

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO JOSÉ LOPES BRUSTOLINI

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ESTAÇÃO
ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA DO RIBEIRÃO SÃO
BARTOLOMEU – SAAE DE VIÇOSA**

VIÇOSA
2012

EDUARDO JOSÉ LOPES BRUSTOLINI

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ESTAÇÃO
ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA DO RIBEIRÃO SÃO
BARTOLOMEU - SAAE DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Campos

VIÇOSA
2012

EDUARDO JOSÉ LOPES BRUSTOLINI

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ESTAÇÃO
ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA DO RIBEIRÃO SÃO
BARTOLOMEU – SAAE DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de outubro de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Ms. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis.”*

(Bertold Brecht)

Aos meus pais, Bárbara e Hélio, pelo apoio incondicional que recebo para realização dos meus sonhos e pela referência que representam em minha vida.

Agradecimentos

A minha família, por todo apoio para seguir nessa caminhada. A todos os colegas de curso, especialmente ao Jorge e a Priscilla, por toda amizade, paciência e disponibilidade para ajudar quando mais necessitava. Ao meu orientador José Carlos, pela colaboração. E finalmente ao SAAE de Viçosa, pela oportunidade de pesquisa e estágio, especialmente José Luiz Pereira Corrêa, Sanzio Borges, José Horta Cardoso, Walmir Felix, José Francisco e José Catarino, por todo apoio necessário ao desenvolvimento deste projeto.

Resumo

O uso racional de água e energia no setor produtivo é um requisito indispensável para o desenvolvimento econômico e social no mundo contemporâneo, pela necessidade de preservação do meio ambiente. Estes insumos estão cada vez mais escassos e conseqüentemente mais caros, provocando o aumento de custos no setor industrial. O setor de saneamento, que engloba a indústria de produção de água potável é, talvez, o mais estratégico no que diz respeito ao uso conjunto de água e energia e, portanto merecedor de uma atenção especial, no tocante à racionalização da utilização destes insumos. Para as empresas do setor de saneamento, em geral empresas públicas, um dos principais insumos é a eletricidade, que representa uma grande fatia de seu custo de produção, e este é devido principalmente ao uso de equipamentos motobombas das estações elevatórias. Este trabalho tem como objetivo principal estudar alternativas para a redução dos custos de energia a partir da implementação de ações de eficiência energética em sistemas de bombeamento e propor soluções eficientes e economicamente viáveis para a operação de sistemas elevatórios de água, em especial para a Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu, pertencente ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE). Para isto, realizou-se o diagnóstico do sistema energético e hidráulico atual, realizando medições elétricas e hidráulicas simultâneas, utilizando: analisador de qualidade de energia, macromedidor de vazão eletromagnético, macromedidor woltmann com saída pulsada e dataloggers de pressão e pulso. Além disso, foi diagnosticado os volumes úteis e vazões mínimas necessárias para o armazenamento de água e adução necessária para o desligamento da elevatória em horário de ponta e analisou-se faturas de energia dos últimos doze meses da instalação em estudo. Por fim, foi proposto soluções viáveis que tornam a estação elevatória mais eficiente, justificando suas vantagens analiticamente e por dados obtidos através das medições realizadas.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Bombas e Estações Elevatórias	14
1.1.1	Introdução.....	14
1.1.2	Classificação e Descrição	15
1.1.3	Classificação das Turbobombas	17
1.1.4	Altura Geométrica e Manométrica	18
1.1.5	Curva Característica do Sistema.....	19
1.1.6	Perdas e Potências	21
1.1.7	Curva Característica de uma Bomba	22
1.1.8	Associação de Bombas	24
1.2	Acionamentos de Motores Elétricos de Indução Trifásico e Correção do Fator de Potência	26
1.2.1	Introdução.....	26
1.2.2	Partida com Autotransformador	26
1.2.3	Partida com Soft-Starter	27
1.2.4	Correção do Fator de Potência.....	29
1.3	Diagnóstico de Sistemas	31
1.3.1	Introdução.....	31
1.3.2	Levantamento do Diagrama Simplificado Eletro-Hidráulico do Sistema.....	33
1.3.3	Levantamento das Contas de Energia das Unidades Consumidoras e Análise Tarifária.....	33
1.3.4	Levantamento do Diagrama Unifilar Elétrico das Unidades Consumidoras	34
1.3.5	Levantamento dos Equipamentos das Unidades Consumidoras, Incluindo Características Técnicas	35
1.3.6	Levantamento dos Equipamentos de Medições Elétricas e Hidráulicas	35
1.3.7	Medições de Campo	35
1.3.8	Cálculos dos Indicadores de Desempenho Operacional.....	36
1.3.9	Cálculos dos Indicadores de Desempenho Financeiro	37
1.4	Objetivo Geral	38
2	Materiais e Métodos	40
2.1	Introdução.....	40
2.2	Descrição dos Materiais.....	41
2.2.1	Conjuntos Motobombas.....	41
2.2.2	Acionamento dos Conjuntos Motobombas e Correção do Fator de Potência	42
2.2.3	Equipamentos para Medição de Grandezas Hidráulicas	42

2.2.4	Equipamentos para Medição de Grandezas Elétricas.....	44
2.2.5	Software de Dimensionamento de Conjuntos Motobombas	44
2.3	Descrição dos Métodos.....	45
3	Resultados e Discussões.....	48
3.1	Medições Elétricas e Hidráulicas	48
3.2	Indicadores de Desempenho Operacional da Estação Elevatória.....	51
3.3	Indicadores de Desempenho Financeiro da Estação Elevatória	51
3.4	Volumes Úteis e Vazões Mínimas Necessárias para Desligamento da Elevatória em Horário de Ponta.....	52
3.5	Propostas para Eficientização da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu	53
3.5.1	Proposta I: Bombeamento Constante e Nulo no Horário de Ponta	53
3.5.2	Proposta II: Substituição dos Conjuntos MB - 02 e MB - 03.....	55
3.5.3	Proposta III: Ampliação da Capacidade do Sistema de Bombeamento	57
4	Conclusões.....	59
	Referências Bibliográficas	61
	Apêndice A – Tabelas com Características de Tubos e Tarifas de Energia	62
A.1	Tabela 16	62
A.2	Tabela 17	62
A.3	Tabela 18	63
	Apêndice B – Dimensionamento de Conjuntos Motobombas.....	64
B.1	Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta I e III:	65
B.2	Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta II:	67

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de Noria Chinesa	14
Figura 2 - Tipos de Rotores	17
Figura 3 - Bomba acima do nível do reservatório inferior	18
Figura 4 - Bomba "afogada" (abaixo do nível do reservatório inferior).....	19
Figura 5 - Representação da curva característica de um sistema	20
Figura 6 - Curvas características esquemáticas de uma bomba.....	23
Figura 7 - Curvas características fornecidas pelo fabricante	24
Figura 8 - Ligação de partida de um motor de indução Trifásico com autotransformador	26
Figura 9 - Esquema de uma chave soft-starter implementado com seis tiristores.....	27
Figura 10 - Curva de aceleração de um motor utilizando soft-starter	28
Figura 11 - Curva de desaceleração de um motor utilizando soft-starter.....	29
Figura 12 - Correção do FP com os capacitores conectados em carga individual	30
Figura 13 - Correção do FP com os capacitores conectados em um grupo de cargas.....	31
Figura 14 – Captação Manancial do Ribeirão São Bartolomeu	40
Figura 15 – Sistema de Bombeamento de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu	41
Figura 16 – Medidor de Vazão Eletromagnético.....	42
Figura 17 – Medidor de Vazão Woltmann	43
Figura 18 – Datalogger de Pressão e Vazão	43
Figura 19 – Analisador de Qualidade de Energia.....	44
Figura 20 - Interface Software AgriBombas	45
Figura 21- Diagrama Unifilar da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu.....	45
Figura 22 - Diagrama Hidráulico Simplificado.....	46
Figura 23 – Potência Demandada e Vazão Bombeada.....	49
Figura 24 - Vazão Água Bruta e Curva de Consumo de Água Tratada	49
Figura 25 - Curva de Reservação	50
Figura 26 - Operação em Paralelo MB - 02 e MB - 03	50
Figura 27 – Curva Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm.....	66
Figura 28 – Curva da Potência Exigida pela Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm	67
Figura 29 - Curva Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm.....	69
Figura 30 - Curva da Potência Exigida pela Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm	69

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características Conjuntos Motobombas.....	41
Tabela 2 – Tipo de Acionamento dos Conjuntos Motobombas	42
Tabela 3 - Grandezas Elétricas e Hidráulicas Medidas para os Conjuntos Motobombas	48
Tabela 4 - Indicadores de Desempenho Operacional	51
Tabela 5 - Indicadores de Desempenho Financeiro Sistema Atual	51
Tabela 6 - Bombeamento Constante e Nulo no Horário de Ponta	52
Tabela 7 - Indicadores Operacionais Proposta I.....	54
Tabela 8 - Comparativo Situação Atual e Proposta I	54
Tabela 9 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta I	55
Tabela 10 - Indicadores Operacionais Proposta II.....	55
Tabela 11 - Comparativo Situação Atual e Proposta II.....	56
Tabela 12 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta II.....	56
Tabela 13 - Indicadores Operacionais Proposta III	57
Tabela 14 - Comparativo Situação Atual e Proposta III.....	57
Tabela 15 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta III.....	58
Tabela 16 - Perdas localizadas expressas em diâmetro de canalização retilínea.....	62
Tabela 17 - Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams.	62
Tabela 18 – Valor Total da Conta de Energia e Volume Bombeado para a Estação Elevatória em Estudo.....	63
Tabela 19 - Informações das Redes de Sucção e Recalque da Estação Elevatória do Ribeirão São Bartolomeu.....	64

1 Introdução

Os Sistemas de Abastecimento de Água compreendem etapas que vão desde a captação do líquido nos corpos hídricos, passando pelo seu tratamento, reservação e distribuição. Para que a água seja transportada a cada uma destas etapas ela precisa de energia, tanto elétrica, através da pressurização dos sistemas de bombeamento e recalque, quanto potencial, através das diferenças de nível entre os pontos de abastecimento [1].

Um dos maiores gastos no setor de saneamento se dá nos sistemas de bombeamento. Segundo [2], cerca de 2% da energia gasta no país é utilizada no setor de saneamento e, dentro deste, 90% nos conjuntos motobombas. É possível que a despesa anual dos prestadores de serviços de saneamento, somente pela ineficiência energética seja de R\$ 375 milhões. Quanto maiores são as perdas de água, maior é a energia em excesso gasta no abastecimento de água.

Os desperdícios de energia elétrica são decorrentes de fatores como formas contratuais indevidas; procedimentos operacionais inadequados; vazamentos nos reservatórios, redes de distribuição e ramais prediais; equipamentos elétricos antigos e ultrapassados, dentre outros [3]. O consumo de energia, na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos 25% por meio de ações de efficientização com melhor desempenho [4]. Como decorrência da conservação e uso racional de energia, há redução dos impactos ambientais, benefícios sociais e redução global de custos e investimentos para o país [2].

A eficiência energética num sistema de abastecimento de água se dá pelo menor consumo de energia para suprir as necessidades de cada setor [2]. As ações para melhoria da eficiência energética do sistema de abastecimento de água podem ser administrativas ou operacionais [3]. Exemplos seriam a redução de cotas de reservatórios, a construção de reservatórios intermediários, a instalação de válvulas redutoras de pressão, o bombeamento fora dos horários de ponta, a substituição de conjuntos motobombas, o reenquadramento tarifário, etc.

É possível avaliar o efeito de medidas de operação e manutenção adotadas, apenas comparando os consumos de energia antes e depois da sua implementação. O desafio principal em termos de avaliação prende-se com a fase do diagnóstico: Quão eficiente é o sistema atualmente? Qual é o subsistema menos eficiente? Qual é o potencial de melhoria do sistema? [5].

O uso de indicadores é de grande valia para a análise de desempenho energético em sistemas de abastecimento público de água. A comparação destes indicadores, antes e depois de mudanças no sistema, avalia o efeito das medidas adotadas, auxiliando no estabelecimento de prioridades de intervenção e no controle de medidas implantadas [5]. O seu uso deve, no entanto, ser contextualizado à realidade local, para que não se cometa erros de interpretação [6].

Desta forma, este trabalho se propõe a avaliar a eficiência energética da estação elevatória de água bruta do Ribeirão São Bartolomeu que atende a aproximadamente 50% da área urbana do município de Viçosa, MG [7]. O estudo servirá para determinar o excesso de energia fornecida ao sistema e como será possível reduzi-la, deixando-o mais eficiente energeticamente e reduzindo o consumo energético, perdas e gastos.

Os beneficiados com os resultados serão os usuários que terão a possibilidade de pagar por uma tarifa de água reduzida; o sistema que poderá ter menores gastos e perdas, além de maior eficiência; e o meio ambiente, pela redução do desperdício de energia.

1.1 Bombas e Estações Elevatórias

1.1.1 Introdução

A bomba constitui-se no dispositivo de transferência de energia de fluido mais antigo que se conhece. A mais remota é sem dúvida a Noria Chinesa, Figura 1, utilizada em irrigação na Ásia e África a partir de 1000 anos antes de Cristo. É constituída de uma roda munida de caçambas movida por força animal ou humana [8].

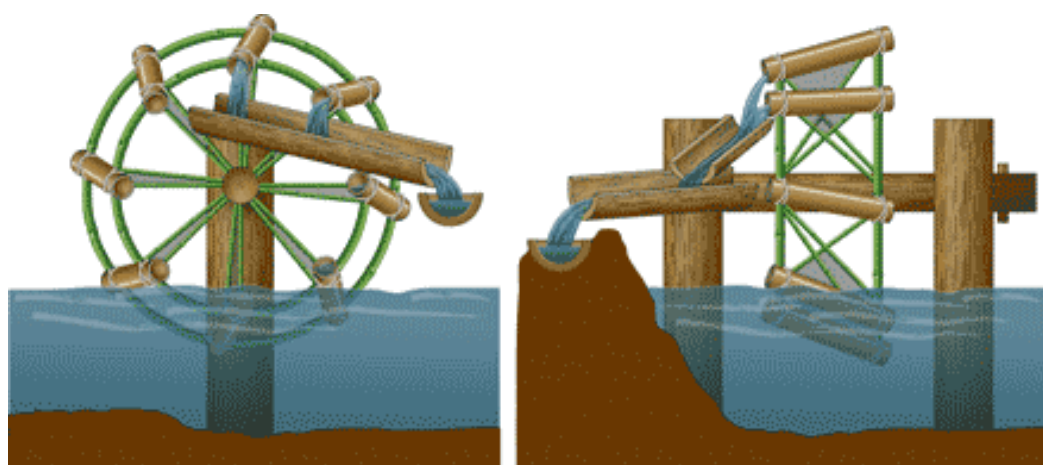


Figura 1 - Exemplo de Noria Chinesa

No contexto das máquinas de fluxo, as bombas são dispositivos que convertem trabalho mecânico em energia de fluido (pressão, energia cinética e/ou potencial). O trabalho pode ser proveniente de uma fonte qualquer, inclusive do esforço humano, sendo que atualmente, graças à alta eficiência, larga faixa de potência e praticidade, predomina o uso do motor elétrico. O termo bomba é restrito ao deslocamento de líquidos. Quando o fluido é um gás, estes equipamentos passam a ser chamados, de acordo com as pressões envolvidas, de ventiladores, sopradores ou compressores [9].

A energia desejada no fluido pode ser apenas cinética, pressão, potencial ou, principalmente, uma combinação delas. Na verdade a bomba fornece um campo de pressões e vazões correspondentes, a tubulação por sua vez transforma esta pressão na forma de energia final desejada.

Analisando a instalação como um todo, as bombas são elementos que fornecem uma determinada gama de pares de valores de vazão e de energia hidráulica, esta última chamada de altura manométrica.

Do ponto de vista do sentido da transformação de energia, as bombas enquadram-se nas máquinas geratrizes, enquanto as turbinas, que fazem a conversão inversa, da energia hidráulica ou de fluido em trabalho mecânico, pertencem ao grupo de máquinas motrizes [10].

