

ESCOLHA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

Carlos Rogério de Mello¹
Tadayuki Yanagi Jr.²

1. Introdução

Com a evolução dos processos produtivos agrícolas, demonstrada principalmente pela presença cada vez maior da irrigação e a crescente demanda por água, acompanhada pela sua escassez (distâncias cada vez maiores), há necessidade de projetar instalações que possam proporcionar fornecimento de água com maior rapidez e eficiência. Sendo assim, a presença de bombas hidráulicas num projeto de irrigação ou abastecimento de água para pequenas comunidades, é de suma importância, e o conhecimento das partes fundamentais ao seu bom funcionamento merece a devida atenção e cuidado.

Bombas hidráulicas são máquinas de fluxo, cuja função é fornecer energia para a água, a fim de recalá-la (elevá-la), através da conversão de energia mecânica de seu rotor proveniente de um motor a combustão ou de um motor elétrico. Desta forma, as bombas hidráulicas são tidas como máquinas hidráulicas geradoras.

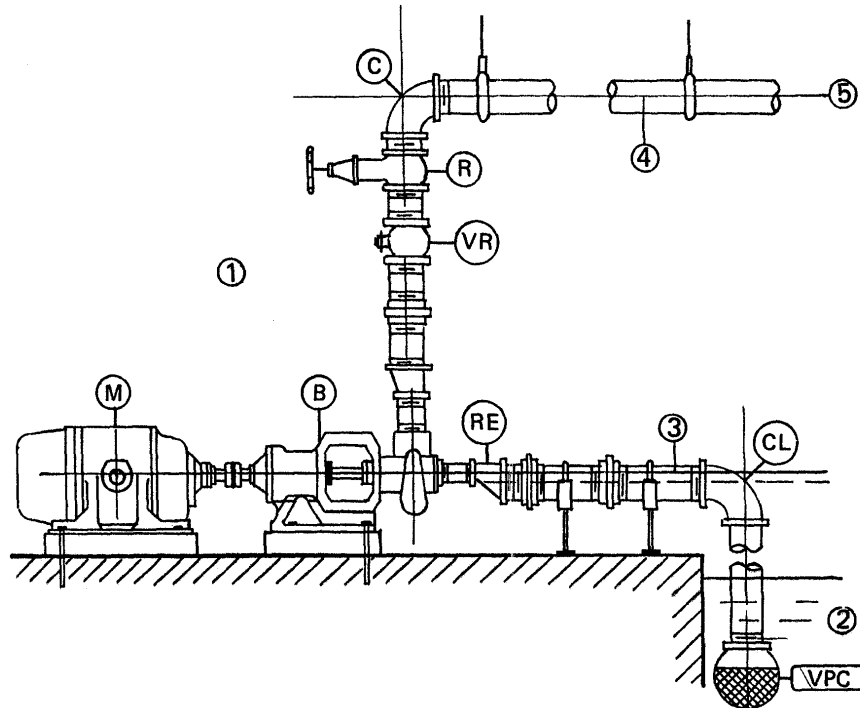
O objetivo deste trabalho é transmitir aos profissionais da área agrícola algum conhecimento básico e prático sobre instalações elevatórias, possibilitando, desta forma, o acompanhamento e/ou desenvolvimento de projetos simples e eficientes de bombeamento, que é algo extremamente importante dentro da hidráulica agrícola, mas que pode se tornar penoso, caso não seja bem estruturado.

1. Engenheiro Agrícola, R. Cristiano Silva, 140. Lavras, MG, 37.200-000.

2. Eng. Agríc., M.Sc., Professor do Departamento de Ciências Exatas da UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Caixa Postal 37, Campus Universitário, Lavras, MG, 37.200-000.

2. Partes Principais de uma Instalação de Bombeamento

A Figura 1 ilustra as partes principais de uma instalação de bombeamento



Legenda:

1- Casa de Bombas
M – Motor de acionamento
B – Bomba
2 – Poço (fonte)
3 – Linha de Sucção
VPC - Válvula de pé com crivo

RE - Redução Excêntrica
CL - Curva de 90°
4 - Linha de Recalque
VR - Válvula de retenção
R - Registro
C - Joelhos
5 - Reservatório

FIGURA 1- Representação das partes de uma instalação.

