

B.01.01 – Máquinas Hidráulicas de Fluxo

Normas e Grandezas Básicas

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci>

Compiled on 2021-02-16 04h49m51s UTC

1

-

2

Nomenclatura

- Máquinas de fluxo são uma **aplicação muito antiga** em fluidos;
- A **nomenclatura** empregada é **bastante heterogênea**;
- Referências incluem **acadêmicas** e **industriais**;
- **Maiores fornecedores mundiais** convergem para o **padrão IEC**.
- E também o material desta disciplina.

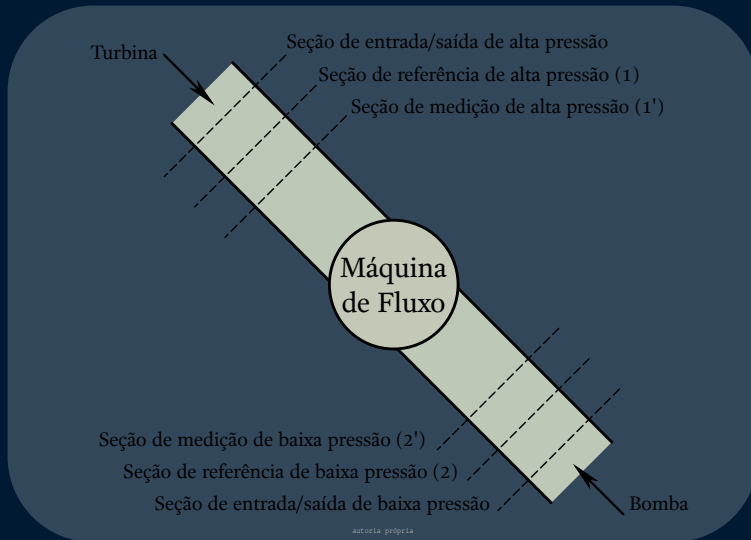
Norma IEC 60193

IEC é o acrônimo da *International Electrotechnical Commission*.

- A **IEC 60193:2019** cancela e revoga a 2ª Ed. de 1999;
- Aplica-se para **modelos de laboratório** de máquinas de **ação** e de **reação**;
- Aplica-se para **turbinas hidráulicas**, **bombas de armazenamento**, ou **turbina-bombas**;

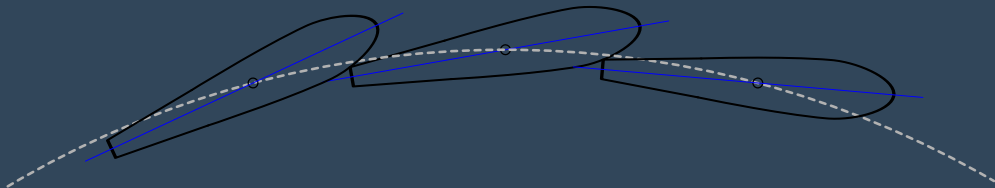
Subscritos e Símbolos Pertinentes

Símbolo	Definição
1	Seção de referência de alta pressão
2	Seção de referência de baixa pressão
1'	Seção de medição de alta pressão
2'	Seção de medição de baixa pressão
max, min	Máximo ou mínimo valor, respectivamente
P	Referente ao protótipo , em tamanho real
M	Referente ao modelo em escala reduzida
ref	Valores em condição de referência especificada
amb	Valores referentes ao ambiente
pl	Valores da planta
R	Referente à condição de disparo (runaway)