1.1.2 Classificação e Descrição

As bombas classificam-se basicamente em duas categorias: as volumétricas e as turbobombas, também chamadas de bombas de fluxo.

As bombas volumétricas possuem uma ou mais câmaras sobre a qual algum elemento móvel atua aumentando a pressão e provocando o movimento. As mais comuns no bombeamento de água são as de embolo e diafragma. As bombas volumétricas podem ser classificadas em:

a) Alternativas:

- Pistão;
- Diafragma.

b) Rotativas rotor único:

- Palhetas;

- Pistão rotativo;
 - Elemento flexível – peristáltica;
 - Parafuso simples.
- c) Rotativas rotores múltiplos:
- Engrenagens;
 - Lóbulos;
 - Pistões oscilatórios;
 - Parafusos.

Para [10], as turbobombas caracterizam-se pela presença de um elemento girante dotado de pás chamado de rotor, movido por alguma fonte de potência através do seu eixo. O conjunto fica acondicionado dentro de uma carcaça onde se identifica claramente o eixo, por onde é transferida a potência de acionamento, a sucção, que é por onde o fluido entra no conjunto e a descarga que é por onde o fluido sai.

O rotor é o órgão onde se dá a transferência de energia para o fluido. Ao passar através de suas pás o líquido recebe quantidade de movimento e é acelerado, aumentando sua energia cinética. Os rotores podem ser fechados, abertos e semi-abertos. Nos fechados, Figura 2a, as pás são contidas axialmente por um disco circular de um lado e por uma coroa no lado oposto, de modo que entre cada duas pás formam-se dutos curvos divergentes e independentes. São limitados pelas pás, o disco e a coroa. Os dutos formados podem ser adequados ao bombeamento de líquidos limpos, preferencialmente. Já nos rotores abertos, Figura 2c, não existe nem disco nem coroa, enquanto nos semi-abertos, figura 2b, existe apenas o disco. Estes dois últimos tipos prestam-se ao bombeamento de pastas e lamas e outros líquidos com partículas em suspensão, como esgotos sanitários.



Figura 2 - Tipos de Rotores

Contendo o rotor existe a parte da carcaça chamada de voluta, que se caracteriza por ter a forma de uma espiral que da origem a uma seção de escoamento crescente em torno da periferia do rotor. Em sua parte superior, a voluta encontra o bocal de descarga, onde a seção continua crescendo, agora num espaço em forma de tronco de cone invertido. O contínuo crescimento da seção de escoamento na voluta e bocal produz uma conversão de energia cinética em pressão. Estes dispositivos, em que ocorre a conversão de energia cinética em pressão, são chamados de difusores [9].

Nas turbobombas não existem volumes fechados, o que torna possível seu funcionamento mesmo com a saída obstruída, ou seja, com vazão nula. Esta condição de funcionamento é uma característica importante da bomba, denominada ponto de *shut off*. Deve ser evitada, a não ser por curtos períodos de tempo, devido mais à inconveniente geração de calor que a limitações hidráulicas ou mecânicas.

1.1.3 Classificação das Turbobombas

As turbobombas podem ser classificadas em:

a) Rotativas:

- Centrífuga ou de fluxo radial;
- Fluxo axial;
- Fluxo misto.

b) Especiais:

- Bomba de jato ou ejetor;
- Fluido Atuante: ar comprimido e carneiro hidráulico;

- Magnéticas: para metais líquidos.

Nos sistemas de abastecimento de água, as turbobombas rotativas, particularmente as centrífugas, predominam de forma absoluta. Além de cobrirem grandes faixas de vazão e pressão, possuem ótimos rendimentos e baixos custos de instalação, operação e manutenção [11].

1.1.4 Altura Geométrica e Manométrica

A altura estática ou geométrica de elevação, H_g , representa a diferença entre os dois níveis que o fluido precisa vencer. Em termos energéticos, significa a diferença de energia potencial que separa a superfície livre do reservatório e a descarga do recalque. Pode ser dividida em duas parcelas: altura geométrica de aspiração, H_{ga} , e altura geométrica de recalque, H_{gr} . Conforme mostrado na Figura 3. Note que H_{ga} e H_{gr} são referenciadas ao centro do rotor da bomba.

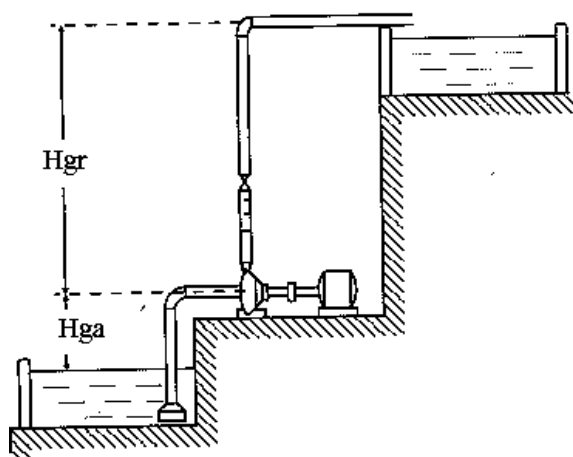


Figura 3 - Bomba acima do nível do reservatório inferior

A energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado denomina-se altura manométrica, H , ou altura manométrica total, HMT/AMT. Pode ser determinada aplicando-se a equação da energia entre um ponto na superfície livre do reservatório inferior e a descarga da tubulação de recalque. Assim, para a instalação da Figura 3, obtém-se:

$$H = H_{ga} + H_{gr} + H_{fa} + H_{fr} + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Onde:

H = Altura manométrica

Hga = Altura geométrica de aspiração

Hgr = Altura geométrica de recalque

Hfa = Perda de carga na aspiração

Hfr = Perda de carga no recalque

Como a parcela referente à energia cinética ($V^2/2g$) é pequena em relação à energia total, este termo é frequentemente desprezado. Assim, para a instalação da Figura 3, obtém-se:

$$H = Hga + Hgr + Hfa + Hfr \quad (2)$$

Caso a bomba se encontre afogada, conforme mostrado na Figura 4 a altura geométrica de aspiração se encontra acima da bomba e, portanto tem sinal negativo.

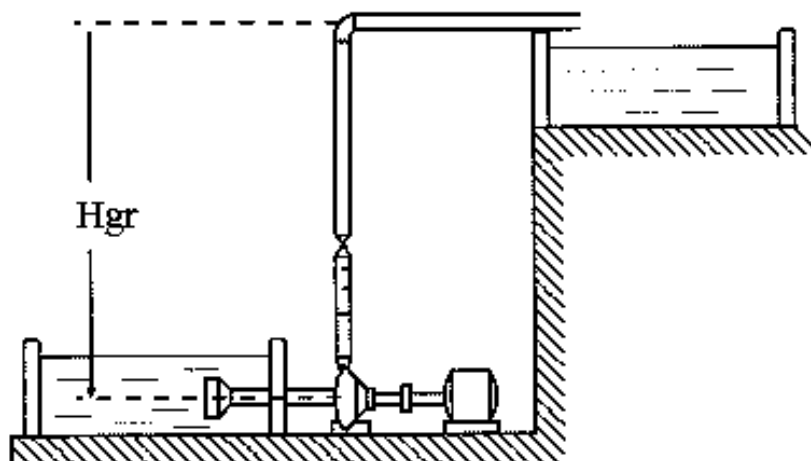


Figura 4 - Bomba "afogada" (abaixo do nível do reservatório inferior)

Ou seja, para a instalação da figura 4 temos:

$$H = -Hga + Hgr + Hfa + Hfr + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

1.1.5 Curva Característica do Sistema

Conforme [12], para instalações de água fria, é recomendável utilizar a fórmula de Hazen-Williams, devido a sua simplicidade. Trata-se de uma fórmula empírica desenvolvida em 1920, em que a perda de carga é função da velocidade ou vazão do escoamento, do diâmetro, do comprimento e de um coeficiente fixo caracterizado de acordo com o tipo e as condições do conduto. No Sistema Internacional de Unidades – SI, tem-se:

$$H_l = 10,68 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (4)$$

$$H_t = H_l L_e = L_e \frac{10,68}{C^{1,85} D^{4,87}} Q^{1,85} = K Q^{1,85} \quad (5)$$

Em que:

$$K = L_e \frac{10,68}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (6)$$

Sendo K uma característica da tubulação ou sistema.

Onde:

H_l = Perda de carga linear unitária [m/m].

H_t = Perda de carga do trecho [m].

L_e = Comprimento real da canalização, mais o comprimento correspondente às peças especiais tabeladas, Tabela 16, Apêndice A.

D = Diâmetro interno do conduto [m].

Q = Vazão [m³/s].

C = Coeficiente característico do conduto, Tabela 17, Apêndice A.

Utilizando a fórmula de Hazen-William, ou seja, $H_t = KQ^{1,85}$, podemos escrever a altura manométrica como:

$$H = H_g + K Q^{1,85} \quad (7)$$

O que indica que a altura manométrica é função aproximadamente quadrática da vazão. Esta curva é conhecida como curva do sistema, que representada graficamente têm o aspecto mostrado na Figura 5.

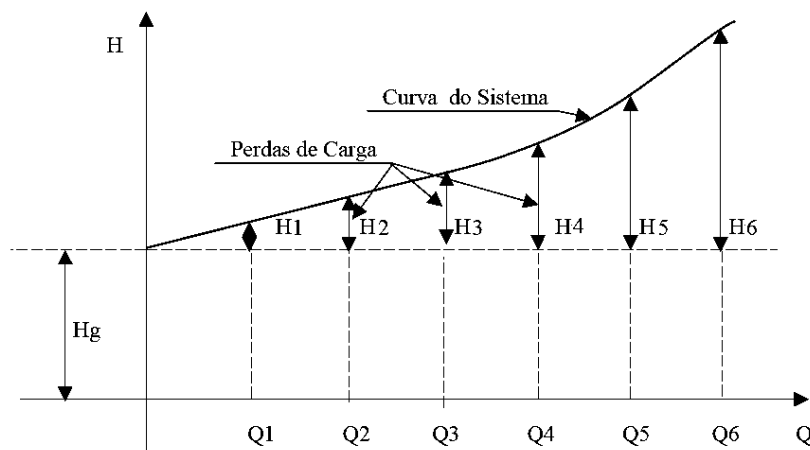


Figura 5 - Representação da curva característica de um sistema

1.1.6 Perdas e Potências

A energia total entregue ao fluido pela bomba é a altura manométrica, H , que representa a quantidade de energia recebida por cada unidade de peso de fluido bombeado (energia/peso). Para obter esta energia na forma de potência (energia/tempo) basta multiplicá-la pela vazão gravimétrica γQ (peso/tempo) [3]. Assim podemos expressar matematicamente:

$$P_{hid} = \frac{\gamma Q H}{75} \quad (8)$$

Onde:

P_{hid} = Potência útil [cv].

γ = Peso específico do líquido [kgf/m³].

Q = Vazão, [m³/s].

H = Altura manométrica [m].

A potência hidráulica, convenientemente chamada de potência útil, compreende a potência efetivamente utilizada pelo fluido para seu escoamento.

Para que a bomba forneça esta potência ela recebe do motor, através de seu eixo, a chamada potência motriz. Evidentemente a potência motriz deve ser maior que a hidráulica, uma vez que a conversão da potência motriz em energia de fluido envolve perdas decorrentes da transformação de energia. Estas perdas são expressas através do conceito de rendimento ou eficiência.

Define-se o rendimento de qualquer máquina como sendo o quociente da energia por ela produzida, pela energia a ela fornecida (“energia ganha / energia paga”). No caso do rendimento de uma bomba temos:

$$\eta_b = \frac{P_{hid}}{P_m} = \frac{\gamma Q H}{P_m} \quad (9)$$

A potência motriz pode ser associada à altura motriz Hm , que possui o mesmo significado, porém nas dimensões de energia/peso:

$$Hm = \frac{P_m}{\gamma Q} = \frac{H}{\eta_b} \quad (10)$$

O rendimento do motor elétrico pode ser determinado pela equação:

$$\eta_{me} = \frac{P_m}{P} \quad (11)$$

Onde P , é a potência requerida da rede elétrica.

O rendimento global de um conjunto motobomba é o produto entre os rendimentos do motor e da bomba:

$$\eta = \eta_b \eta_{me} \quad (12)$$

Onde:

η = Rendimento do conjunto motobomba.

η_b = Rendimento da bomba.

η_{me} = Rendimento do motor elétrico.

Hm = Altura motriz [energia/peso].

Logo, o rendimento do conjunto motobombas pode ser expresso por:

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{P} \quad (13)$$

Segundo [3], a potência requerida da rede elétrica por uma estação elevatória de água bruta, tratada ou de esgoto, em kW, é frequentemente, calculada pela fórmula prática:

$$P = \frac{9,81 Q H}{\eta} \quad (14)$$

Onde:

Q = Vazão [m^3/s].

H = Altura manométrica do bombeamento, em metros de coluna de água [mca].

η = Rendimento global do conjunto motobomba, em decimais, resultante do produto entre o rendimento do motor η_{me} e o da bomba η_b .

Segundo [13], os rendimentos de bombas de grande porte podem atingir mais de 85%, enquanto os de pequenas unidades podem chegar a menos de 40%. Valores de referência para cálculos preliminares situam-se em torno de 40% para bombas pequenas e 60% para bombas de médio porte.

1.1.7 Curva Característica de uma Bomba

Uma bomba se caracteriza principalmente pelos valores de sua altura manométrica e de vazão correspondentes. Esta relação expressa na forma de gráfico denomina-se curva característica principal. A esta curva se junta outras grandezas igualmente importantes como o

diâmetro do rotor, velocidade de rotação, a potência motriz, o rendimento. O conjunto de todas essas curvas ou pelo menos da maior parte delas são chamadas de curvas características. Estas são traçadas pelos fabricantes a partir de ensaios e se constituem em subsídio indispensável para que o projetista possa selecionar a unidade que melhor satisfaz a necessidade de um projeto de instalação elevatória.

Segundo [11], ao projetar uma bomba, o projetista se fixa primeiramente nos valores de vazão, Q , e altura manométrica, H . Este deverá representar o Ponto de Máxima Eficiência, PME, onde se espera que a bomba venha a ter o melhor desempenho.

À curva característica principal de uma bomba se junta a curva de rendimento, além da potência motriz. O conjunto destas curvas, todas em função da vazão, é apresentado esquematicamente na Figura 6 e constitui as chamadas curvas características da bomba, para uma determinada velocidade de rotação. A figura 7 mostra as curvas características típicas na forma apresentada pelos fabricantes. Observam-se várias curvas características principais, correspondendo a diâmetros diferentes. Os rendimentos são mostrados através de curvas de nível de mesmo rendimento.

