



GLÁUCIO FERREIRA LOUREIRO

**GRAFICBOMB: SOFTWARE PARA CÁLCULOS
HIDRÁULICOS E CUSTOS DE BOMBEAMENTO**

LAVRAS - MG

2013

GLÁUCIO FERREIRA LOUREIRO

**GRAFICBOMB: SOFTWARE PARA CÁLCULOS HIDRÁULICOS E
CUSTOS DE BOMDEAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Loureiro, Gláucio Ferreira.

GRAFICBOMB : software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento / Gláucio Ferreira Loureiro. – Lavras : UFLA, 2013.
80 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.
Orientador: Jacinto de Assunção Carvalho.
Bibliografia.

1. Hidráulica de bombeamento. 2. Ponto de operação. 3.
Tarifação de energia - Software. 4. VB.net. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

CDD – 620.00113

GLÁUCIO FERREIRA LOUREIRO

**GRAFICBOMB: SOFTWARE PARA CÁLCULOS HIDRÁULICOS E
CUSTOS DE BOMBEAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de setembro de 2013.

Dra. Fátima Conceição Rezende	UFLA
Dra. Joelma Rezende Durão Pereira	UNILAVRAS

Dr. Jacinto de Assunção Carvalho
Orientador

**LAVRAS - MG
2013**

Ofereço a Deus, pois sem ele não teria a vida, nem a força e a inteligência para desenvolver esse projeto, além dos meios para que isso fosse feito.

Ofereço aos meus pais, Águida e Edson, que de onde estão puderam ver o esforço e a força de vontade para desenvolver esse projeto, além de terem concedido a possibilidade de estudo para chegar onde cheguei.

Ofereço a minha namorada e futura esposa Viviane, pois sem ela não teria o apoio necessário para seguir e desenvolver tudo o que foi desenvolvido.

Dedico esta dissertação a todos que vencem grandes desafios para conquistar seus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Lavras pela oportunidade dos estudos e dos meios para que esta dissertação fosse desenvolvida.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsa de estudo e pelos recursos disponibilizados para que este projeto fosse desenvolvido.

Agradeço ao meu orientador Prof. Jacinto de Assunção Carvalho pela dedicação e pelo auxílio, pois sem sua orientação este projeto não poderia ser concretizado.

Ao Prof. Carlos Rogério que sem sua orientação na graduação, jamais a semente para o desenvolvimento científico poderia ter sido plantada.

Ao Prof. Gilberto Coelho pela amizade e companheirismo.

À Profa. Fátima C. Rezende, pelo aconselhamento e pelas conversas nos momentos de dificuldade.

Aos funcionários Oswaldo (Nênê) e José Luiz (Zé) pelas conversas e pelo auxílio quando precisei.

Aos colegas e amigos pelos momentos de união que permitiram que tudo fosse feito no tempo certo.

BIOGRAFIA

Gláucio Ferreira Loureiro, filho de Edson Farias Loureiro e Águida Aparecida Ferreira Loureiro, nascido em 05/02/1986 na cidade de Ijuí-RS. Concluiu o ensino médio na cidade de Lavras-MG e posteriormente ingressou e se formou no curso de Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras. Durante esse período foi estagiário na Diretoria de Registro e Controle Acadêmico em que desenvolveu diversos sistemas para a instituição, dentre eles: Terminal de Registro de Diplomas (TRD), Cadastro de Alunos On Line para disciplinas isoladas da Pós-Graduação e manutenção nos sistemas da Universidade sob orientação de Carlos Eugênio Sbampato. Durante o curso de Engenharia Agrícola ingressou no curso de Sistemas de Informação no qual é graduando. Foi bolsista de iniciação científica, bolsista atividade e participou de diversos projetos na instituição. Atualmente é professor da Unidade Técnica de Ensino em Lavras - MG ministrando as disciplinas de Algoritmo aplicado a Mecatrônica, Introdução a Programação para o curso técnico em Mecatrônica e Matemática Financeira para o curso técnico em Logística.

RESUMO

A determinação do custo de bombeamento é de extrema importância, tendo em vista que o mesmo representa uma parcela significativa nos custos totais de irrigação. Contudo a determinação deste custo, às vezes, torna-se trabalhosa tendo em vista a escolha do sistema tarifário mais vantajoso, bem como a determinação do ponto de operação e da adequação do ponto de projeto. Em função disso, com este projeto desenvolveu-se um software por meio da IDE Visual Studio 2010[®] e em linguagem VB. NET para geração das curvas da bomba e do sistema e cálculo do ponto de operação, além da adequação do ponto de projeto visando obter o custo de bombeamento de acordo com a tarifação escolhida pelo projetista. O software apresentou uma interface amigável, bem como resultados confiáveis, podendo tornar-se uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisão do projetista.

Palavras-chave: Hidráulica de bombeamento. Ponto de operação. Tarifação de energia. VB.net.

ABSTRACT

Determining the cost of pumping is of utmost importance, given that it represents a significant portion of the total cost of irrigation. However the determination of this cost sometimes becomes hard considering the adequacy of the tariff system more advantageous with the operating point and the adequacy of the project point. Thus arose the need for the development of software through the IDE Visual Studio 2010 © and VB.NET language that generates the pump curves and system by means of these curves calculate the operating point and to suit the project point aiming obtaining the cost of pumping according to the tariff of energy chosen by the projectionist. The software had results with a friendly interface and reliable and may become an important tool to support decision making by the projectionist.

Keywords: Hydraulic pumping. Operating point. Charging energy. VB.net.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esboço do balanço de energia em uma tubulação.....	18
Figura 2	Representação do triângulo de potência.....	27
Figura 3	Fluxograma de funcionamento do software.....	31
Figura 4	Sistema de equações para regressão quadrática.....	36
Figura 5	Matriz para solução das equações lineares da regressão quadrática.....	37
Figura 6	Preenchimento dos dados de sucção do sistema.....	45
Figura 7	Lista de peças e com campo de digitação da quantidade.....	46
Figura 8	Tela de preenchimento dos dados da bomba.....	47
Figura 9	Tela de exibição da curva e da equação do rendimento.....	48
Figura 10	Tela de exibição da curva da potência.....	48
Figura 11	Tela de exibição do ponto de operação, das equações e das curvas da bomba e do sistema, além do rendimento e do ponto de operação.....	49
Figura 12	Tela de preenchimento do novo diâmetro do rotor e da nova rotação.....	50
Figura 13	Dados gerais para o cálculo da tarificação.....	51
Figura 14	Campo de preenchimento dos valores da tarificação Horosazonal verde.....	52
Figura 15	Campo de preenchimento dos valores da tarificação Horosazonal verde.....	52
Figura 16	Campo de preenchimento dos valores da tarificação convencional.....	53
Figura 17	Campo de preenchimento da energia da tarificação Grupo B.....	53
Figura 18	Gráfico e equação da bomba do software “GraficBomb”.....	55
Figura 19	Gráfico e equação do rendimento “GraficBomb”.....	55
Figura 20	Demonstração de um sistema de sucção e recalque.....	57
Figura 21	Curvas da bomba e sistema e ponto de operação.....	58
Figura 22	Curva do sistema com respectiva equação.....	58
Figura 23	Preenchimento na planilha do “GraficBomb” dos dados da bomba.....	59
Figura 24	Curva e equação da bomba geradas com os dados digitados....	59
Figura 25	Ponto de operação da bomba e do sistema.....	60
Figura 26	Dados de preenchimento da bomba do exercício proposto.....	62
Figura 27	Equação e curva da bomba gerada pelo programa.....	62
Figura 28	Dados da equação de sistema proposto pelo exercício.....	63
Figura 29	Preenchimento da vazão máxima do sistema.....	63

Figura 30	Curva da bomba e do sistema e ponto de operação calculado....	64
Figura 31	Gráfico mostrando as curvas originais do exercício, curva calculada e a curva da linha de tendência.....	65
Figura 32	Cálculo do comprimento equivalente e virtual da sucção pelo software “GraficBomb”.....	66
Figura 33	Cálculo do comprimento equivalente e virtual do recalque pelo software “GraficBomb”.....	67
Figura 34	Equação do sistema gerada pelo software “GraficBomb”.....	67
Figura 35	Curvas da bomba proposta no exercício com diversos diâmetros de rotor.....	68
Figura 36	Dados preenchidos com base na curva da bomba.....	69
Figura 37	Curva e equação geradas pelo software.....	70
Figura 38	Dados do sistema preenchidos no software.....	70
Figura 39	Curva da bomba e do sistema, e tela de resposta com ponto de operação, rendimento e potência no ponto e equações do sistema e da bomba.....	71
Figura 40	Vazão de projeto digitada para o cálculo da nova rotação.....	72
Figura 41	Tela de saída com a alteração da rotação da bomba.....	72
Figura 42	Dados de altura manométrica e vazão para a nova rotação.....	72
Figura 43	Saída com a nova rotação e mantendo o diâmetro original.....	73
Figura 44	Saída com o novo diâmetro e mantendo a rotação original.....	73
Figura 45	Gráfico gerado pelo Excel com os dados da bomba e do sistema.....	74
Figura 46	Custo total com ICMS e sem ICMS da tarifa convencional.....	75
Figura 47	Custo total da tarifação horo-sazonal no “GraficBomb”.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de C para cada tipo de material de tubulação.....	33
Tabela 2	Comprimento equivalente em número de diâmetros.....	34
Tabela 3	Dados da bomba Mark DY 3500rpm e D = 179mm.....	54
Tabela 4	Dados de vazão e altura manométrica de uma bomba fictícia.	61

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

kVA	Unidade de medida da potência aparente
VB.NET [®]	Linguagem de programação Visual Basic para a plataforma .NET
m ³	Unidade de medida de volume
F	fator de atrito de Darcy-Weisbach
C	fator de atrito de Hazzen-Willians
K	constante de isoefficiência
α	ângulo do fator de potência
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IDE	Interface de Desenvolvimento
txt	tipo de extensão que indica arquivo de texto
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Caracterização de um sistema de recalque	17
2.2	Perda de carga	17
2.3	Perda de carga Localizada	19
2.4	Equação Hazen-Willians	20
2.5	Equação de Darcy-Weisbach	20
2.6	Altura manométrica	22
2.7	Curva do sistema	23
2.8	Curva da bomba	23
2.9	Ponto de operação	24
2.10	Mudança do ponto de operação através da rotação e diâmetro	25
2.11	Ponto de projeto	26
2.12	Fator de potência	26
2.13	Sistema de tarifação de Energia	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Perda de carga Contínua	32
3.1.1	Equação de Darcy-Weisbach	32
3.1.2	Equação de Hazen-Willians	32
3.1.3	Equação geral de perda de carga	33
3.2	Perda de carga localizada	34
3.3	Altura manométrica	35
3.4	Equações de desempenho da bomba	36
3.5	Determinação de intersecção entre curvas da bomba e do sistema	37
3.6	Cálculo da potência do eixo	38
3.7	Cálculo da potência absorvida	38
3.8	Relação de semelhanças mecânicas de Rateaux	39
3.9	Cálculo do tipo de tarifação	40
3.9.1	Grupo B	41
3.9.2	Grupo A	41
3.9.2.1	Sistema de Tarifação Convencional	41
3.9.2.2	Sistema de Tarifação Horo-Sazonal Azul	42
3.9.2.3	Sistema de Tarifação Horo-Sazonal Verde	43
3.10	Cálculo do Imposto sobre o Comércio e Serviços (ICMS)	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45

4.1	Curva do sistema	45
4.2	Curva da bomba	46
4.3	Curva do rendimento	47
4.4	Curva da potência	48
4.5	Cálculo do ponto de operação	49
4.6	Modificação do ponto de operação	49
4.7	Tarifação de energia	50
4.7.1	Tarifação Horo-sazonal verde	51
4.7.2	Tarifação Horo-sazonal azul	52
4.7.3	Tarifação Convencional	53
4.7.4	Tarifação Grupo B	53
4.8	Estudos de Caso	54
4.8.1	Equação da bomba e do rendimento	54
4.8.2	Ponto de operação.....	56
4.8.3	Perda de carga localizada.....	65
4.8.4	Ponto de projeto.....	68
4.8.5	Tarifação de energia.....	74
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O custo de energia representa uma parcela significativa na composição do custo total de bombeamento. Desta forma, o uso adequado do conjunto motobomba associado a um projeto bem dimensionado pode proporcionar custos menores. Contudo, uma parte dos projetos disponíveis atualmente trabalham superdimensionados em relação às necessidades de bombeamento, o que acarreta gastos desnecessários.

