



**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA
DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE
RECALQUE**

LEANDRO ANDRADE

2001

51259 MFV
36204

LEANDRO ANDRADE

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO
DE SISTEMAS DE RECALQUE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Andrade, Leandro

Aplicativo computacional para dimensionamento de sistemas de recalque /
Leandro Andrade. -- Lavras : UFLA, 2001.

80 p. : il.

Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Sistema de recalque. 2. Bomba hidráulica. 3. Motor elétrico. 4. Perda de
carga. 5. Altura manométrica. 6. Diâmetro econômico. 7. Software. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-621.252

-631.587

LEANDRO ANDRADE

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO DE
SISTEMAS DE RECALQUE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de “Mestre”.

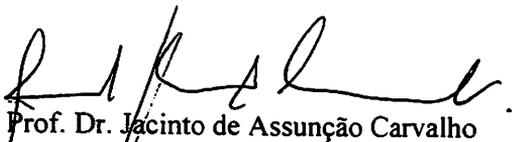
APROVADA em 6 de março de 2001.

Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira

UFLA

Prof. Dr. Nilson Salvador

UFLA



Prof. Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

UFLA

(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

por propiciar-me uma vida repleta de ensinamentos.

OFEREÇO

Aos meus pais, Maurício e Auxiliadora, pelo incentivo e orientação em todos os momentos;

Aos meus irmãos, Fernanda e Leonardo, pelo carinho demonstrado em gestos mais simples;

À minha noiva, Angélica, pelo amor e pela paciência de suportar tamanha saudade.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela bondade de permitir que eu concluísse mais essa etapa.

À CAPES, pelo fornecimento da bolsa de estudo.

Ao Prof. Jacinto, pelas sábias orientações, dedicação, amizade e confiança.

A todos os professores do Departamento de Engenharia, que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação.

A todos os colegas da pós-graduação, pelo ambiente de vivência proporcionado e amizade, em especial ao Gilberto Coelho e ao Edson Sadayuki, pelos trabalhos realizados em conjunto.

Aos servidores do Departamento de Engenharia, em especial ao Oswaldo (Neném) e ao José Luiz, pela boa vontade e presteza.

Aos colegas Amauri, Luciana, Ruy e Marcos (Hidromecânica Germek - São José do Rio Pardo/SP) e ao companheiro José Antônio (Lavras Irrigação), pelo fornecimento de dados necessários à conclusão desta dissertação.

Aos meus pais, Maurício e Auxiliadora, e à minha noiva, Angélica, pelas correções dessa dissertação.

Ao meu grande amigo João Tarcísio, pela velha amizade, que se consolida com o passar dos anos.

BIOGRAFIA

Leandro Andrade, filho de Maurício Ribeiro de Andrade e Maria Auxiliadora Andrade, nasceu em Goiânia – GO, no mês de julho do ano de 1974.

Em 1992, concluiu o segundo grau no Colégio Prevest, localizado na capital goiana. Ingressou, em agosto de 1994, no curso de Agronomia da Universidade Federal de Lavras, classificado em primeiro lugar geral do vestibular.

No primeiro ano de graduação foi monitor no Centro de Processamento de Dados, no segundo ano atuou na área de estatística, como bolsista de Iniciação Científica e os outros três anos, também como bolsista de Iniciação Científica, desenvolveu um software na área de topografia. Gradou-se em setembro de 1999.

No mesmo mês, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, com concentração em Irrigação e Drenagem, defendendo sua dissertação após um ano e seis meses.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Perda de carga	3
2.1.1 Perda de carga contínua.....	4
2.1.2 Perda de carga localizada	13
2.2 Bombas hidráulicas	14
2.2.1 Curvas características	16
2.2.2 Escolha da bomba.....	17
2.2.3 Associação de bombas.....	22
2.2.4 Cavitação.....	23
2.3 Avaliação econômica	25
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Perda de carga contínua.....	30
3.2 Perda de carga localizada	32
3.3 Altura manométrica total.....	33
3.4 Bombas hidráulicas	33
3.4.1 Escolha da bomba.....	39
3.4.2 Associação de bombas.....	39
3.4.3 Cavitação.....	41
3.5 Motores elétricos.....	42
3.6 Análise econômica	44
3.7 Custo de energia.....	46

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Instalação.....	50
4.2 Cópias de segurança.....	51
4.3 Perda de carga e altura manométrica.....	52
4.3.1 Descrição.....	52
4.3.2 Procedimento de cálculo	53
4.4 Bombas.....	55
4.4.1 Descrição.....	55
4.4.2 Procedimentos de cadastramento, alteração e exclusão	56
4.5 Escolha da bomba.....	58
4.5.1 Descrição.....	58
4.5.2 Procedimentos de seleção.....	59
4.5.2.1 Curva do sistema	59
4.5.2.2 Ponto de projeto	60
4.6 Associação de bombas.....	61
4.6.1 Descrição.....	61
4.6.2 Procedimento de associação.....	62
4.7 Cavitação.....	62
4.7.1 Descrição.....	62
4.7.2 Procedimento de cálculo	63
4.8 Motores elétricos.....	63
4.8.1 Descrição.....	63
4.8.2 Procedimentos de cadastramento, alteração, exclusão e escolha	64
4.9 Análise econômica	66
4.9.1 Descrição.....	66
4.9.2 Procedimento de análise.....	67
4.10 Ajuda	69
4.10.1 Descrição.....	69

4.10.2 Procedimento de consulta.....	69
4.11 Exemplo de utilização do aplicativo.....	69
4.11.1 Análise econômica	69
4.11.2 Perda de carga	71
4.11.3 Escolha da bomba: ponto de projeto	73
4.11.4 Escolha da bomba: curva do sistema.....	74
5 CONCLUSÕES.....	77
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
7 GLOSSÁRIO.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	altitude (m)
<i>C</i>	coeficiente de atrito da equação de Hazen-Williams (adimensional)
<i>CA</i>	custo anual (R\$)
<i>CE</i>	consumo específico de combustível (L/cv.h)
<i>Ceq</i>	comprimento equivalente (m)
<i>CI</i>	custo de investimento do equipamento (R\$)
<i>D</i>	diâmetro interno da tubulação (m)
ε	rugosidade absoluta do conduto (mm)
<i>f</i>	coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach
<i>FRC</i>	fator de recuperação do capital (decimal)
<i>g</i>	aceleração da gravidade (m/s^2)
<i>H</i>	altura manométrica (m)
<i>hf</i>	perda de carga (m)
<i>hg</i>	altura geométrica (m)
<i>Hr</i>	altura manométrica de recalque (m)
<i>Hs</i>	altura manométrica de sucção (m)
<i>K</i>	coeficiente experimental de perda de carga localizada (adimensional)
<i>k_f</i>	coeficiente de atrito da equação de Flamant (adimensional)
<i>Ks</i>	constante da curva do sistema (s^2/m^5)
<i>L</i>	comprimento da tubulação (m)

n	rotação (rpm)
n_m	coeficiente de atrito da equação de Manning (adimensional)
NPSH	net position suction head (m)
P	potência (cv)
$\frac{P_{atm}}{\gamma}$	pressão atmosférica (m)
$\frac{P_v}{\gamma}$	pressão de vapor (m)
Q	vazão (m ³ /h)
Re	número de Reynolds (adimensional)
V	velocidade de escoamento do líquido (m/s)
x	expoente da curva do sistema (adimensional)
Δh_B	perdas no interior da bomba (m)
δ	espessura do filme laminar no conduto (mm)
γ	peso específico do líquido (kgf/m ³)
ν	coeficiente de viscosidade cinemática do líquido (m ² /s)

RESUMO

ANDRADE, Leandro. **Aplicativo computacional para dimensionamento de sistemas de recalque**. LAVRAS: UFLA, 2001. 80p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola)

O trabalho teve por objetivo desenvolver um aplicativo computacional, que sirva como ferramenta prática e precisa no dimensionamento de sistemas de recalque. Utilizou-se a linguagem de programação *Microsoft Visual Basic* versão 5.0. O programa realiza cálculos de perdas de carga contínua, utilizando as equações de Darcy-Weissbach, de Hazen-Williams, de Fair-Whipple-Hsiao, de Flamant e de Manning. A perda de carga localizada é realizada pelo método do comprimento equivalente com o emprego do número de diâmetros. O aplicativo permite calcular a altura manométrica total e a análise econômica, onde se determinam o diâmetro de recalque econômico e os custos mensais e anuais com energia. Criaram-se janelas que permitem o cadastro de modelos de bombas e motores elétricos, para que sejam empregados na seleção, visando atender os pontos de projeto solicitados pelo usuário. Cadastraram-se 102 modelos de bombas e 56 modelos de motores elétricos. A seleção das bombas pode ocorrer através da curva do sistema ou de um ponto de projeto. A associação pode ser feita em série ou em paralelo, desde que inserida a curva do sistema, o modelo e o número de bombas a ser associado. O aplicativo permite, também, calcular o NPSH disponível. Os resultados calculados pelo programa foram comparados com os encontrados na literatura. As diferenças foram insignificantes e, em alguns casos, não existiram. Este *software* pode ser utilizado em sistemas de recalque destinados à irrigação, ao abastecimento de água e a outros tipos, que visem o transporte de fluidos. Recomendam-se o cadastramento de novos modelos de bombas e motores elétricos existentes na região de atuação, assim como a atualização freqüente dos bancos de dados existentes.

(Thesis – Magister Science on Agricultural Engineering)

This work aimed the developing of a software to be used as practical and precise tool in single pipeline design. It was used *Microsoft Visual Basic* version 5.0 as the programming language. The program accomplishes calculations of continuous head loss using the following equations: Darcy-Weissbach, Hazen-Williams, Fair-Whipple-Hsiao, Flamant and Manning. The local loss calculation is accomplished by the method of the equivalent length using the number of diameters. The software permits to calculate the total pressure head and the economical analysis where the economical diameters, the monthly and yearly costs with energy are determined. It was created windows that allow the register of pump and electric motors models, so that they can be used in the selection list aimed to assist the project points requested by the user. It was registered 102 models of pumps and 56 models of electric motors. The selection of pumps can be done by using the curve of the system or the project point. The association can be made in series or in parallel, informing the curve of the system, the model and the number of pumps to be associated. The program also allows calculate available NPSH. The results obtained by the software were compared with ones found in the literature. The differences were insignificant and, in some cases, they didn't exist. This software can be used in irrigation, water supply and any other fluid transport pipeline system. It is recommended the registration of new pumps and electric motors models existent in the area of performance, as well as the constant updating of the existent databases.

1 INTRODUÇÃO

A interligação das diversas economias dos países, conhecida como globalização, exigiu de vários setores produtivos, principalmente nos países em desenvolvimento, maior competitividade e com isso maiores investimentos em tecnologia de ponta. Nesse contexto, o Brasil tem se destacado, seja pela capacidade de produção e de competição, seja pela importância que a economia brasileira vem assumindo nos últimos anos no comércio internacional.

Dentre os setores de produção existentes, o setor agrícola é um dos mais importantes para economia, pois participa de uma fatia considerável do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro, podendo ainda expandir por novas fronteiras geográficas e tecnológicas.

Considerando apenas as fronteiras tecnológicas, a agricultura irrigada apresenta-se como uma boa opção para elevar, sensivelmente a produtividade e, em certos casos, assegurar a produção, principalmente em regiões com grande incidência de veranicos prolongados.

Apesar de possuir o maior potencial hídrico do mundo, o Brasil ainda não conseguiu transpor a barreira dos 3 milhões de hectares irrigados, enquanto possui por volta de 55 milhões de hectares agricultados. A grande maioria dos sistemas de irrigação necessita de bombeamento, uma vez que são raras as situações em que a água pode chegar até a planta pela força da gravidade.

A dificuldade de projetar e estimar gastos com sistemas de recalque e ainda o receio de que o alto investimento nessa tecnologia não seja revertido em lucros, podem ser apontados como os principais fatores, que inibem empresários rurais em adotar a prática da irrigação.

Projetos de sistemas de recalque são trabalhosos e demandam muito conhecimento e atenção por parte do projetista. Requerem inúmeros cálculos repetitivos e consultas exaustivas a catálogos, ábacos e tabelas, aumentando a

chance de se cometer erros, podendo, algumas vezes, resultar em sistemas mal dimensionados.

Com o advento da computação e de linguagens de programação mais acessíveis em manuseio, possibilitou-se o desenvolvimento de aplicativos computacionais, por profissionais da área de irrigação, que servissem de ferramentas práticas e precisas na elaboração de projetos de sistemas de recalque.

Esse tipo de aplicativo computacional pode auxiliar os projetistas na escolha de um conjunto moto-bomba, na determinação da altura geométrica de instalação do mesmo, nos diversos cálculos de perda de carga e na escolha do diâmetro econômico de uma tubulação de recalque, além de poder ser utilizado em simulações de diferentes situações de campo.

Objetivou-se neste trabalho o desenvolvimento de um aplicativo computacional para auxiliar o engenheiro projetista em todas as fases de elaboração de um projeto de sistema de recalque.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Instalações de recalque devem ser projetadas, visando atender às demandas de vazão e pressão, sem perder de vista a eficiência econômica. Para isso, o engenheiro projetista realiza inúmeros cálculos de perdas de carga na tubulação, consultas freqüentes a tabelas, ábacos, catálogos de bombas e de motores, além de avaliar o emprego de diversos diâmetros de tubulação para escolher o de menor custo anual total. Detalhou-se, a seguir, cada uma dessas etapas.

2.1 Perda de carga

Perda de carga hidráulica é a energia cedida pelo líquido devido ao atrito interno, atrito contra as paredes e perturbações no escoamento. Essa energia por unidade de peso de líquido, em última análise, dissipa-se sob forma de calor (Macintyre, 1987). Pode ser entendido também, como sendo parte da energia potencial de pressão e de velocidade, que é transformada em outros tipos de energia que são perdidas no processo tal como o calor.

Silvestre (1983) diz que essa perda de energia é irreversível, de modo que, para aplicar o teorema de Bernoulli ao movimento da água, torna-se necessário introduzir à sua expressão matemática um termo que represente a parcela de energia dissipada (perda de carga). A equação de Bernoulli, para os objetivos práticos da hidráulica, sendo o deslocamento da massa fluida de um ponto para outro, fornece:

$$hf = \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \right), \quad (1)$$

em que:

hf : perda de carga (m);

$\frac{P}{\gamma}$: carga de pressão (m);

$\frac{V^2}{2g}$: carga de velocidade ou dinâmica (m);

z : carga geométrica ou de posição (m).

Mattos e Falco (1998) definem a perda de carga contínua, como sendo a energia dissipada por um fluido, que desloca de um ponto para outro em trechos retilíneos da tubulação.

Entretanto, nas instalações de bombeamento, há um segundo tipo de perda de carga, que dependendo do caso, não pode ser desprezada: perda de carga localizada. Silvestre (1983) diz que esse tipo de perda, somada à perda de carga contínua, constituem-se na perda de carga total do sistema e só pode ser desprezada, quando a velocidade do fluido for pequena (inferior à 1 m/s) e o comprimento do conduto for maior que 4000 vezes o seu diâmetro, ou no caso de existirem poucas peças no circuito hidráulico em estudo.

Segundo Carvalho (1999), os fatores que influem de forma direta nas perdas de carga são: a natureza do fluido; o estado superficial da parede do conduto e, portanto, o material de fabricação; o diâmetro do conduto; o regime de escoamento; e o comprimento da tubulação. Além desses, podem-se considerar ainda como fatores que interferem na perda de carga: o processo de fabricação do tubo, o estado de conservação das paredes e a idade da tubulação.

