

Curso Básico
de
Mecânica dos Fluidos
Unidade 7

Raimundo Ferreira Ignácio

Unidade 7 - Projeto de uma Instalação Hidráulica Básica

Na sua luta pela água o homem teve de procurar recursos para facilitar a sua obtenção.

As bombas hidráulicas no mundo atual são necessárias numa série de atividades do nosso cotidiano.

Heródoto (484-425 A.C.) foi o primeiro historiador a descrever um tipo de bomba. Arquimedes por volta de 250 A.C. inventou a bomba de parafuso e depois Ctesibius, em 120 A.C., construiu a primeira bomba empregada em navios.

Hero ou Heron, já na era cristã foi “discípulo” de Ctesibius.

A bomba centrífuga teve um de seus primeiros desenhos feito por Leonardo da Vinci (1452-1519).

James Watts, também introduziu certos melhoramentos, isto em 1736 à 1819.....

Como somos responsáveis pela criação de nossa história, convido a todos a “embarcar” nesta história e com persistência, dedicação e disciplina fazer com que ela também represente a criação de um mundo melhor.



Eu com o Manoel no laboratório e a nossa esquerda os conjuntos motobombas

Unidade 7 - Projeto de uma Instalação Hidráulica Básica

Objetivos:

1. Estabelecer as etapas básicas de um projeto.
2. Mostrar as maneiras comuns para o dimensionamento de uma tubulação.
3. Introduzir, tanto o conceito, como a equação da Curva Característica da Instalação (CCI).
4. Definir a vazão do projeto.
5. Mostrar a escolha preliminar de uma bomba hidráulica.
6. Conceituar o ponto de trabalho e mostrar a sua obtenção.
7. Introduzir o conceito de cavitação.
8. Mostrar como verificamos a existência ou não do fenômeno de cavitação.
9. Mostrar uma das maneiras de especificarmos o motor elétrico.
10. Mostrar o cálculo do custo de operação.

Sumário:

- 7.1 Introdução
- 7.2 Dimensionamento da tubulação
- 7.3 Esquema da Instalação
- 7.4 Curva característica da instalação (CCI)
 - 7.4.1 Definição da CCI
 - 7.4.2 Equação da CCI
- 7.5 Vazão de projeto
- 7.6 Escolha preliminar da bomba
- 7.7 Determinação do ponto de trabalho da bomba
- 7.8 Cavitação
- 7.9 Verificação do fenômeno de Cavitação
- 7.10 Especificação do motor elétrico
- 7.11 Cálculo do custo de operação
- 7.12 Exercícios

Objetivos da primeira aula da unidade 7:

Definir o que consideramos como instalação hidráulica básica.

Introduzir as etapas de um projeto de uma instalação hidráulica básica.

Mencionar os dados iniciais de um projeto.

Desenvolver a primeira etapa do projeto: dimensionamento da tubulação

Mencionar o porquê de se ter o esquema da instalação.

Desenvolver a teoria para obtenção da equação da Curva Característica da Instalação (CCI).

Especificar as condições, a partir da equação da CCI, para se ter um escoamento em queda livre.

Obter a expressão para o cálculo da vazão em queda livre.

Propor os exercícios de 7.12.1 a 7.12.10



Exemplos de instalações de recalque

7.1 Introdução

Nesta unidade, organizamos os conceitos já estudados e introduzimos alguns novos, com a finalidade de apresentarmos uma seqüência possível de execução do projeto de uma instalação hidráulica básica.

Consideramos uma instalação hidráulica básica, aquela que apresenta apenas uma entrada e uma saída, ou seja que opera com uma única vazão e que transporta água, ou fluidos similares à mesma. Para o transporte de fluidos com viscosidade relativamente superiores deve-se recorrer a certos ajustes, os quais não serão objetos desta unidade.

