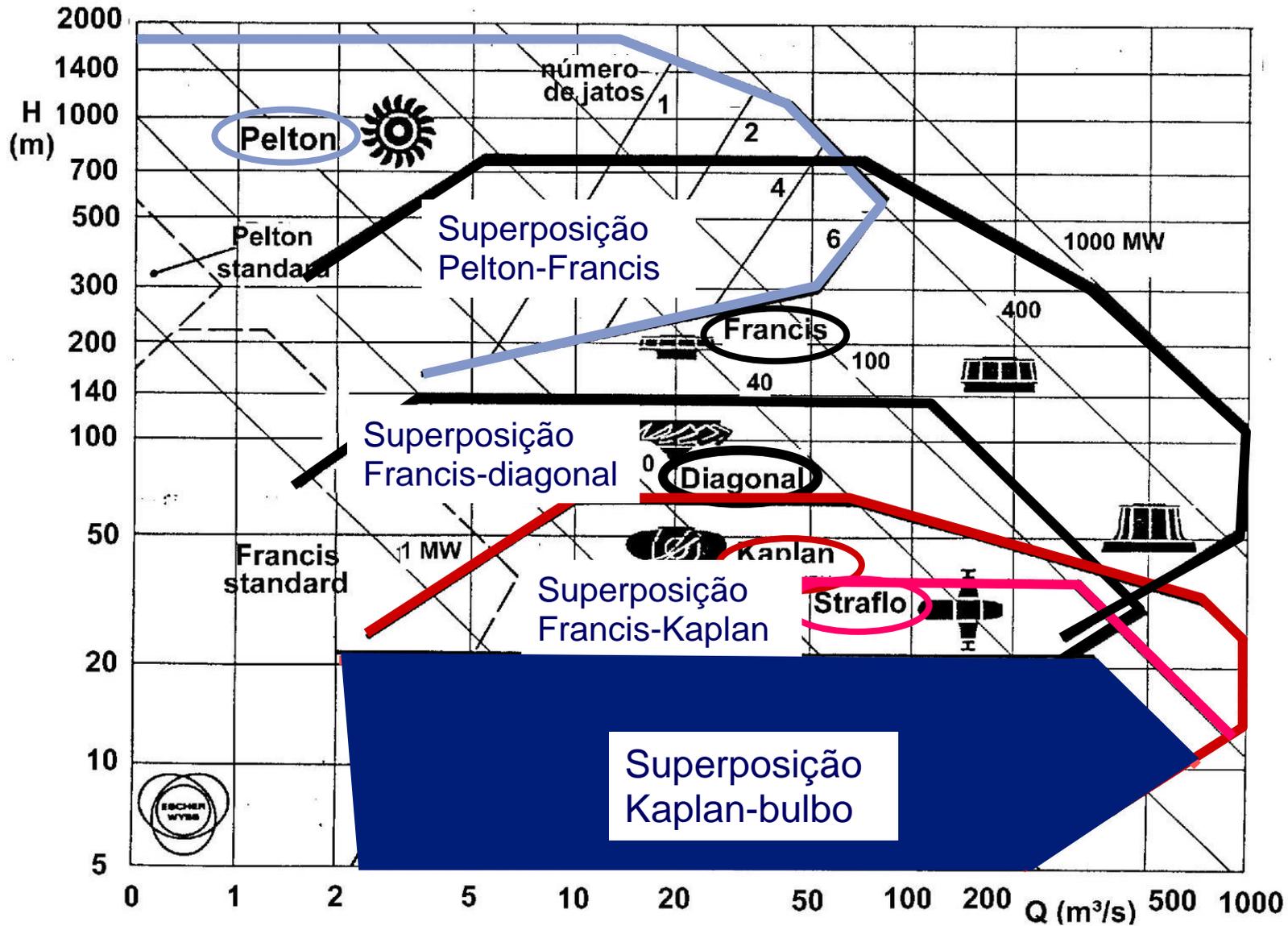


Pré-seleção de turbinas hidráulicas

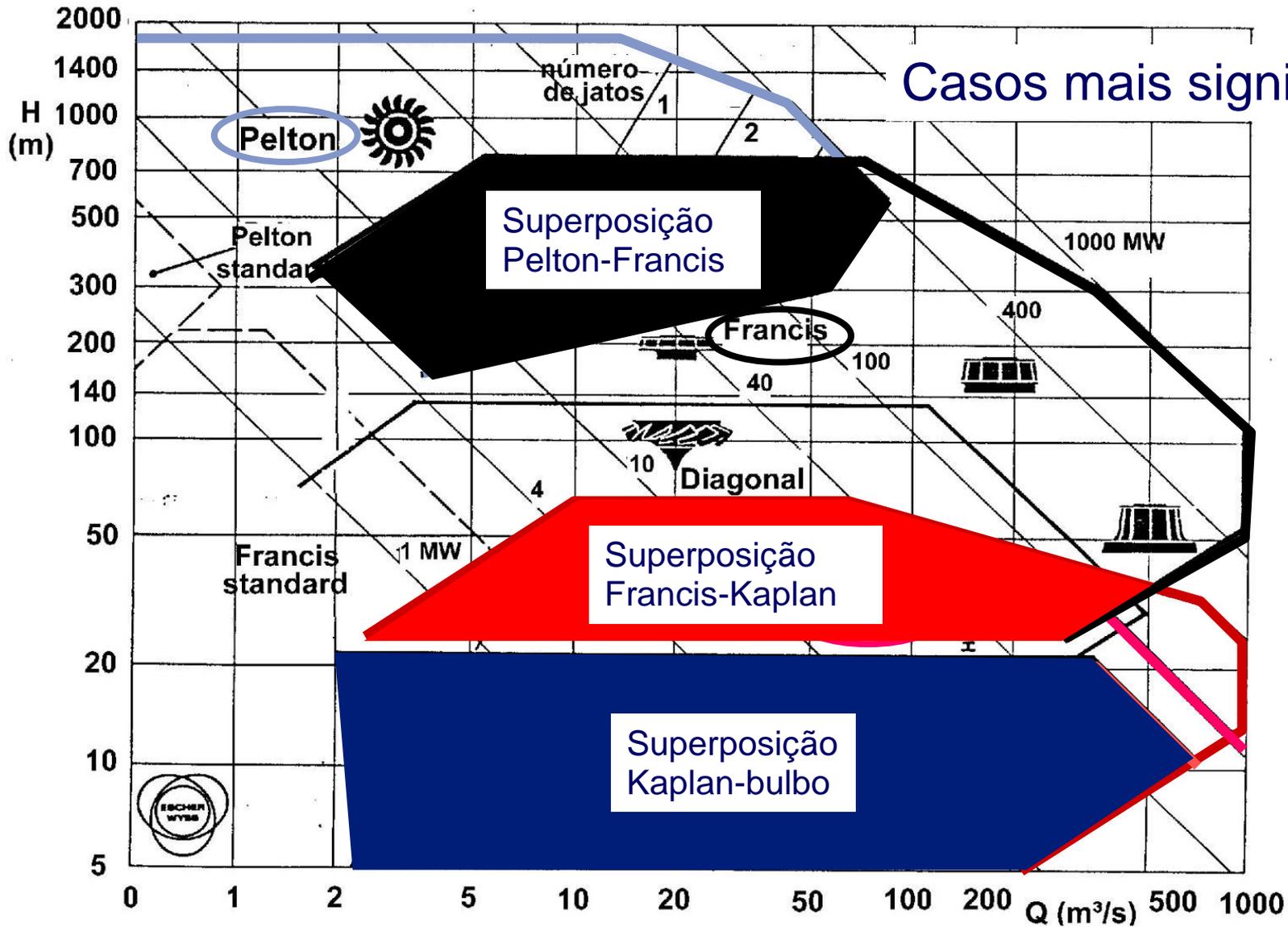




Pré-seleção de turbinas hidráulicas



Pré-seleção de turbinas hidráulicas



Seleção de bombas hidráulicas de fluxo

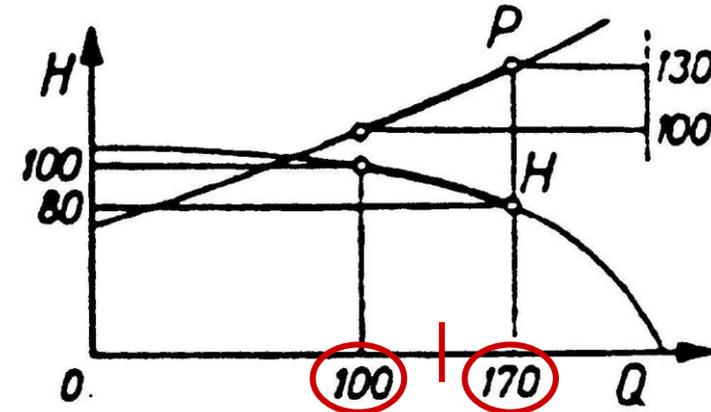
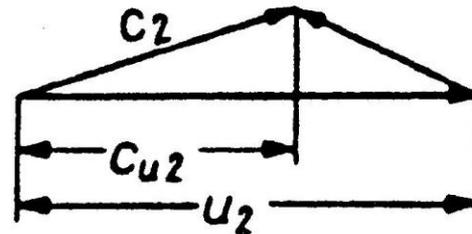
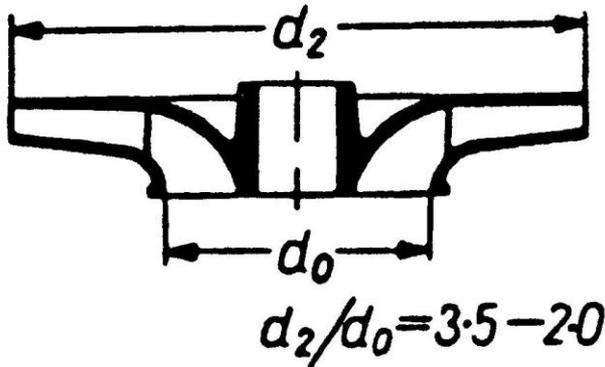