2.1.1 Perda de carga contínua

A resistência que os líquidos oferecem ao escoamento é um fenômeno de inércia-viscosidade e é caracterizada pelo número de Reynolds, que exprime a relação entre as forças de inércia e as forças de atrito interno (forças de cisalhamento) atuantes durante o escoamento (Macintyre, 1987):

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu}, \quad (2)$$

em que:

- Re : número de Reynolds (adimensional);
- D : diâmetro interno do tubo (m);
- V : velocidade de escoamento do fluido no tubo (m/s);
- ν : viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Segundo Neves (1989), o número de Reynolds permite conhecer o regime de escoamento e caracterizar as condições de semelhança do escoamento em condutos sob pressão. A experiência demonstra que, normalmente, o escoamento é turbulento se esse parâmetro excede de 3000 e se o mesmo é inferior a 2000, o escoamento se dá em regime laminar; entre estes valores pode existir um outro regime. esses limites devem ser considerados médios, pois, em condições excepcionais, pode-se encontrar regime laminar bastante além do valor indicado.

Neves (1989) e Azevedo Netto et al. (1998) afirmam que o escoamento permanente pode ser classificado em função do número de Reynolds, mas sugerem valores fixos: laminar (menor ou igual a 2.000), turbulento (maior que 4.000) e crítico ou transitório (entre 2.000 e 4.000). O regime turbulento, quando observado sob a ótica do número de Reynolds, possui a maior amplitude. Gomes (1997) afirma que a maioria absoluta dos escoamentos permanentes, em condutos de sistemas pressurizados, ocorre em regime turbulento.

Por isso, esse regime foi subdividido em outros três: escoamento em condutos lisos, escoamento turbulento de transição e escoamento de turbulência plena. Para separação desses, foram introduzidos outros dois fatores: a espessura do filme laminar e a rugosidade absoluta do tubo.

A perda de carga não deve ser suposta ou imaginada como sendo uma espécie de atrito, semelhante ao que se verifica quando dois sólidos em contato se deslocam um sobre o outro. Ao contrário, não há movimento ou deslocamento do fluido em contato com as paredes dos tubos, mesmo porque, junto à essas paredes, estabelece-se uma camada aderente estacionária (Azevedo Netto et al., 1998).

Carvalho (2000) relata que, mesmo depois de estabelecido o regime de escoamento, há uma película de líquido junto às paredes do conduto, onde ocorre escoamento laminar, independente do escoamento existente no restante da seção da tubulação. A denominação dada à altura desta película é *espessura do filme laminar*.

O cálculo da espessura do filme laminar envolve três variáveis: número de Reynolds, diâmetro interno do tubo e fator de atrito f :

$$\delta = \frac{32,5 \cdot D}{Re \sqrt{f}}, \quad (3)$$

em que:

δ : espessura do filme laminar (mm);

D : diâmetro interno do tubo (mm);

f : coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weissbach (adimensional).

Como há duas incógnitas (espessura do filme laminar e o fator de atrito) e apenas uma equação, a resolução dessa expressão ocorre através de um processo iterativo.

Existem três inequações que dividem o regime de escoamento turbulento, baseando-se na espessura do filme laminar e na rugosidade absoluta do conduto (Carvalho, 2000):

1. Regime de escoamento em condutos lisos:

$$\varepsilon < \frac{\delta}{3}; \quad (4)$$

2. Regime de escoamento turbulento de transição:

$$\frac{\delta}{3} < \varepsilon < 8\delta; \quad (5)$$

3. Regime de escoamento de turbulência plena:

$$\varepsilon > 8\delta. \quad (6)$$

em que:

ε : rugosidade absoluta do conduto (mm).

Segundo Azevedo Netto et al. (1998), o coeficiente de atrito f , adimensional, é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa. A rugosidade absoluta dos tubos podem ser avaliadas determinando-se valores para ε/D (rugosidade relativa).

Para cada tipo de escoamento há uma equação (procedimento) específica para o cálculo do fator de atrito da expressão de Darcy-Weissbach. Entre as equações obtidas empiricamente, para o cálculo desse fator de atrito em condutos forçados, que abrangem todos os tipos de escoamento, aparecem relacionadas abaixo as principais (Azevedo Netto et al., 1998; Carvalho, 2000):

1. Equação para o regime de escoamento laminar:

$$f = \frac{64}{Re}. \quad (7)$$

2. Equação de Blasius, ensaiada para o regime de escoamento turbulento em condutos lisos e número de Reynolds variando entre 3.000 e 100.000:

$$f = 0,316 \cdot Re^{-0,25}. \quad (8)$$

3. Equação de von Kármán-Prandtl, recomendada para regimes turbulentos em condutos lisos, $Re\sqrt{f} > 800$ e número de Reynolds no intervalo de 10.000 e 3.400.000:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0,8. \quad (9)$$

4. Equação de Nikuradse (possui as mesmas exigências da equação anterior):

$$f = 0,0032 + 0,221(Re)^{-0,237}. \quad (10)$$

5. Equação de Konakov, aplicada nos regimes de escoamento turbulento em condutos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{5,62}{Re^{0,9}}\right). \quad (11)$$

6. Equação de Prandtl-Colebrook, recomendada para regimes turbulentos de transição:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log \left(\frac{2\varepsilon}{D} + \frac{18.7}{\text{Re} \sqrt{f}} \right). \quad (12)$$

7. Equação de Colebrook-White, recomendada para regimes turbulentos de transição e deve ainda obedecer à inequação $14 < \frac{\text{Re} \sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 200$:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \text{Log} \left(\frac{2 \cdot \varepsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right). \quad (13)$$

8. Equação de Moody, aplicada em regime de escoamento turbulento de transição e o número de Reynolds deve estar entre 4.000 e 10.000.000:

$$f = 0.0055 \left[1 + \left(20.000 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (14)$$

9. Equação de Nikuradse, equação recomendada para o regime de escoamento de turbulência plena, tendo que obedecer à inequação

$$\frac{\text{Re} \sqrt{f}}{D/\varepsilon} \geq 200:$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log\left(\frac{2\varepsilon}{D}\right). \quad (15)$$

10. Equação Geral de Swamee-Jain recomendada para qualquer regime de escoamento, sem nenhuma restrição (Carvalho, 2000):

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2.500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}. \quad (16)$$

Obtido o valor de f pode-se, então, aplicá-lo na expressão de perda de carga de Darcy-Weissbach, válida para qualquer líquido, denominada por Azevedo Netto et al. (1998) como a “Fórmula Universal”.

As variáveis empregadas nessa fórmula englobam o comprimento e o diâmetro do conduto, a velocidade de escoamento do líquido, a aceleração da gravidade local, além do fator de atrito f (Macintyre, 1987).

A expressão de Darcy-Weissbach é a mais utilizada no meio científico, garantindo maior ajuste dos dados à realidade física:

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g}. \quad (17)$$

em que:

L : comprimento da tubulação (m);

D : diâmetro interno do tubo (m);

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

Apesar da expressão de Darcy-Weissbach ser considerada a equação universal de perda de carga, existem inúmeras outras, largamente utilizadas no

meio técnico, como a de Hazen-Williams, Flamant, Fair-Whipple-Hsiao e Manning.

A equação determinada por Hazen-Williams tem seu próprio coeficiente de atrito e é largamente utilizada no Brasil, para cálculos de perdas de carga em tubulações de irrigação e na prática da Engenharia Sanitária Americana (Porto, 1998), apesar de ser recomendada apenas para os condutos forçados com diâmetro superior à 50 milímetros:

$$hf = 10.643 \frac{L}{D^{4.87}} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1.852} \quad (18)$$

em que:

C : coeficiente de atrito de Hazen-Williams (adimensional);

Q : vazão (m^3/s).

Em projetos de instalações prediais de água fria ou quente, cuja topologia é caracterizada por trechos curtos de tubulação, variação de diâmetros (em geral menor que 4") e presença de um grande número de conexões, é usual a utilização das expressões de Fair-Whipple-Hsiao (Neves, 1989; Porto, 1998):

1. aço galvanizado (água fria):

$$hf = 0.002021 \left(\frac{Q}{D} \right)^{1.88} L \quad (19)$$

2. conduto de cobre (água fria):

$$hf = 0.000859 \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} L; \quad (20)$$

3. conduto de cobre (água quente):

$$hf = 0,00069 \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} L. \quad (21)$$

A equação de Flamant é recomendada para tubos de PVC, com diâmetros internos variando entre 16 e 160 milímetros e para velocidades de 0,1 a 4 m/s (Neves, 1989):

$$hf = k_f \cdot \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} L. \quad (22)$$

em que:

k_f : coeficiente de atrito de Flamant (adimensional).

As expressões até agora citadas somente podem ser aplicadas para escoamentos em condutos forçados. A expressão obtida por Manning é empregada tanto para os escoamentos em condutos forçados quanto para os condutos livres (Neves, 1989):

$$hf = 10.32 \cdot n_m^2 \frac{Q^2}{D^{16/3}} L. \quad (23)$$

em que:

n_m : coeficiente de atrito de Manning (adimensional).

Mattos e Falco (1998) afirmam que as fórmulas de Darcy-Weissbach e de Hazen-Williams são normalmente utilizadas para diâmetros superiores a 50 milímetros. Para pequenos diâmetros é de grande aplicação a expressão de Flamant; para instalações domésticas, as fórmulas de Fair-Whipple-Hsiao; para condutos livres, a equação de Manning.

2.1.2 Perda de carga localizada

Além da perda de energia ocorrida ao longo da tubulação, as peças especiais, conexões, válvulas etc., também são responsáveis por perdas de energia localizadas por causarem turbulência, alterarem o módulo e direção da velocidade, aumentando o atrito (Macintyre, 1987).

Existem dois métodos para calcular essas perdas: o método direto e o método dos comprimentos equivalentes (Silvestre, 1983; Macintyre, 1987; Mattos e Falco, 1998; Carvalho, 1999).

O primeiro consiste na utilização da fórmula geral das perdas localizadas e de tabelas onde se encontram os valores do coeficiente de perdas localizadas para várias peças e conexões:

$$hf = K \frac{V^2}{2g}, \quad (24)$$

em que:

K : coeficiente de perda de carga localizada (adimensional).

Este coeficiente é obtido experimentalmente para cada caso. Há vários anos, laboratórios de hidráulica e fabricantes de peças vêm realizando experiências para determinar esses valores de K , tendo chegado à conclusão que esse coeficiente é praticamente constante para número de Reynolds acima de

50.000 (Silvestre, 1983). Mattos e Falco (1998) afirmam que, para um mesmo acessório, admitem-se variações no valor de K para fabricantes diferentes. Relatam também que K é um valor representativo de influência do coeficiente de atrito, do comprimento e do diâmetro, embora em certos casos ele possa ser constante, mesmo com a variação de um desses valores.

O método do comprimento equivalente consiste na “substituição” das peças especiais, por comprimentos de tubos retilíneos virtuais, que promovam a mesma perda de carga. Esse comprimento do tubo equívale, virtualmente, sob o ponto de vista de perda de carga, àquela peça especial (Silvestre, 1983; Macintyre, 1987; Mattos e Falco, 1998; Carvalho, 1999).

Desse modo, qualquer peça pode ser substituída por um comprimento fictício, que calculado pela fórmula de Darcy-Weissbach, seria:

$$L = \frac{D}{f} \cdot \frac{hf \cdot 2g}{V^2} \quad (25)$$

O comprimento fictício pode ser obtido diretamente em tabelas ou em relação ao número de diâmetros. Carvalho (1999) acredita que o método dos comprimentos equivalentes conduz a resultados mais exatos, principalmente, quando são usados os valores fornecidos pelos fabricantes desses acessórios, conexões e peças especiais.

2.2 Bombas hidráulicas

A bomba hidráulica é uma máquina transformadora de energia. Recebe energia mecânica e a converte, nos fluidos bombeados, em energia de posição, de pressão e de velocidade (Silvestre, 1983).

As bombas podem ser divididas em três grandes grupos: bombas de deslocamento positivo ou volumétricas, turbobombas, hidrodinâmicas ou rotodinâmicas e bombas especiais.

Para a maioria das instalações de bombeamento, inclusive irrigação, as turbobombas são amplamente empregadas devido ao seu menor custo e, principalmente, à capacidade de atendimento a uma ampla variação de campo, pois são capazes de trabalhar com sensíveis variações de pressão, vazão e rotação (Silvestre, 1983; Carvalho, 1999). Segundo Macintyre (1987), a descarga gerada por esse tipo de bomba depende de suas características, número de rotações e das características do sistema de encanamentos ao qual estiver ligada.

As turbobombas são classificadas de acordo com a trajetória da massa fluida no rotor. As bombas centrífugas ou radiais são aquelas em que o líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo e sai pela direção perpendicular; as bombas axiais imprimem ao líquido uma trajetória paralela ao eixo do rotor, desde a entrada até a saída; as bombas mistas possuem características intermediárias aos dois tipos anteriores.

As bombas centrífugas, pela simplicidade, prestam-se à fabricação em série, sendo generalizada sua construção e estendida sua utilização à grande maioria das instalações comuns de água limpa, descargas de 5 a 500 L/s, para pequenas, médias e grandes alturas manométricas (Macintyre, 1987).

Segundo Mattos e Falco (1998), as bombas centrífugas são aquelas em que a energia fornecida ao líquido é, primordialmente, do tipo cinética, sendo, posteriormente, convertida, em grande parte, em energia de pressão. A energia cinética pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou mesmo uma combinação das duas, dependendo da forma do impelidor. A conversão de grande parte da energia cinética, em energia de pressão, é realizada com a passagem do fluido, que sai do impelidor por um conduto de área crescente.

2.2.1 Curvas características

As curvas características das bombas centrífugas representam as condições hidráulicas operacionais da bomba, trabalhando com determinada rotação na unidade de tempo. Permitem relacionar a vazão recalçada com a pressão gerada, com a potência absorvida, com o rendimento e com a altura máxima de sucção (Silvestre, 1983).

Segundo Carvalho (1999), a altura manométrica desenvolvida por uma bomba é a quantidade de energia absorvida por um quilograma de fluido que passa pelo equipamento, sendo função da rotação de acionamento, de dimensões da bomba e do acabamento interno (determinado pelo rendimento hidráulico). A curva característica da altura manométrica, em função da vazão, pode ser expressa por uma equação quadrática (Nielsen, 1986; Arens e Porto, 1989):

$$H = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1 \quad (26)$$

em que:

H : altura manométrica (m):

Q : vazão (m³/h):

a_1, b_1, c_1 : coeficientes da equação.

Arens e Porto (1989) relatam que a equação quadrática também pode ser aplicada à função de potência versus vazão:

$$P = a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2 \quad (27)$$

em que:

P : potência (cv):

a_2, b_2, c_2 : coeficientes da equação.

Da mesma forma das equações anteriores, o NPSH requerido em função da vazão pode ser expressa por uma equação do segundo grau (Arens e Porto, 1989; Yanagi Jr. et al., 1997):

$$NPSH = a_3 Q^2 + b_3 Q + c_3 \quad (28)$$

em que:

NPSH : *Net Position Suction Head* (m):

a_3 , b_3 , c_3 : coeficientes da equação.

2.2.2 Escolha da bomba

O desempenho e o ponto de funcionamento de uma bomba centrífuga, relativos a uma tubulação, podem ser determinados a partir de sua curva característica (H vs. Q) e a curva do sistema (Bernardo, 1989; Andrade e Allen, 1997; Carvalho, 1999).

Para isso, deve-se traçar, primeiramente, a curva da tubulação ou curva do sistema. Entretanto, isso somente é possível conhecendo-se a altura manométrica total, que depende de diversos fatores.

Define-se como altura manométrica de uma instalação de bombeamento, como sendo a quantidade de energia que deve ser absorvida por um quilograma de fluido, que atravessa a bomba, para que o mesmo vença o desnível de instalação, a diferença de pressão entre os dois reservatórios (caso exista) e a resistência natural, que as tubulações e acessórios oferecem ao escoamento dos fluidos (Carvalho, 1999). Em outras palavras, essa energia por unidade de peso solicitada é então, para cada vazão, função da altura estática de elevação do fluido, da diferença de pressões entre a sucção e a descarga e das perdas existentes no circuito (Mattos e Falco, 1998).