3. Classificações mais importantes de Bombas Hidráulicas

3.1. Quanto à trajetória do fluido

- a) Bombas radiais ou centrífugas: sua característica básica é trabalhar com pequenas vazões a grandes alturas, com predominância de força centrífuga; são as mais utilizadas atualmente.
- b) Bombas axiais: trabalha com grandes vazões a pequenas alturas.
- c) Bombas diagonais ou de fluxo misto: caracterizam-se pelo recalque de médias vazões a médias alturas, sendo um tipo combinado das duas anteriores.

3.2. Quanto ao posicionamento do eixo

- a) Bomba de eixo vertical: utilizada em poços subterrâneos profundos.
- b) Bomba de eixo horizontal: é o tipo construtivo mais usado.

3.3. Quanto à posição do eixo da bomba em relação ao nível da água

- a) Bomba de sucção positiva: quando o eixo da bomba situa-se acima do nível do reservatório.
 - b) Bomba de sucção negativa ("afogada"): quando o eixo da bomba situa-se abaixo do nível do reservatório.
-

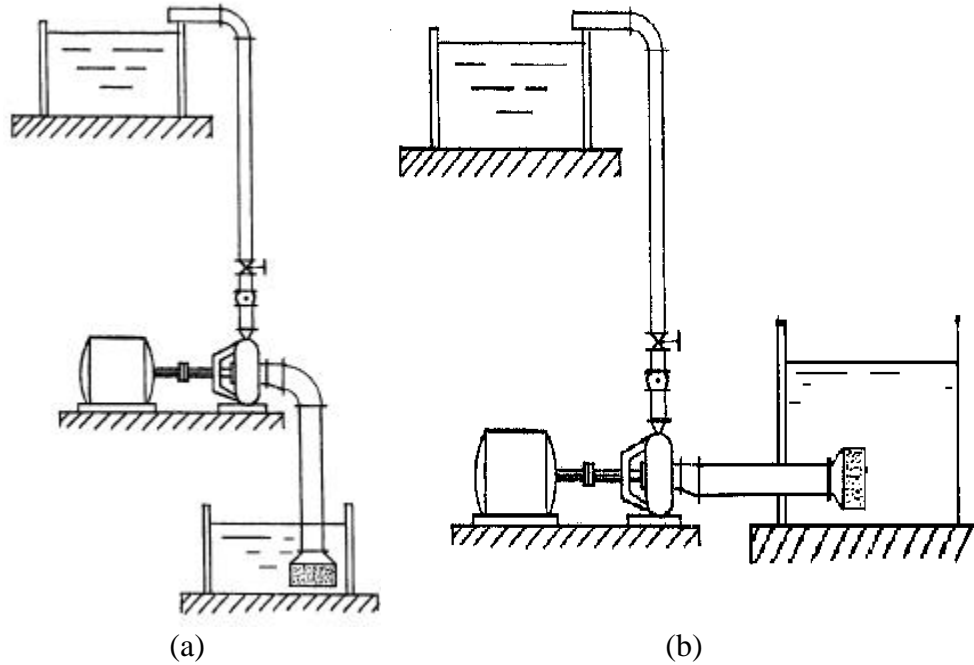


FIGURA 2 - Classificação das bombas com relação à posição do eixo em relação ao nível d'água.

4. Perda de Carga e Altura Manométrica

4.1. Altura Manométrica da Instalação

É definida como sendo a altura geométrica da instalação mais as perdas de carga ao longo da trajetória do fluxo. Altura geométrica é a soma das alturas de sucção e recalque. Fisicamente, é a quantidade de energia hidráulica que a bomba deverá fornecer à água, para que a mesma seja recalçada a uma certa altura, vencendo, inclusive, as perdas de carga.

A altura manométrica é descrita pela seguinte equação:

$$H_m = H_G + h_f \quad (1)$$

sendo H_m = altura manométrica da instalação (m);
 H_G = altura geométrica (m);
 h_f = perda de carga total (m) .