Os custos energéticos de bombeamento representam uma parcela significativa dos custos variáveis de irrigação, desta forma é de fundamental importância que o dimensionamento e operação de sistemas de bombeamento procurem maximizar a eficiência com conseqüente redução nos custos. Uma das medidas que podem ser adotadas é a análise conjunta das curvas da bomba e do sistema de forma a obter o ponto real de funcionamento, denominado ponto de operação, o qual é dado pela intersecção destas curvas. O conhecimento do ponto de operação permite saber a vazão real que está sendo recalçada bem como a energia consumida, e, a partir disso, ajustar para o ponto de projeto reduzindo os gastos e melhorando a eficiência do sistema.

O sistema tarifário brasileiro é aplicado distintamente para dois grupos de consumidores: Grupo B, nos quais fazem parte consumidores com potência abaixo de 75kVA e Grupo A. Existem três tipos de opção tarifária para o consumidor classificado no grupo A, são elas: horo-sazonal verde, horo-sazonal azul e convencional, sendo que cada opção apresenta uma faixa de potência, tensão, meses do ano bem como horário de uso e um valor de tarifa que no total é influenciado por cada uma destas variáveis. Assim é de extrema importância um prévio levantamento de cálculo visando adequar o sistema de bombeamento em um sistema tarifário que apresente menor custo por m³.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um software por meio da IDE Visual Studio 2010[®] através da linguagem de programação VB.NET[®], tendo como foco principal a apresentação de cálculos e gráficos visando a tomada de decisão por parte do projetista através do menor custo por m³ bombeado. O software apresentado é composto de três módulos: (1) “Curvas” destina-se ao ajuste das curvas da bomba, do sistema, do rendimento e da potência, (2) “Ponto de Operação”, tem-se como objetivo a obtenção do ponto de operação por meio da intersecção das referidas curvas em função da vazão, bem como a mudança do ponto de operação para o ponto de projeto e adequação de sua rotação; além disso permite adequar rotação e diâmetro de acordo com o usuário, (3) “Cálculo do consumo de energia”, por meio das tarifações disponíveis nos grupos A e B. O software também disponibiliza o recurso de salvar os dados digitados para carregar posteriormente.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização de um Sistema de Recalque

De acordo com Gomes (2001), as instalações de recalque, ou elevatória, são compostas por bombas e tubulações utilizadas para pressurizar um determinado líquido com a finalidade de conduzi-lo aos pontos de consumo, superando desníveis topográficos e perdas de carga ao longo do conduto.

Damião e Nogueira (2012) enfatizam que o dimensionamento de um sistema elevatório necessita, a princípio, de um estudo de campo, no qual se obtém diversas variáveis que influenciam no projeto de condução de água, dentre elas: levantamento topográfico do local entre a captação e o local de abastecimento, comprimento dos condutos de sucção e recalque, bem como as peças e conexões utilizadas neste percurso.

Porto (2004) salienta que elevadas diferenças de níveis e grandes distâncias entre a fonte d'água e os pontos de abastecimento constituem um importante obstáculo ao uso de sistemas que utilizam a condução de água por gravidade.

2.2 Perda de Carga

De acordo com Macintyre (1987), a perda de carga pode ser entendida como sendo a energia cedida a um líquido para vencer o atrito interno, que ocorre nas paredes do conduto, além das perturbações do líquido. Além disso, o autor complementa que essa energia é dissipada na forma de calor.

Pereira (2011) afirma que o maior interesse ao se analisar o escoamento de um líquido em um conduto é a queda de pressão que ocorre, pois esta queda reflete diretamente na potência necessária do sistema de bombeamento.

Silvestre (1983) afirma que a perda de carga é uma energia dissipada de forma irreversível.

Para Çengel e Cimbala (2008) a equação de Bernoulli é uma expressão de balanço de energia, levando-se em conta a soma das energias cinética, potencial e de escoamento do fluido. Assim, a equação pode ser expressa da seguinte forma:

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

em que:

$\frac{P_1}{\gamma}$ e $\frac{P_2}{\gamma}$: Carga de pressão na entrada e na saída da tubulação (m);

$\frac{V_1^2}{2g}$ e $\frac{V_2^2}{2g}$: Carga de velocidade na entrada e na saída da tubulação (m);

z_1 e z_2 : Cota da entrada e da saída da tubulação (m);

hf : Perda de carga (m);

A figura 1 demonstra como ocorre o balanço energético, bem como as representações de suas variáveis.



Figura 1 Esboço do balanço de energia em uma tubulação
Fonte: Dezotti (2013)

De acordo com Pereira (2011), a perda de carga contínua em uma tubulação é influenciada pela rugosidade da parede do conduto, bem como pelo diâmetro e comprimento. Contudo, no cálculo da perda de carga total é necessário atentar-se também para a determinação de perdas que ocorrem em trechos da tubulação, denominada perda de carga localizada.

Segundo Carvalho e Oliveira (2008), a perda de carga localizada ocorre em todos os casos que há variação da forma, direção ou da seção do escoamento no conduto. Desta forma, o cálculo da perda de carga total de um conduto pode ser entendido como sendo a soma da perda de carga contínua mais a perda de carga localizada.

2.3 Perda de Carga Localizada

Segundo Pereira (2011), o cálculo da perda de carga contínua leva em consideração somente as características do tubo, rugosidade, diâmetro, comprimento, considerando o caminho do escoamento de fluido como sendo padrão. Contudo, o autor enfatiza que qualquer mudança de direção, podendo ser através de uma restrição ou um bloqueio irá ocasionar uma turbulência e conseqüentemente uma perda de carga localizada.

Carvalho e Oliveira (2008), apresentam dois métodos mais utilizados para estimar a perda de carga localizada, ou seja, o método direto e o método do comprimento equivalente. Segundo os autores, o método direto se baseia em uma tabela com valores pré-estabelecidos de uma constante k característica de cada tipo de acessório utilizado. A perda de carga localizada é influenciada diretamente pela velocidade do fluido no conduto. Já o método com comprimento equivalente, como o nome já pressupõe, é um método que se

baseia na substituição virtual da peça especial por um comprimento reto de tubulação que cause a mesma perda de carga localizada. Este comprimento equivalente somado ao comprimento real do conduto forma o que se denomina de comprimento virtual, sendo este utilizado em uma das equações para cálculo da perda de carga contínua, destacando-se as equações de Hazen-Williams e de Darcy-Weisbach.

2.4 Equação Hazen-Williams

A equação de Hazen-Williams é uma equação empírica desenvolvida para o cálculo de perda de carga em condutos. Tal equação relaciona uma constante denominada constante de Hazen-Williams que apresenta um valor para cada tipo de material do tubo utilizado, bem como o diâmetro, comprimento e vazão.

De acordo com Sampaio et al. (2007), de todas metodologias já aplicadas no cálculo da perda de carga, a equação de Hazen-Williams se destaca, pois seu uso é relativamente simples e é fundamentada no regime turbulento.

2.5 Equação de Darcy-Weisbach

De acordo com Brown (2000), a equação de Darcy-Weisbach é a melhor equação empírica que relaciona a resistência do conduto com a vazão. O mesmo autor afirma que a equação relaciona a velocidade do fluido, o comprimento e diâmetro do conduto, bem como a constante de aceleração da gravidade. Além disso, a equação utiliza-se de um fator, denominado fator de atrito o qual engloba os efeitos do regime de escoamento e do tipo de material do conduto.

Segundo Cardoso et al. (2008), apesar de as demais equações, tais como Hazen-Williams, Manning ou Scobey, serem mais utilizadas para cálculo de perda

de carga, a equação de Darcy-Weisbach é uma equação que apresenta maior precisão, pois as demais equações assumem um coeficiente de rugosidade constante para todos os tipos de diâmetros e velocidade de escoamento.

De acordo com Andrade (2001), a maioria dos escoamentos ocorre em regime turbulento. Por isso o autor atenta ao fato que este escoamento foi subdividido em três outros: escoamento em conduto liso, escoamento turbulento e escoamento de turbulência plena. Assim, introduziu mais dois fatores: a espessura do filme laminar e a rugosidade absoluta do tubo.

De acordo com Carvalho e Oliveira (2008), independente do escoamento, tanto turbulento quanto laminar, junto à parede do conduto forma-se uma camada de fluido com baixa velocidade em que esta espessura é inversamente proporcional ao número de Reynolds. Assim, os autores afirmam que o estudo desta camada é de extrema importância nas questões relativas à rugosidade dos condutos e à perda de carga.

Assim, os autores apresentam a equação:

$$\delta = \frac{32,5 \cdot D}{Re \cdot f^{0,5}} \quad (2)$$

em que:

δ : espessura do filme laminar(mm);

D : Diâmetro da tubulação (mm);

f : Coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weishbach (adimensional)

Os autores enfatizam que para cada regime existe uma equação para o cálculo do f baseado na análise preliminar que envolve o coeficiente de rugosidade do tubo k e a espessura do filme laminar δ . Desta forma existem os regimes: laminar, turbulento para conduto liso, turbulento de transição para

conduto rugoso, regime de turbulência plena e equações específicas para cada regime na determinação do número de Reynolds.

2.6 Altura Manométrica

Segundo Damião e Nogueira (2012), a altura manométrica total corresponde ao desnível geométrico entre o nível da água e o ponto de abastecimento, acrescentado de todas as perdas de carga localizada, bem como as perdas de carga contínua.

Moreira e Soares (2013) denominam altura manométrica como sendo a medida de altura de uma coluna de líquido que a bomba pode criar resultante da energia cinética que a bomba fornece ao fluido. Com o isso os autores afirmam que a principal justificativa de se usar a altura em vez de pressão para uma bomba a centrífuga é a de que a pressão pode variar dependendo do tipo do líquido, já a altura não.

Macintyre (1987) cita que a altura manométrica total é a soma da altura manométrica de sucção e a altura manométrica de recalque. Assim, o autor explica que a altura manométrica de sucção é a diferença entre as alturas representativas da pressão atmosférica local e da pressão principal na entrada da bomba, considerando como sendo a entrada do rotor. Já a altura manométrica de recalque simboliza a saída convencional da bomba e a atmosférica.

Carvalho e Oliveira (2008) afirmam que ao se utilizar de curvas de sistema, esta relaciona a altura manométrica com a vazão do sistema, sendo que estas curvas são de extrema importância em problemas de bombeamento. Assim, o autor demonstra que a altura manométrica é a soma da perda de carga do sistema mais o desnível geométrico do terreno.

De acordo com Yanagi Jr et al (1997), devido ao comportamento parabólico das curvas da bomba com eixos de vazão x altura manométrica,

torna-se possível também através de métodos regressivos a determinação de uma equação quadrática que relaciona a altura manométrica fornecida pela bomba em função da vazão da mesma.

Desta forma, é possível relacionar as equações de bomba e sistema para determinação do ponto de confluência entre as duas curvas, que é denominado ponto de operação.

2.7 Curva do Sistema

De acordo com Pereira (2011), as curvas do sistema representam a energia perdida pelo fluido de um ponto a outro em um conduto. Assim, a curva é simbolizada pela altura manométrica total em função da vazão. De forma que são arbitrados valores sequenciais de vazão com o cálculo da altura manométrica correspondente. O autor também chama a atenção para a alteração da curva do sistema que pode ocorrer ao se fechar uma válvula, ocasionando perda de carga e conseqüentemente alterando a curva do sistema.

2.8 Curva da bomba

De acordo com Silvestre (1983), as curvas características representam as condições hidráulicas operacionais da bomba, operando com determinada rotação. Com estas curvas é possível relacionar a vazão recalçada, com a pressão gerada, com a potência absorvida, com o rendimento e com a altura máxima de sucção.

Calgaro et al. (2004) afirmam que as curvas características de uma bomba são obtidas experimentalmente em ensaios e que, para uma determinada quantidade de água recalçada, são medidas a vazão, a altura manométrica, a

potência absorvida pela bomba e o rendimento total do sistema, considerando um determinado número de rotações da bomba.

Contudo, Yanagi Jr et al (1997) desenvolveram por meio de métodos matemáticos de estimativa analítica, uma regressão que visa o desenvolvimento de equações quadráticas que determinam a altura manométrica em função da vazão, sendo também uma boa ferramenta para o desenvolvimento das curvas da bomba.

A partir da determinação da curva da bomba em conjunto com a do sistema é possível calcular o ponto em que as duas curvas se cruzam. Este ponto é denominado ponto de operação.

2.9 Ponto de Operação

À medida que a vazão vai aumentando, a pressão da bomba consequentemente vai diminuindo até atingir o equilíbrio em contrapartida, a pressão da curva do sistema aumenta progressivamente à medida que a vazão vai aumentando. Desta forma, Carvalho e Oliveira (2008) afirmam que o ponto em que as duas curvas se cruzam é denominado ponto de trabalho ou ponto de operação.