Para facilitar os cálculos da altura manométrica, pode-se dividi-la em altura manométrica de sucção e altura manométrica de recalque. Tendo em vista que altura manométrica de sucção representa a energia manométrica por unidade de peso, calcula-se esse valor, mediante a soma das perdas de carga ocorridas na tubulação de sucção e a diferença geométrica entre o nível estático do reservatório e a entrada da bomba. Se a bomba for instalada abaixo do nível do reservatório, ou seja, afogada, ao invés de somar a diferença geométrica às perdas ocorridas, subtrai-se. Nesse caso, denomina-se altura de sucção negativa (Carvalho, 1999).

O valor da altura manométrica de recalque é obtido pela soma da diferença geométrica entre a saída da bomba e a saída do sistema de recalque, das perdas de carga ocorridas na tubulação de recalque e da pressão necessária no ponto de descarga. Entretanto, se o sistema de recalque tiver como função abastecer um outro reservatório, o que implica em despejar o fluido, a pressão necessária, no ponto de descarga é nula (Mattos e Falco, 1998). A altura manométrica total do sistema é o resultado da soma das alturas manométricas de sucção e de recalque.

Segundo Mattos e Falco (1998), curva do sistema é uma curva que mostra a variação da altura manométrica total com a vazão ou, em outras palavras, mostra a variação da energia por unidade de peso, que o sistema solicita em função da vazão.

Santos (1995) diz que a perda de carga total é proporcional ao expoente x da vazão, cujo valor depende da fórmula da perda de carga utilizada, sendo próximo a 2. Dessa forma, a curva do sistema pode ser expressa por:

$$H = hg + K_s \cdot Q^x \quad (29)$$

em que:

hg : altura geométrica total (m):

K_s : constante da curva do sistema;

x : expoente da equação de cálculo da perda de carga utilizada (adimensional).

Expressando as curvas matematicamente, obtém-se o ponto de operação da bomba pela solução simultânea das equações da curva característica da bomba e da curva do sistema. O ponto comum às curvas é o ponto de funcionamento da bomba (Bernardo, 1989; Andrade e Allen, 1997; Carvalho, 1999). O ponto que possui as coordenadas da vazão e da altura manométrica exigidas pela instalação de bombeamento é definido como ponto de projeto.

Nielsen (1986) afirma que dificilmente encontra-se uma curva característica da bomba, que contenha o ponto de projeto. Recomenda-se, nesse caso, a adoção de uma curva característica, correspondente a um rotor comercial que se situe, imediatamente, acima do ponto de projeto.

Com isso, o ponto de operação da bomba se dará à direita e acima (vazão e altura manométrica maiores) do ponto de projeto, o que exigirá, na maioria dos casos, ajustes ou regulagens (Santos, 1995).

As técnicas que visam ajustar o ponto de operação da bomba aos modelos comerciais existentes podem ser divididas em:

- variação da curva do sistema;
- variação da curva da bomba;
- recirculação.

A modificação da curva do sistema é obtida através de alterações na altura geométrica e na constante da tubulação (K_s). Mattos e Falco (1998) afirmam que a alteração usual é um estrangulamento parcial de uma válvula de descarga, propiciando uma diminuição da vazão. As demais alterações, inclusive aquelas que poderiam proporcionar um aumento de vazão, por exemplo, uma redução da altura geométrica, apesar de passíveis do ponto de vista teórico, nem

sempre são passíveis de execução na prática. A alteração desse tipo de curva, normalmente com o incremento de perdas de carga no sistema, não é recomendada, sob o ponto de vista econômico, pois aumenta o consumo de energia.

A segunda forma, a mais recomendada, porque evita desperdícios energéticos, consiste na modificação da curva característica da bomba. Pode ser realizada de duas formas: redução do diâmetro do rotor e da rotação (Santos, 1995; Mattos e Falco, 1998; Carvalho, 1999).

Uma carcaça pode trabalhar com diversos diâmetros de rotores. Para cada diâmetro, corresponde uma curva característica. Se a forma e a rotação se mantiverem constantes, a variação do diâmetro do rotor dá origem a curvas características paralelas, sendo que as superiores referem-se aos diâmetros maiores (Silvestre, 1983).

Segundo Carvalho (1999), variando o diâmetro do rotor, modifica-se a curva característica da bomba: para cada ponto (H_1, Q_1) da curva de uma bomba o diâmetro corresponde, em semelhança mecânica, a um outro ponto (H_2, Q_2) .

Dessa forma, se o diâmetro de um rotor de certa bomba for modificado, as curvas características apresentam relações bem definidas com as curvas originais, expressas pelas relações de Rateaux:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}; \quad (30)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2; \quad (31)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3. \quad (32)$$

sendo as grandezas de índice 1 referentes às características do rotor original e de índice 2, às do rotor usinado.

A usinagem do rotor é recomendada em até 20% do valor do diâmetro original sem afetar, apreciavelmente, o rendimento da máquina (Silvestre, 1983).

Carvalho (1999) ressalta que tais equações são válidas para pontos homólogos, o que significa dizer, para pontos onde a bomba opera com o mesmo rendimento.

A segunda maneira de modificar a curva característica da bomba é alterando a rotação do conjunto moto-bomba. Assim, conservando a forma e o diâmetro do rotor, a energia transferida ao fluido circulante varia com a rotação. A curva característica da bomba também se modifica, pois a altura manométrica aumenta com o acréscimo no número de giros do rotor na unidade de tempo. Aplicando as expressões de Rateaux, tem-se:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} ; \quad (33)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 ; \quad (34)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 . \quad (35)$$

Com isso, pode-se ajustar o ponto de projeto ao ponto de operação da bomba, quando necessário, realizando a usinagem do rotor ou, então, alterando a rotação do conjunto moto-bomba (Santos, 1995; Mattos e Falco, 1998; Carvalho, 1999).

A última maneira conhecida para alterar o ponto de operação da bomba é através da recirculação. Segundo Mattos e Falco (1998), a recirculação consiste

em desviar para o sistema de sucção parte do fluido bombeado. O retorno da linha de recirculação deve acontecer o mais afastado possível da flange de sucção, preferencialmente, no reservatório de captação, para evitar que a temperatura mais elevada do fluido recirculado influencie nas condições de sucção.

O mesmo autor ressaltou ainda que a recirculação é uma forma muito ineficiente de diminuir a vazão, pois toda energia cedida ao fluido recirculado é desperdiçada. Dessa forma, esse procedimento não é recomendável para redução de vazão por períodos prolongados.

2.2.3 Associação de bombas

As bombas podem ser associadas em série e em paralelo. A associação em paralelo é bastante utilizada em sistemas de abastecimento de água em cidades, bem como em serviços industriais e têm sempre a finalidade de aumentar a vazão recalçada e dar maior flexibilidade em termos de atendimento de demanda. Permite a retirada ou colocação de unidades em funcionamento, possibilitando manutenções preventivas com reflexos altamente positivos (Carvalho, 1999).

Segundo este mesmo autor acima, o caso mais recomendado e comum na associação em paralelo é o emprego de bombas iguais com curvas estáveis. Para obtenção da curva de duas bombas iguais, associadas em paralelo, basta marcar o dobro da vazão para cada altura.

A associação em série é um arranjo, que resolve o problema de instalações com alturas manométricas elevadas, quando, então, torna-se necessário o desenvolvimento de grandes pressões. A curva característica desse tipo de associação é obtida a partir das curvas de cada uma das bombas, somando-se às alturas manométricas correspondentes aos mesmos valores de vazão (Mattos e Falco, 1998).

2.2.4 Cavitação

Quando, na tubulação de sucção, a pressão absoluta na entrada da bomba baixar, atingindo a pressão de vapor do líquido, na temperatura em que este se encontra, inicia-se seu processo de vaporização (Macintyre, 1987). A esse fenômeno é dado o nome de *cavitação*.

Segundo Denículi (1993), cavitação é um fenômeno observado somente em líquidos, não ocorrendo sob quaisquer condições em sólidos e gases, podendo-se associá-la, comparativamente, à ebulição de um líquido. O fenômeno ocorre, quando a pressão absoluta na entrada da bomba, for menor ou igual à pressão de vapor do líquido (na temperatura em que este se encontra) e pode ocasionar os seguintes efeitos:

1. se a pressão absoluta do líquido na entrada da bomba for menor ou igual à pressão de vapor e se estender a toda seção do escoamento, poderá formar uma bolha de vapor capaz de interromper o escoamento;
2. se essa pressão for localizada em alguns pontos da entrada da bomba, as bolhas de vapor liberadas serão levadas, pelo escoamento, para regiões de altas pressões (região de saída do rotor). Em virtude da pressão externa ser maior que a interna, ocorrem implosões das bolhas formadas, provocando efeitos distintos, porém simultâneos, como o químico e o mecânico.

O efeito químico ocorre em virtude do ataque de íons livre de oxigênio, liberados com as implosões das bolhas, nas superfícies metálicas, ocasionando corrosão no equipamento. O efeito mecânico, em consequência da condensação das bolhas, faz com que a água que as circunda seja acelerada no sentido centrípeto. Quando a bolha desaparece, as partículas de água chocam-se violentamente umas com as outras, originando o golpe de aríete e, com ele, uma

sobrepressão, que se propaga em sentido contrário, golpeando com violência as paredes do rotor e a carcaça da bomba danificando-as (Santos, 1995).

Segundo Macintyre (1987), os efeitos da cavitação são visíveis, mensuráveis e até audíveis, parecendo o crepitar de lenha seca ao fogo, ou um martelamento com frequência elevada. As pressões exercidas sobre as superfícies, pela ação da percussão das partículas condensadas, ou pela onda de choque por ela provocada alcançam valores relativamente elevados, mas não tão intensos, que pudessem, normalmente, promover uma ruptura do material. Além dos danos causados na bomba, a cavitação ainda promove: redução do rendimento, marcha irregular, trepidação, vibração da máquina e ruídos.

O estudo da cavitação é importante, pois permite prever a altura máxima de colocação de uma bomba, em relação ao nível da água do reservatório de captação. A fim de caracterizar as condições para que ocorra uma boa sucção do líquido, foi introduzida na terminologia de instalações de bombeamento a noção de NPSH, abreviação do termo da língua inglesa *net position suction head*.

Ao se estudar parcelas de energia em uma estação de bombeamento, a partir da equação da energia aplicada entre a superfície livre do líquido, na captação e na entrada da bomba, obtém-se a altura máxima de sucção:

$$h_s \leq \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - h_{f_s} - \frac{V^2}{2g} - \Delta h_B. \quad (36)$$

em que:

h_s : altura de sucção (m);

$\frac{P_{atm}}{\gamma}$: pressão atmosférica local (m);

$\frac{P_v}{\gamma}$: pressão de vapor do fluido em uma dada temperatura (m);

h_{f_s} : perda de carga na sucção (m);

Δh_B : perdas ocorridas no interior da bomba (m).

Pode-se dividir essa equação em outras duas de grande importância no estudo da cavitação. A primeira é o NPSH disponível:

$$NPSH_{disponível} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - hf_s - h_s . \quad (37)$$

A segunda equação é o NPSH requerido pela bomba:

$$NPSH_{requerido} = \frac{V^2}{2g} + \Delta h_B . \quad (38)$$

Para não ocorrer a cavitação, o NPSH disponível tem que ser sempre maior que o requerido.

A curva do NPSH requerido normalmente é fornecida pelo fabricante nos catálogos das bombas. É um ferramental eficiente de que dispõe o engenheiro, para calcular ou determinar a posição da bomba sem que a mesma venha a cavitare, e, finalmente, apresentar uma série de medidas destinadas a diminuir o aparecimento da cavitação (Carvalho, 1999).

2.3 Avaliação econômica

Os custos com sistemas de bombeamento para irrigação são altos, comparados a outros gastos realizados nas lavouras. Em alguns casos, o uso dessa tecnologia promove a redução dos lucros ao invés de incrementá-los. Sob essa ótica, deve-se fazer uma análise prévia antes da implantação do sistema e de

maneira criteriosa, determinar o diâmetro econômico do sistema de adução, parâmetro imprescindível ao sucesso do investimento.

Sabe-se que uma mesma vazão pode ser transportada em tubulações de diferentes diâmetros, alterando a velocidade de escoamento. A variação desse diâmetro, tem reflexos diretos nos custos de investimento, de manutenção e de operação (Carvalho, 1999).

Segundo Porto (1998), sendo a vazão e altura geométrica fixas, os custos totais da linha adutora e do conjunto elevatório, incluindo o custo anual de energia, dependem, de modos opostos, do diâmetro escolhido. Assim, existirá um diâmetro conveniente para o qual o custo total do projeto será mínimo.

Considerando os altos custos de investimento e de operação em irrigação, Carvalho, Braga Júnior e Reis (2000) citam que o dimensionamento da instalação de bombeamento deve ser realizado, levando-se em conta critérios econômicos e não puramente hidráulicos.

O custo do sistema de bombeamento pode ser previsto por meio de uma avaliação econômica, na qual se estimam todos os dispêndios e retornos anuais esperados. Nos custos anuais já incluem os da aquisição do sistema e os da operação e manutenção dos equipamentos (PRONI, 1987).

Segundo Carvalho, Mello, Braga Júnior et al. (2000), os custos anuais consistem na anualização do capital investido, podendo-se utilizar o *fator de recuperação do capital*, que leva em consideração a taxa de juros anual e períodos de retorno do investimento, através das equações 39 e 40:

$$FRC = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (39)$$

em que:

FRC : fator de recuperação do capital (decimal);

i : taxa de juros (decimal);

n : período de amortização (anos).

$$CA = FRC \cdot CI . \quad (40)$$

em que:

CA : custo anualizado (R\$/ano);

CI : custo do equipamento (R\$).

Leftwich (1983) define *custos fixos* como sendo o conjunto de obrigações de uma firma, com os recursos fixos, por unidade de tempo, não dependendo da quantidade produzida nesse intervalo. Os *custos variáveis* são as obrigações da firma, incorridas aos recursos variáveis, ou seja, os gastos que se têm em um curto prazo ou um ciclo de produção. Dessa forma, os custos variáveis são relativos aos gastos com a produção, em um curto prazo e variam de acordo com a quantidade produzida. Os *custos totais* resultam da somatória dos custos fixos e custos variáveis.

Segundo PRONI (1987), os componentes do custo fixo anual são provenientes da aplicação dos juros sobre o capital investido e os resultantes da depreciação do sistema, a qual é definida, por sua vez, como sendo a perda gradual do valor inicial do equipamento ao longo do seu tempo de uso (vida útil). Essa perda é causada pelos desgastes e avarias que o equipamento sofre devido ao uso contínuo ano após ano.

Assim, o valor total do investimento deve ser anualmente amortizado. Existem muitas maneiras de calcular a depreciação. A mais usual é a que tem por base a vida útil do equipamento, considerando o valor de compra e o valor de venda ao final do seu tempo de uso (Leftwich, 1983).

O custo variável anual é composto pelos gastos com a manutenção do sistema e a energia necessária para o acionamento dos motores das casas de bomba. A Tabela 1 traz informações referentes à vida útil dos equipamentos,

utilizados em sistemas de bombeamento e respectivas estimativas dos custos com a manutenção anual (PRONI, 1987).

TABELA 1 Vida útil dos componentes de sistemas de bombeamento e estimativa da manutenção anual (Fonte: PRONI, 1987).

