

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

MAYRON DE SOUZA MACHADO

Estudo da Eficiência Energética de uma Estação Elevatória de Água

VIÇOSA
2015

MAYRON DE SOUZA MACHADO

Estudo da Eficiência Energética de uma Estação Elevatória de Água

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. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2015

MAYRON DE SOUZA MACHADO

Estudo da Eficiência Energética de uma Estação Elevatória de Água

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 15 de Janeiro de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Engenheiro Eduardo José Lopes Brustolini – Membro
Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa-MG

Msc. André Luis Carvalho Mendes - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“Antes de falar, ouça.
Antes de agir, pense.
Antes de criticar, conheça.
Antes de desistir, tente.”*
(Mallu Moraes)

Aos meus pais, Márlío e Cida, pelo exemplo de pais que são e pelo apoio incondicional que me dão em todos os meus sonhos e conquistas que tenho em minha vida.

Agradecimentos

A minha família, pelo apoio e paciência que tiveram comigo nessa etapa da minha vida que encerra-se agora. A todos os amigos e colegas de curso pela ajuda quando mais necessitei. Ao meu orientador Mauro de Oliveira Prates, pela colaboração e amizade. A Eduardo Brustolini e ao SAAE de Viçosa, pela oportunidade de pesquisa e estágio.

Resumo

Toda sociedade organizada consome diariamente várias formas de energia, seja ela natural ou desenvolvida pelo homem. Mas, para um desenvolvimento social, econômico e sem impacto para a natureza é necessário o uso de forma racional e eficiente destas energias.

A energia elétrica é essencial no sistema de saneamento, desde o bombeamento da água bruta nas adutoras até a chegada de água potável nas residências. Dessa forma, as ações de melhoria dos sistemas elétricos de distribuição são tão importantes quanto o uso racional da água. Além disso, o setor de abastecimento de água, coleta e tratamento de esgotos são grandes vilões para empresas de saneamento devido ao alto valor gasto com energia elétrica que representa grande parte de seus orçamentos.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre o consumo de energia atual da Estação Elevatória do Rio Turvo Sujo em Viçosa-MG e propor soluções através da implementação de ações economicamente viáveis de eficiência energética em sistemas de bombeamento. Para isso, realizou-se um diagnóstico do sistema energético e hidráulico atual, através de medições elétricas e hidráulicas, simultaneamente, utilizando um analisador de qualidade de energia, um macromedidor de vazão ultrassônico e *dataloggers* de pressão e pulso.

Além disso, foram diagnosticadas as vazões mínimas e volumes úteis para o armazenamento de água e adução necessária para o desligamento da elevatória em horário de pico. Paralelo a estas medições, realizou-se um trabalho de análise das faturas de energia elétrica dos últimos doze meses da Estação Elevatória do Rio Turvo Sujo (Captação da Estação de Tratamento de Água da Violeira, ETAll). Finalmente, foram apresentadas soluções economicamente viáveis com o intuito de tornar a estação elevatória mais eficiente.

Sumário

1 Introdução	14
1.1 Bombas e Estações Elevatórias.....	14
1.1.1 Introdução	14
1.1.2 Classificação e Descrição	15
1.1.3 Altura Geométrica e Manométrica.....	17
1.1.4 Associação de Bombas	18
1.1.5 Curva característica	20
1.2 Tarifas de Energia.....	22
1.2.1 Introdução	22
1.2.2 Classificação dos consumidores	23
1.2.3 Tarifas para Consumidores do Grupo A.....	24
1.3 Diagnóstico de Sistemas.....	25
1.3.1 Introdução	25
1.3.2 Levantamento do Diagrama Simplificado Eletro-Hidráulico do Sistema...26	
1.3.3 Levantamento das Contas de Energia das Unidades Consumidoras e Análise Tarifária	27
1.3.4 Levantamento do Diagrama Unifilar Elétrico das Unidades Consumidoras 27	
1.3.5 Levantamento dos Equipamentos das Unidades Consumidoras, Incluindo Características Técnicas.....	28
1.3.6 Levantamento dos Equipamentos de Medições Elétricas e Hidráulicas ..28	
1.3.7 Medições de Campo	28
1.3.8 Cálculo dos Indicadores de Desempenho Operacional.....	29
1.3.9 Cálculo dos Indicadores de Desempenho Financeiro	30
1.4 Objetivo Geral	30
2 Materiais e Métodos.....	32
2.1 Introdução	32
2.2 Descrição dos Materiais.....	32
2.2.1 Conjunto Motobombas	32
2.2.2 Acionamento dos Conjuntos Motobombas e Correção do Fator de Potência 34	
2.2.3 Equipamentos Utilizados para Medições de Grandezas Hidráulicas.....	35
2.2.4 Equipamento Utilizado para Medições de Grandezas Elétricas	37
2.3 Descrições dos Métodos.....	38
3 Resultados e Discussões	41
3.1 Medições Elétricas e Hidráulicas	41

3.2 Indicadores de Desempenho Operacional da Estação Elevatória da Violeira	45
3.3 Indicadores de Desempenho Financeiro da Estação Elevatória da Violeira	46
3.4 Volumes Úteis e Vazões Mínimas Necessárias Para Desligamento da Elevatória em Horário de Ponta	46
4 Conclusões	53
5 Referências Bibliográficas	54
Apêndice A – Tabelas com Características de Tubos e Tarifas de Energia	55
A.1 Tabela 11	55
A.2 Tabela 12	55
A.3 Tabela 13	56
Apêndice B – Dimensionamento do Conjunto Motobomba e Capacidade para Reservação de Água Tratada	57
B.1 Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta	57
B.2 Capacidade para Reservação de Água Tratada	62

Lista de Figuras

Figura 1: Parafuso de Arquimedes.....	15
Figura 2: Campo de emprego de bombas.....	16
Figura 3: Tipos de rotores.....	16
Figura 4: Bomba acima do nível do reservatório inferior.....	17
Figura 5: Bomba abaixo do nível do reservatório inferior.....	18
Figura 6: Associação de bombas em Série.....	19
Figura 7: Associação de bombas em Paralelo com aspiração independente.....	19
Figura 8: Associação de bombas em Paralelo com aspiração comum.....	20
Figura 9: Construção da curva característica da associação de 2 bombas iguais em série.....	20
Figura 10: Construção da curva característica da associação de 2 bombas diferentes em série.....	21
Figura 11: Associação de duas bombas iguais em paralelo.....	21
Figura 12: Associação de bombas diferentes em paralelo.....	22
Figura 13: Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo.....	32
Figura 14: Conjuntos Motobombas.....	34
Figura 15: Datalogger de Pressão.....	35
Figura 16: Macromedidor de vazão ultrassônico.....	36
Figura 17: Medidor magnético de inserção.....	36
Figura 18: Analisador de Qualidade de Energia.....	37
Figura 19: Diagrama Unifilar Simplificado da Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo.....	38
Figura 20: Diagrama Hidráulico simplificado.....	39
Figura 21: Comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória da Violeira do conjunto motobomba MB 01.....	42
Figura 22: Comportamento da vazão bombeada e a potência demandada para o conjunto motobomba MB 02 e MB 03 na Estação Elevatória da Violeira quando estão operando em paralelo.....	43
Figura 23: Comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada.....	44
Figura 24: Curva de Reservação.....	44
Figura 25: Tipos de Bombas (marca KSB), 60 Hz.....	59
Figura 26: Tamanho de 150 – 400 (marca KSB).....	59
Figura 27: Comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada para a nova bomba.....	61

Figura 28: Nova Curva de Reservação.....	61
--	----

Lista de Tabelas

Tabela 1: Divisão do Grupo A.	23
Tabela 2: Características dos Conjuntos Motobombas.	33
Tabela 3: Tipos de acionamentos dos conjuntos e suas respectivas potências do banco de capacitores.	35
Tabela 4: Valores medidos de algumas grandezas elétricas e hidráulicas.	41
Tabela 5: Indicadores de Desempenho Operacional.	45
Tabela 6: Indicadores de Desempenho Financeiro.	46
Tabela 7: Água Bruta que deve ser Bombeada para que possa ocorrer o Desligamento da Estação Elevatória no Horário de Ponta.	47
Tabela 8: Novos indicadores operacionais.	50
Tabela 9: Comparativo Situação Atual e Proposta.	51
Tabela 10: Novos indicadores de Desempenho Financeiro.	52
Tabela 11: Valor Total da Conta de Energia e Volume Bombeado para a Estação Elevatória em Estudo.	55
Tabela 12: Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen Willians.	55
Tabela 13: Comprimentos Equivalentes.	56
Tabela 14: Informações do cadastro técnico do SAAE – Viçosa.	57
Tabela 15: Resultados Obtidos.	58
Tabela 16: Água Bruta que Deve ser Bombeado para que possa ocorrer o Desligamento da Estação Elevatória no Horário de Ponta.	62

1 Introdução

Para aplicar medidas de eficiência a qualquer setor é necessário primeiramente obter todo o conhecimento do processo, através de análises, monitoramento e levantando dos parâmetros do mesmo. Dessa forma será possível fazer um diagnóstico e planejamento de otimização dos recursos disponíveis [1].

Estima-se 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 o desperdício de energia elétrica no abastecimento de água [3]. Aplicando ações de eficiência é possível reduzir de 20% a 25% do consumo de energia desse setor, o equivalente a cerca de 30% do total de energia demandado [1].

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 [2].

Dessa forma, este trabalho propõe avaliar a eficiência energética da estação elevatória do Rio Turvo Sujo que atende cerca de 50% da área urbana do município de Viçosa, MG [3]. Este estudo é útil para determinar se ocorre excesso de energia fornecido ao sistema, deixando-o mais eficiente energeticamente, ou seja, reduzindo o consumo energético, perdas e gastos.

Com isso, este estudo beneficiará: 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 é uma máquina que transfere energia ao fluido através de um eixo rotor, transformando o trabalho que recebe para seu funcionamento em energia, que é transformada em energia cinética e de pressão ao fluido. Uma das bombas mais antigas é a bomba de parafuso ou parafuso de Arquimedes, Figura 1, que era utilizada para elevação de líquidos entre dois pontos distintos [4].

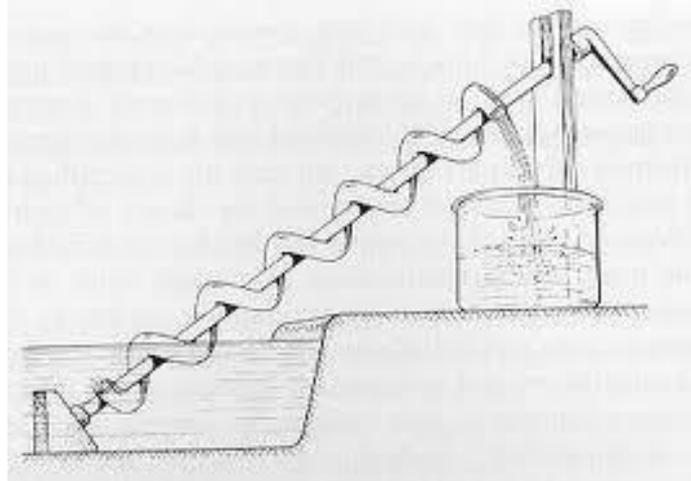


Figura 1: Parafuso de Arquimedes.