De acordo com Carvalho e Oliveira (2008), a alteração do ponto de projeto pode ser obtido por:

- modificação da curva do sistema, a partir da abertura ou fechamento do registro de gaveta: esta ação diminui ou aumenta a perda de carga devido a relação direta da perda de carga com altura manométrica, a mesma será alterada;
- modificação da curva característica da bomba através da alteração da rotação da bomba: esta ação pode ser feita através do uso de um

inversor de frequência. Ou ainda por meio da alteração do diâmetro do rotor, que pode ser feita por meio de usinagem do mesmo.

2.10 Mudança do ponto de operação através da rotação e diâmetro

Alves et al. (2002) afirmam que ao se projetar um sistema de bombeamento tem-se a necessidade da adequação de um ponto de projeto por meio da pressão e vazão necessárias bem como a potência e o rendimento da bomba neste ponto. Uma das possíveis formas para alteração da vazão e da altura manométrica do ponto de operação através dos valores de diâmetro e/ou rotação é através da relação de Rateaux, as quais se baseiam nas leis de semelhança física das máquinas hidráulicas rotativas.

De acordo com Carvalho e Oliveira (2008), as equações de Rateaux se baseiam na semelhança mecânica em que por meio de uma vazão de projeto e do ponto de operação, bem como sua rotação, diâmetro ou potência é possível determinar a nova rotação, diâmetro ou potência. Contudo, os autores afirmam que existem dois casos para se utilizar as relações de Rateaux, a primeira refere-se a situação do ponto de vazão e altura manométrica estarem sobre a mesma curva de isoeffiência, neste caso, basta utilizar as relações de Rateaux de forma direta. Na segunda situação, quando as vazões e as altura manométricas não estão sobre uma curva de isoeffiência, é necessário por meio do valor de projeto de vazão e altura manométrica através da relação abaixo determinar uma constante k:

$$k = \frac{Q^2}{H_{man}} \quad (3)$$

em que:

k : Constante de isoefficiência

Q : vazão de projeto (m³/h)

H_{man} : Altura manométrica de projeto (m)

Com o valor de **k** e os valores de vazão e altura manométrica originais da bomba é possível traçar a curva de isoefficiência. Com essa curva associada à curva da bomba é possível determinar o ponto de intersecção entre as mesmas, denominado ponto homólogo em que a partir deste ponto calcula-se a nova rotação ou o novo diâmetro da bomba visando adequar-se ao ponto de projeto.

2.11 Ponto de projeto

No dimensionamento do sistema de captação, o projetista determina a vazão necessária, bem como a altura manométrica que o sistema precisa para o seu adequado funcionamento. Contudo, em algumas situações a bomba escolhida trabalhando com a rotação original ou com o diâmetro do rotor do fabricante não consegue produzir exatamente a vazão de abastecimento, acarretando em um custo de bombeamento maior do que o necessário. Desta forma, o ponto de projeto simboliza a vazão em que o projeto foi desenvolvido.

2.12 Fator de potência

De acordo com Rodrigues (2007), quando se utilizam circuitos que apresentam carga reativas, assim como motobombas, há uma diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente, que pode ser adiantada ou atrasada. O autor enfatiza que a ocorrência dessa defasagem gera diversos transtornos às concessionárias de energia, pois além de a energia reativa ocupar o mesmo cabo de condução de energia ativa, a mesma não realiza trabalho.

A figura 2 apresenta a relação entre as potências: aparente “S” (potência fornecida pela concessionária), reativa “Q” e ativa “P” (potência que realiza trabalho). O ângulo α é formado entre a potência aparente e a potência ativa.

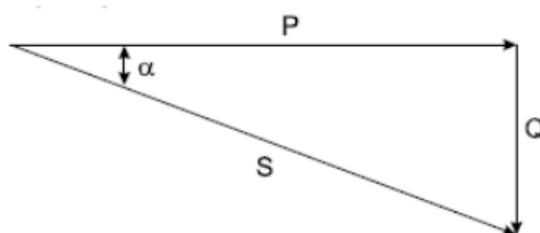


Figura 2 Representação do triângulo de potência
Fonte: Rodrigues (2007)

Carvalho e Oliveira (2008) afirmam que o cosseno do ângulo formado no triângulo é denominado fator de potência, em que este valor é uma expressão do quanto de energia total fornecida foi realmente transformada em trabalho e quanto foi transformada em magnetização da motobomba. O fator de potência é um número adimensional que pode variar entre 0 e 1. Com isso, o fator de potência indica a quantidade de potência total fornecida que foi utilizada como potência ativa. Assim, valores próximos a 1 indicam um uso eficiente do sistema elétrico e valores próximos de 0 indicam o mal uso de equipamentos, ou seja, alta magnetização e baixo uso de energia de trabalho. Para regulamentar o uso adequado da energia a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu um valor mínimo de fator de potência, sendo este 0,92 capacitivo durante as 6 horas da madrugada e indutivo durante as 18 horas do dia.

É de extrema importância que a escolha de motores elétricos seja condizente com a real necessidade demandada, para que não haja cargas reativas

acima dos valores estipulados, tendo em vista que os mesmos são tarifados por meio de multas acarretando em aumento no custo energético.

2.13 Sistema de Tarifação de Energia

De acordo com Carvalho e Oliveira (2008), atualmente tem-se dois grupos de consumidores no Brasil: grupo B, de baixa tensão, que apresenta um sistema de tarifação monômnia, no qual é cobrada apenas a energia consumida; e grupo A ou de tarifação binômnia, na qual o consumidor, além do consumo (kWh), paga também pela demanda energética (kW).

O grupo A apresenta três subdivisões de tarifação: convencional, horo-sazonal verde e horo-sazonal azul. Para a contratação da tarifa convencional, a concessionária exige um contrato específico, na qual a demanda pretendida pelo consumidor será única, independente da hora do dia ou do período do ano, sendo que esta forma de tarifação somente pode ser contratada se o consumidor apresentar demanda abaixo de 300kW, desde que não tenha ultrapassado nos últimos 11 meses três registros consecutivos ou seis registros alternados. A tarifação horo-sazonal verde leva em consideração o consumo na ponta ou fora dela, contudo a demanda é única, sendo cobrada somente a demanda de ultrapassagem, se a mesma for superada. Para a sua contratação, o consumidor deve se enquadrar entre a tensão de fornecimento de 2,3kV e 44kV. Já a tarifação horo-sazonal azul é obrigatória para a faixa de tensão entre 69kV e 230kV, sendo as variáveis desta tarifação o consumo na ponta ou fora dela, a demanda na ponta ou fora dela, sendo que as tarifas de demanda não são diferentes para determinadas épocas do ano.

De acordo com Carção (2011), ambas as tarifas, horo-sazonal verde e azul, levam em consideração no custo da tarifa de consumo as épocas do ano, sendo no período úmido uma tarifa com um valor menor que no período seco. O

período úmido é considerado entre Dezembro de um ano a Abril do ano subsequente, já o período seco, entre os meses de Maio a Novembro de um mesmo ano. Para o período do dia na ponta e fora de ponta considera-se entre 18:00 e 21:00 o período na ponta e as demais 21 horas do dia o período fora de ponta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema foi desenvolvido na linguagem VB.Net utilizando como ferramenta de programação a IDE Visual Studio 2010[®] para 32 bits, em que o sistema foi subdividido em menus denominados: arquivos, curvas, ponto de operação e tarifação.

O programa consiste em um aplicativo que auxilia na tomada de decisão com base em cálculos e geração de equações, bem como na plotagem de gráficos e na determinação de pontos de intersecção entre os gráficos da bomba e sistema também denominados de ponto de operação. Além disso, o sistema apresenta o menu de tarifação, destinado ao cálculo do custo de energia de bombeamento, baseando-se nos dados digitados pelo usuário observados na tarifação de energia vigente.

Como ferramenta o programa apresenta a opção de salvar e abrir projetos, em que o usuário pode salvar os dados em arquivos com extensão “txt” e posteriormente carregar os dados digitados.

Assim, tem-se o fluxograma de demonstração dos recursos disponíveis no programa (figura 3).

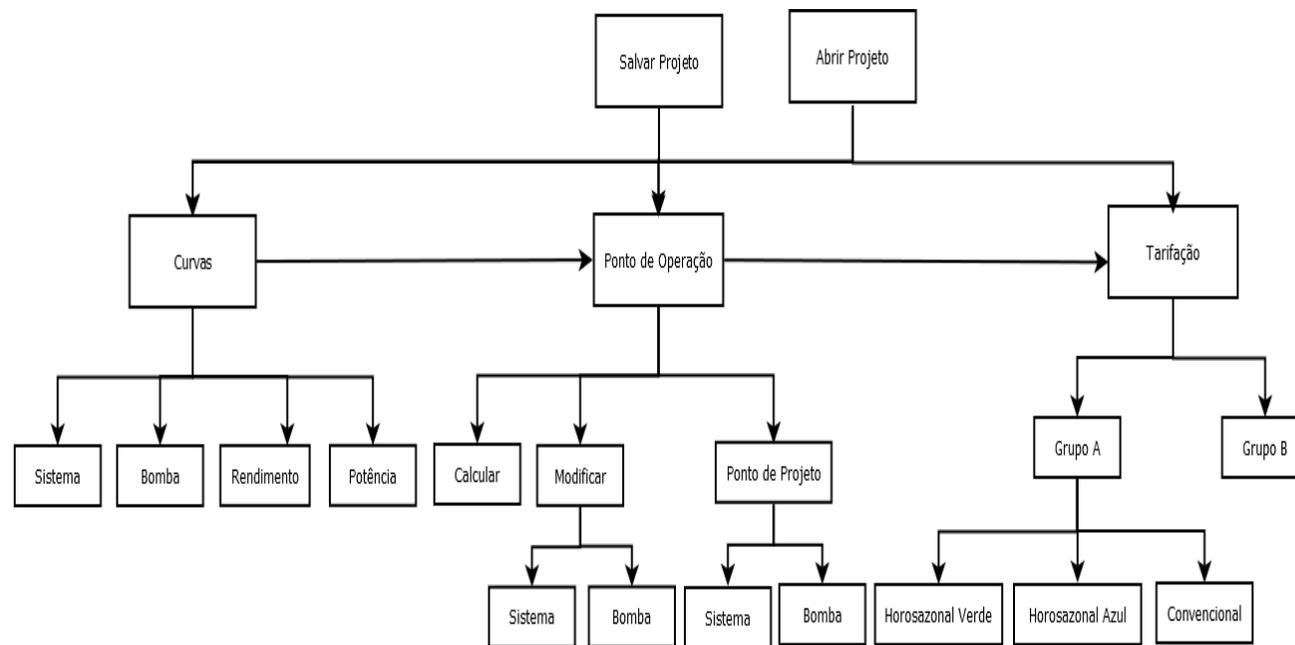


Figura 3 Fluxograma de funcionamento do software

3.1 Perda de Carga Contínua

No cálculo da perda de carga contínua o usuário do software pode adotar dois tipos de equações, podendo ser a equação de Darcy-Weisbach ou a equação de Hazen-Willians.

3.1.1 Equação de Darcy-Weisbach

$$hf = \frac{f \cdot L \cdot 8 \cdot Q^2}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (4)$$

em que:

hf: perda de carga (mca)

f: fator de atrito

L: Comprimento do tubo (m)

D: Diâmetro do tubo (m)

g: Aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

Q: vazão do fluido (m³/s)

3.1.2 Equação de Hazen-Willians

$$hf = 10,643 \cdot \frac{L}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \quad (5)$$

em que:

C: constante de rugosidade de Hazen-Willians

A constante "C" de Hazen-Willians se baseia em valores pré-determinados para cada tipo de material do conduto (tabela 1):

Tabela 1 Valores de C para cada tipo de material de tubulação

Material da Tubulação	C	Material da Tubulação	C
Aço corrugado	60	Ferro fundido novo	130
Aço galvanizado	125	Ferro fundido (15-20 anos)	100
Aço rebitado novo	110	Ferro fundido usado	90
Chumbo	130	Fofo* revestido com cimento	130
Cimento-amianto	140	Manilha vitrificada	110
Cobre	130	Latão – cobre	130
Concreto (bom acabamento)	130	Vidro	140
Concreto (acabamento comum)	120	Plástico	140

* fofo = ferro fundido

Fonte: Carvalho e Oliveira (2008)

3.1.3 Equação geral de perda de carga

Para gerar a equação do sistema utilizou-se a expressão:

$$hf = K \cdot Q^n \quad (6)$$

Em que "n" é o expoente da equação, no caso de Hazen-Willians, igual a "1,852" e a "2" para a equação de Darcy-Weisbach. Já, o valor de K assume valores diferentes dependendo da equação utilizada, assim para Hazen Willians:

$$K = \frac{10,643 \cdot L}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (7)$$

E no caso da equação de Darcy-Weisbach:

$$K = \frac{f \cdot L \cdot 8}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (8)$$

3.2 Perda de Carga Localizada

Para o cálculo da perda de carga localizada adotou-se o método do comprimento equivalente. Este método baseia-se em uma tabela com valores de diâmetro pré-determinados (TABELA 2).