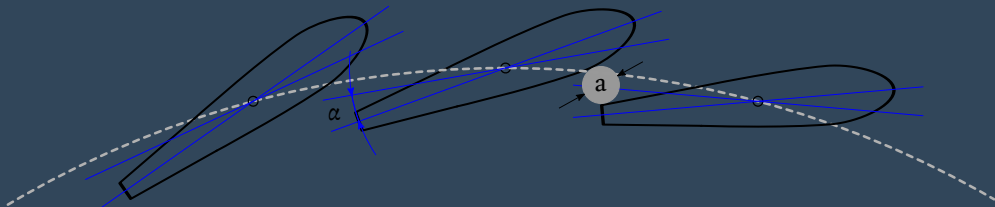


Termos Geométricos

Símbolo	Definição
$A \text{ (m}^2\text{)}$	Área
$a \text{ (m)}$	Abertura de palhetas (menor distância média entre palhetas adjacentes)
$\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	Ângulo de abertura de palhetas (valor médio à partir do fechamento)
$\beta \text{ (}^\circ\text{)}$	Ângulo de abertura de pá de rotor
$D \text{ (m)}$	Diâmetro de referência (geralmente mínimo e não variável)
$z \text{ (m)}$	Nível, ou quota (elevação em rel. a uma ref.: nível do mar)



Palhetas diretrizes: abertura, a , e ângulo de abertura, α .



autoria própria

Quantidades e Propriedades Físicas

Símbolo	Definição
g (m/s ²)	Aceleração devido à gravidade
Θ (K)	Temperatura termodinâmica
θ (°C)	Temperatura em Celsius, $\theta = \Theta - 273,15$
ρ (kg/m ³)	Densidade. Subscritos incluem: w , a e Hg , para água, ar e Mercúrio
p_{va} (Pa)	Pressão absoluta de vapor d'água (uma função da temperatura)
μ (Pa·s)	Viscosidade dinâmica
ν (m ² /s)	Viscosidade cinemática, ou difusividade do movimento, $\nu = \mu/\rho$
σ^* (J/m ²)	Tensão superficial

Termos de Vazão e Velocidade

Símbolo	Definição
Q (m^3/s)	Vazão (taxa de escoamento volumétrica) ou descarga
ρQ (kg/s)	Vazão mássica (taxa de massa)
Q_1' ou Q_2'	Vazão volumétrica medida
Q_1 ou Q_2	Vazão volumétrica na seção de referência
Q_R (m^3/s)	Vazão volumétrica em condição de disparo (runaway)
Q_0 (m^3/s)	Vazão volumétrica da turbina em potência mecânica nula (no-load)
q (m^3/s)	Vazão de vazamentos (perdas)

Termos de Vazão e Velocidade (Cont.)

Símbolo	Definição
v (m/s)	Velocidade média, $v = Q/A$
n (1/s)	(Velocidade de) rotação: revoluções por unidade de tempo
u (m/s)	Velocidade periférica (de rotor), $u = \pi D n$
n_R (1/s)	Rotação, em regime permanente, em condição de disparo (runaway)
n_{Rmax} (1/s)	Rotação, em regime permanente, máxima em condição de disparo

Termos de Pressão

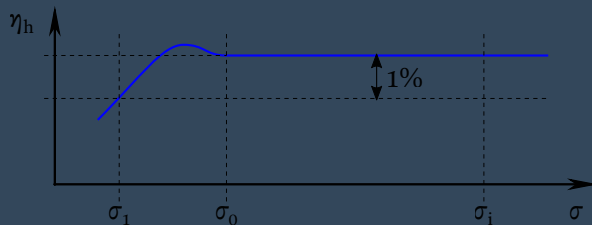
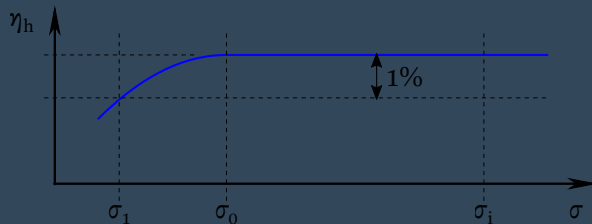
Símbolo	Definição
p_{abs} (Pa)	Pressão absoluta — pressão estática de um fluido em relação ao vácuo
p_{amb} (Pa)	Pressão ambiente — pressão absoluta do ar ambiente
p (Pa)	Pressão manométrica, $p = p_{abs} - p_{amb}$, no nível de referência da medição.

