

**3ª EXPERIÊNCIA - ESTUDO DAS BOMBAS
APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL
E DA TEORIA DA SEMELHANÇA**

**1 – INTRODUÇÃO AO ESTUDO DAS MÁQUINAS DE FLUXO
(BOMBAS, TURBINAS, COMPRESSORES, VENTILADORES)**

As máquinas que fornecem ou extraem energia de um fluído de modo contínuo, sob a forma de um conjugado de um eixo rotativo, são denominados máquinas de fluxo.

As máquinas de fluxo podem ser classificadas segundo vários critérios. Citamos dois:

- a) Conforme o sentido da transformação de energia.
 - a1) O fluído cede energia à máquina, que transforma esta energia em trabalho mecânico.
Ex.: turbinas, moinhos de vento, etc
 - a2) A máquina cede energia ao fluído, resultando um aumento de energia do fluído.
Ex.: bombas, ventiladores, compressores, etc.

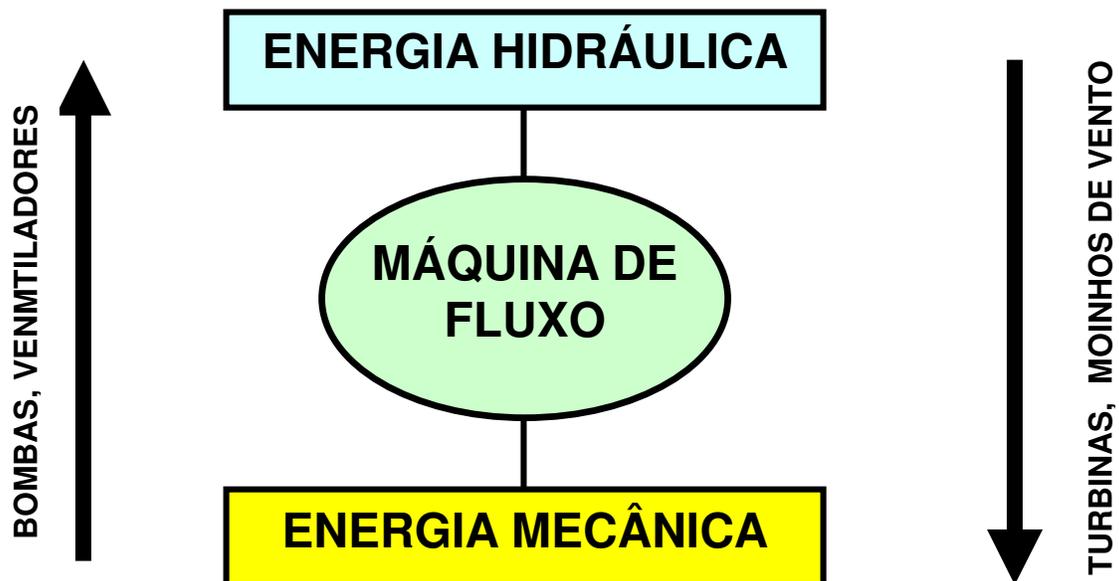


Fig.1- Esquema de operação das máquinas de fluxo, conforme o sentido da transformação da energia.

b) Conforme direção do escoamento (fig. 2)

b1) **RADIAIS**: o escoamento é predominantemente radial
Ex.: bombas centrífugas

b2) **MISTAS**: o escoamento é dito diagonal, isto é, parte axial e parte radial.
Ex.: turbina Francis.

b3) **AXIAIS**: o escoamento é axial.
Ex.: ventiladores axiais, hélices.