Componentes	Vida útil (anos)	Manutenção anual (% sobre o valor de investimento)
Bomba de eixo vertical	20-30	0,5-1,5
Bomba centrífuga	16-25	3,0-5,0
Motor elétrico	20-25	1,5-2,5
Motor diesel	10-20	5,0-8,0
Tubos de PVC (enterrado)	15-40	0,25-0,75
Tubos de alumínio sob pressão	10-20	1,5-2,5
Tubos de aço (enterrado)	15-25	0,25-0,5
Tubos de aço (superfície)	10-12	1,5-2,5
Tubos de aço galvanizado (superfície)	10-20	1,0-2,0
Tubos de polietileno (gotejamento)	8-10	1,5-2,5

Segundo Carvalho (1998), o custo de energia para irrigação depende do tipo de energia utilizada, diesel ou energia elétrica. No caso do uso de energia diesel, o cálculo é simples: multiplica-se o consumo do motor pelo preço do óleo diesel. O de energia elétrica é um pouco mais complexo. Dependerá da potência instalada, da existência de um contrato com a concessionária e do período do ano em que a energia será utilizada. Os pequenos consumidores, grupo B, são atendidos por redes monofásicas (até 37,5 kVA) e trifásicas (até 75 kVA). Este grupo poderá se beneficiar, a partir de um contrato, apenas pela tarifa reduzida (noturna), no caso de irrigantes. Ao grupo A (transformadores acima de 75 kVA) pode ser aplicado outros dois tipos de tarifa: verde e azul. O primeiro tipo aplica-se às potências de transformadores entre 75 e 500 kVA, e ao segundo tipo, às potências superiores à 500 kVA.

O sistema de bombeamento deve ser dimensionado de tal forma que o somatório do custo energético anual, com o custo de manutenção anual e com o custo fixo anual seja minimizado (Paulino e Pereira, 1986).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolveu-se um aplicativo computacional, na linguagem de programação Microsoft Visual Basic versão 5.0, em ambiente operacional Windows, plataforma 32 bits, para ser utilizado como ferramenta básica em projetos de recalque, envolvendo cálculos de perda de carga, escolha do conjunto moto-bomba e avaliação econômica.

O programa elaborado possui 52 janelas, 1 módulo e 5 bancos de dados. Estes últimos foram divididos nas seguintes categorias: bombas hidráulicas (Bombas.DAT), motores elétricos (Motor.DAT), tarifas energéticas e configurações do sistema (Tarifas.DAT), dados econômicos detalhados (EcDet.DAT) e dados econômicos com funções pré-programadas (EcProg.DAT).

Ficou disponível ao usuário o aplicativo “Calculadora” do Windows e também uma tecla de atalho para obter informações do sistema operacional.

O fluxograma (Fig. 1) mostra, esquematicamente, o funcionamento do aplicativo computacional desenvolvido.

3.1 Perda de carga contínua

A perda de carga contínua pode ser calculada pelas seguintes equações: Darcy-Weissbach, Hazen-Williams, Fair-Whipple-Hsiao, Flamant e Manning. Os parâmetros de entrada comum a todas as equações relacionadas são: comprimento da tubulação, diâmetro interno do tubo e vazão ou velocidade de escoamento. A diferença entre elas está na determinação do coeficiente ou fator de atrito, peculiar à cada expressão.

A equação de Darcy-Weissbach (equação 17) utiliza o fator de atrito f . Este coeficiente pode ser calculado a partir de diversas equações (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16), dependendo do regime de escoamento e da opção do usuário.

O cálculo desse coeficiente requer ainda, para todas as equações, o valor do número de Reynolds e, para algumas, a rugosidade absoluta e o diâmetro interno do conduto.

O valor inicial de f utilizado é obtido pela expressão geral de Swamee-Jain (equação 16) e, posteriormente, determina-se o regime de escoamento a partir das equações 3, 4, 5 e 6.

O número de Reynolds é obtido, utilizando-se a equação 2. Esta requer dados de velocidade, viscosidade do fluido e diâmetro interno do tubo, sendo a tabela de viscosidade da água em função da temperatura encontrada no programa, assim como a tabela da rugosidade absoluta de alguns materiais.

As demais equações de perda de carga contínua utilizam o mesmo procedimento de cálculo, sendo que cada uma possui diferentes coeficientes de atrito.

3.2 Perda de carga localizada

A perda de carga localizada é determinada pelo método do comprimento equivalente em função do número de diâmetros das peças especiais.

Nesse método, multiplica-se a quantidade de uma peça especial qualquer, pelo número de diâmetro correspondente. Essa metodologia é repetida para todas as peças e adiciona-se, ao final, os resultados. O valor dessa soma é multiplicado pelo diâmetro da tubulação empregada, obtendo-se o comprimento equivalente das peças especiais existentes no sistema.

3.3 Altura manométrica total

Por ser um parâmetro de suma importância em projetos de sistemas de bombeamento, foi criada uma janela para cálculo da altura manométrica total, denominada no aplicativo de *Hidráulica: Altura Manométrica*.

A altura manométrica total é calculada pela seguinte expressão:

$$H = hg + hf + Ps, \quad (41)$$

em que:

H : altura manométrica total (m);

hg : altura geométrica total (m);

hf : perda de carga na tubulação (m);

Ps : pressão na saída do sistema de recalque (m).

3.4 Bombas hidráulicas

As informações do banco de dados das bombas foram divididas em propriedades descritivas e curvas características.

A introdução das curvas características $H = H(Q)$, $P = P(Q)$ e $NPSH = NPSH(Q)$ obedecem aos procedimentos explicados a seguir.

As duas primeiras funções podem conter o número de curvas, variando entre 1 e 6 e a última apenas uma curva, esta referente ao rotor de maior diâmetro.

A equação, que descreve a curva característica de altura manométrica em função da vazão, é uma função polinomial de segundo grau completa (Nielsen, 1986; Arens e Porto, 1989):

$$H = a_1 \cdot Q^2 + b_1 \cdot Q + c_1. \quad (42)$$

Os parâmetros a_1 , b_1 e c_1 são obtidos através da estimativa analítica, tomando-se três pontos sob a curva. No primeiro ponto, onde a vazão é nula (Q_1), é lido H_1 ou altura manométrica no ponto de *shut-off*. No segundo ponto, situado na metade da vazão máxima (Q_2), obtém-se o valor H_2 ; o terceiro e último ponto, onde a vazão é máxima (Q_3), lê-se o valor H_3 , como esquematizado na Figura 2.

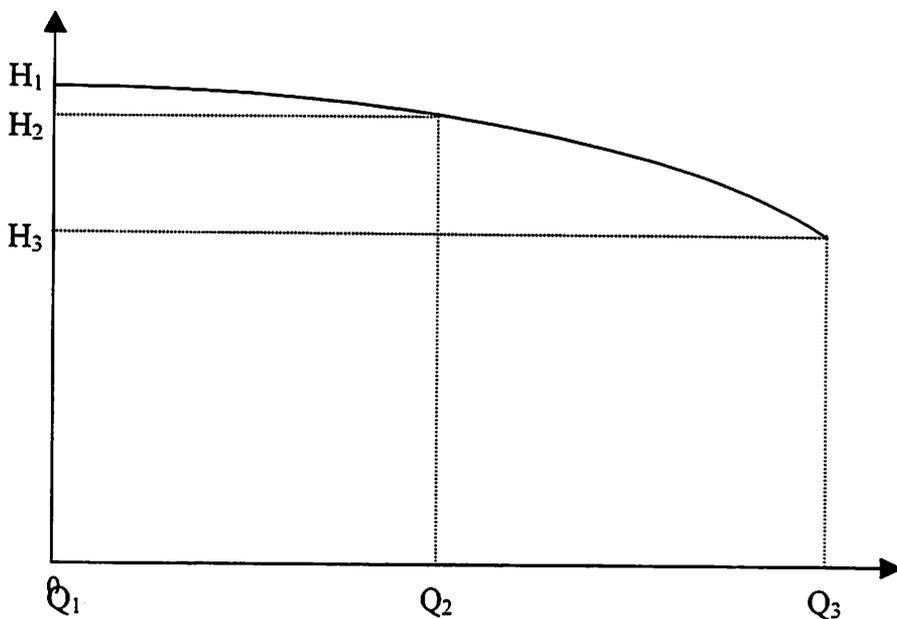


FIGURA 2 Gráfico esquemático do método de obtenção dos três pontos na curva característica $H = H(Q)$, para determinar a função polinomial de segundo grau completa.

A constante c_1 da função polinomial é igual a H_1 , ou seja, quando a vazão é igual a zero, c_1 é igual a altura manométrica. Os outros dois parâmetros foram assim determinados:

$$H_2 = a_1 \cdot Q_2^2 + b_1 \cdot Q_2 + H_1; \quad (43)$$

$$H_3 = a_1 \cdot Q_3^2 + \frac{H_2 - H_1 - a_1 \cdot Q_2^2}{Q_2} \cdot Q_3 + H_1; \quad (44)$$

$$a_1 = \frac{H_3 - 2 \cdot H_2 + H_1}{2 \cdot Q_2^2}; \quad (45)$$

$$b_1 = \frac{H_2 - H_1 - a_1 \cdot Q_2^2}{Q_2}. \quad (46)$$

A função utilizada para descrever a curva $P = P(Q)$ é uma polinomial do segundo grau completa (Nielsen, 1986; Arens e Porto, 1989):

$$P = a_2 \cdot Q^2 + b_2 \cdot Q + c_2. \quad (47)$$

A diferença desta curva para a curva anterior é que nesta, a vazão mínima não inicia no ponto de vazão zero (Figura 3).

Para determinação da expressão polinomial de segundo grau completa, partindo de uma vazão maior que zero, é necessário que seja cumprida a seguinte exigência estabelecida na equação 48, ou seja, que os pontos lidos na curva sejam equidistantes em função da vazão:

$$Q_2 - Q_1 = Q_3 - Q_2. \quad (48)$$

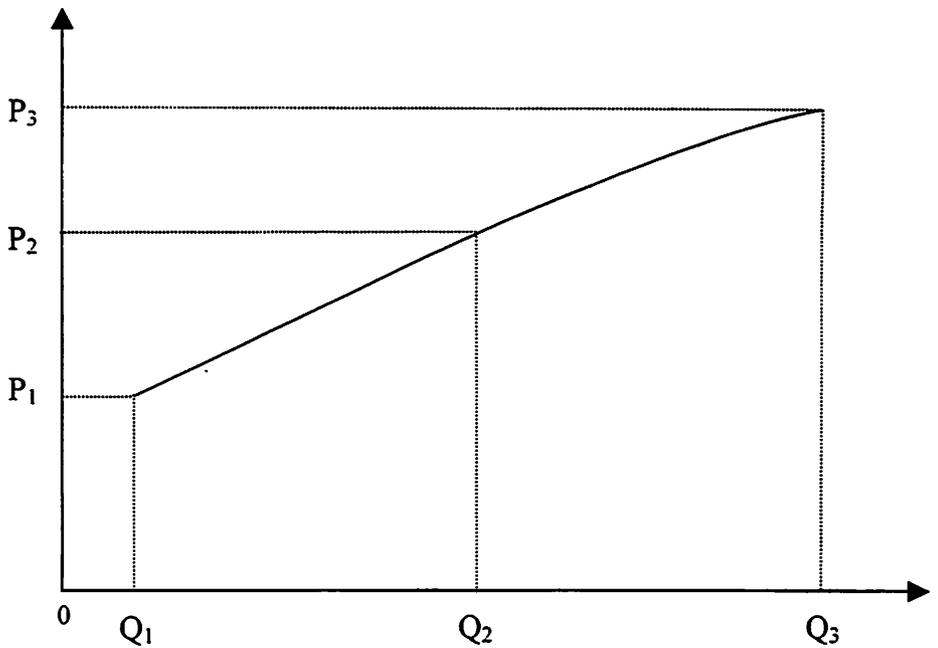


FIGURA 3 Gráfico esquemático do método de obtenção dos 3 pontos na curva característica $P = P(Q)$, para determinar a função polinomial de segundo grau completa.

Os parâmetros a_2 , b_2 e c_2 são obtidos através das seguintes equações:

$$P_1 = a_2 \cdot Q_1^2 + b_2 \cdot Q_1 + c_2; \quad (49)$$

$$P_2 = a_2 \cdot Q_2^2 + b_2 \cdot Q_2 + c_2; \quad (50)$$

$$P_3 = a_2 \cdot Q_3^2 + b_2 \cdot Q_3 + c_2; \quad (51)$$

$$c_2 = \frac{P_1 \cdot (Q_3 - Q_2) + P_2 \cdot (Q_1 - Q_3) + P_3 \cdot (Q_2 - Q_1)}{(Q_2^2 - Q_3^2) \cdot (Q_1 - Q_2) - (Q_1^2 - Q_2^2) \cdot (Q_2 - Q_3)}; \quad (52)$$

$$b_2 = \frac{P_1 - P_2 - c_2 \cdot (Q_1^2 - Q_2^2)}{(Q_1 - Q_2)}; \quad (53)$$

$$a_2 = P_1 - (b_2 \cdot Q_1 + c_2 \cdot Q_1^2). \quad (54)$$

A obtenção dos coeficientes da curva característica do NPSH é idêntica à curva característica de potência:

$$NPSH = a_3 \cdot Q^2 + b_3 \cdot Q + c_3 . \quad (55)$$

A Figura 4 esquematiza a obtenção dos pontos da curva do NPSH.

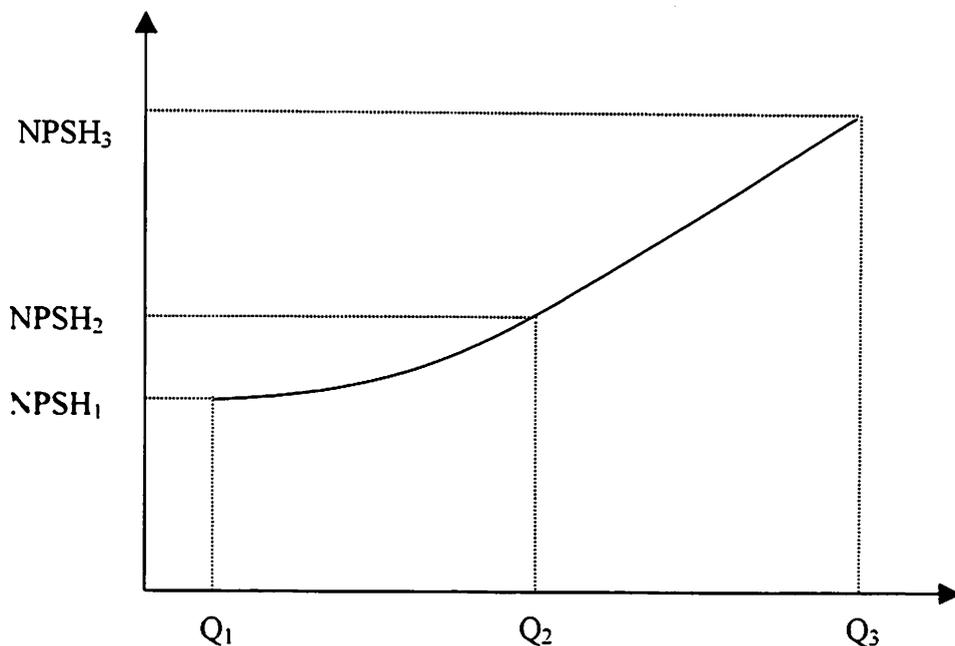


FIGURA 4 Gráfico esquemático do método de obtenção dos 3 pontos na curva característica $NPSH = NPSH(Q)$, para determinar a função polinomial de segundo grau completa.