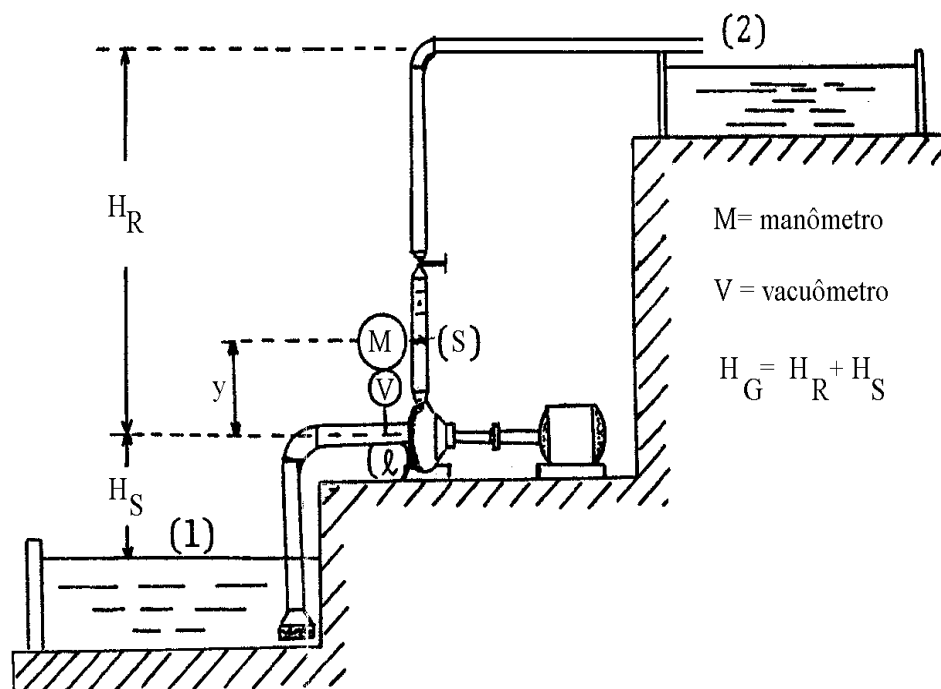


FIGURA 3 - Representação das alturas de sucção e recalque em uma instalação.

4.2. Perda de Carga

Perdas de carga referem-se à energia perdida pela água no seu deslocamento por alguma tubulação. Essa perda de energia é provocada por atritos entre a água e as paredes da tubulação, devido à rugosidade da mesma. Portanto, ao projetar uma estação de bombeamento, deve-se considerar essa perda de energia.

São classificadas em 2 tipos:

- Perdas de carga contínuas: São aquelas relativas às perdas ao longo de uma tubulação, sendo função do comprimento, material e diâmetro.
- Perdas de carga acidentais: São aquelas proporcionadas por elementos que compõem a tubulação, exceto a tubulação propriamente dita. Portanto, são perdas de energia observadas em peças como, curvas de 90° ou 45°, registros, válvulas, luvas, reduções e ampliações.

Para o cálculo da perda de carga total, normalmente trabalha-se com o método dos comprimentos equivalentes, ou seja, através de tabelas, convertendo-se a perda acidental em perda de carga equivalente a um determinado comprimento de tubulação. Isso significa que, ficticiamente, seria como substituir, por exemplo, uma curva de 90° por um comprimento de tubo, e a perda de carga contínua nesse comprimento equivale à perda localizada na curva.

Matematicamente, define-se perda de carga como sendo:

$$hf_{1-2} = J \cdot L_e \quad (2)$$

sendo

hf_{1-2} = perda de carga entre os pontos 1 e 2 de uma instalação (m);

J = perda de carga unitária (m/m);

L_e = comprimento equivalente da tubulação (Tabela 1).

Tabela 1

Existem vários métodos para o cálculo de perda de carga unitária; entre esses, destaca-se pela simplicidade e facilidade de uso, o Método de Hazen-Williams, que é feito através da seguinte expressão:

$$J = \left[\frac{4 \cdot Q}{0,355 \cdot \pi \cdot C \cdot D^{2,63}} \right]^{1,852} \quad (3)$$

sendo Q = vazão (m^3/s);
 C = constante adimensional de Hazen-Williams (Tabela 2);
 D = diâmetro interno da tubulação (m);

Tabela 2 - Valores de C (Hazen-Williams) para diversos materiais.

| | Tubos | Valores de C |
|----|--|---------------------|
| 1 | Aço corrugado | 60 |
| 2 | Aço com juntas "lock-bar", novos | 135 |
| 3 | Aço galvanizado (novos e em uso) | 125 |
| 4 | Aço rebitado, novos | 110 |
| 5 | Aço rebitado, em uso | 85 |
| 6 | Aço soldado, novos | 120 |
| 7 | Aço soldado, em uso | 90 |
| 8 | Aço soldado com revestimento especial (novos e em uso) | 130 |
| 9 | Chumbo | 130 |
| 10 | Cimento amianto | 135 |
| 11 | Cobre | 130 |
| 12 | Concreto - acabamento liso | 130 |
| 13 | Concreto - acabamento comum | 120 |
| 14 | Ferro fundido, novos | 130 |
| 15 | Ferro fundido, em uso | 90 |
| 16 | Ferro fundido, tubos revestidos de cimento | 110 |
| 17 | Grês cerâmico vidrado (manilhas) | 110 |
| 18 | Latão | 130 |
| 19 | Madeira, em aduelas | 120 |
| 20 | Tijolos, condutos com revestimento de cimento alisado | 100 |
| 21 | Vidro | 140 |