No sentido da transformação de energia, as bombas são consideradas máquinas geratrizes, devido ao fato delas transformarem energia mecânica em energia hidráulica. Quando essa conversão ocorre de forma inversa, ou seja, a energia hidráulica é transformada em energia mecânica, esse grupo é denominado de máquinas motrizes, que é composto pelas turbinas [5].

1.1.2 Classificação e Descrição

As bombas são comumente especificadas pela capacidade de pressão máxima de operação e pelo seu deslocamento, comumente em litros por minuto (l/min), em uma determinada rotação por minuto, onde a faixa de pressão é determinada pelo fabricante [6]. Elas podem ser classificadas em dois grandes grupos: as volumétricas ou de deslocamento positivo e as turbobombas ou hidrodinâmicas.

As bombas volumétricas têm esse nome devido ao fato que ela obriga o fluido a ocupar e desocupar espaços no interior da bomba de forma sucessiva, com volumes conhecidos. Elas possuem também uma ou mais câmaras sobre a qual algum elemento móvel atua aumentando a pressão e provocando o movimento do fluido. Essas bombas são indicadas para locais onde se deseja vazão constante independente de variação da carga sobre a bomba [6]. Elas ainda podem ser classificadas como Êmbolo ou Alternativas, e Rotativas.

Estas bombas alternativas e rotativas são comumente usadas em áreas com grandes pressões e pequenas descargas, conforme pode-se observar na Figura 2 [6].

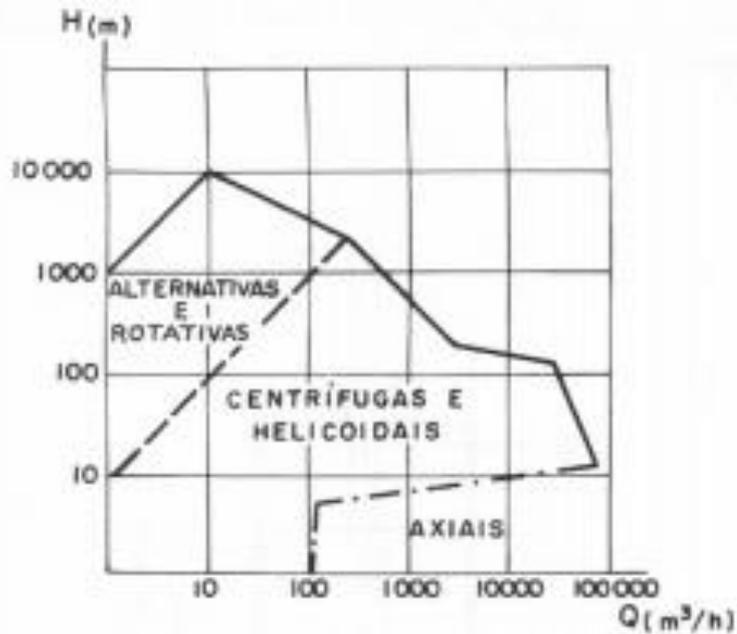


Figura 2: Campo de emprego de bombas.

Já com relação às turbobombas, elas são caracterizadas por possuírem um dispositivo rotatório dotado de pás, denominado rotor, movido por alguma fonte externa de potência através do seu eixo, cuja finalidade é aplicar aceleração a massa líquida para que ela adquira pressão e energia cinética [6]. O rotor, Figura 3, pode ser: fechado, quando existe uma coroa além do disco onde se fixa o rotor; aberto, quando não existe coroa circular; semi-aberto, quando existe apenas um disco onde se fixam as pás do rotor. Quando o líquido sai do rotor, ele possui uma elevada energia cinética, dessa forma as turbobombas necessitam de um difusor que transforma essa energia cinética em energia de pressão, fazendo com que o líquido ao atingir a boca de saída da bomba possua uma velocidade razoável. O difusor pode ser de tubo reto troncônico ou de caixa com forma de caracol.



Figura 3: Tipos de rotores.

1.1.3 Altura Geométrica e Manométrica

Os Conduitos com escoamento por gravidade são os ideais quando se pretende conduzir fluido de um local para outro. Mas a partir do esgotamento de desses locais topograficamente adequados, surgirá necessidade da aplicação de métodos para o transporte desse fluido [8].

Para transferir fluidos de locais topograficamente inadequados para escoamento por gravidade, é necessário fornecer energia ao fluido para obter maiores pressões, vazões e velocidades. Nestes sistemas utilizam-se bombas.

A altura geométrica, H_g , representa o valor do desnível geométrico vertical, H_g pode ser dividida em: altura de sucção, H_s , e altura de recalque, H_r , conforme é mostrado na Figura 4.

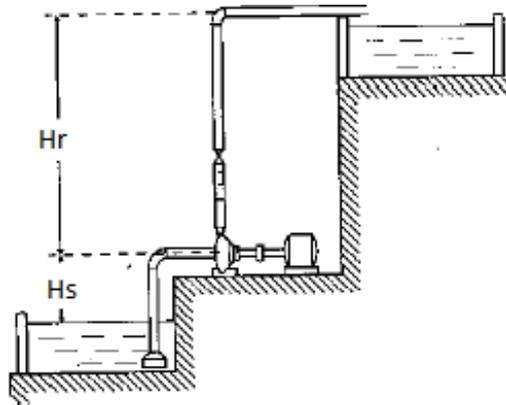


Figura 4: Bomba acima do nível do reservatório inferior.

A altura manométrica, H , representa a distância vertical mínima para que o fluido atinja o ponto desejado, ou seja, a altura geométrica, H_g , somada as perdas de energia do processo.

Pode-se determinar a altura manométrica, H , 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 4, obtém-se:

$$H = H_s + H_r + H_{fa} + H_{fr} \quad (1)$$

Onde:

H_{fa} = Perda de carga na sucção

H_{fr} = Perda de carga no recalque

A energia cinética é desprezada por ser muito pequena em relação ao total.

Caso a bomba se encontre afogada, conforme mostrado na Figura 5, a altura geométrica de sucção se encontra acima da bomba e, portanto tem sinal negativo.

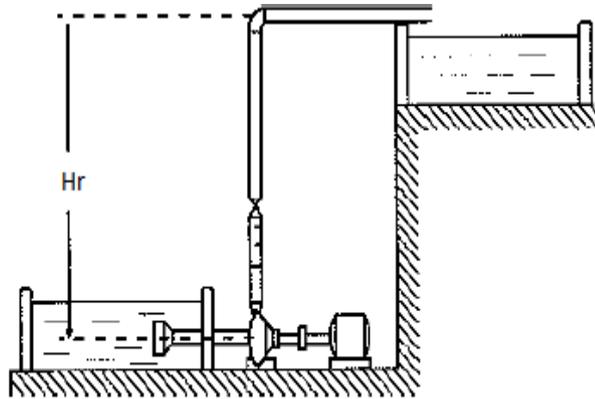


Figura 5: Bomba abaixo do nível do reservatório inferior.

Assim, para a Figura 5 temos que:

$$H = -H_s + H_r + H_{fa} + H_{fr} \quad (2)$$

1.1.4 Associação de Bombas

1.1.4.1 Introdução

Devido a grande variações de pressão e descarga que acontecem em uma estação elevatória surge a necessidade de instalar várias bombas no sistema. As bombas podem ser associadas em série ou em paralelo [7].

1.1.4.2 Associação em Série

A associação em série é adequada quando a altura manométrica é muito elevada e só é utilizada quando o valor desta altura ultrapassa os valores que podem ser alcançados por bombas de múltiplo estágio. Esta associação consiste na ligação do recalque de uma bomba na sucção da bomba seguinte, permitindo ao fluido receber energia de todas as máquinas da associação, Figura 6 [7].

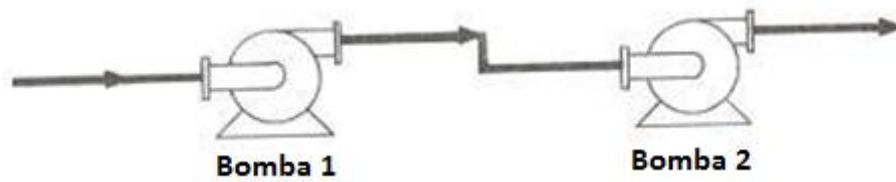


Figura 6: Associação de bombas em Série.

1.1.4.3 Associação em Paralelo

Este tipo de associação é utilizado quando a vazão desejada é muito elevada e em casos onde a vazão desejada é variável. Uma das vantagens deste tipo de associação é a segurança operacional que ela proporciona, pois em caso de falha em uma das máquinas, não haverá o colapso total no fornecimento, embora a vazão diminua consideravelmente. Neste tipo de associação, a tubulação de recalque é comum às várias máquinas do conjunto, sendo que a aspiração pode se dar de forma independente (Figura 7) ou através de uma tubulação comum (Figura 8) sendo que neste último caso deve-se tomar um cuidado maior com a escolha do diâmetro da tubulação de aspiração para se evitar velocidades excessivas [7].

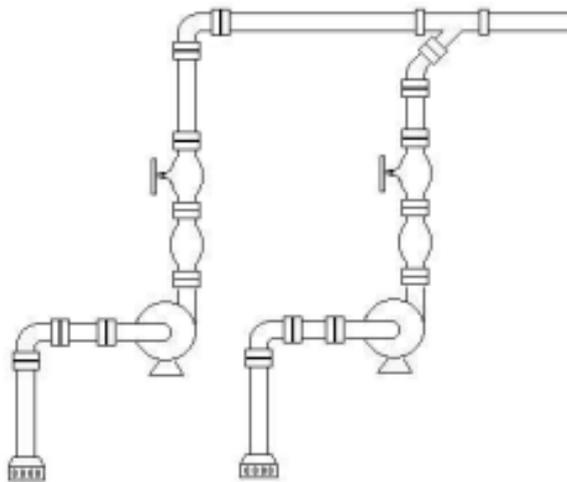


Figura 7: Associação de bombas em Paralelo com aspiração independente.