Termos de Energia Específica

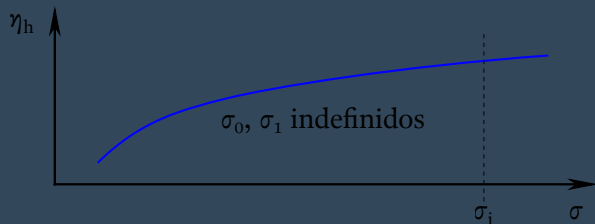
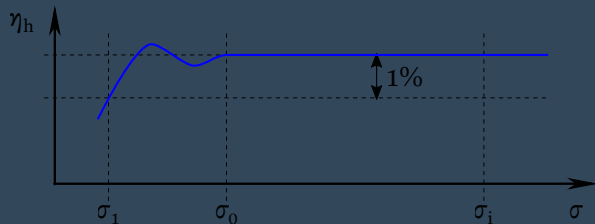
Símbolo	Definição
e (J/kg)	Energia específica — energia hidráulica por unidade de massa da água
E (J/kg)	Energia hidráulica específica da máquina $E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + (z_1 - z_2)g, \text{ com } \bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$
E_0 (J/kg)	Energia hidráulica específica da bomba estrangulada na alta pressão
E_s (J/kg)	Energia potencial específica de sucção da máquina $E_s = g(z_r - z_2')$
$NPSE$ (J/kg)	<i>Net pos. suction sp. energy</i> : energia específica de sucção positiva líquida $NPSE = \frac{p_{abs2} - p_{va}}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} - g(z_r - z_2)$

Termos de Energia Específica (Cont.)

Símbolo	Definição
σ (–)	Número de Thoma, indicativo das condições de operação quanto à cavitação, $\sigma = NPSE/E$
σ_{nD} (–)	Coeficiente de cavitação, $\sigma_{nD} = NPSE/(n^2 D^2)$
σ_0 (–)	Número de Thoma zero, incipiente da redução de performance
σ_1 (–)	Número de Thoma um, de 1% de redução de performance
σ_i (–)	Número de Thoma incipiente, de visível cavitação em rotor
σ_{pl} (–)	Número de Thoma da planta, nas condições de operação do protótipo
E_L (J/kg)	Perda de energia hidráulica específica, entre quaisquer duas seções



autoria própria



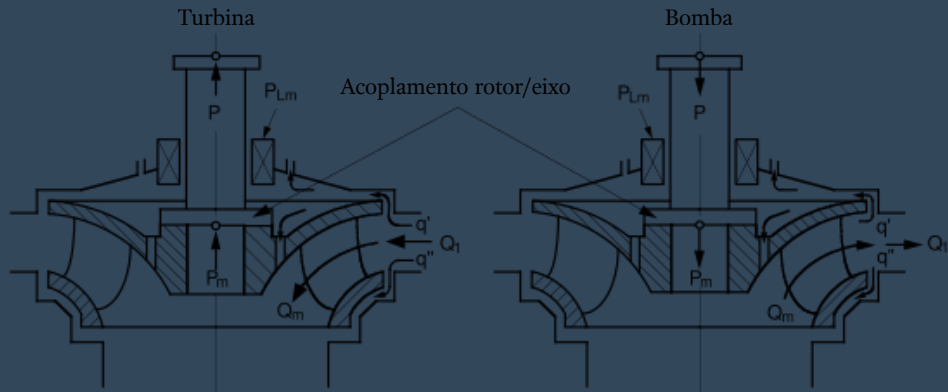
autoria própria

Termos de Elevações e Quedas

Símbolo	Definição
h (m)	Queda ou carga: energia por unidade de peso em qualquer seção, $h = e/g$
H (m)	Queda da turbina ou carga da bomba, $H = E/g$
H_0 (m)	Carga da bomba em condição de estrangulamento, $H_0 = E_0/g$
Z_s (m)	Altura de sucção da bomba, $Z_s = E_s/g$
$NPSH$ (m)	<i>Net pos. suction head</i> queda de sucção positiva líquida $NPSH = \frac{p_{abs2} - p_{va}}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} - (z_r - z_2)$
z_r (m)	Nível de referência (elevação do ponto de referência) da máquina