$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

$$0,19 \leq K \leq 0,57 \quad 10 \leq n_q \leq 30$$

Rotor / Bomba radial

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$



Posicionar a vazão para o ponto de máximo de rendimento do rotor no centro da faixa (100 – 170).

Com isso definem-se as vazões (relativas) recomendadas máxima e mínima.

Os valores numéricos encontrados na figura devem ser tomados como relativos ou percentuais (100% - 170%) e jamais como valores numéricos representativos da vazão.

Mais detalhes no cap. 6

Faixa recomendada de operação da bomba

Seleção de bombas hidráulicas de fluxo

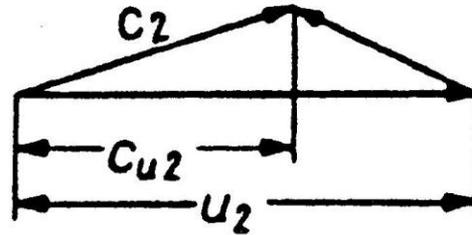
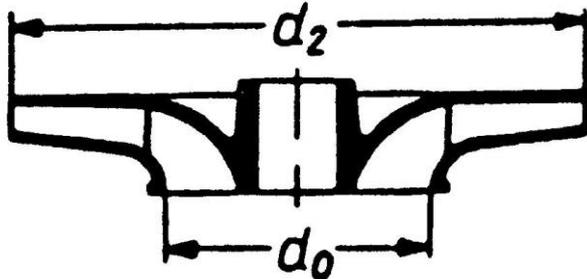