Desenvolvemos esta unidade, considerando uma instalação de recalque, onde desejamos no projeto da instalação desenvolver as seguintes etapas:

1ª → dimensionar as tubulações;

2ª → estabelecer um esquema da instalação;

3ª → obter a equação da curva característica da instalação;

4ª → estabelecer a vazão de projeto;

5ª → especificar a escolha preliminar da bomba;

6ª → obter o ponto de trabalho da bomba preliminarmente escolhida;

7ª → verificar o fenômeno de cavitação;

8ª → especificar o motor elétrico adequado;

9ª → especificar o custo de operação.

Ao iniciarmos um projeto de uma instalação de bombeamento, devemos conhecer os seguintes dados:

- vazão desejada → Q

- fluido e temperatura de escoamento → e com ela, obtemos o seu peso específico (γ) e a sua viscosidade, por exemplo à cinemática (ν)

- carga total na seção de captação → H_0

- carga total na seção terminal → H_{ST}

A partir destes dados, salientando que no desenvolvimento de um projeto jamais teremos uma única solução, nem regras fixas, daí o fato de não termos a pretensão de sermos o “dono da verdade”, ou seja a criatividade de cada um pode originar uma outra solução tão boa, ou até mesmo melhor a aqui apresentada.

7.2 Dimensionamento da Tubulação

Em função do fluido a ser transportado e da sua temperatura de escoamento, procura-se estabelecer o material da tubulação.

Apresentamos a seguir uma tabela que pode nos auxiliar nesta escolha porém deixamos claro que:

- 1 → dependendo da aplicação, considera-se outros fatores;
- 2 → os tubos de PVC hoje ganham espaço nas aplicações industriais;
- 3 → o objetivo de nosso trabalho é ser uma referência bibliográfica básica, o que equivale dizer que outras fontes devem ser consultadas¹;
- 4 → a tabela 7.1 fornece a faixa de velocidade recomendada, que é denominada de velocidade econômica.

FLUIDO (líquido)	Velocidade econômica (m/s)	Material da Tubulação
Água:		
- serviços gerais	0,9 a 2,5	aço
- rede industrial	0,9 a 2,2	aço
Bombas:		
- linha de sucção	0,9 a 2,2	aço
- linha de recalque	2,1 a 3,0	aço
Ácido clorídrico	1,5	rev. de borracha
Ácido sulfúrico 88 a 98%	1,2	F° F°
Amoníaco	1,8	aço
Benzeno	1,8	aço
Cloro	1,5	aço

¹ Por exemplo: Telles, Pedro Carlos da Silva – Tubulação industriais: materiais, projeto e desenho – Livros Técnicos e Científicos S.a Editora S.A

FLUIDO (líquido)	Velocidade econômica (m/s)	Material da Tubulação
Clorofórmio	1,8	cobre e aço
Hidróxido de sódio		
- solução até 30%	1,8	aço
- solução de 30 a 50%	1,5	aço
- solução de 50 a 73%	1,2	aço
Óleo lubrificante	1,8	aço
Óleo combustível	1,8	aço
Salmoura (CaCl ₂)	1,2	aço
Tetracloro de Carbono	1,8	aço
Tricloro etileno	1,8	aço

Tabela 7.1

Por outro lado, sabemos que para o escoamento de gás perfeito até cerca de 75 m/s o escoamento é considerado como incompressível, daí a tabela 7.2.

FLUIDO - gás ou vapor	Velocidade econômica (m/s)	Material da Tubulação
Ar (0 a 30 psi)	20	aço
Amônia	30	aço
Ácido Clorídrico	20	rev. de borracha
Cloro	10 a 25	aço
Clorofórmico	10	cobre e aço
Dióxido de enxofre	20	aço
Etileno	30	aço
Hidrogênio	20	aço
Gás natural	30	aço
Vapor d'água		
- 0 a 30 psi-sat	20 a 30	aço
- 30 a 150 psi-sat ou superaquecido	30 a 50	aço
- acima de 150 psi	50 a 75	aço
- linhas curtas	75	aço

Tabela 7.2

Após o preestabelecimento do material e da velocidade econômica, calcula-se o diâmetro da tubulação como mostramos a seguir.

$$Q = V_x A = V_x \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\therefore D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V}}$$

equação 7.1

Através do diâmetro calculado pela equação 7.1, consultando uma tabela normalizada, especificamos o diâmetro nominal.