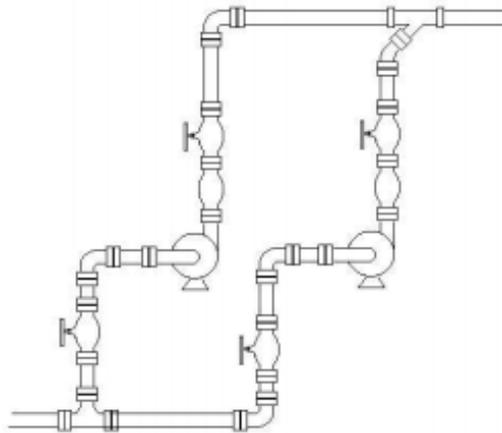


Figura 8: Associação de bombas em Paralelo com aspiração comum.

1.1.5 Curva característica

1.1.5.1 Associação em Série

A curva característica do conjunto é obtida a partir das curvas de cada uma das bombas, somando-se as alturas manométricas correspondentes aos mesmos valores de vazão. Nas Figuras 9 e 10 estão esquematizadas curvas de associações de 2 bombas iguais e 2 diferentes, respectivamente. É importante ressaltar que as construções das curvas das associações consideram que os rendimentos das máquinas não se alteram com a associação, o que nem sempre é verdadeiro, pois as condições de operação da segunda máquina são bastante diferentes daquelas utilizadas nos testes para a determinação das curvas características [7].

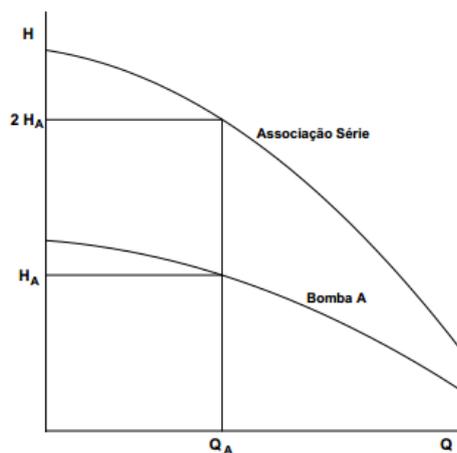


Figura 9: Construção da curva característica da associação de 2 bombas iguais em série.

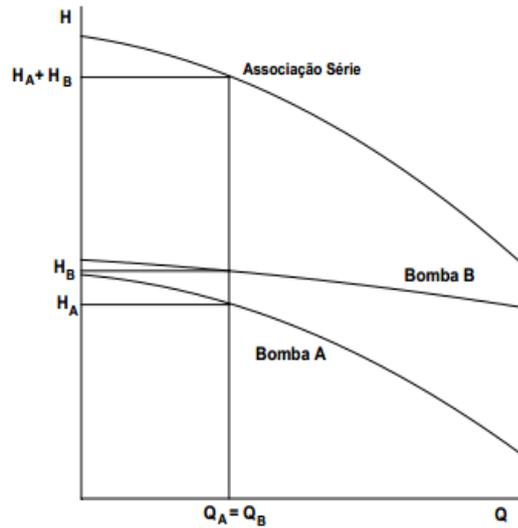


Figura 10: Construção da curva característica da associação de 2 bombas diferentes em série.

1.1.5.2 Associação em Paralelo

A curva característica da associação será obtida somando-se para cada valor de H , as vazões de cada uma das bombas. Considerando duas bombas iguais funcionando com a mesma rotação, a curva característica da associação será a esquematizada na Figura 11. Para bombas diferentes, o procedimento é o mesmo e é mostrado na Figura 12 [7].

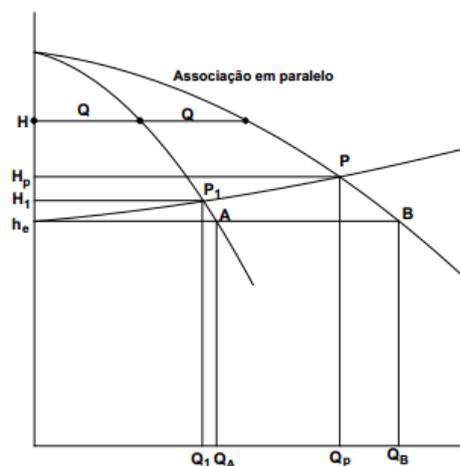


Figura 11: Associação de duas bombas iguais em paralelo.

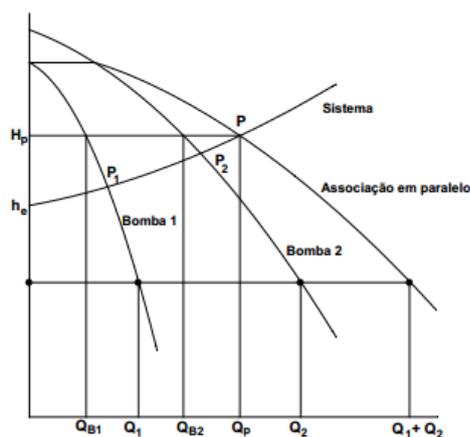


Figura 12: Associação de bombas diferentes em paralelo.

1.2 Tarifas de Energia

1.2.1 Introdução

Entre as décadas de 70 e 90 as concessionárias de energia elétrica não eram incentivadas a buscarem uma maior eficiência energética, pois naquela época havia apenas uma única tarifa de energia elétrica para todo o país. As empresas que não possuíam lucro eram mantidas por aquelas que davam lucro e pelo Governo Federal. A remuneração mínima prevista para as concessionárias não era atingida, gerando um círculo vicioso, com inadimplência entre distribuidoras e geradoras e falta de capacidade econômico-financeira para a realização de novos investimentos [9].

Dessa forma surgiu a necessidade da criação de uma Lei que garantisse uma tarifa que fosse fixada pela concessionária e que fosse aprovada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), surgindo assim a Lei 8.631/1993. E em 1995 foi aprovada a Lei nº 8.987/1995 que garantiu o equilíbrio econômico-financeiro às concessões de distribuição de energia elétrica, estabelecendo uma tarifa por concessão [9].

As tarifas de energia refletem peculiaridades de cada região, como números de consumidores, quilômetros de rede e tamanho do mercado (quantidade de energia atendida por uma determinada infra estrutura), custo da energia comprada, tributos estaduais e outros [9].

A tarifa foi criada para garantir com qualidade o fornecimento de energia elétrica e dar segurança as concessionárias para custear custos operacionais e

investimentos que venham a ser necessários para garantir uma boa qualidade de atendimento ao cliente.

Toda concessionária possui a obrigação de fornecer energia elétrica aos seus consumidores. Mas para cumprir esse compromisso ela inclui na tarifa os seus custos necessários para o fornecimento, que são eles: Geração de energia elétrica; Transmissão e distribuição da energia elétrica; Encargos e tributos; E transporte de energia até as unidades consumidoras [9].

1.2.2 Classificação dos consumidores

Os consumidores são classificados pelo nível de tensão em que são atendidos. Os consumidores atendidos em baixa tensão, em geral em 127 ou 220 volts, como residências, lojas, agências bancárias, edifícios residenciais e boa parte dos edifícios comerciais, são classificados no Grupo B [10].

O Grupo B é dividido em sub-grupos, de acordo com a atividade do consumidor. Os consumidores residenciais urbanos, por exemplo, são classificados como B1, e os rurais como B2 [10].

Os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2300 volts, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais, são classificados no Grupo A. Esse grupo é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, como mostrado Tabela 1 [10].

Tabela 1: Divisão do Grupo A.

Subgrupos	Tensão de Fornecimento
A1	$\geq 230\text{KV}$
A2	88 KV a 138 KV
A3	69 KV
A3a	30 KV a 44 KV
A4	2,3 KV a 25 KV
AS	Subterrâneo

Os consumidores do Grupo B são cobrados apenas pela energia elétrica que consomem. Já os consumidores do Grupo A são cobrados pela demanda contratada e pela energia que consomem.

1.2.3 Tarifas para Consumidores do Grupo A

1.2.3.1 Tarifação Convencional

Nesse tipo de tarifação é exigido um contrato entre a concessionária e a unidade consumidora, discriminando um único valor pretendido pelo contratante, independente da hora do dia ou período do ano. A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem. Os consumidores dos sub-grupos A3a, A4 ou AS, podem ser enquadrados na tarifa Convencional quando a demanda contratada for inferior a 300 kW, desde que não tenham ocorrido, nos 11 meses anteriores, 3 registros consecutivos ou 6 registros alternados de demanda superior a 300 kW [10].

1.2.3.2 Tarifação Horo-Sazonal Verde

Os consumidores dos sub-grupos A3a, A4 ou AS podem ser enquadrados nessa tarifação, mas é opcional. Para esse tipo de tarifação também é necessário um contrato entre a concessionária e a unidade consumidora, discriminando um único valor pretendido pelo contratante, independente da hora do dia ou período do ano. A resolução 456 permite aos consumidores contratar dois valores diferentes de demanda durante o ano, um para o período seco e outro para o período úmido. A conta de energia elétrica desses consumidores é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem [10].

1.2.3.3 Tarifação Horo-Sazonal Azul

Esse tipo de tarifação é obrigatória para consumidores dos sub-grupos A1, A2 ou A3. Essa tarifação exige um contrato entre a concessionária e a unidade consumidora, discriminando um único valor pretendido pelo contratante no horário de ponta e o valor pretendido nas horas fora do horário de ponta. A conta de energia elétrica desses consumidores também é composta da soma de parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem [10].

1.3 Diagnóstico de Sistemas

1.3.1 Introdução

Diagnosticar um sistema é determinar as possíveis melhorias para possibilitar uma eficiência hidroenergética, atuando na redução do consumo de energia elétrica e potência no horário de ponta no sistema elétrico nacional.

Atualmente para diagnosticar um sistema hidroenergético, utiliza-se uma pesquisa das contas de energia, pois através delas pode-se obter indicações sobre as instalações mais promissoras para sofrer intervenções para um melhor aproveitamento da eficiência hidroenergética do sistema [11].

O indicador de Consumo específico de energia (CE), apresentado na equação (5), representa a energia elétrica necessária para bombear 1 m³ de água na instalação em análise[12]. Nesse trabalho, utilizou-se o CE para verificar a eficiência energética dos conjuntos moto-bombas presente na Estação Elevatória da Violeira.

$$CE = \frac{EE_{cons}}{V_{bomb}} \quad (5)$$

Onde:

CE = Consumo específico de energia, em KWh/m³.

EE_{cons} = Energia Elétrica consumida, em KWh.

V_{bomb} = Volume bombeado, em m³.

Se 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.

De acordo com [12], deve ser feito as medições das grandezas elétricas e hidráulicas para diagnóstico de um sistema específico, outras etapas desse 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 motobombas;
- Cálculos dos indicadores de desempenho operacional;
- Cálculos dos indicadores de desempenho financeiro.

As etapas mencionadas acima estão relacionadas nas próximas seções.

1.3.2 Levantamento do Diagrama Simplificado Eletro-Hidráulico do Sistema

Esse diagrama tem a função de demonstrar uma visualização simples do conjunto de unidades consumidoras, onde 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

Possui a função de fornecer dados sobre a condição do suprimento de energia elétrica fornecido pela concessionária as unidades consumidoras. Através desse levantamento obtêm-se a necessidade de medidas corretivas, tais como: baixo fator de carga, multas por baixo fator de potência e multa por ultrapassagem da demanda contratada.