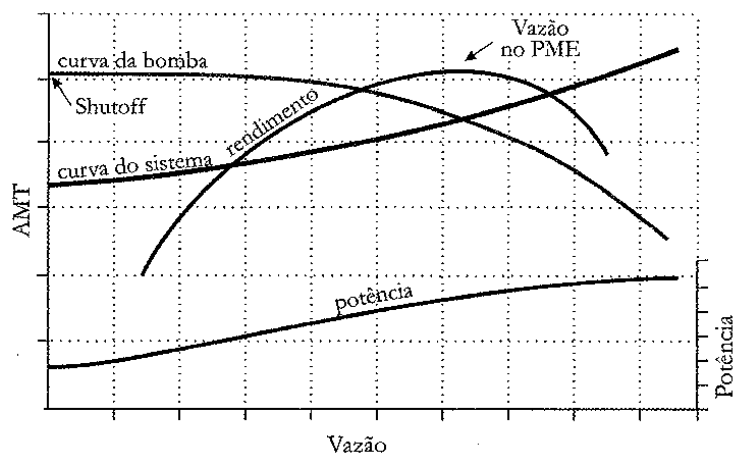


Figura 6 - Curvas características esquemáticas de uma bomba

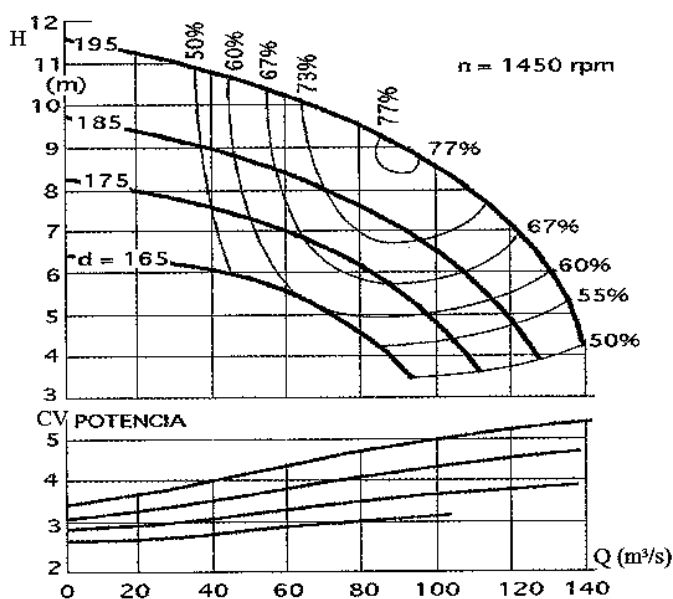


Figura 7 - Curvas características fornecidas pelo fabricante

1.1.8 Associação de Bombas

Dependendo da necessidade física ou da versatilidade desejada nas instalações elevatórias o projetista pode optar por conjuntos de bombas em série ou em paralelo. Quando o problema é de altura elevada geralmente a solução é o emprego de bombas em série e quando temos que trabalhar com maiores vazões a associação em paralelo é a mais provável. Teoricamente temos que bombas em série somam alturas e bombas em paralelo somam vazões. Na prática, nos sistemas de recalque, isto dependerá do comportamento da curva característica da bomba e da curva do sistema [13].

Para obtermos a curva característica de uma associação de bombas em série somamos as ordenadas de cada uma das curvas correspondentes. Exemplo: se quisermos a curva de duas bombas iguais dobram-se estas ordenadas correspondentes a mesma vazão. Quando a associação é em paralelo somam-se as abscissas referentes a mesma altura manométrica. Nesta situação para duas bombas iguais dobram-se as vazões correspondentes.

É comum em sistemas de abastecimento de água, esgotamento ou serviços industriais, a instalação de bombas em paralelo, principalmente com capacidades idênticas, porém não exclusivas. Esta solução torna-se mais viável quando a vazão de projeto for muito elevada ou no caso em que a variação de vazão for perfeitamente predeterminada em função das necessidades de serviço.

No primeiro caso o emprego de bombas em paralelo permitirá a vantagem operacional de que havendo falha no funcionamento em uma das bombas, não acontecerá a interrupção completa e, sim, apenas uma redução da vazão bombeada pelo sistema. No caso de apenas uma bomba aconteceria a interrupção total, pelo menos temporária, no fornecimento.

Na segunda situação a associação em paralelo possibilitará uma flexibilização operacional no sistema, pois como a vazão é variável poderemos retirar ou colocar bombas em funcionamento em função das necessidades e sem prejuízo da vazão requerida.

A associação de bombas em paralelo, no entanto requer precauções especiais por parte do projetista devido as seguintes características:

- Vazão: uma bomba isolada sempre fornecerá mais vazão do que esta mesma bomba associada em paralelo com outra igual porque a variação na perda de carga no recalque é diferente;
- Potência consumida: este item dependerá do tipo de fluxo nas bombas, onde temos para o caso de fluxo radial potência maior com uma bomba, fluxo axial potência maior com a associação em completo funcionamento e, no caso de fluxo misto, será necessário calcularmos para as diversas situações para podermos indicar o motor mais adequado.

Para outras situações, como nos casos de associação de bombas diferentes, sistemas com curvas variáveis, as análises tornam-se mais complexas.

Segundo [13], quando a altura manométrica for muito elevada, devemos analisar a possibilidade do emprego de bombas em série, pois esta solução poderá ser mais viável, tanto em termos técnicos como econômicos. Como principal precaução neste tipo de associação, devemos verificar se cada bomba a jusante tem capacidade de suporte das pressões de montante na entrada e de jusante no interior da sua própria carcaça. Para melhor operacionalidade do sistema é aconselhável a associação de bombas idênticas, pois este procedimento flexibiliza a manutenção e reposição de peças.

1.2 Acionamentos de Motores Elétricos de Indução Trifásico e Correção do Fator de Potência

1.2.1 Introdução

A corrente absorvida da rede por um motor de indução trifásico durante a partida é bastante elevada, podendo atingir valores da ordem de sete vezes a corrente de funcionamento em regime permanente de operação. Com o intuito de atenuar a intensidade da corrente de partida, e permitir adequado acionamento da máquina, métodos de acionamentos são utilizados. São basicamente quatro métodos de partida: direta, estrela-triângulo, compensadora com autotransformador e com chave estática (Soft-Starter). Serão abordadas a seguir as partidas, compensadora com autotransformador e com soft-starter, uma vez que estes são os acionamentos utilizados na Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu.

1.2.2 Partida com Autotransformador

Segundo [13], quando na utilização de autotransformador para partida de motores elétricos, a corrente absorvida da linha é reduzida de acordo com o quadrado da relação de espiras do autotransformador, e a corrente no motor é reduzida segundo a relação de espiras.

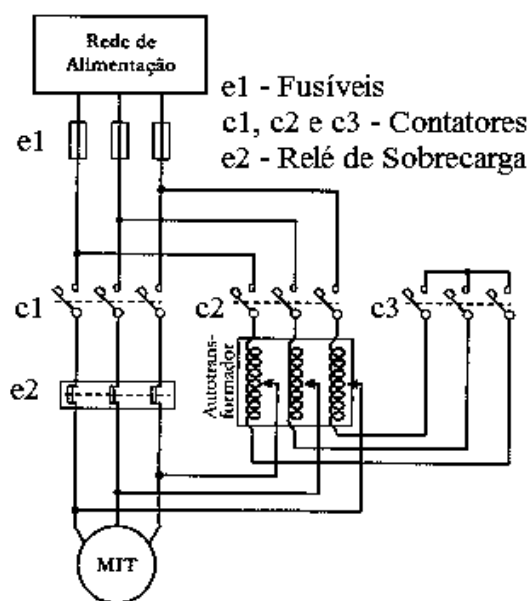


Figura 8 - Ligação de partida de um motor de indução Trifásico com autotransformador

Embora esse método tenha custo inicial mais alto que o método de partida estrela-triângulo, apresenta a vantagem de permitir ajuste de tensão e de corrente absorvida por

simples mudança de tapes. Normalmente os autotransformadores de partida têm tapes para 80%, 65% e 50%. A Figura 8 mostra o diagrama esquemático do circuito de comando principal com autotransformador. Uma vez escolhido o tap para partida, fecham-se os contadores c3 e c2 até que o processo de partida em tensão esteja completado. Em seguida fecha-se o contator c1, enquanto o motor passa a ser alimentado a plena tensão, abrindo-se então os contadores c2 e c3 e retirando o autotransformador do circuito.

1.2.3 Partida com Soft-Starter

As chaves soft-starters são utilizadas, basicamente, para partidas de motores de indução de correntes alternadas tipo gaiola, em substituição aos métodos estrela-triângulo, autotransformador e partida direta. Possuem a vantagem de não provocar trancos no sistema, limitar a corrente de partida, evitar picos de corrente e ainda incorporar partidas e paradas suaves e proteções.

Segundo [13], estas chaves contribuem para a redução dos esforços sobre acoplamentos e dispositivos de transmissão durante partidas e para o aumento da vida útil do motor e equipamentos mecânicos, devido a eliminação de choques mecânicos. Também contribui para a economia de energia, sendo muito utilizada em sistemas de refrigeração e em bombeamento.

A chave soft-starter é um equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem, ao contrário dos métodos convencionais utilizados para essa função, sendo que seu princípio de funcionamento baseia-se em componentes estáticos. O esquema genérico de uma soft-starter é mostrado na Figura 9.

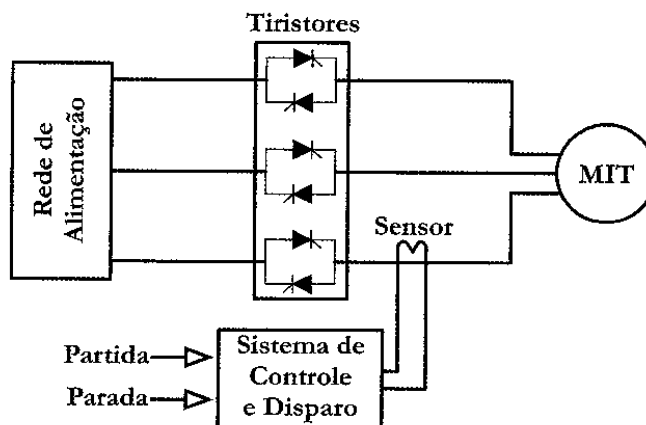


Figura 9 - Esquema de uma chave soft-starter implementado com seis tiristores

Por meio do ângulo de condução dos tiristores, a tensão na partida é reduzida, diminuindo os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica. Um dos requisitos da chave soft-starter é controlar a potência do motor, sem alterar a frequência da tensão de alimentação do motor.

Para que a partida do motor ocorra de modo suave, a tensão inicial V_p deve ser ajustada de modo que ela assuma o menor valor possível suficiente para iniciar o movimento da carga. A partir desse instante, a tensão subirá linearmente segundo um tempo parametrizado t_r até atingir o valor nominal. Isso pode ser observado na Figura 10.

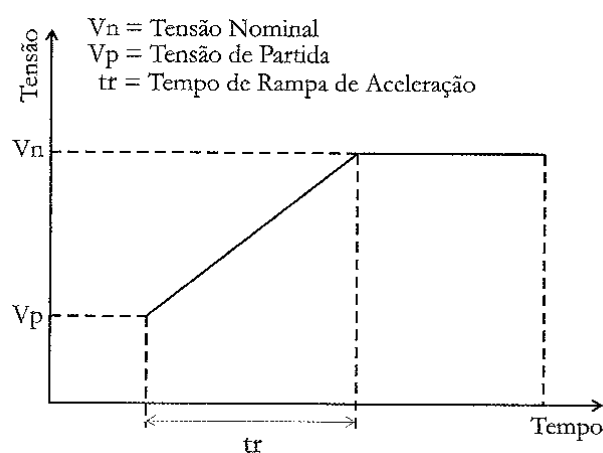


Figura 10 - Curva de aceleração de um motor utilizando soft-starter

Na frenagem, a tensão deve ser reduzida, instantaneamente, a um valor ajustável V_t , que deve ser parametrizado no nível em que o motor inicia a redução da velocidade de rotação. A partir desse ponto, a tensão diminui linearmente até a tensão final V_z , quando o motor parar de girar. Nesse instante, a tensão de alimentação da chave soft-starter é desligada. Isso pode ser observado na Figura 11.

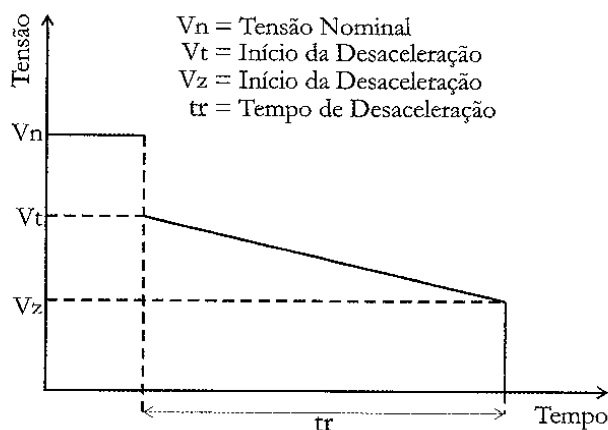


Figura 11 - Curva de desaceleração de um motor utilizando soft-starter

Além da tensão, a chave soft-starter também tem circuitos de controle de corrente. Ela é conservada em um valor ajustável por um determinado intervalo de tempo. Esse recurso permite que as cargas de alta inércia sejam aceleradas com a menor corrente possível, além de limitar a corrente máxima para partidas de motores de indução trifásicos.

A maioria das soft-starters modernas tem um circuito de economia de energia. Essa facilidade reduz a tensão aplicada para motores operando sem carga, diminuindo as perdas no entreferro, que correspondem à maior parcela de perdas nos motores com baixas cargas. Uma economia significativa pode ser experimentada para motores que operam com cargas de até 50% da potência do motor. Entretanto, essa função gera correntes harmônicas indesejáveis na rede, devido à diminuição do ângulo de condução dos tiristores com o objetivo de diminuir a tensão de alimentação do motor [13].

1.2.4 Correção do Fator de Potência

O baixo fator de potência é um agente gerador de perdas devido o aumento das correntes reativas que circulam nos circuitos de alimentação. Essas correntes não realizam trabalho, apenas ficam circulando na linha, entre a fonte e a carga, aumentando a corrente total circulante. Isto geralmente ocasiona o uso de condutores de maiores seções, além do superdimensionamento dos dispositivos de comando e proteção.

A alternativa, geralmente empregada, é a utilização de banco de capacitores, para gerar correntes reativas contrárias àquelas geradas pelos equipamentos. Com isso, as correntes reativas, geradas pelos motores elétricos de indução, são reduzidas, elevando o fator de potência. Segundo [14], para não pagar multa, as empresas devem manter o fator de potência maior ou igual a 0,92.

O fator de potência (FP) é definido como a relação entre a potência ativa P e a potência aparente S consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente, apresentem, Equação 15. Ele depende do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão, ϕ . Quanto maior for essa defasagem menor será o fator de potência e vice-versa. Os sinais alternados devem ser periódicos e de mesma frequência.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (15)$$

$$FP = \cos\phi \quad (16)$$

O banco de capacitores, para correção de fator de potência pode ser conectado em cargas individuais, como é mostrado na Figura 12, ou em grupos, como mostra a Figura 13.

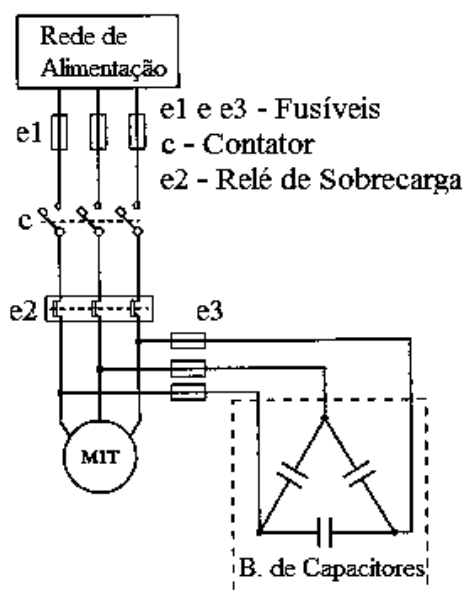


Figura 12 - Correção do FP com os capacitores conectados em carga individual

Quando os bancos de capacitores são utilizados para correções individuais, pode-se assegurar o valor do fator de potência desejado, porque os capacitores foram projetados para aquela carga, a não ser que o motor elétrico opere com cargas mecânicas, cuja potência solicitada sofra grandes variações. No caso onde há grandes variações nas cargas, a correção individual torna-se onerosa. Neste caso, para se reduzir os custos, pode-se utilizar bancos de capacitores para corrigir o fator de potência de um grupo de cargas (Figura 13), porém nem todas as cargas podem estar em funcionamento em determinado período, resultando em fatores de potência baixos com características capacitivas, ou seja, a potência reativa absorvida pelos capacitores é maior do que a potência reativa absorvida pelas cargas.

Segundo [15], uma alternativa para minimizar este problema é utilizar sistemas de controle em malha fechada, onde a potência absorvida pelos capacitores do grupo de cargas pode ser controlada, mantendo o fator de potência no valor desejado, independente do número de cargas do grupo que estão em operação.