5. Curvas Características

A figura 4 apresenta um gráfico de pré-seleção de bombas de uma determinada marca, a partir do qual o usuário tem uma idéia de quais catálogos consultar a respeito da seleção propriamente dita, locando o ponto de trabalho neste gráfico e determinando qual a "família" ideal de bombas.

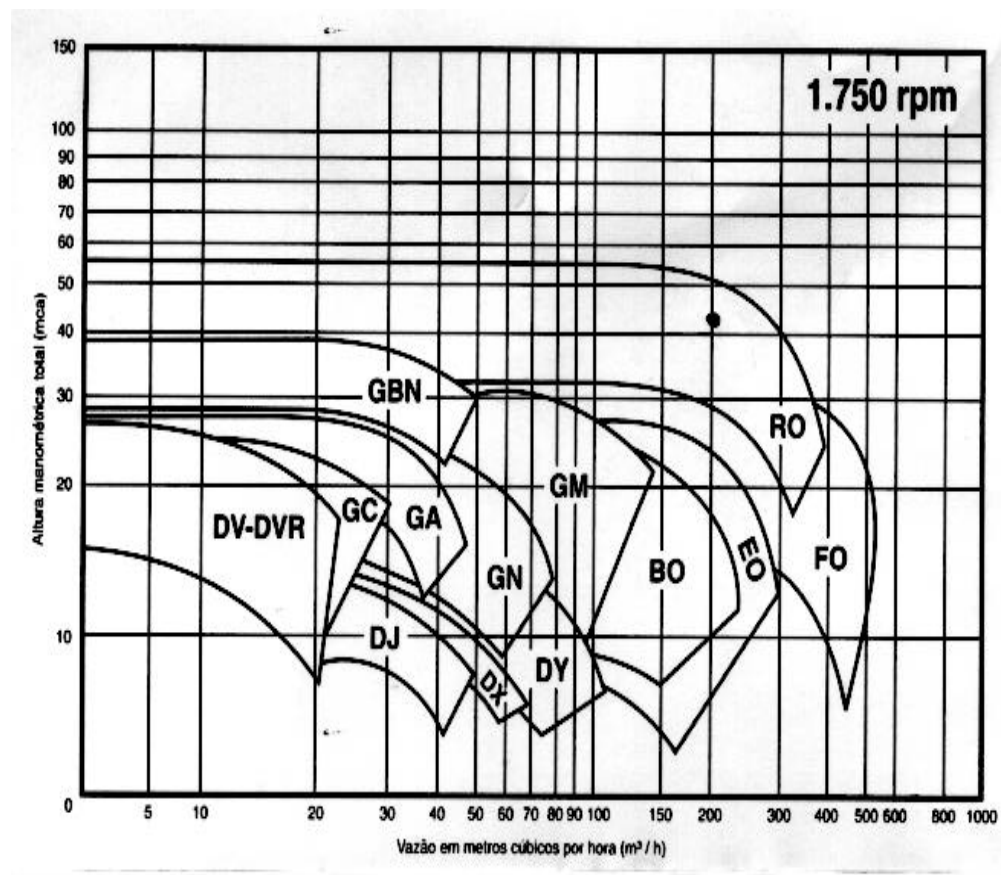


FIGURA 4 - Representação de um gráfico de pré-seleção de bombas.