$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

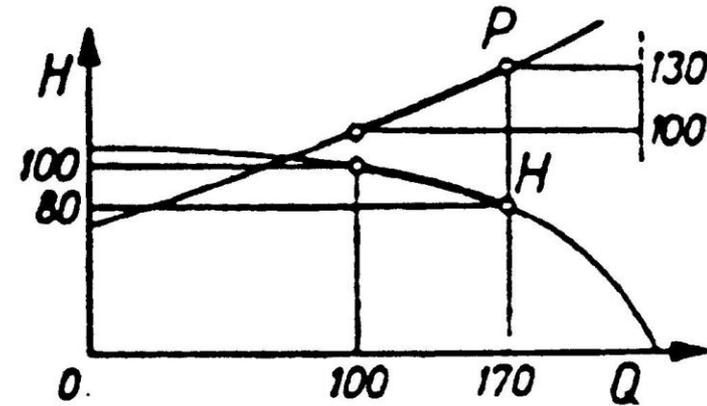
$$0,19 \leq K \leq 0,57 \quad 10 \leq n_q \leq 30$$

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

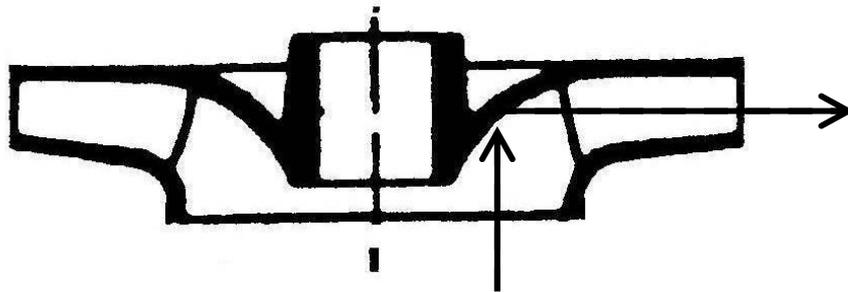
Rotor / Bomba radial



$$d_2/d_0 = 3.5 - 2.0$$



Saída radial



Entrada axial

Seleção de bombas hidráulicas de fluxo



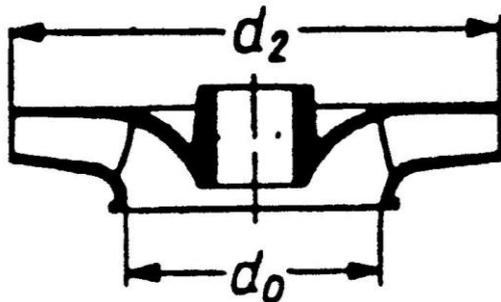
$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

$$0,57 \leq K \leq 0,95$$

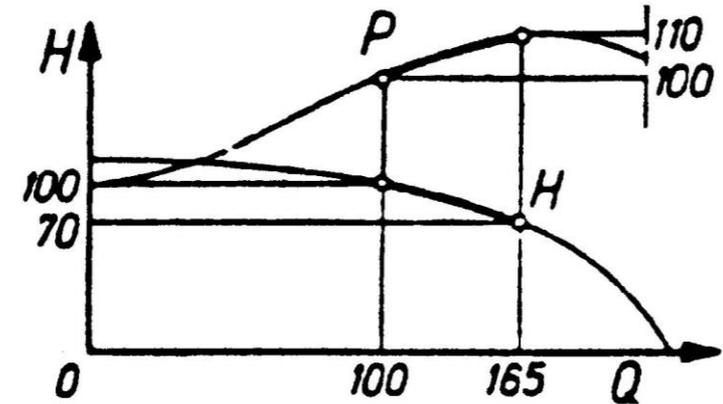
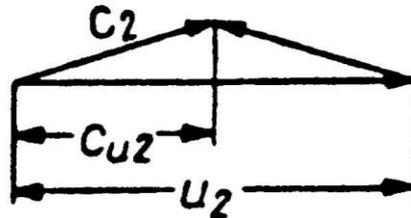
$$30 \leq n_q \leq 50$$