1.3.4 Levantamento do Diagrama Unifilar Elétrico das Unidades Consumidoras

Através desse levantamento é possível verificar as condições operacionais e proposição de alterações. 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;
- Transformadores de corrente e potencial para medição
- Disjuntores;
- Chaves seccionadoras;
- 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 [12], deve ser levantada a documentação existente, contendo os dados dos equipamentos instalados nas estações de bombeamento, principalmente no que se refere aos conjuntos motobombas, a fim de obter-se:

- 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

O levantamento dos Equipamentos de medições elétricas e hidráulicas tem a finalidade de determinar não somente o rendimento e o 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.

1.3.7 Medições de Campo

Através das medições de campo é que se obtém um diagnóstico do sistema em relação a sua eficiência energética, para que com os dados medidos possam-se fazer alterações com o objetivo de economia de energia elétrica.

Para a obtenção de dados consistentes é necessário que 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. Estas grandezas são determinadas por analisadores de grandezas elétricas, instrumentos que podem registrar os valores a intervalos de tempo pré-definidos.

As grandezas hidráulicas a registrar são, principalmente, vazões e pressões. O registro pode ser feito em *dataloggers* (dispositivos eletrônicos de armazenamento dos dados das medições) colocados em pontos que permitem caracterizar o estado operativo.

1.3.8 Cálculo dos Indicadores de Desempenho Operacional

O consumo específico de energia elétrica (CE) é um dos indicadores mais comuns para determinar a eficiência energética no setor de saneamento [13].

Através do CE é possível 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. Isto porque diferentes sistemas recalcam água a diferentes alturas manométricas.

Para contornar a limitação que o CE possui, a IWA (*Internacional WaterAssociation*) propôs reduzir as alturas manométricas de diferentes instalações a uma altura única, de modo a permitir a comparação do desempenho destas. Assim criou-se o Consumo Específico de Energia Normalizado (CEN), Equação 6, 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[14].

$$CEN = \frac{EE_{cons}}{V_{bomb}} \frac{1}{\frac{H}{1000}} \quad (6)$$

Onde:

CEN = Consumo específico de energia normalizada, em KWh/m³.

EE_{cons} = Energia Elétrica consumida, em KWh.

V_{bomb} = Volume bombeado, em m³.

H = Altura manométrica, em mca.

Segundo [13], 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. Assim, conhecendo-se três das variáveis mostradas na equação (7), a quarta pode ser determinada, onde η é o rendimento da bomba.

$$\frac{\eta_{inicial}}{\eta_{final}} = \frac{CEN_{final}}{CEN_{inicial}} \quad (7)$$

1.3.9 Cálculo dos Indicadores de Desempenho Financeiro

Os indicadores de desempenho financeiro reúnem informações das contas de energia e do monitoramento do volume bombeado pelas instalações [13].

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. 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 [11].

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. 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 [11].

1.4 Objetivo Geral

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

A partir do objetivo geral, têm-se também como objetivos específicos:

- Realizar um diagnóstico do sistema hidroenergético atual, realizando medições elétricas e hidráulicas simultaneamente;
- Diagnosticar os volumes úteis e vazões mínimas necessárias para o armazenamento de água e adução necessária com o desligamento da elevatória no horário de ponta do sistema elétrico nacional;
- Verificar a possibilidade de desligamento do conjunto motobomba no horário de ponta do sistema elétrico nacional, das 17 às 20hrs fora do horário de verão e das 18 às 21hrs durante o horário de verão;
- Verificar o enquadramento 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 de campo.

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 [3].

O estudo de eficiência energética foi realizado em uma das instalações do SAAE, a Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo, localizada no Bairro da Violeira em Viçosa, onde é feito o bombeamento para a Estação de Tratamento de Água da Violeira (ETA II).

2.2 Descrição dos Materiais

2.2.1 Conjunto Motobombas

A Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo, Figura 13, possui três conjuntos motobombas, Figura 14, com informações de placa, conforme a Tabela 2.



Figura 13: Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo.

Tabela 2: Características dos Conjuntos Motobombas.

Identificação	MB 01	MB 02	MB 03
Marca do Motor	EBERLE	WEG	WEG
Tipo do Motor	Alto Rendimento	Convencional	Convencional
Tipo do Rotor	Gaiola de Esquilo	Gaiola de Esquilo	Gaiola de Esquilo
Potência	125 CV	30 CV	30 CV
Tensão Y/ Δ	220/380 V	220/380 V	220/380 V
Corrente	293/169 A	76/44 A	76/44 A
Rotação	1775 RPM	1765 RPM	1765 RPM
Fator de Serviço	1.0	1.15	1.15
Marca da Bomba	KSB	KING	KING
Tipo de Bomba	Centrífuga	Centrífuga	Centrífuga
Vazão	540 m ³ / h	-	-
Altura Manométrica	42 mca	-	-
Ano de Fabricação	-	1998	1998



Figura14: Conjuntos Motobombas.

2.2.2 Acionamento dos Conjuntos Motobombas e Correção do Fator de Potência

Os Conjuntos Motobombas são acionados por Partida Compensadora com Autotransformador e por Soft-Starter. A Tabela 3 apresenta os tipos de acionamentos dos conjuntos e suas respectivas potências do banco de capacitores.

Tabela 3: Tipos de acionamentos dos conjuntos e suas respectivas potências do banco de capacitores.

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	30 Kvar	25 Kvar no painel (MB 02 e MB03 dividem o mesmo painel)	

2.2.3 Equipamentos Utilizados para Medições de Grandezas Hidráulicas

- *Datalogger* de pressão da marca LAMON, Figura 15. Este equipamento permite medir e registrar os valores de pressão.



Figura 15: Datalogger de Pressão.

- Macromedidor de vazão ultrassônico da marca MICRONICS LTD, Figura 16. Este equipamento permite registrar simultaneamente as vazões instantâneas e o volume totalizado.



Figura 16: Macromedidor de vazão ultrassônico.

- Medidor magnético de inserção, Figura 17, permite registrar o volume total de água que sai do reservatório.



Figura 17: Medidor magnético de inserção.

2.2.4 Equipamento Utilizado para Medições de Grandezas Elétricas

As medições para as grandezas elétricas foram realizadas com o analisador de qualidade de energia da marca INSTRUTHERM, modelo AE 100, Figura 18. Este equipamento registra simultaneamente vários parâmetros relacionados à energia elétrica, tais como: fator de potência, tensão e corrente.



Figura 18: Analisador de Qualidade de Energia.

2.3 Descrições dos Métodos

A Figura 19 apresenta o diagrama unifilar simplificado da Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo.

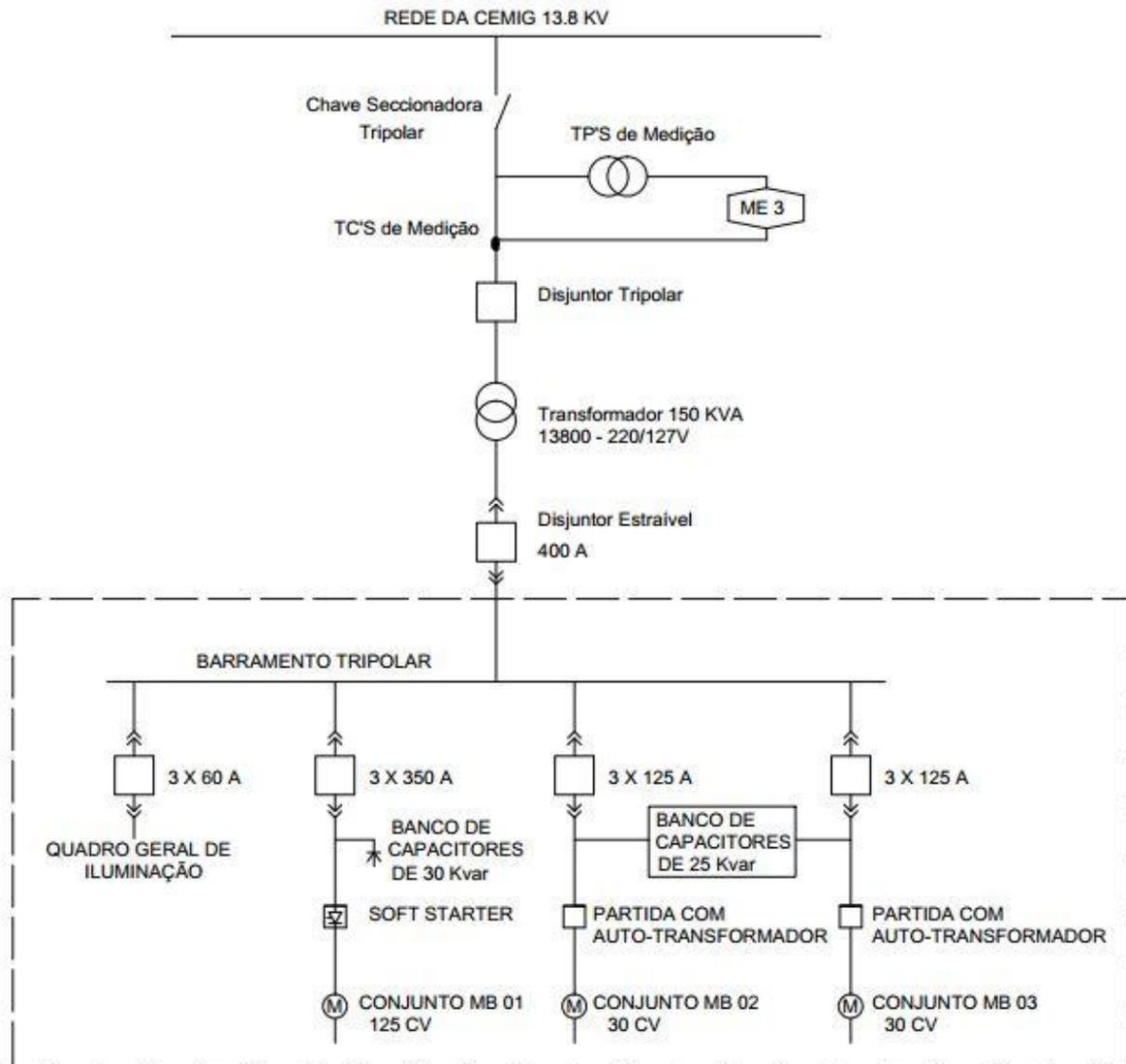


Figura 19: Diagrama Unifilar Simplificado da Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo.

Na Figura 20 temos o diagrama Hidráulico simplificado, desde a Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo até a estação de Tratamento de Água da Violeira (ETA II).