Tabela 2 Comprimento equivalente em número de diâmetros

Peça	Diâmetros	Peça	Diâmetros
Ampliação Gradual	12	Tê c/ passagem direta	20
Cotovelo de 90°	45	Tê com saída de lado	50
Cotovelo de 45°	20	Tê com saída bilateral	65
Curva de 90°	30	Válvula de pé c/ crivo	250
Curva de 45°	15	Válvula de retenção	100
Entrada normal de tubulação	17	Curva de aço 30° com 2 segmentos	7
Entrada de borda	35	Curva de aço 45° com 2 segmentos	15
Junção	30	Curva de aço 45° com 3 segmentos	10
Redução gradual	6	Curva de aço 60° com 2 segmentos	25
Registro de gaveta	8	Curva de aço 60° com 3 segmentos	15
Registro de globo	350	Curva de aço 90° com 2 segmentos	65
Registro de ângulo	170	Curva de aço 90° com 3 segmentos	25
Saída de canalização	35	Curva de aço 90° com 4 segmentos	15

Fonte Carvalho e Oliveira (2008)

Desta forma, a perda de carga equivalente foi calculada, para cada peça inserida, utilizando a seguinte equação:

$$L_e = n \cdot D \quad (9)$$

em que:

L_e : comprimento equivalente (m)

D : diâmetro do tubo utilizado no sistema (m)

n : número de diâmetros

Assim, o comprimento equivalente total foi obtido pela soma dos comprimentos equivalentes de todas as peças inseridas no sistema.

Com o comprimento equivalente total e real obteve-se o comprimento virtual:

$$L_v = L_e + L \quad (10)$$

em que:

L_v : comprimento virtual do tubo (m)

L : comprimento real do tubo (m)

3.3 Altura Manométrica

A altura manométrica foi obtida pela equação:

$$H_{man} = h_g + h_f \quad (11)$$

em que:

H_{man} : altura manométrica (mca)

h_g : desnível geométrico (m)

hf: perda de carga total (mca)

Ao se adotar a equação geral de perda de carga tem-se que a altura manométrica:

$$H_{man} = h_g + K \cdot Q^n \quad (12)$$

3.4 Equações de desempenho da bomba

Para gerar as curvas de desempenho da bomba utilizou-se a metodologia apresentada por Yanaji Jr et al. (1996), adotando o uso de equações quadráticas para representar a relação da vazão com altura manométrica e com o rendimento. Com pares de dados fornecidos pelo usuário, vazão e altura manométrica, e vazão e rendimento, os parâmetros da equação quadrática são calculados com base no sistema de equações da figura 4.

$$\begin{cases} A \sum x^4 + B \sum x^3 + C \sum x^2 = \sum x^2 y \\ A \sum x^3 + B \sum x^2 + C \sum x = \sum xy \\ A \sum x^2 + B \sum x + C \cdot n = \sum y \end{cases}$$

Figura 4 Sistema de equações para regressão quadrática

Assim, os valores de x e y são baseados nos valores fornecidos pelo usuário e n é o número de pares de valores que foram fornecidos.

Para a solução deste sistema torna-se necessário a transformação para uma matriz, visando a aplicação da regra de Cramer; desta forma a matriz deste sistema fica conforme demonstra a figura 5.

$$\begin{vmatrix} \sum x^4 & \sum x^3 & \sum x^2 & \sum x^2 y \\ \sum x^3 & \sum x^2 & \sum x & \sum xy \\ \sum x^2 & \sum x & n & \sum y \end{vmatrix}$$

Figura 5 Matriz para solução das equações lineares da regressão quadrática

Com isso, ao obter a solução do sistema em questão é possível determinar os parâmetros a, b e c da equação quadrática e chegar às seguintes equações de motobomba e rendimento, respectivamente:

$$H_{man} = a_h Q^2 + b_h Q + c_h \quad (13)$$

em que:

a_h , b_h e c_h : parâmetros da equação

H_{man} : altura manométrica (mca)

Q : vazão da equação (m^3/h)

$$\eta_B = a Q^2 + b Q + c \quad (14)$$

em que:

η_B : rendimento da motobomba (%)

a, b e c: parâmetros da equação do rendimento

3.5 Determinação de intersecção entre curvas da bomba e do sistema

Para determinação do ponto de operação, intersecção das curvas da bomba e do sistema, foi utilizado o método de Newton-Raphson:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (15)$$

Assim, este método tem como características múltiplas iterações até que o valor de x_{n+1} seja menor que o erro determinado.

O método foi aplicado para determinar todas as intersecções utilizadas no software, desde a determinação do ponto de operação e suas variações em função das alterações da rotação e/ou do diâmetro do rotor, até a determinação do ponto de projeto. Foram estipuladas 100.000 iterações como sendo o máximo de tentativas, de forma a minimizar o erro possível e obter maior precisão.

3.6 Cálculo da potência do eixo

De posse dos dados de vazão e altura manométrica do ponto de operação ou do ponto de projeto, a potência no eixo da bomba foi obtida com a equação:

$$Pot = \frac{Q_{po} \cdot H_{man_{po}}}{270 \cdot \eta_B} \quad (16)$$

em que:

Pot: Potência do eixo da motobomba (cv)

Q_{po} : Vazão do ponto de operação (m^3/h)

$H_{man_{po}}$: Altura manométrica do ponto de operação (mca)

η_B : Rendimento da bomba

3.7 Cálculo da potência absorvida

Para o cálculo da potência da bomba adota-se a seguinte equação:

$$Pot = \frac{Q_{po} \cdot Hman_{po}}{270 \cdot \eta_B \cdot \eta_M} \quad (17)$$

em que:

η_M : Rendimento do motor

Q_{po} : vazão no ponto de operação (m³/h)

3.8 Relação de semelhanças mecânicas de Rateaux

A variação da curva de desempenho da bomba, em função da velocidade da rotação e/ou do diâmetro do rotor, foi obtida utilizando-se as equações de Rateaux.

As curvas de isoefficiência foram obtidas empregando-se a seguinte equação:

$$Hman_{po} = \frac{Q_{po}^2}{K} \quad (18)$$

em que:

K: constante baseada na vazão e na altura manométrica do ponto de operação.

Pela intersecção da curva de isoefficiência com a curva da bomba obteve-se o ponto homólogo. A partir deste foram empregadas as equações de Rateaux para obtenção da nova rotação e/ou diâmetro do rotor de forma atender um novo par de valores (Q x Hman):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \text{ ou } \frac{Hman_1}{Hman_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \text{ ou } \frac{Pot_1}{Pot_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (19)$$

em que:

Q_1 e Q_2 : respectivamente vazão no ponto de operação da bomba e nova vazão adotando a nova rotação.

H_{man_1} e H_{man_2} : respectivamente, altura manométrica no ponto de operação da bomba e a altura manométrica adotando a nova rotação.

Pot_1 e Pot_2 : respectivamente, potência no ponto de operação da bomba e potência adotando a nova rotação.

n_1 e n_2 : respectivamente, rotação no ponto de operação e a nova rotação.

Para variação do diâmetro do rotor as relações de Rateuax empregadas foram:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \text{ ou } \frac{H_{man_1}}{H_{man_2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (20)$$

em que:

D_1 e D_2 : respectivamente, diâmetro original do rotor da motobomba e o novo diâmetro.

3.9 Cálculo do tipo de tarifação

Para o cálculo do sistema de tarifação serão utilizadas as equações descritas por Carvalho e Oliveira (2008), na qual cada tipo de contrato de tarifa escolhida apresenta variáveis próprias em seu cálculo.

3.9.1 Grupo B

Para o grupo B o sistema de tarifação é único, ou seja, a cobrança ocorre somente em relação ao uso, desta maneira a tarifação é feita de acordo com a equação:

$$\text{Custo Final (R\$)} = C \cdot T_c \quad (21)$$

em que:

C: consumo em kWh

T_c: Tarifa de energia elétrica em R\$/kWh

3.9.2 Grupo A

Foram considerados os sistemas de tarifação: convencional, horo-sazonal verde e horo-sazonal azul.

3.9.2.1 Sistema de Tarifação Convencional

O custo final da tarifa foi obtido pela equação:

$$\text{Custo Final (R\$)} = C \cdot T_c + D \cdot T_d \quad (22)$$

em que:

C: consumo em kWh

T_c: Tarifa de energia elétrica em R\$/kWh

D: Demanda em kW

Td: Tarifa de demanda em R\$/kW

3.9.2.2 Sistema de Tarifação Horo-Sazonal Azul

Para o cálculo do sistema de tarifação horo-sazonal azul utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{Custo energia (R\$)} = C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad (23)$$

em que:

C_p: Consumo de energia em horário de ponta em kWh

T_p: Tarifa de consumo em horário de ponta em R\$/h

C_{fp}: Consumo de energia em horário fora de ponta em kWh

T_{fp}: Tarifa de consumo em horário fora de ponta em R\$/kWh

$$\text{Custo demanda (R\$)} = D_p \cdot T_{d_p} + D_{fp} \cdot T_{d_{fp}} \quad (24)$$

em que:

D_p: Demanda em horário de ponta em kW

T_{d_p}: Tarifa de demanda em horário de ponta em R\$/kW

D_{fp}: Demanda em horário fora de ponta em kW

T_{d_{fp}}: Tarifa de demanda em horário fora de ponta em R\$/kW

Se houver ultrapassagem de demanda medida, em relação à demanda contratada, o custo da energia será acrescida do excedente de demanda na ponta e fora de ponta, de acordo com a equação:

$$CDU (R\$) = (Dm_p - D_p) \cdot T_{up} + (Dm_{fp} - D_{fp}) \cdot T_{ufp} \quad (25)$$

em que:

CDU: Custo de demanda de ultrapassagem em R\$

Dm_p : Demanda medida em kW

D_p : Demanda contratada na ponta em kW

Dm_{fp} : Demanda medida fora de ponta em kW

D_{fp} : Demanda contratada fora de ponta em kW

T_{up} : Tarifa de demanda de ultrapassagem na ponta em R\$/kW

T_{ufp} : Tarifa de demanda de ultrapassagem fora de ponta em R\$/kW

O custo final com a soma do excedente de demanda pode ser expresso da seguinte forma:

$$\text{Custo final (R\$)} = \text{Custo energia} + \text{Custo demanda} + \text{CDU} \quad (26)$$

3.9.2.3 Sistema de Tarifação Horo-Sazonal Verde

O custo final da tarifação utilizando o sistema horo-sazonal verde foi obtido pela equação:

$$\text{Custo consumo(R\$)} = C_p \cdot T_p + C_{fp} \cdot T_{fp} \quad (27)$$

em que:

C_p : Consumo de energia em horário de ponta em kWh

T_p : Tarifa de consumo em horário de ponta em R\$/kWh

C_{fp} : Consumo de energia em horário fora de ponta em kWh

T_{fp} : Tarifa de consumo em horário fora de ponta em R\$/kWh

Sendo que no caso de ultrapassagem de demanda medida em relação à demanda contratada, o custo final será composto de um valor relativo à ultrapassagem, ficando a equação do custo final assim:

$$\text{Custo demanda} = D_c \cdot T_d + (D_m - D_c) \cdot T_u \quad (28)$$

em que:

D_c: Demanda contratada em kW

T_d: Tarifa de demanda em R\$

D_m: Demanda medida em kW

D_c: Demanda contratada em kW

T_u: Tarifa de demanda de ultrapassagem em R\$/kW

$$\text{Custo final (R\$)} = \text{Custo energia} + \text{Custo demanda} \quad (29)$$

3.10 Cálculo do Imposto sobre o Comércio e Serviços (ICMS)

No Brasil, dentre os impostos que incidem sobre a tarifação energética está o ICMS. Para o cálculo deste imposto adota a seguinte equação:

$$\text{ICMS} = \left(\frac{100 \cdot \text{Alíquota}}{100 - \text{Alíquota}} \right) \quad (30)$$

em que:

ICMS: Imposto sobre circulação de mercadoria e serviços (%)

Alíquota: Porcentagem adotada por cada unidade de federação brasileira (%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva do Sistema

O software “GraficBomb” apresenta a possibilidade de o usuário digitar as variáveis que envolvem o cálculo da altura manométrica na sucção e no recalque, possibilitando a escolha entre as equações de Hazzem-Willians e Darcy-Weisbach (figura 6) .

Equação

Sucção

Diâmetro	<input type="text"/>	mm
Comprimento real	<input type="text"/>	m
Comprimento Equivalente	<input type="text"/>	m Localizada
Comprimento virtual	<input type="text"/>	m
Desnível	<input type="text"/>	m

Recalque

Diâmetro	<input type="text"/>	mm
Comprimento real	<input type="text"/>	m Localizada
Comprimento Equivalente	<input type="text"/>	m
Comprimento virtual	<input type="text"/>	m
Desnível	<input type="text"/>	m

Preencher vazão máxima do sistema

Valor máx: m³/h

Figura 6 Preenchimento dos dados de sucção do sistema

Além disso, o sistema também permite o cálculo da perda de carga localizada por meio do preenchimento de uma lista de peças (figura 7).