As vazões dos três pontos lidos no catálogo obedecem às mesmas exigências da curva de potência:

$$\underline{Q}_2 - \underline{Q}_1 = \underline{Q}_3 - \underline{Q}_2. \quad (56)$$

Os parâmetros a_3 , b_3 e c_3 são obtidos através das equações abaixo:

$$NPSH_1 = a_3 \cdot \underline{Q}_1^2 + b_3 \cdot \underline{Q}_1 + c_3; \quad (57)$$

$$NPSH_2 = a_3 \cdot \underline{Q}_2^2 + b_3 \cdot \underline{Q}_2 + c_3; \quad (58)$$

$$NPSH_3 = a_3 \cdot \underline{Q}_3^2 + b_3 \cdot \underline{Q}_3 + c_3; \quad (59)$$

$$c_3 = \frac{NPSH_1 \cdot (\underline{Q}_3 - \underline{Q}_2) + NPSH_2 \cdot (\underline{Q}_1 - \underline{Q}_3) + NPSH_3 \cdot (\underline{Q}_2 - \underline{Q}_1)}{(\underline{Q}_2^2 - \underline{Q}_3^2) \cdot (\underline{Q}_1 - \underline{Q}_2) - (\underline{Q}_1^2 - \underline{Q}_2^2) \cdot (\underline{Q}_2 - \underline{Q}_3)}; \quad (60)$$

$$b_3 = \frac{NPSH_1 - NPSH_2 - c_3 \cdot (\underline{Q}_1^2 - \underline{Q}_2^2)}{(\underline{Q}_1 - \underline{Q}_2)}; \quad (61)$$

$$a_3 = NPSH_1 - (b_3 \cdot \underline{Q}_1 + c_3 \cdot \underline{Q}_1^2). \quad (62)$$

Os coeficientes das funções polinomiais de segundo grau completa são armazenados em campos correspondentes no banco de dados da bomba.

O rendimento foi obtido através da expressão (Arens e Porto, 1989):

$$R = \frac{H \cdot Q}{2.7 \cdot P}, \quad (63)$$

em que:

R : rendimento (%).

Para cada curva característica $H = H(Q)$ determina-se o máximo rendimento e, em seguida, estima-se uma curva do segundo grau do rendimento, em função da vazão, sendo que o ponto máximo dessa curva coincide com o máximo rendimento calculado.

3.4.1 Escolha da bomba

A seleção de bombas necessita do ponto de projeto do sistema de recalque: vazão e altura manométrica total.

O aplicativo realiza um rastreamento no banco de dados, selecionando somente as bombas, que atenderem a vazão de projeto, considerando uma faixa de 15% para mais e para menos, do rendimento máximo na curva do rotor de maior diâmetro.

O passo seguinte é descobrir quais as bombas, das selecionadas, atendem à altura manométrica exigida. Para isso, o ponto de projeto fica delimitado entre a curva do rotor de maior diâmetro e uma curva fictícia, que, por sua vez, consiste em uma projeção paralela à curva do rotor de menor diâmetro e abaixo desta em 15%.

Caso haja seleção de um número superior ao número de modelos requisitados pelo usuário, serão mostrados apenas os que possuem os melhores rendimentos no ponto de projeto.

3.4.2 Associação de bombas

Pode-se fazer a associação de bombas em série ou em paralelo. A recomendação para a associação em paralelo é que seja realizada apenas com bombas iguais (Carvalho, 1999). O procedimento adotado no aplicativo foi a associação de um número ilimitado de bombas, porém, sempre do mesmo modelo, tanto para a associação em série quanto para a em paralelo.

A curva característica, que representa o comportamento da altura manométrica, em função da vazão, é descrita na equação 26. Sempre será associada a curva característica do rotor de maior diâmetro do modelo escolhido.

Os coeficientes da associação em paralelo (a_p , b_p e c_p) são obtidos pelo seguinte procedimento:

$$a_p = \frac{a_1}{N^2}; \quad (64)$$

$$b_p = \frac{b_1}{N}; \quad (65)$$

$$c_p = c_1. \quad (66)$$

em que:

N é o número de bombas associadas.

A curva da associação em paralelo é representada pela equação 67:

$$H = a_p Q^2 + b_p Q + c_p. \quad (67)$$

Os coeficientes da associação em série (a_s , b_s e c_s) são obtidos multiplicando-se o número de bombas associadas, pelos seus coeficientes, operando isoladamente:

$$a_s = a_1 \cdot N; \quad (68)$$

$$b_s = b_1 \cdot N; \quad (69)$$

$$c_s = c_1 \cdot N. \quad (70)$$

A equação 71 descreve a associação em série:

$$H = a_s Q^2 + b_s Q + c_s \quad (71)$$

O programa gera o gráfico, traçando às curvas da associação, da bomba isolada e do sistema. As interseções destas resultam em informações numéricas

importantes ao projetista, as quais são obtidas através da resolução simultânea destas funções:

- pontos de trabalho da bomba operando isolada e na associação;
- rendimentos da bomba operando isolada e na associação;
- potências da bomba operando isolada e na associação;
- ponto de trabalho da associação;
- rendimento da associação;
- potência da associação.

3.4.3 Cavitação

Para determinar o NPSH disponível são necessários os dados referentes à pressão atmosférica local, pressão de vapor do líquido bombeado, perdas de carga no conduto de sucção e altura de instalação da bomba, em relação ao nível da água no reservatório de captação.

A tabela da pressão de vapor da água limpa, em função da temperatura, foi introduzida no aplicativo. A pressão atmosférica local pode ser estimada utilizando-se a equação 72 (Carvalho, 2000):

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} = 10 - 0,0012A, \quad (72)$$

em que:

$\frac{P_{atm}}{\gamma}$: pressão atmosférica local (m);

A : altitude do local (m).

As perdas de carga, que ocorrem na tubulação de sucção também são computadas, assim como a altura geométrica de instalação da bomba, em relação ao nível da água no reservatório de captação.

O cálculo do NPSH disponível (m) é descrito na equação 73:

$$NPSH_{disponível} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - h_s - h_{f_s}, \quad (73)$$

em que:

$\frac{P_v}{\gamma}$: pressão de vapor do fluido (m);

h_s : altura de sucção (m);

h_{f_s} : perda de carga na tubulação de sucção (m).

3.5 Motores elétricos

A seleção de motores baseia-se nas seguintes características do sistema de bombeamento:

- vazão;
- altura manométrica;
- rendimento da bomba;
- rendimento do motor.

A partir desses dados, o programa calcula a potência mínima requerida (potência instalada) e a potência com folga, esta recomendada para que os motores não trabalhem no limite e sejam atendidas às exigências do sistema de recalque.

$$P_{min} = \frac{Q \cdot H}{270 \cdot \eta_{bomba} \cdot \eta_{motor}}, \quad (74)$$

em que:

P_{min} : potência mínima requerida (cv);

Q : vazão (m³/h);

H : altura manométrica total (m);

η_{bomba} : rendimento da bomba (decimal);

η_{motor} : rendimento do motor (decimal).

A Tabela 2 mostra a reserva de potência, em porcentagem, dada ao motor em função da potência exigida pelo sistema de recalque.

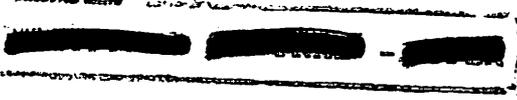
TABELA 2. Porcentagem de potência acrescida aos motores elétricos em função da potência instalada (Fonte: Carvalho, 2000).

Potência exigida (cv)	Acréscimo à potência instalada (%)
< 2	50
3-5	30
6-10	25
11-25	15
> 25	10

A seleção consiste em duas classificações: motores que tenham a potência nominal imediatamente superior à potência com folga (recomendado) e motores que possuem potência nominal entre a potência instalada e a com folga.

Com relação aos modelos selecionados são mostradas as características armazenadas e os valores do ponto de operação do motor. Estes consistem-se em estimativas do uso da potência nominal e da potência consumida, do rendimento e do fator de potência.

A porcentagem da potência nominal é obtida pela divisão da potência consumida pela potência nominal do motor. A potência consumida é a própria potência mínima requerida ou potência instalada. O rendimento e o fator de potência são estimados, utilizando-se os três pontos de cada um desses parâmetros para se obter funções quadráticas.



Posteriormente, aplicando a potência instalada em cada uma dessas equações, determinam-se o rendimento e o fator de potência no ponto de operação do motor.

3.6 Análise econômica

O aplicativo analisa até 7 diâmetros simultâneos. Uma vez digitada a vazão de projeto, o diâmetro supostamente mais econômico da tubulação de recalque é determinado de acordo com a velocidade econômica, por volta de 1,5 m/s, recomendada por Carvalho e Reis (2000).

A partir deste diâmetro são inseridos três diâmetros comerciais superiores e três diâmetros comerciais inferiores. Para a tubulação de sucção não é recomendada a variação do diâmetro para análise econômica, uma vez que esta é limitada pela possibilidade da ocorrência da cavitação.

Por isso, os diâmetros das tubulações de sucção são iguais nas sete situações avaliadas e foram calculados para que a velocidade de fluxo ocorra entre 1 e 1.5 m/s.

Para cada diâmetro é calculado a altura manométrica total, o custo fixo anual, o custo de manutenção anual, o custo de energia anual e o custo total anual. Este último é proveniente da soma dos custos anuais fixos, de manutenção e de energia.

Os dados de vazão, de altura geométrica, de pressão na saída do sistema, de comprimentos virtuais das tubulações de sucção e de recalque, dos diâmetros das tubulações de sucção e de recalque e dos coeficiente de atrito de Hazen-Williams são necessários, para os cálculos das alturas manométricas totais das sete instalações de bombeamento em estudo.

Os valores de comprimento equivalente relativos às perdas de carga localizadas são adicionados automaticamente aos comprimentos das tubulações de sucção e de recalque informados pelo usuário. A tubulação de sucção possui

as seguintes conexões: uma válvula de pé e crivo, uma curva de 90° e uma redução gradual excêntrica.

Na tubulação de recalque usaram-se as seguintes peças especiais na saída do conjunto moto-bomba: uma ampliação gradual, um registro de gaveta aberto, uma curva dupla e uma válvula de retenção.

A partir da equação de Hazen-Williams, calcularam-se as perdas de carga existentes nas tubulações de sucção e de recalque, utilizando-se, além dos comprimentos virtuais e dos diâmetros relativos a cada sistema, o coeficiente de atrito dessa equação.

A altura manométrica total é resultado da soma da altura geométrica, da pressão na saída do sistema de bombeamento e das perdas de carga da sucção e do recalque.

Os custos fixos são calculados, com base nos custos de investimento em tubulação e moto-bomba. Sobre o valor total despendido nesses equipamentos, aplica-se o fator de recuperação de capital (equações 39 e 40), no qual está embutido o período de amortização do investimento, obtendo-se o custo anualizado.

Os custos de manutenção são realizados com base no investimento em tubulações e sistema moto-bomba. Dependendo do tipo de material empregado na fabricação da tubulação e das condições de campo, em que estas se encontram, há uma estimativa do custo da manutenção anual em relação ao capital investido (Tabela 1). Da mesma forma ocorre com o sistema moto-bomba. Nesse caso, a variável que determina o valor estimado é o tipo de energia utilizada no sistema (diesel ou elétrica).

Os custos de energia são obtidos de acordo com a potência do conjunto moto-bomba, do tipo de energia utilizada e no caso de motores elétricos, se há contrato com a concessionária. Os cálculos serão descritos no item 3.7.

Um outro tipo de análise econômica é realizada com o uso de equações pré-programadas, em substituição a alguns dados de entrada. Nesse tipo de análise, o material utilizado nas tubulações é o aço galvanizado, com o coeficiente de atrito de Hazen-Williams igual a 125.

Os custos calculados para a tubulação de sucção e conjunto moto-bomba elétrico, tubulação de sucção e conjunto moto-bomba a diesel, tubulação de recalque e para todos os diâmetros em aço galvanizado, são obtidos, respectivamente, pelas equações 75, 76 e 77 (Carvalho e Reis, 2000):

$$C = e^{3.75+0.806 \cdot \ln(Q)+0.083 \cdot (\ln(H))^2} ; \quad (75)$$

$$C = e^{6.1+0.537 \cdot \ln(Q)+0.0574 \cdot (\ln(H))^2} ; \quad (76)$$

$$C = e^{3.7+0.066 \cdot (\ln(L))^2+1.496 \cdot \ln(D)} , \quad (77)$$

em que:

C : custo (R\$);

D : diâmetro da tubulação de recalque (polegadas).

3.7 Custo de energia

Os cálculos referentes aos custos de energia, em instalações de bombeamento, dependem da vazão bombeada, da altura manométrica total, do rendimento do sistema moto-bomba, do tipo de energia utilizada (elétrica ou diesel), do tempo de funcionamento do conjunto moto-bomba, das tarifas praticadas pelo mercado e das equações utilizadas em cada região.

A potência exigida ao motor a diesel, em cavalo vapor, é calculada de acordo com a equação 78:

$$P_{diesel} = \frac{Q \cdot H}{270 \cdot \eta_{Bomba}} . \quad (78)$$

em que:

η_{Bomba} : rendimento da bomba (decimal).

O consumo específico (CE) do motor, referente ao volume consumido de óleo diesel por hora de funcionamento por cv, é obtido segundo a equação 79 (Carvalho, 2000):

$$CE = \left(0,03054 + \frac{0,2445}{P_{diesel}} \right)^{0,5} \quad (79)$$

O custo de energia (valor monetário em reais) com a utilização de motor a óleo diesel fica:

$$C_{diesel} = P_{diesel} \cdot CE \cdot T \cdot Pr, \quad (80)$$

em que:

T : tempo de funcionamento do sistema de bombeamento (h);

Pr : preço do litro de óleo diesel (R\$).

O consumo de um motor elétrico, em quilowatt, pode ser calculado utilizando-se a potência como variável. Para motores com menos de 25 cv e com mais de 25 cv, aplicam-se as equações 81 e 82, respectivamente (Carvalho, 2000):

$$Cons_{elétrica} = 0,286 + 0,9 \cdot P; \quad (81)$$

$$Cons_{elétrica} = 2,64 + 0,8 \cdot P. \quad (82)$$

em que:

P é a potência consumida pelo motor no ponto de operação (cv).

Para os consumidores do grupo A, além do consumo, deve-se calcular a demanda:

$$D = \frac{P \cdot 0,736}{R}, \quad (83)$$

em que:

D : demanda do equipamento (kW);

R : rendimento do motor (decimal).

Posteriormente, com a possibilidade de haver ou não um contrato com a concessionária, determinam-se as fórmulas a serem empregadas no cálculo do custo final de energia elétrica.

O total a ser pago pelo consumidor sem contrato (*tarifa convencional*) depende, primeiramente, do grupo do consumidor. Para os consumidores do grupo B, o custo de energia é obtido com base apenas no consumo e no preço do kWh (equação 84). O custo energético do grupo A exige, além do consumo e da tarifa de consumo, a demanda do sistema e a tarifa de demanda (equação 85). O custo final de energia é dividido por 0,82, para acrescentar a parcela do ICMS cobrada no estado de Minas Gerais:

$$Custo_B = \frac{Cons_{elétrica} \cdot T \cdot Tr_C}{0,82}; \quad (84)$$

$$Custo_A = \frac{Cons_{elétrica} \cdot T \cdot Tr_C + 12 \cdot D \cdot Tr_D}{0,82}, \quad (85)$$

em que:

T : tempo de funcionamento (h);

Tr_C : tarifa de consumo (R\$/kWh);

Tr_D : tarifa de demanda (em R\$/kW).

O contrato pode ser aplicado aos consumidores do grupo B e do grupo A. Para o primeiro grupo de consumidores há uma tarifa noturna reduzida, no período das 23 h às 5 h do dia seguinte, reduzindo sensivelmente os gastos com energia elétrica, se o equipamento funcionar neste horário. Para o segundo grupo existem dois tipos de tarifas: azul (equação 86) e verde (equação 87).

$$Custo = \frac{Dp \cdot Tdp + Dfp \cdot Tdfp + Cp \cdot Tp + Cfp \cdot Tfp}{0,82}; \quad (86)$$

$$Custo = \frac{Dc \cdot Td + Cp \cdot Tp + Cfp \cdot Tfp}{0,82}, \quad (87)$$

em que:

- Dp : demanda em horário de ponta (kW);
- Tdp : tarifa da demanda em horário de ponta (R\$/kW);
- Dfp : demanda do horário fora de ponta (kW);
- $Tdfp$: tarifa da demanda do horário fora de ponta (R\$/kW);
- Cp : consumo de energia no horário de ponta (kWh);
- Tp : tarifa do consumo no horário de ponta (R\$/kWh);
- Cfp : consumo fora do horário de ponta (kWh);
- Tfp : tarifa do consumo no horário fora de ponta (R\$/kWh);
- Dc : demanda contratada (kW);
- Td : tarifa da demanda contratada (R\$/kW).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aplicativo computacional desenvolvido, denominado *BombaSoft*, pode ser executado em computadores, que utilizem o ambiente Windows versão 95, ou superior e espaço mínimo disponível em disco rígido de 20 megabytes.

