

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Estudo de Diagnóstico Energético em
Sistemas de Abastecimento

Artino Quintino Da Silva Filho

Itajubá, Junho de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Artino Quintino Da Silva Filho

Estudo de diagnóstico energético em
sistemas de abastecimento

Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Energia como
parte dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Ciências em Engenharia de Energia

Área de Concentração: Planejamento e Gestão
de Sistemas Energéticos - PGSE

Orientador: Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho
Vianna

Junho de 2012
Itajubá - MG

Dedico está dissertação aos meus pais e minha namorada Helen, que me dão força para vencer os desafios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Augusto Nelson Carvalho Viana, pela oportunidade, paciência e ensinamentos. Sem seu apoio, não poderia chegar a este momento tão especial.

Agradeço aos professores Fernando das Graças Braga da Silva e Roberto de Mattos que estiveram presentes em minha banca de avaliação e cujas sugestões foram muito importantes para o término deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos e membros da equipe, Renato Swerts, Gustavo Lima e Júlio dos Santos, que trabalharam arduamente neste projeto contribuindo para os resultados desta dissertação sem os quais não seria possível ser escrita.

Ao pessoal do GEN, LEB e LHPCH, Ana Sofia, Keila, Rodrigo, Marcelo, Douglas, Tiago, Oswaldo, entre outros, pelo convívio e amizade.

Agradeço aos amigos e professores do mestrado que tanto contribuíram para o meu desenvolvimento.

Agradeço ao PROCEL/Eletróbrás pela bolsa e oportunidade de trabalho, assim como os colaboradores dos SAAEs Cacoal, Cruzeiro, Passos e São Lourenço onde foi aplicado esta metodologia.

Agradeço também aos meus amigos de Itajubá, aos amigos da república Vira-Latas cuja amizade ajuda a superar as barreiras.

RESUMO

ESTUDO DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

Este texto pretende realizar uma revisão sobre gestão de energia aplicável para sistemas de abastecimento de água e mostrar uma metodologia para implementar ações de eficiência energética nestes sistemas. É motivado pela crescente necessidade de maximização do potencial dos recursos hídricos e energéticos que intensifica a busca pela utilização racional destes recursos e promoção da eficiência energética. Cerca de 3% da energia consumida no Brasil é utilizada no setor de abastecimento e saneamento, sendo que os sistemas de bombeamento representam 90% deste consumo. Nestes locais, a eficiência energética pode ser obtida através de ações administrativas, sem investimento, e em ações operacionais, com investimento e esta dissertação irá explorar estas ações.

Palavras-chave: Eficiência energética, Sistemas de abastecimento de água, Gestão de energia, Medição & Verificação

ABSTRACT

STUDY OF ENERGY EFFICIENCY DIAGNOSTIC IN WATER SUPPLY SYSTEMS

This text intends to review the suitable energy management for water supply systems and to show a methodology to implement energy efficiency actions in water supply systems. It is motivated by the growing need of hydric and energy power resources optimization that has intensified the search of the rational use of those and the energy efficiency promotion. Around 3% of energy consumed in Brazil is used for water supply sector, of which 90% is taken by the pumping system. Energy efficiency in water supply systems can be reached through management actions, without investment, and through operational actions, with investment.

Keywords: Energy efficiency, water supply systems, pumping systems, frequency inverter, modulação da carga

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - modelo de gestão energética	5
Figura 2.2 - Modelo de gestão de colaboradores.....	8
Figura 3.1 - Tipos de demanda de energia elétrica.....	28
Figura 3.2 - Relação do fator de carga com o custo médio pago pela energia.....	30
Figura 3.3 – Rendimento percentual do motor em relação ao rendimento deste operando com 100 % da potência nominal	38
Figura 3.4 - Instalação com reservatório de sucção com líquido abaixo da bomba (bomba não afogada)	39
Figura 3.5 - Instalação com reservatório de sucção com nível do líquido acima da bomba (bomba afogada)	40
Figura 3.6 - Bomba acionada por um motor elétrico.....	44
Figura 3.7 - Redução da eficiência de um motor x Desbalanceamento	49
Figura 3.8 - Influência das variações de níveis nos reservatórios de sucção e recalque	53
Figura 3.9 - Influência da abertura e fechamento da válvula	54
Figura 3.10 – Campo de funcionamento de uma bomba com diâmetros de rotor.....	55
Figura 3.11 - Equações de semelhança.....	57
Figura 3.12 - Campo de funcionamento de uma bomba com diâmetros de	58
Figura 3.13 - Comparação de uma bomba centrífuga operando com.....	59
Figura 3.14 - Triângulo de potências	61
Figura 4.1 - Medidor de vazão ultrassom do tempo de trânsito com sistema emissor/receptor não intrusivo	68
Figura 4.2 - Conexão do manômetro e/ou transdutor de pressão	70
Figura 4.3 - Obtenção da curva da bomba.....	74
Figura 4.4 - Obtenção da curva do sistema	75
Figura 4.5 - Estimativa das curvas características por três pontos	77
Figura 5.1 - Composição os custos da Captação	83
Figura 5.2 - Demanda Contratada x Demanda Medida (Captação)	83
Figura 5.3 - Comparação entre as tarifas azul e verde (Captação)	84
Figura 5.4 - Valor da conta de energia após contratação da nova demanda (Captação)	84
Figura 5.5 - Composição dos custos da ETA	85
Figura 5.6 - Demanda Contratada x Demanda Medida (ETA).....	85
Figura 5.7 - Simulação Tarifária (ETA).	86