Ampliação gradual	<input type="text"/>	Tê com passagem direta	<input type="text"/>
Cotovelo de 90°	<input type="text"/>	Tê com saída de lado	<input type="text"/>
Cotovelo de 45°	<input type="text"/>	Tê com saída bilateral	<input type="text"/>
Curva de 90°	<input type="text"/>	Válvula de pé com crivos	<input type="text"/>
Curva de 45°	<input type="text"/>	Válvula de retenção	<input type="text"/>
Entrada normal de tubulação	<input type="text"/>	Curva de aço 30° com 2 segmentos	<input type="text"/>
Entrada de borda	<input type="text"/>	Curva de aço 45° com 2 segmentos	<input type="text"/>
Junção	<input type="text"/>	Curva de aço 45° com 3 segmentos	<input type="text"/>
Redução Gradual	<input type="text"/>	Curva de aço 60° com 2 segmentos	<input type="text"/>
Registro de gaveta	<input type="text"/>	Curva de aço 60° com 3 segmentos	<input type="text"/>
Registro de globo	<input type="text"/>	Curva de aço 90° com 2 segmentos	<input type="text"/>
Registro de ângulo	<input type="text"/>	Curva de aço 90° com 3 segmentos	<input type="text"/>
Saída de Canalização	<input type="text"/>	Curva de aço 90° com 4 segmentos	<input type="text"/>

Figura 7 Lista de peças e com campo de digitação da quantidade

4.2 Curva da Bomba

O sistema permite também o cálculo da equação quadrática da bomba bem como a plotagem de sua curva, por meio da digitação dos dados da bomba (figura 8).

Dados Originais da Bomba

Diâmetro do Rotor mm

Rotação rpm

Preencher dados da bomba

	Q(m ³ /h)	Hman (m)	Rendimento
▶	0	41,88	
	20	42,36	
	40	42,30	
	60	41,70	63
	80	40,57	72,5
	100	38,90	78,5

Figura 8 Tela de preenchimento dos dados da bomba

4.3 Curva do Rendimento

Com os dados preenchidos da vazão, altura manométrica e rendimento, o programa plota a curva do rendimento, bem como gera uma equação quadrática da vazão versus o rendimento (figura 9).

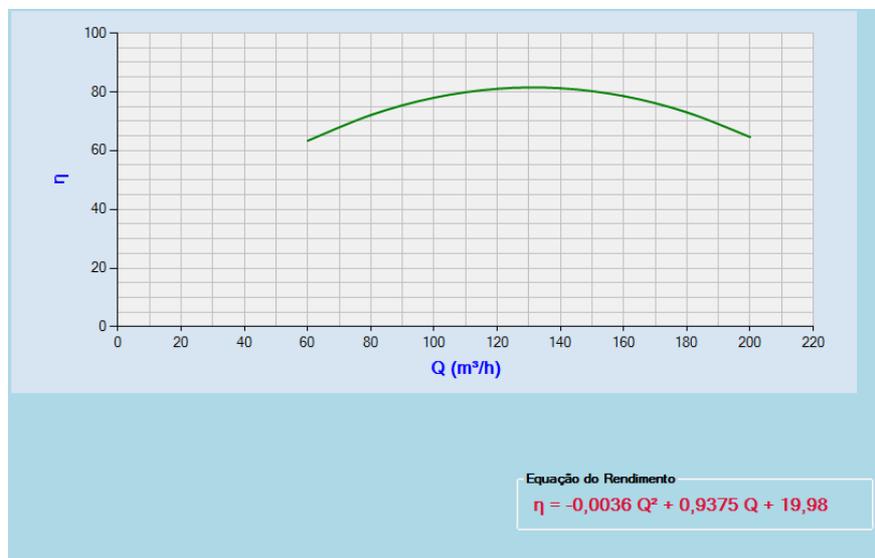


Figura 9 Tela de exibição da curva e da equação do rendimento

4.4 Curva da potência

A curva da potência também é gerada pelo software, com base nos dados digitados da bomba (figura 10).



Figura 10 Tela de exibição da curva da potência

4.5 Cálculo do Ponto de Operação

Com base nos dados do sistema e da bomba é possível calcular o ponto de operação e gerar o gráfico com as curvas da bomba e do sistema (figura 11).

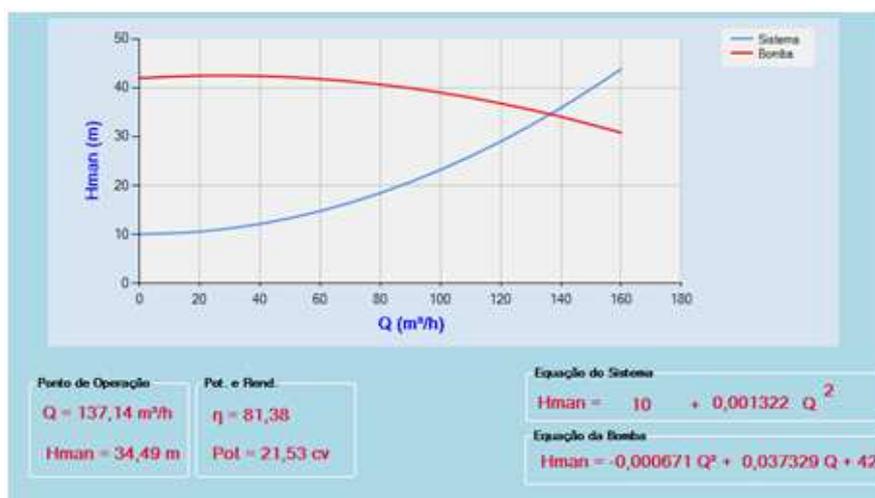


Figura 11 Tela de exibição do ponto de operação, das equações e das curvas da bomba e do sistema, além do rendimento e do ponto de operação

4.6 Modificação do ponto de operação

É possível também modificar o ponto de operação da bomba, com base na rotação e no diâmetro, exibindo também o novo ponto de operação, rendimento e potência desse novo ponto (figura 12).

The image shows a software interface with two sections for pump data. The top section, titled 'Dados Originais da Bomba', contains two input fields: 'Diâmetro do Rotor' with the value '290' and unit 'mm', and 'Rotação' with the value '1750' and unit 'rpm'. The bottom section, titled 'Dados Modificados da Bomba', contains two input fields: 'Diâmetro do Rotor' with the value '280,7' and unit 'mm', and 'Rotação' with the value '1750' and unit 'rpm'.

Dados Originais da Bomba	
Diâmetro do Rotor	290 mm
Rotação	1750 rpm

Dados Modificados da Bomba	
Diâmetro do Rotor	280,7 mm
Rotação	1750 rpm

Figura 12 Tela de preenchimento do novo diâmetro do rotor e da nova rotação.

4.7 Tarifação de energia

O cálculo da tarifação de energia pode ser feito adotando-se as tarifas convencionais, horo-sazonal azul e verde e também da tarifação do grupo B. Na esquerda da tela são mostrados os campos de preenchimento geral da tarifação que envolvem as variáveis necessárias para o cálculo da demanda contratada, demanda medida, bem como o fator de potência, ICMS e da energia consumida (figura 13).

Dados Gerais		
Tempo	<input type="text"/>	h/dia
Tempo Ponta	<input type="text"/>	h/dia
Tempo F. Ponta	<input type="text"/>	h/dia
Dias	<input type="text"/>	dias/mês
Vazão	<input type="text"/>	m ³ /h
Hman	<input type="text"/>	m
R. motor	<input type="text"/>	%
R. bomba	<input type="text"/>	%
Pot. Absorvida	<input type="text"/>	cv
Consumo	<input type="text"/>	kW/h
Pot. Instalada	<input type="text"/>	cv
Demand. Cont	<input type="text"/>	kW
Demanda Med	<input type="text"/>	kW
cos Φ	<input type="text"/>	
ICMS	<input type="text"/>	%

Figura 13 Dados gerais para o cálculo da tarifação

4.7.1 Tarifação Horo-sazonal Verde

A partir do preenchimento gerais dos dados, é necessário o preenchimento das tarifas de cada estrutura de tarifação; dessa forma tem-se os campos do custo da tarifação na ponta e fora de ponta, bem como da tarifação de demanda e de demanda de ultrapassagem (figura 14).

Tarifação Horosazonal Verde			
T.E.P	T.E.F.P	T.D	T.D.U

Figura 14 Campo de preenchimento dos valores da tarifação Horo-sazonal verde

em que:

T.E.P: Tarifa de energia na ponta

T.E.F.P: Tarifa de energia fora de ponta

T.D: Tarifa de demanda

T.D.U: Tarifa de demanda de ultrapassagem

4.7.2 Tarifação Horo-sazonal Azul

Para o cálculo da tarifação Horo-sazonal azul são necessários os dados da tarifa de energia na ponta, tarifa de energia fora de ponta, tarifa de demanda na ponta, tarifa de demanda fora de ponta, tarifa de demanda de ultrapassagem na ponta e tarifa de demanda de ultrapassagem fora de ponta (figura 15).

Tarifação Horosazonal Azul					
T.E.P	T.E.F.P	T.D.P	T.D.F.P	T.D.U.P	T.D.U.F.P

Figura

15 Campo de preenchimento dos valores da tarifação Horo-sazonal verde

em que:

T.D.P: Tarifa de demanda na ponta

T.D.F.P: Tarifa de demanda fora de ponta

T.D.U.P: Tarifa de demanda de ultrapassagem na ponta

T.D.U.F.P: Tarifa de demanda de ultrapassagem fora de ponta

4.7.3 Tarifação Convencional

Para o cálculo da tarifação convencional são necessários os dados da tarifa de energia, tarifa de demanda e tarifa de demanda de ultrapassagem (figura 16).

Tarifação Convencional		
T. E	T. D	T. D. U.
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 16 Campo de preenchimento dos valores da tarifação convencional

em que:

T.E: Tarifa de energia

T.D: Tarifa de demanda

T.D.U: Tarifa de demanda de ultrapassagem

4.7.4 Tarifação Grupo B

Para o cálculo da tarifação do grupo B é necessário somente o valor da tarifa de energia (figura 17).

Tarifação Grupo B			
Tarifa	Total s/ICMS	Total c/ICMS	Custo/m ³
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figura 17 Campo de preenchimento da energia da tarifação Grupo B

Desta forma, na tarifação do grupo B já é apresentado o cálculo total com ICMS e sem ICMS, além do custo total por m³.

4.8 Estudos de caso

4.8.1 Equação da bomba e do rendimento

Para validação da equação da bomba e do rendimento foi utilizado como comparação o software “Desmobo”, desenvolvido e demonstrado por Bier et al (2004, p. 229), o que possibilita a geração de equações cúbicas da bomba e do rendimento. Desta forma, o programa adotou como estudo de caso de validação uma bomba Mark DY com rotação de 3500rpm e diâmetro de rotor de 179mm e com os seguintes dados (tabela 3).

Tabela 3 Dados da bomba Mark DY 3500rpm e D = 179mm

Vazão (m ³ /h)	Vazão (L/s)	Hm (m)	Rendimento (%)	NPSH (mca)
60	17	57	50	2,00
80	22	56	60	2,01
100	28	55	73	2,10
120	33	54	77	2,21
140	39	52	81	2,46
160	44	49	81	2,92
180	50	44	77	3,69
200	56	38	73	5,13

Fonte: Bier et al (2004)

A partir destes dados o programa “Desmobo” gerou a equação cúbica da bomba e do rendimento, respectivamente:

$$H_{man} = -0,0003Q^3 + 0,0171Q^2 - 0,4846Q + 61,598 \quad (31)$$

$$\eta = 0,0003Q^3 - 0,0832Q^2 + 5,31Q - 18,39$$

(32)

Com isso os dados da bomba foram digitados no software “GraficBomb” visando a geração da curva e equação da bomba (figura 18) e do sistema, além da curva do rendimento (figura 19).