5.1. Curvas Características da Bomba

Quando se trabalha com estas curvas, têm-se graficamente as variáveis altura manométrica (H_m), rendimento (η) e $NPSH_{requerido}$ em função da vazão. As curvas de rendimento e altura manométrica podem ser criadas em gráficos separados ou em um único gráfico, dependendo do fabricante. Essas três variáveis caracterizam as condições de funcionamento de uma bomba. Tais gráficos são plotados pelos fabricantes e publicados na forma de catálogos, utilizando-se resultados de testes realizados em laboratório. Para bombas centrífugas, estes gráficos possuem a seguinte forma:

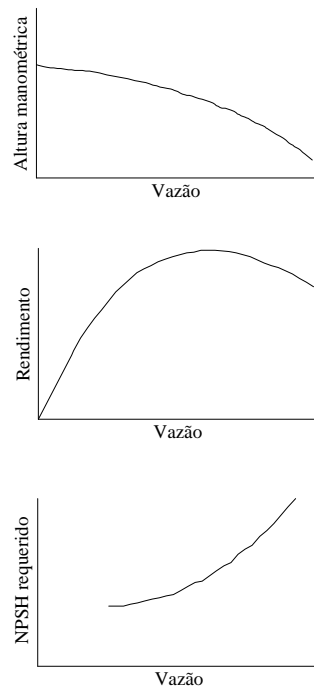


FIGURA 5- Curvas características de bombas centrífugas.

5.2. Curva do Sistema

A curva do sistema, também conhecida como curva da tubulação, é uma curva traçada no gráfico $H_m \times Q$ e sua importância está na determinação do ponto de trabalho da bomba, pois esse é obtido no encontro dessa curva com a curva característica da bomba.

Para traçá-la, é necessário retornar à definição de altura manométrica, fazendo com que a equação 1 tenha a forma $H_m = f(Q)$, através dos passos descritos a seguir. Assim, hf pode também ser definida pela equação:

$$hf = k \cdot Q^{1,852} \quad (4)$$

sendo:

$$k = Le \cdot \left[\frac{4}{0,355 \cdot \pi \cdot C \cdot D^{2,63}} \right]^{1,852} \quad (5)$$

ou seja, basta desmembrar a vazão da equação de Hazen-Williams da perda de carga unitária e multiplicar o comprimento equivalente pela outra parte da equação. Desta forma, a equação $H_m = f(Q)$, é a seguinte:

$$H_m = HG + K \cdot Q^{1,852} \quad (6)$$

Em um projeto de irrigação ou abastecimento, tem-se o conhecimento da vazão necessária e da altura manométrica (altura geométrica mais perdas de carga); a altura geométrica é a soma da altura de sucção com a altura de recalque. Assim, basta substituir esses pontos conhecidos, na equação acima, para encontrar k, completando a equação.

Definida a equação, constrói-se a curva do sistema, criando uma tabela de valores de vazão pela altura manométrica. Em seguida, plota-se os valores no gráfico $H_m \times Q$ e unindo-os, tem-se a curva do sistema.

Através do ponto de intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba, encontra-se o ponto de trabalho da bomba que, na maioria das vezes, é diferente do ponto proveniente do projeto. A solução para este problema é apresentada em um exemplo de projeto de uma instalação no item 8.

6. CAVITAÇÃO

Cavitação é um fenômeno semelhante à ebulição, que pode ocorrer na água durante um processo de bombeamento, provocando estragos, principalmente no rotor e palhetas e é identificado por ruídos e vibrações. Para evitar tal fenômeno, devem-se analisar o $NPSH_{requerido}$ e o $NPSH_{disponível}$.

7. NPSH requerido e NPSH disponível

O NPSH (Net Positive Suction Head) disponível refere-se à "carga energética líquida e disponível na instalação" para permitir a sucção do fluido, ou seja, diz respeito às grandezas físicas associadas à instalação e ao fluido.

Esse NPSH deve ser estudado pelo projetista da instalação, através da seguinte expressão:

$$NPSH_{disponível} = H_{atm} - (\pm H_s - H_v + \Delta H_s) \quad (7)$$

Sendo: $NPSH_{disponível}$ = energia disponível na instalação para sucção, em m;

H_{atm} = pressão atmosférica local (Tabela 3);

H_s = altura de sucção; é negativa quando a bomba está afogada, e positiva quando estiver acima do nível d'água (m);

H_v = pressão de vapor do fluido em função da sua temperatura (Tabela 4);

ΔH_s = perda de carga total na linha de sucção (m).

O $NPSH_{requerido}$ é a "carga energética líquida requerida pela bomba" para promover a sucção. Esse NPSH é objeto de estudo do fabricante, sendo fornecido graficamente através de catálogos.

Observa-se, portanto, que a energia disponível na instalação para sucção deve ser maior que a energia requerida pela bomba, logo $NPSH_{disponível} \geq NPSH_{requerido}$. Caso contrário, haverá cavitação em decorrência de uma sucção deficiente.