Figura 5.8 - Valor da conta de energia após contratação da nova demanda (ETA)	87
Figura 5.9 - Composição dos custos da Elevatória.....	88
Figura 5.10 - Simulação Tarifária (Itagaçaba).....	88
Figura 5.11 - Balsa de Captação e sua tubulação	90
Figura 5.12 - Medição de Vazão	90
Figura 5.13 - Medição de Pressão	91
Figura 5.14 - Medição de potência elétrica	91
Figura 5.15 – Ponto de operação das bombas da Captação.....	93
Figura 5.16 - Conjuntos motobombas do Solar dos Lagos	94
Figura 5.17 - Conjunto motobomba do Jardim das Acácias.....	95
Figura 5.18 - Conjuntos motobombas do São Francisco.....	95
Figura 5.19 - Conjuntos motobombas do Carioca.....	96
Figura 5.20 - Medições de vazão (Elevatória Vilanova).....	96
Figura 5.21 - Medidas de pressão (Elevatória Vilanova)	97
Figura 5.22 - Medições de parâmetros elétricos (Elevatória Vilanova).....	97
Figura 5.23 - Campo de aplicação da bomba do Solar dos Lagos.....	99
Figura 5.24 - Campo de aplicação da bomba (Jardim das Acácias).....	100
Figura 5.25 - Campo de aplicação da bomba das bombas da unidade São Francisco..	101
Figura 5.26 - Campo de aplicação da bomba	102
Figura 5.27 – Comparação no consumo de energia para a troca de conjuntos motobombas	105
Figura 5.28 - Comparação entre os rendimentos dos conjuntos motobombas (Solar dos Lagos).....	107
Figura 5.29 – Comparação entre os rendimentos dos conjuntos motobombas (Jardim das Acácias)	107
Figura 5.30 – Comparação entre os índices de consumo específico normalizado entre as bombas antigas (1) e as bombas novas (2) (Solar dos Lagos).....	108
Figura 5.31 – Comparação entre os índices de consumo específico normalizado entre as bombas antigas (1) e as bombas novas (2) (Jardim das Acácias).....	108
Figura 5.32 - Captação de água bruta do SAAE Passos.....	110
Figura 5.33 - Curva do sistema e da associação das bombas em paralelo da captação do SAAE Passos	111
Figura 5.34 - Curva de demanda da captação do SAAE Passos.....	111
Figura 5.35 - Conjuntos motobomba da ETA do SAAE Cruzeiro.....	112