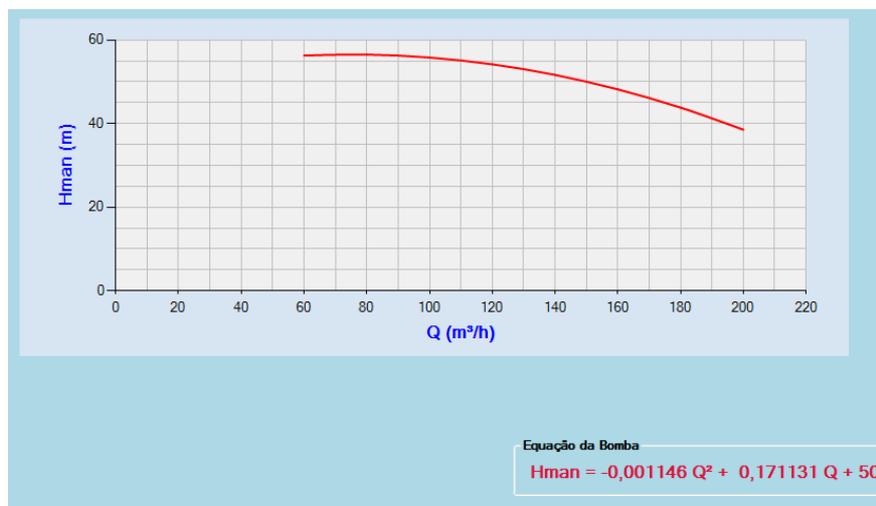


Figura 18 Gráfico e equação da bomba do software “GraficBomb”

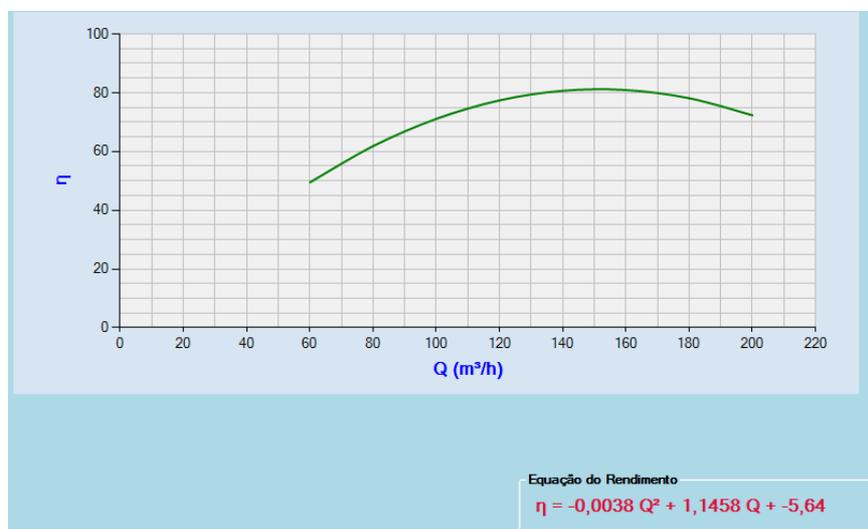


Figura 19 Gráfico e equação do rendimento “GraficBomb”

Os parâmetros da equação foram digitados no Excel[®] visando a determinação do r^2 de ambos os softwares. Desta forma foram obtidos os seguintes valores de r^2 para a equação da bomba: 0,9623 para o “Desmobo” e 0,9911 para o “GraficBomb”. Já para o rendimento chegou-se aos valores de 0,9855 para o “Desmobo” e 0,9871 para o “GraficBomb”.

Por fim, Bier et al (2004) adotaram valores de vazão e altura manométrica para a determinação da potência da bomba, sendo os valores: $Q = 39\text{L/s}$ ou $140\text{m}^3/\text{h}$ e $H_{\text{man}} = 50\text{m}$ e com $\eta = 80\%$, chegando-se ao valor de potência igual a $24,2\text{ kW}$ ou $33,1\text{ cv}$.

Adotando o software “GraficBomb” para o cálculo da potência chegou-se ao valor de $31,17\text{cv}$.

Desta forma, pode-se afirmar que o software “GraficBomb” apresentou um ajuste próximo daquele apresentado por Bier et al (2004), apesar do autor fazer uso de uma equação cúbica, tanto na geração da equação da bomba quanto na geração da equação do rendimento.

4.8.2 Ponto de operação

Para o cálculo do ponto de operação no software, bem como sua validação, foi utilizado o estudo de caso citado por Lopes et al (2008).

Desta forma, o estudo de caso considera as seguintes informações fornecidas pela figura 20.

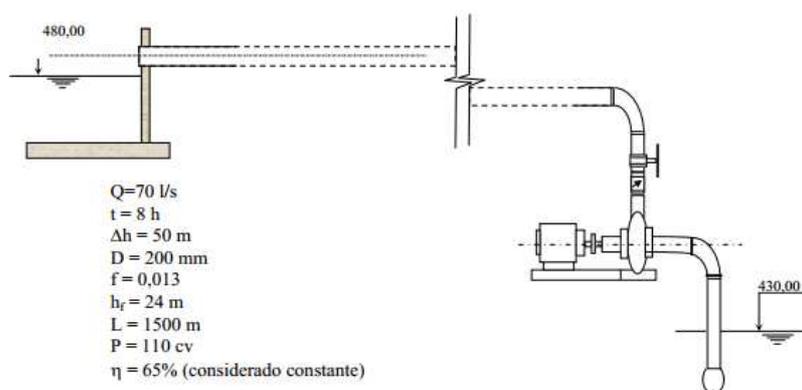


Figura 20 Demonstração de um sistema de sucção e recalque
 Fonte: Lopes et al (2008)

em que:

- Q: Vazão de projeto (l/s)
- t: Tempo de bombeamento (h)
- Δh : Desnível geométrico (m)
- D: Diâmetro da tubulação
- f: Fator atrito de Darcy-Wishbach
- h_f : Perda de carga (m)
- L: Comprimento do tubo (m)
- P: Potência da bomba adotada (cv)
- η : Rendimento global da bomba (%)

O estudo de caso apresentou como resposta a curva da bomba e do sistema (figura 21).

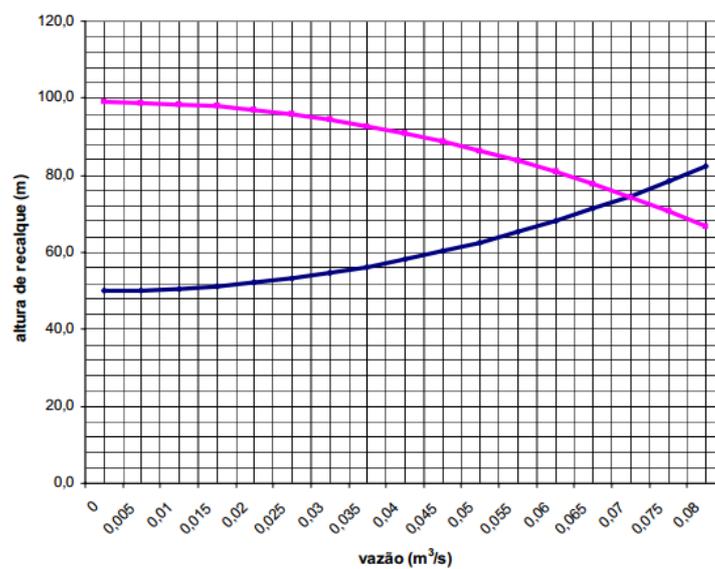


Figura 21 Curvas da bomba e sistema e ponto de operação

Fonte: Lopes et al (2008)

A partir da resposta buscou-se a validação do software em que os dados do sistema foram preenchidos e obteve-se a curva e equação do sistema (figura 22).



Figura 22 Curva do sistema com respectiva equação

Com isso foi necessário converter os valores de vazão de m³/s para m³/h do gráfico e digitados no software (figura 23).

Preencher dados da bomba

	Q(m³/h)	Hman (m)	Rendimento
▶	0	99	65
	18	98,6	65
	36	98,4	65
	54	98	65
	72	96,4	65
	90	96	65

Figura 23 Preenchimento na planilha do “GraficBomb” dos dados da bomba

Como o estudo de caso considerou o rendimento constante, o mesmo foi digitado 65% para todos os dados de vazão e altura manométrica.

A partir disso foi gerada a seguinte curva e equação da bomba (figura 24).

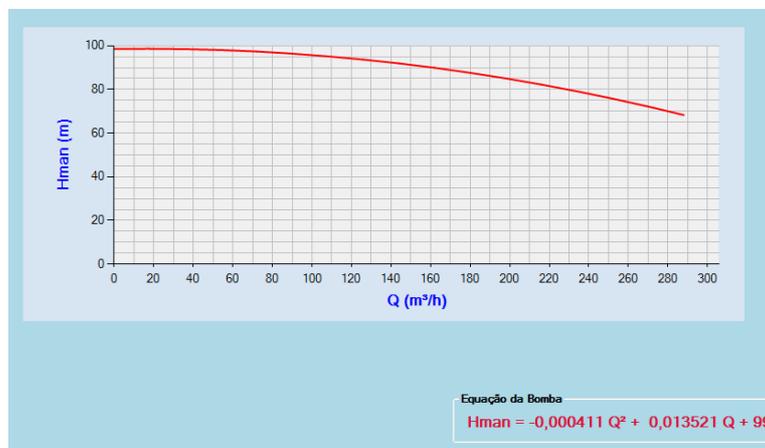


Figura 24 Curva e equação da bomba geradas com os dados digitados

Assim, foi executado o botão “calcular” no menu “ponto de operação” e obtido a seguinte resposta de curva de bomba e do sistema, além das equações da bomba e do sistema, bem como o ponto de operação, a potência no ponto e o rendimento (figura 25).

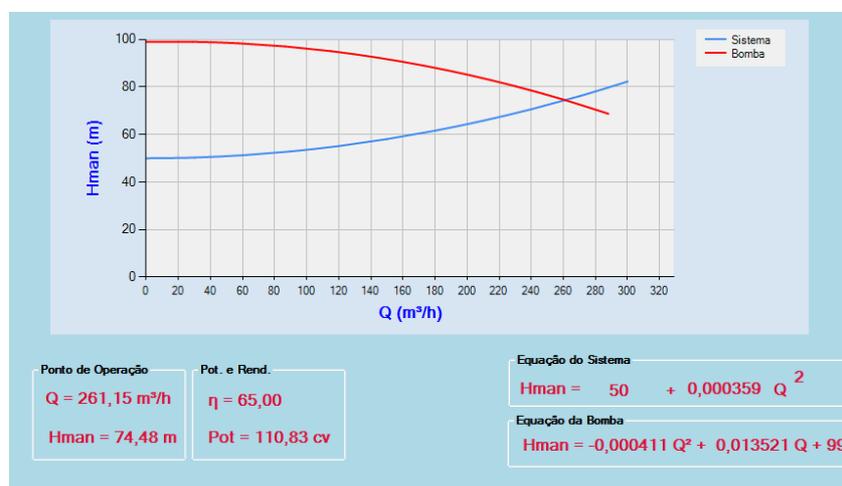


Figura 25 Ponto de operação da bomba e do sistema

O ponto de operação encontrado está de acordo com o proposto pelo estudo de caso que é de $Q = 0,0725 \text{ m}^3/\text{s} = 261 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H_{\text{man}} = 73$, sendo a do “GraficBomb” igual a $Q = 261,15 \text{ m}^3/\text{h}$ e $H_{\text{man}} = 74,48$, além disso a potência da bomba proposta pelo estudo de caso também está de acordo com o ponto de operação encontrado que é de 110 cv.

Além disso, foi utilizado também um exercício apresentado por Carvalho (2004), em que a seguinte curva da bomba foi apresentada (tabela 4):

Tabela 4 Dados de vazão e altura manométrica de uma bomba fictícia

Vazão (m ³ /h)	Hman(mca)
0	52,5
10	52
20	51,5
30	51
40	50
50	48
60	42
70	37

Fonte: Carvalho (2004)

De acordo com os dados apresentados, o valor de desnível geométrico (hg) e perda de carga (hf), foram, respectivamente, 40 e 10m, resultando em uma altura manométrica de 50m. Pelos dados da bomba chega-se à vazão de 40 m³/h. Utilizando-se da equação geral do sistema $H_{man} = h_g + K \cdot Q^n$ e da equação de Darcy-Weisbach, chegou-se a $H_{man} = 40 + 0,00625 \cdot Q^2$.

A partir disso, no aplicativo “GraficBomb” na aba “Curvas” e, posteriormente, “Bomba” foram inseridos os dados da bomba proposta pelo exercício e dados fictício de valores de rendimento, tendo em vista que é obrigatório o preenchimento do mesmo no programa; contudo estes dados não foram utilizados como base do cálculo. Assim, tem-se a tela de preenchimento na figura 26.

Preencher dados da bomba

	Q(m ³ /h)	Hman (m)	Rendimento
	0	52,5	
	10	52	40
	20	51,5	50
	30	51	60
	40	50	55
	50	48	35

Figura 26 Dados de preenchimento da bomba do exercício proposto

Desta forma, com os dados preenchidos, o software, por meio de regressão quadrática, encontrou a seguinte equação da bomba, bem como seu gráfico com base nos dados da equação (figura 27).