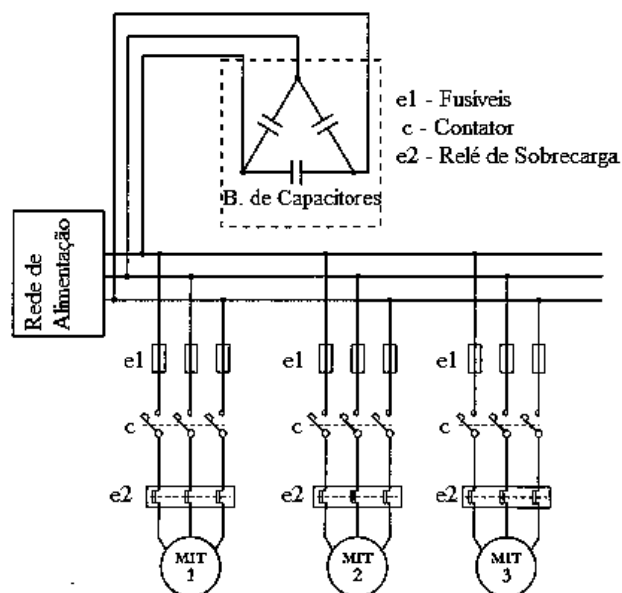


Figura 13 - Correção do FP com os capacitores conectados em um grupo de cargas

1.3 Diagnóstico de Sistemas

1.3.1 Introdução

O diagnóstico de um sistema consiste na determinação das possibilidades de ganhos em eficiência hidroenergética, sendo seu produto final uma lista de intervenções e as respectivas estimativas de redução de consumo de energia elétrica e redução da demanda de potência no horário de ponta do sistema elétrico. Obviamente, a redução das perdas de água também é levada em conta. Na falta de uma metodologia universalmente reconhecida para valoração dos ganhos de água, a economia em volume bombeado é transformada em redução de consumo de energia, podendo também acarretar redução da demanda no horário da ponta [16].

Os ganhos decorrentes da adequação tarifária das instalações e da compensação do baixo fator de potência não são considerados estritamente como ganhos de eficiência energética, sendo antes de tudo um requisito de boa gestão. Usualmente, um diagnóstico hidroenergético baseia-se, inicialmente na pesquisa das contas de energia ou nos relatórios do

sistema de gestão de contas, pois esta pesquisa pode fornecer indicações sobre as instalações mais promissoras para sofrer intervenções voltadas para o aumento da eficiência hidroenergética do sistema.

Sendo a energia elétrica dos motores que acionam as bombas o insumo principal do processo, a eficiência energética pode ser mensurada através do indicador consumo específico de energia (CE), cujo valor representa a energia elétrica necessária para bombear 1 m³ de água na instalação em análise [13].

$$CE = \frac{EE_{cons}}{V_{bomb}} \quad (17)$$

Onde:

CE = Consumo específico de energia, em [kWh/m³].

EE_{cons} = Energia elétrica consumida, em [kWh].

V_{bomb} = Volume bombeado, em [m³].

Caso, na expressão acima, a energia elétrica for consumida em todo o sistema, e o volume de água for o volume total entregue aos consumidores, o consumo específico será o global do sistema. Se a energia for gasta em uma unidade consumidora e o volume de água for o bombeado pelos conjuntos daquela unidade, o consumo específico será o da referida unidade. Na primeira situação mede-se a eficiência de todo o processo de operação do sistema, enquanto que no segundo monitora-se o desempenho da unidade em questão. De qualquer modo, o desempenho global do sistema é dependente do desempenho de cada uma das unidades.

Segundo [13], além das medições das grandezas elétricas e hidráulicas para diagnóstico de um sistema específico, outras etapas do diagnóstico podem ser também consideradas, tais como:

- Levantamento do diagrama simplificado eletro-hidráulico do sistema;
- Levantamento das contas de energia das unidades consumidoras e análise tarifária;
- Levantamento do diagrama unifilar das unidades consumidoras;
- Levantamento do cadastro dos equipamentos das unidades consumidoras, incluindo as características técnicas das adutoras e acessórios e o perfil topográfico;
- Levantamento dos equipamentos de medição elétrica e hidráulica;

- Medições no campo para confirmação de valores registrados ou determinação de dados faltantes, particularmente os relativos ao desempenho dos conjuntos motobomba;
- Cálculos dos indicadores de desempenho operacional;
- Cálculos dos indicadores de desempenho financeiro.

A seguir serão abordadas as etapas acima relacionadas. A obtenção e manutenção das informações necessárias devem ser levadas em conta desde a fase de planejamento até a operação de cada expansão do sistema.

1.3.2 Levantamento do Diagrama Simplificado Eletro-Hidráulico do Sistema

O diagrama eletro-hidráulico simplificado do sistema tem como objetivo a rápida visualização do conjunto de unidades consumidoras. Nele devem ser indicados:

- Unidades consumidoras, com indicação da quantidade e características nominais elétricas e hidráulicas dos conjuntos motobombas;
- Adutoras, com comprimento, material e diâmetro nominal;
- Reservatórios, com capacidade, tipo e características geométricas;
- Redes de distribuição de forma simplificada;
- Localização dos equipamentos de medição de grandezas hidráulicas;
- Cotas dos pontos notáveis (pontos altos e baixos na adutora; pontos de medição de pressão).

1.3.3 Levantamento das Contas de Energia das Unidades Consumidoras e Análise Tarifária

O levantamento das contas de energia destina-se a obter dados sobre a condição do suprimento de energia elétrica nas unidades consumidoras. Se a operadora de saneamento adota um sistema de gestão de contas de energia, os dados já deverão estar processados e disponíveis. Constituem indicativo da necessidade de medidas corretivas: baixo fator de carga, multas por baixo fator de potência e multas por ultrapassagem da demanda contratada.

Um sistema simples de gestão pode consistir em uma planilha com indicação de todas as unidades consumidoras, seu número de registro na concessionária, tipo de suprimento e modalidade tarifária, características do medidor de energia, dados mensais retirados da conta de energia e outras informações que sejam fornecidas pela concessionária. Outras planilhas no mesmo arquivo poderão conter a informação das tarifas vigentes e efetuar simulações sobre a modalidade tarifária mais adequada a cada instalação.

1.3.4 Levantamento do Diagrama Unifilar Elétrico das Unidades Consumidoras

Segundo [17], a maior parte das empresas operadoras de sistemas de saneamento não possui registros das instalações elétricas, tanto no que se refere aos circuitos de força como aos de controle. Tais dados são fundamentais para a verificação das condições operacionais e proposição de reformas, ampliações ou simplesmente rearranjo de componentes.

O diagrama unifilar elétrico deve indicar o caminho da corrente desde a entrada da concessionária distribuidora, até os equipamentos e componentes consumidores de energia, bem como os circuitos de medição, proteção e controle, desde os transformadores de corrente e potencial até os respectivos aparelhos e instrumentos, podendo fornecer informações sobre:

- Valor da tensão de suprimento;
- Transformadores de força: tensões e capacidades nominais;
- Transformadores de corrente e potencial para medição: localização e relações nominais de transformação;
- Disjuntores: tensão e correntes nominais, capacidade nominal de interrupção;
- Chaves seccionadoras: tensão e corrente nominais;
- Fios e cabos: bitola, corrente nominal, material, quantidade por circuito;
- Fusíveis: tensão, corrente nominais e tipo;
- Dispositivos de partida;
- Motores: potência e tensão nominais.

1.3.5 Levantamento dos Equipamentos das Unidades Consumidoras, Incluindo Características Técnicas

Segundo [13], deve ser levantada a documentação existente, contendo os dados dos equipamentos instalados nas estações de bombeamento, principalmente no que se refere aos conjuntos motobombas, para obtenção de:

- Dados de placa dos motores;
- Dados de placa das bombas;
- Tipo de acionamento;
- Planta baixa da adutora e estação de bombeamento, permitindo a determinação de comprimento de peças e conexões hidráulicas, de forma a estimar a perda de carga nas conexões e barriletes.

1.3.6 Levantamento dos Equipamentos de Medições Elétricas e Hidráulicas

As medições de grandezas elétricas e hidráulicas permitem determinar não somente o rendimento e consumo isolado dos conjuntos, mas fornecer, também, dados para cálculos de indicadores que caracterizam a eficiência do sistema. Há de se assegurar, portanto, que as grandezas medidas sejam de fato as que deverão constar nos cálculos citados. Portanto, é de suma importância levantar as características dos equipamentos instalados de medição de grandezas hidráulicas e elétricas e suas localizações, utilizando a mesma nomenclatura para estabelecer a formulação dos indicadores a serem usados no monitoramento dos resultados das intervenções.

1.3.7 Medições de Campo

As medições de campo são necessárias para a execução de um diagnóstico da situação da operadora quanto a eficiência energética de suas instalações. Incluem as medições para a determinação de indicadores de desempenho, que devem ser encarados como atividade permanente, além das medições que permitem caracterizar a viabilidade econômico-financeira de intervenções em equipamentos e processos.

O propósito do projeto de eficiência energética, do ponto de vista do sistema elétrico, é reduzir custos, tanto de operação e manutenção como de novos investimentos. Este objetivo é realizado quando se obtém economia de energia: redução da demanda e consumo de energia.

Para termos dados de medição consistentes é necessário que, antes de tudo, as medições das grandezas elétricas e hidráulicas sejam realizadas simultaneamente, caracterizando assim um estado do sistema de forma completa.

As grandezas elétricas a determinar são obrigatoriamente: tensão, corrente, potência (ativa e reativa) e fator de potência. Para instalações com conversores de frequência é desejável a obtenção de dados relativos a frequência e à presença de harmônicas. Estas grandezas são determinadas por analisadores de grandezas elétricas, instrumentos que podem registrar os valores a intervalos de tempo pré-definidos.

As medições das grandezas hidráulicas deverão estar sincronizadas com as elétricas. As grandezas hidráulicas a registrar são, principalmente, vazões e pressões. O registro das pressões é geralmente mais simples, desde leitura de manômetros analógicos em períodos determinados, nos casos de operação constante, até mesmo registros em *dataloggers* (dispositivos eletrônicos de armazenamento dos dados das medições) colocados em pontos que permitem caracterizar o estado operativo.

Para o registro das vazões de água bruta proveniente da captação, é frequente a utilização de leituras horárias de vazão em calha Parshall na entrada da Estação de Tratamento de Água (ETA) e da variação de níveis de reservatórios para determinação dos volumes aduzidos ou distribuídos.

1.3.8 Cálculos dos Indicadores de Desempenho Operacional

As medições de campo fornecem os subsídios para o cálculo de indicadores de desempenho operacional. Segundo [18], um dos indicadores mais comuns no setor de saneamento para indicar a eficiência em sistemas de bombeamento de água bruta e tratada tem sido o *CE* - consumo específico de energia elétrica, representado pela Equação 17. Este indicador reflete a eficiência do conjunto motobomba unida à eficiência do sistema hidráulico a jusante da bomba. Este indicador é útil para acompanhar o desempenho de uma mesma instalação de bombeamento ao longo do tempo, mas não pode ser utilizado para comparar o desempenho de estações de bombeamento distintas, sendo esta a sua principal limitação. Isto se deve ao fato de que diferentes sistemas recalcam água a diferentes alturas manométricas,

em diferentes configurações hidráulicas, consumindo, naturalmente, diferentes quantidades de energia, ainda que os rendimentos dos equipamentos sejam iguais.

No intuito de contornar a limitação do “consumo específico de energia elétrica” a IWA - *International Water Association* [6], propôs o artifício de reduzir as alturas manométricas de diferentes instalações a uma altura única, de modo a permitir a comparação do desempenho destas. Assim criaram o *CEN* - Consumo Específico de Energia Normalizado, Equação 18, que é definido como a quantidade média de energia gasta para elevar 1 m³ de água a 100 metros de altura manométrica por meio de instalações de bombeamento. Este indicador pode ser entendido como uma medida indireta do rendimento médio dos conjuntos motobomba.

$$CEN = \frac{EE_{cons}}{V_{bomb}} \frac{1}{\frac{H}{100}} \quad (18)$$

Onde:

CEN = Consumo específico de energia normalizado, em [kWh/m³].

EE_{cons} = Energia elétrica consumida, em [kWh].

V_{bomb} = Volume bombeado, em [m³].

H = Altura manométrica, em [mca].

Segundo [18], para uma determinada instalação de bombeamento, o *CEN* varia linearmente e de forma inversamente proporcional com o rendimento do conjunto motobomba, ou seja, na medida em que o rendimento aumenta, o *CEN* diminui. Conhecida três variáveis da equação abaixo, a quarta é determinada, conforme Equação 19.

$$\frac{\eta_{inicial}}{\eta_{final}} = \frac{CEN_{final}}{CEN_{inicial}} \quad (19)$$

1.3.9 Cálculos dos Indicadores de Desempenho Financeiro

Os indicadores de desempenho financeiro reúnem informações financeiras oriundas das contas de energia e do monitoramento do volume bombeado pelas instalações [18].

O custo médio da energia elétrica em R\$/MWh é calculado pelo valor total da conta dividido pelo consumo total de energia, correspondente ao período de medição. O valor total de uma conta é resultado da soma das parcelas de consumo, demanda, multas por baixo fator de potência e por demanda de ultrapassagem, impostos e outros encargos. Para cada MWh

consumido na realização efetiva de um determinado trabalho, incidem todos os demais custos, resultando em maior ou menor custo operacional da energia ativa utilizada. O custo médio por MWh consumido é um indicador de eficiência do uso de energia sobre o qual refletem todos os custos de procedimentos operacionais, equipamentos e forma de contratação do fornecimento de energia.

O custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado, R\$/1000 m³, trata-se de um parâmetro que pode ser útil em estudos e estimativas de cenários. O custo médio, por 1000 m³ bombeados, reflete o custo da energia elétrica do m³ bombeado. O custo, como já foi dito, reflete a carga total de impostos, multas, custo da parcela de demanda etc., e as tarifas praticadas conforme a modalidade tarifária em que a instalação está enquadrada. Em razão disto, não deve ser usado como um indicador de desempenho operacional. Sua melhoria não indica que, necessariamente, medidas de eficiência energética nos equipamentos ou processos tenham sido executadas, podendo indicar tão somente que o enquadramento tarifário correto foi efetuado, embora a execução de medidas de eficiência energética deva necessariamente refletir na melhoria deste indicador.

1.4 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo identificar alternativas para a redução dos custos de energia a partir da implementação de ações de eficiência energética em sistemas de bombeamento.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Realizar um diagnóstico do sistema hidroenergético atual, realizando medições elétricas e hidráulicas;
- Diagnosticar os volumes úteis e vazões mínimas necessárias para o armazenamento de água e adução necessária com o desligamento da elevatória em horário de ponta;
- Verificar a possibilidade de desligamento dos conjuntos motobomba no horário de ponta;
- Realizar reenquadramento tarifário;

- Propor soluções eficientes e economicamente viáveis para a operação de sistemas elevatórios de água, justificando suas vantagens analiticamente e por dados obtidos através das medições a serem realizadas.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Introdução*

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa – SAAE é uma autarquia fundada em 1970. Cumpre com sua missão de prestar serviços de saneamento básico que contribuam para a melhoria da qualidade de vida da população viçosense e para o desenvolvimento socioeconômico, visando à satisfação da sociedade, dos clientes e dos colaboradores. Atualmente, o SAAE atende a 98% da população com água tratada e a 88% com rede de esgoto e, desde janeiro de 2010, é responsável pela limpeza urbana do município de Viçosa [7].

O estudo de eficiência energética foi realizado em uma das instalações do SAAE, a Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa. A captação é responsável pela drenagem da água do manancial Ribeirão São Bartolomeu, e o bombeamento para a Estação de Tratamento de Água I (ETA I), que fica localizada na Rua do Pintinho, bairro Bela Vista.