Figura 5.36 - Curva do sistema e da bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro	113
Figura 5.37 - Curva de demanda para a bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro.....	113
Figura 5.38 - Estação elevatória Teixeira do SAAE Cacoal	115
Figura 5.39 - Curva do sistema e da bomba para o setor Teixeira do SAAE Cacoal.	116
Figura 5.40 - Curva de demanda para o setor Teixeira do SAAE Cacoal	116
Figura 5.41 - Curva de demanda entre os dias 25/08/2010 e 31/08/2010	118
Figura 5.42 - Curva de demanda de vazão	118
Figura 5.43 - Variação do nível d'água e vazão de entrada na situação atual	120
Figura 5.44 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de uma bomba no HP	122
Figura 5.45 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de 2 bombas no HP.....	124
Figura 5.46 - Curva de demanda entre os dias 15/08/2010 e 22/08/2010	125
Figura 5.47 - Curva de demanda do dia de maior consumo	125
Figura 5.48 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada na operação atual.....	127
Figura 5.49 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada com o desligamento das bombas no HP.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Gestão de energia	6
Tabela 2.2 - Plano de ação de uma auditoria energética	11
Tabela 2.3 - Princípios do PIMVP	21
Tabela 2.4 - Comparação entre as estruturas do PIMVP e ASHRAE 14-2002	22
Tabela 3.1 - Ações básicas para redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água	25
Tabela 3.2 - Ações operacionais de eficiência energética em sistemas de abastecimento	26
Tabela 3.3 - Classes de consumo por grupo	27
Tabela 3.4 - Comparação entre as tarifas azul e verde	31
Tabela 3.5 - Eficientização energética em conjuntos motobombas.....	35
Tabela 3.6 - Método dos volumes diferenciais.....	64
Tabela 5.1 - Caracterização do consumo de energia	81
Tabela 5.2 - Tarifas praticadas pela Concessionária EDP Bandeirante.	82
Tabela 5.3 - Dados de placa dos conjuntos motobombas do SAAE São Lourenço	89
Tabela 5.4 – Ensaios dos conjuntos motobombas 1, 2 e 3 operando isoladamente	91
Tabela 5.5 - Ensaios dos conjuntos motobombas 2 e 3 Operando em Paralelo	92
Tabela 5.6 - Ensaios dos conjuntos motobombas 1 e 3 Operando em Paralelo	92
Tabela 5.7 - Ensaios dos conjuntos motobombas 1 e 2 Operando em Paralelo	92
Tabela 5.8 - Valores médios obtidos e valores nominais	92
Tabela 5.9 - Ensaio dos conjuntos motobombas da Elevatória Vilanova operando isoladamente	98
Tabela 5.10 - Valores obtidos e valores nominais.....	98
Tabela 5.11 - Análise de carregamento e de desequilíbrios de tensão no SAAE São Lourenço.....	102
Tabela 5.12. Dados utilizados na simulação de troca dos equipamentos.....	103
Tabela 5.13 - Potência dos novos conjuntos	104
Tabela 5.14. Comparação da operação atual com a troca de motores e bombas.....	104
Tabela 5.15. Resultados da análise econômica para a troca de motores e bombas	105
Tabela 5.16 - Potência dos novos conjuntos	106
Tabela 5.17 – Ensaios dos conjuntos motobombas 1, 2 e 3 operando isoladamente ...	106
Tabela 5.18 – Melhoria no consumo específico dos conjuntos motobombas	109

Tabela 5.19 - Resultados da análise do uso de inversor de frequência na bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro	114
Tabela 5.20 - Resultados da análise do uso de uma bomba com ponto de operação adequado na ETA do SAAE Cruzeiro	114
Tabela 5.21 - Resultados da análise do uso de inversor de frequência para o setor Teixeira do SAAE Cacoal	117
Tabela 5.22 - Método dos volumes diferenciais para a situação atual	119
Tabela 5.23 - Gastos com energia para a situação atual	120
Tabela 5.24 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 1 bomba no HP.	121
Tabela 5.25 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 1 bomba no HP	122
Tabela 5.26 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 2 bombas no HP.....	123
Tabela 5.27 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 2 bombas no HP.	124
Tabela 5.28 - Resultados da operação atual	126
Tabela 5.29 - Gastos com energia na situação atual.....	127
Tabela 5.30 - Resultados da operação com o desligamento das bombas no HP	128
Tabela 5.31 - Gastos com energia na situação de desligamento das bombas no HP. ..	129

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos e justificativa de trabalho.....	2
1.3	Estrutura de trabalho	2
2	GESTÃO DE ENERGIA	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Programa de Gestão de Energia (PGE)	7
2.3	Gestão dos colaboradores da empresa.....	7
2.3.1	Obter o apoio/suporte da alta direção	8
2.3.2	Escolha do gestor/responsável pelo PGE	8
2.3.3	Seleção da equipe de trabalho de EE.....	9
2.3.4	Comprometimento de outros colaboradores.....	9
2.3.5	Canal de divulgação.....	9
2.4	Auditoria Energética	10
2.4.1	Levantamento de dados para uma auditoria energética no setor de abastecimento de água	12
2.5	Identificação de oportunidade de EE e elaboração do plano de ação	16
2.6	Medição e Verificação (M&V)	17
2.6.1	Histórico da Medição e Verificação	18
2.6.2	Definição do Plano de M&V	20
2.6.3	PIMVP - Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (2011) 20	
2.6.4	ASHRAE Guideline 14-2002	21
2.6.5	Comparação entre os protocolos.....	22
2.7	Monitoramento do desempenho das ações de EE	23
3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO.....	25
3.1	Análise Tarifária.....	26
3.1.1	Estrutura tarifária.....	27
3.1.2	Componentes da conta de energia	27
3.1.3	Formas de Redução do Custo da Energia com o Enquadramento Tarifário 30	
3.1.4	Enquadramento da Demanda Contratada	30
3.1.5	Escolha do Sistema de Tarifação Adequado	31
3.2	Utilização de conjuntos motobombas mais eficientes.....	34
3.2.1	Seleção e dimensionamento adequados da bomba	36
3.2.2	Localização correta da instalação da bomba	37