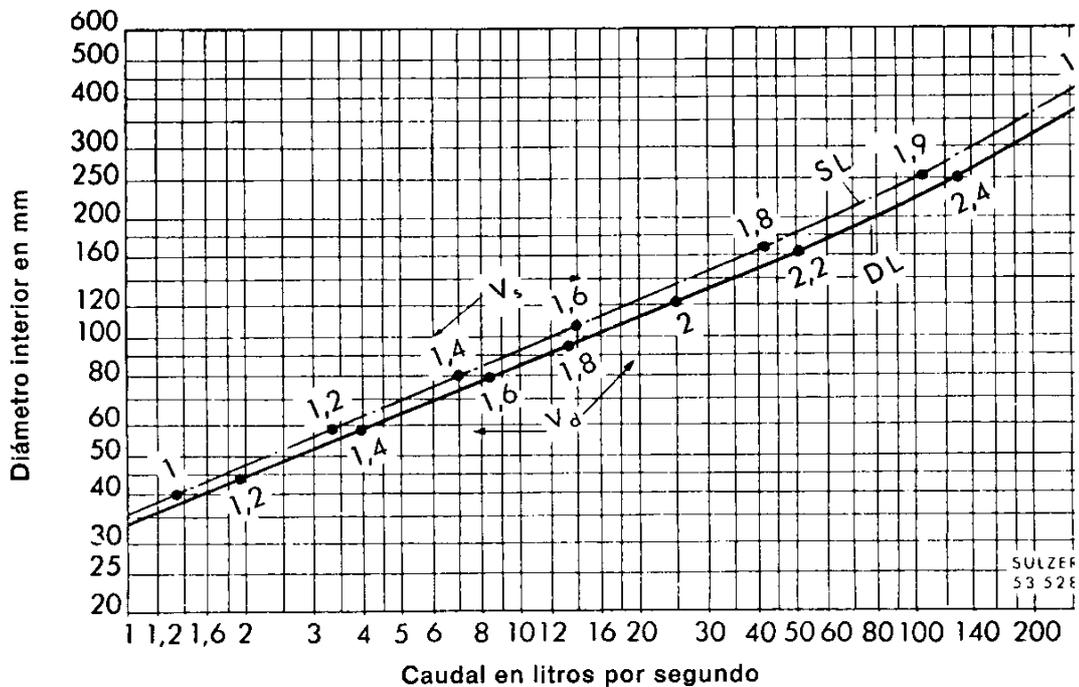
Devemos salientar, que dependendo da fonte de consulta encontramos certas variações das velocidades econômicas, para ilustrar o mencionado, apresentamos na tabela 7.3 as velocidades recomendadas pela *Alvenius Equipamentos Tubulares S/A* e na tabela 7.4 e gráfico 7.1 os valores recomendados para linhas de recalque curtas recomendados pela *Companhia Sulzer*.

Fluido	Velocidade (m/s)
Água - redes em cidades	1 a 3
- redes industriais	2 a 4
- alimentação de caldeiras	4 a 8
- sucção de bombas	0,75 a 1,8
Água salgada	1,5 a 2,5
Ar comprimido	15 a 20
Vapor - até 2 kgf/cm ² saturado	20 a 40
- de 2 a 10 kgf/cm ²	40 a 80
- mais de 10 kgf/cm ²	80 a 200
Hidrocarbonetos líquidos em instalações industriais	
- linhas de sucção	1 a 2
- linhas de recalque	1,5 a 2,5
Hidrocarbonetos gasosos em instalações industriais	25 a 30
Acetileno	20 a 25
Amônia - líquida	2
- gás	25 a 35
Hidrogênio	20 a 35
Cloro - líquido	1,5 a 2,0
- gás	15 a 30
Soda cáustica - 0 a 30%	2
- 30 a 50%	1,5
- 50 a 75%	1,2
Cloreto de sódio	1,5 a 2,0
Cloreto de Cálcio	1,5
Tetra-Cloreto de carbono	2,0
Ácido sulfúrico	1,0 a 1,2