Termos de Potência e Torque

Símbolo	Definição
P_h (W)	Potência hidráulica disponível (turb.) ou fornecida (bombas) na/à água $P_h = E(\rho Q_1)$
P (W)	Potência mecânica entregue pela (turb.) ou à (bombas) máquina
P_m (W)	Potência mecânica do rotor
P_{Lm} (W)	Perda de potência mecânica, devido a vedações e mancais $P = P_m - P_{Lm}$ (turb.) ou $P = P_m + P_{Lm}$ (bombas)
P_0 (W)	Potência da bomba em condição de estrangulamento
T (N·m)	Torque de eixo correspondente à potência mecânica
T_m (N·m)	Torque de rotor correspondente à potência mecânica de rotor
T_{Lm} (N·m)	Torque de atrito, devido a vedações e mancais

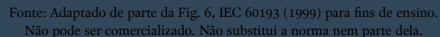


$$q = q' + q''$$

$$Q_1 = Q_m + q$$

$$P_h = E(\rho Q)_1$$

$$P = P_m - P_{Lm}$$



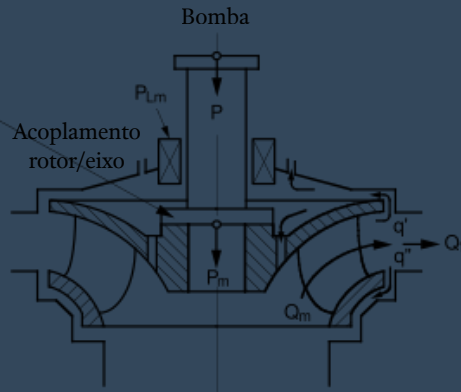
Para bombas:

$$q = q' + q''$$

$$Q_1 = Q_m - q$$

$$P_h = E(\rho Q)_1$$

$$P = P_m + P_{Lm}$$



Fonte: Adaptado de parte da Fig. 6, IEC 60193 (1999) para fins de ensino.
Não pode ser comercializado. Não substitui a norma nem parte dela.

Termos de Eficiência

Símbolo	Definição
η_h (—)	Eficiência hidráulica, da transformação hidráulica \leftrightarrow mecânica Turbinas: $\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$. Bombas: $\eta_h = \frac{P_h}{P_m}$.
η_m (—)	Eficiência mecânica, com base em torques de saída \leftrightarrow entrada Turbinas: $\eta_m = \frac{P}{P_m}$. Bombas: $\eta_m = \frac{P_m}{P}$.
η (—)	Eficiência, da composição $\eta = \eta_h \cdot \eta_m$.
η_w (—)	Eficiência média ponderada $\eta_w = \frac{w_1\eta_1 + w_2\eta_2 + w_3\eta_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots}$

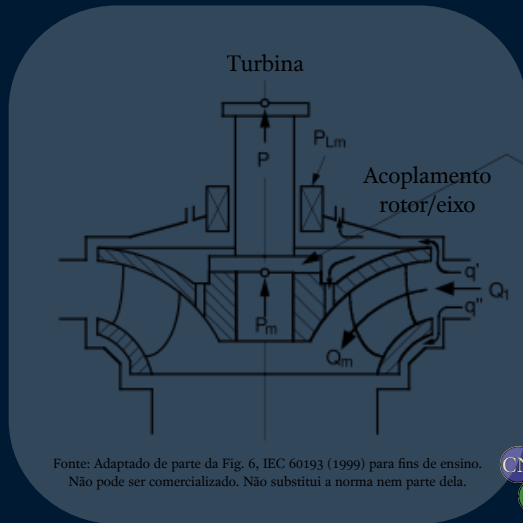
Termos de Eficiência (Cont.)

Para turbinas:

$$\eta_v = \frac{Q_m}{Q_1}$$

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h}$$

$$\eta = \frac{P}{P_h}$$



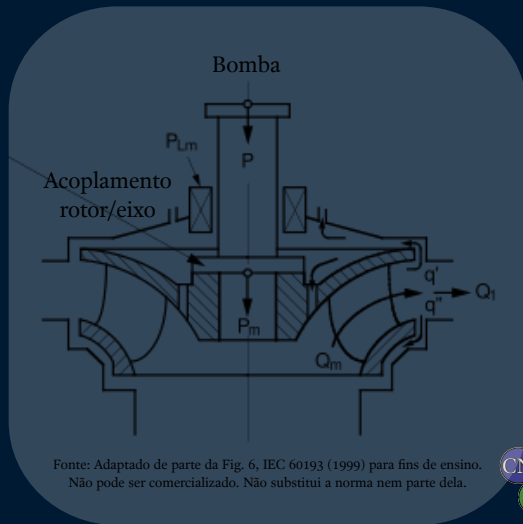
Termos de Eficiência (Cont.)