3.2.3	Instalação adequada dos conjuntos motobombas	37
3.2.4	Dimensionamento adequado do motor em relação à carga acionada.....	38
3.2.5	Seleção de motores de alto-rendimento.....	38
3.2.6	Análise da operação dos conjuntos motobombas operando com rotação constante	39
3.3	Desequilíbrios de Tensão	48
3.3.1	Determinação dos desequilíbrios de tensão.....	50
3.4	Operação da bomba utilizando rotação variável	51
3.4.1	Utilização do inversor de frequência.....	51
3.4.2	Variação da altura geométrica total	53
3.4.3	Variação da vazão através da abertura e fechamento de uma válvula.....	54
3.4.4	Variação da vazão através da diminuição do diâmetro externo do rotor....	55
3.4.5	Rotação variável	56
3.5	Correção do Fator de Potência	60
3.6	Otimização do uso de reservatórios	62
3.6.1	Cálculo do volume útil do reservatório	63
4	METODOLOGIA PROPOSTA	66
4.1	Metodologia	66
4.2	Medições de campo.....	66
4.2.1	Grandezas necessárias	66
4.2.2	Equipamentos utilizados.....	67
4.2.3	Medidor de vazão	67
4.2.4	Medidor de pressão.....	69
4.2.5	Medidor de rotação.....	70
4.2.6	Balanço Hídrico.....	70
4.3	Análise tarifária.....	71
4.4	Condições de operação dos conjuntos motobombas	71
4.4.1	Condições de operação da bomba	72
4.4.2	Rendimento dos conjuntos motobombas.....	72
4.4.3	Carregamento dos motores	72
4.4.4	Comparação por índices de eficiência energéticos.....	73
4.4.5	Desequilíbrio de tensão	73
4.5	Utilização de bombas com rotação variável.....	73
4.5.1	Determinação da curva da bomba	73
4.5.2	Determinação da curva do sistema	75
4.5.3	Interpolação por três pontos	76
4.5.4	Economia de energia	78

4.6	Otimização do uso do reservatório.....	79
5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	81
5.1	Análise tarifária.....	81
5.1.1	Captação.....	82
5.1.2	Estação de Tratamento (ETA).....	85
5.2	Análise dos conjuntos motobombas.....	89
5.2.1	Rendimento dos conjuntos motobombas.....	90
5.2.2	Análise de carregamento e desequilíbrio de tensão.....	102
5.2.3	Substituição dos conjuntos motobombas.....	103
5.2.4	Verificação da substituição dos conjuntos.....	106
5.3	Uso de inversores de frequência.....	109
5.3.1	SAAE Passos.....	109
5.3.2	SAAE Cruzeiro.....	112
5.3.3	SAAE Cacoal.....	114
5.4	Otimização do uso dos reservatório.....	117
5.4.1	SAAE de São Lourenço.....	117
5.4.2	SAAE de Cruzeiro.....	124
6	Conclusões e Recomendações.....	130
6.1	Conclusão.....	130
	BIBLIOGRAFIA.....	133
	ANEXO A - ANÁLISE ECONÔMICA.....	140
	ANEXO B – Rendimentos nominais mínimos.....	142
	ANEXO C – DADOS DOS NOVOS MOTORES SELECIONADOS.....	143
	ANEXO D - CURVAS DE RENDIMENTOS DAS BOMBAS.....	144
	ANEXO E – ARTIGOS PUBLICADOS.....	147

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Com a crescente necessidade de maximização do potencial dos recursos hídricos e energéticos tem intensificado a busca pela utilização racional destes recursos e promoção da eficiência energética. A eficiência energética e a conservação de energia não representam somente uma preocupação com a redução de custos. Significa também uma preocupação com o uso racional de energia para que se atinja um crescimento econômico sustentável e ecologicamente correto, preservando o meio ambiente para as gerações futuras.