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

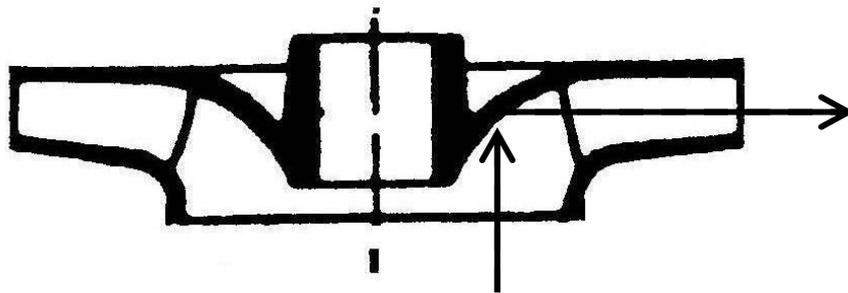
Rotor / Bomba radial



$$d_2/d_0 = 2,0 - 1,5$$



Saída radial



Entrada axial

Seleção de bombas hidráulicas de fluxo



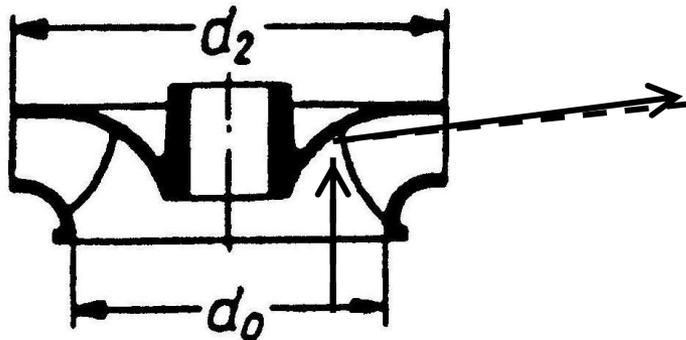
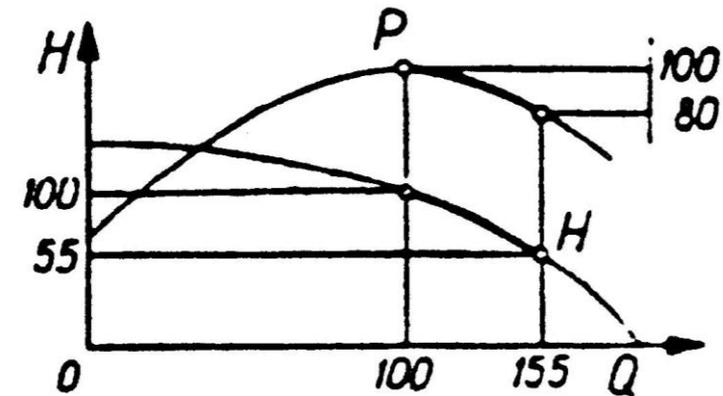
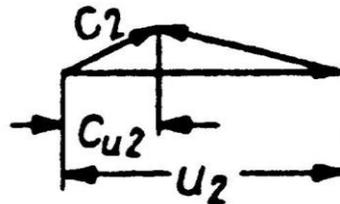
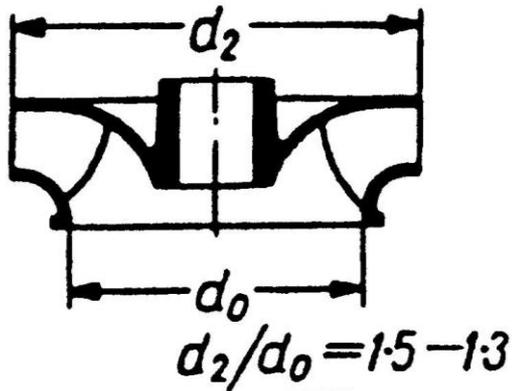
$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

$$0,95 \leq K \leq 1,52$$

$$50 \leq n_q \leq 80$$

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Rotor / Bomba mista fechada



Saída inclinada

Variação de direção do escoamento $> 90^\circ$
Saída nem radial, nem axial \Rightarrow mista