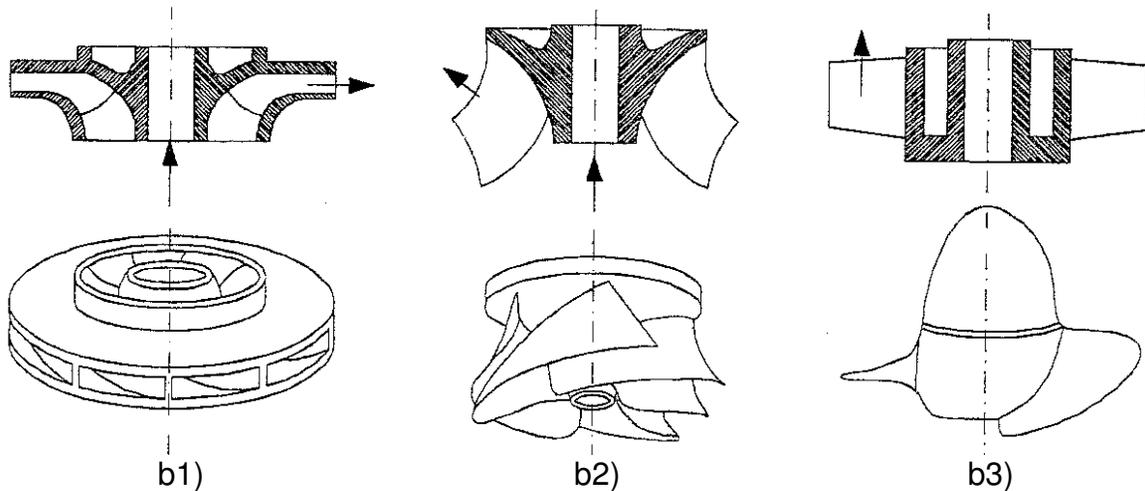


Fig. 2- Classificação das Máquinas de Fluxo, segundo a direção do escoamento.

2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

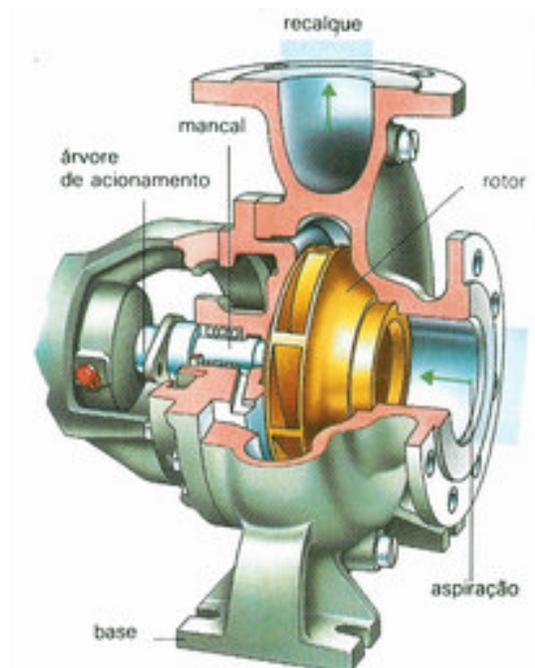


Fig. 3- Princípio de funcionamento de uma bomba centrífuga radial

3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Algumas das grandezas que intervêm no fenômeno de escoamento de um fluido, através de uma turbo-máquina, são:

ρ	massa específica do fluido
μ	viscosidade dinâmica do fluido
D	diâmetro do rotor da turbo-máquina
N	rotação do rotor
Q	vazão em volume
c	velocidade do som nas condições de operação
$E = g H_m$	energia por unidade de massa fornecida ou retirada do fluido
W	potência consumida ou desenvolvida pela turbo-máquina.

Pode-se então escrever a função representativa do fenômeno:

$$f(\rho, \mu, D, N, E, W, Q, c) = 0$$

Através do Teorema dos “ Π ” de Buckingham a função pode ser simplificada para :

$$\left(\frac{gH_m}{N^2 D^2}, \frac{Q}{ND^3}, \frac{W}{\rho N^3 D^5}, \frac{\rho ND^2}{\mu}, \frac{ND}{C} \right) = 0$$

Onde :

$$\pi_1 = \frac{gH_m}{N^2 D^2} = C_H \quad - \quad \text{coeficiente manométrico}$$

$$\pi_2 = \frac{Q}{ND^3} = C_Q \quad - \quad \text{coeficiente de vazão}$$

$$\pi_3 = \frac{W}{\rho N^3 D^5} = C_W \quad - \quad \text{coeficiente de potência}$$

$$\pi_4 = \frac{\rho ND^2}{\mu} = R \quad - \quad \text{número de Reynolds}$$

$$\pi_5 = \frac{ND}{c} = M \quad - \quad \text{número de Mach}$$

Constata-se, porém que no estudo das máquinas de fluxo o emprego da combinação dos adimensionais C_W , C_Q e C_H , isto é, o adimensional π_3 ,

$$\pi_3 = \frac{C_W}{C_Q \cdot C_H} = \eta$$

é mais importante que a utilização de “ C_W ”, uma vez que π_3 caracteriza a eficiência da turbo-máquina. Este adimensional é denominado rendimento (η) e considerada as perdas de potência que ocorrem nas turbo-máquinas.