Para bombas:

$$\eta_v = \frac{Q_1}{Q_m}$$

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m}$$

$$\eta = \frac{P_h}{P}$$



Termos de Escala e Grupos Adimensionais em Fluidodinâmica

Símbolo Definição

Re (—) Número de Reynolds, razão entre forças de inércia e viscosas

$$Re = \frac{Du}{\nu}$$

Fr (—) Número de Froude, raiz da razão entre forças de inércia e gravitacionais

$$Fr = \sqrt{\frac{E}{gD}}$$

We (—) Número de Weber, razão entre forças de inércia e superficiais

$$We = \sqrt{\frac{\rho L v^2}{\sigma^*}}$$

Eu (—) Número de Euler, razão entre forças de inércia e de pressão

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$$

Fatores Adimensionais

Símbolo Definição

n_{ED} (—) *Speed factor* ou Fator de velocidade

$$n_{ED} = \frac{nD}{E^{0,5}} = \frac{1}{E_{nD}^{0,5}}$$

Q_{ED} (—) *Discharge factor* ou Fator de vazão (ou descarga)

$$Q_{ED} = \frac{Q_1}{D^2 E^{0,5}} = \frac{Q_{nD}}{E_{nD}^{0,5}}$$

T_{ED} (—) *Torque factor* ou Fator de torque

$$T_{ED} = \frac{T_m}{\rho_1 D^3 E} = \frac{T_{nD}}{E_{nD}}$$

P_{ED} (—) *Power factor* ou Fator de potência

$$P_{ED} = \frac{P_m}{\rho_1 D^2 E^{1,5}} = \frac{P_{nD}}{E_{nD}^{1,5}}$$



Coefficientes Adimensionais





Símbolo	Definição
E_{nD} (—)	<i>Energy coefficient</i> ou Coeficiente de energia $E_{nD} = \frac{E}{n^2 D^2}$
Q_{nD} (—)	<i>Discharge coefficient</i> ou Coeficiente de vazão (ou descarga) $Q_{nD} = \frac{Q_1}{n D^3}$
T_{nD} (—)	<i>Torque coefficient</i> ou Coeficiente de torque $T_{nD} = \frac{T_m}{\rho_1 n^2 D^5}$
P_{nD} (—)	<i>Power coefficient</i> ou Coeficiente de potência $P_{nD} = \frac{P_m}{\rho_1 n^3 D^5}$

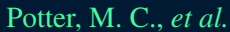
Coefficients and Dimensional Numbers

Símbolo	Definição
σ_{nD} (—)	<i>Cavitation coefficient</i> ou Coeficiente de cavitação $\sigma_{nD} = \frac{NPSE}{n^2 D^2} = \sigma E_{nD} = \frac{\sigma}{n_{ED}^2}$
N_{QE} (—)	<i>Specific speed</i> ou Velocidade específica $N_{QE} = \frac{n Q^{0,5}}{E^{0,75}} = n_{ED} Q_{ED}^{0,5}$

Referências

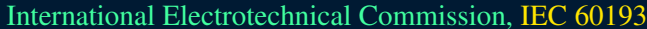
-  Potter, M. C., *et al.*
Mecânica dos Fluidos. **Seção 12-1**.
Cengage. São Paulo. ISBN 978-85-221-1568-6.
-  International Electrotechnical Commission, **IEC 60193**
Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests.
International Standard. 2019. webstore.iec.ch/publication/60951.





Mecânica dos Fluidos. Seção 12-1.

Cengage. São Paulo. ISBN 978-85-221-1568-6.



Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests.



Photo by mali maeder from Pexels

www.pexels.com/photo/environment-forest-grass-leaves-142497