Possui uma interface “amigável”, permitindo que seja usado por pessoas que possuam um mínimo de conhecimento de informática, como, por exemplo, saber usar o ambiente operacional Windows.

O programa foi elaborado visando atender projetos de instalações de recalque, principalmente destinadas à irrigação. Entretanto, pode ser utilizado para outros fins, como cálculos de perda de carga para situações isoladas e avaliações do custo de energia.

Apesar do *BombaSoft* facilitar o dimensionamento de instalações de recalque, não dispensa o conhecimento técnico-científico, pois suas rotinas possuem embasamento teórico, sendo os resultados emitidos pelo programa passíveis de análise final.

4.1 Instalação

Os arquivos necessários à instalação do *BombaSoft* foram gerados e organizados pelo recurso *Application Setup Wizard* do Microsoft Visual Basic versão 5.0. Gravaram-se esses arquivos em CD-ROM e em disquetes 3½” de 1,44 megabytes de capacidade. Todos arquivos de instalação foram compactados, principalmente o executável (2,98 megabytes), reduzindo a quase um terço o espaço de armazenamento dos discos.

Fazem parte do conjunto de arquivos de instalação as bibliotecas, o programa executável, os bancos de dados e os arquivos de ajuda. Os arquivos,

no total de 31, ocupam 5 megabytes e, após a descompactação, aproximadamente 13 megabytes.

Na instalação do aplicativo *BombaSoft*, os arquivos bibliotecas são gravados no subdiretório *System* situado no diretório *Windows*. Eles são necessários em computadores, que não possuam a linguagem de programação Microsoft Visual Basic, ou seja, para a grande maioria dos equipamentos. Trazem informações referentes às construções dos botões de comando, caixas de texto, caixas de lista, gráficos, formulários, dentre outros controles. Sem esses arquivos o aplicativo computacional não funciona.

O programa executável *BombaSoft.EXE*, os 5 bancos de dados e os 2 arquivos de ajuda são gravados no subdiretório *BombaSoft*, criado pelo programa de instalação, localizado no diretório *Arquivos de Programas*. Este endereço não deve ser alterado, pois o aplicativo foi programado para buscar diversas informações necessárias à sua execução nesse local.

O aplicativo computacional *BombaSoft* é executado seguindo a seqüência: botão *Iniciar*, *Programas* e *BombaSoft*.

4.2 Cópias de segurança

As cópias de segurança podem ser gravadas em discos rígidos ou flexíveis, bastando o usuário escolher o caminho dentro do sistema de hardware.

Para gravar os bancos de dados das bombas e dos motores, devem-se deixar selecionados os dois arquivos, como é mostrado na Figura 5. Se desejar gravar apenas um dos dois, seleciona-se apenas a caixa de verificação relativa à esse banco de dados. Posteriormente, clica-se no botão de comando *Gravar*.

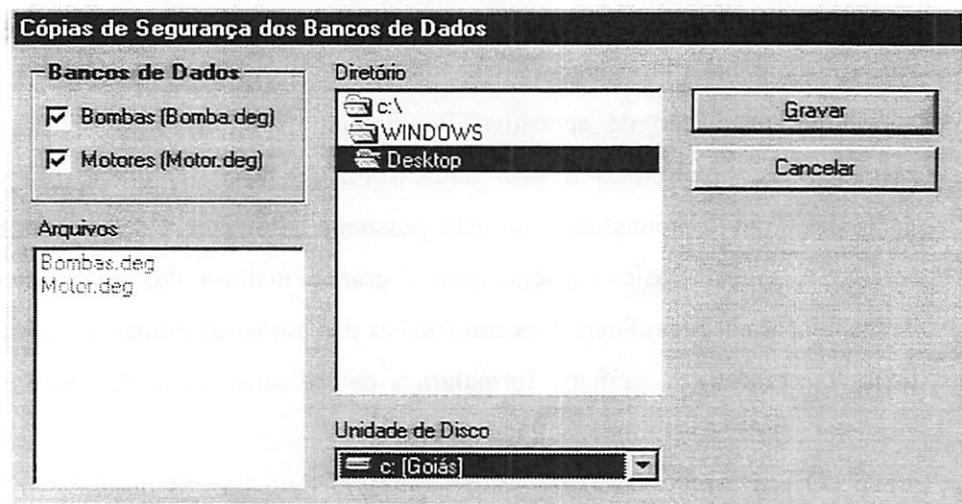


FIGURA 5 Janela do *BombaSoft* destinada a gerar cópias de segurança.

A restauração das cópias de segurança gravadas previamente consiste no caminho inverso. Primeiro deve ser informado o caminho onde se encontra(m) o(s) banco(s) de dados e, em seguida, clicar no botão de comando *Restaurar*.

4.3 Perda de carga e altura manométrica

4.3.1 Descrição

Os cálculos de perda de carga contínua, utilizando as equações inseridas no aplicativo, são realizados digitando os valores de diâmetro, comprimento do tubo, velocidade ou vazão de escoamento e coeficiente de atrito.

O fator de atrito f , da expressão geral de Darcy-Weissbach, por envolver cálculos mais complexos e trabalhosos, tem sua determinação auxiliada pelo aplicativo. Para isso, são necessários os valores do diâmetro do conduto, do número de Reynolds e da rugosidade absoluta do material.

Para calcular o número de Reynolds, precisa-se do diâmetro do conduto, da velocidade ou vazão de escoamento e da viscosidade cinemática do fluido. Os dois primeiros dados são de obtenção direta e o último pode ser obtido no próprio aplicativo.

A rugosidade absoluta é tabelada em função do material empregado e do tempo de uso. Há uma variação considerável dos valores encontrados na literatura. No aplicativo empregaram-se valores médios e mais utilizados na prática.

As expressões de Hazen-Williams e Manning requerem os mesmos dados que a equação de Darcy-Weissbach, diferenciando apenas no coeficiente de atrito, tabelado em função do material empregado (tabelas inseridas no aplicativo).

As equações de Fair-Whipple-Hsiao e Flamant não requerem o coeficiente de atrito como as fórmulas anteriores. Por outro lado, o usuário deve informar o material de fabricação dos tubos e as condições de uso.

No caso das perdas de carga localizadas, a determinação ocorre pelo método do comprimento equivalente, utilizando as tabelas que contém o número de diâmetros de várias peças especiais. Para se obter a perda de carga localizada em unidade de energia (m.c.a.), deve se introduzir o valor do comprimento fictício nas equações de perda de carga contínua.

4.3.2 Procedimento de cálculo

Os cálculos de perda de carga contínua são realizados da mesma forma em todas equações e obedecem os seguintes passos:

- escolha da incógnita do problema, clicando no botão de opção correspondente;
- preenchimento dos dados de entrada;
- clicar no botão de comando *Calcular*.

Para o cálculo do fator de atrito f são necessários os seguintes dados de entrada: rugosidade absoluta da parede do tubo, número de Reynolds e diâmetro da tubulação. Em seguida, escolhe-se a equação a ser empregada no cálculo.

Para utilizar a tabela de rugosidade absoluta inserida no aplicativo, basta clicar no botão K e escolher o material utilizado. Para determinar o número de Reynolds usando o aplicativo, clica-se no botão de comando Re . Os dados de entrada são: fluxo de escoamento (velocidade ou vazão), diâmetro do tubo e viscosidade cinemática do fluido.

Qualquer equação pode ser escolhida para se calcular o fator de atrito f . Entretanto, se a equação selecionada não se aplicar ao regime de escoamento, o programa avisa que não poderá ser utilizada e f recebe o valor zero.

Nas demais equações de perda de carga contínua, os coeficientes de atrito, quando existentes, são tabelados.

No cálculo de perda de carga localizada, o primeiro dado de entrada é o diâmetro da tubulação. Em seguida, devem-se selecionar as peças especiais existentes em um conjunto de recalque e indicar a quantidade referente a cada uma. Posteriormente, clica-se no botão de comando *Calcular*.

O último tópico dentro da opção *Hidráulica* é a altura manométrica.

A altura manométrica de sucção requer os seguintes dados de entrada:

- altura geométrica de sucção;
- comprimento da tubulação;
- comprimento fictício da tubulação (perdas localizadas);
- perda de carga na tubulação de sucção.

A altura manométrica de recalque, além dos dados pedidos na sucção, precisa também da pressão na saída do sistema de recalque. Simultaneamente à entrada dos dados, o programa calcula as alturas manométricas de sucção, de recalque e total.

4.4 Bombas

4.4.1 Descrição

No banco de dados *Bombas.DAT* foram cadastrados 102 modelos de bombas centrífugas:

- KSB: 61 modelos;
- Equipe: 14 modelos;
- Mark Peerless: 15 modelos;
- Imbil: 11 modelos;
- Schneider: 1 modelo.

A escolha dessas marcas e modelos foi ao acaso, não significando que essas bombas sejam as mais utilizadas ou as mais recomendadas, pois o *BombaSoft* é considerado um programa “aberto”, permitindo, assim, que o usuário crie a sua própria base de dados.

O número de marcas e modelos de bombas, que podem ser inseridas nesse aplicativo é ilimitado.

O cadastramento de novos modelos é importante para o enriquecimento do banco de dados das bombas, uma vez que o usuário pode trabalhar com os modelos existentes na sua região de atuação.

A alteração de dados das bombas tem a finalidade de corrigir eventuais informações errôneas, existentes nas propriedades comerciais e nas suas curvas características. Isso tornou o programa mais eficiente e menos trabalhoso, pois a inexistência dessa opção, obrigaria o usuário do aplicativo a excluir um modelo toda vez que fosse cometido um erro de cadastramento, exigindo que o modelo fosse inserido novamente. O procedimento de alteração é semelhante ao cadastramento.

Outra opção existente no aplicativo refere-se à exclusão de bombas. O objetivo é deletar os modelos obsoletos, que não devem fazer parte do conjunto de seleção de bombas.

As curvas características e as propriedades comerciais de todos os modelos existentes no banco de dados poderão ser visualizadas no item *Consulta*, situado dentro da opção *Bombas*.

Os modelos foram divididos pelas marcas de bombas cadastradas nesse trabalho e por outras marcas que futuramente poderão ser inseridas pelo usuário. Existe, ainda, a alternativa de se agruparem todas as marcas, listadas em ordem alfabética (marca, modelo e rotação).

4.4.2 Procedimentos de cadastramento, alteração e exclusão

Para iniciar o processo de cadastramento, clica-se no botão de comando *Inserir*, iniciando pelas propriedades comerciais das bombas:

- marca;
- modelo;
- rotação;
- número de estágios;
- número de curvas da bomba no catálogo do fabricante (*H* e *P*);
- diâmetro do bocal na entrada da bomba (sucção);
- diâmetro do bocal na saída da bomba (recalque);
- diâmetro do maior rotor no catálogo;
- diâmetro do menor rotor no catálogo.

O programa trava qualquer outra ação do usuário até que ele insira pelo menos 1 caractere nas caixas de texto referentes às cinco primeiras propriedades comerciais listadas acima. Posteriormente, são disponibilizados os botões de comando - *Salvar*, *Hman(Q)*, *NPSH(Q)* e *Potência(Q)*.

Clicando no botão de comando $H_{man}(Q)$, aparecerá uma moldura com campos relativos ao cadastramento das curvas características $H = H(Q)$. Para cada curva referente ao diâmetro de cada rotor são pedidos pelo aplicativo, primeiramente, o diâmetro do rotor (mm) e a vazão máxima (m^3/h) da curva no catálogo. Esta vazão é dividida pela metade, indicando, ao usuário, os pontos na curva em que deverão ser lidas as alturas manométricas. A primeira leitura é o ponto de *shut-off* ou vazão nula. As outras duas leituras ocorrem na vazão máxima e na metade desta.

O número de curvas características da potência é igual ao da altura manométrica. Nessa parte do cadastramento, os valores dos diâmetros dos rotores são fixados pelo programa, sendo os mesmos das curvas de altura manométrica. As informações exigidas do usuário consistem nas vazões inicial e final e nas potências dos pontos inicial, médio e final das curvas.

A curva característica do NPSH requerido é referente apenas ao rotor de maior diâmetro. O usuário deverá informar as vazões máxima e mínima e os pontos de NPSH requeridos no início, meio e fim da curva. As vazões desses pontos são indicados pelo aplicativo.

Após a entrada dos dados de cada grupo de curvas características, o usuário deverá clicar no botão de comando - *Estimar Equações* - para calcular os parâmetros das funções.

Realizadas essas estimativas, os gráficos de cada conjunto podem ser visualizados, clicando-se no botão de comando *Gráfico*. Nesse momento é possível detectar erros de cadastramento, corrigindo-os imediatamente.

A alteração é iniciada, clicando-se no botão de comando - *Alterar Dados*. Os dados alterados somente serão gravados no banco de dados, se ao término das modificações realizadas, clicar-se em *Salvar*.

O processo de exclusão de um modelo ocorre, quando se clica em - *Excluir Bomba*. Deve-se, posteriormente à escolha do modelo a ser deletado, confirmar a exclusão, para que o procedimento seja completado.

Para visualizarem-se os modelos cadastrados no banco de dados das bombas, deve-se entrar na opção *Consulta*, inserida em *Bombas*. Escolhe-se, primeiro, a marca a ser inserida na caixa de lista; depois, clica-se sobre o modelo desejado.

Para cada bomba são mostradas as curvas $H = H(Q)$, $P = P(Q)$, e $NPSH = NPSH(Q)$, bastando clicar sobre as opções *Hman x Q*, *Potência x Q* e *NPSH x Q*, respectivamente.

4.5 Escolha da bomba

4.5.1 Descrição

A seleção de bombas possui a finalidade de detectar os modelos existentes no banco de dados, que atendem os requisitos de um sistema de bombeamento. A seleção pode ocorrer de duas maneiras: introduzindo-se a curva do sistema e a vazão requerida ou informando-se o ponto de projeto.

Quando se pretende realizar a seleção a partir da curva do sistema, os dados requeridos pelo aplicativo são:

- constante K_s do sistema;
- expoente da equação de perda de carga utilizada;
- altura geométrica total;
- vazão de projeto.

No método de seleção, utilizando o ponto de projeto, é necessária a informação apenas da vazão e da altura manométrica.

Com os modelos selecionados, as curvas características, do sistema e do rotor ajustada ao ponto de projeto, poderão ser visualizadas graficamente.

Os resultados numéricos do ponto de operação, em relação à alteração do diâmetro do rotor e da rotação, são apresentados em molduras específicas da janela e consistem em:

- rendimento da bomba;
- diâmetro do rotor usinado sem alteração da rotação da bomba;
- rotação da bomba sem usinagem do rotor.

Na seleção, que utiliza o ponto de projeto (H e Q), este é realçado no gráfico para o usuário identificá-lo facilmente. No outro método de seleção o destaque não foi necessário, pois esse ponto é identificado pela interseção das curvas da tubulação e do rotor ajustado.

As características da curva do sistema e a vazão de projeto podem ser alteradas na janela do gráfico, possibilitando simular diversas situações com os modelos selecionados.