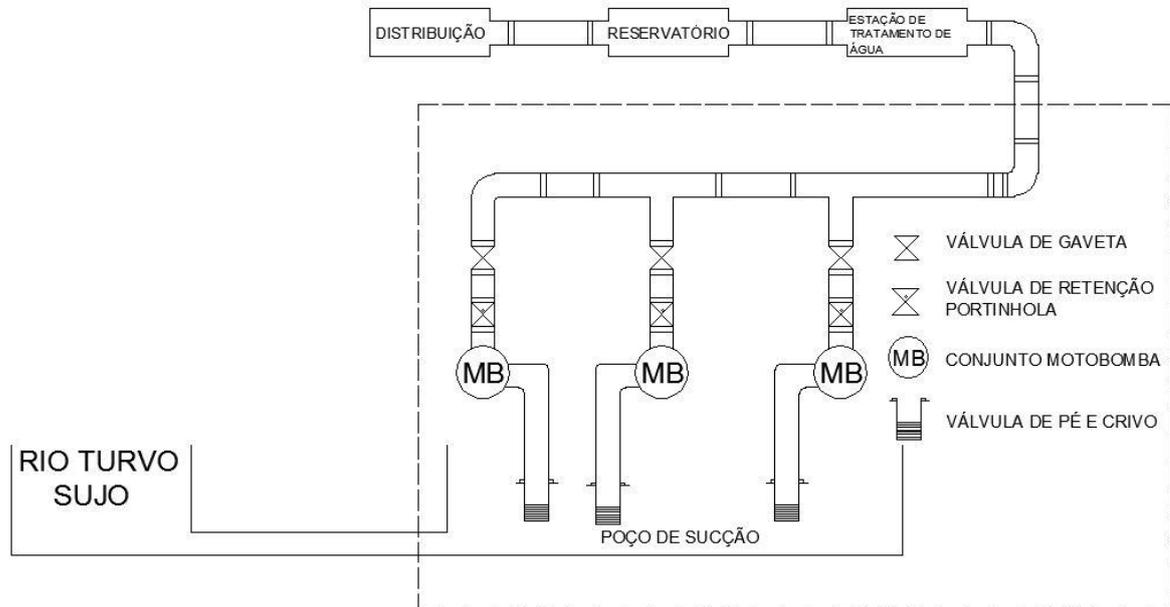


Figura 20: Diagrama Hidráulico simplificado.

Na Figura 20 observa-se três válvulas essenciais para um sistema de bombeamento:

- Válvula de gaveta: possui o acionamento similar ao de uma gaveta de armário, onde o disco da válvula entra no fluido e o bloqueia, sai do fluxo e permite que ele flua.
- Válvula de retenção e portinhola: possui a função de evitar o retorno de fluxo na tubulação.
- Válvula de pé e crivo: possui a função de reter a coluna d'água quando houver paralisação das bombas.

A Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo possui três conjuntos motobombas em operação que seguem o seguinte regime de operação:

- Conjunto motobomba MB – 01: Operação isolada, fora do horário de ponta do sistema elétrico nacional;
- Conjunto motobomba MB – 02 e MB – 03: Operam em paralelo quando o conjunto MB – 01 está fora de operação. Estes conjuntos funcionam tanto no horário de ponta do sistema elétrico nacional quanto fora do horário de ponta quando há necessidade;

Todas as medições hidráulicas e elétricas foram realizadas simultaneamente para que o sistema fosse caracterizado de forma completa.

As medições hidráulicas foram realizadas no período compreendido entre os dias 03 de Outubro de 2014 a 04 de Novembro de 2014, na Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo e na Estação de Tratamento de Água da Violeira (ETA II), conforme a 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 10 minutos;
- Vazão de Água Bruta: na adutora de água bruta por recalque foi instalado um macromedidor de vazão ultrasônico. Estes dados foram coletados com amostragem de 12 minutos;
- Consumo de Água Tratada: a adutora de água tratada possui um medidor magnético de inserção, sendo que seus dados foram coletados com amostragem de 12 minutos.

As medições elétricas foram realizadas com o analisador de qualidade de energia instalado no quadro de comandos de cada conjunto motobomba da Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo Sujo, sendo coletadas durante o período de um mês com amostragem de 2 minutos.

3 Resultados e Discussões

3.1 Medições Elétricas e Hidráulicas

A Tabela 4 apresenta os valores medidos de algumas grandezas elétricas e hidráulicas para os conjuntos motobombas estudados.

Tabela 4: Valores medidos de algumas grandezas elétricas e hidráulicas.

Identificação	MB – 01	MB – 02	MB – 03
Potência Nominal	125 CV	30 CV	30 CV
Potência Medida	104,84 CV	38,94 CV	38,94 CV
Tensão Média	215,01 V	216,25 V	216,25 V
Corrente Média	215,06 A	80, 71 A	80,71 A
Fator de Potência	0,96	0,94	0,94
Marca da Bomba	KSB	KING	KING
Vazão Nominal	540 m ³ /h	-	-
Vazão Média	376,60 m ³ /h	212,49 m ³ /h	212,49 m ³ /h
Altura Manométrica	33,10 mca	33,11 mca	33,11 mca

Analisando a Tabela 4, observa-se que cada um dos conjuntos Motobombas MB 02 e MB 03, operam com potência de cerca de 30% superior a informada na placa de seus motores, esse fato pode ter ocorrido devido a rebobinagens que foram efetuadas nos motores. Constatou-se também que o conjunto motobomba MB 01 opera com cerca de 16% a menos de potência e 30% a menos de vazão do que a informada em sua placa. O fator de potência dos conjuntos Motobombas MB 01, MB 02 e MB 03 são respectivamente 0.96, 0.94 e 0.94, dessa forma não há necessidade de correção do fator de potência, pois estão superiores ao mínimo exigido que é de 0.92.

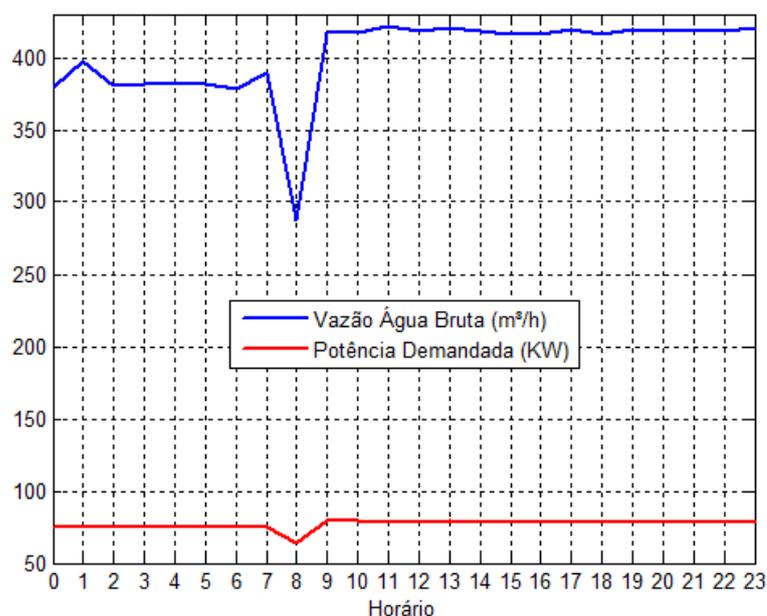


Figura 21: Comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória da Violeira do conjunto motobomba MB 01.

Na Figura 21, temos o comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória da Violeira do conjunto motobomba MB 01 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.

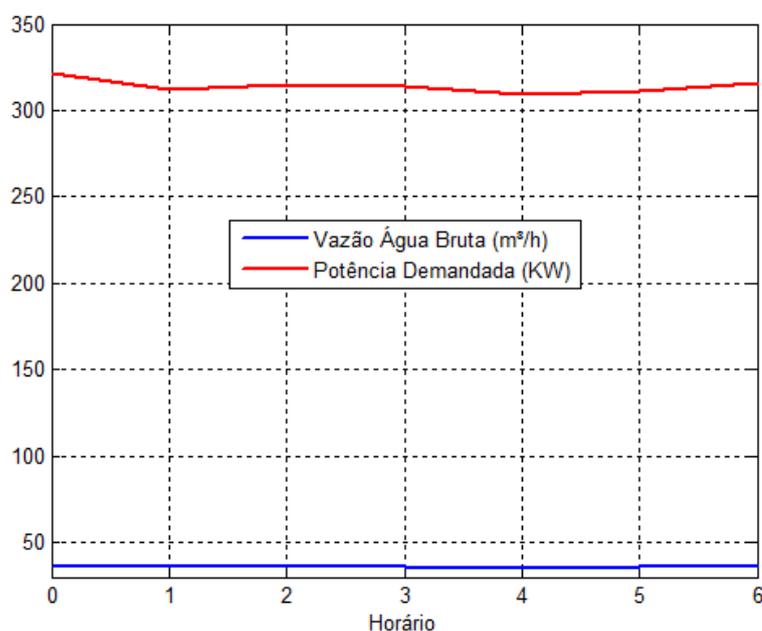


Figura 22: Comportamento da vazão bombeada e a potência demandada para o conjunto motobomba MB 02 e MB 03 na Estação Elevatória da Violeira quando estão operando em paralelo.

A Figura 22 apresenta o comportamento da vazão bombeada e a potência demandada na Estação Elevatória da Violeira, para o conjunto motobomba MB - 02 e MB - 03 quando estão operando em paralelo no período de 0 às 6:00 h, tendo em vista que os conjuntos motobombas MB 02 e MB 03 apresentam o mesmo comportamento apresentado na Figura 22.

Analisando as Figuras 21 e 22, temos que o conjunto motobomba MB 01 demanda uma potência média de aproximadamente 77 kW para uma vazão média de aproximadamente 402 m³/h, enquanto o conjunto MB 02 e MB 03, operando em paralelo, demandam cada um, aproximadamente 35,6 kW para uma vazão aproximada de 314 m³/h.

Observa-se também na Figura 21 que ocorre uma demanda maior de água bruta no período de 9 às 23hrs, esse período corresponde a uma maior demanda de água tratada pela população, dessa forma aumenta-se a vazão de água bruta para a estação de tratamento de água para atender essa demanda. No período de 7 às 9hrs ocorre uma queda de vazão, devido ao reservatório de água tratada encontrar-se com água que foi armazenada durante a madrugada, que é o período de menor consumo de água tratada.

Na Figura 23 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 de água bruta em função da demanda de água tratada. Onde pode-se observar que a vazão de água bruta é quase sempre superior a de água tratada, menos no período entre 6:30 às 9:30h, onde a população é parcialmente atendida pela água tratada que foi armazenada no reservatório durante a madrugada, onde a demanda de água tratada é menor.