TABELA 3 - Pressão atmosférica em função da altitude.

| Altitude (m) | Pressão atmosférica (m) |
|--------------|-------------------------|
| 0 | 10,33 |
| 300 | 9,96 |
| 600 | 9,59 |
| 900 | 9,22 |
| 1200 | 8,88 |
| 1500 | 8,54 |
| 1800 | 8,20 |
| 2100 | 7,89 |
| 2400 | 7,58 |
| 2700 | 7,31 |
| 3000 | 7,03 |

TABELA 4 -Pressão de vapor da água, em m, para diferentes temperaturas.

| Temperatura °C | Peso específico γ (kN/m³) | Pressão de Vapor (m) |
|-----------------------|---|-----------------------------|
| 15 | 9,798 | 0,17 |
| 20 | 9,789 | 0,25 |
| 25 | 9,777 | 0,33 |
| 30 | 9,764 | 0,44 |
| 40 | 9,730 | 0,76 |
| 50 | 9,689 | 1,26 |
| 60 | 9,642 | 2,03 |
| 70 | 9,589 | 3,20 |
| 80 | 9,530 | 4,96 |
| 90 | 9,466 | 7,18 |
| 100 | 9,399 | 10,33 |

8. Exemplo de dimensionamento de uma instalação de bombeamento

Dimensionar uma instalação de bombeamento, para atender a demanda de $200\text{m}^3/\text{h}$ de vazão durante 24 hs/dia, recalçando a uma altura de 24m. A composição das linhas de sucção e recalque é a seguinte:

| Quant. | Sucção | Quant. | Recalque |
|--------|--------------------------|--------|----------------------------|
| 01 | Válvula de pé com crivo | 01 | Válvula de retenção |
| 01 | curva de 90° | 03 | curvas de 90° |
| 6 m | tubulação de sucção (Ls) | 02 | curvas de 45° |
| 2 m | altura de sucção (Hs) | 01 | registro de gaveta |
| | | 01 | saída da canalização |
| | | 1000 m | tubulação de recalque (Lr) |
| | | 24 m | altura de recalque (Hr) |

Dimensionamento

a) Dimensionamento da linha

O critério a ser utilizado para escolha de diâmetros de tubulações é o critério de velocidade econômica, por ser simples e eficiente, e segundo muitos autores, seu valor deve variar de 0,5 a 2,0 m/s. Para determinar o diâmetro a partir deste critério, procede-se da seguinte forma, utilizando-se a relação abaixo:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

em que V é a velocidade (m/s); Q é a vazão (m³/s); A é a área da seção do tubo, sendo determinada por:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (9)$$

Substituindo a velocidade por um valor entre 0,5 e 2,0m/s, isola-se matematicamente a expressão 9 em função do diâmetro. A partir do valor calculado, usa-se o diâmetro comercial imediatamente acima para a tubulação de sucção, e o diâmetro comercial imediatamente abaixo no recalque. Sendo assim, adotando-se uma velocidade média de 1,5m/s, tem-se, a partir da equação 8:

$$1,5 = \frac{0,0556}{A} \Rightarrow A = 0,0371\text{m}^2 . \text{ Isolando D na equação 9, obtém-se:}$$

$$0,0371 = \frac{(3,14 \cdot D^2)}{4} \Rightarrow D = 0,217 \text{ m} = 217\text{mm}.$$

Valor comercial acima = 250 mm \Rightarrow diâmetro da sucção (Tabela 1).

Valor comercial abaixo = 200mm \Rightarrow diâmetro do recalque (Tabela 1).

c) Escolha da Bomba

- Traçado da curva do sistema
 - Cálculo das perdas de carga
-

Sucção (Diâmetro = 250 mm)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Comprimento da Tubulação (Ls) | 6m |
| anexões | Comprimento equivalente (L_{equivalente}) |
| válvula de pé com crivo | 65m |
| curva de 90° | 4,1m |
| Comprimento total: | 69,1m |
| Comprimento equivalente total: | 75,1m |

Utilizando-se a equação de Hazen-Williams, obtém-se a perda de carga na linha de sucção:

C= 130 (Tabela 2)

$$hf = J \cdot L$$

$$J = \left[\frac{4 \cdot 0,0556}{0,355 \cdot \pi \cdot 130 \cdot 0,25^{2,63}} \right]^{1,852} = 5,26 \times 10^{-3} \text{ m/m}$$

$$hf_{\text{sucção}} = 5,25 \times 10^{-3} \cdot 75,1 = 0,4\text{m}$$

Recalque (Diâmetro = 200 mm)