4.5.2 Procedimentos de seleção

4.5.2.1 Curva do sistema

Para dar início ao procedimento de seleção, clica-se em - *Seleção* - e posteriormente, escolhe a opção - *Curva do Sistema*. A primeira informação pedida pelo aplicativo é a constante K_s da curva da tubulação. Esta constante pode ser determinada pelo próprio programa, desde que solicitada pelo usuário. Abre-se uma outra janela, na qual é necessário informar a equação de cálculo de perda de carga, que será utilizada (Darcy-Weissbach, Hazen-Williams, Fair-Whipple-Hsiao, Flamant ou Manning), o coeficiente de atrito, o diâmetro da tubulação e o comprimento virtual. Então, basta clicar em *Calcular*, onde

aparecerão o valor K_s da curva da tubulação e o expoente da equação utilizada. Os outros dados, altura geométrica e vazão, são de entrada direta via digitação.

Preenchidos os campos exigidos pelo aplicativo e clicando no botão de comando *Selecionar Bombas*, inicia-se um processo de busca no banco de dados, relativo às bombas, observando as rotações requeridas. Se houver modelos aptos a atender o ponto de projeto, serão listados por ordem de melhor rendimento. Caso contrário, será exibida a mensagem de que não há modelos capazes de atender aquela situação exigida.

Clicando sobre qualquer modelo selecionado e, em seguida, no botão de comando - *Detalhar Bomba* - abre-se uma nova janela, que apresenta as curvas características da bomba, a curva do sistema, os valores do ponto de projeto e do ponto de operação referentes ao rotor usinado (sem alteração da rotação) e à rotação modificada (sem alteração do diâmetro do rotor).

Nessa janela as simulações com o ponto de projeto são realizadas clicando em - *Alterar Parâmetros* - ficando as variáveis do sistema disponíveis para sofrerem alterações. Feita uma ou mais alterações nessas variáveis, clica-se no mesmo botão de comando, por ora intitulado *Alterar Gráfico*.

Pode-se “navegar” pelos modelos selecionados, utilizando-se os botões de comando - *Próxima Bomba* e *Bomba Anterior*. As bombas obedecem a ordem em que foram inseridas na caixa de lista da janela de seleção.

4.5.2.2 Ponto de projeto

Da mesma forma que o tipo de seleção descrita no item anterior, esse procedimento de seleção, inicia-se clicando em - *Seleção* - e posteriormente, escolhe a opção - *Vazão e altura manométrica*.

Nesse tipo de seleção, o programa requer apenas vazão e altura manométrica total, para determinar os modelos, que atendem as exigências do projeto.

O procedimento de seleção, após a entrada desses dados, é idêntico ao tópico anterior, incluindo detalhamento, simulação do ponto de projeto e “navegação” pelos modelos selecionados.

4.6 Associação de bombas

4.6.1 Descrição

As informações de maior interesse em uma associação de bombas, tanto em série quanto em paralelo, são os pontos referentes às interseções da curva da tubulação com a curva característica da bomba operando isoladamente e com a curva da associação. O programa calcula rendimento, potência, altura manométrica e vazão para os pontos obtidos nas duas interseções, bem como para cada bomba operando na associação.

Dessa forma, antes de escolher o modelo a ser associado, é necessário que sejam determinados os parâmetros da curva do sistema, como descrito no item 4.5.1.

Nesse aplicativo é permitido apenas a associação de modelos iguais, sendo ilimitado o número de bombas na associação. Assim, deve o usuário determinar o número de bombas a serem associadas e escolher o modelo.

Na janela referente ao gráfico da associação, o programa verifica se há interseção da curva da associação com a curva do sistema. Caso contrário, a associação não poderá ser realizada.

Por outro lado, havendo interseção, desenham-se no gráfico, as curvas da associação, da bomba operando isoladamente e da tubulação. Os valores numéricos calculados são mostrados em molduras específicas.

4.6.2 Procedimento de associação

A curva do sistema é a primeira informação que o usuário deve usar para fazer a associação de bombas, explicado no procedimento do item 4.5.1.

Deve-se, então, clicar em - *Associar* - para abrir uma segunda janela, onde deve ser informado o tipo de associação (série ou paralelo), o número de bombas na associação e o modelo de bomba a ser associado. Este último ocorre clicando no botão de comando - *Escolher Bombas*.

O próximo passo é clicar no botão de comando - *Gráfico* - para visualizar, numérica e graficamente, a associação requisitada. Pode ocorrer que a curva do sistema não intercepte a curva da associação. Nesse caso, o aplicativo avisa o usuário e fecha a janela do gráfico automaticamente.

Numericamente são mostrados ao usuário as características do ponto de operação (vazão, altura manométrica, rendimento e potência) da bomba, trabalhando isoladamente, de cada bomba na associação e da associação.

4.7 Cavitação

4.7.1 Descrição

Para calcular o NPSH disponível nesse aplicativo é necessário que sejam informadas a pressão atmosférica local, a pressão de vapor do líquido, a perda de carga provocada pela tubulação de sucção e a altura geométrica de sucção.

A pressão atmosférica é calculada com base na altitude local, de acordo com a equação 72 e a pressão de vapor do líquido depende do fluido e da temperatura, a qual é encontrada na literatura. Esse programa possui internamente a tabela de pressão de vapor da água limpa em função da temperatura.

A altura de instalação e as perdas de energia são parâmetros referentes ao sistema de bombeamento. A primeira pode ser considerada como a incógnita dessa avaliação e a segunda é determinada através dos cálculos de perda de carga.

4.7.2 Procedimento de cálculo

Para a pressão atmosférica local, pressão de vapor do líquido e perdas de carga na tubulação de sucção, podem-se digitar os valores nas respectivas caixas de texto ou, então, clicar nos botões de comando para que esses dados sejam calculados pelo programa.

A altura geométrica de instalação do conjunto moto-bomba pode ficar em branco ou entrar com o dado via digitação e o cálculo do NPSH disponível é realizado simultaneamente com a entrada de dados.

4.8 Motores elétricos

4.8.1 Descrição

Foi elaborado um banco de dados para armazenar as principais características de um sistema de bombeamento. Cadastraram-se 56 modelos da marca WEG, com rotações de 1800 e 3600 rpm, não se preocupando, porém, em criar uma base de dados, que englobasse as principais marcas e modelos, mas que servissem para uma consulta inicial. Posteriormente, no uso cotidiano do aplicativo, o usuário poderá formar sua própria base de dados com as marcas e os modelos disponíveis no mercado.

Esses dados, além de possibilitarem a identificação de um modelo de motor elétrico, permitem estimar o consumo de energia, em função da potência

nominal utilizada. O banco de dados dos motores pode sofrer alterações nas informações cadastradas, receber novos modelos e deletar os existentes.

A seleção de motores é realizada com base em dois valores:

- potência demandada pelo sistema;
- folga recomendada pela literatura.

Dessa forma, para se calcular a potência demandada, o usuário deverá informar a vazão, a altura manométrica total e os rendimentos esperados do conjunto moto-bomba.

A potência do motor com folga depende, primeiramente, da potência demandada pela instalação de bombeamento. Determinada a porcentagem de folga que deverá ser dada ao motor, aplica-se esse valor sobre a potência demandada e o aplicativo seleciona os motores recomendados (potência nominal igual ou superior à potência com folga).

Em uma segunda caixa de lista são colocados os motores, que possuem potência nominal entre a potência demandada e a potência com folga. A escolha de um ou outro modelo fica a critério do usuário.

As informações dos modelos selecionados podem ser visualizadas, além das estimativas da porcentagem de utilização da potência nominal, da potência consumida, do rendimento e do fator de potência.

4.8.2 Procedimentos de cadastramento, alteração, exclusão e escolha

Para a inserção de um novo motor deve-se clicar em - *Inserir Motor*. Entram-se com os seguintes dados de cada modelo:

- marca;
- modelo;
- potência nominal;
- rotação;
- rendimentos;

- fator de potência.

Posteriormente à entrada dos dados, clica-se no botão de comando - *Salvar*.

A alteração é iniciada, clicando-se no botão de comando - *Alterar Motor*. Os dados alterados somente serão gravados no banco de dados, se ao término das modificações realizadas, clicar-se em *Salvar*.

O processo de exclusão de um modelo inicia clicando-se em *Excluir Motor*. Deve-se, posteriormente à escolha do modelo a ser deletado, confirmar a exclusão, para que o procedimento seja completado.

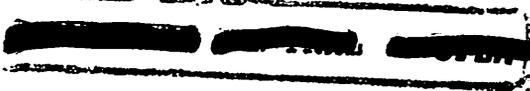
Na seleção de motores os dados de entrada consistem na vazão e na altura manométrica de projeto e nos rendimentos da bomba, do motor e do conjunto moto-bomba.

Se se informar apenas o rendimento total do conjunto moto-bomba, o aplicativo calcula, simultaneamente, a potência requerida e a potência com folga. Por outro lado, se se entrar apenas com os rendimentos da bomba e do motor é calculado o rendimento do conjunto.

Pode-se também informar apenas a potência mínima requerida, pois a entrada desse dado dispensa os demais.

Calculadas as potências mínima requerida e com folga, o aplicativo está apto a realizar a seleção, procedimento que se inicia com o clique sobre o botão de comando - *Seleciona Motores*.

Para detalhar as informações dos motores selecionados, basta clicar sobre o modelo desejado e, em seguida, no botão de comando *Detalhar Motor*. Abre-se uma nova janela, com as características cadastradas e as estimativas do ponto de operação. Nessa janela, existem os botões de comando - *Anterior* e *Próxima*, que permitem a “navegação” através dos modelos selecionados.



4.9 Análise econômica

4.9.1 Descrição

Foram inseridas neste aplicativo, metodologias que visam estimar o diâmetro econômico da tubulação de recalque e calcular custos de energia em diversas situações de utilização do equipamento.

As duas primeiras opções desse item, localizadas na barra de menu são a - *Análise Econômica Detalhada* e com *Função Pré-programada*. O programa analisa até sete instalações de recalque simultaneamente, entretanto, pode-se alterar essa quantidade, desde que seja entre uma e sete instalações. As variáveis comuns aos dois tipos, detalhada e com função pré-programada, são:

- vazão;
- altura manométrica;
- pressão na saída do sistema de recalque;
- comprimentos das tubulações de sucção e de recalque;
- horas de funcionamento anual;
- tipo de energia;
- uso de contrato ou não (nos casos de energia elétrica);
- taxa de juros;
- período de amortização;
- diâmetros das tubulações de sucção e de recalque.

O tipo de análise econômica detalhada exige que o usuário entre com um número maior de informações que, além das citadas acima, são:

- custos de sete tubulações de sucção,
- custos de sete conjuntos moto-bombas;
- custos de sete tubulações de recalque;
- rendimentos de sete bombas;

- rendimentos de sete motores.

Embora a análise econômica detalhada necessite de 35 dados a mais, em relação ao outro tipo, apresenta resultados mais precisos.

A análise econômica com função pré-programada, estima os dados solicitados a mais, pelo tipo de análise detalhada. Seu uso é mais simplificado, pois os dados de entrada são de fácil obtenção. Os resultados são menos precisos porém satisfatórios.

O custo de energia, além de entrar nas análises de determinação do diâmetro econômico, pode ser obtido separadamente, em uma janela, para determinar os gastos mensais de energia. Os resultados foram classificados em energia elétrica e diesel.

Com relação à energia diesel, o programa calcula a potência necessária no eixo da bomba e o custo mensal com o diesel. Para a energia elétrica são calculadas a potência necessária no eixo da bomba, a potência do conjunto moto-bomba e a potência comercial do motor. De acordo com esses valores, o aplicativo determina o grupo do consumidor, a demanda energética e os custos da energia elétrica com e sem contrato. Podem-se determinar quanto um tipo de energia é mais econômico que o outro e se a utilização do contrato, no caso de energia elétrica, é vantajosa ou não.

O último item da análise econômica refere-se às configurações das tarifas de energia, do valor do dólar em reais e das taxas de manutenção anual. O usuário do aplicativo deve manter os dados dessa janela sempre atualizados, para não incorrer de resultados errôneos nas análises econômicas e nos custos de energia.

4.9.2 Procedimento de análise

A análise econômica pode ser realizada pela análise detalhada ou com funções pré-programadas.

Após o preenchimento de todos os dados deve-se clicar no botão de comando - *Calcular* - para que sejam realizados os cálculos referentes à altura manométrica e aos custos de energia, de manutenção, fixos e totais para cada sistema de recalque analisado.

Em seguida, o botão de comando *Gerar Gráfico* fica disponível. Este, quando acionado, abre uma nova janela, que indica o diâmetro de menor custo anual e o respectivo valor. Os dados podem ser salvos, clicando-se no botão de comando - *Salvar*.

Para calcular os custos de energia, devem-se preencher os dados de entrada e, em seguida, clicar no botão de comando *Calcular*. O programa realizará cálculos referentes aos gastos com energia à diesel e elétrica, esta última com e sem contrato. As variáveis requeridas pelo programa são:

- vazão;
- altura manométrica total;
- rendimento da bomba;
- rendimento do motor;
- tempo de funcionamento do equipamento no horário de ponta;
- tempo de funcionamento do equipamento fora do horário de ponta;
- dias de funcionamento em um mês.

O procedimento de atualização dos dados referentes às *tarifas e configurações* é extremamente simples. Os valores devem ser alterados via teclado e, em seguida, basta clicar no botão de comando *Salvar*.

4.10 Ajuda

4.10.1 Descrição

O objetivo dessa opção é informar ao usuário sobre o desenvolvimento desse aplicativo, procedimentos de utilização e informações técnicas referentes ao assunto abordado nesse projeto.

4.10.2 Procedimento de consulta

Nos tópicos de ajuda e informações técnicas, será aberta a janela do navegador de Internet existente no equipamento. Caso contrário, essa opção do aplicativo não funciona. O processo de consulta assemelha-se à própria “navegação” na rede mundial de computadores.

4.11 Exemplo de utilização do aplicativo

Com a finalidade de comprovar a validade dos resultados emitidos e demonstrar a utilização de algumas tarefas possíveis de serem realizadas por esse aplicativo, foram empregadas algumas situações desenvolvidas manualmente no *BombaSoft*.

4.11.1 Análise econômica

Simulou-se um sistema de recalque com as seguintes características:

- vazão de projeto: 70 m³/h;
- altura geométrica: 10 m;
- pressão na saída do sistema: 15 m.c.a.;
- comprimento da tubulação de recalque: 300 m;
- comprimento da tubulação de sucção: 6 m;

- tempo de funcionamento anual: 3000 h;
- tipo de energia: elétrica sem contrato;
- taxa de juros anual: 12%;
- período de amortização: 15 anos;
- valor do dólar: R\$ 1,76;
- taxa de manutenção da tubulação: 0,5%;
- taxa de manutenção do conjunto moto-bomba: 4%;
- tarifa elétrica convencional (irrigante): R\$ 0,09/kWh.

O diâmetro econômico escolhido para a tubulação de recalque foi de 150 mm, tanto na análise econômica realizada pelo método convencional quanto a realizada pelo *BombaSoft* (Tabela 3), utilizando-se aço galvanizado, uma bomba KSB 60-250 a 1750 rpm, chave de proteção manual, luva de acoplamento e motor elétrico de 1750 rpm e 12,5 cv. Os valores monetários de mercado são referentes ao mês de outubro do ano de 2000.

TABELA 3 Comparação dos valores de uma análise econômica entre o método convencional e o método com função pré-programada do *BombaSoft*.

Parâmetro	Convencional	<i>BombaSoft</i>
Altura manométrica	28,3 m	28,3 m
Custo da moto-bomba + sucção	R\$ 5.387,00	R\$ 5.805,23
Custo da tubulação de recalque	R\$ 8.661,00	R\$ 8.892,58
Custo de energia anual	R\$ 4.116,31	R\$ 4.116,31
Custo de manutenção anual	R\$ 258,79	R\$ 276,67
Custo fixo anual	R\$ 2.062,25	R\$ 2.157,63
Custo total anual	R\$ 6.437,35	R\$ 6.550,61

A Figura 6 mostra a janela da análise econômica utilizando função pré-programada.