$$\eta = \frac{C_W}{C_Q C_H} = \frac{W}{\gamma H m Q} \text{ (turbina)} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{\gamma Q H m}{W} \text{ (bomba)}$$

Para máquinas hidráulicas (as que operam com fluídos incompressíveis) tem-se os seguintes fenômenos que irão permitir uma simplificação na análise do escoamento:

- a) As máquinas operam com números de Reynolds elevados (regime turbulento) e suas variações não tem praticamente nenhuma influência nos demais adimensionais,
- b) Devido ao fluído incompressível, a velocidade do som (c) não é um parâmetro relevante na análise do fenômeno.

Portanto para o estudo das máquinas hidráulicas devem ser analisados os seguintes adimensionais C_H , C_Q e η .

Para caracterizar o funcionamento de uma máquina hidráulica são feitos ensaios em laboratório para a obtenção de suas curvas características, isto é, $H_m = f(Q)$ e para caracterizar o funcionamento de uma família de máquinas hidráulicas dinamicamente semelhantes, levantam-se as curvas de $C_H = f(C_Q)$ e $\eta = f(C_Q)$ conforme mostrado na Fig.3.

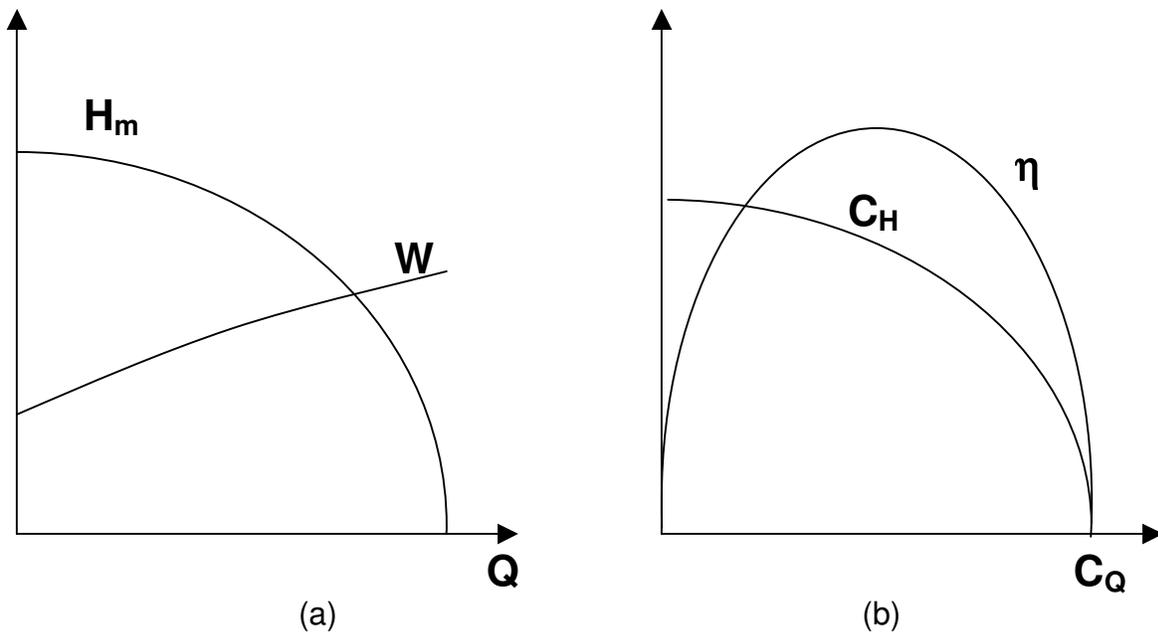


Fig.4 - (a) Curvas características de uma bomba
(b) Curvas de uma família de bombas semelhantes

3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O equipamento (ver fig.4) é constituído por:

1. uma bomba centrífuga operando com rotação constante, $N = \text{Const.}$
2. um manômetro na secção de saída de bomba;
3. um vacuômetro na secção de entrada de bomba;
4. uma balança;
5. uma válvula de três vias;
6. um registro regulador de vazão;
7. um amperímetro
8. um voltímetro

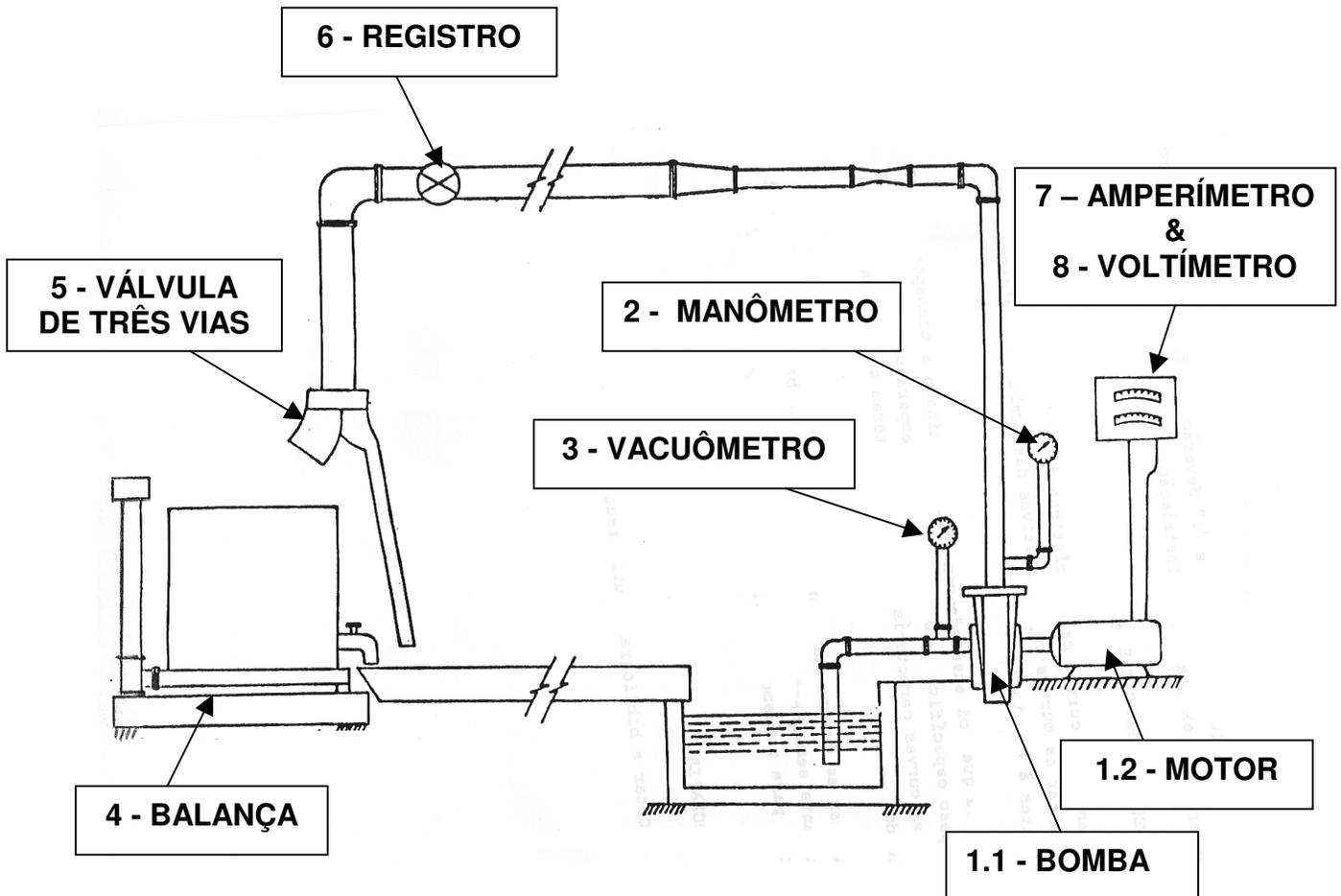


Fig. 5- Esquema da instalação com os equipamentos.



Fig. 6- Instalações no laboratório

A experiência consiste em levantar as curvas características da bomba centrífuga: $H_m = f(Q)$ e $W = f(Q)$ através do seguinte procedimento:

a) Vazão:

Medir cinco valores de vazão pelo método das pesagens, através do registro regulador de vazão (sendo os valores extremos obtidos com o registro totalmente fechado e totalmente aberto).

b) Carga Manométrica

$$H_m = H_s - H_e$$

Onde

$$H_s = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{\alpha_s V_s^2}{2g} + z_s \quad (\text{carga total média na secção de saída da bomba})$$

$$H_e = \frac{P_e}{\gamma} + \frac{\alpha_e V_e^2}{2g} + z_e \quad (\text{carga total média na secção de entrada da bomba})$$

com $\alpha_s = \alpha_e = 1$

Substituindo as equações e os valores de α , temos:

$$H_s - H_e = \frac{P_s}{\gamma} - \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{V_e^2}{2g} + z_s - z_e$$

$$H_m = \frac{P_s}{\gamma} - \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{V_e^2}{2g} + \Delta h$$

Observações:-

- b1) As pressões deverão ser lidas no manômetro e no vacuômetro.
- b2) As velocidades médias serão obtidas a partir dos valores das vazões e dos diâmetros da tubulação de entrada e saída da bomba.
- b3) A diferença de cotas ($\Delta h = z_s - z_e$) será medida na instalação, conforme ANEXO-1.

c) Potência consumida, conforme ANEXO-2

$$W = \sqrt{3} U i \cos \varphi$$

Onde :

U = voltagem de alimentação do motor

i = amperagem da linha

$\cos \varphi$ = fator de potência

As leituras de “U” e “i” deverão ser feitas no voltímetro e amperímetro existentes na instalação.

4 – QUESTÕES PROPOSTAS

- a) Levantar as curvas características da bomba.
- b) Levantar as curvas representativas das bombas dinamicamente semelhantes à ensaiada.
- c) A bomba que foi ensaiada com água é destinada a transportar óleo de peso específico $\gamma = 800 \text{ kgf/m}^3$ à temperatura $\theta = 20^\circ\text{C}$. Traçar as curvas características que se alteram com a mudança de fluido.
- d) Levantar as curvas características de uma bomba (protótipo) dinamicamente semelhante à ensaiada (modelo) com $D_P = 1/3 D_M$ e $N_P = 2N_M$, para o mesmo fluido.

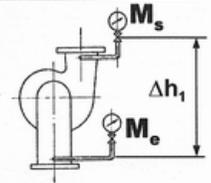
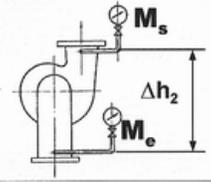
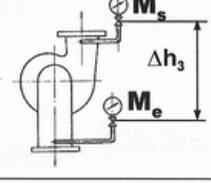
5 - BIBLIOGRAFIA

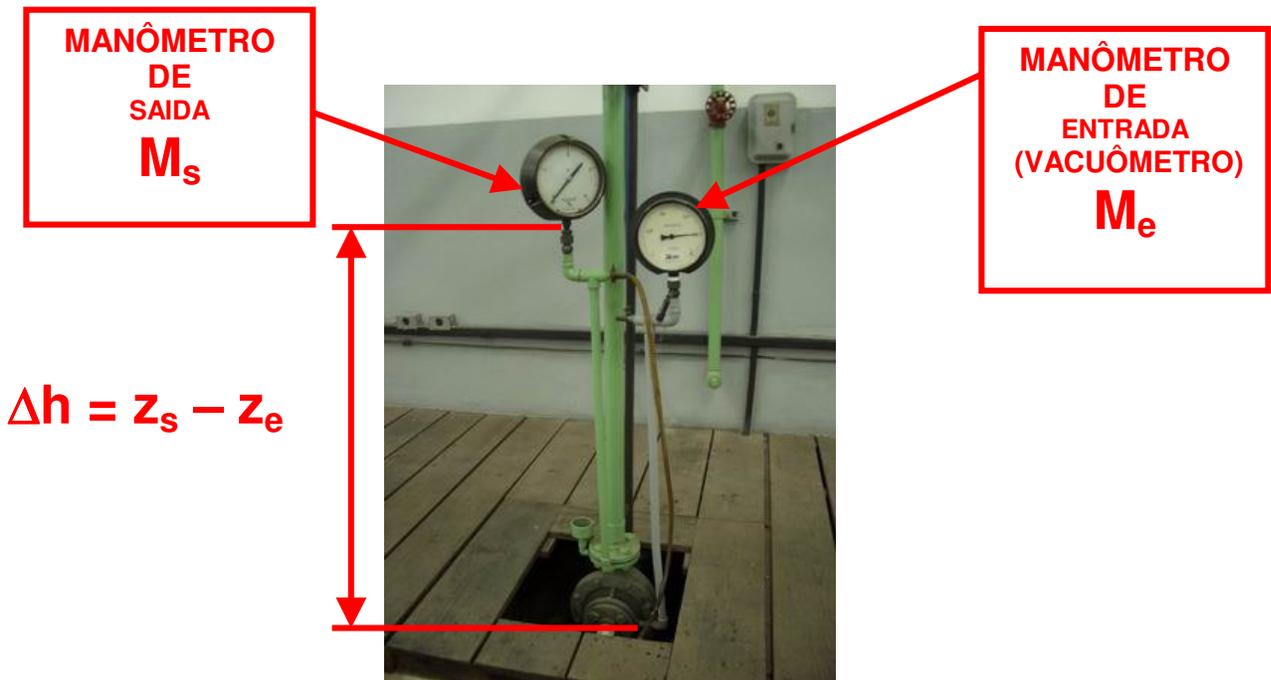
Citar a bibliografia utilizada.

ANEXO 1

(3ª EXPERIÊNCIA - ESTUDO DAS BOMBAS)

MÉTODO GERAL DE MEDIÇÃO DO “ Δh ” (DIFERENÇA DE COTAS $z_s - z_e$) EM FUNÇÃO DO POSICIONAMENTO E DAS RESPECTIVAS INDICAÇÕES EM MANÔMETROS METÁLICOS

MANÔMETRO DE ENTRADA (ASPIRAÇÃO) M_e	MANÔMETRO DE SAÍDA (RECALQUE) M_s	MEDIDA DO Δh A SER CONSIDERADA	ESQUEMA
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	Δh_1	
ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ABAIXO DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	Δh_2	
ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	ACIMA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA	Δh_3	



ANEXO 2

(3ª EXPERIÊNCIA - ESTUDO DAS BOMBAS)

ENSAIO DE BOMBA HIDRAULICA ACIONADA POR MOTOR ELÉTRICO

Na determinação da potência fornecida ao eixo de acionamento de uma bomba por um motor elétrico é necessário medir as grandezas elétricas envolvidas e conhecer a curva para o rendimento do motor.

Apresenta-se a seguir alguns conceitos envolvidos e um roteiro para cálculo dessa potência no eixo, denominada Potência útil ($P_{\text{útil}}$), considerando-se conhecidas as curvas características para o motor elétrico [Fator de Potência ($\cos \varphi$), Rendimento (η)].

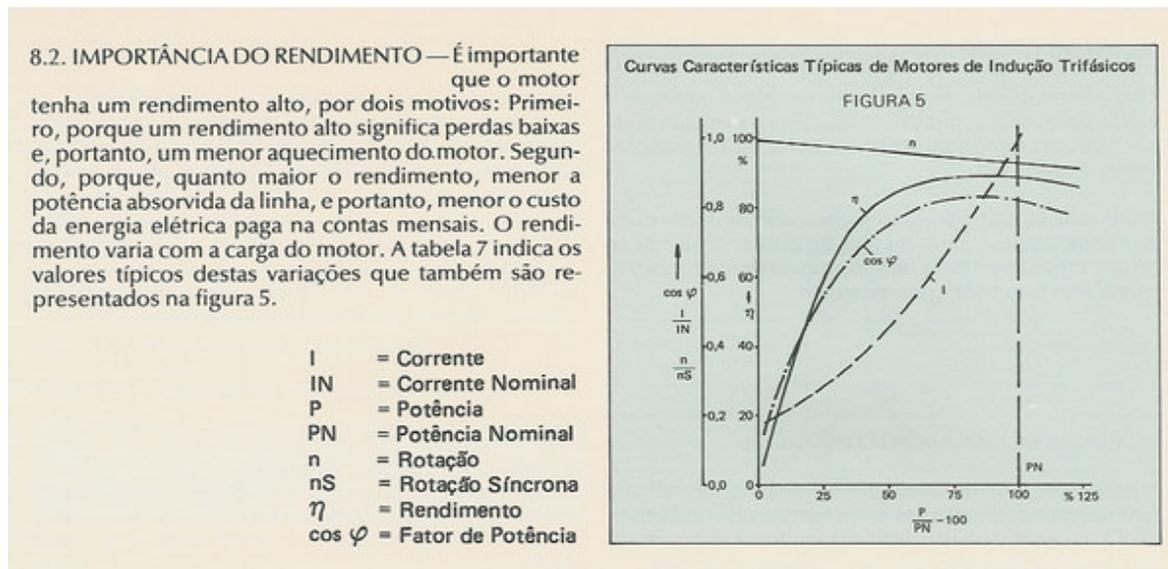


Fig. 1- Curvas características típicas de motores elétricos de indução trifásicos
(Ref. : “Manual de Motores Elétricos WEG”)

Descrição abreviada sobre as Potências Elétricas envolvidas:

Potência Ativa (P_{ativa}):

- Aquela que é convertida em trabalho mecânico
- Determinada através do watímetro (**kW**)

Potência Reativa ($P_{reativa}$):

- Utilizada para produzir campos magnéticos (não produz trabalho)

Potência Aparente ($P_{aparente}$):

- Resulta da soma vetorial das potências ativa e reativa.
- Determinada através das leituras de um Amperímetro e de voltímetro (**kVA**)
- Circuitos Monofásicos: $P_{aparente} = U \cdot i$
- Circuitos Trifásicos: $P_{aparente} = U \cdot i \cdot \sqrt{3}$

Fator de Potência (**cos ϕ**):

- Determinado pela relação entre potência ativa e potência aparente: **cos ϕ = $P_{ativa} / P_{aparente}$**

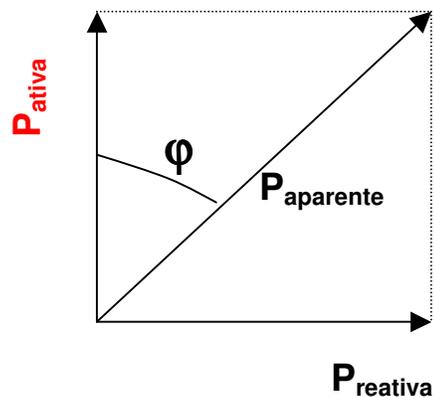


Fig.2- Fator de potência

Rendimento do motor elétrico:

- Rendimento = $P_{útil} / P_{ativa}$

Roteiro de cálculo para o relatório de bombas:

1) medidas elétricas:

U = Tensão elétrica

i = Corrente elétrica

P_{ativa} = Potência medida com o watímetro

2) Cálculo da Potência Aparente:

$$P_{\text{aparente}} = U \cdot i \cdot \sqrt{3}$$

3) Cálculo do Fator de Potência:

$$\text{Cos } \varphi = P_{\text{ativa}} / P_{\text{aparente}}$$

4) Determinação do Rendimento do motor elétrico utilizando-se o fator de potência (Utilizaremos a seguinte aproximação, conforme Gráfico típico da Fig. 1) :

“Rendimento elétrico é numericamente igual ao fator de potência.”

$$\text{Cos } \varphi = P_{\text{ativa}} / P_{\text{aparente}}$$

$$\eta = \text{Potência medida com o watímetro} / U \cdot i \cdot \sqrt{3}$$

5) Determinação da Potência útil:

$$P_{\text{útil}} = \text{Rendimento elétrico} \times P_{\text{ativa}} = \eta \times P_{\text{ativa}}$$

6) Determinação do Rendimento da Bomba:

$$\eta_b = \text{Rendimento da bomba} = W / P_{\text{útil}}$$

Onde **W** é a potência fornecida ao fluido pela bomba (**W = γ Q H**)

$$\eta_b = \text{Rendimento da bomba} = \gamma Q H / P_{\text{útil}}$$