Entrada axial

Seleção de bombas hidráulicas de fluxo



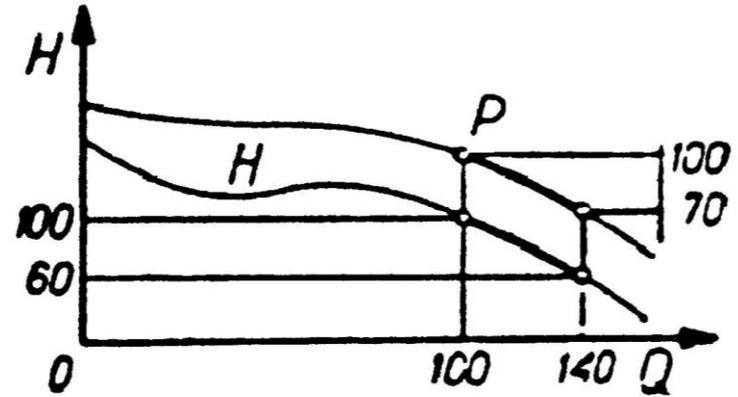
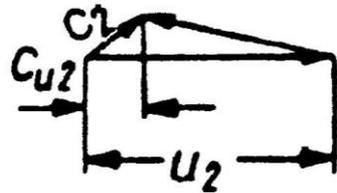
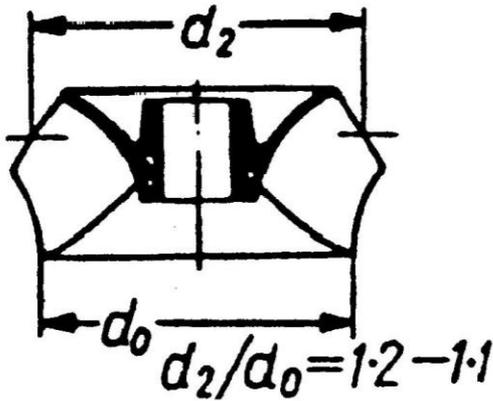
$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

$$1,52 \leq K \leq 3,04$$

$$80 \leq n_q \leq 160$$

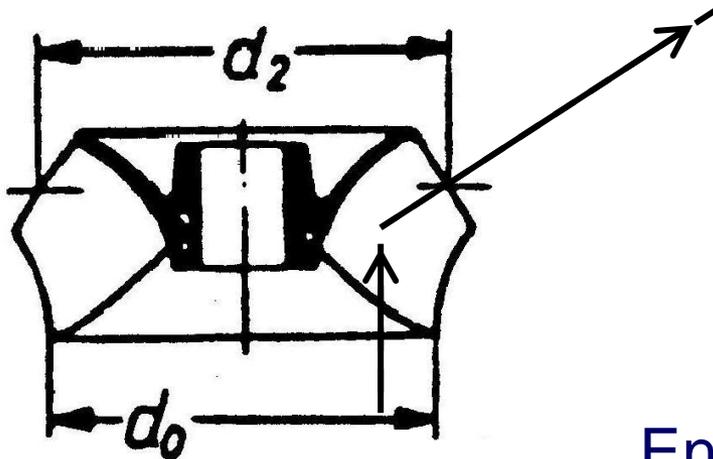
$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Rotor / Bomba mista aberta



Saída inclinada

Variação de direção do escoamento $> 90^\circ$
Saída nem radial, nem axial \Rightarrow mista