Figura 14 – Captação Manancial do Ribeirão São Bartolomeu



Figura 15 – Sistema de Bombeamento de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu

2.2 *Descrição dos Materiais*

2.2.1 Conjuntos Motobombas

A Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu, Figura 15, possui três conjuntos motobombas, com informações de placa, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Características Conjuntos Motobombas

Identificação	MB - 01	MB - 02	MB - 03
Marca Motor	WEG	General Eletric	Bufalo
Tipo do Motor	Alto Rendimento	Convencional	Convencional
Tipo de Rotor	Gaiola de Esquilo	Gaiola de Esquilo	Gaiola de Esquilo
Potência	175 CV	75 CV	75 CV
Tensão Y/ Δ	220/380/440 V	220/380 V	220/380 V
Corrente	418/242/209 A	189/109 A	192/111 A
Rotação	1785 RPM	1770 RPM	1770 RPM
Fator de Serviço	1,15	1,15	1,15
Fator de potência	0,87	-	-
Rendimento	95,3 %	-	-
Marca Bomba	KSB	Albrizzi	Albrizzi
Tipo de Bomba	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga

Vazão	450 m ³ /h	190.8 m ³ /h	190.8 m ³ /h
Altura Manométrica	76 mca	72 mca	72 mca
Ano Fabricação	2008	1980	1980

2.2.2 Acionamento dos Conjuntos Motobombas e Correção do Fator de Potência

Os conjuntos motobombas são acionados por Soft-Starter e Partida Compensadora com Autotransformador. Além disso, cada quadro de comandos possui correção do fator de potência individualizada, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Tipo de Acionamento dos Conjuntos Motobombas

Identificação	MB - 01	MB - 02	MB - 03
Tipo de Acionamento	Soft-Starter	Partida Compensadora com Autotransformador	Partida Compensadora com Autotransformador
Tensão de Operação	220 V	220 V	220 V
Potência do Banco de Capacitores	40 Kvar	15 Kvar	15 Kvar

2.2.3 Equipamentos para Medição de Grandezas Hidráulicas

As medições hidráulicas foram realizadas com os seguintes equipamentos:

- Macromedidor de vazão eletromagnético, Figura 16. Este equipamento permite registrar simultaneamente as vazões instantâneas e o volume totalizado.



Figura 16 – Medidor de Vazão Eletromagnético

- Macromedidor Woltmann com saída pulsada, Figura 17. Este equipamento permite registrar o volume totalizado. E com o uso de *datalogger* de vazão, podemos registrar a vazão em intervalos de tempo pré-definido.



Figura 17 – Medidor de Vazão Woltmann

- *Datalogger* de pressão e vazão, Figura 18. Este equipamento permite medir e registrar os valores de pressão, e permite registrar os valores de vazão, quando o canal de vazão deste for conectado a saída pulsada do medidor de vazão.



Figura 18 – Datalogger de Pressão e Vazão

2.2.4 Equipamentos para Medição de Grandezas Elétricas

As medições elétricas foram realizadas com o analisador de qualidade de energia, Figura 19, este equipamento permite registrar simultaneamente vários parâmetros relacionados à energia.

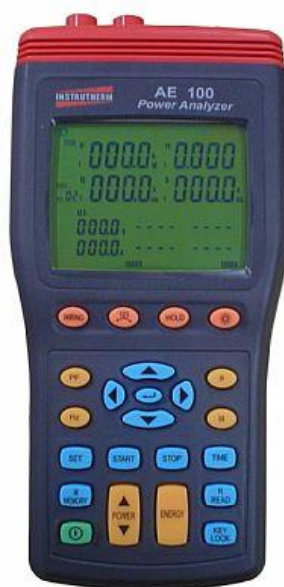


Figura 19 – Analisador de Qualidade de Energia

2.2.5 Software de Dimensionamento de Conjuntos Motobombas

O software AgriBombas é um gerenciador eletrônico para escolha da bomba mais eficiente e contém dados de cinco fabricantes de bombas (EH, Mark Peerless, KSB, Imbil e Schneider), com três rotações diferentes, podendo selecionar até dez bombas distintas que melhor otimizem a escolha e as curvas características dos motores elétricos [19].

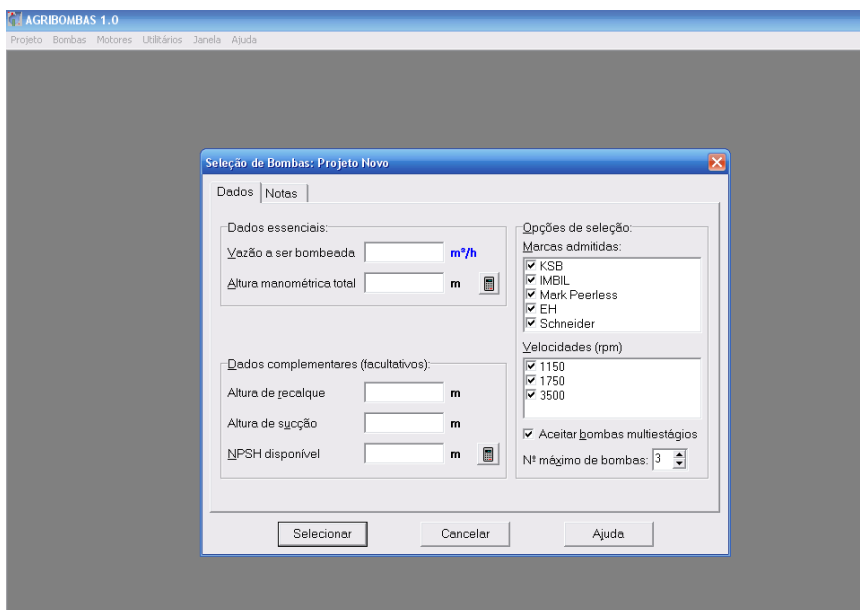


Figura 20 - Interface Software AgriBombas

2.3 Descrição dos Métodos

Na Figura 21 temos o diagrama unifilar da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu.

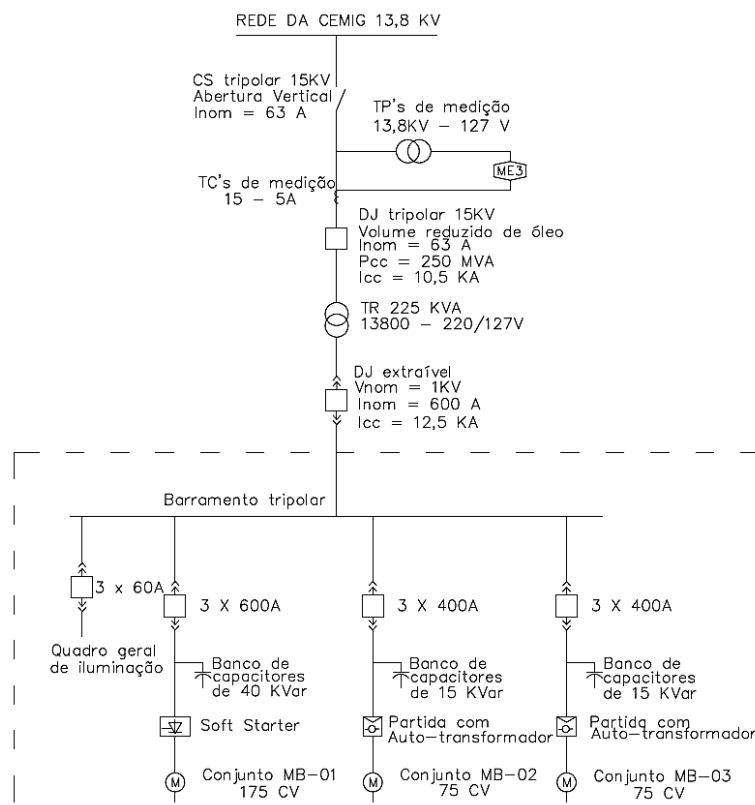


Figura 21- Diagrama Unifilar da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu

Na Figura 22 temos o diagrama hidráulico simplificado, desde a Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu até a Estação de Tratamento de Água (ETA I).

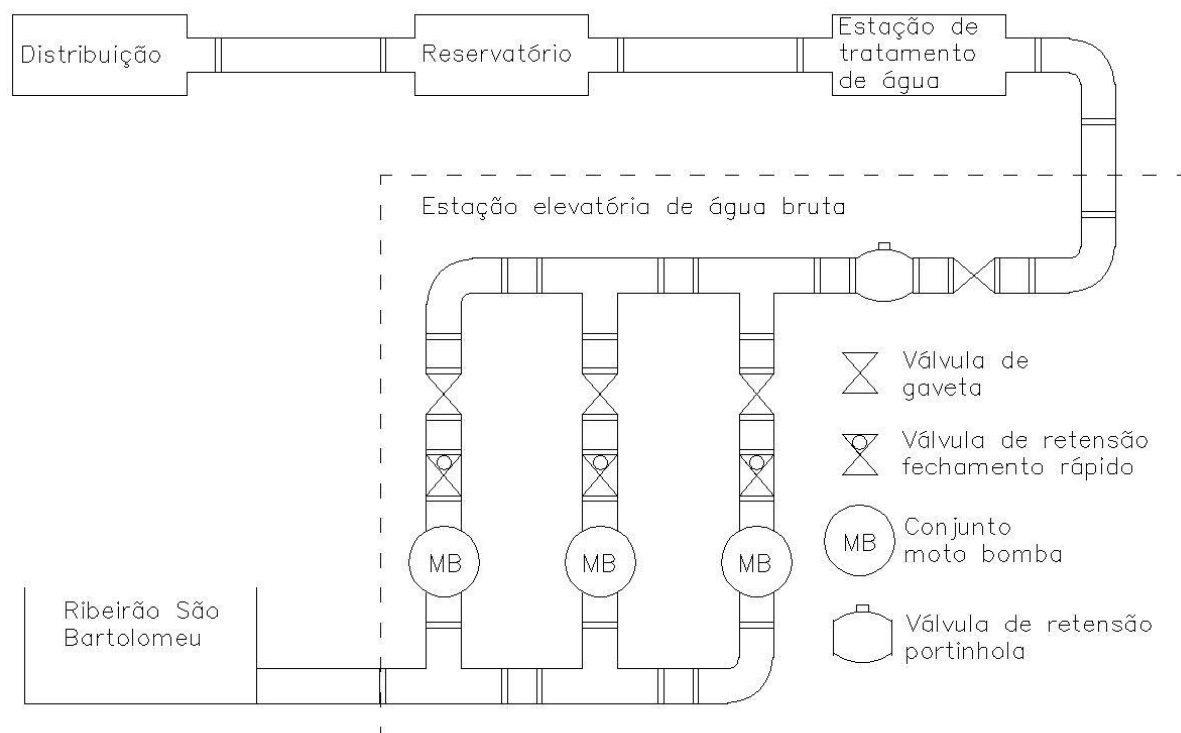


Figura 22 - Diagrama Hidráulico Simplificado

A Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu possui três conjuntos motobombas em operação, sendo que o regime de funcionamento da estação elevatória é o seguinte:

- Conjunto motobomba MB - 01: operação isolada, fora do horário de ponta do sistema elétrico nacional;
- Conjunto motobomba MB - 02: operação isolada, no horário de ponta do sistema elétrico nacional;
- Conjunto motobomba MB - 03: operação isolada, no horário de ponta do sistema elétrico nacional;
- Conjuntos motobombas MB - 02 e MB - 03: operam em paralelo, quando o conjunto MB - 01 está em manutenção. Sendo que estes conjuntos só operam em paralelo fora do horário de ponta do sistema elétrico nacional.

As medições hidráulicas foram realizadas pelo período de um mês na Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu e na ETA I, conforme descrição a seguir:

- Pressão: na sucção e recalque de cada conjunto motobomba foram instalados dataloggers de pressão, sendo que estes dados foram coletados com amostragem de 12 minutos;
- Vazão de Água Bruta: a adutora de água bruta por recalque possui um macromedidor de vazão eletromagnético. Estes dados foram coletados com amostragem de 12 minutos;
- Volume de Água Tratada nos Reservatórios: Estes dados foram coletados com amostragem de 1 hora;
- Consumo de Água Tratada: a adutora de água tratada possui dois macromedidores de vazão com saídas pulsadas, nestes foram instalados dataloggers de vazão, sendo que estes dados foram coletados com amostragem de 12 minutos.

As medições elétricas foram realizadas com o analisador de qualidade de energia instalado no quadro geral de força da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu, estas foram coletadas durante o período de um mês com amostragem de 2 minutos.

Além disso, utilizamos o tacômetro para realizar medições pontuais da rotação dos motores.

Para que o estado do sistema fosse caracterizado de forma completa, as medições das grandezas elétricas e hidráulicas foram sincronizadas.

3 *Resultados e Discussões*

3.1 *Medições Elétricas e Hidráulicas*

A análise das medições de grandezas elétricas e hidráulicas é realizada em conjunto, pois permite uma melhor caracterização do sistema.

Na tabela 03 temos os valores medidos de algumas grandezas elétricas e hidráulicas para os conjuntos motobombas.

Tabela 3 - Grandezas Elétricas e Hidráulicas Medidas para os Conjuntos Motobombas

Identificação	MB - 01	MB - 02	MB - 03
Potência Nominal	175 CV	75 CV	75 CV
Potência Medida	142 CV	88 CV	98 CV
Tensão Média	218 V	220 V	220 V
Corrente Média	365 A	212 A	239 A
Rotação	1780 RPM	1775 RPM	1770 RPM
Fator de Potência no Quadro Geral de Força	0,91	0,96	0,89
Marca Bomba	KSB	Albrizzi	Albrizzi
Vazão Nominal	450 m ³ /h	190,8 m ³ /h	190,8 m ³ /h
Vazão Média	352 m ³ /h	190 m ³ /h	169,2 m ³ /h
Altura Manométrica	78 mca	69,25 mca	69,50 mca

Analisando a Tabela 3, constatamos que os conjuntos motobombas MB - 02 e MB - 03, operam com potência superior a informada na placa do motor, tal divergência deve-se a reformas utilizando procedimentos rudimentares na rebobinagem dos motores. Além disso, constatamos que a vazão fornecida pela bomba MB - 01 é aproximadamente 22% menor que a informada na placa desta e o fator de potência dos conjuntos MB - 01 e MB - 03 necessitam de correção, uma vez que o baixo fator de potência reduz a capacidade de condução de corrente, além das sanções aplicadas pelas concessionárias de energia, quando este é inferior a 0,92.

Na Figura 23, temos o comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória, considerando valores máximos destas grandezas por horário, no período de segunda a sexta-feira. Nesta figura podemos observar a variação da vazão em função da potência elétrica demandada pelo motor.

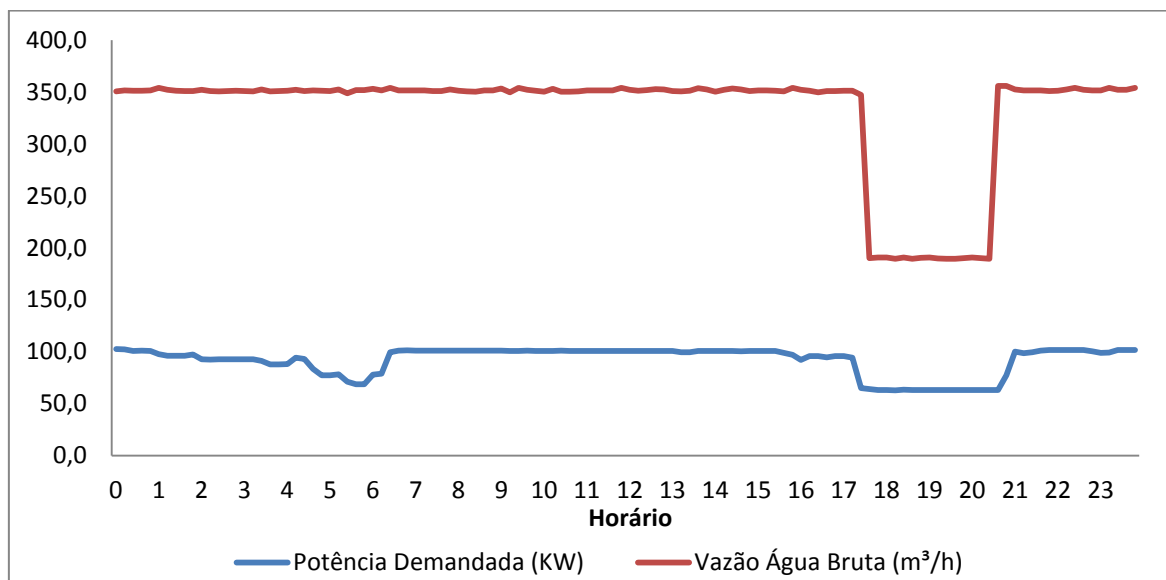


Figura 23 – Potência Demandada e Vazão Bombeada

Na Figura 24, temos o comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada, considerando valores máximos destas grandezas por horário, no período de segunda a sexta-feira. Nesta figura podemos observar a variação da vazão em função da potência elétrica demandada pelo motor.