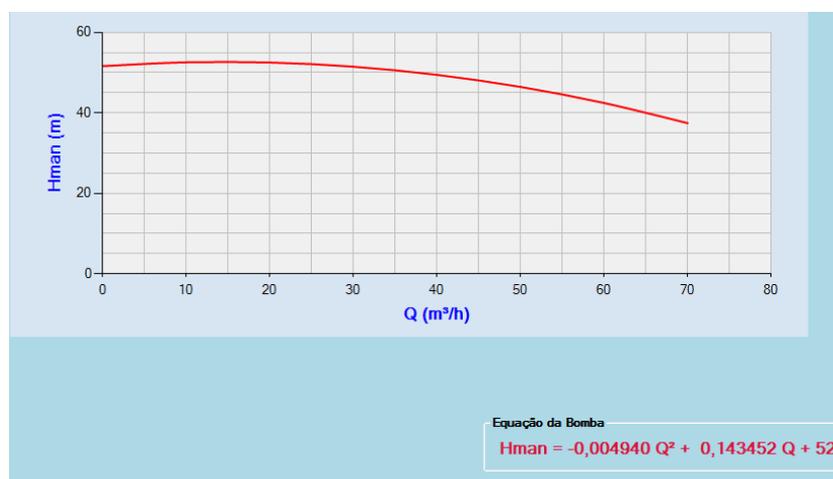
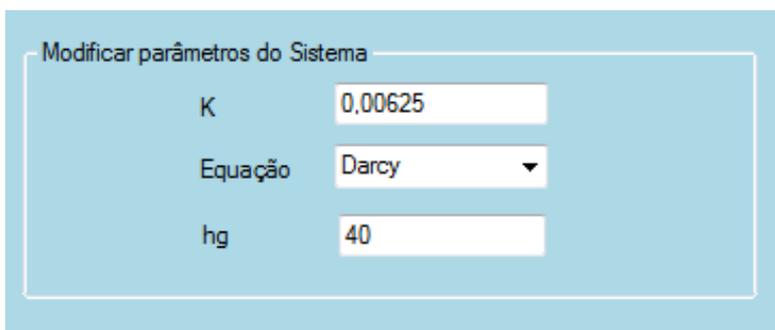


Figura 27 Equação e curva da bomba gerada pelo programa

Depois de gerados os dados da bomba, foram preenchidos os dados do sistema; assim, foi utilizada a equação geral do sistema proposta pelo exercício, como pode-se ver na figura 28, bem como o valor máximo de vazão de 300m³/h, em que o programa cria pontos de 30 em 30 ou seja 10% do valor máximo (figura 29).



Modificar parâmetros do Sistema	
K	<input type="text" value="0,00625"/>
Equação	<input type="text" value="Darcy"/>
hg	<input type="text" value="40"/>

Figura 28 Dados da equação de sistema proposto pelo exercício



Valor máx:	<input type="text" value="300"/>	<input type="button" value="Ex"/>
------------	----------------------------------	-----------------------------------

Figura 29 Preenchimento da vazão máxima do sistema

Com isso o software determinou a curva do sistema e da bomba, bem como o ponto de operação das duas curvas (figura 30).



Figura 30 Curva da bomba e do sistema e ponto de operação calculado

Desta forma, de acordo com o cálculo do programa, o ponto de operação da bomba é de vazão igual $39,57 \text{ m}^3/\text{h}$ e altura manométrica de $49,47\text{m}$. Com isso obteve-se valores próximos do resultado proposto pelos autores, sendo eles $40\text{m}^3/\text{h}$ e 50m .

Os parâmetros da equação da bomba fornecida pelo “GraficBomb” foram digitados no software Microsoft Office Excel visando a determinação dos pares de vazão e altura manométrica correspondentes. Além disso, foram também digitados os dados da curva da bomba fornecidos pelo exercício visando a comparação entre os mesmos. Para que houvesse uma melhor comparação, foi adotada também a ferramenta “Linha de tendência” fornecida pelo Microsoft Office Excel, gerando uma curva da bomba por meio desta ferramenta, bem como uma equação e seu erro. Com isso foram comparados o erro encontrado entre a linha de tendência e a curva do exercício e entre a equação fornecida pelo “GraficBomb” e a curva do exercício. Desta forma, obteve-se o valor do coeficiente de determinação (r^2) do software “GraficBomb” e do Excel, em que obteve-se $r^2 = 0,97985$ para o software e $r^2 = 0,975$ para Excel, demonstrando

que apesar do erro entre o dado original e o software, mesmo assim o software “GraficBomb” ainda é relativamente mais preciso que o cálculo feito no Excel. Além disso, os dados da bomba adotados pelo exercício proposto não apresentam uma curva quadrática exata, como mostra a figura 31, o que pode também ser um fator que pode ter interferido na determinação de um ponto de operação diferente.

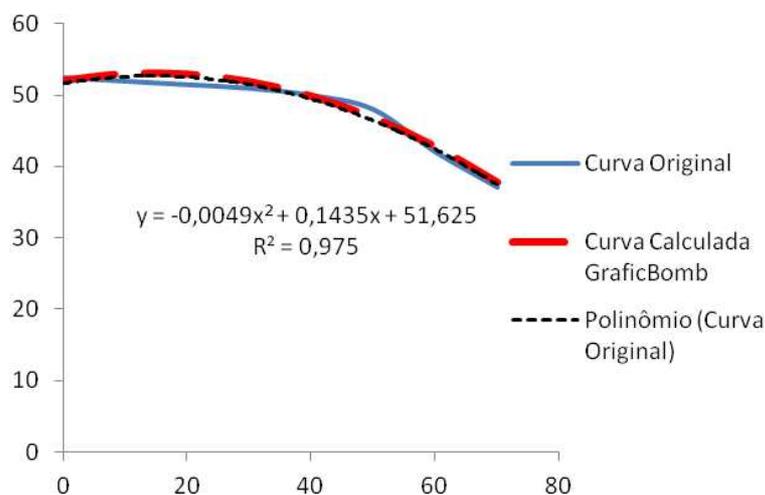


Figura 31 Gráfico mostrando as curvas original do exercício, curva calculada e a curva da linha de tendência

4.8.3 Perda de carga localizada

Para validar o cálculo da perda de carga localizada foi adotado um exercício proposto por Silvestre (1983, p. 117), em que o mesmo apresenta os seguintes dados para o cálculo da altura manométrica:

$$Q = 40 \text{ L/s} = 144 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Tubulação C de Hazzen-Willians} = 100$$

$\eta = 72\%$ (rendimento total do conjunto)

$D_s = 300$ mm (diâmetro da sucção)

$D_r = 250$ mm (diâmetro do recalque)

$h_s = 3,00$ m (altura da sucção)

$L_r = 9,00$ m (comprimento da tubulação de sucção)

$h_r = 17,00$ m (altura do recalque)

$L_r = 322,00$ (comprimento da tubulação de recalque)

No item b do exercício o autor calcula a perda de carga localizada na sucção, de forma que as peças utilizadas na mesma foram: uma válvula de pé com crivos, uma curva de 90° e uma saída de canalização.

A partir disso, calculando o comprimento equivalente do tubo, tem-se o valor de 84 m e somando com o comprimento real, e calculando o comprimento virtual chegou-se ao valor de 93m (figura 32).

Sucção		
Diâmetro	300	mm
Comprimento real	9	m
Comprimento Equivalente	84	m
Comprimento virtual	93	m
Desnível	3	m

Localizada

Figura 32 Cálculo do comprimento equivalente e virtual da sucção pelo software “GraficBomb”

Pode-se perceber que o valor calculado pelo exercício foi exatamente o mesmo valor calculado pelo software.

No item c do exercício, o autor calcula a perda de carga localizada no recalque, em que o comprimento equivalente baseou-se nas seguintes peças: um

registro de gaveta, uma curva de 90°, uma válvula de retenção e duas curvas de 45°.

A partir disso o autor fez os cálculos e chegou ao valor de 50,75m de comprimento equivalente e por fim o valor de 372,75m de comprimento virtual (figura 33).

Recalque		
Diâmetro	250	mm
Comprimento real	322	m
Comprimento Equivalente	50,75	m
Comprimento virtual	372,75	m
Desnível	17	m

Figura 33 Cálculo do comprimento equivalente e virtual do recalque pelo software “GraficBomb”

Tem-se que os valores calculados pelo exercício foram idênticos aos valores encontrados pelo software “GraficBomb”.

Por fim, no item f o exercício pede o cálculo da altura manométrica do sistema, em que o valor encontrado foi de 21,91m.

No software esse valor não é expresso de forma direta, sendo expresso por meio da equação do sistema; desta forma, ao executar o cálculo do sistema, foi gerada a equação demonstrada pela figura 34.

$$H_{man} = 20 + 0,000197 Q^{1,852}$$

Figura 34 Equação do sistema gerada pelo software “GraficBomb”

Desta maneira, tem-se que o valor de vazão de projeto é de $144\text{m}^3/\text{h}$ fornecido pelo exercício, e adotando esse valor na equação tem-se que a altura manométrica (H_{man}) foi de $21,91\text{m}$, sendo idêntica a resposta demonstrada pelo exercício.

4.8.4 Ponto de projeto

Foram utilizados dados apresentados por Carvalho (2004), para o cálculo da rotação bem como do novo diâmetro de uma bomba, de forma atender a uma demanda de $140\text{m}^3/\text{h}$ com altura manométrica de 31m , sendo o desnível total de $18,2\text{m}$. A rotação e o diâmetro do rotor da bomba previamente escolhida eram, respectivamente, 1750 rpm e 290 mm , sendo a curva da bomba disponibilizada de acordo com a figura 35.

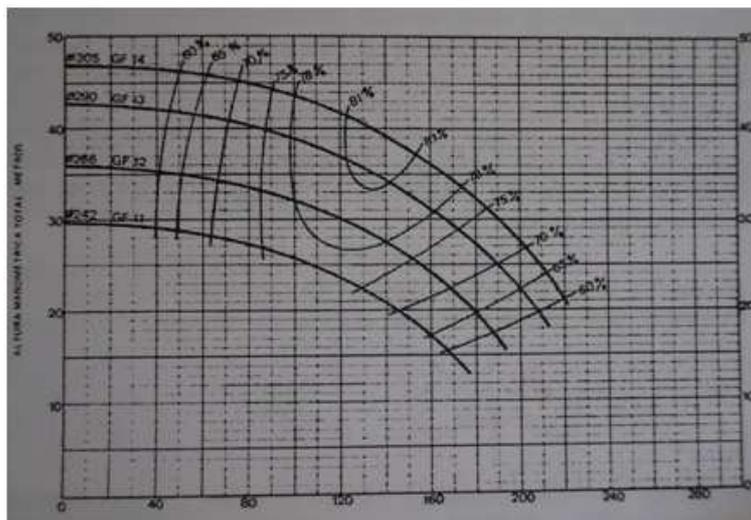


Figura 35 Curvas da bomba proposta no exercício com diversos diâmetros de rotor

Fonte: Carvalho (2004)

Calculando a equação do sistema por meio dos dados fornecidos chegou-se à seguinte equação geral, adotando nesse caso a equação de Darcy-Weisbach tem-se que $H_{man} = 18,2 + 0,000653Q^2$.

Desta forma, foi feita a leitura na curva da bomba visando adotar a curva com o diâmetro que adequa-se ao ponto de projeto, sendo este igual a $Q = 140\text{m}^3/\text{h}$ e $H_{man} = 31\text{m}$. Assim, a curva que adequa-se melhor é a curva do diâmetro igual a 290mm. Desta forma, foi feita a leitura dos pontos de vazão e altura manométrica correspondente ao longo da curva e o mesmo copiado para o software “GraficBomb” (figura 36) visando o cálculo da equação da bomba.

Dados Originais da Bomba

Diâmetro do Rotor mm

Rotação rpm

Preencher dados da bomba

	Q(m ³ /h)	H _{man} (m)	Rendimento
	0	42,1	
	20	42	
	40	41,8	
	60	41,2	63
	80	40,2	72,5
	100	39	78,5

Figura 36 Dados preenchidos com base na curva da bomba

A partir destes dados foi gerado por meio do software a equação e a curva da bomba no programa ajustada para a equação da bomba (figura 37).



Figura 37 Curva e equação geradas pelo software

A partir disso foram preenchidos os dados do sistema, com base no exercício proposto, sendo adotado o valor máximo de vazão igual a 200m³/h em que os pontos do sistema foram adotados de 20 em 20 (figura 38).

Modificar parâmetros do Sistema

K	<input type="text" value="0,000653"/>
Equação	<input type="text" value="Darcy"/>
hg	<input type="text" value="18,2"/>

Valor máx:

Figura 38 Dados do sistema preenchidos no software

A partir disso foi gerado o ponto de operação original da bomba com rotação de 1750rpm e diâmetro do rotor igual a 290mm (figura 39).