Comprimento da tubulação (Lr) 1000m

| Conexões | Comprimento equivalente ($L_{\text{equivalente}}$) |
|--|--|
| válvula de retenção (leve) | 16,0m |
| 3 curvas de 90° | 3.(3,3)=9,9m |
| 2 curvas de 45° | 2.(1,5)=3,0m |
| registro de gaveta | 1,4m |
| saída da canalização | 6,0m |
| Comprimento total : | 36,3m |
| Comprimento equivalente total: 1036,3m | |

Utilizando-se a equação de Hazen-Williams, obtém-se a perda de carga na linha de recalque:

$$J = \left[\frac{4 \cdot 0,0556}{0,355 \cdot \pi \cdot 130 \cdot 0,20^{2,63}} \right]^{1,852} = 0,016 \text{ m/m}$$

$$hf_{\text{recalque}} = 0,016 \times 1036,3 = 16,1\text{m}$$

Para o cálculo da perda de carga total, ou seja, ao longo das linhas de sucção e recalque, utiliza-se a seguinte equação:

$$h_{f_{total}} = h_{f_{sucção}} + h_{f_{recalque}} \quad (10)$$

$$h_{f_{total}} = 0,4 + 16,1 = 16,5\text{m}$$

- **Equação do sistema**

A equação do sistema (equação 6), definida anteriormente é:

$$H_m = H_G + k \cdot Q^{1,852}$$

O cálculo da altura geométrica é realizado através da soma das alturas geométricas de sucção e de recalque, como pode ser verificado a seguir:

$$H_G = H_s + H_r = 2 + 24 = 26 \text{ m}$$

Logo, a altura manométrica, calculada pela equação 3, será:

$$H_m = 26 + 16,5 = 42,5\text{m}$$

Em seguida, calcula-se o coeficiente k da equação 6, através dos valores obtidos anteriormente.

$$42,5 = 26 + k \cdot (200)^{1,852} \Rightarrow k = 9,04 \times 10^{-4}$$

Desta forma, a equação do sistema será:

$$H_m = 26 + 9,04 \times 10^{-4} \cdot Q^{1,852}, \text{ sendo: } H_m \text{ em m e } Q \text{ em m}^3/\text{h}.$$

Com os dados H_m e Q , utiliza-se o gráfico de pré-seleção da página 9, encontrando-se a "família" de bombas RO, da marca MARK-PEERLESS, como sendo a mais adequada para a situação criada.

O modelo escolhido, compatível com o projeto, é a RO 16, com diâmetro do rotor de 310mm e rotação de 1750 rpm.

No gráfico (HmxQ) da curva característica, traça-se a curva do sistema, criando uma tabela com valores de vazão, encontrando-se a altura manométrica correspondente:

| Q(m³/h) | Hm (m) |
|---------------------------|---------------|
| 0 | 26 |
| 50 | 27,2 |
| 100 | 30,6 |
| 150 | 35,7 |
| 200 | 42,5 |
| 250 | 50,9 |
| 300 | 61,0 |

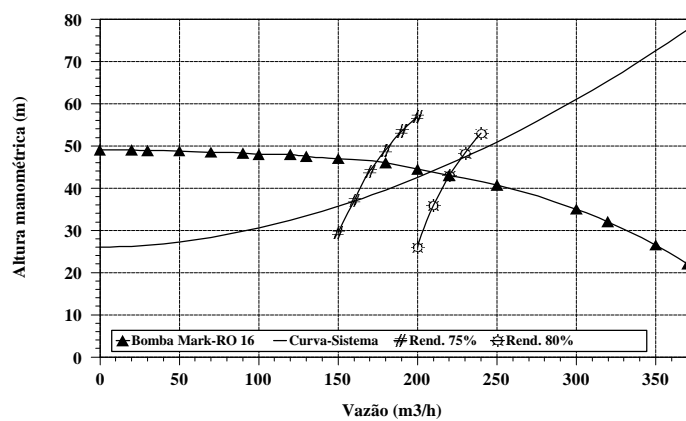
Através da Figura 6, observa-se que o ponto de trabalho da bomba é: Q=215 m³/h e Hm= 44 m. O ponto de projeto é: Q= 200m³/h e Hm=42,5m. Observa-se que há uma ligeira diferença, mas que pode ser contornada com um dos três procedimentos abaixo:

- Controlar a vazão com um Medidor de Vazão (válvula ou registro), reduzindo-a à quantidade desejada. Essa prática, apesar de mais usada, implica na introdução de perda de carga, o que reduziria a eficiência energética da instalação, havendo um consumo de energia além do necessário para este bombeamento.