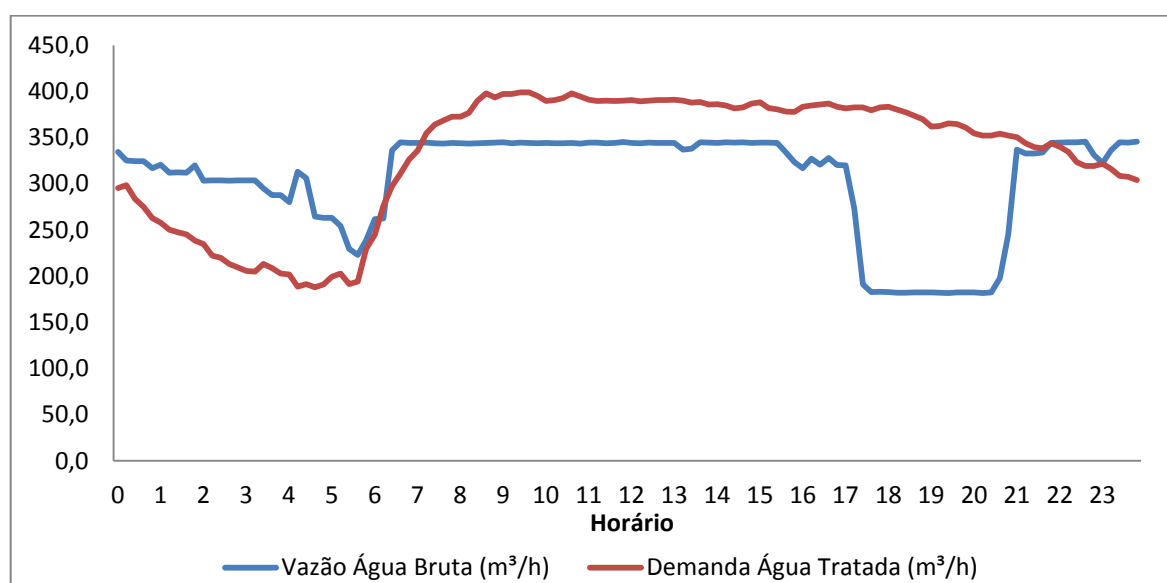


Figura 24 - Vazão Água Bruta e Curva de Consumo de Água Tratada

Na Figura 25, temos a curva de reservação, que é a diferença entre o volume de água bruta bombeada e a demanda de água tratada, considerando valores máximos destas grandezas por horário, no período de segunda a sexta-feira.

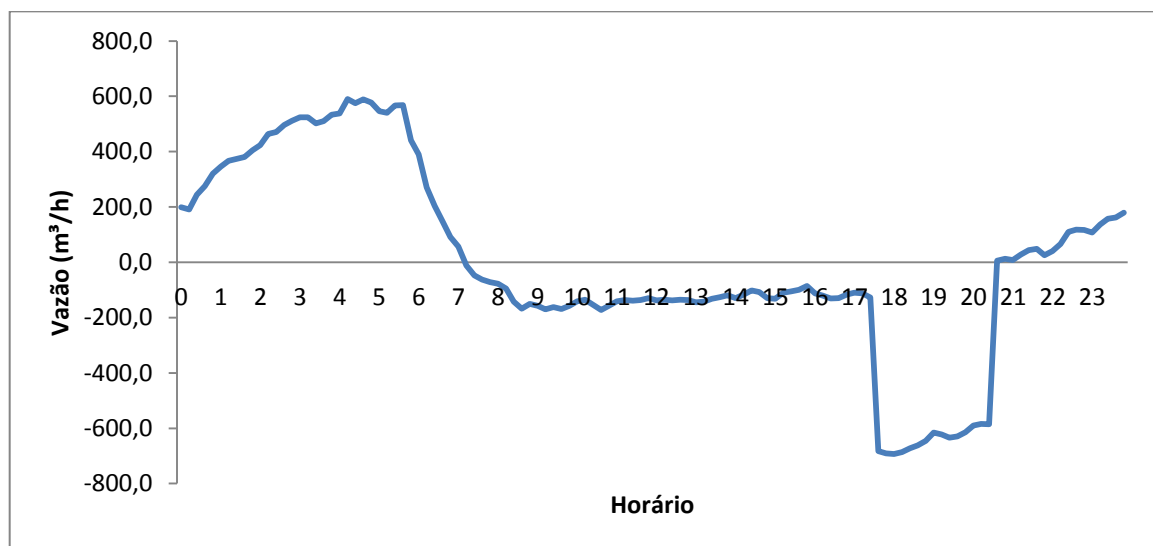


Figura 25 - Curva de Reservação

Analisando a Figura 25, percebemos que no período das 20h30min às 07h00min da manhã temos água sendo acumulada no reservatório. Esta reserva contribui para que no período em que a demanda por água tratada é maior que o volume bombeado, não falte água para os consumidores.

Na Figura 26, temos o comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória, para os conjuntos motobombas MB - 02 e MB - 03 operando em paralelo.

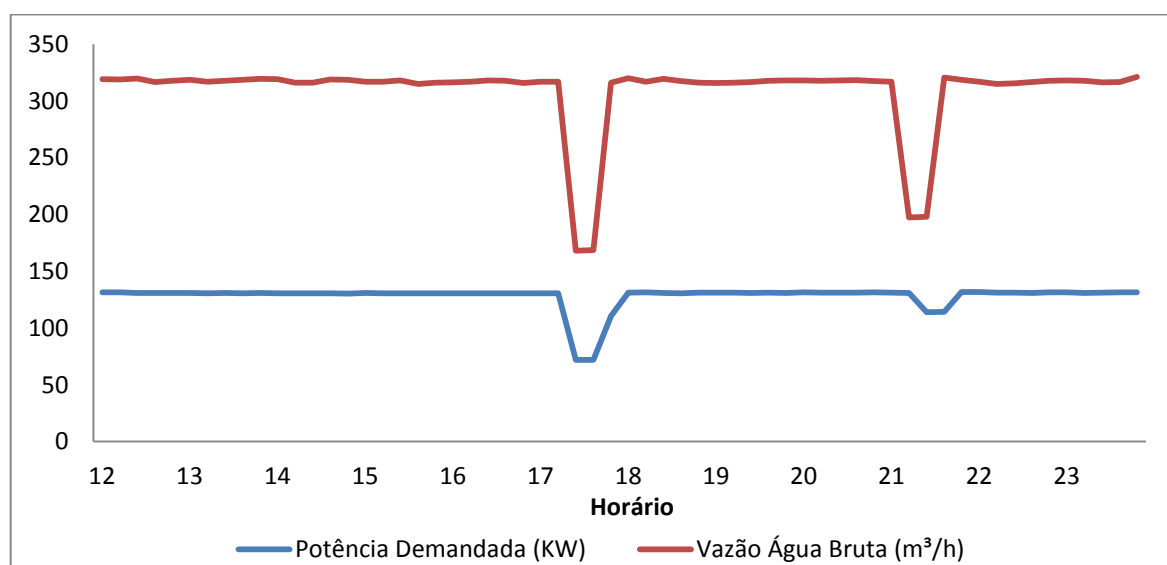


Figura 26 - Operação em Paralelo MB - 02 e MB - 03

Comparando as Figuras 23 e 26, temos que os conjuntos MB - 02 e MB - 03 operando em paralelo demandam uma potência de aproximadamente 130 kW para uma vazão de 318 m³/h, enquanto o conjunto MB - 01 demanda aproximadamente 104 kW para uma vazão de 352 m³/h. Isso deve-se ao baixo rendimento dos conjuntos MB - 02 e MB - 03, que já estão em operação a mais de 30 anos.

3.2 Indicadores de Desempenho Operacional da Estação Elevatória

Na Tabela 4, temos os valores do consumo específico de energia elétrica *CE* e o consumo específico de energia elétrica normalizado *CEN* para os conjuntos MB - 01, MB - 02 e MB - 03 operando de forma isolada e os conjuntos MB - 02 e MB - 03 operando em paralelo.

Tabela 4 - Indicadores de Desempenho Operacional

Identificação	Volume Bombeado (m ³)	Energia Consumida (kWh)	H (m)	CE (kWh/m ³)	CEN (kWh/m ³)
MB - 01	352	104	78	0,29545454	0,37878787
MB - 02	190	65	68,25	0,34210526	0,50125313
MB - 03	169,2	72	69,5	0,42553191	0,61227613
MB - 02//MB - 03	318	130	71	0,40880503	0,57578173

Sabendo que o consumo específico de energia elétrica *CEN* varia linearmente e de forma inversamente proporcional com o rendimento do conjunto motobomba, ou seja, na medida em que o rendimento aumenta, o *CEN* diminui, podemos diagnosticar que o conjunto MB - 01 possui maior rendimento, e o conjunto MB - 03 possui menor rendimento.

3.3 Indicadores de Desempenho Financeiro da Estação Elevatória

Na Tabela 5, temos os valores do custo médio da energia elétrica *CMEE*, e o custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado *CVB*, para a Estação Elevatória, utilizando as tarifas praticadas pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, em outubro de 2011, conforme Tabela 18, apêndice A.

Tabela 5 - Indicadores de Desempenho Financeiro Sistema Atual

Valor Total da Conta	Consumo Total de	Volume	CMEE	CVB
----------------------	------------------	--------	------	-----

de Energia (R\$)	Energia (MWh)	Bombeado (m ³)	(R\$/MWh)	(R\$/1000 m ³)
22.639,86	72,936	242.748	310,41	93,26

Analisando a Tabela 5, temos que o custo efetivo do MWh é de R\$ 310,41 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 93,26.

3.4 Volumes Úteis e Vazões Mínimas Necessárias para Desligamento da Elevatória em Horário de Ponta

Utilizando informações do cadastro técnico do SAAE - Viçosa, adotaremos que a capacidade do reservatório de água tratada localizado na ETA I possui volume útil de 1920 m³, ou seja, o volume útil necessário para desligamento da elevatória em horário de ponta não poderá ser superior ao volume útil do reservatório.

Na Tabela 6, temos qual o volume de água bruta deve ser bombeado para que a estação elevatória seja desligada no horário de ponta.

Tabela 6 - Bombeamento Constante e Nulo no Horário de Ponta

Hora	Volume de Entrada (m ³ /h)	Volume de Saída (m ³ /h)	Saldo	
			Entrada - Saída	
1	379,15	295,31	83,84	
2	379,15	257,99	121,16	
3	379,15	234,84	144,32	
4	379,15	205,54	173,61	
5	379,15	201,76	177,39	
6	379,15	199,40	179,76	
7	379,15	244,76	134,39	
8	379,15	335,95	43,20	
9	379,15	372,81	6,35	
10	379,15	397,38		-18,23
11	379,15	389,82		-10,67
12	379,15	391,24		-12,08
13	379,15	390,76		-11,61
14	379,15	391,24		-12,08
15	379,15	386,51		-7,36

16	379,15	388,40		-9,25
17	379,15	383,68		-4,52
18	0,00	381,79		-381,79
19	0,00	383,68		-383,68
20	0,00	361,94		-361,94
21	379,15	354,85	24,30	
22	379,15	350,60	28,55	
23	379,15	340,21	38,95	
24	379,15	321,78	57,38	
Total	7.962	7.962	1.213	-1.213
Vazão Média (m³/h)		331,76	Volume Útil Necessário (m³)	

Da Tabela 6, temos que seria necessário um conjunto motobomba com vazão de 379,15 m³/h para possibilitar o desligamento da Estação Elevatória no horário de ponta do sistema elétrico nacional. Para isso é necessário a substituição do rotor da bomba do conjunto MB - 01, tendo em vista que isso é tecnicamente e economicamente viável [20]. Além disso, percebemos que o volume útil necessário é menor que o volume útil do reservatório existente, o que possibilita a implementação de tal medida.

3.5 Propostas para Eficientização da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu

Na elaboração das propostas de eficientização da estação elevatória em estudo, que apresentaremos a seguir, consideraremos as seguintes informações fornecidas pelo SAAE:

- Capacidade máxima de tratamento da ETA I: 450 m³/h;
- Vazão média do manancial do Ribeirão São Bartolomeu disponível para bombeamento em períodos de estiagem: 255 m³/h.

3.5.1 Proposta I: Bombeamento Constante e Nulo no Horário de Ponta

Para que seja possível desligar o bombeamento no horário de ponta do sistema elétrico é necessária uma vazão média de aproximadamente 380 m³/h e capacidade de reservação de 1.213 m³, conforme Tabela 6.

Além disso, propomos a instalação de dois conjuntos motobombas, que foram dimensionados conforme cálculo disponível no Apêndice B, B.1. Feito isso, temos os novos indicadores operacionais, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Indicadores Operacionais Proposta I

Identificação	Volume Bombeado (m ³)	Energia Consumida (kWh)	H (m)	CE (kWh/m ³)	CEN (kWh/m ³)
MB - 01	380	98	76	0,25789473	0,33933518
MB - 02	252	66	72	0,26190476	0,36375661
MB - 03	252	66	72	0,26190476	0,36375661
MB - 02//MB - 03	360	85	75	0,23611111	0,31481481

Analisando o consumo específico de energia normalizado, Tabela 7, temos que a implementação desta proposta terá como resultado o aumento expressivo do rendimento dos conjuntos motobombas.

Além disso, a implementação desta proposta implicará em significativa redução do custo com energia elétrica, pois nesta situação realizaremos o reenquadramento tarifário, para a Tarifa Horo-Sazonal Verde (THS Verde). Na Tabela 8 podemos comparar o consumo e o custo com energia considerando a operação atual e a proposta.

Tabela 8 - Comparativo Situação Atual e Proposta I

Situação Atual			
THS Azul	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	72,00	R\$ 59,14	R\$ 4.258,43
Demanda HFP (KW)	131,00	R\$ 16,60	R\$ 2.174,06
Energia HP (kWh)	4.920,00	R\$ 0,34	R\$ 1.665,32
Energia HFP (kWh)	6.8016,00	R\$ 0,21	R\$ 14.542,04
Valor Total Fatura			R\$ 22.639,86
Volume Bombeado por Mês (m³)			239.400
Situação Proposta I			
THS Verde	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	0,00	R\$ 59,14	R\$ 0,00
Demanda HFP (KW)	98,00	R\$ 16,60	R\$ 1.626,40
Energia HP (kWh)	0,00	R\$ 1,71	R\$ 0,00
Energia HFP (kWh)	61740,00	R\$ 0,21	R\$ 13.200,21

Valor Total Fatura	R\$ 14.826,61
Volume Bombeado por Mês (m³)	239.400

Ainda analisando a Tabela 8, teremos uma economia mensal no consumo de energia de aproximadamente 15% e redução no valor total da conta de energia da ordem de 34%.

Na Tabela 9, temos os novos indicadores de desempenho financeiro.

Tabela 9 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta I

Valor Total da Conta de Energia (R\$)	Consumo Total de Energia (MWh)	Volume Bombeado (m³)	CMEE (R\$/MWh)	CVB (R\$/1000 m³)
14.826,61	61,740	239.400	240,15	61,93

Analisando a Tabela 9, temos que o custo efetivo do MWh é de R\$ 240,15 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 61,93. Quando comparamos os indicadores financeiros desta proposta com o sistema atual (Tabela 5), temos que o custo médio da energia elétrica foi reduzido em aproximadamente 22% e o custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado teve redução da ordem de 33%.