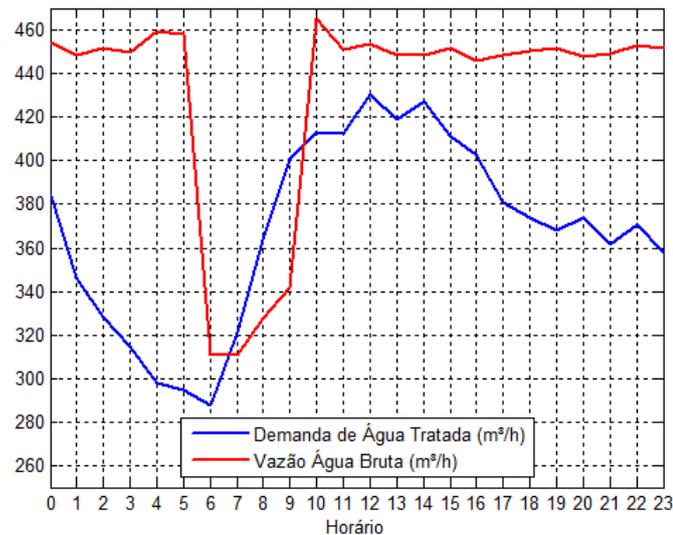


Figura 23: Comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada.

Na Figura 24, 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.

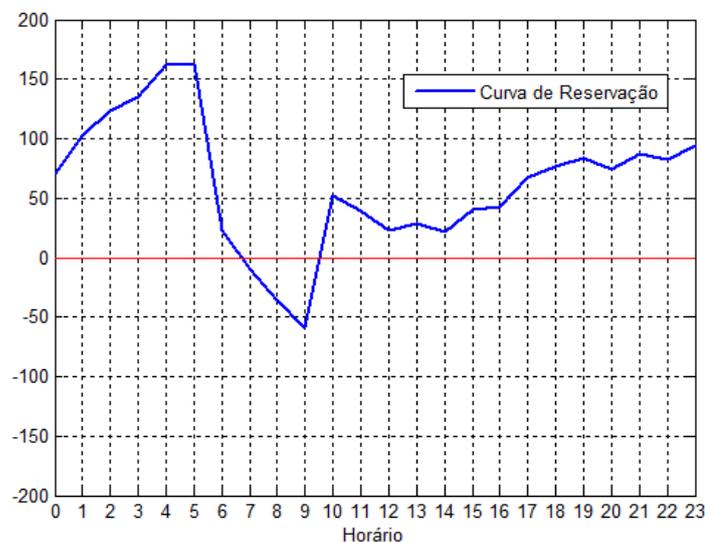


Figura 24: Curva de Reservação.

Analisando a curva de reservação, Figura 24, observa-se que no período de 0:00 às 6:30hrs e de 9:30 às 23:00hrs, temos água tratada sendo acumulada no reservatório, dessa forma quando a vazão demandada for maior que a vazão de água bruta não faltará água.

3.2 Indicadores de Desempenho Operacional da Estação Elevatória da Violeira

A Tabela 5 apresenta os valores do volume bombeado, da energia consumida, da altura manométrica, do consumo específico de energia elétrica (CE) e o consumo específico de energia elétrica normalizada (CEN) para os conjuntos MB 01 operando de forma isolada e para cada um dos conjuntos MB 02 e MB 03 operando em paralelo.

Tabela 5: Indicadores de Desempenho Operacional.

Identificação	Volume Bombeado (m³)	Energia Consumida (KWh)	H(m)	CE(KWh/m³)	CEN (KWh/m³)
MB 01	402	77	33,10	0,19154229	0,57867761
MB 02	314	35,6	33,11	0,11337580	0,34242162
MB 03	314	35,6	33,11	0,11337580	0,34242162

Analisando a Tabela 5 pode-se concluir que os conjuntos motobombas MB 02 e MB 03 atuando em paralelo possuem maior rendimento e o conjunto motobomba MB 01 possui menor rendimento, visto que o CE e o CEN são menores nestas motobombas. Esse fato deve-se por o conjunto MB 01 já esta operando ha mais anos do que os conjuntos MB 02 e MB 03.

3.3 Indicadores de Desempenho Financeiro da Estação Elevatória da Violeira

A Tabela 6 apresenta 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 da Violeira, utilizando as tarifas praticadas pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, em outubro de 2014, conforme Tabela 11, apêndice A.

Tabela 6: Indicadores de Desempenho Financeiro.

Valor Total da Conta de Energia (R\$)	Consumo Total de Energia (MWh)	Volume Bombeado (m³)	CMEE (R\$/MWh)	CVB (R\$/1000m³)
R\$ 20.040,30	52,644	271.152	380,68	73,91

Analisando a Tabela 6, temos que o custo efetivo do MWh é de R\$ 380,68 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 73,91.

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

Através de informações fornecidas pelo cadastro técnico do SAAE de Viçosa, adotou-se a capacidade do reservatório de água tratada utilizado pela estação de tratamento de água II, localizado no Bairro Silvestre, com volume útil de 1000 m³, dessa forma o volume útil necessário para desligamento da Elevatória em horário de ponta não poderá ser superior ao volume útil do reservatório.

A Tabela 7 apresenta o volume de água bruta que deve ser bombeado para que possa ocorrer o desligamento da estação elevatória no horário de ponta.

Tabela 7: Água Bruta que deve ser Bombeada para que possa ocorrer o Desligamento da Estação Elevatória no Horário de Ponta.

Hora	Volume de Entrada (m³/h)	Volume de Saída (m³/h)	Saldo	
			Entrada	Saída
1	463,10	422,60	40,5	
2	463,10	380,46	82,64	
3	463,10	360,83	102,27	
4	463,10	345,82	117,28	
5	463,10	327,6	135,5	
6	463,10	324,17	138,93	
7	463,10	316,38	146,72	
8	463,10	353,15	109,95	
9	463,10	399,94	63,16	
10	463,10	440,54	22,56	
11	463,10	454,33	8,77	

12	463,10	453,69	9,43	
13	463,10	473,67		-10,57
14	463,10	461,05	2,05	
15	463,10	470,13		-7,03
16	463,10	452,47	10,63	
17	0,00	443,15		-443,15
18	0,00	418,81		-418,81
19	0,00	411,55		-411,55
20	463,10	404,51	58,59	
21	463,10	411,55	51,55	
22	463,10	397,79	65,31	
23	463,10	407,33	55,77	
24	463,10	393,60	69,5	
Total	9725,10	9725,06	1291,1	1291,1

Vazão Média (m ³ /h)	405,21	Volume Útil Necessário (m ³)
---------------------------------	--------	--

Analisando a Tabela 7, verifica-se que seria necessário um conjunto motobomba com vazão mínima de 463,10 m³/h para que possa ocorrer o desligamento da Estação Elevatória no horário de ponta do sistema elétrico nacional. Esse valor foi calculado através do volume de saída total, dividido pelo tempo de funcionamento que queremos do conjunto motobomba, 21h. Para isso seria necessária a substituição de todos os conjuntos motobombas por um ou mais conjuntos motobombas que atendesse a essa demanda (é importante considerar a permanência do conjunto MB 01 antigo como reserva do(s) novo(s) conjunto(s) motobomba(s) que será(ão) dimensionado(s)). Essa medida é tecnicamente e economicamente viável, tendo em vista que trará economia na conta de energia elétrica e com essa economia será possível financiar o(s) novo(s) conjunto(s) motobomba(s). Percebe-se também que o volume útil necessário é maior que o volume útil do reservatório (1000 m³), dessa forma também seria necessário uma ampliação do reservatório em pelo menos 291,1m³ para atender a nova demanda (este valor foi calculado desprezando as perdas durante o processo), mas dessa forma, o reservatório irá para o nível zero após o horário de ponta, assim, deve-se considerar a demanda de água tratada para a próxima hora, que é de 404,51 m³, logo, seria necessária a ampliação do reservatório em pelo menos 695,61 m³.

3.5 Proposta para Eficientização da Estação Elevatória de Água Bruta do Rio Turvo

Para a elaboração da proposta, levou-se em consideração as seguintes informações fornecidas pelo SAAE:

- Capacidade máxima de tratamento de água da ETAII: 540m³/h;
- Vazão média do manancial Rio Turvo disponível para bombeamento em período de estiagem: 585,40m³/h.

3.5.1 Proposta: Bombeamento Constante e Nulo no Horário de Ponta

Para manter o bombeamento constante e nulo no horário de ponta do sistema elétrico nacional seria necessária uma vazão mínima de 463,10 m³/h e capacidade de reservação de 1291,1 m³, conforme foi demonstrado na Tabela 7.

Devido a limitações encontradas nos conjuntos motobombas existentes, propõem-se a instalação de um novo conjunto motobomba que atenda às necessidades pretendidas. No Apêndice B, B.1, encontram-se os cálculos deste dimensionamento. A partir destes cálculos, chega-se aos valores apresentados na Tabela 8, dos novos indicadores operacionais, onde observa-se que somente uma bomba com a mesma vazão nominal da MB 01 conseguirá suprir a demanda e com um CEN inferior ao da MB 01.

A implementação desta proposta implicará em significativa redução do custo com energia elétrica, como é demonstrado na Tabela 9, onde podemos comparar o consumo e o custo com energia considerando a operação atual e a proposta.

Tabela 8: Novos indicadores operacionais.

Identificação	Volume Bombeado (m³)	Energia Consumida (KWh)	H (m)	CE (KWh/m³)	CEN (KWh/m³)
MB 01	510	119,40	47,75	0,23411764	0,49029873

Analisando a Tabela 9, verificamos que não há necessidade de um reenquadramento tarifário, pois como foi abordado no item 1.2.3.2, será contratada uma demanda única que não irá atuar no horário de ponta do sistema elétrico nacional. O valor da nova fatura (THS Verde) reduzirá cerca de 14% em relação a situação atual, observa-se que o volume bombeado da proposta aumentou 18% em relação a situação atual.

Tabela 9: Comparativo Situação Atual e Proposta.

Situação Atual			
THS Verde	Consumo	Tarifa (R\$)	Valor em R\$
Demanda HP (KW)	-	-	-
Demanda HFP (KW)	84	10,61810721	887,91
Energia HP (KWh)	5002	1,31785073	6591,87
Energia HFP (KWh)	47642	0,26364452	12,560,52
Valor Total da Fatura			R\$ 20.040,30
Volume Bombeado por Mês (m ³)			271.152
Situação Proposta			
Demanda HP (KW)	0,00	-	0,00
Demanda HFP (KW)	98,00	10,61810721	1040,57
Energia HP (KWh)	0,00	1,31785073	0,00
Energia HFP (KWh)	61740	0,26364452	16277,41

Valor Total da Fatura	17317,98
Volume Bombeado por Mês (m ³)	321.300

Tabela 10: Novos indicadores de Desempenho Financeiro.