Tabela 7.3

VELOCIDADES MÁXIMAS EM L. DE RECALQUE CURTAS								
D, mm	5,0	60	75	100	150	200	300	400
V, m/s	1,3	1,4	1,55	1,80	2,20	2,30	2,45	2,60
Q, l/s	2,5	4,0	6,8	14,1	38,9	72,3	173,1	326,5

Tabela 7.4



Diâmetros interiores de tubérias de aspiración y de presión

(las cifras que aparecen a lo largo de las curvas indican las velocidades)

v_s = velocidad en m/s en el conducto de aspiración SL

v_d = velocidad en m/s en la tubería de impulsión DL

Gráfico 7.1²

Uma outra forma de determinar o diâmetro e através da equação 7.2, que é válida para instalações que não funcionam continuamente (instalações em edifícios) que é a fórmula de Forscheimmer.

$$D_{er} = 1,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{n}{24}} \cdot \sqrt{Q} \quad \text{equação 7.2}$$

onde:

² Extraído do Manual – Fundamentos hidráulicos para instalaciones con bombas centrífugas – Sulzer Frères, Société Anonyme, Winterthur, Suiza

Der = diâmetro econômico para o recalque (m)

Q = vazão desejada (m^3/s)

n = número de horas/dia de funcionamento das bombas.

Com (Der) na tabela normalizada de tubos, especificamos o diâmetro de recalque comercial.

Se houver tubulação de sucção o seu diâmetro deve ser um diâmetro comercial acima.

Nota: Já que existe mais de uma possibilidade para a escolha do diâmetro de recalque e como hoje, podemos recorrer as máquinas programáveis é comum efetuar-se um estudo econômico para a escolha do diâmetro mais adequado.

Vamos imaginar que em um dado projeto, temos a possibilidade de recorrermos aos diâmetros D_1 , D_2 , D_3 e D_4 .

Para especificarmos o diâmetro adequado, podemos executar um estudo econômico como mostra a tabela 7.5.

	D_1	D_2	D_3	D_4
- Custo do tubo / m				
- Custo total				
- Velocidade média (m/s)				
- Perda de carga (m)				
- Altura Manométrica (m)				
- Potência Consumida (KW)				
- Custo Mensal de Energia				
- Escolha do Diâmetro Adequado →				

Tabela 7.5

7.3 Esquema de Instalação

O esquema da instalação a ser projetada é geralmente representado por um desenho isométrico com a finalidade de estabelecer:

- *os comprimentos dos tubos;*
- *os tipos de acessórios necessários.*

Uma boa referência bibliográfica para este item é o livro Tubulações Industriais escrito por Silva Telles.

7.4 Curva Característica da Instalação → (CCI)

7.4.1 Definição de C.C.I.

É a curva que representa os lugares geométricos que caracterizam a energia por unidade de peso, que o fluido necessita fornecer ou receber de uma máquina hidráulica, de tal forma que origine um escoamento em regime permanente em uma dada instalação a uma vazão Q .

Para uma dada instalação a CCI é representada por $H_m = f(Q)$.

Para uma instalação de bombeamento o fluido recebe energia por unidade de peso e a CCI é representada por $H_B = f(Q)$.

Para que não haja dúvida no conceito da CCI, devemos responder as seguintes questões propostas:

- 1ª → Um fluido escoando em regime permanente, em uma dada instalação a uma vazão q , apresenta perda de carga?
- 2ª → 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?
- 3ª → A energia por unidade de peso que o fluido possui sendo igual a 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 ?
- 4ª → Se a energia por unidade de peso que o fluido possui é igual a soma da cota crítica (Z_c) com a perda de carga total (H_{p_T}), isto garante que haja o escoamento em regime permanente?
- 5ª → Como calculamos a energia por unidade de peso que o fluido possui?
- 6ª → Considerando uma instalação de bombeamento com uma entrada e uma saída, como determinamos a energia por unidade de peso que deve ser vencida para que o fluido escoe em regime permanente com uma vazão Q ?