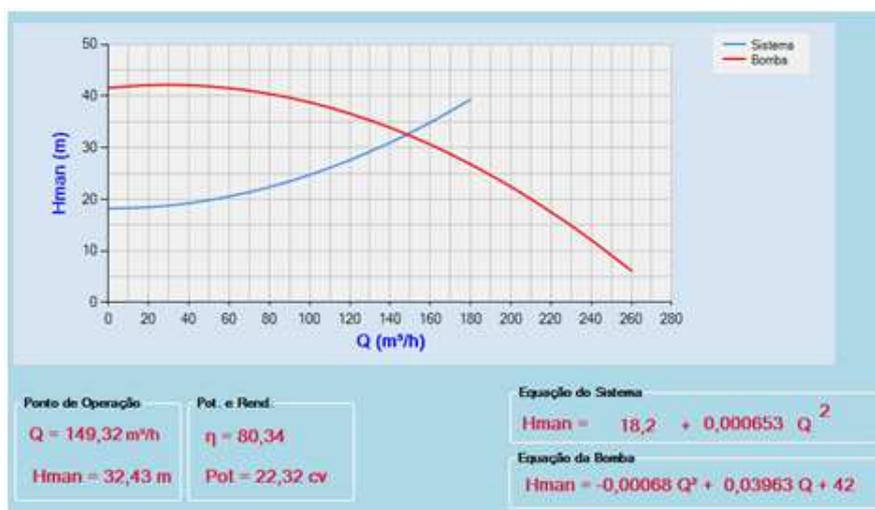


Figura 39 Curva da bomba e do sistema e tela de resposta com ponto de operação, rendimento e potência no ponto e equações do sistema e da bomba

Com os dados gerados, foi iniciada então, no programa a parte de adequação da rotação ou diâmetro do rotor para que o ponto de projeto fosse determinado.

Desta forma, foi digitado o valor de vazão igual a 140m³/h e obteve-se pelo próprio software o valor de 31m de altura manométrica, como mostra a figura 40, que fora o que o exercício estipulou como sendo o ponto de projeto. A princípio foi alterada a rotação mantendo o diâmetro original do rotor e obteve-se a curva com a nova rotação, bem como o ponto homólogo e a potência e o rendimento da nova rotação, assim como a equação da bomba para a nova rotação (figura 41).

Valores de Projeto

Q m³/h

Hman m

Figura 40 Vazão de projeto digitada para o cálculo da nova rotação



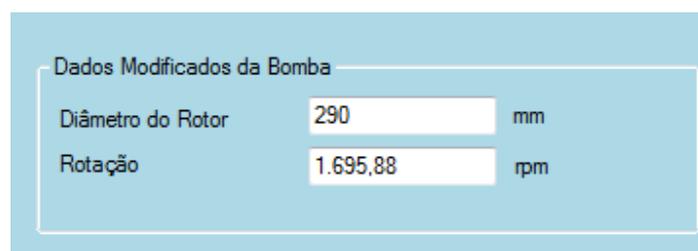
Figura 41 Tela de saída com a alteração da rotação da bomba

A partir da nova equação foi então demonstrado pelo programa os novos pontos de vazão e altura manométrica (figura 42).

	Q(m ³ /h)	Hman(mca)	Hmancalculada(η)
▶	0,00	39,54	39,54
	19,38	39,44	40,01
	38,76	39,25	39,92
	58,14	38,69	39,28
	77,53	37,75	38,08

Figura 42 Dados de altura manométrica e vazão para a nova rotação

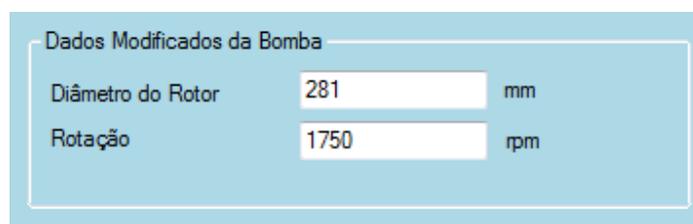
Dessa forma, o sistema encontrou como potência no ponto de projeto, o valor de 19,87 cv e como rendimento o valor de 80,88%. Além da rotação de 1695,88 rpm, como mostra a figura 43.



Dados Modificados da Bomba		
Diâmetro do Rotor	290	mm
Rotação	1.695,88	rpm

Figura 43 Saída com a nova rotação e mantendo o diâmetro original

O procedimento foi adotado também para a alteração do diâmetro do rotor, em que encontraram-se os mesmos resultados e com valor de diâmetro igual a 281 mm, como mostra a figura 44.



Dados Modificados da Bomba		
Diâmetro do Rotor	281	mm
Rotação	1750	rpm

Figura 44 Saída com o novo diâmetro e mantendo a rotação original

A partir disso, tornou-se necessário a validação dos dados, desta forma foi adotado o mesmo cálculo utilizando o programa Excel, em que foram digitados os valores da bomba, bem como seu rendimento e gerado o seguinte gráfico da bomba e do sistema (figura 45).

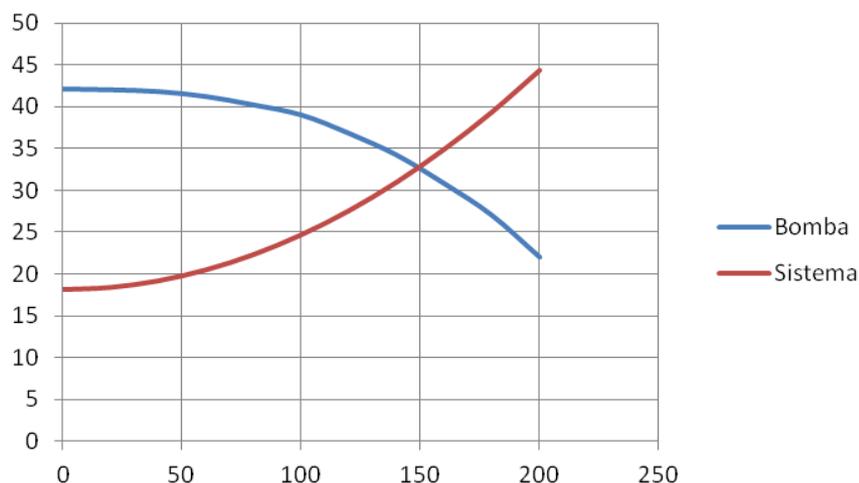


Figura 45 Gráfico gerado pelo Excel com os dados da bomba e do sistema

Com a leitura dos dados e adotando o mesmo procedimento do sistema, com as equações de semelhança mecânica de Rateaux, em que foi considerado de forma visual o valor do ponto de operação igual a $148\text{m}^3/\text{h}$ e altura manométrica de 33m , foram então encontrados os seguintes valores de rotação e diâmetro do rotor para o ponto de projeto em questão. Para rotação foi determinado o valor de $1696,14\text{ rpm}$ e para o diâmetro do rotor $281,07\text{mm}$, demonstrando então que o programa “GraficBomb” apresentou valores satisfatórios para os dados calculados.

4.8.5 Tarifação de energia

Para validação dos cálculos de tarifação de energia foi adotado um exercício proposto por Carvalho e Oliveira (2008, p. 264) em que foram fornecidos os seguintes dados: $Q = 240\text{m}^3/\text{h}$, $H_{\text{man}} = 80\text{m}$, rendimento da

bomba = 70%, rendimento do motor elétrico = 90%, tempo de bombeamento = 15h/dia e considerando o tempo de funcionamento de um mês.

Desta forma, no item a foi calculado o custo final de bombeamento considerando a tarifação convencional com valores de R\$ 0,213/kWh de tarifa de energia e R\$16,93/kW de valor de demanda.

Com estes valores o exercício chegou ao custo total de R\$9685,80, de forma que o programa obteve os seguintes valores (figura 46):

Total s/ ICMS	Total c/ICMS	Custo/m ³
9.692,73	9.692,73	0,09

Figura 46 Custo total com ICMS e sem ICMS da tarifa convencional

Como o exercício não utilizou em seus cálculos a alíquota de ICMS, o valor adotado no programa foi de 0%.

Pode-se perceber que houve uma pequena diferença nos cálculos, isso se deve ao uso de valores não arredondados no programa, fazendo com que o valor calculado seja relativamente maior.

Para o cálculo da tarifação horo-sazonal azul, no exercício 2 da página 266, com os mesmos dados do exercício anterior com tempo de funcionamento de 12 horas fora de ponta e de 3 horas na ponta e com tarifas de R\$16,929/kW para a demanda fora de ponta, R\$58,276/kW para demanda na ponta, R\$0,213/kWh para tarifa de energia fora de ponta e R\$0,345 kWh para a tarifa de energia na ponta, desta forma, obteve-se o seguinte resultado no software (figura 47):

Total s/ ICMS	Total c/ICMS	Custo/m ³
16.635,45	16.635,45	0,15

Figura 47 Custo total da tarifação horo-sazonal no “GraficBomb”

A resposta do exercício foi de R\$16.627, 54 sendo este valor próximo ao valor encontrado no software “GraficBomb”.

5 CONCLUSÕES

O software “GraficBomb” é uma ferramenta que pode auxiliar na geração de equações que envolvem o conjunto motobomba e o sistema, além de facilitar os cálculos da tarifação de energia e permitir a comparação entre os cálculos obtidos.

O software apresenta uma interface amigável em que a tela de exibição é única permitindo que as ações não sejam confundidas com diversas telas abertas.

Pode auxiliar o projetista na tomada de decisão por meio de cálculos pré-determinados, além do módulo do software que permite salvar os dados para posterior modificação ou análise.

REFERÊNCIAS

ALVES, J.A.; OLIVEIRA, L.F.C.; OLIVEIRA, A.M.. Verificação das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.523-525, set./dez.2002.

ANDRADE, L. **Aplicativo computacional para dimensionamento de sistemas de recalque**. 2001. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

BIER, V.A.; SOUZA, E.G.; VILAS BOAS, M.A. Programa computacional para seleção de conjuntos motobomba. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.3, p. 225-234, jul./set. 2004.

BROWN, G. **The Darcy-Weisbach equation**. Oklahoma: Oklahoma State University, 2000.

CALGARO, M.; ROBAINA, A.D; PEITER, M.X. Curvas de desempenho operacional de bombas centrífugas determinadas a partir das **características** físicas do rotor I – Valores Nominais. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.1, p.19-30, jan./mar. 2004.

CARÇÃO, J. F. de C. **Tarifas de energia elétrica no Brasil. 2011. 103 p.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARDOSO, G.G.G; FRIZZONE, J.A; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n.3, p.299-305, July/Sept. 2008.

CARVALHO, J.A. **Captação, elevação e condução de água**. Lavras: FAEPE, 2004. 231p. (Texto Acadêmico)

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L.F.C. **Instalações de bombeamento para irrigação: hidráulica e consumo de energia**. Lavras: UFLA, 2008. 354p.

CENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw Hill, 2008. 821p.

DAMIÃO, J.; NOGUEIRA, E. Dimensionamento do sistema de recalque para abastecimento de água da comunidade de Macundú, distrito de São João Marcos, município de Rio Claro, Rio de Janeiro. **Cadernos UniFOA**, Alfenas, n. 18, p. 11-19, abr. 2012.

DEZOTTI, M.C. **Perdas de cargas distribuídas e localizadas em tubulações**. São José do Rio Pardo: UNIP, 2013. 6p. (Notas de Aula – Modulo 1).

GOMES, H.P. Dimensionamento econômico de instalações de recalque. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.6, n.3, p. 108-114, jul./set. 2001.

LOPES, K.G.O.; MARTINEZ, C.B.; COELHO, M.M.L.P. Impacto da evolução da perda de carga no custo do bombeamento de água. SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DRENAGEM, 8., 2008, Lisboa. **SEREA...** Lisboa: Instituto Superior Tecnico Ibero-Americano, 2008.

MACINTYRE, A.J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 782p.

MOREIRA, R.F.P.M.; SOARES, J.L. **Bombas**. EQA 5313-Operações unitárias de transferência de quantidade de movimento. Disponível em: <<http://www.enq.ufsc.br/disci/eqa5313/bombas.htm>>. Acessado em: 29 mar. 2013.

PEREIRA, F.N. **Determinação experimental da curva do sistema e da potência consumida em unidade de bombeamento alimentando dois tanques em desnível com fluidos diferentes.** 2011. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2011.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica.** 3. ed. São Carlos: EESC-USP, 2004. 519p.

RODRIGUES, W. **Critérios para uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SAMPAIO, S.C. et al. Equação de Hazzen-Williams corrigida para água residuária proveniente de suionocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.1, p.5-10, jan./fev. 2007.

SILVESTRE, P. **Hidráulica geral.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1983. 316p.

YANAJI JUNIOR, T. et al. Método matemático para estimativa analítica das curvas de desempenho de bombas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.21, n.4, p.484-490, out./dez. 1997.