Dimensionamento Econômico do Sistema de Adução com Funções Pré-Programadas

Características do Sistema de Adução

Vazão (m³/h)

Altura Geométrica (m)

Pressão na Entrada (m)

Tubulação de Recalque (m)

Tubulação de Sucção (m)

Horas de funcionamento anual

Dados Econômicos

Taxa de Juros Anual (%)

Período de Amortização do Investimento (anos)

Fator de Recuperação de Capital

Custos do Sistema de Adução

Diâmetro da Sucção (mm)	250	250	250	250	250	250	250
Diâmetro do Recalque (mm)	75	100	125	150	200	250	300
MotoBomba+Sucção (1000 x R\$)	14.8510	7.91567	6.31014	5.80523	5.53005	5.46877	5.45024
Tubulação Recalque (1000 x R\$)	3.15273	4.84836	6.76975	8.89258	13.6752	19.0947	25.0823
Altura Manométrica Total (m)	114.64	47.49	32.75	28.27	25.87	25.34	25.18
Custo Energia Anual (1000 x R\$)	15.3675	6.85088	4.75371	4.11631	3.77486	3.63946	3.67667
Manutenção Anual (1000 x R\$)	0.60980	0.34066	0.28625	0.27667	0.28957	0.31422	0.34342
Custo Fixo Anual (1000 x R\$)	2.64295	1.87376	1.92012	2.15763	2.81934	3.60592	4.48218
Custo Total Anual (1000 x R\$)	18.6203	9.06551	6.96009	6.55062	6.88378	7.61960	8.50228

FIGURA 6 Janela da análise econômica com função pré-programada do *BombaSoft*.

A diferença obtida no custo total entre um método e outro foi inferior a 2%. Essa diferença é explicada pelo fato de que o método convencional utiliza valores reais de mercado e a análise com função pré-programada faz estimativas dos custos. Entretanto, a diferença não interferiu na escolha do diâmetro econômico da tubulação.

4.11.2 Perda de carga

Foram utilizados os exercícios resolvidos 14.8.1 e 16.5.3 de Vianna (1993), para exemplificar os cálculos de perdas de carga contínua e localizada, respectivamente.

O primeiro exercício pretende determinar a perda de carga ocorrida em uma tubulação de rugosidade absoluta 0,1 mm, comprimento do conduto igual à 100 m e diâmetro de 200 mm, transportando 226 m³/h de água à 20°C. Os resultados obtidos por Vianna (1993) e pelo *BombaSoft* estão na Tabela 4.

TABELA 4 Comparação entre os valores obtido por Vianna (1993) e pelo *BombaSoft* na determinação de perda de carga contínua.

Parâmetro	Vianna (1993)	<i>BombaSoft</i>
Valor de f	0,0179	0,0180
Perda de carga contínua	1,83 m	1,83 m

A Figura 7 mostra a janela de cálculo do *BombaSoft*.

Equação de Darcy-Weissbach

Incógnita do Problema

- Perda de Carga (m)
- Fator de Atrito (f) f
- Comprimento da Tubulação (m)
- Diâmetro da Tubulação (mm)
- Velocidade e Vazão
- Velocidade (m/s)
- Vazão (m³/h)

Calcular
Limpar
Fechar

FIGURA 7 Janela do *BombaSoft* para cálculo de perda de carga contínua, utilizando a equação universal de Darcy-Weissbach.

O *BombaSoft* encontrou o valor de f bem próximo ao obtido por Vianna (1993), embora o aplicativo tenha utilizado a equação geral de Swamee-Jain e o

citado autor tenha empregado outra metodologia. Essa diferença não interferiu no resultado final da perda de carga, mostrando que o *BombaSoft* é bastante preciso na determinação de perda de carga contínua.

O segundo exercício, referente à perda de carga localizada, consiste apenas em determinar os comprimentos fictícios de algumas peças especiais, para o diâmetro de 25,4 mm e obter o comprimento virtual total produzido por essas peças. Os resultados estão na Tabela 5.

TABELA 5 Comparação dos valores do cálculo de comprimento fictício referente às peças especiais entre o exemplo de Vianna (1993) e o *BombaSoft*.

Parâmetro	Vianna (1993)	<i>BombaSoft</i>
1 Entrada de borda	0,889 m	0,89 m
1 Tê de saída de lado	1,270 m	1,27 m
1 Cotovelo 90°	1,143 m	1,14 m
1 Registro de globo aberto	8,890 m	8,89 m
1 Saída de canalização	0,889 m	0,89 m
Comprimento fictício total	13,081 m	13,08 m

O aplicativo mostra os resultados com duas casas decimais, mas armazena na memória com quatro casas, sendo que o resultado final não difere do exemplo de Vianna (1993).

4.11.3 Escolha da bomba: ponto de projeto

Segundo Porto (1998), o modelo da bomba escolhido, para uma vazão de 54 m³/h e altura manométrica igual a 42,3 m, foi KSB ETANORM 50-315, com rotação de 1750 rpm, diâmetro do rotor de 307 mm e rendimento de 61%.

A Figura 8 mostra o gráfico e os resultados numéricos do ponto de projeto.

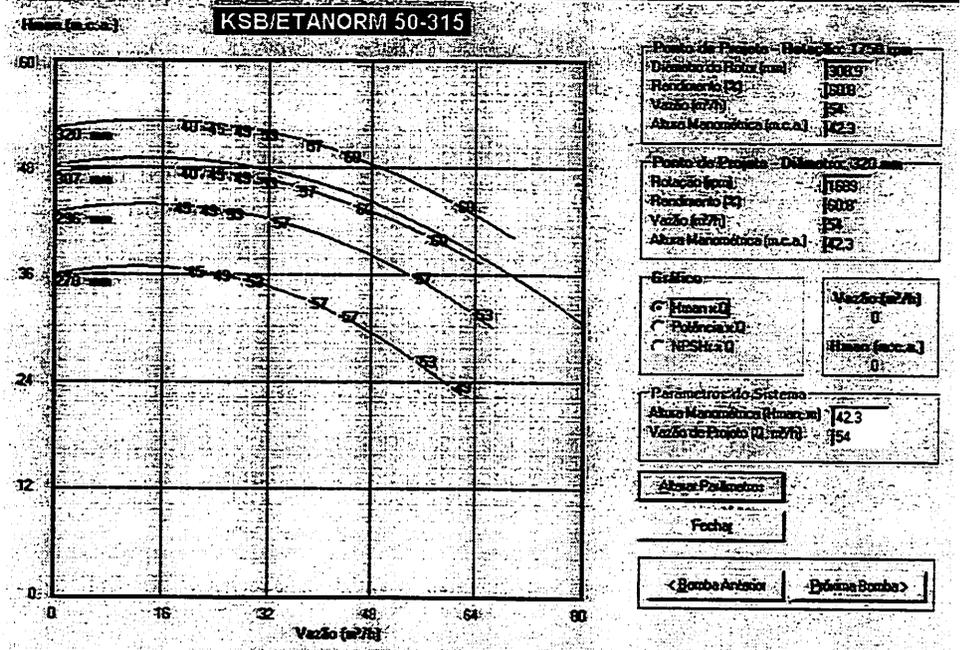


FIGURA 8 Gráfico da seleção de bombas utilizando o ponto de projeto.

O *BombaSoft* selecionou esse modelo, dentre outros. Entretanto, o diâmetro do rotor sugerido pelo aplicativo foi de 308,9 mm e o rendimento de 60,8%. A diferença encontrada nos diâmetros dos rotores é inferior à 1 mm na usinagem.

4.11.4 Escolha da bomba: curva do sistema

Para exemplificar a utilização da seleção de bomba, empregando a curva do sistema, adotou-se o exercício de aplicação 6.19, de Denículi (1993). Pretende-se, nesse caso, selecionar uma bomba, que atenda à vazão de 110 m³/h e à seguinte curva do sistema: $H = 46.3 + 0.000613Q^{1.852}$.

Denículi (1993) selecionou a marca Mark Peerless, modelo DY 3500 rpm. Os resultados encontrados pelo autor e pelo aplicativo estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 Comparação dos valores do obtidos por Denículi (1993) e pelo *BombaSoft*, referentes ao ajuste da curva característica da bomba ao ponto de projeto.

Parâmetro	Denículi (1993)	<i>BombaSoft</i>
Rendimento no ponto de projeto	75,5%	73,4%
Rotação ajustada ao ponto de projeto	3348 rpm	3357 rpm
Diâmetro do rotor usinado	171 mm	171,7 mm

Nesse exemplo de seleção, o programa emitiu resultados bastante próximos ao obtido pela literatura. As diferenças inferiores a 0,5% mostram que o aplicativo é uma ferramenta eficaz, na seleção de bombas para sistemas de recalque.

O gráfico apresentado pelo *BombaSoft* (Figura 9) mostra o cruzamento da curva do sistema com a curva do rotor ajustada. Nessa interseção encontra-se o ponto de projeto solicitado pelo usuário do aplicativo.

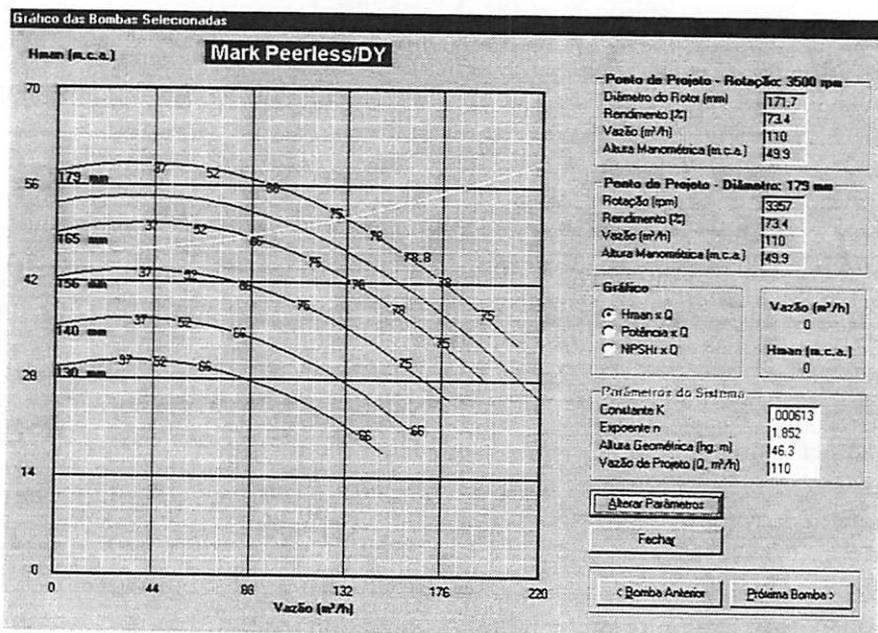


FIGURA 9 Gráfico da seleção de bombas utilizando a curva do sistema.

5 CONCLUSÕES

1. O *BombaSoft* é um programa de fácil manuseio e entendimento;
2. Os resultados obtidos pelo aplicativo são confiáveis e podem ser utilizados em projetos de sistemas de recalque;
3. O aplicativo atende aos requisitos básicos necessários para projetos de sistemas de recalque;
4. Os usuários poderão utilizar os modelos de bombas e motores cadastrados neste trabalho, mas é recomendado o cadastramento de novos modelos, uma vez que as marcas e modelos disponíveis variam de região para região.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. de L.T. de.; ALLEN, R.G. Pump curve combination model. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA NA AGROPECUÁRIA, 1., 1997, Belo Horizonte. **Anais...** Lavras: UFLA, 1997. p.329-341.
- ARENS, H.G.; PORTO, R. de M. Para o desempenho de bombas. **Revista DAE**, São Paulo, v.49, n.154, p.11-14, jan./mar. 1989.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAUJO, R. de et al. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Blücher, 1998. 669p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: UFV, 1989. 596p.
- CARVALHO, D.F. **Instalações elevatórias: bombas**. 6.ed. Belo Horizonte: UFMG/FUMARC. 1999. 353p.
- CARVALHO, J. de A. **Estimativa do custo da energia para bombeamento**. Lavras: UFLA. 1998. 17p. Apostila.
- CARVALHO, J. de A. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Lavras: UFLA, 2000. 241p. Apostila.
- CARVALHO, J. de A.; BRAGA JÚNIOR, R.A.; REIS, J.B.R. da. Análises de custos na escolha do tipo de motor para acionamento de bombas em áreas irrigadas. **Ciência e Agrotecnologia** . Lavras, v.24, n.2, p.434-440, abr./jun. 2000.
- CARVALHO, J. de A.; REIS, J.B.R. da. Avaliação dos custos de energia de bombeamento e determinação do diâmetro econômico da tubulação. **Ciência e Agrotecnologia** , Lavras, v.24, n.2, p.441-449, abr./jun. 2000.
- CARVALHO, J. de A.; MELLO, C.R. de.; BRAGA JÚNIOR, R.A. et al. Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.4, n.1, p.51-56, jan./abr. 2000.
- DENÍCULI, W. **Hidráulica-eng.341**. Viçosa: UFV, 1993. 162p. Apostila.
- GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1997. 390p.
- LEFTWICH, R.H. **O sistema de preços e alocação de recursos**. 6.ed. São Paulo: Pioneira, 1983. 452 p.

- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 782p.
- MATTOS, E.E. de.; FALCO, R. de. **Bombas Industriais**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 474p.
- NEVES, E.T. **Curso de hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Globo. 1989. 577p.
- NIELSEN, M.J. Análises de circuitos hidráulicos com bombas centrífugas - Método para estimativa analítica do ponto de funcionamento (vazão x altura manométrica). **Revista DAE**, São Paulo, IMESP, v.46, n.147, p.385-386, dez. 1986.
- PAULINO, W.D.; PEREIRA, P.M. Dimensionamento econômico de tubulação de recalque. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM 7., 1986, Brasília. **Anais...** Brasília: ABID, 1986 v.3, p.777-796, 1986.
- PORTO, R. DE M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC/USP. 1998. 519p.
- PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO - PRONI - **Tempo de Irrigar**: manual do irrigante. São Paulo: Mater/Fundação Victor Civita. 1987. 160p.
- SANTOS, W.L. dos. **Software para seleção e dimensionamento hidráulico de bombas centrífugas**. Viçosa: UFV, 1995. 79p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola)
- SILVESTRE, P. **Hidráulica geral**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1983. 316p.
- VIANNA, M.R. **Mecânica dos fluidos para engenheiros civis**. Belo Horizonte: IEA, 1993. 97p.
- YANAGI JR., T.; FERREIRA, E.; COLOMBO, A.; MELLO, C.R. de. Método matemático para a estimativa analítica das curvas de desempenho de bombas centrífugas. **Revista Ciência e Tecnologia**, Lavras, UFLA, v.21, n.4, set./dez. 1997.

7 GLOSSÁRIO

<i>Application Setup Wizard</i>	aplicativo da linguagem de programação Microsoft Visual Basic, que possui a tarefa exclusiva de gerar os arquivos de instalação de um programa desenvolvido.
Arquivos bibliotecas	arquivos necessários ao funcionamento do aplicativo em qualquer computador, mesmo aqueles que não possuam a linguagem de programação em que foi desenvolvido o programa.
Botão de comando	controle existente nas janelas do programa, os quais são acionados com o clique do mouse. Assemelham-se à botões de aparelhos eletrônicos.
Botão de opção	controle existente nas janelas do programa, permitindo que seja selecionado apenas um dentre o conjunto.
Caixa de lista	controle onde é inserido um número ilimitado de itens, um abaixo do outro.
Caixa de texto	controle destinado à receber dados via digitação, também chamados de campo.
Caixa de verificação	controle semelhante ao botão de opção, porém permite que sejam selecionados mais de um por vez.
Formulários ou janelas	estrutura destinada à receber os demais controles do programa.
Molduras	locais reservados nas janelas, delimitados por um retângulo.