

# B.01.01 – Máquinas Hidráulicas de Fluxo

## Normas e Grandezas Básicas

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



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

Compiled on 2021-01-28 20h26m36s UTC

## 1 Normas em Máquinas de Fluxo

- Definições – IEC 60193

## 2 Referências



# 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**.

# 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**;

# 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**;
- com **potência unitária**  $> 5 \text{ MW}$ , ou
- com **diâmetro**  $> 3 \text{ m}$ ;







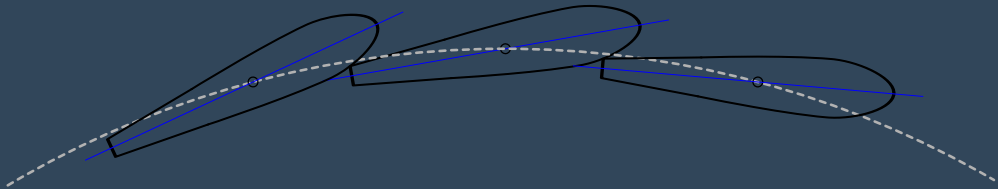
# Subscritos e Símbolos Pertinentes

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 <b>protótipo</b> , em tamanho real
$M$	Referente ao <b>modelo</b> em escala reduzida
ref	Valores em condição de referência especificada
amb	Valores referentes ao ambiente
pl	Valores da planta
$R$	Referente à condição de <b>disparo</b> (runaway)

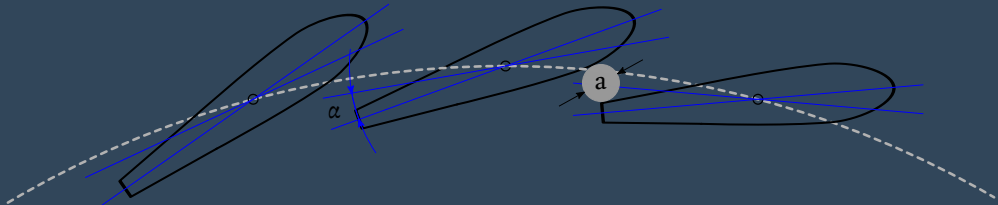


# Termos Geométricos

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,  $\alpha$ .



autoria própria

# Quantidades e Propriedades Físicas

Símbolo	Definição
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração devido à gravidade
$\Theta$ (K)	Temperatura termodinâmica
$\theta$ (°C)	Temperatura em Celsius, $\theta = \Theta - 273,15$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	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)
$\mu$ (Pa·s)	Viscosidade dinâmica
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Viscosidade cinemática, ou difusividade do movimento, $\nu = \mu/\rho$
$\sigma^*$ (J/m <sup>2</sup> )	Tensão superficial

# Termos de Vazão e Velocidade

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

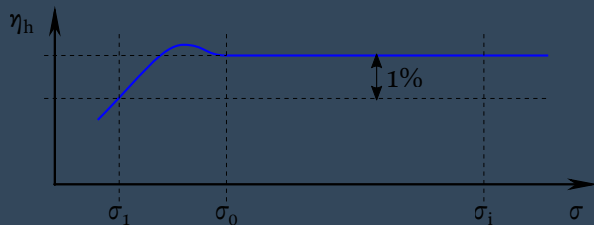
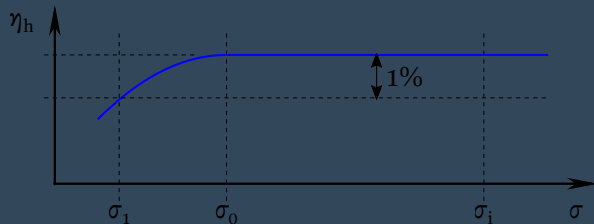
Símbolo	Definição
$p_{abs}$ (Pa)	Pressão absoluta — pressão estática de um fluido em relação ao vácuo
$p_{amb}$ (Pa)	Pressão ambiente — pressão absoluta do ar ambiente
$p$ (Pa)	Pressão manométrica, $p = p_{abs} - p_{amb}$ , no nível de referência da medição.

