

7- Bombas Hidráulicas

b1

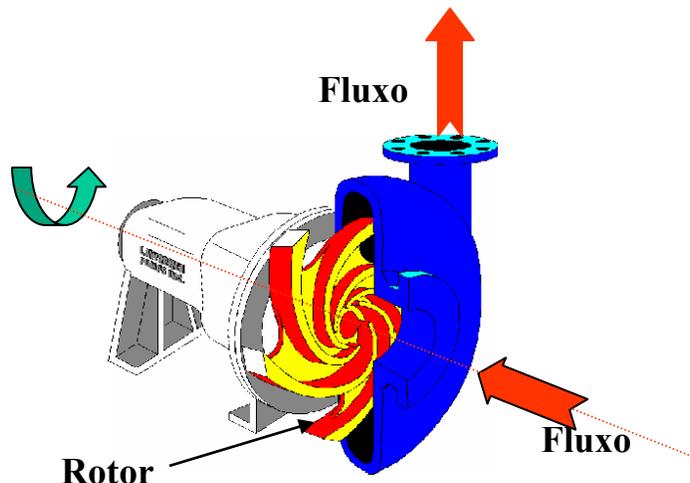
7.1 Introdução - No estudo das máquinas hidráulicas, que foi abordado ao analisarmos o Teorema de Bernoulli, verificamos que existem três tipos de máquinas hidráulicas:

- i) **Máquinas Motrizes:** que transformam energia hidráulica em energia mecânica (turbinas);
- ii) **Máquinas Geratrizes:** que convertem energia mecânica em energia hidráulica (bombas);
- iii) **Máquinas Mistas:** que convertem a forma da energia hidráulica disponível (carneiro hidráulico, ejetores etc).

As bombas hidráulicas são máquinas geratrizes, que transmitem um acréscimo da energia hidráulica ao líquido bombeado. As bombas hidráulicas podem ser classificadas em dois grupos distintos:

- i) **Bombas de deslocamento positivo** (bombas de embolo ou pistão, bombas de diafragma etc);
- ii) **Bombas Rododinâmicas ou Turbobombas** (bombas que apresentam um **rotor** giratório que transmite ao líquido um acréscimo na sua energia cinética e um **difusor** onde a maior parte da energia cinética adquirida é transformada em energia de pressão).

Neste capítulo, estudaremos as **bombas centrífugas**. As bombas centrífugas pertencem à classe de turbobombas na qual o líquido penetra no rotor em sentido paralelo ao eixo de acionamento do mesmo sendo dirigido pelas pás do rotor para a sua periferia, segundo trajetórias normais ao eixo de acionamento.



As primeiras bombas centrífugas foram desenvolvidas por volta de 1600. No entanto, a utilização destas bombas só se tornou comum nos últimos 80 anos. Antes disto, era mais comum o uso de bombas volumétricas.

A maior utilização de bombas centrífugas só se tornou possível devido ao desenvolvimento de motores de combustão interna e elétricos de alta velocidade. As bombas centrífugas são máquinas hidráulicas que exigem velocidades de rotação relativamente altas.

As bombas centrífugas também foram melhoradas, não sendo incomum encontramos, na atualidade, bombas centrífugas de grande capacidade com rendimento próximo de 90% e unidades de menorecapacidade com rendimento maior do que 50%.

7.2 Curvas Características – Antes que um dado modelo de bomba seja destinado ao mercado consumidor, ele é submetido a uma série de ensaios para caracterização do seu desempenho.

Os resultados destes ensaios são apresentados em uma série de curvas (veja b3) que apresentam, para diferentes diâmetros de rotor operando na mesma rotação ou, para diferentes rotações de um mesmo diâmetro de rotor, as seguintes características:

vazão versus altura manométrica total (Hmt -veja b4 e b5)

vazão versus rendimento (veja b6)

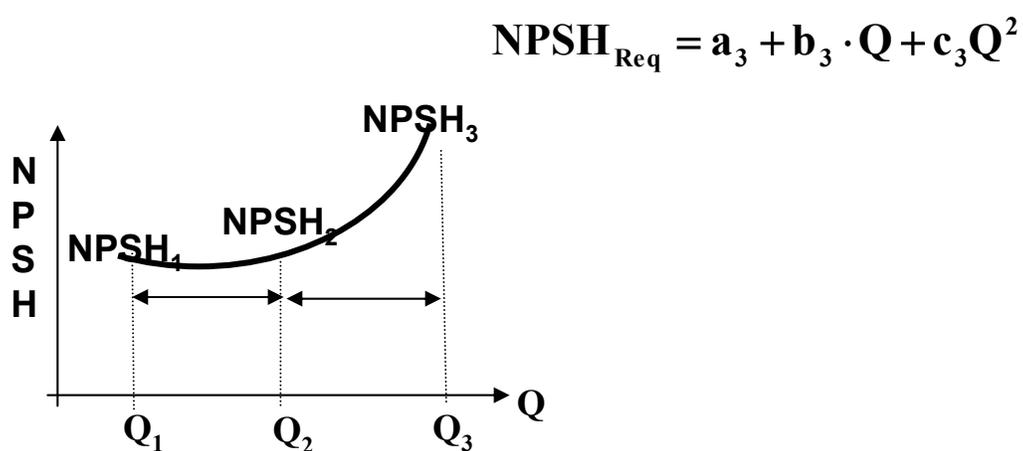
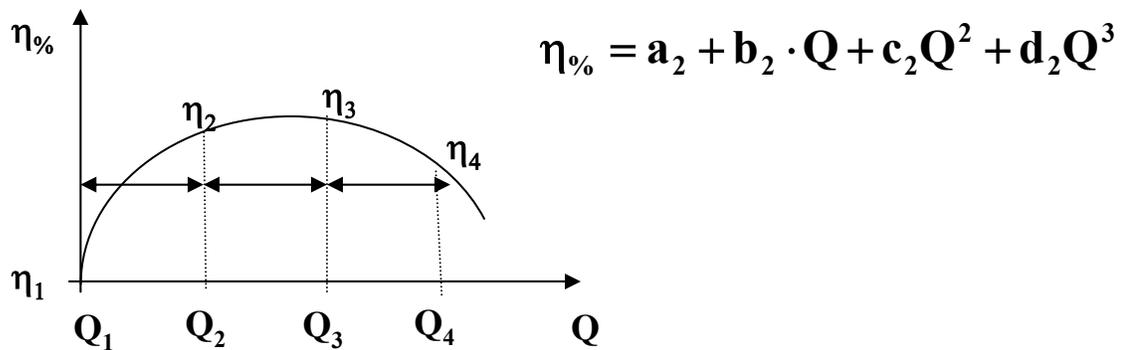
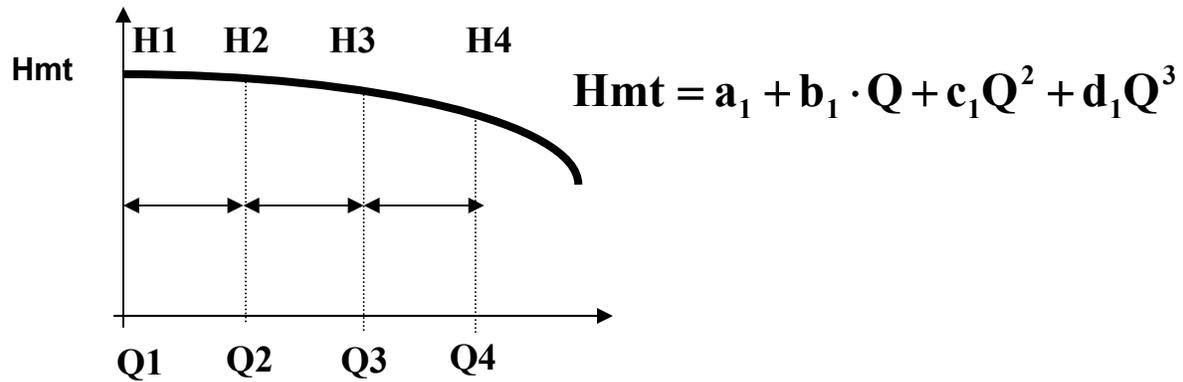
vazão versus potência requerida no eixo de acionamento.

As curvas de desempenho apresentadas pelo fabricante só são válidas quando as condições de NPSH são atendidas, isto é quando:

$$\mathbf{NPSH_{Disp} > NPSH_{Req}}$$

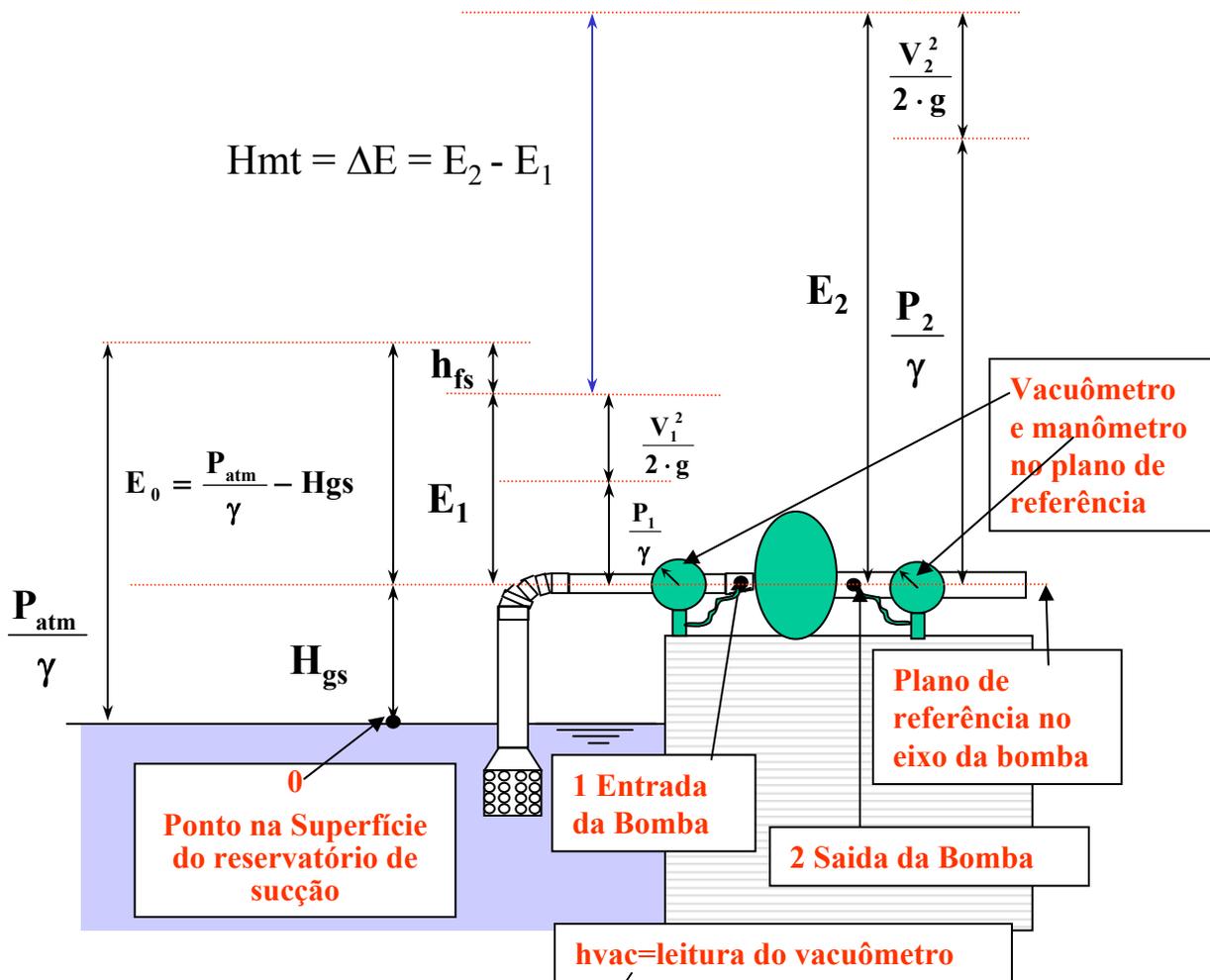
O valor do NPSH Disponível **deve exceder** o valor NPSH Requerido especificado pelo fabricante **em pelo menos 0,6m**. O valor do NPSH Requerido para o bom funcionamento de um dado modelo de bomba, operando com dada vazão, é fornecido pelo fabricante, na curva de vazão versus NPSH Requerido. O cálculo do NPSH Disponível é apresentado em b7.

Curvas de desempenho de Bombas Centrifugas



Altura manométrica total = Hmt
Energia Cedida pela Bomba = ΔE

$$Hmt = \Delta E = E_{\text{saida}} - E_{\text{entrada}} = E_2 - E_1$$



$$E_1 = \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) \quad \text{e} \quad \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - hvac \quad \text{logo,} \quad E_1 = \left(\frac{P_{atm}}{\gamma} - hvac + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right)$$

$$E_2 = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right) \quad \text{e} \quad \frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} + hman \quad \text{logo,} \quad E_2 = \left(\frac{P_{atm}}{\gamma} + hman + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right)$$

$$E_2 - E_1 = \left(\frac{P_{atm}}{\gamma} + hman + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right) - \left(\frac{P_{atm}}{\gamma} - hvac + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) = hman + hvac + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g}$$

Na Equação da Energia cedida pela bomba
 $\Delta E = E_2 - E_1 = \text{HMT} = \text{Altura Manométrica Total}$

$$E_2 - E_1 = \left(\frac{P_{\text{atm}}}{\gamma} + h_{\text{man}} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right) - \left(\frac{P_{\text{atm}}}{\gamma} - h_{\text{vac}} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) = h_{\text{man}} + h_{\text{vac}} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g}$$

Veja b9

Substituindo o valor da leitura do
 vacuômetro (**hvac**):

$$h_{\text{vac}} = H_{\text{gs}} + h_{\text{fs}} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

obtemos

$$E_2 - E_1 = h_{\text{man}} + (H_{\text{gs}} + h_{\text{fs}} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g}) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g}$$

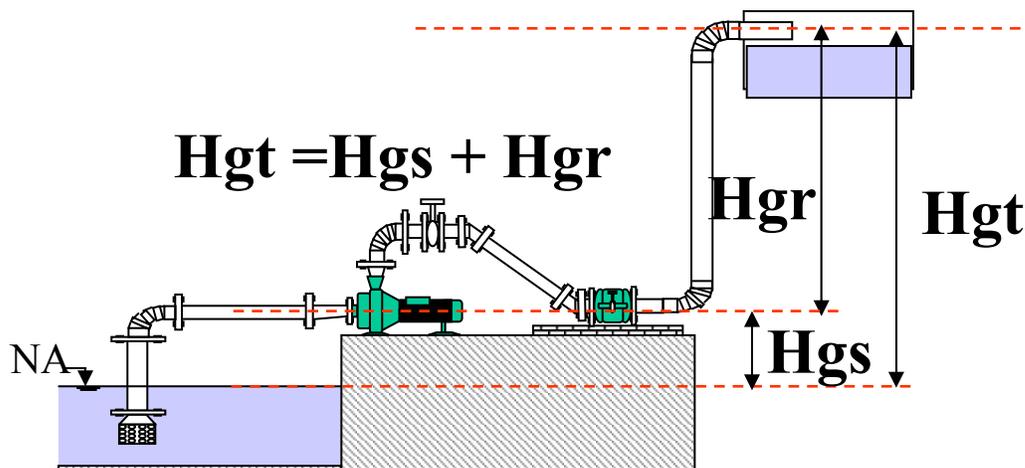
$$E_2 - E_1 = h_{\text{man}} + H_{\text{gs}} + h_{\text{fs}} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

Quando se deseja transportar água entre dois reservatórios, a
 leitura do manômetro (**hman**) será :

$$h_{\text{man}} = H_{\text{gr}} + h_{\text{fr}}$$

h_{fr} = perda de carga na tubulação de recalque (m);

H_{gr} = altura geométrica de recalque (m) = Cota da superfície de água no reservatório que recebe água - Cota do eixo da bomba.



$$\Delta E = E_2 - E_1 = \text{HMT} = H_{\text{gs}} + h_{\text{fs}} + H_{\text{gr}} + h_{\text{fr}} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

Rendimento: η

$$\eta = \frac{\text{Potência Hidráulica}}{\text{Potência no eixo}} = \frac{\text{Pot}_H}{\text{Pot}_E}$$

$$\text{Pot}_H = \Delta E \cdot Q \cdot \gamma$$

$$\text{Pot}_E = \frac{\text{Pot}_H}{\eta} = \frac{\text{Hmt} \cdot Q \cdot \gamma}{\eta}$$

$$\text{Hmt} := 100\text{m} \quad Q := 50 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad Q = 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \gamma := 9806.65 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \quad \eta := 0.65$$

$$\text{Pot} := \frac{100 \cdot \text{m} \cdot 0.014 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 9806.65 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^3}}{0.65} \quad \text{Pot} = 2.112 \times 10^4 \text{W}$$

Unidades utilizadas

$$\text{Pot1} := 1 \cdot \text{W} \quad \text{Pot1} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{CV} := 75 \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}} \quad 1 \cdot \text{CV} = 75 \cdot \text{kgf} \cdot 9.80665 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kgf}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad 75 \cdot \text{kgf} \cdot 9.80665 \cdot \frac{\text{N}}{\text{kgf}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = 735.499 \text{W}$$

$$\text{Pot} := \frac{1000 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 0.014 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 100\text{m}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{75 \frac{\text{s}}{\text{CV}} \cdot 0.65}} \quad \text{Pot} = 28.718 \text{CV}$$

NPSH_{disponível} = E. entrada (E₁) – pressão de vapor (h_v):

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} = h_{\text{atm}} - h_{\text{fs}} - H_{\text{gs}} - h_{\text{v}}$$

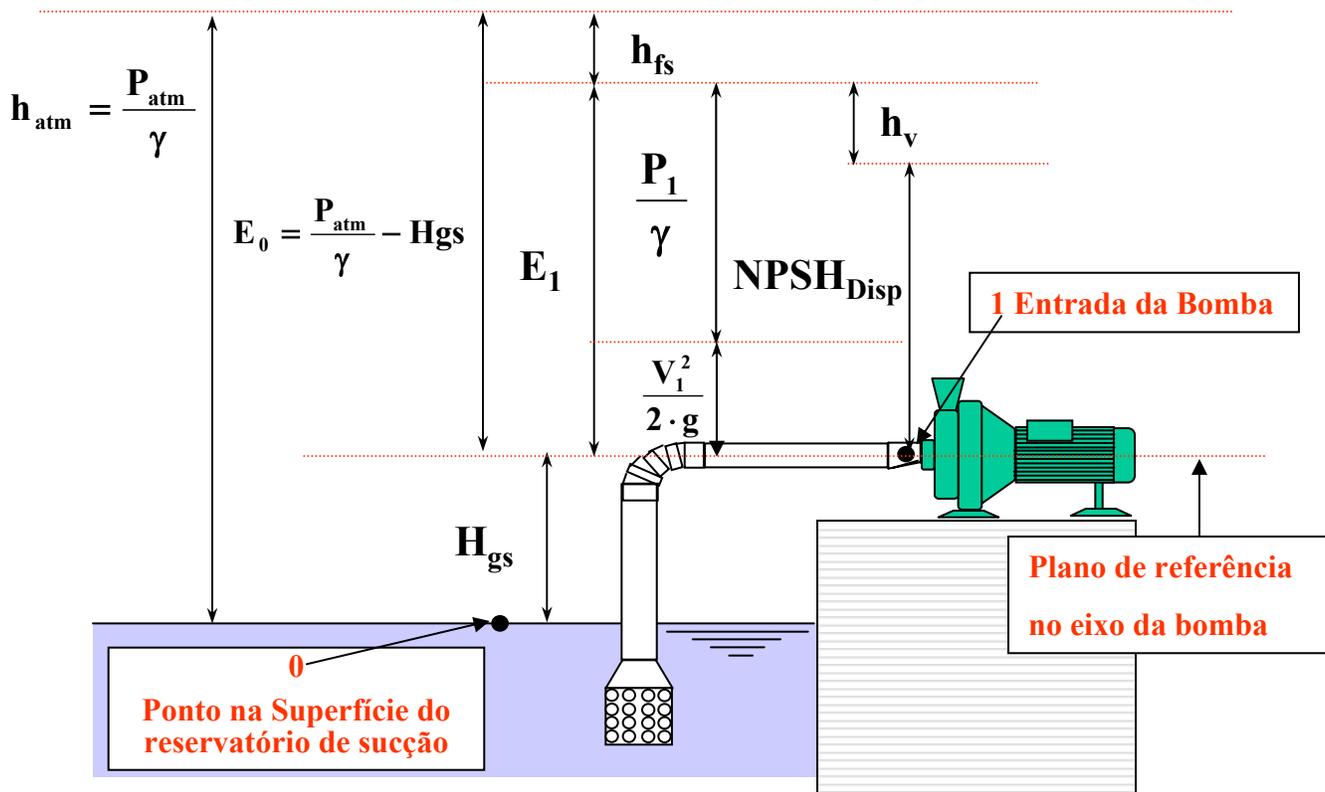
$h_{\text{atm}} = P_{\text{atm}}/\gamma =$ carga hidráulica (m) correspondente à pressão atmosférica (depende da altitude do local);

$$h_{\text{atm}} = 10,33\text{m} - 0,00108 \times (\text{Altitude Local em metros})$$

$h_{\text{fs}} =$ perda de carga na tubulação de sucção (m);

$H_{\text{gs}} =$ altura geométrica de sucção (m) = Cota do eixo da bomba - Cota da superfície da água no reservatório de sucção;

$h_{\text{v}} =$ carga hidráulica (m) correspondente à pressão de vapor do líquido bombeado (valor tabelado em função da temperatura do líquido- veja b8).



O líquido não “Ferve” quando a **pressão absoluta** do meio é maior que a sua **pressão de vapor** (h_v):

$$\frac{P}{\gamma} > h_{\text{v}}$$

Para evitar cavitação : $\text{NPSH}_{\text{Disp}} > \text{NPSH}_{\text{Req}}$

Para fins de cálculo do NPSH disponível, utilizam-se, em função da temperatura da água, os valores de pressão de vapor da água apresentados abaixo. O cálculo da perda de carga deve considerar os comprimentos equivalentes apresentados abaixo.

TEMP °C	Presão de vapor (mca)	Perdas localizadas expressas em diâmetros de canalização retilínea(comp equivalente)	
		Peça	Comp exp em diâmetros (nº de diâmetros)
15	0,17	Ampliação gradual	12
20	0,25	Cotovelo de 90°	45
25	0,33	Cotovelo de 45°	20
30	0,44	Curva de 90°	30
30	0,44	Curva de 45°	15
40	0,76	Entrada normal	17
40	0,76	Entada de borda	35
50	1,26	Junção	30
50	1,26	Redução gradual	6
60	2,03	Registro de gaveta, aberto	8
60	2,03	Registro de Gglobo, aberto	350
70	3,20	Registro de ângulo, aberto	170
70	3,20	Saída de canalização	35
80	4,96	Tê, passagem direita	20
80	4,96	Tê, saída de lado	50
90	7,18	Tê, saída bilateral	65
90	7,18	Válvula-de-pé e crivo	250
100	10,33	Válvula de retenção	100

Algumas curvas de bombas mais antigas, ao invés de apresentarem os valores de NPSH Requerido em função da vazão, apresentam os valores da altura geométrica máxima de sucção (H_{gsm}). A equação abaixo pode ser utilizada para converter os valores de H_{gsm} em NPSH requerido :

$$\text{NPSHreq} = 10 - \text{H}_{\text{gsm}} - \frac{v_s^2}{2g} + 0.5$$

Leitura do vacuômetro (hvac) na altura do eixo da bomba:

$$E_0 = E_1 + h_{fs} \quad (i)$$

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} - H_{gs} = \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) + h_{fs} \quad (i)$$

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} = h_{vac} \quad (ii) \quad \text{de i + ii}$$

$$h_{vac} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} = H_{gs} + h_{fs} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

$$h_{vac} = H_{gs} + h_{fs} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

Energia na entrada da Bomba (E_1):

b9

$$E_0 = E_1 + h_{fs}$$

$$\left(\frac{P_{atm}}{\gamma} - H_{gs} \right) = \left(\frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) + h_{fs}$$

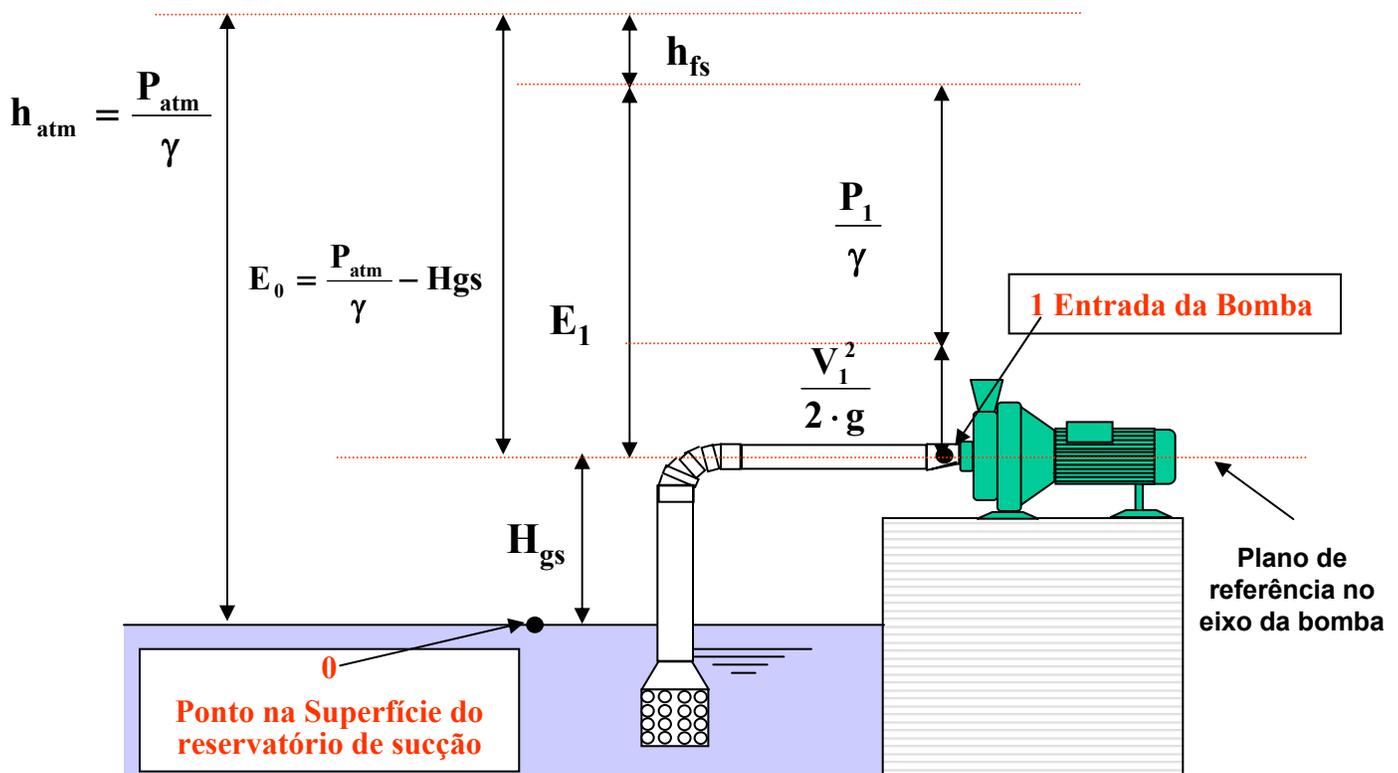
$$E_1 = \left(\frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \right) = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_{gs} - h_{fs}$$

$P_{atm}/\gamma = h_{atm} =$ carga hidráulica (m) correspondente à pressão atmosférica (depende da altitude do local);

$$h_{atm} = 10,33\text{m} - 0,00108 \times (\text{Altitude Local em metros})$$

$h_{fs} =$ perda de carga na tubulação de sucção (m);

$H_{gs} =$ altura geométrica de sucção (m) = Cota do eixo da bomba - Cota da superfície da água no reservatório de sucção.



7.3 Exemplo de uso das curvas características

1. As curvas características de uma bomba instalada em um local com altitude de 1200m são representadas pela equações abaixo.

$$H = 40,0 + 3,70Q - 5Q^2 \quad [\text{mca} ; \text{L/s}]$$

$$\eta = 45,00Q - 15,00Q^2 \quad [\% ; \text{L/s}]$$

$$\text{NPSHr} = 0,10Q^2 \quad [\text{mca} ; \text{L/s}]$$

A máquina deve elevar água entre dois reservatórios abertos que se encontram separados por uma altura estática total de 20m e as perdas de carga nos trechos de sucção e descarga são dadas por:

$$h_f = 1,00Q^2 \quad \text{e} \quad h_d = 5,00Q^2 \quad (\text{mca}, \text{L/s})$$

respectivamente.

- a. Determine a vazão e altura manométrica total do sistema .
- b. Calcule o rendimento e a potência (CV) de acionamento no eixo da bomba na condição de equilíbrio.
- c. Desprezando os termos cinéticos, calcule as leituras de um manômetro e de um vacuômetro, instalados na altura do eixo da bomba que se encontra 3,5m acima do nível de água do reservatório inferior.
- d. Verifique a ocorrência de cavitação no ponto de equilíbrio considerando que a temperatura da água é de 30°C e que a altura geométrica de sucção é 3,5m.
- e. Para as condições do item anterior, isto é na vazão do ponto de equilíbrio, calcule a máxima altura geométrica de sucção de forma a obter $\text{NPSHreq} + 0,6\text{m} = \text{NPSHdisp}$.
- f. Se fosse necessário operar o sistema com vazão de 1.3L/s, qual seria a perda de carga localizada introduzida pelo fechamento de um registro.
- g. Esquematize juntamente com a curva da bomba, as curvas do sistema quando : (i) a bomba opera com o registro inteiramente aberto e (ii) a bomba opera com o registro parcialmente fechado para se obter um a vazão de equilíbrio de 1,3L/s.
- h. Determine o ponto de equilíbrio quando duas bombas iguais a esta bombas operam em paralelo no sistema dado.

1A- No ponto de equilíbrio HMTda bomba = HMT do sistema

$$\text{HMTB}(Q) := 40 + 3.7 \cdot Q - 5Q^2 \quad \text{HMSTS}(Q) = 20 + 1 \cdot Q^2 + 5 \cdot Q^2 \quad \text{HMTS}(Q) := 20 + 6 \cdot Q^2$$

Igualando as duas HMT

$$20 + 6 \cdot Q^2 = 40 + 3.7 \cdot Q - 5 \cdot Q^2$$

$$0 = 20 + 3.7 \cdot Q - 11 \cdot Q^2$$

$$\frac{-3.7 - \sqrt{3.7^2 - 4 \cdot (-11) \cdot (20)}}{2 \cdot (-11)} = 1.527$$

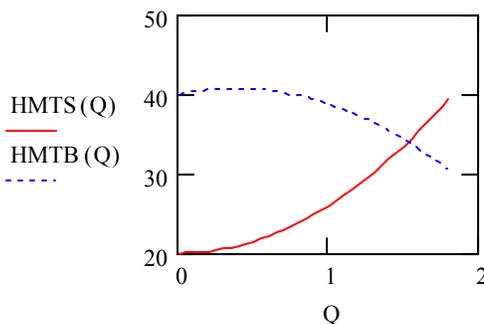
Verifique a resposta :

$$20 + 6 \cdot 1.527^2 = 33.99$$

$$40 + 3.7 \cdot 1.527 - 5 \cdot 1.527^2 = 33.991$$

Resposta Q= 1.527L/s HMT= 34mca

$$Q := 0, 0.05.. 1.8$$



1 B- Rendimento e potência no eixo :

$$\text{Rend}(Q) := 45 \cdot Q - 15 \cdot Q^2$$

$$45 \cdot 1.527 - 15 \cdot 1.527^2 = 33.739$$

Rendimento 33.74%

$$\text{Pot eixo} = \frac{\left(\frac{1.527}{1000}\right) \cdot 33.991 \cdot 1000}{75 \cdot 0.3374} = 2.051$$

CV

resposta 2.051CV

1 C- Leitura do Vacuômetro :
$$h_{vac} = h_{gs} + h_{fs} + \frac{v^2}{2}$$

Se o termo cinético ($v^2/2g$) é desprezado, a leitura do vacuômetro fica:

$$3.5 + 1.0 \cdot (1.527^2) + 0 = 5.832 \quad \text{mca}$$

A leitura do manômetro sera:
$$h_{man} = H_{gr} + h_{fr} - \frac{v^2}{2g}$$

$$(20 - 3.5) + 5 \cdot (1.527^2) = 28.159 \quad \text{mca}$$

note que $28.159 + 5.832 = 33.991$ que é a HMT na vazão considerada,

Resposta: Vacuômetro 5.833mca Manometro 28.159mca

1 D- Verifique cavitação : $h_{atm} := 10.33 - 0.001081200$ $h_{atm} = 9.034$ mca

$h_v := 0.44$ mca Valor tabelado para temperatura de 30 graus

$NPSH_d := 9.034 - 3.5 - 1 \cdot (1.527^2) - 0.44$ $NPSH_d = 2.762$

$NPSH_r := 0.10 \cdot (1.527^2)$ $NPSH_r = 0.233$

resposta Não vai cavitatar porque NPSHd maior que NPSH r

1 E- Cálculo da máxima altura de sucção:

$NPSH_r + 0.6 = 0.10 \cdot Q^2 + 0.5$ $0.10 \cdot (1.527^2) + 0.6 = 0.833$

$0.833 = 9.034 - H_{gs} - 1 \cdot (1.527^2) - 0.43$

$H_{gs} := 9.034 - 0.833 - 1 \cdot (1.527^2) - 0.43$ $H_{gs} = 5.439$

resposta máxima altura de sucção 5.43m

1 F- Perda de carga em um registro para Q = 1.3 L/s

$HMTB(Q) := 40 + 3.7 \cdot Q - 5Q^2$ $40 + 3.7 \cdot 1.3 - 5 \cdot 1.3^2 = 36.36$

$HMSTS(Q) = 20 + 1 \cdot Q^2 + 5 \cdot Q^2$ $HMTS(Q) := 20 + 6 \cdot Q^2$ $20 + 6 \cdot 1.3^2 = 30.14$

$36.36 - 30.14 = 6.22$

Resposta: a perda de carga no registro seria de 6.22m

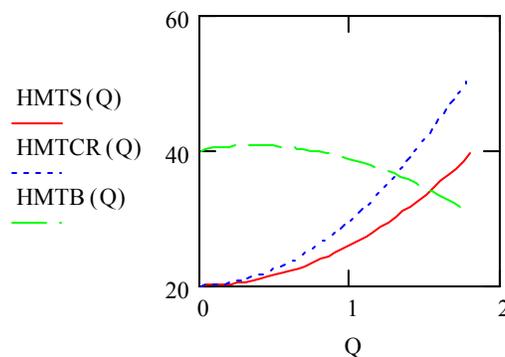
1 G- Curva com registro regulado para equilíbrio em Q= :

$HMTB(Q) := 40 + 3.7 \cdot Q - 5Q^2$ $HMTS(Q) := 20 + 6 \cdot Q^2$

$k := \frac{6.22}{1.3^2}$

$k = 3.68$

$HMTCR(Q) := 20 + 9.68 \cdot Q^2$



1H- No ponto de equilíbrio HMTda bomba = HMT do sistema

$$\text{HMTB}(Q) := 40 + 3.7 \cdot Q - 5 \cdot (Q)^2$$

Agora a vazão de cada bomba é metade da vazão no sistema (Q)

$$\text{HMTBP}(Q) := 40 + 3.7 \cdot \frac{Q}{2} - 5 \left(\frac{Q}{2} \right)^2$$

$$\text{HMTBP}(Q) := 40 + 1.85 \cdot Q - 1.25 \cdot Q^2$$

$$\text{HMSTS}(Q) = 20 + 1 \cdot \left(\frac{Q}{2} \right)^2 + 5 \cdot Q^2$$

$$\text{HMSTS}(Q) := 20 + 5.25 \cdot Q^2$$

Igualando as duas HMT $20 + 5.25 \cdot Q^2 = 40 + 1.85 \cdot Q - 1.25 \cdot Q^2$

$$20 + 1.85 \cdot Q - 6.5 \cdot Q^2 = 0$$

$$\frac{-1.85 - \sqrt{1.85^2 - 4 \cdot (-6.5)(20)}}{2 \cdot (-6.5)} = 1.9022$$

Verifique :

sistema $20 + 5.25 \cdot 1.9022^2 = 38.996$

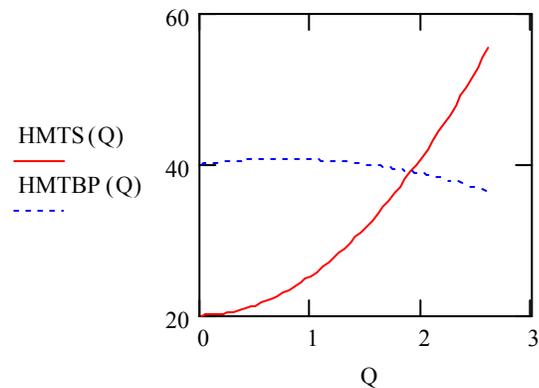
$Q := 0, 0.05.. 2.6$

Bombas paralelo

$$40 + 1.85 \cdot 1.9022 - 1.25 \cdot 1.9022^2 = 38.996$$

Cada bomba

$$40 + 3.7 \cdot \frac{1.9022}{2} - 5 \cdot \left(\frac{1.9022}{2} \right)^2 = 38.996$$



Resposta $Q = 1.9022 \text{L/s}$ $\text{HMT} = 38.996 \text{mca}$

2- Considere uma instalação de bombeamento, em uma altitude de 900m, que opera com água a uma temperatura de 25°C e apresenta as seguintes características:

(a) uma tubulação de sucção, em material com coeficiente C de Hazen-Williams de 130, com diâmetro interno de 200mm, comprimento virtual de 75m e altura geométrica de sucção de 3.5m;

(b) uma tubulação de recalque, em material com coeficiente C de Hazen-Williams de 130, com diâmetro interno de 150mm, comprimento virtual de 1500m e altura geométrica de recalque de 20m;

(c) uma bomba cujas curvas de desempenho, na rotação de 1750rpm, apresentam os valores dados na tabela abaixo.

Q	HMT	Rend	NPSHr
m ³ /s	mca	%	mca
0.000	50.6		
0.006	49.0	40	0.84
0.012	46.5	74	1.32
0.018	42.4	86	1.74
0.024	39.2	85	2.11
0.030	34.2	70	2.44
0.036	29.5	46	2.76
0.042	23.8	8	3.06

Para os valores apresentados, pede-se:

2.a) Plotar em um único gráfico, (i) a curva da bomba (Hmt da bomba em função da vazão), (ii) a curva da tubulação (Hmt versus vazão na tubulação) e (iii) a curva de rendimento da bomba em função da vazão bombeada;

2.b) Plotar, em outro gráfico, a curva da potência (em CV) requerida no eixo de acionamento da bomba. Para plotar este gráfico, assuma que o peso específico do líquido bombeado (γ) é 1000 kgf/m³ e que 1 CV= 75 kgf m/s;

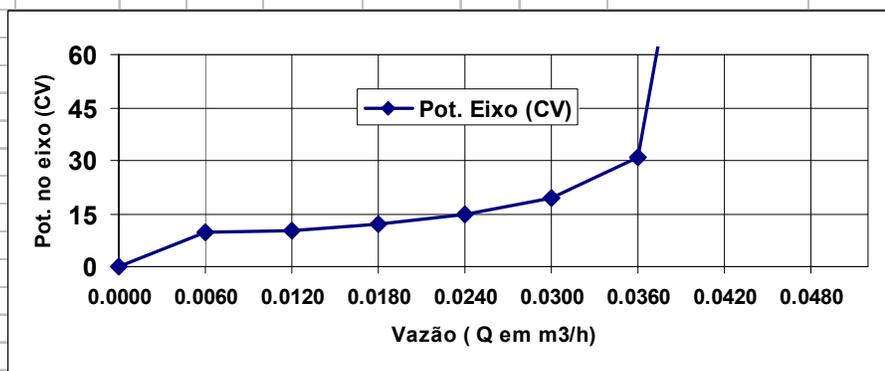
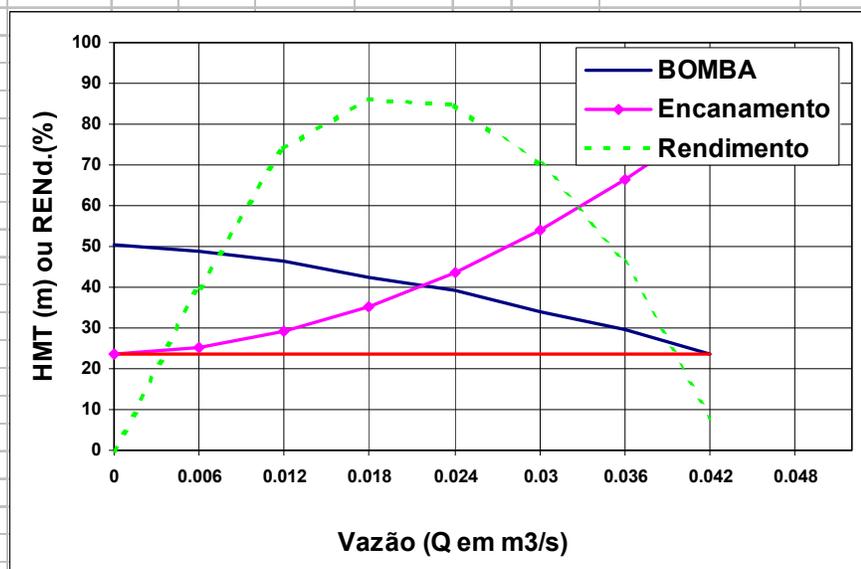
2.c) Plote, em outro gráfico, (i) a curva do NPSH Requerido em função da vazão e (ii) a curva do NPSH Disponível em função da vazão;

2.d) Indique, também, em uma tabela, para as diferentes vazões consideradas, os valores da provável leitura de um vacuômetro instalado na entrada da bomba no mesmo nível do eixo horizontal da bomba;

2.e) Determine o ponto de equilíbrio (Hmt da bomba = Hmt da tubulação) e especifique, para este ponto, o valor da (i) vazão (m³/s), da (ii) altura manométrica total (HMT em mca), do (iii) rendimento da bomba (%), (iv) do NPSH requerido (m) e do NPSH Disponível.

UMA única bomba		
Sucção	CHW	130
	diam	200 mm
	Lvirt	75 m (inclui perdas localizadas)
	HGs	3.5 m
Recalque	CHW	130
	diam	150 mm
	Lvirt	1500 m (inclui perdas localizadas)
	HGR	20 m
HGT=HGS+HGR		

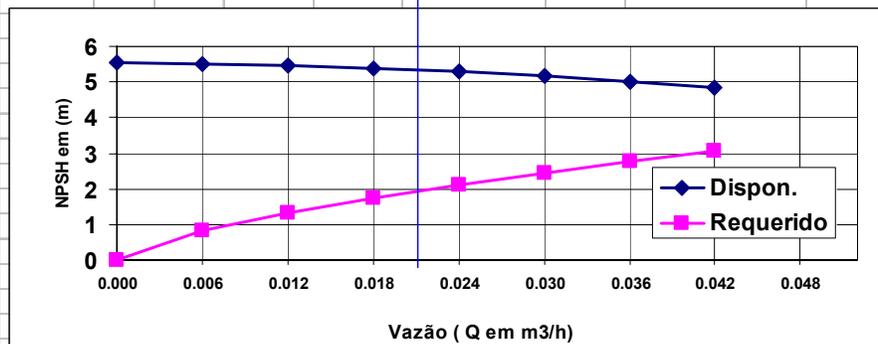
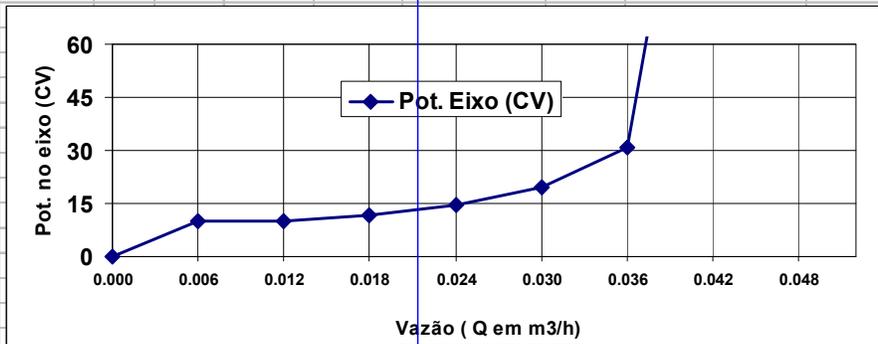
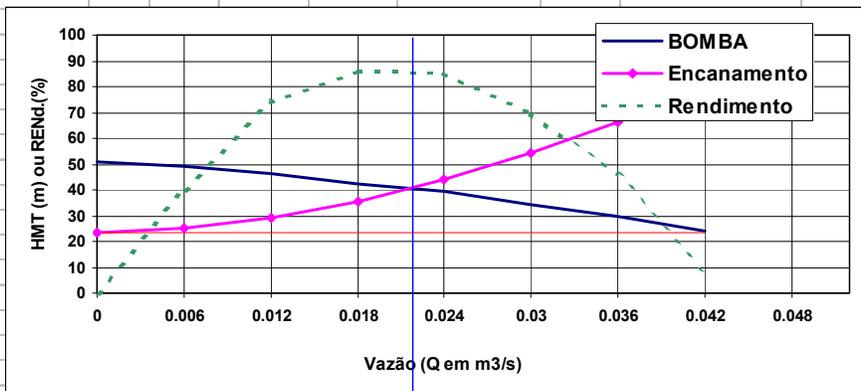
Q m ³ /s	HMT m	Rend %	Vs m/s	Vr m/s	hfs m	hfr m	hfs+hfr+HGT m	Pot Cv
0	50.6		0.00	0.00	0	0	23.50	
0.006	49	40	0.19	0.34	0.02	1.53357	25.05	9.80
0.012	46.5	74	0.38	0.68	0.07	5.5362	29.10	10.05
0.018	42.4	86	0.57	1.02	0.14	11.7309	35.38	11.83
0.024	39.2	85	0.76	1.36	0.25	19.9857	43.73	14.76
0.03	34.2	70	0.95	1.70	0.37	30.2132	54.09	19.54
0.036	29.5	46	1.15	2.04	0.52	42.3487	66.37	30.78
0.042	23.8	8	1.34	2.38	0.69	56.3411	80.54	166.60



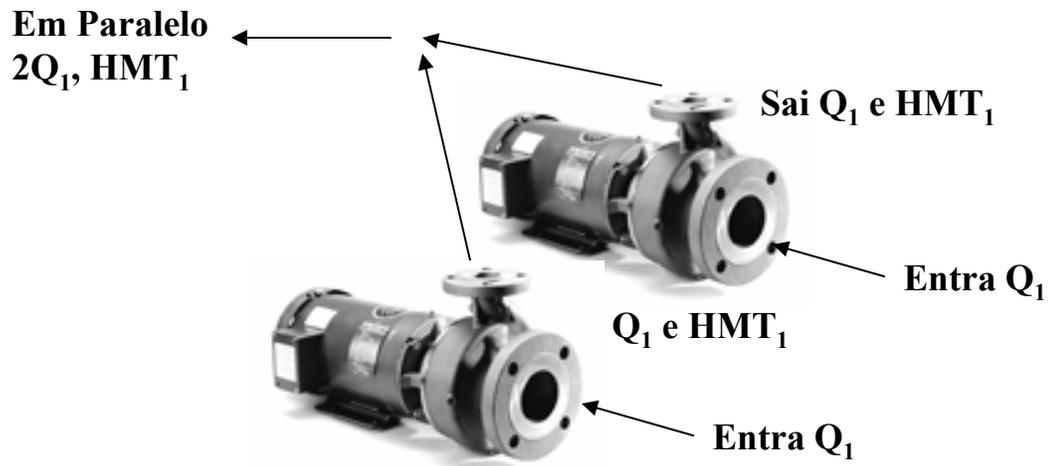
UMA única bomba

Altitude local :	900 m	Patm/γ :	9.358 m
Rotação da bomba :	1750 rpm	HGS:	3.5 m
Temp água :	25 °C	h _v =	0.33 m

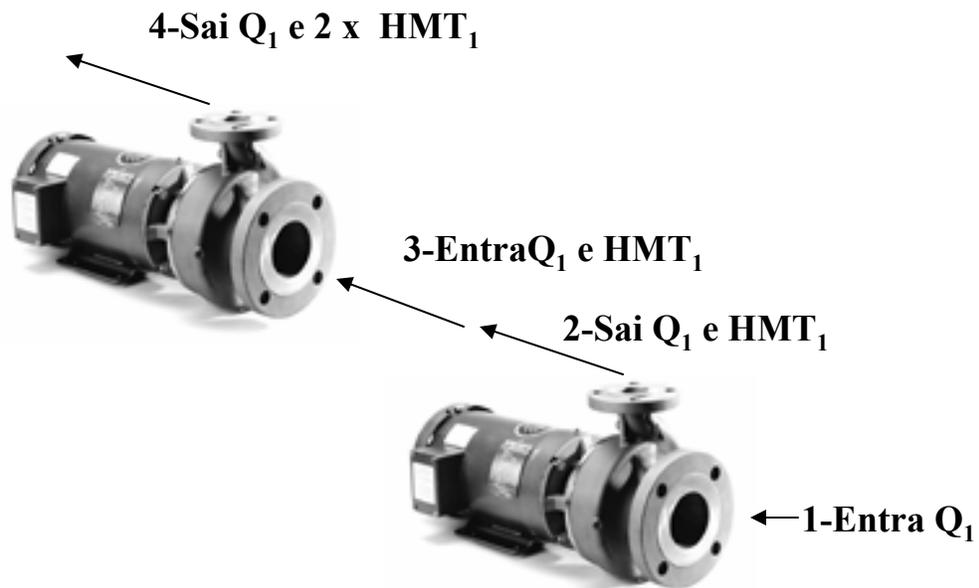
Q m ³ /s	Vs m/s	h _{fr} m	Leitura	NPSH	NPSH
			Vacuo. m	DISP m	REQ m
0	0.00	0	3.50	5.53	
0.006	0.19	0.0189	3.71	5.51	0.84
0.012	0.38	0.0682	3.95	5.46	1.33
0.018	0.57	0.1445	4.22	5.38	1.74
0.024	0.76	0.2462	4.51	5.28	2.11
0.030	0.95	0.3721	4.83	5.16	2.44
0.036	1.15	0.5216	5.17	5.01	2.76
0.042	1.34	0.694	5.53	4.83	3.06



7.4 Bombas em paralelo: Quando duas bombas operam em paralelo, a vazão correspondente a uma determinada altura manométrica total é igual a soma das vazões de cada bomba na mesma altura manométrica total considerada. Desta forma, a curva correspondente à associação em paralelo de duas bombas iguais tem uma vazão igual ao dobro da vazão de cada bomba operando individualmente.



7.5 Bombas em série: Quando duas bombas operam em série, a vazão que atravessa cada bomba é igual, mas a altura manométrica total é a soma da altura manométrica que foi cedida por cada uma das bombas. Desta forma, a curva correspondente a associação em série de duas bombas iguais apresenta o dobro da altura manométrica de cada bomba operando individualmente.



7.5 Exercícios de associação de bombas:

3- Considere uma instalação de bombeamento, em uma altitude de 900m, que opera com água a uma temperatura de 25°C e apresenta as seguintes características:

(a) uma tubulação de sucção, em material com coeficiente C de Hazen-Williams de 130, com diâmetro interno de 250mm, comprimento virtual de 75m e altura geométrica de sucção de 3,5m;

(b) uma tubulação de recalque, em material com coeficiente C de Hazen-Williams de 130, com diâmetro interno de 150mm, comprimento virtual de 1500m e altura geométrica de recalque de 20m;

(c) uma bomba cujas curvas de desempenho, na rotação de 1750rpm, apresentam os valores dados na tabela abaixo.

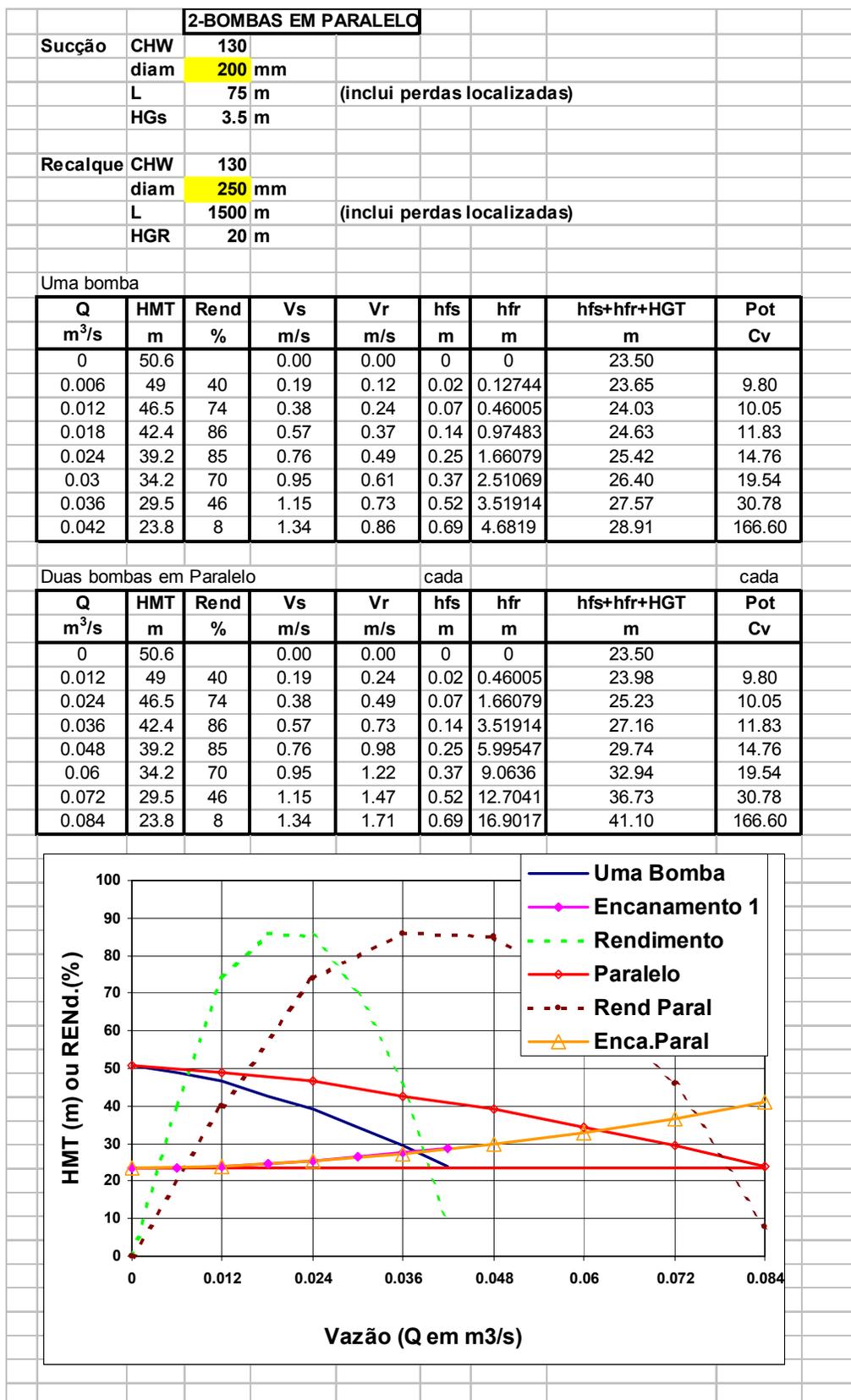
Q m ³ /s	HMT mca	Rend %	NPSHr mca
0.000	50.6		
0.006	49.0	40	0.84
0.012	46.5	74	1.32
0.018	42.4	86	1.74
0.024	39.2	85	2.11
0.030	34.2	70	2.44
0.036	29.5	46	2.76
0.042	23.8	8	3.06

Para os valores apresentados, pede-se:

3.a) Plotar em um único gráfico:

- i) a curva da Hmt (m) em função da vazão (m³/s), para uma única bomba;
- ii) a curva de rendimento(%) em função da vazão (m³/s), bombeada, para uma única bomba;
- iii) a curva da Hmt (m) em função da vazão (m³/s), para duas bombas iguais operando em série ;
- ii) a curva de rendimento (%) em função da vazão (m³/s), bombeada, para duas bombas iguais operando em paralelo;
- iv) a curva do encamento com duas bombas operando em paralelo.

3b) Mostre, em uma tabela, a potência no eixo de cada bomba em função da vazão de duas bombas iguais operando em série ;

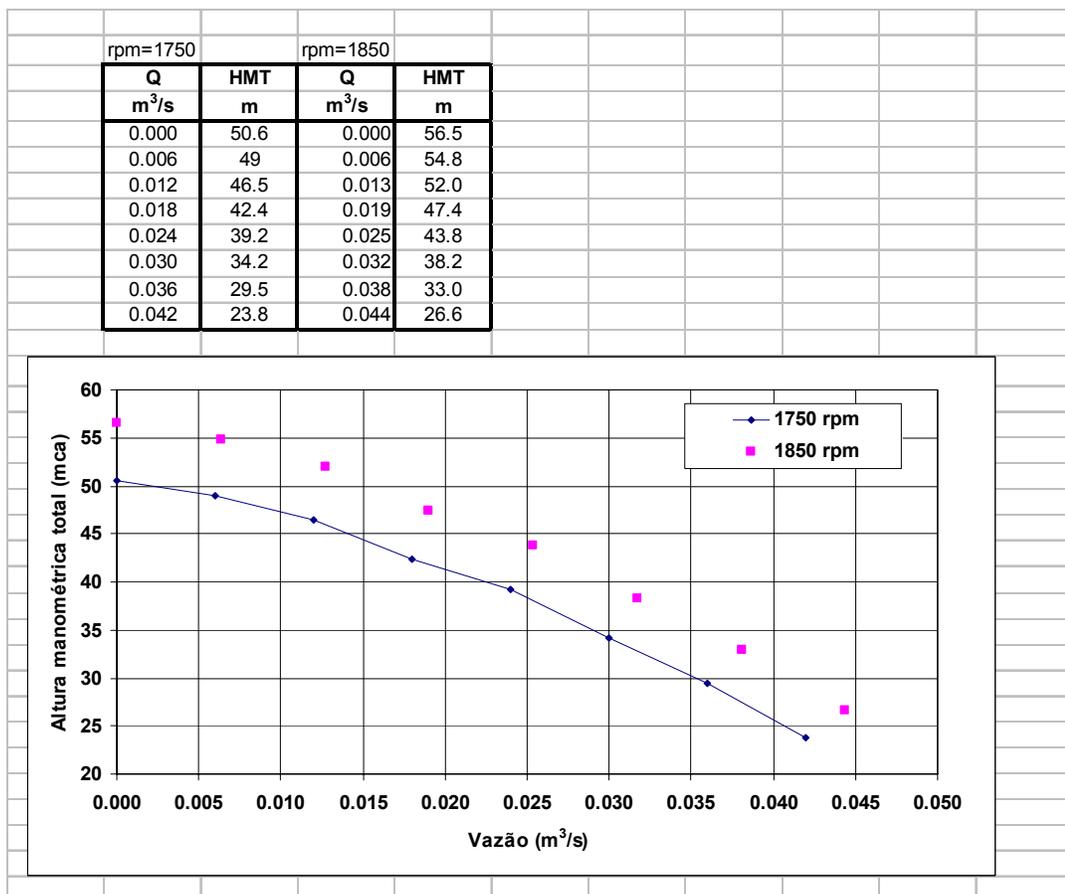


7.6 Relações de semelhança: Quando o diâmetro (d) do rotor, ou a rotação (rpm) de uma bomba centrífuga, sofre pequenas alterações, os valores da altura manométrica total (HMT) e da vazão (Q) podem ser corrigidos através das seguintes equações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} \quad \frac{\text{HMT}_1}{\text{HMT}_2} = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} \right)^2$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 \quad \frac{\text{HMT}_1}{\text{HMT}_2} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

O exemplo abaixo ilustra o uso destas fórmulas, na correção da curva de desempenho de uma bomba. Neste exemplo, pares de valores observados com uma rotação de 1750rpm foram extrapolados para uma rotação de 1850 rpm.



7.7 Exemplos de provas anteriores

1) Considere os valores da tabela abaixo em uma instalação de bombeamento projetada para conduzir uma vazão de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ entre dois reservatórios de água:

Altitude Local : 720m	Pressão de vapor da água (hv): 0.32m
Tubulação de Sucção: Altura geométrica de sucção: 3.0m Diâmetro de 150mm em material com CHW=130 . Comprimento linear de 8,0m . Acessórios: uma válvula de pé com crivo e Um cotovelo de 90 graus	Tubulação de recalque: Altura geométrica de recalque: 12,0m Diâmetro de 125mm em material com CHW=135 . Comprimento linear de 395m . Acessórios: um registro gaveta, uma válvula de retenção, três curvas de 90° , duas curvas de 45° , e saída da canalização.

1.a) Calcule o comprimento virtual da tubulação de sucção e o valor do coeficiente K_s (em $\text{s}^{1.85}/\text{m}^{4.55}$) da equação $h_{fs} = K_s Q^{1.85}$ que relaciona a perda de carga na tubulação de sucção (h_{fs} em m) com a vazão (Q em m^3/s).

$$L_v := 8\text{m} + 250 \times 0.15\text{m} + 45 \times 0.15\text{m} \quad L_v = 52.25\text{m} \quad h_{fs} = 10.64 \times \left(\frac{Q}{130}\right)^{1.852} \times \frac{52.25\text{m}}{0.15^{4.87}}$$

$$\frac{10.64}{130^{1.852}} \times \frac{52.25}{0.15^{4.87}} = 695.729 \quad h_{fs} = 695.729 \times Q^{1.852}$$

1.b) Calcule o valor esperado da leitura, em mca, em um vacuometro instalado na entrada da bomba quando a vazão é de $90\text{m}^3/\text{h}$. Calcule também a pressão absoluta (em mca) na entrada da bomba.

$$h_{vac} = H_g + H_{fs} + \frac{V_s^2}{2g}$$

$$V_s := 4 \cdot \frac{\frac{90}{3600} \times \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \times (0.15\text{m})^2} \quad V_s = 1.415 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{OK} < 1.5\text{m/s}$$

$$h_{vac} := 3 + 695.729 \times \left(\frac{90}{3600}\right)^{1.852} + \frac{1.415^2}{2 \times 9.81} \quad h_{vac} = 3.853 \quad \frac{P_{abs}}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_{vac}$$

$$\frac{P_{abs}}{\gamma} = (10.33\text{m} - 720\text{m} \times 0.00108) - 3.853\text{m} \quad (10.33\text{m} - 720\text{m} \times 0.00108) - 3.853\text{m} = 5.699\text{m}$$

$$\frac{P_{abs}}{\gamma} = 5.7\text{m}$$

1.c) Considerando a altitude local (720m), a altura geométrica de sucção (3,0m), a pressão de vapor dada (0.32m), calcule a equação que relaciona o NPSH disponível com a vazão (Q em m^3/s): $\text{NPSH}_{disp} = K_1 - K_{npsH} Q^{1.852}$ onde K_1 (em m) e K_{npsH} (em $\text{s}^{1.852}/\text{m}^{4.556}$) são constantes.

$$\text{NPSH}_{disp} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - h_{fs} - H_g - h_v$$

$$\text{NPSH}_{disp} = (10.33 - 720 \times 0.00108) - 3.0\text{m} - 695.729 \times Q^{1.852} - 0.32$$

$$\text{NPSH}_{disp} = 6.232 - 695.729 \times Q^{1.852}$$

1) Considere os valores da tabela abaixo em uma instalação de bombeamento projetada para conduzir uma vazão de $90 \text{ m}^3/\text{h}$ entre dois reservatórios de água:

Altitude Local : 720m	Pressão de vapor da água (hv): 0.32m
Tubulação de Sucção: Altura geométrica de sucção: 3.0m Diâmetro de 150mm em material com CHW=130 . Comprimento linear de 8,0m . Acessórios: uma válvula de pé com crivo e Um cotovelo de 90 graus	Tubulação de recalque: Altura geométrica de recalque: 12,0m Diâmetro de 125mm em material com CHW =135 . Comprimento linear de 395m . Acessórios: um registro gaveta, uma válvula de retenção, três curvas de 90° , duas curvas de 45° , e saída da canalização.

1.d) Calcule o comprimento virtual da tubulação de recalque e o valor do coeficiente Kr (em $\text{s}^{1,85}/\text{m}^{4,55}$) da equação $h_{fr} = Kr Q^{1,85}$, que relaciona a perda de carga na tubulação de sucção (h_{fs} em m) com a vazão (Q em m^3/s).

$$LE := 8 \times 0.125\text{m} + 100 \times 0.125\text{m} + 3 \times 30 \times 0.125\text{m} + 2 \times 15 \times 0.125\text{m} + 35 \times 0.125\text{m}$$

$$LE = 32.875\text{m}$$

$$L_v := 395\text{m} + 32.875\text{m}$$

$$L_v = 427.875\text{m}$$

$$h_{fr} = 10.64 \times \left(\frac{Q}{135} \right)^{1.852} \times \frac{427.875}{0.125^{4.87}}$$

$$10.64 \times \left(\frac{1}{135} \right)^{1.852} \times \frac{427.875}{0.125^{4.87}} = 12910.07$$

$$h_f = 12910.07 \times Q^{1.852}$$

1.e Determine a curva do encanamento

$$HMT = H_{gs} + h_{fs} + H_{gr} + h_{fr} + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} \quad \text{se desprezarmos o valor de } \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g}$$

$$HMT = H_{gs} + h_{fs} + H_{gr} + h_{fr}$$

$$HMT = 3 + 695.729 \times Q^{1.852} + 12 + 12910.07 \times Q^{1.852}$$

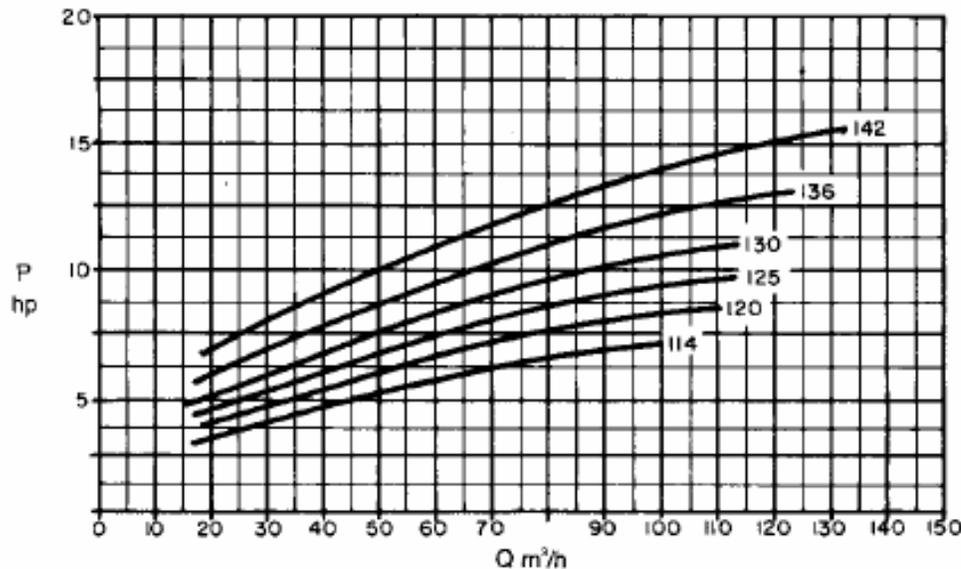
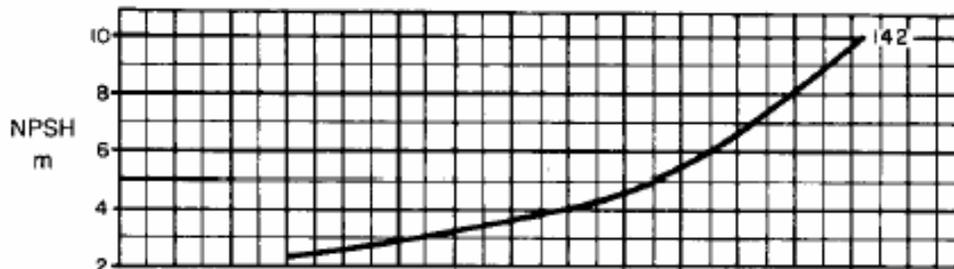
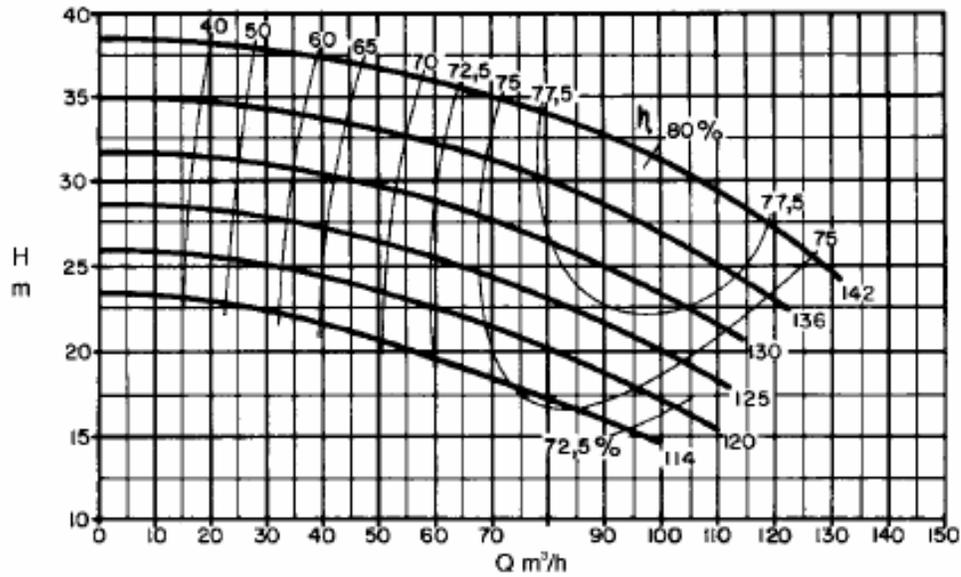
$$12910.07 + 695.729 = 13605.8$$

$$HMT = 15 + 13605.8 \times Q^{1.852}$$

1.f Plote na curvas de desempenho da bomba KSB-MEGANORM 50-25, fornecida em anexo, a curva do encanamento e a curva do NPSH disponível. Utilize os seguintes pares de valores de vazão: 0, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100 m^3/h

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM	Tamanho Size Tamaño	50-125	KSB 
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos. - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	3500 rpm	

b23



Dados válidos para densidade de 1 Kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
Data applies to a density of 1 Kg/dm³ and Kinematical viscosity up to 20 mm²/s.
Datos válidos para densidad 1 Kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo D.
Operating data according to ISO 9906 attachment D.

Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento D.

1.i Para o **rotor especificado no item f**, se fosse necessário **operar a bomba com uma vazão de 70 m³/h** quais seriam os valores de

- i) vazão e HMT da bomba
- ii) perda a ser introduzida pelo fechamento parcial do registro
- iii) rendimento da bomba,
- iv) potência requerida no eixo de acionamento da bomba (em CV),
- v) o NPSH requerido
- vi) e o NPSH disponível
- vii) leitura no vacuometro
- viii) leitura no manômetro (instalado no corpo da bomba antes do registro).

i) A vazão e a HMT da bomba: $Q := 70 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ HMT := 35m (**valores retirados da curva dada**)

ii) Perda no registro = HMT da bomba com 70m³/h - HMT do encanamento com registro aberto e 70m³/h

$$35 - \left[15 + 13605.8 \times \left(\frac{70}{3600} \right)^{1.852} \right] = 10.783 \quad \text{Perda no registro} = 10.8\text{m}$$

iii) Rendimento com 70m³/h = 75% (**valor retirado da curva dada**)

iv) Potência (em cv) no eixo de acionamento para a vazão de 70m³/h

$$\text{Potência no eixo de acionamento da bomba} = \frac{\text{Potência Hidraulica}}{\text{rendimento da bomba expresso em fração}} = \frac{\frac{70}{3600} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 35 \cdot \text{m}}{0.75 \times 75 \cdot \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{\text{CV}}} = 12.1$$

v) O NPSH disponível $6.232 - 695.729 \left(\frac{70}{3600} \right)^{1.852} = 5.76$ **Calculado com a equação do item 1c**

vi) O NPSH requerido : 3.8m (**valor observado na curva da bomba**)

vii) A leitura do vacuômetro

$$h_{vac} := 3 + 695.729 \times \left(\frac{70}{3600} \right)^{1.852} + \frac{\left(4 \cdot \frac{\left(\frac{70}{3600} \right)^2}{\pi \times 0.15^2} \right)}{2 \times 9.81}$$

hvac = 3.533

vi) A leitura do manômetro (no corpo da bomba e antes do registro)

$$H_{man} = HMT - h_{vac} \quad H_{man} := 35\text{m} - 3.5\text{m} \quad H_{man} = 31.5\text{m}$$

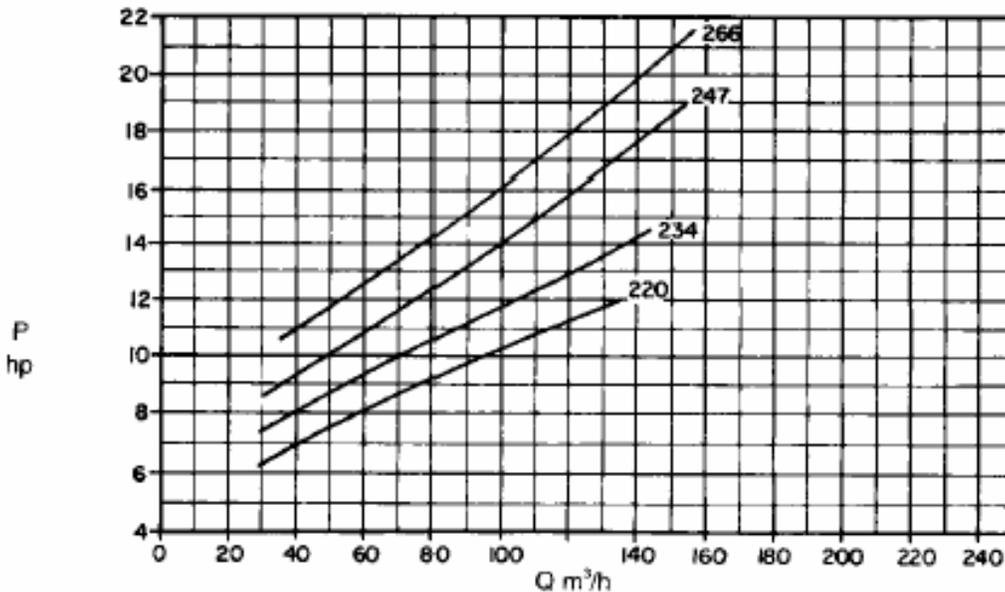
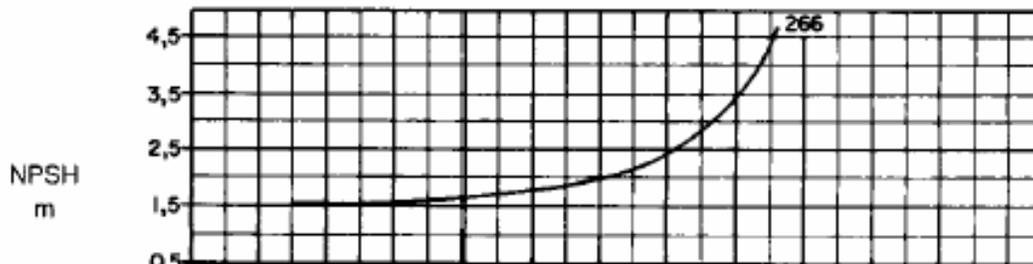
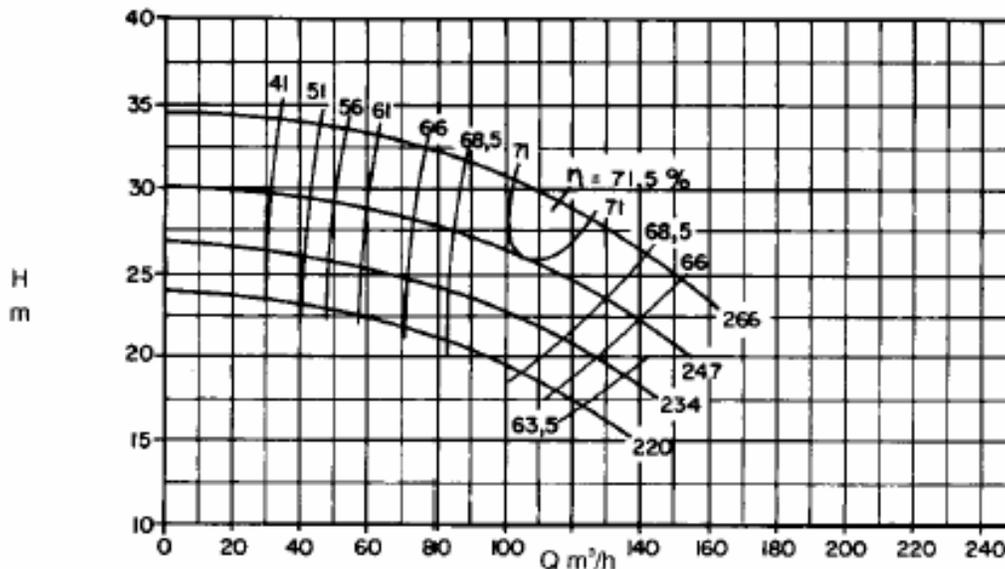
ou

$$H_{man} = H_{gr} + h_{fr} \quad 12 + \left[12910.07 \times \left(\frac{70}{3600} \right)^{1.852} + 10.783 \right] = 31.5$$

1.j Agora, repita os itens 1f até 1i para a curva da bomba KSB Meganorm 80-250 de 1750rpm que é fornecida em seguida. Compare os resultados com os de seus colegas e BOA SORTE NA PROVA.....

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGABLOC KSB MEGACHEM	Tamanho Size Tamaño	80-250	KSB 
Oferta n° Project - No. Oferta - n°	Item n° Item - No. Pos. - n°	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal		

b26



Dados válidos para densidade de 1 Kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
Data applies to a density of 1 Kg/dm³ and Kinematic viscosity up to 20 mm²/s.
Datos válidos para densidad 1 Kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Garantia das características de funcionamento conforme ISO 9906 anexo D.
Operating data according to ISO 9906 attachment D.
Garantía de las características de funcionamiento según ISO 9906 suplemento D.