Do ponto de vista do consumidor, a redução na eficiência significa que maiores serão os gastos com energia elétrica, e do ponto de vista da concessionária, significa um aumento na carga do sistema. De forma geral, como diz Abdelaziz et al (2010), a eficiência energética resultará em mais energia para uso, além de reduzir as concentrações de emissões de gases como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOX), entre outros. A eficiência energética traz benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Para uma empresa, a energia elétrica é uma importante variável para o funcionamento da mesma, pois é parte essencial do processo produtivo e representa uma parcela significativa dos gastos com a produção.

No setor de saneamento, a eficiência energética, de acordo com Barreto (2010), “tem como objetivo principal a eliminação do desperdício, pois o consumo racional ocasiona o máximo desempenho com o mínimo de consumo”, de forma que toda a redução de custos obtida com energia adiciona ganhos para a empresa. Sistemas de suprimento e distribuição de água consomem uma quantidade significativa de energia para transportar água pelo sistema de distribuição, sendo a energia elétrica consumida um dos maiores gastos nestas empresas (PASHA, LANSEY, 2009).

De acordo com Gomes (2009), cerca de 3% da energia consumida no Brasil é utilizada no setor de saneamento, sendo que os sistemas de bombeamento representam 90% deste consumo. Segundo a Europump e o Hydraulic Institute (2004), cerca de 75% destes sistemas estão superdimensionados em relação a demanda real, prática comum justificada

pela necessidade de uma margem de segurança. Segundo Saidur (2010), pelo fato destas instalações serem especificadas para operar em condições de máxima carga onde, na maioria das vezes, operam sob carga máxima somente por curtos períodos de tempo, resultando em uma operação ineficiente pela maior parte do tempo. Sahoo (2009a) cita que bombas sobredimensionadas operam longe do seu Ponto de Máximo Rendimento (PMR). Desta forma, torna-se necessário controlar a vazão bombeada, com a finalidade de diminuí-la.

Em sistemas de bombeamento de água, pode-se obter economia nos custos com energia por meio de medidas visando um bom dimensionamento dos conjuntos motobombas, a modulação do bombeamento para deslocamento para fora do horário de ponta e a utilização de inversores de frequência. De forma geral, entre as diversas ferramentas para a promoção do uso racional, podem-se incluir:

- Definição de um plano de ação;
- Medição e Verificação (M&V);
- Equipamentos mais eficientes;
- Modulação da carga;
- Sistema de controle.

1.2 Objetivos e justificativa de trabalho

Realizar uma revisão sobre gestão de energia aplicável para sistemas de bombeamento e mostrar uma metodologia para implementar ações operacionais de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água.

1.3 Estrutura de trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, cujas descrições seguem a seguir:

O capítulo dois traz uma revisão bibliográfica sobre a gestão de energia e sobre os protocolos de medição e verificação.

O capítulo três traz uma revisão sobre as ações de eficiência energética em instalações de abastecimento de água.

O capítulo quatro mostra a metodologia utilizada para redução do consumo devido ao bombeamento em sistemas de abastecimento e o capítulo cinco demonstra aplicações da metodologia proposta através de estudos de caso.

O capítulo seis apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho.

2 GESTÃO DE ENERGIA

2.1 Introdução

A gestão de energia tem o propósito de auxiliar a empresa a compreender e analisar as condições da utilização de energia, identificando onde o consumo de energia pode ser reduzido, fornecendo soluções para a utilização racional desta energia, de forma a reduzir o desperdício e os custos com a utilização de energia.

A redução no consumo de energia não deve implicar no racionamento de energia e nem afetar negativamente qualidade dos serviços prestados, de forma que deve ser promovida uma otimização do processo. O termo “otimização” refere-se às mudanças necessárias para promover o mínimo uso de energia elétrica, considerando-se as condições de conforto, segurança e dos aspectos práticos relacionados à produtividade. O elemento chave para promover a gestão da energia é procurar por oportunidades que envolvem desde a mudança dos hábitos até procedimentos de substituição de equipamentos.

Segundo a definição da ISO 50001 (2011), a gestão de energia deve possibilitar à empresa desenvolver e implementar uma política energética, estabelecendo objetivos e planos de ação, onde deverão constar os requisitos e as informações pertinentes sobre o uso da energia, que possibilitarão à empresa tomar as ações necessárias para a melhoria da eficiência energética.