3.5.2 Proposta II: Substituição dos Conjuntos MB - 02 e MB - 03

Nesta proposta manteremos o conjunto MB - 01 com as mesmas características atuais e substituiremos os conjuntos motobombas MB - 02 e MB - 03 por conjuntos com maior rendimento, mantendo a vazão e reduzindo a potência demandada. Neste caso, propomos a instalação de dois conjuntos motobombas, que foram dimensionados conforme cálculo disponível no Apêndice B, B.2. Feito isso, temos os novos indicadores operacionais, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Indicadores Operacionais Proposta II

Identificação	Volume Bombeado (m³)	Energia Consumida (kWh)	H (m)	CE (kWh/m³)	CEN (kWh/m³)
MB - 01	352	104	78	0,29545454	0,37878787
MB - 02	190	52	70	0,27368421	0,39097744
MB - 03	190	52	70	0,27368421	0,39097744
MB - 02//MB - 03	340	72	72	0,21176470	0,29826014

Analisando o consumo específico de energia normalizado, Tabela 10, temos que a substituição dos conjuntos MB - 02 e MB - 03 terá como resultado o aumento expressivo do rendimento dos conjuntos motobombas.

Além disso, a implementação desta proposta implicará em significativa redução do custo com energia elétrica, pois nesta situação realizaremos o reenquadramento tarifário, mantendo a Tarifa Horo-Sazonal Azul (THS Azul) e reduzindo as demandas contratadas. Na Tabela 11 podemos comparar o consumo e o custo com energia considerando a operação atual e a proposta.

Tabela 11 - Comparativo Situação Atual e Proposta II

Situação Atual			
THS Azul	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	72,00	R\$ 59,14	R\$ 4.258,43
Demanda HFP (KW)	131,00	R\$ 16,60	R\$ 2.174,06
Energia HP (kWh)	4.920,00	R\$ 0,34	R\$ 1.665,32
Energia HFP (kWh)	68.016,00	R\$ 0,21	R\$ 14.542,04
Valor Total Fatura			R\$ 22.639,86
Volume Bombeado por Mês (m³)			239.400
Situação Proposta II			
THS Azul	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	52,00	R\$ 59,14	R\$ 3.075,00
Demanda HFP (KW)	104,00	R\$ 16,60	R\$ 1.795,27
Energia HP (kWh)	3.432,00	R\$ 0,34	R\$ 1.161,66
Energia HFP (kWh)	68016,00	R\$ 0,21	R\$ 14.542,04
Valor Total Fatura			R\$ 20.505,21
Volume Bombeado por Mês (m³)			242.748

Ainda analisando a Tabela 11, teremos uma economia mensal no consumo de energia de aproximadamente 2% e redução no valor total da conta de energia da ordem de 9%. Além disso, nesta situação teremos o acréscimo de 1% no volume bombeado por mês.

Na Tabela 12, temos os novos indicadores de desempenho financeiro.

Tabela 12 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta II

Valor Total da Conta de Energia (R\$)	Consumo Total de Energia (MWh)	Volume Bombeado (m³)	CMEE (R\$/MWh)	CVB (R\$/1000 m³)
20.505,21	71,45	242.748	286,99	84,47

Analisando a Tabela 12, temos que o custo efetivo do MWh é de R\$ 286,99 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 84,47. Quando comparamos os indicadores financeiros desta proposta com o sistema atual (Tabela 5), temos que o custo médio da energia elétrica foi reduzido em aproximadamente 7 % e o custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado teve redução da ordem de 9 %.

3.5.3 Proposta III: Ampliação da Capacidade do Sistema de Bombeamento

Para ampliarmos a capacidade de bombeamento da Estação Elevatória propomos a substituição do rotor do conjunto MB - 01, obtendo a vazão de 380 m³/h, tendo em vista que isso é tecnicamente e economicamente viável [20].

Além disso, propomos a instalação de dois conjuntos motobombas, que foram dimensionados conforme cálculo disponível no Apêndice B, B.1. Feito isso, temos os novos indicadores operacionais, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Indicadores Operacionais Proposta III

Identificação	Volume Bombeado (m ³)	Energia Consumida (kWh)	H (m)	CE (kWh/m ³)	CEN (kWh/m ³)
MB - 01	380	98	76	0,25789473	0,33933518
MB - 02	252	66	72	0,26190476	0,36375661
MB - 03	252	66	72	0,26190476	0,36375661
MB - 02//MB - 03	360	85	75	0,23611111	0,31481481

Analisando o consumo específico de energia normalizado, Tabela 13, temos que a implementação desta proposta terá como resultado o aumento expressivo do rendimento dos conjuntos motobombas.

Na Tabela 14 podemos comparar o consumo e o custo com energia considerando a operação atual e a proposta.

Tabela 14 - Comparativo Situação Atual e Proposta III

Situação Atual			
THS Azul	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	72,00	R\$ 59,14	R\$ 4.258,43
Demanda HFP (KW)	131,00	R\$ 16,60	R\$ 2.174,06

Energia HP (kWh)	4.920,00	R\$ 0,34	R\$ 1.665,32
Energia HFP (kWh)	68.016,00	R\$ 0,21	R\$ 14.542,04
Valor Total Fatura			R\$ 22.639,86
Volume Bombeado por Mês (m³)			239.400
Situação Proposta III			
THS Azul	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (kW)	66,00	R\$ 59,14	R\$ 3.903,57
Demanda HFP (KW)	98,00	R\$ 16,60	R\$ 1.626,40
Energia HP (kWh)	4356,00	R\$ 0,34	R\$ 1.474,42
Energia HFP (kWh)	64092,00	R\$ 0,21	R\$ 13.703,07
Valor Total Fatura			R\$ 20.707,45
Volume Bombeado por Mês (m³)			265.152

Analisando a Tabela 14, diagnosticamos que mesmo com a ampliação do volume de água bruta bombeada em 11%, teremos uma economia mensal no consumo de energia de aproximadamente 6% e redução no valor total da conta de energia da ordem de 8%.

Na Tabela 15, temos os novos indicadores de desempenho financeiro.

Tabela 15 - Indicadores de Desempenho Financeiro Proposta III

Valor Total da Conta de Energia (R\$)	Consumo Total de Energia (MWh)	Volume Bombeado (m³)	CMEE (R\$/MWh)	CVB (R\$/1000 m³)
20.707,45	68,45	265.152	302,53	78,10

Analisando a Tabela 15, temos que o custo efetivo do MWh é de R\$ 302,53 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 78,10. Quando comparamos os indicadores financeiros desta proposta com o sistema atual (Tabela 5), temos que o custo médio da energia elétrica foi reduzido em aproximadamente 2 % e o custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado teve redução da ordem de 16 %.

É importante salientar que a diferença entre as propostas I e III, está apenas na operação do sistema, ou seja, na proposta I o sistema é desligado no horário de ponta do sistema elétrico nacional, enquanto que na proposta III a vazão é apenas reduzida no horário de ponta. Vale ressaltar que as propostas I e III possuem modalidades tarifárias distintas.

4 *Conclusões*

O setor de saneamento é um grande consumidor de energia elétrica. Este consumo representa uma das maiores parcelas das despesas de exploração do setor, sendo os conjuntos motobombas os principais responsáveis por este alto consumo. As grandes perdas nos sistemas de abastecimento de água contribuem para o maior consumo de energia.

A efficientização do saneamento se mostra uma ótima alternativa para, além da redução dos gastos com energia, melhorar a qualidade dos serviços prestados e contribuir diretamente para o uso racional de energia. A gestão do saneamento deve promover a melhoria no desempenho dos serviços, principalmente quanto à eficiência energética.

Os indicadores *CE* (Consumo Específico de Energia Elétrica) e *CEN* (Consumo Específico de Energia Normalizado) analisam apenas a relação entre a potência fornecida pelo conjunto motobomba e o volume de água recalcado, não considerando se este volume é o necessário ou excessivo para atender a demanda. Os indicadores estudados neste trabalho analisam a situação como um todo, levando em consideração aspectos como vazão fornecida, altura manométrica e demanda necessária.

Os indicadores comprovam teoricamente que as medidas sugeridas reduzem o consumo de energia, tornando-o mais eficiente. É possível analisar o comportamento do sistema antes de serem aplicadas as intervenções pretendidas, pelo uso dos indicadores operacional e financeiro.

Os indicadores auxiliam na escolha da melhor opção para cada situação, pois permitem comparar cenários alternativos e avaliar o respectivo potencial de redução do consumo de energia.

A metodologia aplicada se mostrou interessante para o estudo da eficiência energética de estações elevatórias, possibilitando elaborar alternativas de intervenção no sistema. A avaliação econômica irá variar em cada situação, no entanto, o custo ambiental deverá ser priorizado, visto que medidas que minimizem o consumo de energia são cada vez mais necessárias.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo da automação e instrumentação de sistemas de bombeamentos e os ganhos em eficiência energética e operacional resultantes destes.

Referências Bibliográficas

- [01] CHEUNG P. et al. Curso de Eficiência Energética no Saneamento. Guia do profissional em treinamento, 2008. 13
- [02] ELETROBRÁS. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005... 13
- [03] GOMES, H. P. Eficiência hidráulica e energética em saneamento: Análise Econômica de Projetos. Rio de Janeiro: ABES, 2005. 13, 21, 22
- [04] JAMES, K. *et al.* Água e energia: aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas municipais. Alliance to Save Energy, 2002. 13
- [05] DUARTE *et al.* Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento. In: VIII SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO, 2008. 13, 14
- [06] ALEGRE, H. *et al.* *Performance indicators for water supply service.* IWA Publishing, 2004. 14, 37
- [07] <http://www.saaevicosa.com.br>. Acesso em: 31 de agosto de 2012 14, 40
- [08] FOX, R. W. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro: LTC, 2001 14
- [09] MACYNTIRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983 . 15, 17
- [10] LUCARELLI, D. L. Bombas e Sistemas de Recalque. São Paulo: CETESB, 1974 15, 16
- [11] BAPTISTA, MÁRCIO BENEDITO, Fundamentos de Engenharia Hidráulica, 2ª edição, - Belo Horizonte: Editora UFMG, 2003. 18, 23
- [12] Norma ABNT NBR 12214:1992. Projeto de Sistema de Bombeamento de Água para Abastecimento Público, a perda de carga de uma dada singularidade ou Acessório. 19
- [13] GOMES, HEBER PIMENTEL et al. Sistema de Bombeamento - Eficiência Energética. 1ª edição. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009. 22, 24, 25, 26, 27, 29, 32, 35, 66, 68
- [14] Resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL nº 456/2000. 29
- [15] MAMEDE FILHO, JOÃO. Instalações Elétricas Industriais. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 31
- [16] CEBEL, JOÃO. Indicadores relacionados ao consumo de energia utilizáveis em metodologias de avaliação hidráulica. Rio de Janeiro-RJ: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2006. 31
- [17] MONACHESI, MARCELO GAIO. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Editora Eletrobrás, 2005. 34
- [18] TSUTIYA, MILTON TOMOYUKI et al. Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento: Guia do Profissional em Treinamento – Secretaria Nacional de Saneamento – Salvador, 2008. 36, 37
- [19] AGRIBOMBAS, Software desenvolvido pelo Engenheiro Wellington Lima dos Santos, durante o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, oferecido pela Universidade Federal de Viçosa 44
- [20] KSB, Bombas Hidráulicas S. A., Catálogo Eletrônico, Versão 1.1, São Paulo, 2000 53, 57

Apêndice A – Tabelas com Características de Tubos e Tarifas de Energia

A.1 Tabela 16

Tabela 16 - Perdas localizadas expressas em diâmetro de canalização retilínea.

Peça	Comprimento expressos em números de diâmetro
Ampliação Gradual	12
Cotovelo de 90°	45
Cotovelo de 45°	20
Curva de 90°	30
Curva de 45°	15
Entrada normal	17
Entrada de borda	35
Junção	30
Redução gradual e excêntrica	6
Válvula de gaveta aberta	8
Válvula de globo, aberta	350
Válvula de ângulo, aberta	170
Saída de canalização	35
Tê, passagem direta	20
Tê, passagem direta	65
Válvula de pé com crivo	250
Válvula de Retenção	100

A.2 Tabela 17

Tabela 17 - Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams.

Tubos	Valores de C
Aço corrugado	60
Aço com juntas, novos	135

Aço galvanizado	125
Cimento amianto	135
Cobre	130
Concreto – acabamento liso	130
Concreto – acabamento comum	120
Ferro Fundido, novo	130
Ferro Fundido, em uso	90
Ferro fundido, tubos revestidos com cimento	110
Grés cerâmico vidrado – manilhas	110
Latão	130
Tijolos, condutos com revestimento de cimento alisado	100
Vidro	140

A.3 Tabela 18

Tabela 18 – Valor Total da Conta de Energia e Volume Bombeado para a Estação Elevatória em Estudo

Conta de Energia e Volume Bombeado - Outubro/2011		
THS Azul	Consumo	Valor
Demanda HP (kW)	72,00	R\$ 4.258,43
Demanda HFP (KW)	131,00	R\$ 2.174,06
Energia HP (KWh)	4920,00	R\$ 1.665,32
Energia HFP KWh)	68016,00	R\$ 14.542,04
Valor Total Fatura		R\$ 22.639,86
Volume Bombeado Mês (m³)		242.748

Apêndice B – Dimensionamento de Conjuntos Motobombas

Para o dimensionamento dos conjuntos motobombas utilizamos as seguintes informações do cadastro técnico do SAAE-Viçosa, conforme Tabelas 19.

Tabela 19 - Informações das Redes de Sucção e Recalque da Estação Elevatória do Ribeirão São Bartolomeu

Informações Gerais das Redes de Recalque e Sucção			
Comprimento da Tubulação de Recalque (m) - Trecho I		6	
Comprimento da Tubulação de Recalque (m) - Trecho II		222	
Comprimento da Tubulação de Sucção (m)		4	
Diâmetro Nominal da Tubulação de Recalque (mm) - Trecho I		250	
Diâmetro Nominal da Tubulação de Recalque (mm) - Trecho II		300	
Diâmetro Nominal da Tubulação de Sucção (mm)		300	
Material da Tubulação		Ferro Fundido	
Altura Geométrica Total do Recalque (m)		68,67	
Altura Geométrica de Recalque (m) - Trecho I		2	
Altura Geométrica de Recalque (m) - Trecho II		66,67	
Altura Geométrica de Sucção (m)		-2	
Observação: A bomba encontra-se “afogada”, a altura geométrica de Sucção encontra-se acima da bomba e, portanto tem sinal negativo.			
Peças Especiais da Tubulação			
Identificação	Localização	Diâmetro Nominal (mm)	Quantidade
Ampliação Gradual	Sucção	300 - 400	1
Ampliação Gradual	Recalque – Trecho I	125 -250	1
Válvula de Gaveta	Recalque – Trecho I	250	2
Válvula de Retenção	Recalque – Trecho I	250	2
Junção	Recalque – Trecho I	250	1
Ampliação Gradual	Recalque – Trecho II	300	1
Curva de 90°	Recalque – Trecho II	300	2

Curva de 45°	Recalque – Trecho II	300	7
--------------	----------------------	-----	---

B.1 Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta I e III:

Nas propostas I e III temos uma vazão de projeto de 252 m³/h. A fim de verificar se as tubulações de sucção e recalque são adequadas para a vazão de projeto, utilizaremos a equação de continuidade, Equação 20.

$$V = \frac{4 Q}{\pi D^2} \quad (20)$$

Onde:

V = Velocidade de Escoamento do Fluido [m/s].

D = Diâmetro Nominal do Tubo [m].

Q = Vazão de Projeto [m³/s].

Utilizando a Equação 20, obtemos que a velocidade do fluido na sucção é de 1,426 m/s, e a velocidade deste no recalque é de 0,990 m/s. Segundo [13], estes valores estão dentro do limite recomendado, tendo em vista que a velocidade máxima permitida para tubulações de recalque é 3 m/s, e para tubulações de sucção 2 m/s.