# Termos de Energia Específica

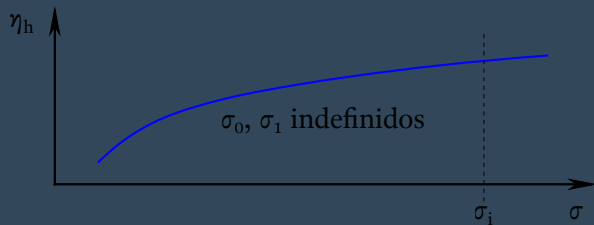
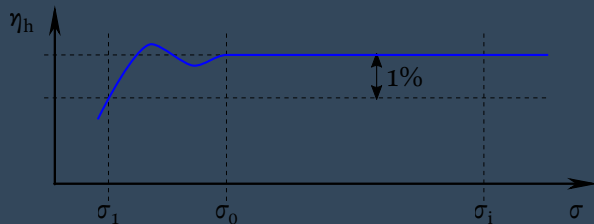
Símbolo	Definição
$e$ (J/kg)	Energia específica — energia hidráulica por unidade de massa da água
$E$ (J/kg)	Energia hidráulica específica da máquina $E = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\bar{\rho}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + (z_1 - z_2)g, \text{ com } \bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$
$E_0$ (J/kg)	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
$\sigma$ (–)	Número de Thoma, indicativo das condições de operação quanto à cavitação, $\sigma = NPSE/E$
$\sigma_{nD}$ (–)	Coeficiente de cavitação, $\sigma_{nD} = NPSE/(n^2 D^2)$
$\sigma_0$ (–)	Número de Thoma zero, incipiente da redução de performance
$\sigma_1$ (–)	Número de Thoma um, de 1% de redução de performance
$\sigma_i$ (–)	Número de Thoma incipiente, de visível cavitação em rotor
$\sigma_{pl}$ (–)	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
$z_r$ (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





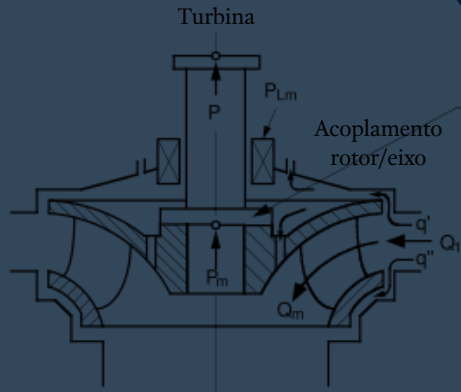
Para turbinas:

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

$$Q_1 = Q_m + q$$

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

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



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.

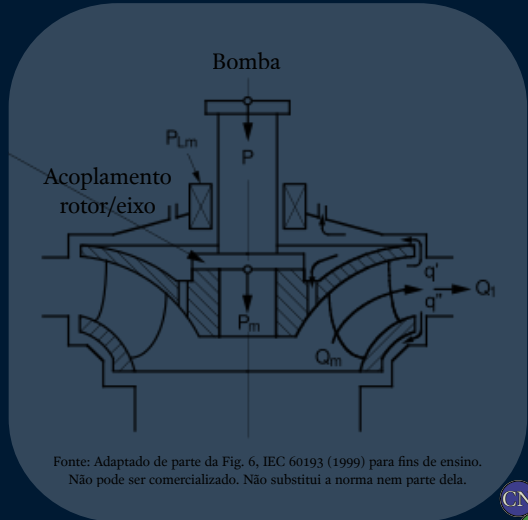
Para bombas:

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

$$Q_1 = Q_m - q$$

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

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



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

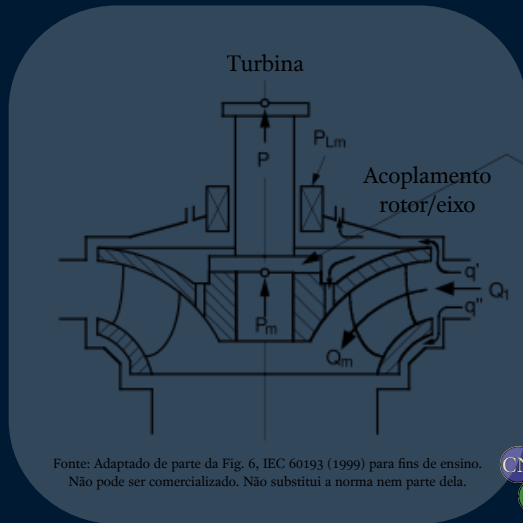
# Termos de Eficiência (Cont.)

Para turbinas:

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

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

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



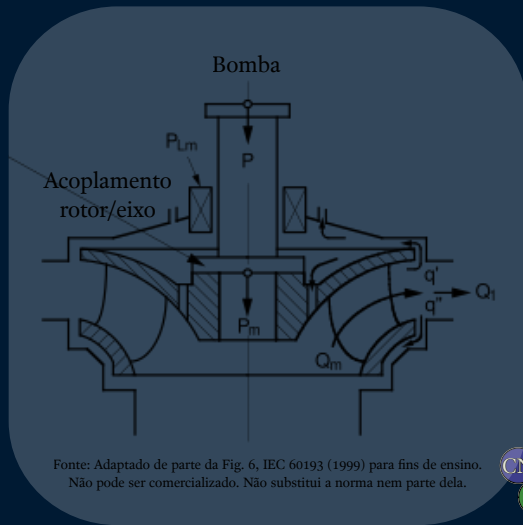
## Termos de Eficiência (Cont.)

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

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

# Coefficients and Dimensional Numbers

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 $P_{nD} = \frac{P_m}{\rho_1 n^3 D^5}$





*Mecânica dos Fluidos. Seção 12-1.*

### *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](https://www.pexels.com/photo/environment-forest-grass-leaves-142497)