Entrada axial

Seleção de bombas hidráulicas de fluxo



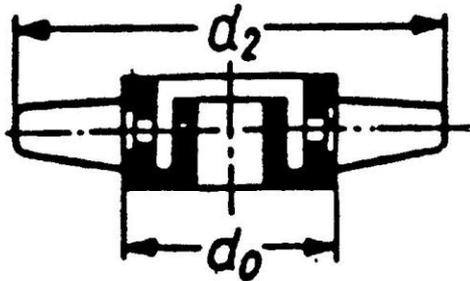
$$K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

$$2,66 \leq K \leq 7,60$$

$$140 \leq n_q \leq 400$$

$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

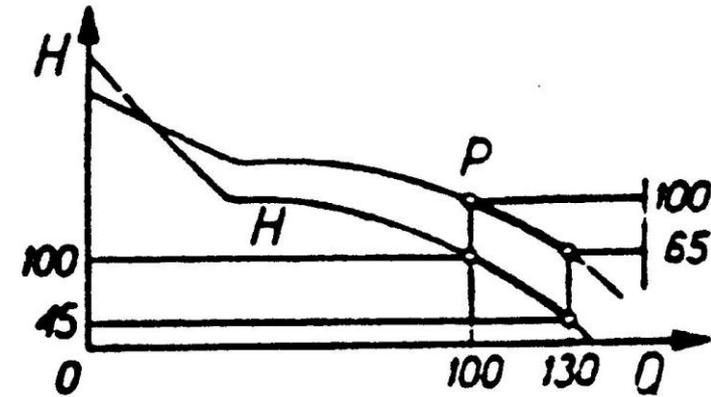
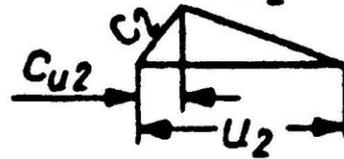
Rotor / Bomba axial