7.4.2 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 terminal, como mostramos a seguir:

$$H_0 + H_B = H_{ST} + H_{pTOTAL}$$

$$H_B = H_{ST} - H_0 + H_{pTOTAL}$$

Supondo uma instalação de recalque com $D_{sucção}$ diferente do diâmetro de recalque e com a seção terminal apresentando a carga cinética, temos:

$$H_B = (Z_{ST} - Z_0) + \frac{p_{ST} - p_0}{\gamma} + \frac{v_R^2}{2g} + H_{p_{sucção}} + H_{p_{recalque}}$$

Supondo ainda que $Z_{ST} - Z_0 = Z_C$, que representa a cota crítica a ser vencida, temos:

$$H_B = Z_C + \frac{p_{ST} - p_0}{\gamma} + \frac{v_R^2}{2g} + H_{p_{sucção}} + H_{p_{recalque}}$$

onde:

$$Z_C + \frac{p_{ST} - p_0}{\gamma} = H_{estática} = C_{arga \cdot Estática} \cdot Total$$

$$H_{p_i} = f_i \frac{L_i + \sum L_{eqi}}{D_H} \cdot \frac{v_i^2}{2g}$$

Podemos representar a equação da CCI pela equação 7.3

$$H_B = H_{estática} + B_{inst} Q^2 \quad \text{equação 7.3}$$

onde:

$$B_{inst} = f_S \cdot \frac{L_S + \sum L_{eqS}}{D_{H_S}} \cdot \frac{1}{2g A_S^2} + \left(y + f_R \cdot \frac{L_R + \sum L_{eqR}}{D_{H_R}} \right) \cdot \frac{1}{2g A_R^2}$$

$$y = 1,0 \text{ para } V_{ST} = V_R$$

ou

$$y = 0 \text{ para } V_{ST} = 0$$

Apresentamos a seguir um programa em BASIC baseado na calculadora PB-700 da CASIO, para a resolução da equação 7.3.

```

5 CLEAR
10 INPUT "NI = "; NI
20 INPUT "GAMA = "; T
30 INPUT "G = "; G
40 INPUT "K = "; K
50 INPUT "PØ = "; PX
60 INPUT "PST = "; PF
70 INPUT "ZC = "; Z
80 INPUT "xo = "; xo
90 INPUT "E = "; E
100 INPUT "Q = "; Q
110 Hx = Z + (PF - PX)/T
120 IF Q <> 0 THEN 170
130 PRINT "H_M = "; Hx
140 FOR I = 0 TO 500
150 NEXT I
160 GOTO 100
170 S = 0 : B = 0
180 INPUT "N = NUMERO DE DIÂMETROS" ; N
190 FOR IO = 1 TO N
200 INPUT "L = "; L
210 INPUT "SOMA DE LEQ = "; LE
220 INPUT "y = SE EXISTE √2 / ( 2 * g ) NA ST" ; y
230 INPUT "D = "; D
240 RE = (4 * Q)/(PI * D * NI)
250 IF RE > 2000 THEN 270
260 F = 64/RE THEN 330
270 A = LGT ((.27 * k/D) + (2.51 * PI * D * NI * XO)/(4 * Q))
280 x = xo - (xo + 2 * A)/(1 + 5.02 / (((.27 * 4 * K * Q)/(PI * D * D * NI) + 2.51 * xo)
    *LOG (10)))
290 IF ABS (x - xo) <= E THEN 320
300 xo = x
310 GOTO 270
320 F = 1/(x * x)
330 B = (y + F * (L + LE)/D) * (16/ ( 2 * G * PI * PI * D * D * D * D))