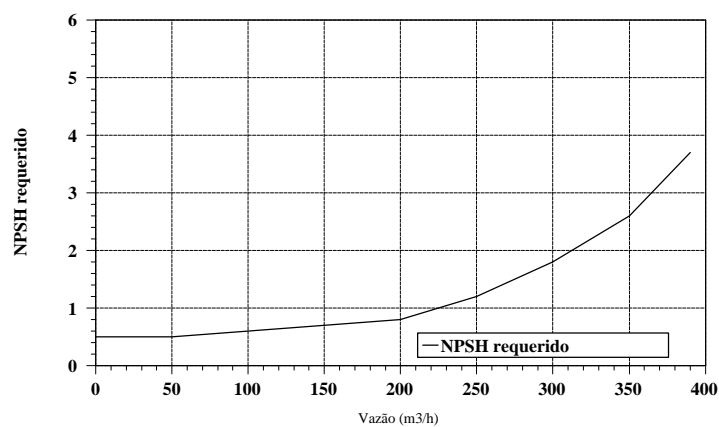
- Alterar o diâmetro do rotor, mantendo-se a rotação constante.

- Alterar a rotação do rotor, mantendo-se o diâmetro constante.

OBS.: Essas duas últimas práticas devem ser priorizadas.



(a)



(b)

FIGURA 6 - Curvas características da bomba Mark-Peerless, modelo RO 16 e curva do sistema usadas no exemplo de dimensionamento de uma instalação de bombeamento.

- **Para o cálculo da potência necessária, utiliza-se a seguinte fórmula:**

$$N = \left(\frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \right) \quad (11)$$

sendo: N = potência (CV);

γ = peso específico da água (1000 kg/m³);

Q = vazão (m³/s);

H = altura manométrica (m);

η = rendimento (decimal).

O rendimento é obtido através da curva característica (figura 6a), na qual toma-se o ponto de trabalho (Q,H), e aproximadamente obtém-se um rendimento de 77%. Aplicando-se a fórmula para o cálculo da potência, tem-se:

$$N = (1000 \cdot 0,0555 \cdot 42,5 / 75 \cdot 0,77) = 40,9 \text{ CV}$$

O motor comercial que satisfaz esse valor é de 45 CV, ou seja, o primeiro motor com potência igual ou maior ao valor calculado pela fórmula acima.

- **Cálculo do NPSH_{disponível} e do NPSH_{requerido}**

O NPSH_{requerido} deve ser obtido diretamente da curva característica correspondente, obtendo-o da mesma forma que no rendimento, logo: NPSH_{requerido} = 0,8m

O NPSH_{disponível} é calculado a partir da fórmula abaixo, sabendo-se que a pressão correspondente à altitude do local (900 m) é de 9,22x10³ kg/m² (0,922 atm) e a temperatura do fluido bombeado é de 20°C.

$NPSH_{\text{disponível}} = H_{\text{atm}} - H_s - H_v - \Delta H_s$; pois trata-se de sucção positiva.

$H_v = 0,25\text{m}$ (Tabela 4)

$H_{\text{atm}} = P_{\text{atm}}/\gamma \Rightarrow 9,22 \times 10^3 / 998,23 = 9,23\text{m}$ (Tabela 3)

$\Delta H_s = 0,4\text{m}$

$H_s = 2\text{m}$

$NPSH_{\text{disponível}} = 9,23 - 2 - 0,25 - 0,4 = 6,57\text{m}$

Como $NPSH_{\text{disponível}}$ (6,57 m) é maior que o $NPSH_{\text{requerido}}$ (0,8m), não haverá problemas de cavitação nesta instalação.

9. Bibliografia

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 7.ed. São Paulo: E. Blücher, 1991. v.1, 335p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: UFV/Impr. Univ., 1989. 596p.

BOMBAS HIDRÁULICAS MARK-PEERLESS. **Catálogo de Produtos**. São Bernardo do Campo, SP, 1996.

CARVALHO, D.F. **Instalações elevatórias: bombas**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG/FUMARC, 1977. 355p.

DENÍCULI, W. **Bombas hidráulicas**. Viçosa: UFV/Imprensa Universitária, 1993. 162p.