Marques et al (2006) diz que “o gerenciamento energético de qualquer instalação requer o pleno conhecimento dos sistemas energéticos existentes, dos hábitos de utilização da instalação e da experiência dos usuários e técnicos da edificação”. Um modelo de gestão sustentável de eficiência energética deve ter como objetivos gerais os seguintes itens e pode ser visualizado na Figura 2.1 (LEITE, 2010):

- Definição de um Programa de Gestão de Energia (PGE);
- Identificar a equipe de eficiência energética (EE) e melhorar a comunicação entre os envolvidos;
- Divulgação das informações do PGE para os usuários da instalação e motivá-los a utilizar racionalmente a energia;

- Obter uma compreensão da utilização da energia na corporação (fluxos de energia, contrato, processos)
- Identificar oportunidades de economia de energia;
- Procurar pelo uso de melhores práticas e processos;
- Auxiliar o pensamento de gestão da energia com um processo amplo e com longa duração e não somente em ações isoladas de EE;
- Auxiliar a simplificar e padronizar os indicadores de EE em uma instalação;
- Alavancar ações de EE similares através da comparação de indicadores de EE.



Figura 2.1 - modelo de gestão energética

Fonte: elaborado pelo autor

Górdic et al (2010) diz que o passo inicial é verificar a situação da empresa em relação à eficiência energética, que pode ser visualizado na Tabela 2.1. Esta tabela pode ser utilizada para identificar os aspectos onde podem ser obtidas melhorias para a gestão da eficiência energética.

Tabela 2.1 - Gestão de energia

Nível	Programa de Gestão de energia	Organização	Auditoria da energia	Treinamento e promoção da eficiência energética	Investimentos
4	Política energética definida, plano de ação e revisão regular integrados ao gerenciamento da empresa	Delegação clara das responsabilidades pelo consumo de energia	Monitoramento de consumo, qualidade da energia, identificação e busca por oportunidades de eficiência energética	Divulgação dos benefícios da eficiência energética dentro e fora da empresa, realização de treinamento para funcionários	Detalhamento de análise de investimentos para novas construções, equipamentos e outras oportunidades visando o longo prazo
3	Política energética formal, sem suporte da alta diretoria	Gestor de energia responde a um comitê de energia representando todos os usuários	Monitoramento e coleta de dados com medições próprias, mas sem vislumbrar as oportunidades de economia aos funcionários	Treinamento para funcionários, divulgação das metas em alguns setores	Avaliação superficial das oportunidades de aquisição e troca de equipamentos e instalações
2	Existe uma política energética informal elaborada pelo gestor de energia	Existe um gestor de energia, sem autoridade definida	Monitoramento e coleta de dados dos medidores da fornecedora de energia	Treinamento para pessoas-chave	Investimentos realizados visando somente ganhos a curto prazo
1	Gestão de energia é de responsabilidade de um funcionário de outra função com autoridade limitada	Contatos informais entre o gestor e os usuários	Compilação de informações para uso do departamento técnico	Contatos esporádicos com funcionários para a promoção da eficiência energética	Somente trocas de equipamentos danificados
0	Sem política energética, gestor de energia	Sem contato com os usuários	Sem contas de consumo de energia	Sem promoção da eficiência energética	Sem investimentos

Fonte: Adaptado de Gordic et al(2010)

2.2 Programa de Gestão de Energia (PGE)

Segundo o PROCEL (2005a), a primeira iniciativa deve ser a implantação de um PGE, que deverá ser estruturado de forma que as ações de eficiência energética e seus resultados tenham longa duração, ou seja, não perdendo seu efeito ao longo do tempo. Isso se deve ao fato de que ações isoladas tendem a perder seu efeito ao longo do tempo. A simples aquisição de equipamentos mais eficientes, por exemplo, não é garantia de se obter eficiência energética.

- Gestão de colaboradores, obtendo o suporte da alta direção;
- Execução da auditoria energética;
- Definição do plano de M&V;
- Tomada de decisão sobre as medidas de EE a serem implementadas;
- Implementação e acompanhamento das medidas de EE;
- Monitoramento da performance das medidas de EE;

No PGE também deverá ser elaborado a política energética da empresa onde, como diz a ISO 50001 (2011), a empresa deverá declarar (através da alta direção) as suas intenções e diretrizes gerais relacionadas com seu desempenho energético. Esta política energética deverá entre outras coisas, prever uma estrutura para as ações e para o estabelecimento de objetivos e metas energéticas.

2.3 Gestão dos colaboradores da empresa

Quando se fala em eficiência energética, segundo a IEEE 739 (1995), Kannan et al (2003), Gordic et al (2010) além da troca de equipamentos, análise tarifária, entre outras medidas de eficiência energética, a compreensão e aceitação da gestão da energia por parte dos colaboradores (funcionários, gerentes, etc.) de uma empresa é de extrema importância.