```

```

340 S = S + B
350 NEXT IO
360 HM = HX + S * Q * Q
370 PRINT "HM="; HM
380 FOR J = 0 TO 500
390 NEXT J
400 PRINT "Q="; Q
410 FOR JO = 0 TO 500
420 NEXT JO
430 PRINT "HM="; HX; " + "; S; " Q ^ 2 "
440 FOR RA = 0 TO 500
450 NEXT RA
460 PRINT "DESEJA MAIS CALCULO, RESPONDA SIM OU NÃO"
470 INPUT A$
480 IF A$ = "NÃO" THEN 540
490 PRINT "Continua na mesma instalação responda SIM ou NÃO"
500 INPUT B$
510 IF B$ = "NÃO" THEN 5
520 INPUT "NOVA Q="; Q
530 GOTO 170
540 END

```

Nota: Para verificar se o programa mencionado acima está correto apresentamos a tabela 7.6 que foi obtida para os seguintes dados:

$v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$\gamma = 10^4 \text{ N/m}^2$	$g = 10 \text{ m/s}^2$
$k = 0,000046 \text{ m}$	$p_0 = 0$	$p_{ST} = -6 \times 10^4 \text{ N/ m}^2$
$Z_C = 3 \text{ m}$	$x_0 = 7$	$E = 10^{-6}$
$N = 2$	$L_3'' = 4\text{m}$	$\sum L_{eq_2}'' = 59,52 \text{ m}$
$y_3'' = 0$	$D_3'' = 77,9 \times 10^{-3} \text{ m}$	$L_2'' = 6 \text{ m}$
$\sum L_{eq_2}'' = 22,56 \text{ m}$	$y_2'' = 1$	$D_2'' = 52,5 \times 10^{-3} \text{ m}$

Para os dados acima, devemos notar que a tubulação de sucção é de 3'', enquanto que a tubulação de recalque é de 2''.

VAZÃO (m ³ / s)	EQUAÇÃO DA CCI (H _M = H _{est} + B _{inst} . Q ²)	HM (m)
0	H _M = -3	-3
2 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 192842,616 . Q ²	- 2,23
4 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 176606,192 . Q ²	- 0,17
6 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 169866,660 . Q ²	3,12
8 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 166098,437 . Q ²	7,63
10 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 163673,230 . Q ²	13,37
12 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 161975,676 . Q ²	20,33
14 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 160718,622 . Q ²	28,50
16 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 159749,208 . Q ²	37,90
18 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 158978,291 . Q ²	48,51
20 x 10 ⁻³	H _M = -3 + 158350,268 . Q ²	60,34

Tabela 7.6

Nota: Podemos estabelecer através da equação da CCI se a instalação hidráulica pode ou não operar em queda livre (H_M = 0) e também determinar a vazão de queda livre, como mostramos a seguir.

$$H_B = H_{\text{estática}} + B_{\text{inst}} Q^2 \quad 0 = H_{\text{estática}} + B_{\text{inst}} Q^2$$

$$\therefore Q_{\text{ql}} = \sqrt{\frac{-H_{\text{est.}}}{B_{\text{inst}}}} \quad \text{equação 7.4}$$

Através da equação 7.4 estabelecemos que a condição para que exista o escoamento em queda livre é que H_{est} < 0

Se desejarmos resolver a equação 7.3 sem auxílio de um máquina programável é comum considerarmos o B_{inst} como sendo constante, para tal temos duas possibilidades:

1^a → Admite-se f_{sucção} = f_{recalque} = 0,02

2^a → Determina-se tanto o f_{sucção} como o f_{recalque} no escoamento hidráulicamente rugoso, ou seja:

$$p/ \left(\frac{D_H}{K} \right)_{\text{sucção}} \Rightarrow \text{det. } f_{\text{sucção}} \quad p/ \left(\frac{D_H}{K} \right)_{\text{recalque}} \Rightarrow \text{det. } f_{\text{recalque}}$$