Valor Total da Conta de Energia (R\$)	Consumo Total de Energia (MWH)	Volume Bombeado (m³)	CMEE (R\$/MWh)	CVB(R\$/1000 m³)
17317,98	61,74	321.300	280,50	53,90

A Tabela 10 apresenta os novos indicadores de desempenho financeiro, onde nota-se que o custo do MWh é de R\$ 280,50 e o custo de cada 1000 m³ bombeado é de R\$ 53,90. Comparando os indicadores financeiros desta proposta com os do sistema atual (Tabela 6), observa-se que o custo médio da energia elétrica foi reduzido em aproximadamente 26% e o custo médio da energia elétrica por metro cúbico bombeado teve redução de 27%.

Além disso, observa-se no Apêndice B, B.2 que será necessária a ampliação do reservatório existente para utilizar o novo conjunto motobomba em pelo menos 723,17 m³.

4 Conclusões

A energia elétrica é essencial no sistema de saneamento, desde o bombeamento da água por adutoras até a chegada de água potável nas residências. Dessa forma, as ações de melhoria dos sistemas elétricos são tão importantes quanto o uso racional da água.

Este trabalho apresentou um estudo sobre o consumo de energia elétrica atual da Estação Elevatória do Rio Turvo Sujo em Viçosa-MG onde foi proposta uma solução implementando ações economicamente viáveis de eficiência energética, através de medições elétricas e hidráulicas, que foram realizadas simultaneamente.

Os indicadores de desempenho aplicados comprovam teoricamente que as medidas sugeridas reduzem o consumo de energia da estação elevatória, tornando-a mais eficiente. Através dos indicadores operacional e financeiro foi possível analisar o comportamento do sistema antes de serem aplicadas as intervenções pretendidas no estudo.

Conclui-se também que o novo conjunto motobomba calculado possui a mesma potência nominal do conjunto motobomba MB 01, mas não deve-se utilizar o conjunto motobomba MB 01, pois ele não trabalha mais a essa potência e nem sua vazão é próxima da nominal, esse fato deve-se a reformas utilizando procedimentos rudimentares na rebobinagem do motor e ao desgaste da bomba do conjunto MB 01.

Para trabalhos futuros sugere-se um projeto de um inversor de frequência para controlar a rotação do conjunto motobomba calculado no Apêndice B, B.1, dessa forma com uma rotação controlada em 1750 rpm, a vazão será facilmente controlada em 510m³/h. Sugere-se também um estudo da automação e instrumentação do sistema de bombeamento para que o operador possa ter um maior controle sobre a planta sem a necessidade de estar no local.

5 Referências Bibliográficas

- [1] MARQUES, M. G. Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Rio Grande do Sul: Porto Alegre. 2013. Laboratório de Obras Hidráulicas.UFRGS.
- [2] GOMES, H. P. Eficiência hidráulica e energética em saneamento: Análise Econômica de Projetos. Rio de Janeiro: ABES. 2005.
- [3] Acessado em 12 de Setembro de 2014. Disponível em: <http://www.saaevicosa.com.br>
- [4] Technology and Culture Volume 44, Number 1, January 2003 (PDF)
- [5] LUCARELLI, D. L. Bombas e Sistemas de Recalque. São Paulo: CETESB, 1974.
- [6] Alex N. Máquinas Termohidráulicas de Fluxo. Editora Universitária. 1º Edição.Mato Grosso. 2010.
- [7] UNESP. Campus Guaratinguetá. Ensaio de bombas em série e paralelo. São Paulo: Guaratinguetá. 2013.
- [8] MENESCAL. G. Sistemas Elevatórios. Ceará: Fortaleza. Caderno de Normas Técnicas para Sistemas de Abastecimento e Esgoto. UFC. 2014.
- [9] Acessado em 12 de Setembro de 2014. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Paginas/cartilhas_de_tarifas.aspx.
- [10] Manual de Tarifação da Energia Elétrica. Procel; Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 1º Edição. Maio 2001.
- [11] BRUSTOLINI, E. J. L. Estudo da Eficiência Energética da Estação Elevatória de água bruta do Ribeirão São Bartolomeu – SAAE de Viçosa. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica. Minas Gerais: Viçosa, 2012. UFV.
- [12] GOMES, HEBER PIMENTEL. ET AL. Sistema de Bombeamento - Eficiência Energética. 1 edição. João Pessoa: Editora Universitária/ UFPB. 2009.
- [13] 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
- [14] ALEGRE, H. et al. Performance indicators for water supply service. IWA Publishing, 2004

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

A.1 Tabela 11

Tabela 11: Valor Total da Conta de Energia e Volume Bombeado para a Estação Elevatória em Estudo.

Conta de Energia e Volume Bombeado – Outubro de 2014		
THS Verde	Consumo	Valor
Demanda HP (KW)	79	R\$ 17,24
Demanda HFP (KW)	84	R\$ 870,67
Energia HP (KW/h)	5002	R\$ 6591,87
Energia HFP (KW/h)	47642	R\$ 12560,52
Valor Total da Fatura		R\$ 20.040,30
Volume Bombeado no Mês (m³)		280.190,4

A.2 Tabela 12

A Tabela 12 apresenta os valores de coeficiente C da fórmula de Hazen Willians, Equação 9. Que será apresentada no Apêndice B, B.1.

Tabela 12: Valores de coeficiente C da fórmula de Hazen Willians.

Tubos	Valores de C
Aço corrugado	60
Aço com juntas, novos	135
Aço galvanizado	125
Cimento amianto	135
Cobre	130
Concreto – acabamento liso	130
Aço galvanizado	125

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 13

A Tabela 13 apresenta a relação do comprimento equivalente para cada peça presente no sistema hidráulico em estudo, que foi utilizado para o cálculo da perda de carga contínua, Apêndice B, B.1.

Tabela13:Comprimentos Equivalentes.

Peça	Equivalência (m)
Válvula de Pé e Crivo	78
Curva de 90	3,6
Curva de 22	2,2
Válvula de Retenção	38
Válvula de Gaveta	2,1

Apêndice B – Dimensionamento do Conjunto Motobomba e Capacidade para Reservação de Água Tratada

Para o dimensionamento do conjunto motobomba utilizou-se as seguintes informações do cadastro técnico do SAAE - Viçosa, conforme Tabela 14.

Tabela 14: Informações do cadastro técnico do SAAE – Viçosa.

Informações Gerais das Redes de Recalque e Sucção			
Comprimento da Tubulação de Recalque (m)		438	
Comprimento da Tubulação de Sucção (m)		5,5	
Diâmetro Nominal da Tubulação de Recalque (mm)		300	
Diâmetro Nominal da Tubulação de Sucção (mm)		300	
Altura Geométrica de Sucção (m)		3,65	
Altura Geométrica de Recalque (m)		30	
Peças Especiais da Tubulação			
Identificação	Localização	Diâmetro Nominal (mm)	Quantidade
Válvula de Pé e Crivo	Sucção	300	01
Curva de 90°	Sucção	300	01
Redução Gradual	Sucção	300 - 125	01
Válvula de Retenção	Recalque	300	01
Válvula de Gaveta	Recalque	300	01
Curva de 90°	Recalque	300	05
Curva de 22°	Recalque	300	01
Ampliação Gradual	Recalque	200 - 300	01

B.1 Dimensionamento do Conjunto Motobomba da Proposta

Na proposta, adotou-se uma vazão de projeto de 510 m³/h, devido a perdas que ocorrem durante o processo. A fim de verificar se as tubulações de sucção e recalque são adequadas para a vazão de projeto, utilizaremos a equação de continuidade, Equação 8.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (8)$$

Onde:

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

D = Diâmetro Nominal do Tubo [m].

Q = Vazão de Projeto [m³/s].

Através da Equação 8, obtêm-se a velocidade do fluido na sucção e a velocidade no recalque, que são de 2,0 m/s. Segundo [12], estes valores estão dentro do limite recomendado, tendo em vista que a velocidade máxima permitida para tubulações de recalque é 3,0 m/s, e para tubulações de sucção é de 2,0 m/s.

Após aferir as velocidades de escoamento do fluido para a vazão de projeto, calculou-se a altura manométrica da instalação.

Para o cálculo da perda de carga contínua, utilizou-se o método dos comprimentos equivalentes (Tabela 13) e para o cálculo da perda de carga linear será utilizada a fórmula de Hazen-Williams, Equação 9, utilizando $C=90$ que é o coeficiente de Hazen-Williams para tubo de ferro fundido usado. A Tabela 15 apresenta o resultado obtido:

Tabela 15: Resultados Obtidos.

Comprimento Virtual	
Sucção	Recalque
$h_t = 87,1\text{m}$	$h_t = 498,3\text{ m}$
Perda de Carga Total	
$h_{ts} = 2,1\text{m}$	$h_{tr} = 12,0\text{ m}$

$$H_l = 10,68 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85}} \frac{1}{D^{4,87}} \quad (9)$$

Onde:

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

D = Diâmetro interno do conduto [m];

Q = Vazão [m^3/s];

C = Coeficiente característico do conduto, Tabela 12.

Através da Equação 1, obtemos a seguinte altura manométrica (H):

$$H = 47,75\text{m}$$

Através da altura manométrica calculada e a vazão de projeto, determinou-se por interpolação de ponto através da Figura 25, o tipo de bomba a ser utilizado no projeto.

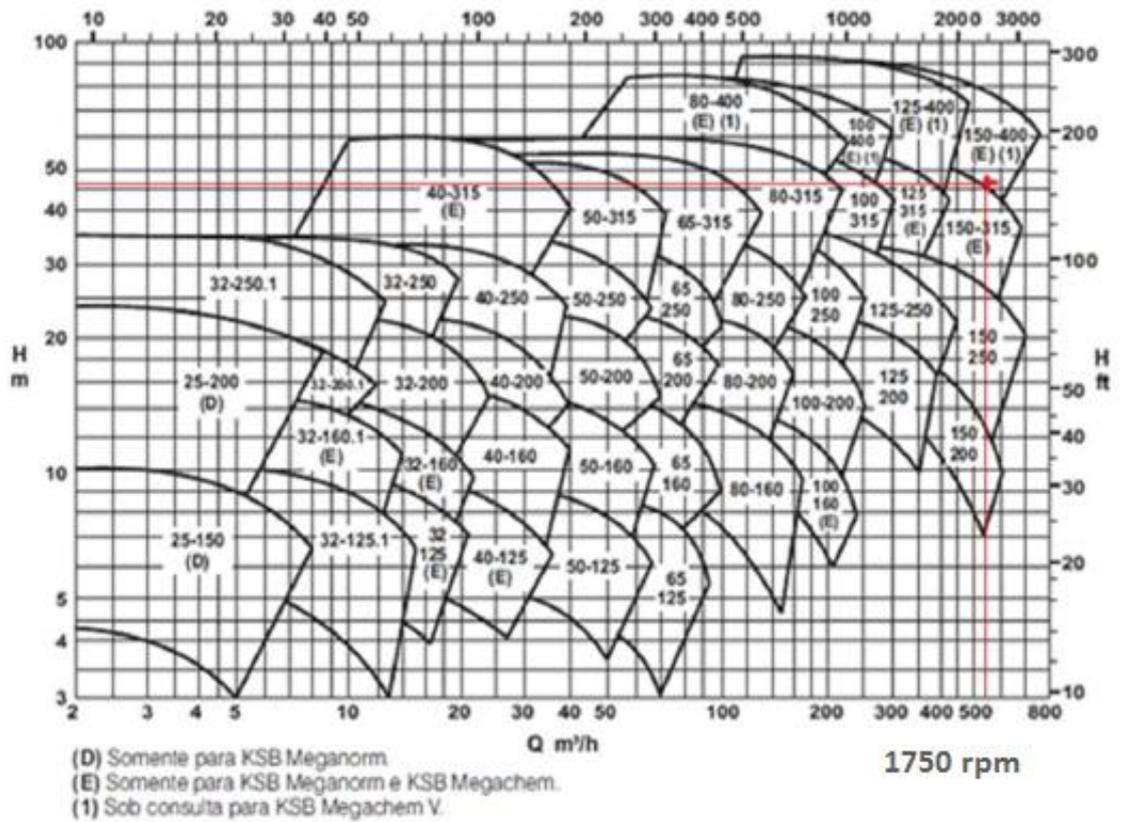


Figura 25: Tipos de Bombas (marca KSB), 60 Hz.