Verificadas as velocidades de escoamento do fluido para a vazão de projeto, podemos calcular a altura manométrica H da instalação.

Para o cálculo da perda de carga contínua será usado o método dos diâmetros equivalentes (Tabela 16) e para o cálculo da perda de carga linear será utilizada a fórmula de Hazen-Willians, Equação 4. Além disso, utilizamos $C = 90$, que é o coeficiente de Hazen-Willians para tubo de ferro fundido usado. Com isso, obtemos:

- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Sucção: $H_{ls} = 0,006631 \text{ m/m}$;
- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Recalque - Trecho I: $H_{lrI} = 0,016113 \text{ m/m}$;
- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Recalque - Trecho II: $H_{lrII} = 0,006631 \text{ m/m}$.

Feito isso obtemos as alturas manométricas em cada trecho:

- Altura Manométrica da Sucção: $H_S = -1,961540 \text{ m}$;

- Altura Manométrica do Recalque - Trecho I: $H_{RI} = 4,103741 \text{ m}$;
- Altura Manométrica do Recalque - Trecho II: $H_{RII} = 69,494188 \text{ m}$.

Sabendo que a altura manométrica total é dada pela Equação 21, temos que a altura manométrica total para a vazão de projeto de $252 \text{ m}^3/\text{h}$ é de 72 metros.

$$H = H_S + H_{RI} + H_{RII} \quad (21)$$

Utilizando o Software AgriBombas, obtemos a curva da bomba para atender a vazão de projeto de $252 \text{ m}^3/\text{h}$, para a altura manométrica de 72. E utilizando a Equação 7 obtemos a curva da tubulação ou sistema.

Na Figura 27 temos a curva da bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm.

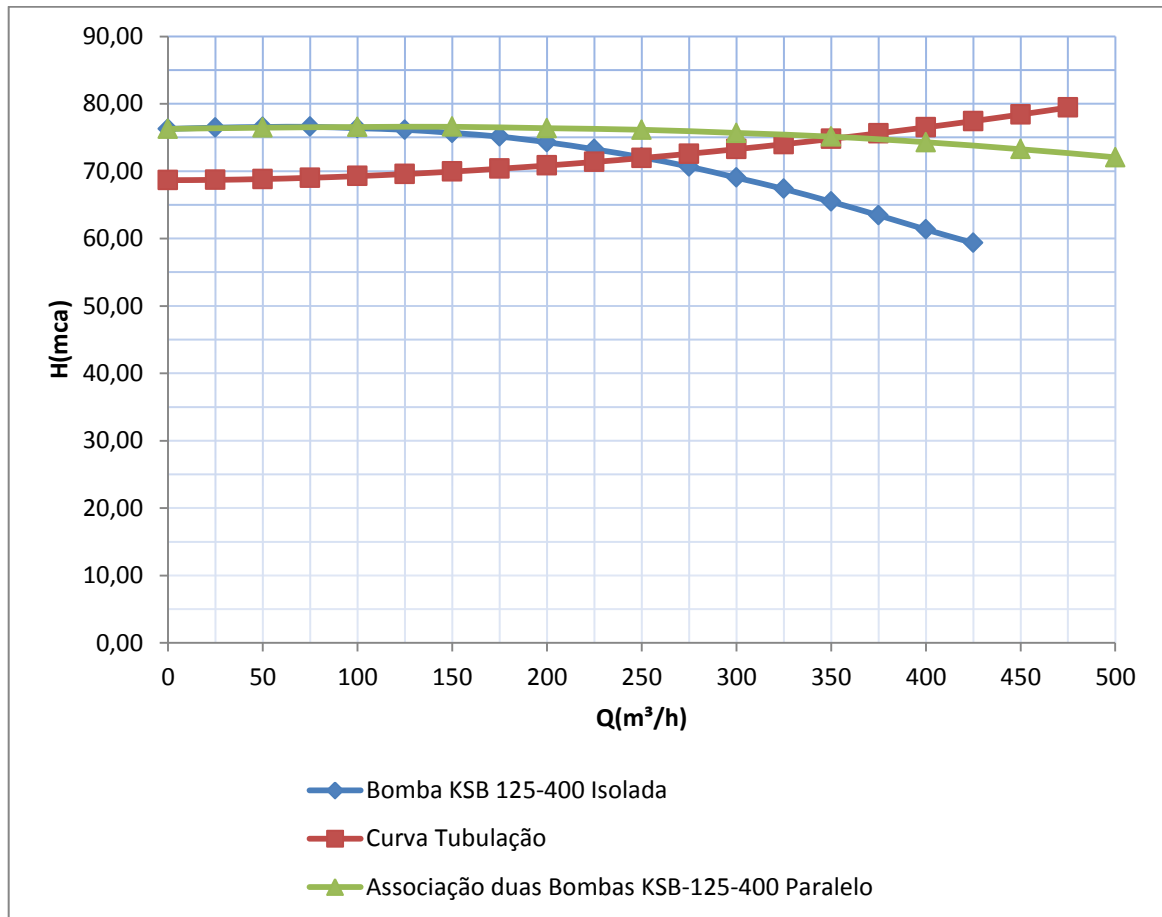


Figura 27 – Curva Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm

Na Figura 28 temos a curva da potência exigida do motor pela bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm.

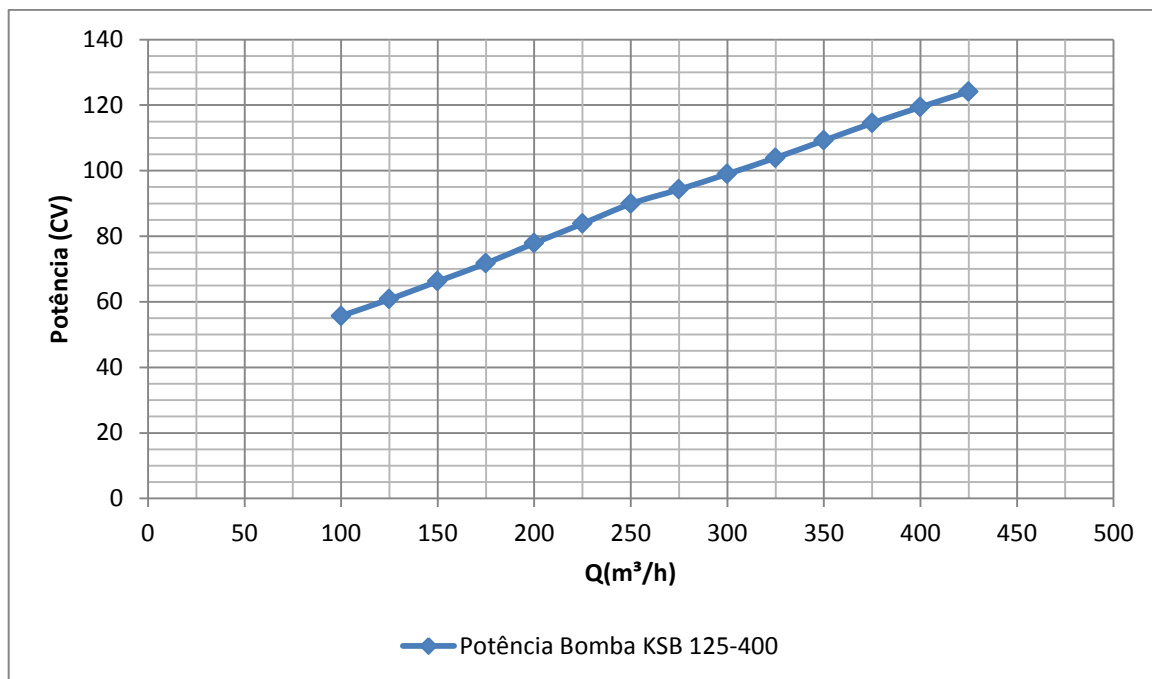


Figura 28 – Curva da Potência Exigida pela Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 388 mm

B.2 Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta II:

Nas propostas II temos uma vazão de projeto de 190 m³/h. A fim de verificar se as tubulações de sucção e recalque são adequadas para a vazão de projeto, utilizaremos a equação de continuidade, Equação 20.

$$V = \frac{4 Q}{\pi D^2} \quad (20)$$

Onde:

V = Velocidade de Escoamento do Fluido [m/s].

D = Diâmetro Nominal do Tubo [m].

Q = Vazão de Projeto [m³/s].

Utilizando a Equação 20, obtemos que a velocidade do fluido na sucção é de 0,750 m/s, e a velocidade deste no recalque é de 1,075 m/s. Segundo [13], estes valores estão dentro do limite recomendado, tendo em vista que a velocidade máxima permitida para tubulações de recalque é 3 m/s, e para tubulações de sucção 2 m/s.

Verificadas as velocidades de escoamento do fluido para a vazão de projeto, podemos calcular a altura manométrica H da instalação.

Para o cálculo da perda de carga contínua será usado o método dos diâmetros equivalentes (Tabela 16) e para o cálculo da perda de carga linear será utilizada a fórmula de Hazen-Willians, Equação 4. Além disso, utilizamos $C = 90$, que é o coeficiente de Hazen-Willians para tubo de ferro fundido usado. Com isso, obtemos:

- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Sucção: $H_{ls} = 0,003933 \text{ m/m}$;
- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Recalque - Trecho I: $H_{lri} = 0,009556 \text{ m/m}$;
- Perda de Carga Linear Unitária na Tubulação de Recalque - Trecho II: $H_{lrii} = 0,003933 \text{ m/m}$.

Feito isso obtemos as alturas manométricas em cada trecho:

- Altura Manométrica da Sucção: $H_S = -1,977472 \text{ m}$;
- Altura Manométrica do Recalque - Trecho I: $H_{RI} = 3,654586 \text{ m}$;
- Altura Manométrica do Recalque - Trecho II: $H_{RII} = 67,751968 \text{ m}$.

Sabendo que a altura manométrica total é dada pela Equação 21, temos que a altura manométrica total para a vazão de projeto de $190 \text{ m}^3/\text{h}$ é de 70 metros.

$$H = H_S + H_{RI} + H_{RII} \quad (21)$$

Utilizando o Software AgriBombas, obtemos a curva da bomba para atender a vazão de projeto de $190 \text{ m}^3/\text{h}$, para a altura manométrica de 70. E utilizando a Equação 7 obtemos a curva da tubulação ou sistema.

Na Figura 29 temos a curva da bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm.

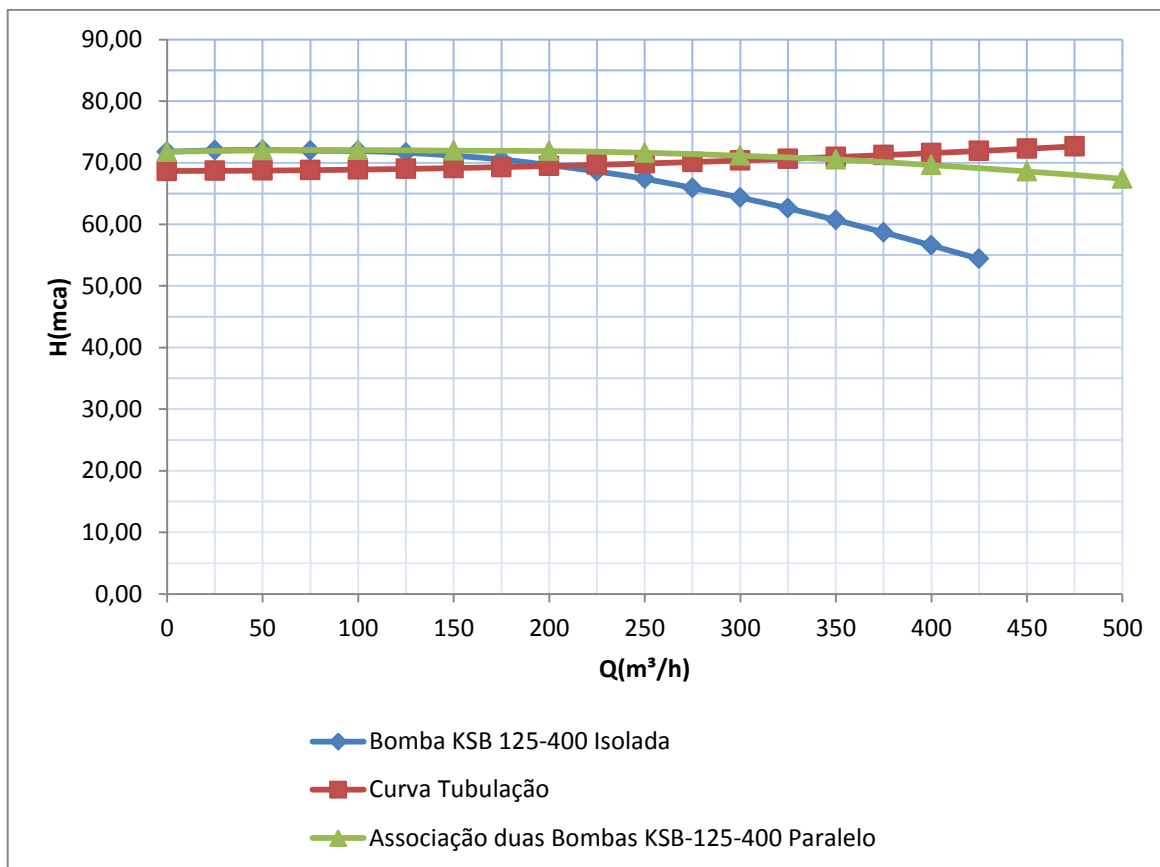


Figura 29 - Curva Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm

Na Figura 30 temos a curva da potência exigida do motor pela bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm.

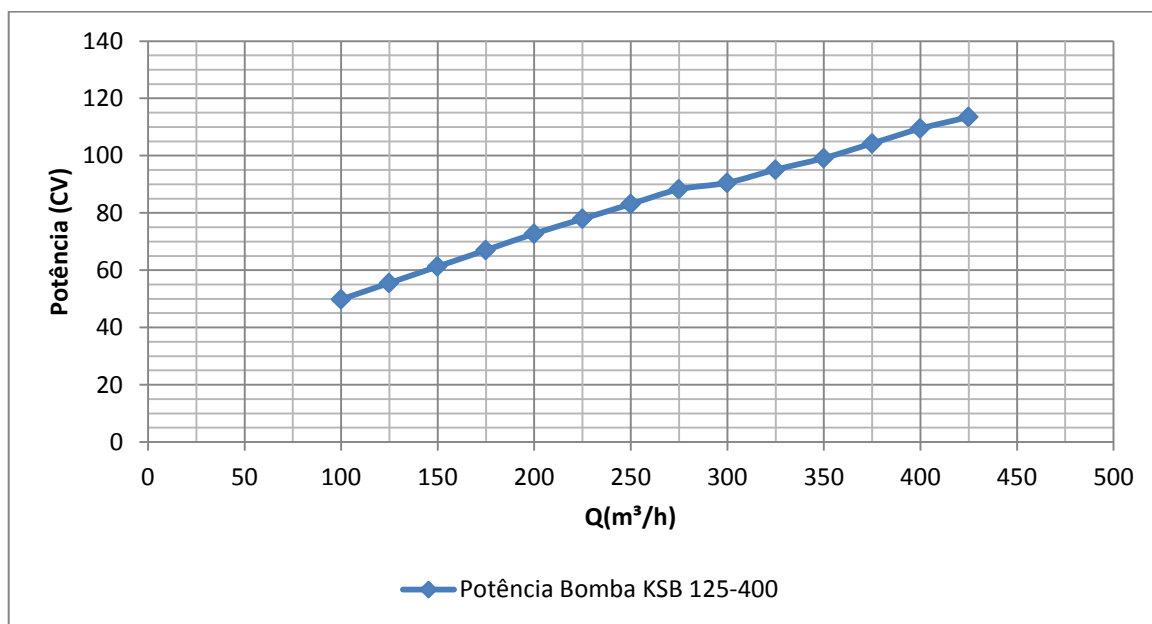


Figura 30 - Curva da Potência Exigida pela Bomba KSB Meganorm 125-400, com rotor de 377 mm