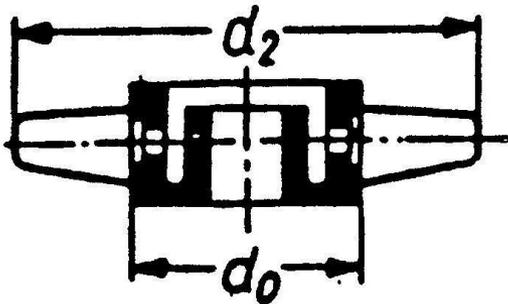
perímetro externo



cubo



Saída axial



Entrada axial



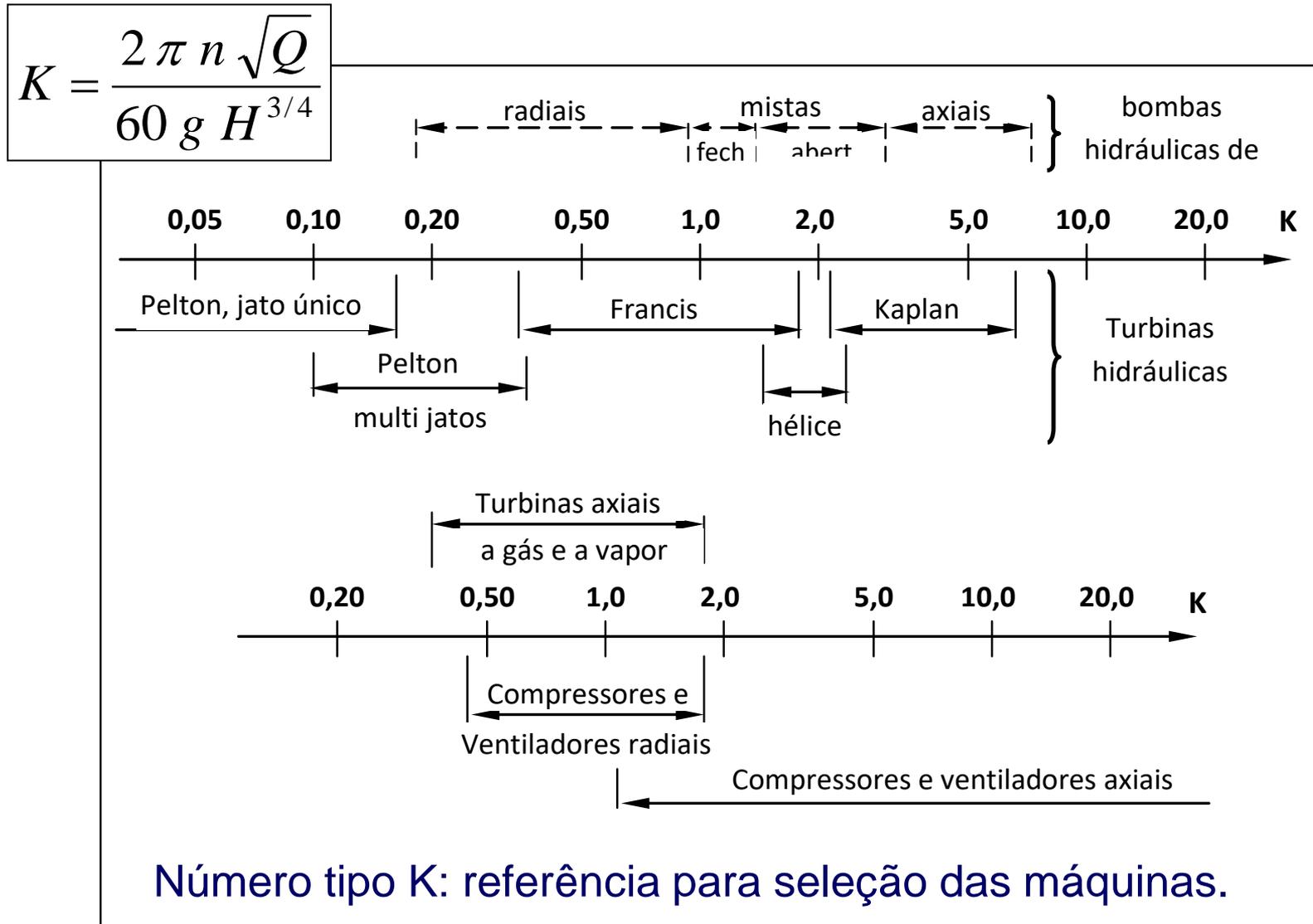
Bombas-turbina são projetadas como bomba.

Critérios de seleção são os mesmos de bombas hidráulicas de fluxo.

Menor rotação específica para bombas hidráulicas de fluxo convencionais $n_q = 10$.

Menor rotação específica para bombas-turbina $n_q = 25$, a máquina deve apresentar elevado desempenho tanto operando como bomba quanto como turbina.

Seleção das demais máquinas de fluxo



Pré-cálculo da rotação específica para máquinas hidráulicas



$$n_q = \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad K = \frac{2 \pi n \sqrt{Q}}{60 g H^{3/4}}$$

Bombas:

A rotação n (ou a velocidade angular ω), a vazão Q e a altura manométrica H , são dados de projeto.

Turbinas:

A vazão Q é definida pela hidrologia do local e a altura de queda H , é definida pela topografia local. A rotação n (ou a velocidade angular ω) depende de fatores como número de pares de polos do gerador, diâmetro do rotor hidráulico, entre outros, e dificulta a avaliação inicial da forma construtiva do rotor hidráulico.

Pré-cálculo da rotação específica para máquinas hidráulicas



Pelton

j: refere-se a um único jato da turbina Pelton

$$n_{qj} = 196,2 H^{-0,5}$$

Francis

$$n_q = 1303,7 H^{-0,654}$$

Bomba-turbina

Refere-se à operação como bomba

$$n_q = 579,9 H^{-0,496}$$

Kaplan

$$n_q = 791,7 H^{-0,486}$$

Bulbo

$$n_q = 1059,2 H^{-0,625}$$

Expressões baseadas em levantamentos estatísticos envolvendo turbinas hidráulicas em operação em todo o mundo e publicados na revista “*Water Power and Dam Construction*”.

Dúvidas?

Obrigado.



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO