3.4. Equação da Curva Característica da Instalação (CCI)

3.4.1. Definição da CCI

É a curva que representa os lugares geométricos que caracterizam a energia por unidade de peso que o fluido necessita ter para que ocorra o escoamento em regime permanente em uma dada instalação a uma vazão Q.

A CCI é representada por $H_S = f(Q)$.

Para uma instalação de bombeamento a energia por unidade de peso que o fluido necessita é fornecida pela bomba hidráulica.

Para que não haja dúvida na obtenção da equação da CCI, deve-se estar apto a responder as questões a seguir.

1ª - Um fluido escoando em regime permanente, em uma dada instalação a uma vazão Q, apresenta perda de carga?

2ª - Como calculamos a energia por unidade de peso que o fluido possui?

3ª - Se a energia por unidade de peso que o fluido possui, for inferior a perda de carga total, que ele dissiparia ao percorrer a instalação com uma vazão Q, pode haver o escoamento em regime permanente sem a presença da bomba hidráulica?

4ª - A energia por unidade de peso que o fluido possui sendo igual à perda de carga total que ele dissiparia ao percorrer a instalação com uma vazão Q é condição necessária e suficiente para que haja o escoamento em regime permanente com uma vazão Q?

5ª - Se a energia por unidade de peso que o fluido possui é igual à soma da cota crítica (Zc) com a perda de carga total (H_{pT}), isto garante que haja o escoamento em regime permanente?

6ª - Considerando uma instalação de bombeamento com uma entrada e uma saída, como se determina a energia por unidade de peso que o fluido necessita para que escoe em regime permanente com uma vazão Q?

3.4.2. Equação da CCI

A equação da CCI pode ser obtida pela diferença entre a energia por unidade de peso a ser vencida e a energia por unidade de peso que o fluido possui, ou em outras palavras aplicando-se a equação da energia entre o nível de captação e a seção final, como é mostrado a seguir:

$$H_{inicial} + H_S = H_{ST} + H_{p_{total}}$$
$$H_S = H_{ST} - H_{inicial} + H_{p_{total}}$$

Supondo uma instalação de bombeamento com o diâmetro antes da bomba ($D_{antes\ da\ bomba}$) diferente do diâmetro de recalque e com a seção final apresentando carga cinética, tem-se que:

$$H_S = (z_{ST} - z_{inicial}) + \left(\frac{p_{ST} - p_{inicial}}{\gamma}\right) + \frac{\alpha \times v_R^2}{2g} + H_{p_{antes\ da\ bomba}} + H_{p_{recalque}}$$

Supondo ainda que z_{ST} - z_0 = z_C, que representa a cota crítica a ser vencida e que o escoamento na seção final é turbulento ($\alpha \cong 1{,}0$):

$$H_S = z_C + \left(\frac{p_{ST} - p_{inicial}}{\gamma}\right) + \frac{v_R^2}{2g} + H_{p_{antes\,da\,bomba}} + H_{p_{recalque}}$$

onde:

$$z_C + \left(\frac{p_{ST} - p_{inicial}}{\gamma}\right) = H_{estática} = \text{carga estática}$$

$$H_{p_i} = f_i \times \frac{\left(L_i + \sum Leq_i\right)}{D_{H_i}} \times \frac{Q^2}{2g \times A_i^2}$$

Ao se considerar uma instalação com apenas dois diâmetros, pode-se representar a equação da CCI pela equação 2

$$H_S = H_{estática} + B_{instalação} \times Q^2 \qquad \text{equação 2}$$

onde:

$$B_{instalação} = f_{aB} \times \frac{\left(L_{aB} + \sum Leq_{aB}\right)}{D_{H_{aB}}} \times \frac{1}{2g \times A_{aB}^2} + f_R \times \frac{\left(L_R + \sum Leq_R\right)}{D_{H_R}} \times \frac{1}{2g \times A_R^2} + \frac{y_{ST}}{2g \times A_R^2}$$

$y_{ST} = 0$ se for nível de reservatório, ou seja, velocidade nula

$y_{ST} = 1$ se for saída de tubulação, ou seja, velocidade diferente de zero

Nota: Pode-se estabelecer através da equação da CCI se a instalação hidráulica pode ou não operar em queda livre ($H_S = 0$) e também determinar a vazão de queda livre, como é mostrado a seguir.

$$0 = H_{estática} + B_{instalação} \times Q_{qL}^2$$

$$Q_{qL} = \sqrt{\frac{-H_{estática}}{B_{instalação}}}$$

Através da equação anterior é possível estabelecer a condição para que exista o escoamento em queda livre, que no caso é ter a carga estática negativa, já que $B_{instalação} > 0$.

Ao se observar a equação da CCI, fica evidente que se devem estabelecer maneiras de se determinar o coeficiente de perda de carga distribuída e os comprimentos equivalentes; uma das maneiras de se determinar o coeficiente de perda de carga distribuída seria através da equação de Colebrook que é resolvida pela planilha como pode ser visto no sítio: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/det_f.xls, ou ainda no sítio: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/consultas.htm .

Pode-se também determinar este coeficiente, tanto pelos diagramas de Moody[14] ou Rouse como por expressões empíricas, a seguir apresenta-se uma síntese desta determinação.

Para a determinação do coeficiente de perda de carga distribuída, "f", inicialmente calcula-se o número de Reynolds.

Se Re for menor ou igual a 2000[15] tem-se o escoamento laminar, neste caso o "f" é determinado pela expressão: $f = \frac{64}{Re} = \frac{64 \times \mu}{\rho \times v \times D_H} = \frac{64 \times \nu}{v \times D_H}$, que demonstra que para o escoamento laminar o coeficiente de perda de carga distribuída independe do material do tubo, ou seja, da rugosidade da parede interna.

[14] O diagrama de Moody tem uma precisão de $\pm 15\%$ (White, F.M. – Mecânica dos Fluidos, p.245)

[15] Segundo Schlichting – Boundary Layer Theory – pode-se considerar até 2300

Se Re for maior, ou igual, a 4000, tem-se o escoamento turbulento, que pode ser subdivido em hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso[16].

Hidraulicamente liso: este regime de escoamento é estabelecido para uma faixa de número de Reynolds variável, onde o limite inferior depende da turbulência natural e o limite superior depende da rugosidade da parede.

O escoamento no interior do tubo é turbulento, porém existe próximo à parede interna, devido ao princípio de aderência, uma subcamada (ou filme) laminar, que cobre a rugosidade da parede. Neste caso a parede é denominada de hidraulicamente lisa e o "f não depende" do material da tubulação. Neste caso o coeficiente "f" pode ser determinado pela fórmula de Konakov[17]: $f = \frac{1}{\left(-2 \times \log\left(\frac{5,62}{Re^{0,9}}\right)\right)^2}$ ou pelas equações: de Blausius[18] $f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ que é válida para $4000 \leq Re \leq 10^5$ e de Prandtl[19] $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log Re \sqrt{f} - 0,8$ que é válida para $Re > 10^5$.

Hidraulicamente rugoso: este regime de escoamento é estabelecido quando a rugosidade da parede torna-se maior que a espessura da subcamada (ou filme) laminar.

Neste tipo de escoamento o diagrama de velocidade aproxima-se do estabelecido para o escoamento ideal, como mostra a figura 12.

---

[16] Em mecânica dos fluidos, se emprega o escoamento liso não no sentido de rugosidade (ou rugosidade relativa equivalente) desprezível, mas no sentido que ela não influencia na perda de carga

[17] Página 366 do livro: Problemas de Mecânica dos Fluidos, escrito por Francisco de Assis A. Bastos e editado pela Guanabara Dois em 1983

[18] H.Blausius, Das Äehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten, VDI-Forschungsh, vol. 131, 1913

[19] L.Prandtl, Essentials of Fluid Dynamics, Hafner, Nova York (1952), p. 165

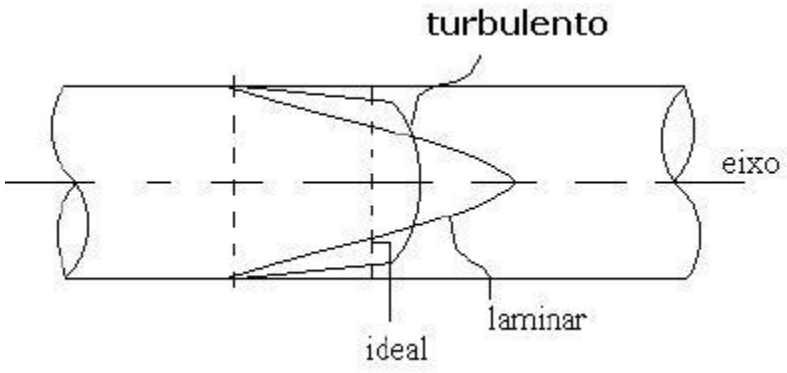


Figura 12

Para o escoamento hidraulicamente rugoso o "f" depende somente do parâmetro denominado rugosidade relativa, que é um adimensional calculado pela expressão $\frac{D_H}{k}$ ou $\frac{k}{D_H}$. Importante observar que o escoamento torna-se hidraulicamente rugoso praticamente para $Re > \frac{560}{k/D_H}$ e nesta situação recorre-se a expressão estabelecida por Von-Karman-Nikuradse $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\frac{k}{3{,}71 \times D_H}$, que também pode ser escrita como $f = \left[1{,}74 - 2\log\left(2k/D\right)\right]^{-2}$, ou a expressão estabelecida por Blench $f = 0{,}790\sqrt{\frac{k}{D_H}}$ ou ainda a estabelecida por Moody $f = 0{,}0055 + 0{,}15 \times \left(\frac{k}{D}\right)^{1/3}$, onde os resultados diferem de cerca de 2% dos obtidos com a equação de Nikuradse.

Zona de "transição" entre o escoamento hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso; neste caso, ou recorre-se a equação geral estabelecida por Colebrook, que é representada pela expressão

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\frac{2{,}51}{Re \times \sqrt{f}} + \frac{k}{3{,}71 \times D_H}\right]$$, ou a fórmula de Moody[20]

$$f = 0{,}0055 \times \left[1 + \left(20000 \times \frac{k}{D} + \frac{10^6}{Re}\right)^{1/3}\right]$$ ou ainda a fórmula ajustada de Wood:

$f = a + b \times (Re)^{-c}$, onde:

$$a = 0{,}53 \times \left(\frac{k}{D_H}\right) + 0{,}094 \times \left(\frac{k}{D_H}\right)^{0{,}225}$$

$$b = 88 \times \left(\frac{k}{D_H}\right)^{0{,}44}$$

$$c = 1{,}62 \times \left(\frac{k}{D_H}\right)^{0{,}134}$$

Já a determinação dos comprimentos equivalentes pode ser obtida em tabelas de fabricantes dos acessórios hidraulicos, ou tabelas normalizadas, algumas delas encontram-se especificadas no sítio:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2007/mecflu2_2_2007.htm

ou

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/planejamento_12009/consultas.htm

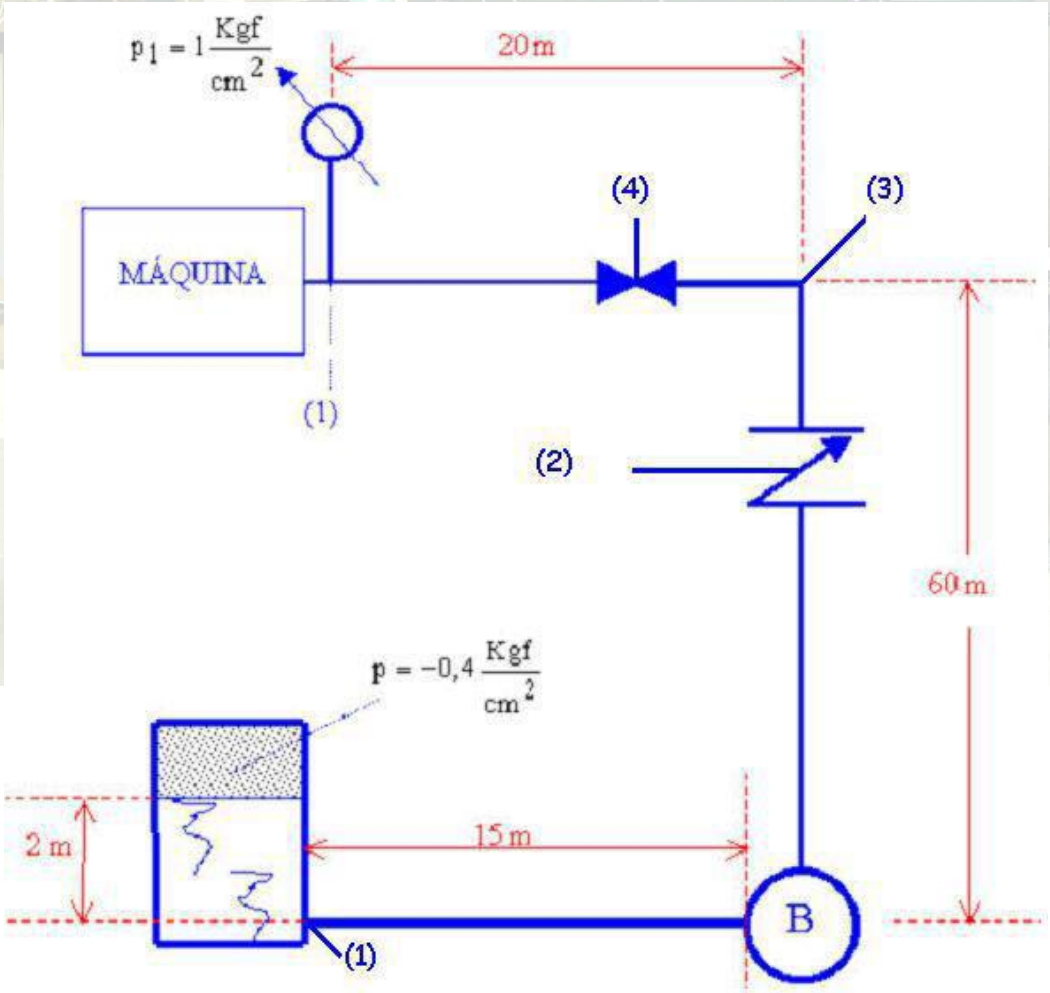
Nota: mais considerações para determinação do coeficiente "f" serão apresentadas no anexo B, onde se apresenta o estudo do fluxo totalmente desenvolvido através de um tubo.

.

[20] Os resultados da fórmula de Moody diferem de ± 5 % em relação aos da fórmula de Colebrook-White desde que o número de Reynolds esteja no intervalo de 4000 a 10^7 e a rugosidade relativa equivalente (k/D) até o valor máximo de 0,01 e f até no máximo de 0,05

3.4.3.Exemplos de aplicação

1º - Considere a instalação de bombeamento a seguir que transporta água a 12ºC e sabendo que a tubulação antes da bomba é de aço 40 com um diâmetro nominal de 3"; que a tubulação depois da bomba é de aço 40 com diâmetro nominal de 2" e que a instalação de bombeamento é constituída das seguintes singularidades: (1) saída normal; (2) válvula de retenção leve; (3) joelho de 90º e (4) válvula globo aberta; pede-se determinar a CCI em função da vazão e dos coeficientes de perda de carga distribuída.

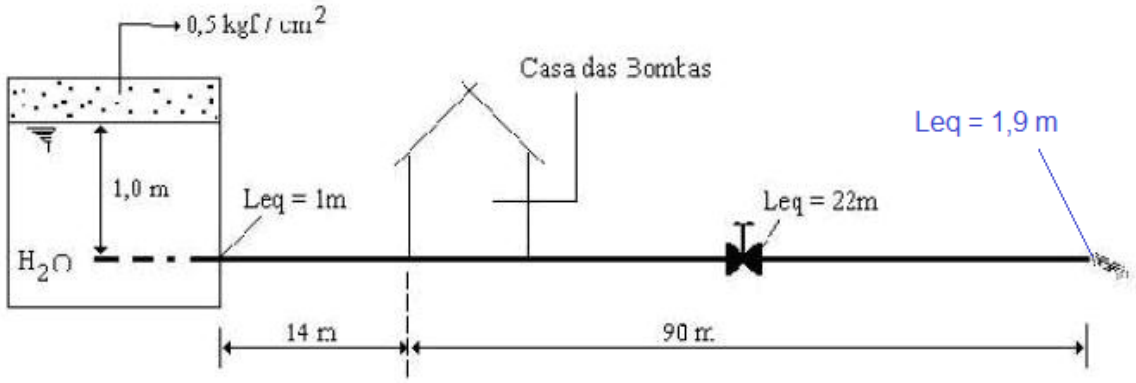


2° - Considere a instalação de bombeamento a seguir que transporta água a 12ºC e determine a CCI em função da vazão e dos coeficientes de perda de carga distribuída.

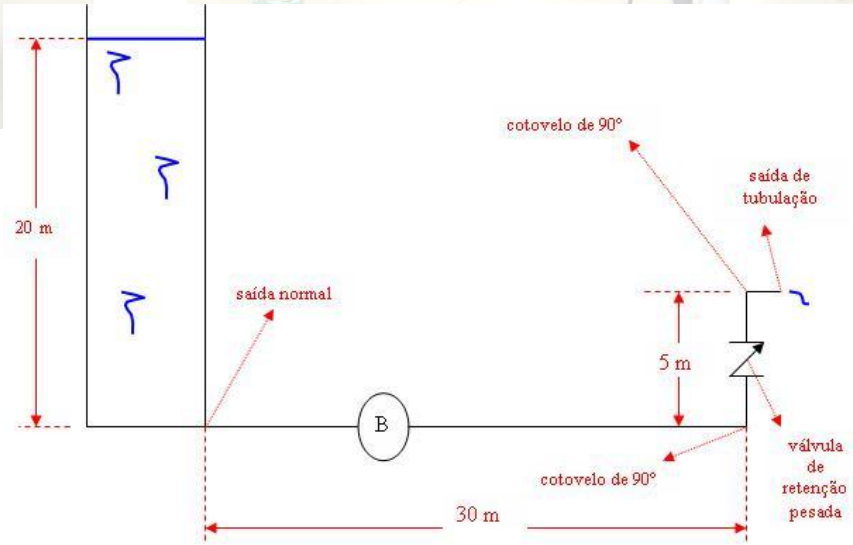
São dados:

$g = 9{,}8\ m/s^2$

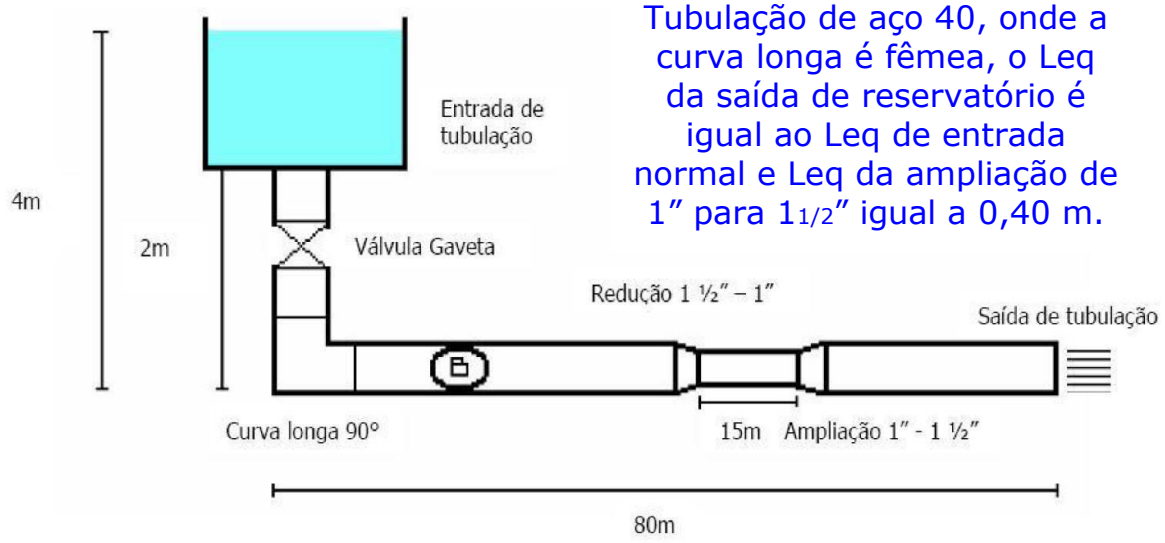
tubos de ∅ nominal = 2 ½" - Sch 40



3º - Considere a instalação de bombeamento a seguir que transporta água a 12ºC e determine a CCI em função da vazão e dos coeficientes de perda de carga distribuída.



4º - Considere a instalação de bombeamento a seguir que transporta água a 12ºC e determine a CCI em função da vazão e dos coeficientes de perda de carga distribuída.



Tubulação de aço 40, onde a curva longa é fêmea, o Leq da saída de reservatório é igual ao Leq de entrada normal e Leq da ampliação de 1" para 1 1/2" igual a 0,40 m.

"As oportunidades normalmente se apresentam disfarçadas de trabalho árduo e é por isso que muitos não as reconhecem." Ann Landers na página 97 do livro: Bernardinho - TRANSFORMANDO SUOR EM OURO - Editora Sextante – 2006

Observações:

1ª - As propriedades da água a 12º são obtidas no endereço:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2007/mecflu2_2_2007.htm

$$\mu = 0{,}001254\frac{kg}{m \times s};\rho = 999{,}23\frac{kg}{m^3};p_{vapor} \cong 1402{,}28Pa(abs)$$

2ª – Os gabaritos dos exercícios podem ser consultados no endereço:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2007/terceira_aula_complemento.htm

3.5. Vazão de projeto

Para prever o envelhecimento da instalação deve-se para a escolha da bomba, ou até mesmo para a determinação da vazão em queda livre, trabalhar com a chamada vazão de projeto, que pode ser determinada da seguinte forma: $Q_{projeto}$ = (fator de segurança) x $Q_{desejada}$, onde o fator de segurança é no mínimo 1,1 e se possível não acima de 1,2.

3.6. Escolha preliminar da bomba

Como não é objetivo descrever as variedades de bombas disponíveis no mercado, mencionam-se de forma rápida algumas delas:

- ✓ Bombas centrífugas - usadas para instalações residenciais, alimentação de caldeiras, poço profundo, de processo, química, de recirculação, petroquímica, de esgotos, efluentes, polpa, combate a incêndio, condensado, etc.
- ✓ Bombas rotativas - limitam-se as aplicações nas indústrias de processo, principalmente no bombeamento de líquidos pastosos ou muito viscosos e bombeamento de óleo combustível para queima de caldeiras, fornos, etc.
- ✓ Bombas alternativas - praticamente a sua única aplicação é a dosificação de produtos químicos, mediante as chamadas "bombas dosificadoras".

Nota: Posteriormente se introduz a rotação específica (n_S) para facilitar a obtenção da primeira classificação das bombas. Feita a escolha preliminar, opta-se pelo fabricante da bomba, alguns exemplos:

1. http://www.ksb.com.br/001/aplicacao/index.htm
2. http://www.sulzerpumps.com/
3. http://www.imbil.com.br

Em todos os sítios apresentados anteriormente, tem-se após a escolha, em função da aplicação, a escolha em função da vazão de projeto e da carga manométrica de projeto que é obtida aplicando-se a vazão de projeto na equação da CCI.

Com a vazão de projeto e a carga manométrica de projeto no diagrama de tijolos da bomba escolhida tem-se a escolha preliminar da bomba (figura 13 - diagrama de tijolos da KSB).

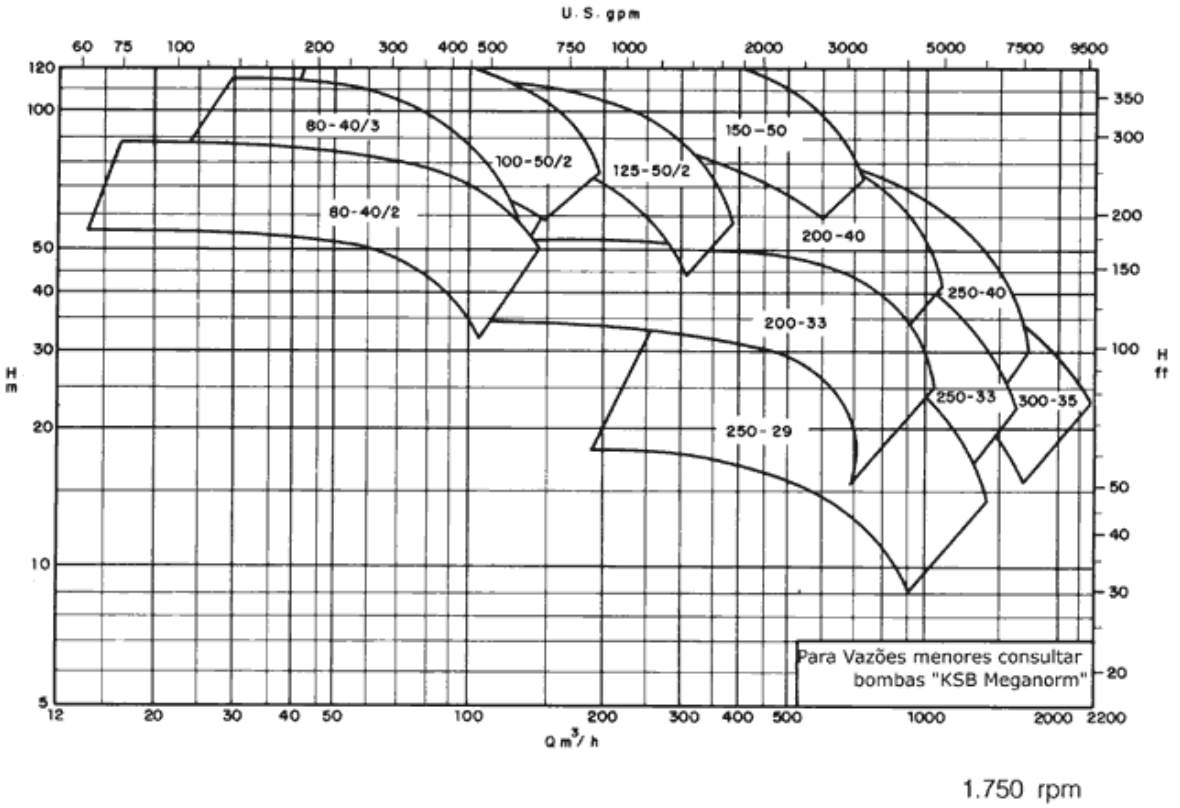
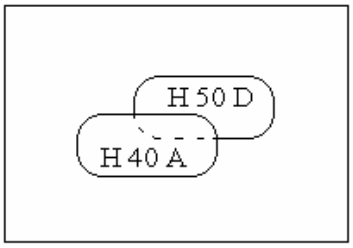


Figura 13

Notas:

- Considerando o esquema a seguir:

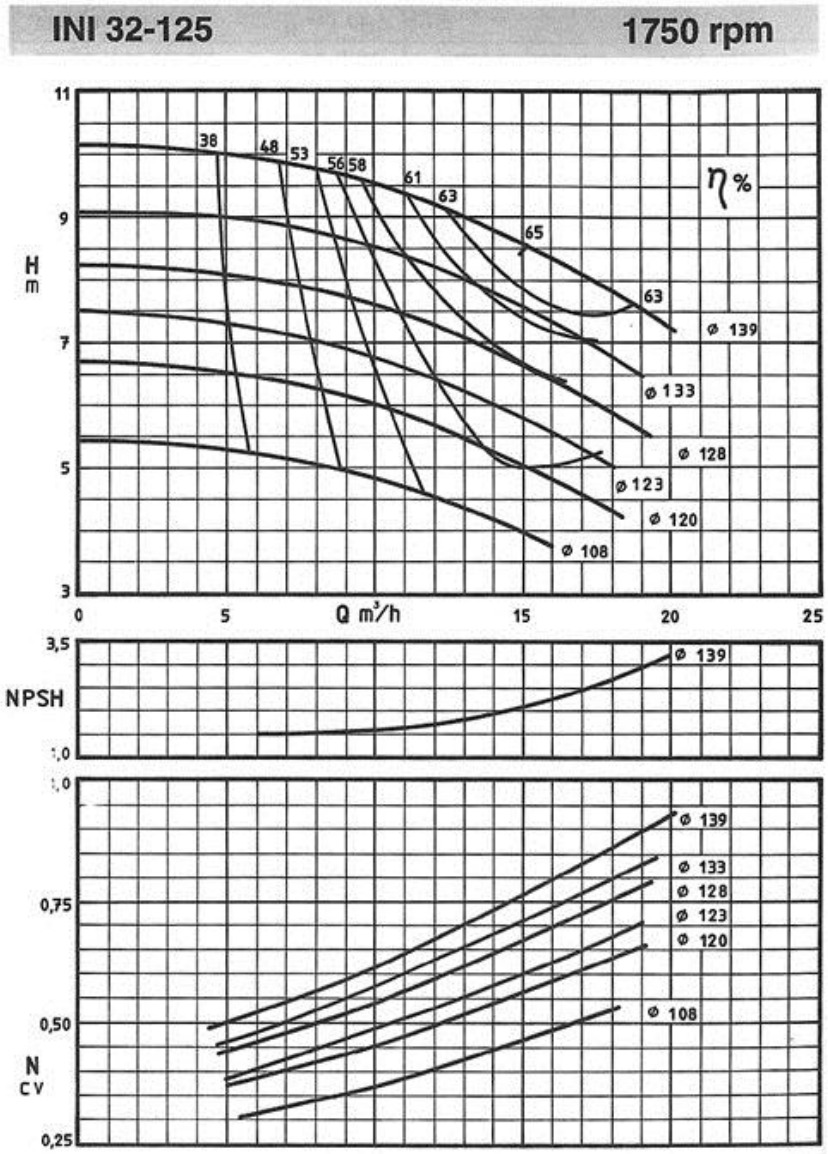


Como a bomba H 40 A encontra-se à frente no diagrama, deve-se esperar dela um rendimento maior.

É fundamental operar-se com o rendimento o mais próximo do rendimento máximo (ponto de projeto do fabricante), ou se possível imediatamente a sua direta, já que se escolhe a bomba para a vazão de projeto que é superior a vazão desejada, portanto, ao opera-se com a vazão desejada, provavelmente, estará se obtendo um rendimento maior.

Por outro lado, se não houver problemas de manutenção e se for necessário optar entre uma bomba de 1750 rpm e uma de 3500 rpm, geralmente escolhe-se a de 3500 rpm, pois são bombas menores, o que correspondem a um custo menor; são bombas que requerem motores elétricos com menor número de pólos o que implica em um custo de operação menor.

Através da bomba preliminarmente escolhida, obtêm-se as suas curvas características (CCB = figura 14)



Rotor Ø Máximo	139 mm	Flange sucção	50 mm
Rotor Ø Mínimo	108 mm	Flange pressão	32 mm
Largura do Rotor	9 mm	Peso específico	$\gamma = 1$ kgf/dm³
Viscosidade	$\mu = 1$ cP		

Figura 14

3.7. Determinação do ponto de trabalho da bomba e especificação do diâmetro do rotor

O ponto de trabalho de uma bomba hidráulica é obtido pelo cruzamento da curva característica da instalação [CCI] com as curvas características da bomba [CCB], isto porque neste ponto a bomba é capaz de fornecer ao fluido a carga manométrica (H_{B_τ}) precisamente igual a que o fluido necessita para percorrer a instalação hidráulica com uma vazão Q_τ em regime de escoamento permanente.

Neste tópico, vamos considerar o ponto de trabalho constituído por:

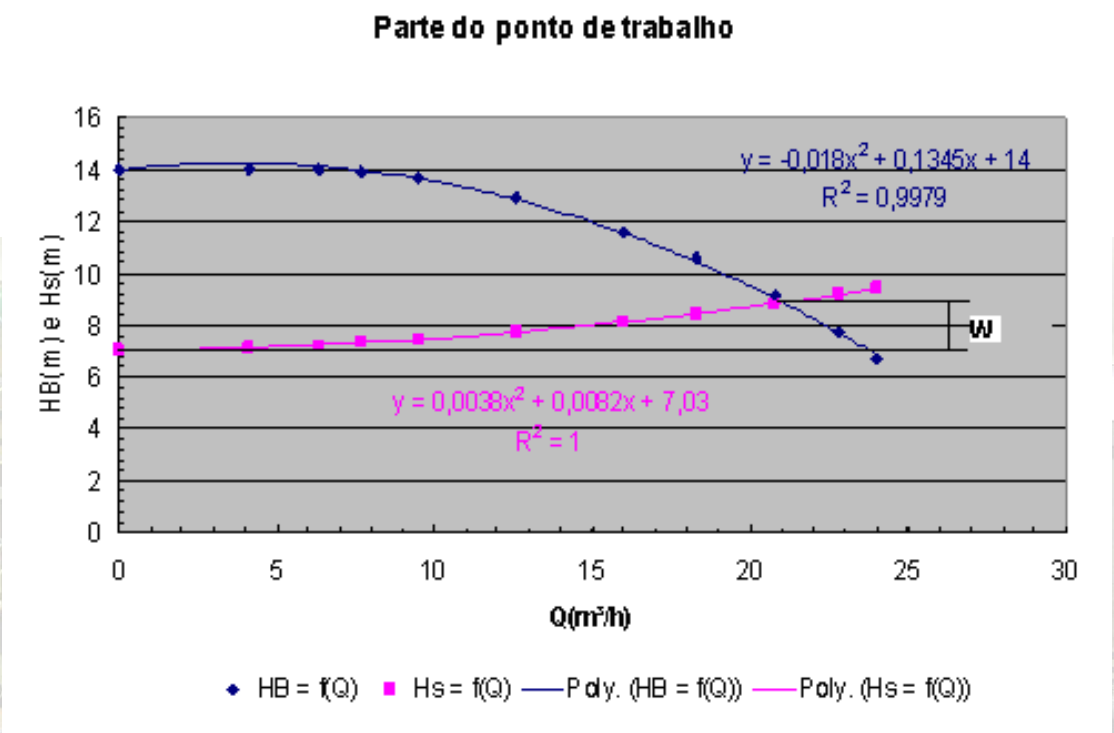
Q_τ - vazão do escoamento em regime permanente para H_{B_τ};
H_{B_τ} - carga manométrica que a bomba fornece ao fluido;
η_{B_τ} - rendimento da bomba para H_{B_τ} e Q_τ.
$NPSH_{req}$ – parâmetro importante para o estudo da cavitação.

Para que a bomba trabalhe adequadamente é necessário que:

$Q_\tau \geq Q_{projeto} \geq \text{fator de segurança} \times Q_{desejada}$
$H_{B_\tau} \geq H_{B_{projeto}}$
η_{B_τ} o mais próximo do rendimento máximo, ou até mesmo um pouco a sua direita
$NPSH_{requerido} < NPSH_{disponível}$

Além do ponto de trabalho, o que mais se pode obter com o cruzamento da CCI com a CCB?

Pode-se obter a cota W.



O que será que representa a cota W?

Para responder a pergunta anterior é importante recordar a equação genérica da CCI, a qual em uma instalação hidráulica com um único diâmetro pode ser representada pela equação a seguir:

$$H_S = (z_{sf} - z_i) + \left(\frac{p_{sf} - p_i}{\gamma}\right) + \left(\frac{y_{sf} \times \alpha_{sf}}{2g \times A_{sf}^2} - \frac{y_i \times \alpha_i}{2g \times A_i^2}\right) \times Q^2 + f \times \frac{\left(L + \sum Leq\right)}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

onde:

sf = seção final ou seção terminal

i = seção inicial

y = 0 se for nível de reservatório e aí não se define o α

y = 1 se for seção de tubo e aí se tem α = 1,0 para o escoamento turbulento e a α = 2,0 para o escoamento laminar.

No ponto de trabalho, tem-se:

$$W = H_{S_\tau} - (z_f - z_i) + \left(\frac{p_f - p_i}{\gamma}\right) = H_{B_\tau} - H_{\text{estática}}$$

ou

$$W = \left(\frac{y_{sf} \times \alpha_{sf}}{2g \times A_{sf}^2} - \frac{y_i \times \alpha_i}{2g \times A_i^2}\right) \times Q_\tau^2 + f \times \frac{\left(L + \sum Leq\right)}{D_H} \times \frac{Q_\tau^2}{2g \times A^2}$$

Notas:

- não se pode esquecer, que a CCB considerada, pode sofrer influência da rotação, do tempo vida da bomba, do fluido a ser transportado e de eventuais alterações da rede elétrica.
- em se tratando do fluido, deve-se lembrar que a CCB foi obtida para a água com massa específica igual a 1000 kg/m³ e é válida para outros fluidos, desde que a viscosidade dos mesmos seja inferior a um valor da viscosidade cinemática de referência, no caso da KSB é igual a 20 mm²/s.
- no caso de não ser a água com massa específica igual a 1000 kg/m³, ou um outro fluido com a viscosidade inferior a viscosidade cinemática de referência, só se corrige a potência da bomba $N_B = \dfrac{\gamma \times Q_\tau \times H_{B_\tau}}{\eta B_\tau}$.

3.7.1.Exemplo de aplicação

O exemplo estará alicerçado nas bancadas do laboratório de mecânica dos fluidos do Centro Universitário da FEI e terá três partes:

1ª - Determinação da perda de carga para a vazão máxima de escoamento entre duas seções da bancada, os trechos considerados encontram-se representados pelas figuras 15 e 16.

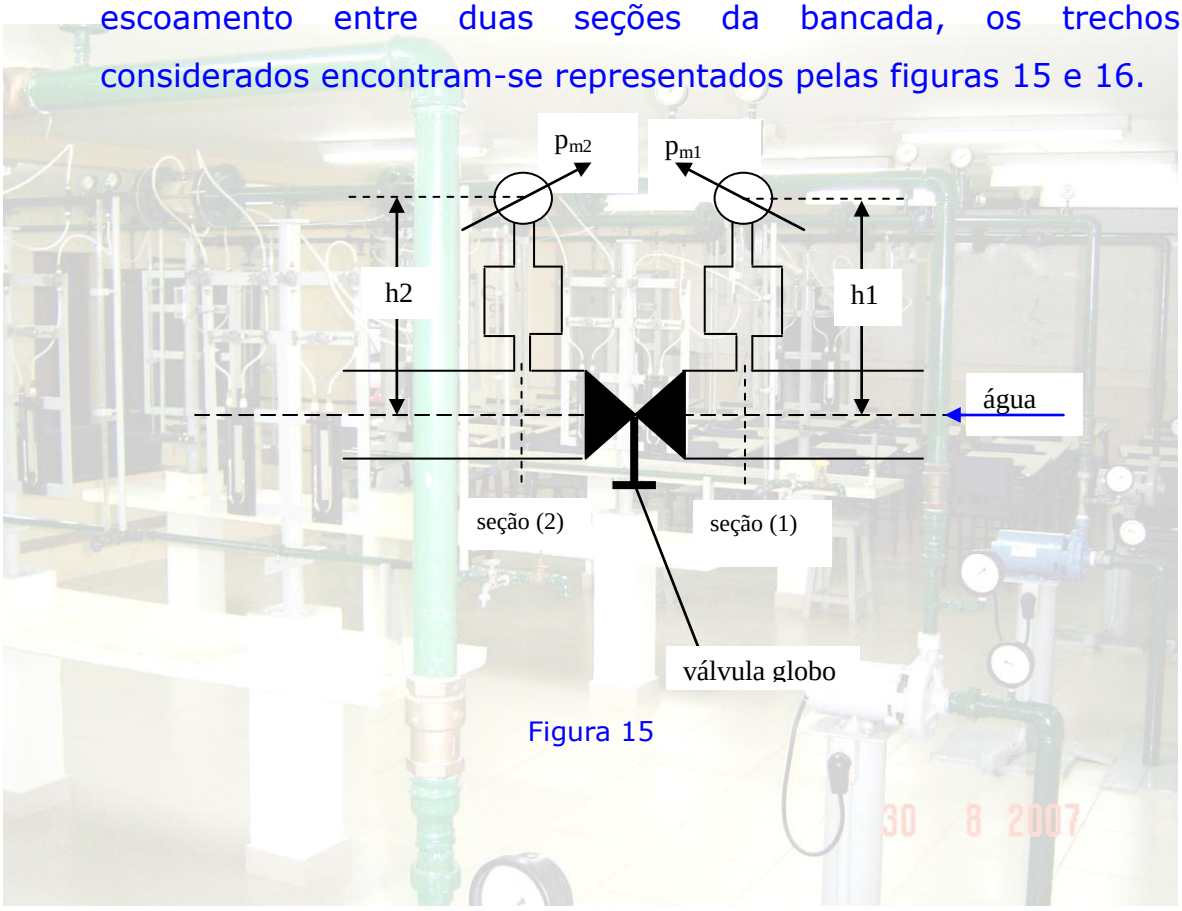


Figura 15

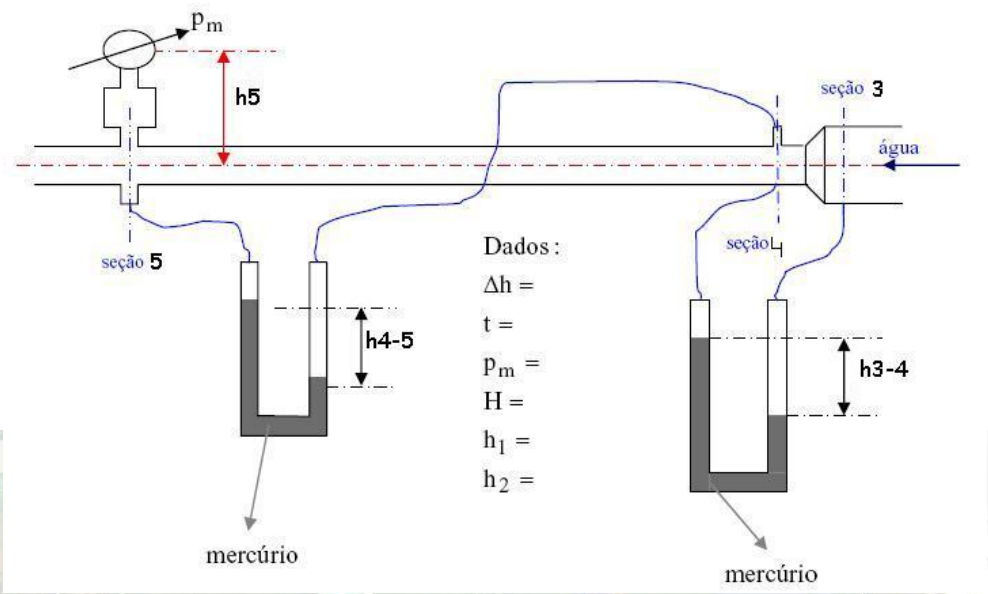


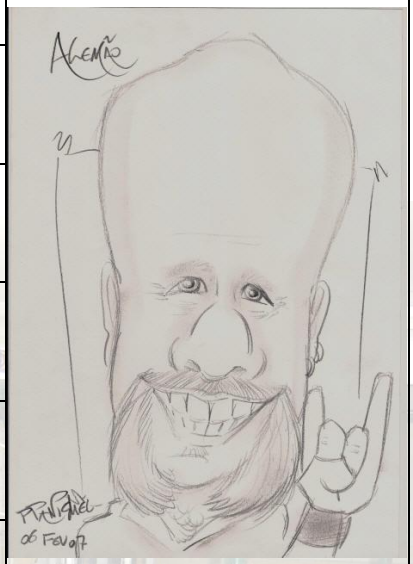
Figura 16

Dados:

- seções (1), (2) e (3) tubulação de aço 40 com diâmetro nominal de 1,5", portanto diâmetro interno de 40,8 mm e área de seção livre 13,1 cm², os valores mencionados podem ser comprovados no endereço:
  http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Apostila/Unidade%206/Primeira%20aula%20un%206.pdf

- seções (4) e (5) tubulação de aço 40 com diâmetro nominal de 1", portanto diâmetro interno de 26,6 mm e área de seção livre 5,57 cm² , os valores mencionados podem ser comprovados no endereço:
  http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Apostila/Unidade%206/Primeira%20aula%20un%206.pdf

Pede-se o cálculo das perdas:

Perda no trecho que engloba as seções 1 - 3 (H_{p1-3})	bancada 4	
Perda no trecho que engloba as seções 2 - 4 (H_{p2-4})	bancada 5	
Perda no trecho que engloba as seções 1 - 2 (H_{p1-2})	bancada 3	
Perda no trecho que engloba as seções 4 - 5 (H_{p4-5})	bancada 1	
Perda no trecho que engloba as seções 3 - 5 (H_{p3-5})	bancada 2	
Perda no trecho que engloba as seções 2 - 4 (H_{p2-4})	bancada 6	

Nota: consideram-se as bancadas do laboratório de mecânica dos fluidos do Centro Universitário da FEI, sala IS01

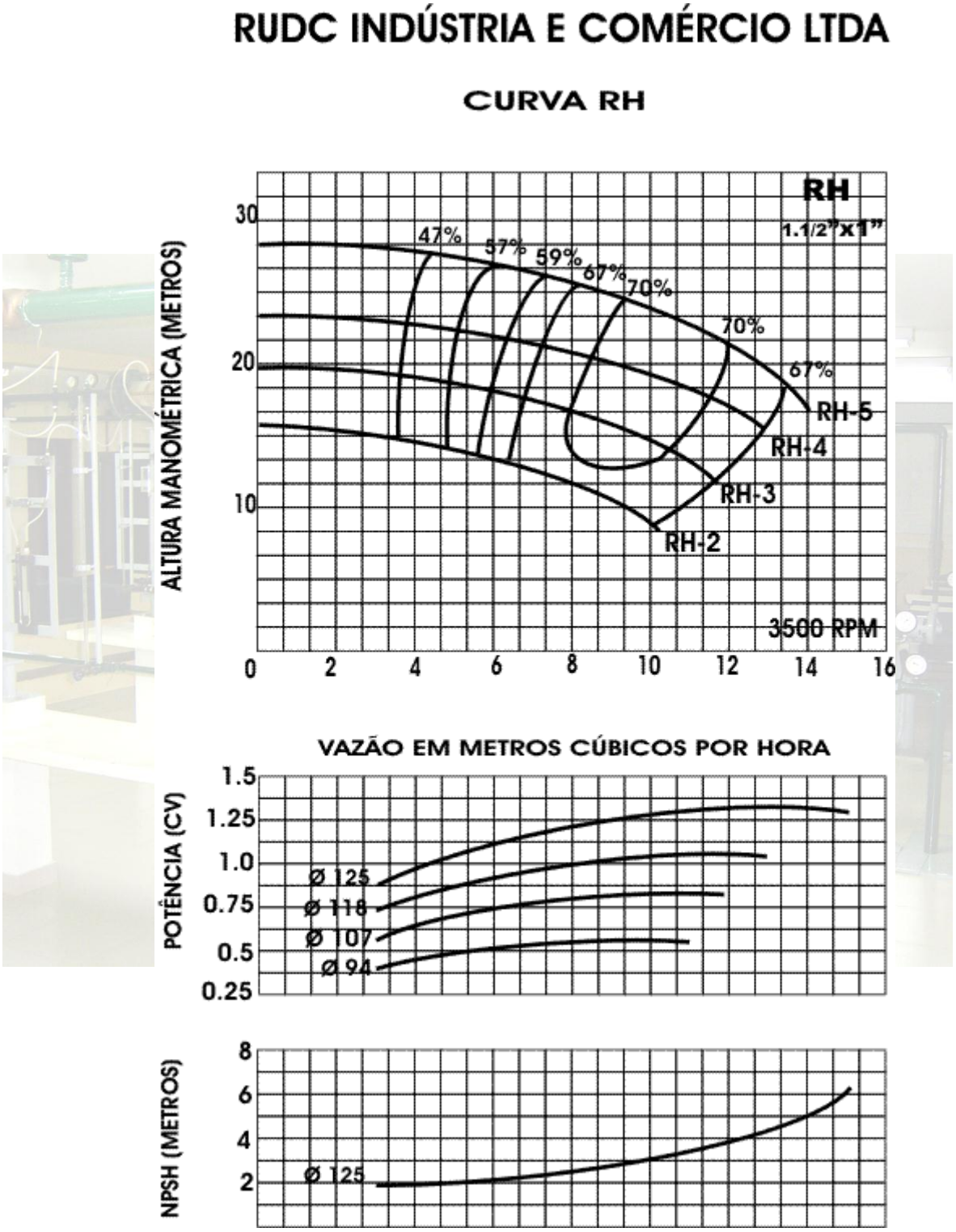
2ª - Determinação da perda de carga na bancada para a vazão máxima do escoamento e obtida através do ponto de trabalho na CCB.

Dados:

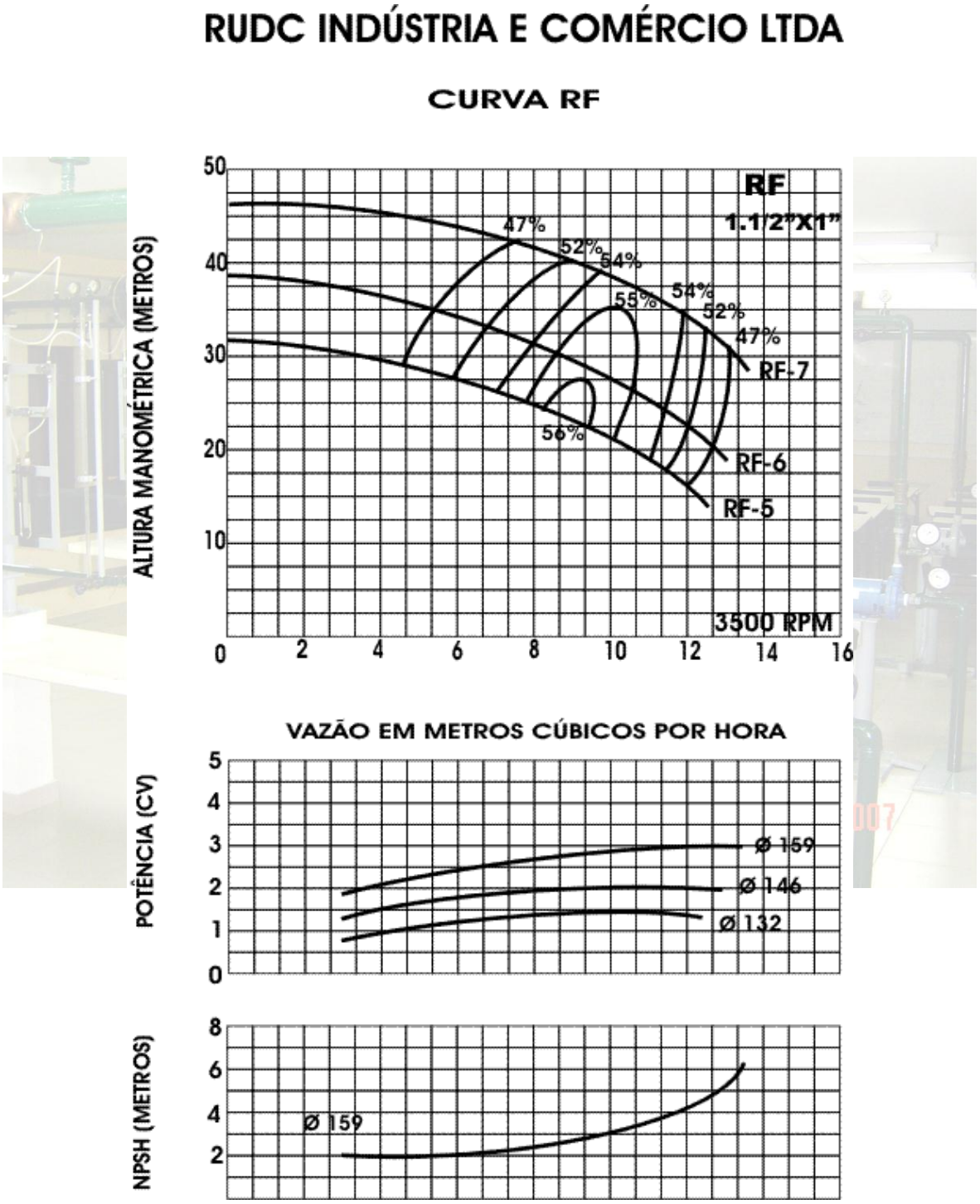
- bancadas 1, 3, 4 e 5 com bombas da INAPI com as seguintes características:

Q(m³/h)	H_B (m)	η_B(%)	$NPSH_r$(m)
0	26		
2.8	25.95	45	
4	25.9	47	0.8
4.8	25.5	52	0.9
5.8	25	54	1
6.8	24	55	1.1
7.2	23	56	1.15
9	20.5	55	1.3
9.5	18.7	54	1.4
10.3	16.5	52	1.45
10.8	14	47	1.5
n = 3500 rpm			

- bancada 2 bomba RUDC RH-5 com as seguintes características:



- bancada 6 bombas RUDC RF-6 com as seguintes características:



3ª - Questão referente ao "provão" de 1999 e cujo enunciado é transcrito a seguir:

Água é transferida de um reservatório para outro, cujo nível de referência encontra-se 30 m acima do primeiro. Essa transferência é efetuada através de uma tubulação com diâmetro interno igual a 0,254 m e comprimento total de 450 m. Ambos os reservatórios encontram-se sob pressão atmosférica.

Como o número de conexões é pequeno, a perda de carga localizada (em virtude dessas conexões) pode ser atribuída somente a uma válvula globo (posicionada no recalque da bomba centrífuga) utilizada para regular a vazão transferida entre os reservatórios. A Equação de Bernoulli, modificada para fluidos reais, aplicada entre dois pontos localizados nas superfícies dos reservatórios, leva à obtenção da chamada curva de carga do sistema, que, para a condição de válvula totalmente aberta e variação desprezível dos níveis no interior dos reservatórios, apresenta a seguinte forma:

$$Hs = 30 + 1.055\ Q^2 + 99\ Q^2\ ,$$

na qual Hs é a carga que deve ser desenvolvida pela bomba para que escoe uma vazão volumétrica Q através da tubulação. Nesta equação, [Hs] = m de coluna de fluido escoando e [Q] = $m^3\ s^{-1}$. Dentre os termos em Q^2, o de maior coeficiente responde pela perda de carga distribuída (efeitos viscosos na região de escoamento estabelecido).

A curva característica da bomba centrífuga utilizada no sistema pode ser aproximada por:

$$Hb = 150 - 4.050\ Q^2,$$

na qual Hb é a carga desenvolvida pela bomba quando ela bombeia uma vazão volumétrica Q.

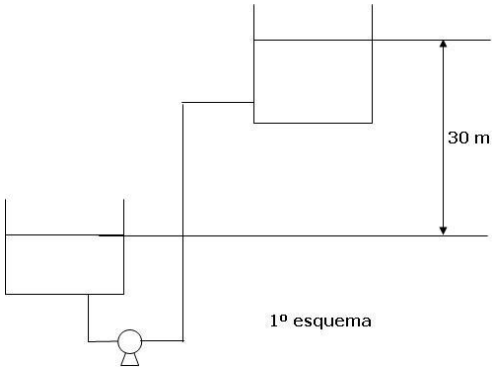
Também neste caso, [Hb] = m de coluna de fluido escoando e [Q] = m^3/s.

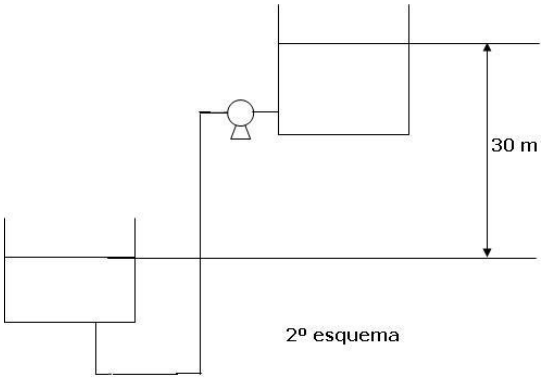
Com base nestas informações e admitindo que se esteja operando em uma faixa de Números de Reynolds, na qual o fator de atrito se mantenha constante (escoamento totalmente turbulento), determine:

a) vazão transferida do reservatório inferior para o superior, estando a válvula totalmente aberta;

b) nova vazão com a válvula fechada em 50%. Considere que a constante da válvula aberta (Kab) é igual a 5,0 e que, para válvulas globo 50% fechadas, K = 5 Kab.

c) Indique qual das duas alternativas representadas a seguir você escolheria e justifique a sua escolha.





Dados e informações adicionais		
Propriedade ⇒	Densidade	viscosidade
Fluido ⇓	kg/m³	kg/(m*s)
água	1000	$1{,}0 \times 10^{-3}$

Perdas de Carga:

Distribuída: $h_D = f(L/D)v^2/(2g)$;

Localizada: $h_L = K\, v^2/(2g)$

Onde: f - fator de atrito de Darcy; L - comprimento da tubulação; D - diâmetro do tubo; v - velocidade média do escoamento; g - aceleração da gravidade ($g = 9{,}8\ m\ s^{-2}$); K - constante do acidente.

Nota: o gabarito das duas primeiras partes encontra-se no sítio:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2007/quinta_aula_complemento.htm

"Tento tratar de forma diferente pessoas diferentes, não permitindo que alguém se ache maior, melhor ou mais importante na equipe". Bernardinho na página 134 do livro: Bernardinho - TRANSFORMANDO SUOR EM OURO - Editora Sextante - 2006

"Não sei, ou não tenho certeza, se a falta de talento, de capacidade técnica, leva necessariamente ao fracasso. Mas sei que a ausência de paixão e de comprometimento, esta sim, é fatal". Bernardinho na página 146 do livro: Bernardinho - TRANSFORMANDO SUOR EM OURO - Editora Sextante - 2006

3.7.2. Exemplos complementares cuja parte dos gabaritos pode ser consultada no sítio:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2007/sexta_aula_complemento.htm

1º - Uma dada instalação bombeia água a 20ºC com uma bomba que apresenta rotação igual a 3500 rpm e diâmetro de rotor igual a 150 mm e tem as seguintes características:

Q (m^3/h)	12	18	22	29	38,3	48,5	51,5	55
H_B (m)	41	40,5	40	38	35	28,5	26	22
η_B (%)	40	50	55	60	63	60	55	50

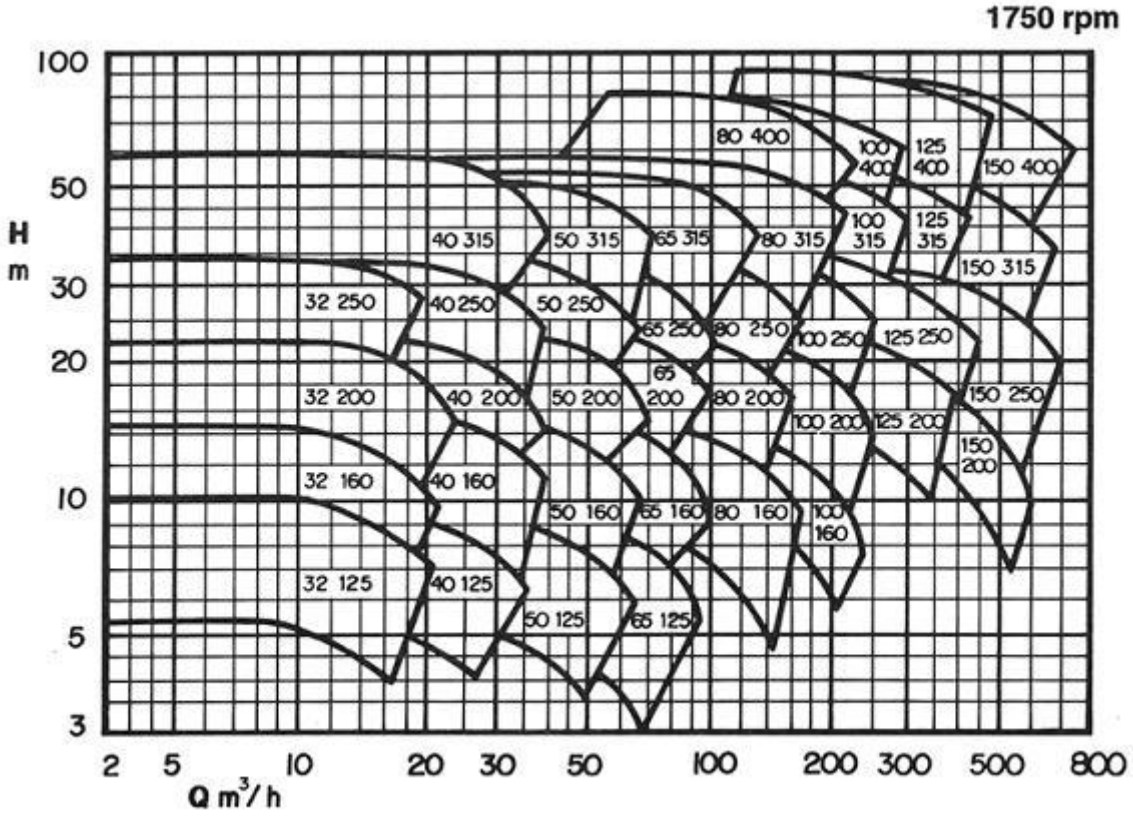
Para a situação de vazão máxima, pede-se a potência consumida supondo que o rendimento do motor é igual a 90% e que a curva característica da instalação é dada pela equação:

$$H_S = 12 + f \times 20627750 \times Q^2$$

com a vazão em "m^3/s" e a carga do sistema em "m"

2º - Uma dada instalação hidráulica apresenta a seguinte equação da curva característica da instalação (CCI): $H_S = 10 + 16200*Q^2 + 129600*Q^2$, onde as parcelas $16200*Q^2$ e $129600*Q^2$ representam respectivamente a tubulação antes e depois da bomba, onde a carga H_S é dada em m e a vazão Q dada em m^3/s.

Sabendo-se que a vazão desejada é 72 m^3/h e que se utilizou um coeficiente de segurança de 10%, pede-se especificar a bomba adequada a partir do diagrama de blocos dado a seguir:

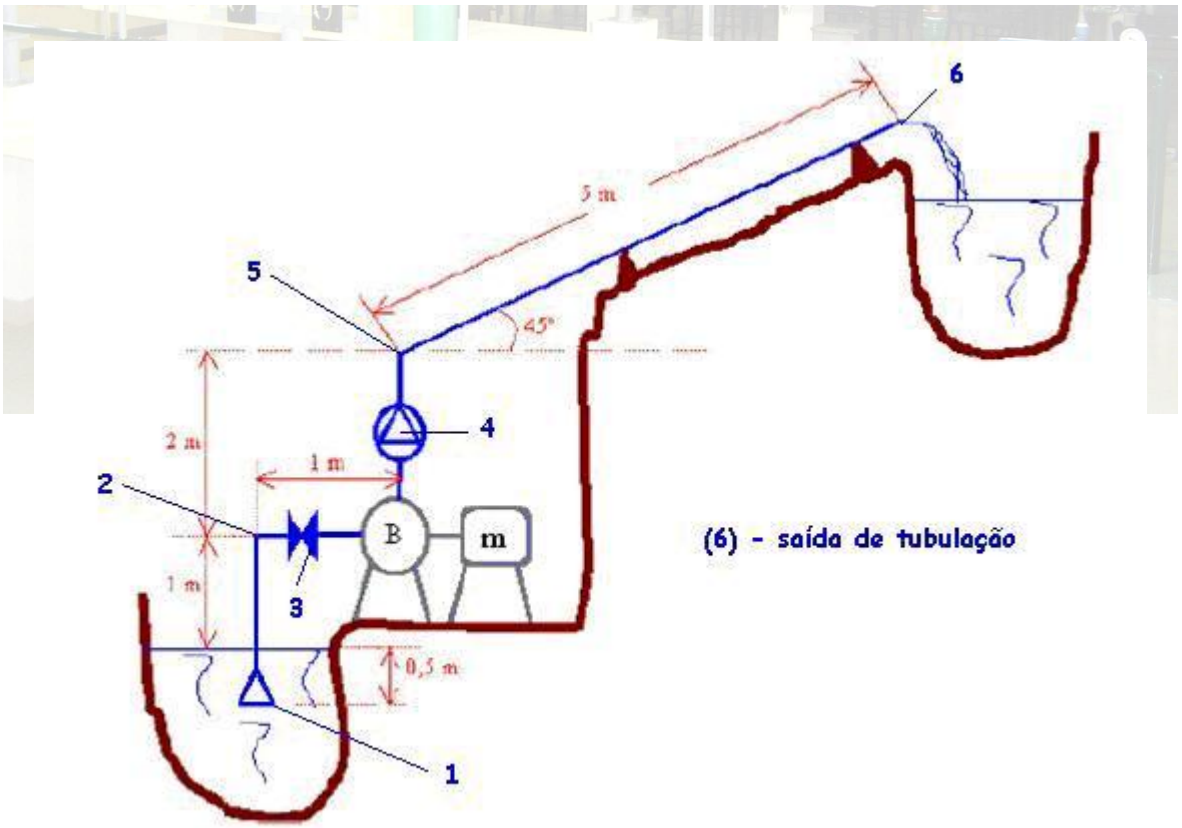


3º Para a instalação esquematizada abaixo, adotou-se um único diâmetro nominal para a tubulação de aço, que têm a espessura 40. Sabendo-se que o diâmetro nominal é 1" ½, pede-se:

a) Através da legenda das singularidades, marca-las no desenho
b) A carga estática da instalação;
c) A somatória dos comprimentos equivalentes;
d) A pressão na entrada da bomba para a vazão de 2,0 l/s ;
e) A equação da CCI;
f) O NPSH disponível para a vazão de 2,0 l/s;
g) Em relação à tubulação de sucção você faria algum comentário.

Dados: $\begin{cases} g = 9{,}8\,\dfrac{m}{s^2} \rightarrow p_{atm} = 760 \cdot mmHg \rightarrow \gamma_{H_2O} = 10^3\,\dfrac{Kgf}{m^3} \\ f = 0{,}02 \rightarrow p_{vapor} = 0{,}0268\,\dfrac{Kgf}{cm^2}(abs) \end{cases}$

(1) - Válvula de pé ;
(2) - Joelho de 90° ;
(3) - Válvula globo aberta;
(4) - Válvula de retenção com portinhola;
(5) - Joelho de 45° .



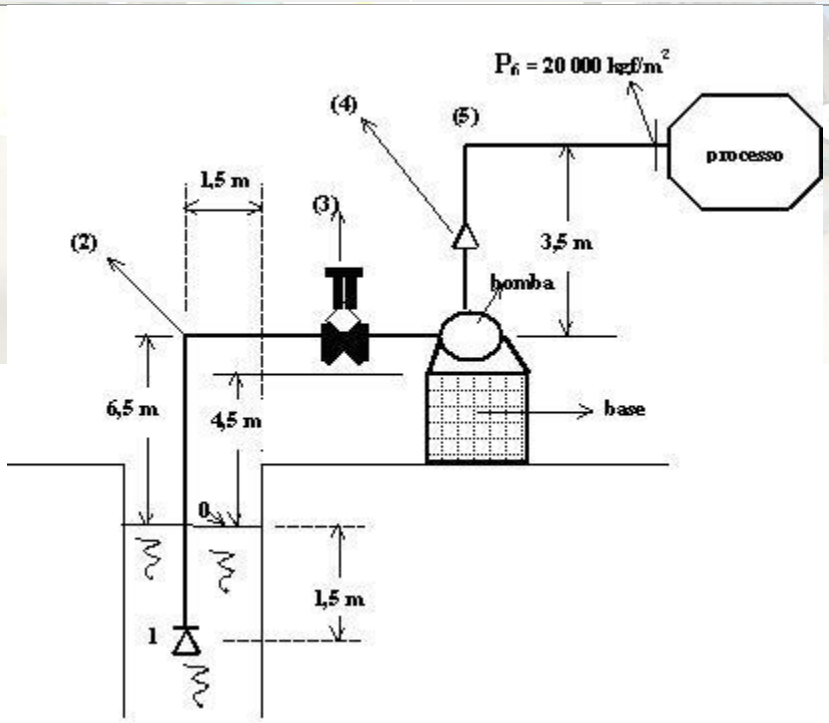
4º - Considerando a instalação hidráulica representada a seguir, pede-se a equação da CCI (curva característica da instalação).

Dados:

$L_{sucção}$ = 40 m; $L_{recalque}$ = 10 m; $f_{sucção}$ = $f_{recalque}$ = 0,025; (6) – seção final da instalação; $D_{sucção}$ = $D_{recalque}$ = 38mm; peso específico = 850 Kgf/m^3; g = 9,8 m/s^2; p_{vapor} = 580 Kgf/m^2 (abs) e leitura barométrica igual a 700 mm Hg.

Observação: considera-se que o tamanho da bomba hidráulica é desprezível em relação a instalação hidráulica considerada.

Singularidade	Comprimento equivalente
	D = 38 mm
(1)	11,6
(2) e (5)	1,3
(3)	13,4
(4)	3,2



A resolução deste exercício pode ser observada no sítio:

http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/resolucao_do_item_a.htm

Nota:

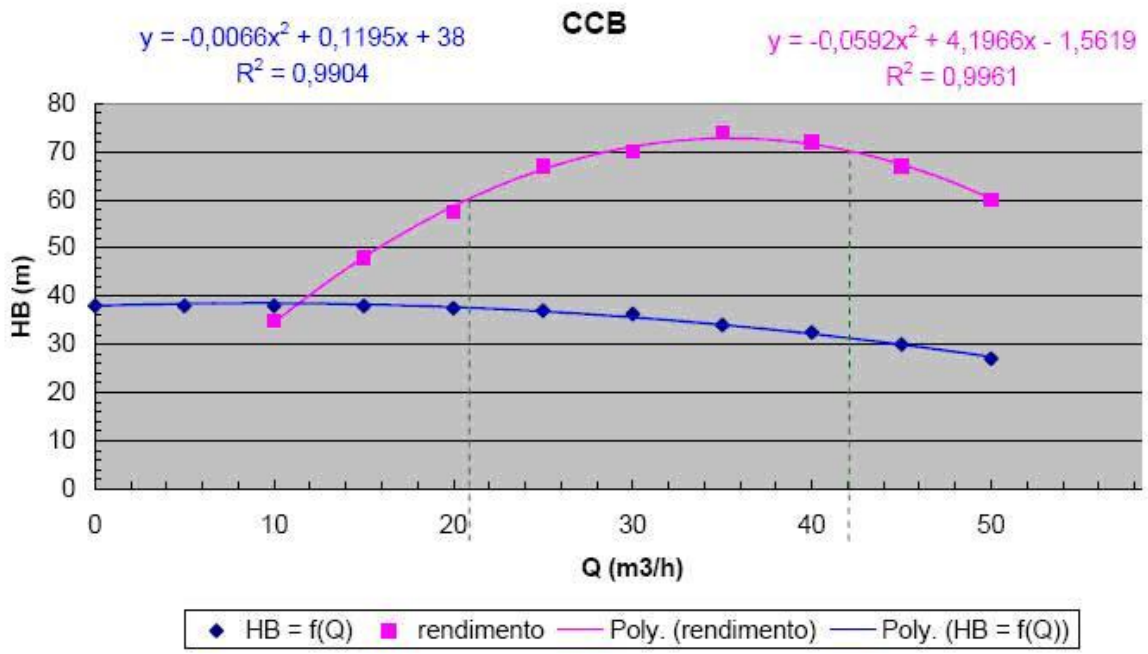
Apesar da curva característica da bomba (CCB) ter o seu ponto de "shutoff", não se deve trabalhar em toda a sua região.

Considera-se que a bomba escolhida tenha parte da sua CCB representada pela tabela e gráfico a seguir:

Q (m³/h)	H_B (m)	η_B (%)
0	38	
5	38	
10	38	35
15	38	48
20	37,5	57,5
25	37	67
30	36,3	70
35	34	74
40	32,5	72
45	30	67
50	27	60

Observa-se que para o rendimento máximo (74%) se tem o que o fabricante denomina de PONTO DE PROJETO DO FABRICANTE, ou seja, a vazão e a carga manométrica da bomba, que para o exemplo é representado por 35 m³/h e 34 m respectivamente.

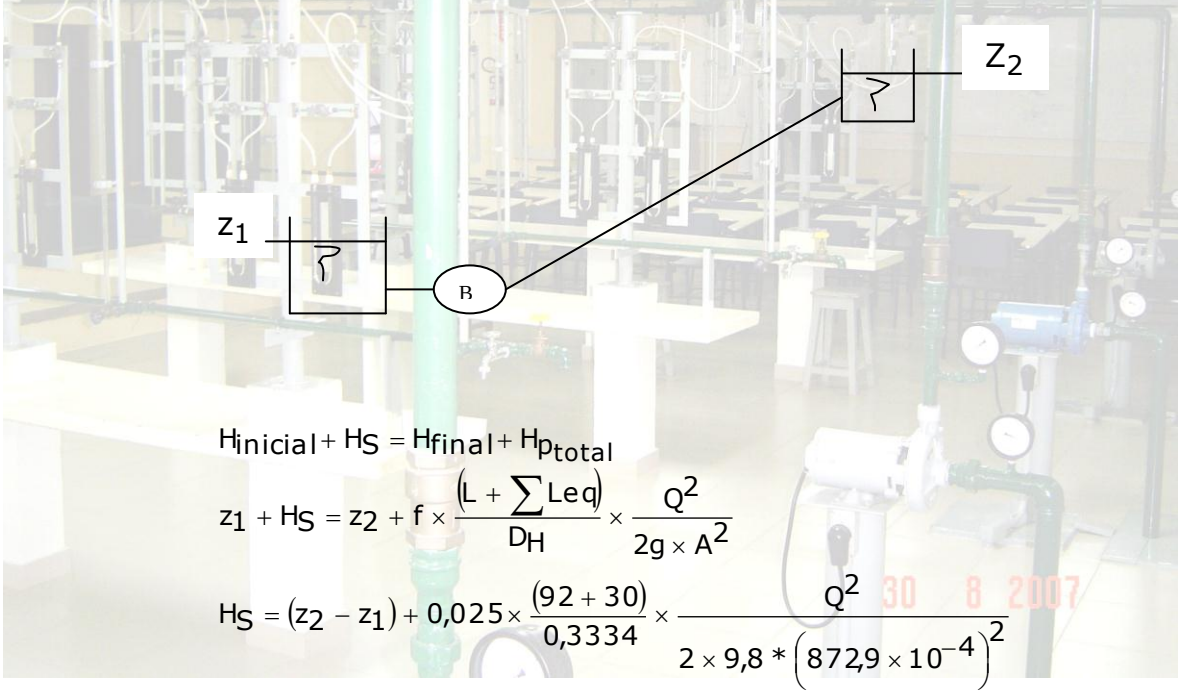
É recomendável (ou praticamente ideal) que a bomba opere com a vazão na faixa de cerca de 60% a 120% da vazão de projeto do fabricante. Para o exemplo seria de 21 m³/h a 42 m³/h.



Para vazões inferiores a 60% da vazão de projeto do fabricante, tem-se já o problema de RECIRCULAÇÃO e para vazões superiores a 120% da vazão de projeto do fabricante, tem-se maior probabilidade de cavitação.

"Estar continuamente se preparando, manter-se atualizado e observar o que há de novo são os preços a pagar pela excelência. Ela se constrói muito a partir do inconformismo, da eterna insatisfação, da seção eterna de achar que o trabalho pode levá-lo mais adiante. Acredito piamente que é preciso criar situações de desconforto para tirar o melhor das pessoas." - página 199 do livro - Bernardinho - Transformando Suor em Ouro - editado pela Sextante – 2006

5º A água é bombeada entre dois reservatórios interligados por uma tubulação de aço 40 com diâmetro nominal de 14" (D_{int} = 333,4 mm e A = 872,9 cm²), com comprimento (L) igual a 92 m, com coeficiente de perda distribuída (f) igual a 0,025 e somatória de comprimento equivalente (ΣLeq) igual a 30 m. Sabendo que a curva característica da bomba escolhida tem a CCB representada pela equação: $H_B = 22{,}9 + 10{,}7Q - 111Q^2$, onde a carga manométrica (H_B) está em metros e a vazão (Q) em m³/s, pede-se determinar a vazão e a carga manométrica do ponto de trabalho para uma variação de cota ($z_2 - z_1$) igual a 22,5 m.



$$H_{inicial} + H_S = H_{final} + H_{p_{total}}$$

$$z_1 + H_S = z_2 + f \times \frac{\left(L + \sum Leq\right)}{D_H} \times \frac{Q^2}{2g \times A^2}$$

$$H_S = (z_2 - z_1) + 0{,}025 \times \frac{(92 + 30)}{0{,}3334} \times \frac{Q^2}{2 \times 9{,}8 * \left(872{,}9 \times 10^{-4}\right)^2}$$

$$H_S = 22{,}5 + 61{,}26Q^2 \rightarrow \text{com } H_S \text{ em "m" e } Q \text{ em "} m^3/s \text{"}$$

No ponto de trabalho, tem o cruzamento da CCB com a CCI, ou seja,

$$H_B = H_S \therefore 22{,}9 + 10{,}7Q - 111Q^2 = 22{,}5 + 61{,}26Q^2 \Rightarrow 172{,}26Q^2 - 10{,}7Q - 0{,}4 = 0$$

$$Q = \frac{10{,}7 + \sqrt{(-10{,}7)^2 - 4 \times 172{,}26 \times (-0{,}4)}}{2 \times 172{,}26} \cong 0{,}0884 \frac{m^3}{s} = 88{,}4 \frac{l}{s}$$

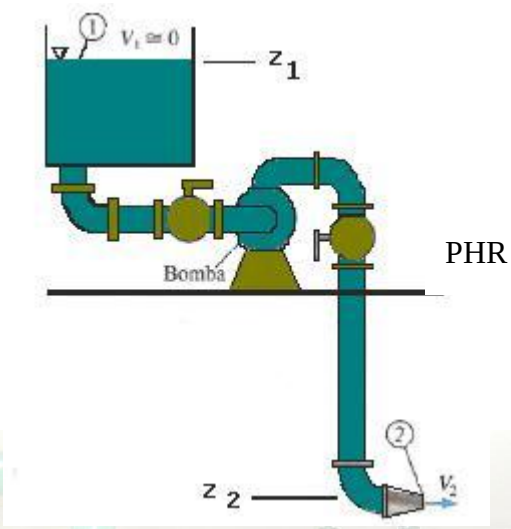
$$\therefore H_B = 22{,}9 + 10{,}7 \times 0{,}0884 - 111 \times 0{,}0884^2 \cong 23m$$

6º Sabendo-se que a velocidade econômica para a instalação anterior está compreendida entre 0,9 e 2,2 m/s, verifique se a tubulação foi bem dimensionada.

$$Q = v \times A \Rightarrow 0{,}0884 = v \times 872{,}9 \times 10^{-4} \therefore v \cong 1{,}01 \frac{m}{s}$$

Como a velocidade calculada encontra-se na faixa da velocidade econômica, pode-se afirmar que a tubulação foi dimensionada adequadamente.

7º A curva característica da bomba (CCB) que opera a instalação a seguir pode ser representada pela equação $H_B = 17{,}6 - 1{,}1834 \times Q^2$, com H_B em m e Q em m³/h. Sabendo que a instalação de bombeamento tem um único diâmetro, que no caso é de aço 40 com diâmetro nominal de 1" ($D_{int} = 26{,}6\,mm$ e $A = 5{,}57\,cm^2$), que o coeficiente de perda de carga localizada na saída do reservatório é igual a 0,50, que cada válvula tem o coeficiente de perda de carga localizada igual a 2,4, e cada um dos três cotovelos tem o coeficiente de perda de carga localizada igual a 0,90 e que a contração na saída tem o coeficiente de perda de carga localizada igual a 0,15 e que a mesma reduz o diâmetro em um fator de 0,6 (60% do diâmetro do tubo), que a tubulação tem um comprimento de 6,7 m, que a diferença de elevação ($z_1 - z_2$) é de 4,6 m e considerando que o coeficiente de perda de carga distribuída médio é igual a 0,022, pede-se determinar o ponto de trabalho.



$$H_{inicial} + H_S = H_{final} + H_{p_{total}}$$

$$z_1 + H_S = z_2 + \frac{Q^2}{2 \times 9{,}8 \times \left[\frac{\pi \times (0{,}6 \times 0{,}0266)^2}{4}\right]^2} + 0{,}022 \times \frac{(6{,}7)}{0{,}0266} \times \frac{Q^2}{2 \times 9{,}8 \times (5{,}57 \times 10^{-4})^2} +$$

$$(0{,}50 + 2 \times 2{,}4 + 3 \times 0{,}90) \times \frac{Q^2}{2 \times 9{,}8 \times (5{,}57 \times 10^{-4})^2} + 0{,}15 \times \frac{Q^2}{2 \times 9{,}8 \times \left[\frac{\pi \times (0{,}6 \times 0{,}0266)^2}{4}\right]^2}$$

$$H_S = (z_2 - z_1) + 1274772{,}3Q^2 + 911274{,}9Q^2 + 1315599{,}0Q^2 + 1912158Q^2$$

$$H_S = -4{,}6 + 36928620Q^2 \rightarrow \text{com } H_S \text{ em "m" e } Q \text{ em "} m^3/s \text{"}$$

ou

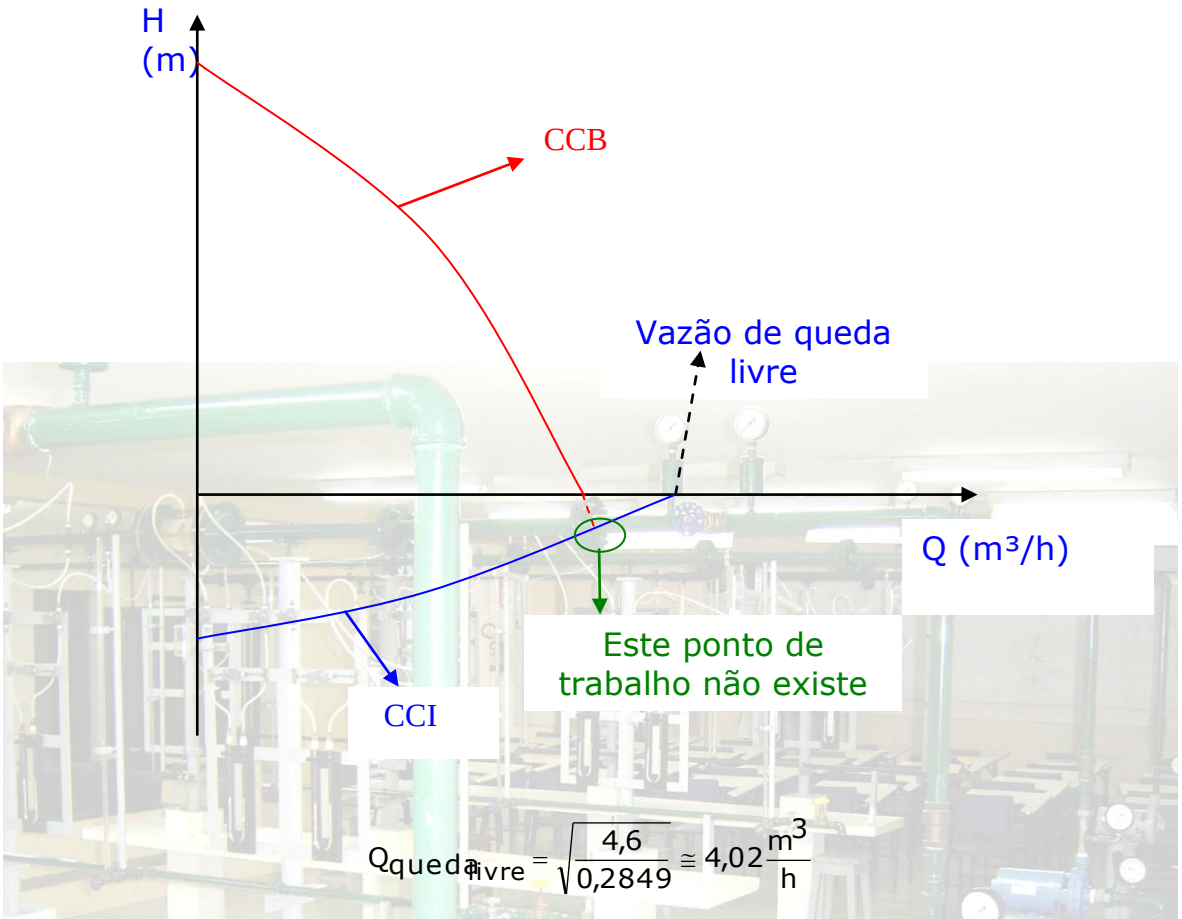
$$H_S = -4{,}6 + \frac{36928620}{3600^2}Q^2 = -4{,}6 + 0{,}2849Q^2 \text{ com } H_S \text{ em "m" e } Q \text{ em "} m^3/h \text{"}$$

No ponto de trabalho, tem o cruzamento da CCB com a CCI, ou seja,

$$17{,}6 - 1{,}1834Q^2 = -4{,}6 + 0{,}2849Q^2 \therefore Q = \sqrt{\frac{17{,}6 + 4{,}6}{0{,}2849 + 1{,}1834}} \cong 3{,}89\frac{m^3}{h}$$

$$H_B = 17{,}6 - 1{,}1834 \times 3{,}89^2 \cong -0{,}292m$$

O valor negativo da carga manométrica da bomba comprova que a mesma não está operando como bomba para as condições da instalação, isto também pode ser observado no diagrama a seguir.



$$Q_{queda\ livre} = \sqrt{\frac{4,6}{0,2849}} \cong 4,02\frac{m^3}{h}$$

Como a vazão de queda livre é maior do que a máxima vazão obtida com o "funcionamento" da bomba, isto comprova que a mesma não consegue operar como bomba na instalação dada.

8º O diâmetro da tubulação foi bem dimensionado, considere que a velocidade econômica para a instalação anterior está compreendida entre 0,9 e 2,2 m/s

$$Q = v \times A \Rightarrow \frac{4,02}{3600} = v \times 5,57 \times 10^{-4} \therefore v \cong 2,0\frac{m}{s}$$

Como a velocidade calculada encontra-se na faixa da velocidade econômica, pode-se afirmar que a tubulação foi dimensionada adequadamente.