De forma geral, a gestão dos colaboradores de uma empresa deve seguir o esquema da Figura 2.2.

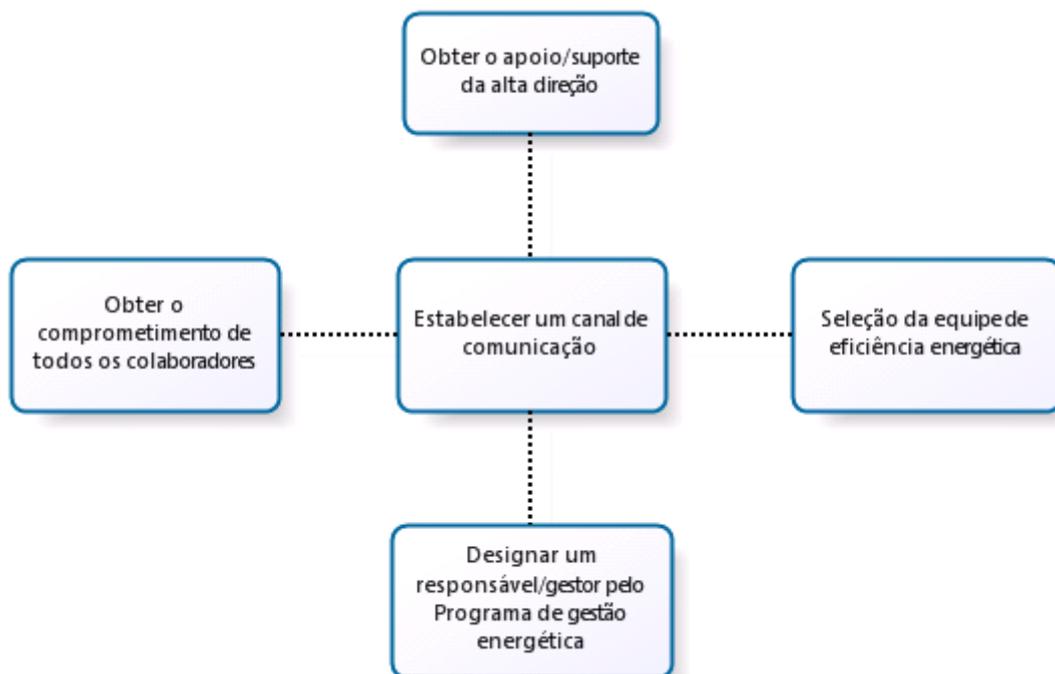


Figura 2.2 - Modelo de gestão de colaboradores

Fonte: elaborado pelo autor

2.3.1 Obter o apoio/suporte da alta direção

Um fator chave é a adesão da alta diretoria da empresa, pois ela tem a responsabilidade pela aprovação dos recursos necessários para promover a eficiência energética. Sem este apoio, o programa de gestão de energia tem grande probabilidade de fracassar. Este apoio pode ser obtido esclarecendo que o programa irá reduzir o consumo de energia, mantendo ou melhorando o funcionamento do processo.

2.3.2 Escolha do gestor/responsável pelo PGE

Um bom programa de gestão energética deve contar com um responsável/gestor com autoridade para obter o compromisso de todos os envolvidos. Para a IEEE 739 (1995), o gestor de um programa de eficiência energética deve-se reconhecer quais

são as pessoas chave que realizam decisões. Estas pessoas chaves devem ser convencidas dos benefícios do programa de gestão da energia para obter sucesso. Além disso, ele será responsável por desenvolver o programa, selecionando a equipe de trabalho.

2.3.3 Seleção da equipe de trabalho de EE

A equipe de trabalho deverá ser uma equipe multidisciplinar, pois a gestão da energia engloba as áreas de administração, engenharia, desenvolvimento, aplicação, utilização e manutenção dos sistemas para promover a otimização do uso da energia elétrica. De forma geral, a gestão de energia engloba as seguintes áreas e campos:

- Administração;
- Técnicos e engenheiros de eletrotécnica, mecânica, hídrica, produção, controle e automação, eletrônica, etc.);
- Arquitetura;
- Análise financeira;
- Gestão de projetos.

2.3.4 Comprometimento de outros colaboradores

Além da diretoria é necessário o envolvimento de todos os colaboradores de todos os setores. Os colaboradores devem ser comunicados da importância e objetivos do programa de eficiência energética. Suas ideias devem ser não somente ouvidas, como devem ser encorajadas. O pessoal dos setores operacionais detém grande conhecimento da operação do sistema, possibilitando ideias com maior potencial de eficiência energética.