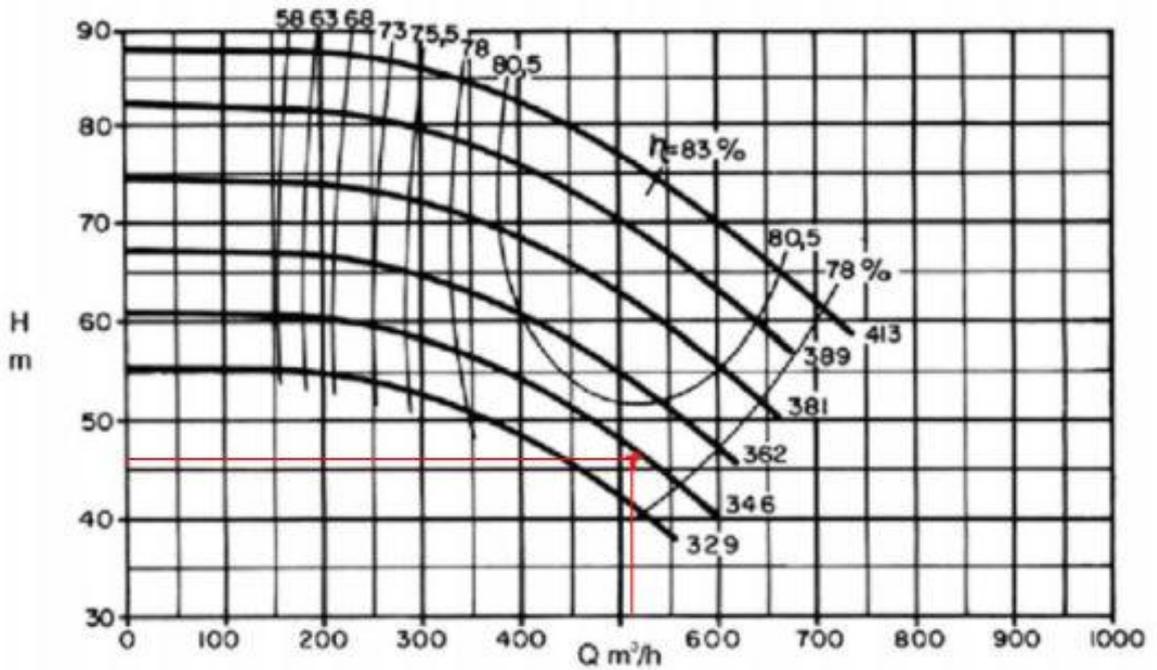


Figura 26: Tamanho de 150 – 400 (marca KSB).

A Figura 25 nos mostra que a o tipo de bomba utilizado para o projeto deve ser a KSB MEGANORM, com tamanho de 150 – 400, com velocidade de 1750 rpm.

Analizou-se em seguida a Figura 26, para determinar o diâmetro do rotor e a eficiência para o tamanho de 150 – 400.

Obteve-se o diâmetro do rotor de 346 mm e uma eficiência de aproximadamente 79%.

A Equação 10 nos fornece a potência necessária para o motor do conjunto motobomba.

$$P_{ot} = \frac{\gamma Q H_m}{75 \eta} \quad (10)$$

Onde:

γ = Peso específico da água (998,23 g/cm³);

Q = Vazão, em m³/h;

H_m = Altura manométrica, em metros (m);

η = Rendimento em %.

Através da Equação 9, tem-se que a potência necessária é de:

$$P_{ot} = 113,97 \text{ CV}$$

Devido a esse valor não ser um valor comercial, adota-se o valor comercial mais próximo que atenda essa demanda, dessa forma a potência do motor será de:

$$P_{ot} = 125 \text{ CV}$$

A Figura 27 apresenta o comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada para o novo conjunto motobomba. Nesta figura podemos observar a vazão constante de água bruta em função da demanda de água tratada.

A Figura 28 apresenta nova curva de reservação de água tratada, onde observa-se que no período de 0:00 às 17:00hrs e de 20:00 às 23hrs temos água sendo acumulada no reservatório, dessa forma quando a vazão demandada for maior que a vazão de água bruta não faltará água para a cidade.

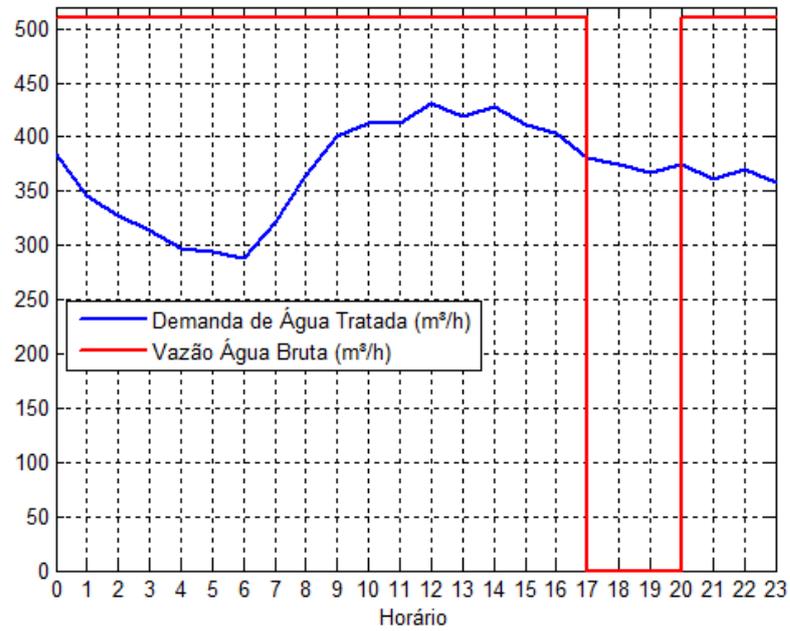


Figura 27: Comportamento da vazão bombeada e a curva de demanda de água tratada para a nova bomba.

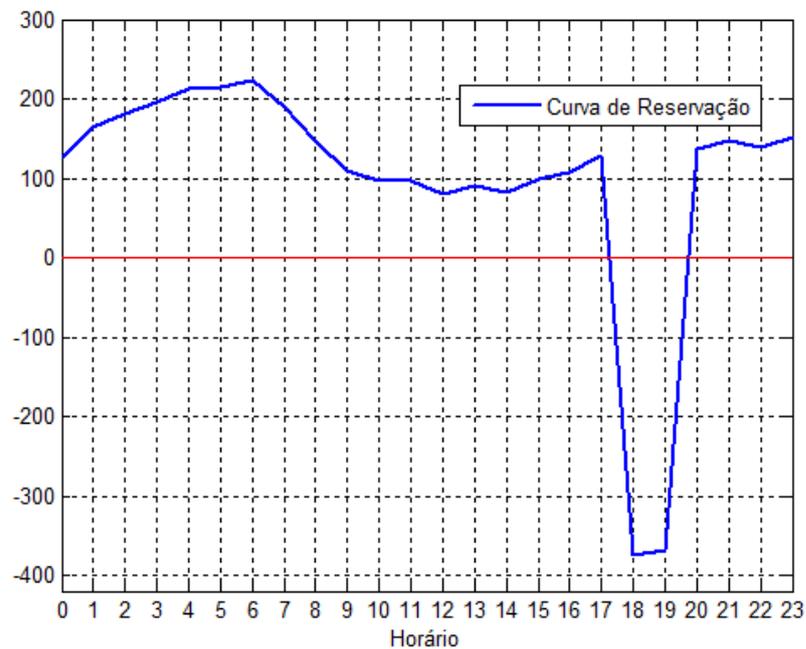


Figura 28: Nova Curva de Reservação.

B.2 Capacidade para Reservação de Água Tratada

A Tabela 16 apresenta a água bruta que deve ser bombeado para que possa ocorrer o desligamento da estação elevatória no horário de ponta com vazão de entrada de 510 m³/h fora do horário de ponta.

Tabela 16: Água Bruta que Deve ser Bombeado para que possa ocorrer o Desligamento da Estação Elevatória no Horário de Ponta.

Hora	Volume de Entrada (m ³ /h)	Volume de Saída (m ³ /h)	Saldo	
			Entrada	Saída
1	510,00	422,6	87,4	
2	510,00	380,46	129,54	
3	510,00	360,83	149,17	
4	510,00	345,82	164,18	
5	510,00	327,6	182,4	
6	510,00	324,17	185,83	
7	510,00	316,38	193,62	
8	510,00	353,15	156,85	
9	510,00	399,94	110,06	

10	510,00	440,54	69,46	
11	510,00	454,33	55,67	
12	510,00	453,69	56,31	
13	510,00	473,67	36,33	
14	510,00	461,05	48,95	
15	510,00	470,13	39,87	
16	510,00	452,47	57,53	
17	0,00	443,15		-443,15
18	0,00	418,81		-418,81
19	0,00	411,55		-411,55
20	510,00	404,51	105,49	
21	510,00	411,55	98,45	
22	510,00	397,79	112,21	
23	510,00	407,33	102,67	

24	510,00	393,6	116,4	
Total	10710	9725,06	2258,4	1273,51

Analisando a Tabela 16 observa-se que será necessária a ampliação do reservatório existente (1000 m³) em pelo menos 723,17 m³, tendo em vista que a reservação de água tratada até o horário de ponta será de 1723,17 m³ considerando que o reservatório esteja no nível zero às 0:00hrs.