2.3.5 Canal de divulgação

Como diz a IEEE 739 (1995), em relações interpessoais é muito importante a comunicação entre os envolvidos, de forma que é necessário estabelecer um canal de comunicação cujo propósito será reportar para à organização e seus integrantes às ações realizadas, as metas atingidas, as ações futuras.

2.4 Auditoria Energética

Auditoria energética é o processo de inspecionar, analisar e monitorar a utilização de energia em uma organização, identificando fontes de desperdício e alternativas para a redução deste consumo de energia.

A auditoria energética é um elemento-chave para a tomada de decisão da gestão de energia e traz os seguintes benefícios (SAIDUR, 2009):

- Identificação e quantificação dos tipos e dos custos do uso de energia;
- Compreensão de como a energia está sendo utilizada;
- Identificação e análise das alternativas para redução do custo da utilização de energia;
- Estimar o impacto financeiro de projetos de eficiência energética;
- Elaboração de um plano de implementação de medidas de EE;
- Redução do consumo específico e do custo operacional;
- Monitoramento das melhorias.

Existem dois tipos básicos de auditoria energética: a básica e a detalhada. A principal diferença entre elas é que a auditoria básica requer uma noção geral do funcionamento, enquanto a auditoria detalhada requer informações mais específicas (IEEE 739, 1995).

A auditoria básica é mais simples e rápida, conduzida sob condições limitadas de tempo e custo. Envolve obter informações com a equipe do setor auditado (equipes de operação, de manutenção, etc.), fazendo uma breve visita em campo para observar, conhecer o processo produtivo, obter uma noção geral do rendimento dos equipamentos e identificar possíveis áreas ineficientes.

Geralmente, este tipo de auditoria foca nos equipamentos consumidores de energia de grande porte, fornecendo breves descrições de medidas corretivas, com os

respectivos custos de implementação e de potencial de economia e um payback simples. Embora o detalhamento de informações desta auditoria não seja suficiente para uma decisão final, é adequado para direcionar projetos de eficiência energética e evidenciar a necessidade de uma auditoria mais ampla.

A auditoria detalhada expande a auditoria simples, obtendo informações mais detalhadas da operação e rendimento dos equipamentos. Este tipo de auditoria irá levantar dados de horas de funcionamento dos equipamentos, obter o consumo mensal de energia e da demanda requisitada, irá realizar medições em campo para informações adicionais sobre o rendimento e consumo específico dos equipamentos. Como resultado, a auditoria detalhada elaborará um relatório detalhado com as estimativas do consumo e perdas para diferentes alternativas.

A auditoria detalhada, geralmente é conduzida em duas etapas, ou seja, uma para levantamento de dados e reconhecimento do sistema. A Tabela 2.2 apresenta um plano de ação de uma auditoria energética:

Tabela 2.2 - Plano de ação de uma auditoria energética

Etapa (passo)	Plano de ação
Etapa 1 – pré-auditoria	<p data-bbox="791 1216 1126 1249">Planejamento e organização</p> <p data-bbox="592 1305 1326 1391">Entrevista com equipes de operação e de manutenção do setor auditado</p> <p data-bbox="571 1447 1347 1585">Realizar uma visita ao local para obter informações sobre o processo e obter dados sobre os equipamentos (dados de placa de equipamentos, tipo de processo)</p>
Etapa 2 – auditoria energética	Obtenção de informações detalhadas e sugestão de melhorias

Continua na próxima página

Continuação

Etapa (passo)	Plano de ação
	Realizar uma visita ao local para obter informações sobre o processo e obter dados sobre os equipamentos (dados de placa de equipamentos, tipo de processo)
	Elaborar um diagrama de utilização da energia
	Realizar medições nos equipamentos
	Identificação das oportunidades de eficiência energética
	Identificação de alternativas tecnicamente viáveis
	Análise da viabilidade econômica
	Elaboração do diagnóstico energético
	Apresentar a alta gerência

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.1 Levantamento de dados para uma auditoria energética no setor de abastecimento de água

Conforme citado anteriormente, para indicar alternativas para melhorar a eficiência energética de qualquer instalação é necessário conhecer detalhadamente o local a ser auditado, obtendo o conhecimento dos sistemas energéticos existentes, dos hábitos de utilização da instalação, recorrendo à experiência dos usuários e técnicos da edificação. Desta forma, para Gomes (2009), o diagnóstico deverá ser elaborado com base nestas informações e será tanto mais preciso quanto mais exatos e completos forem estes dados. Ao obter conhecimento sobre os problemas e limitações existentes, pode-se prever o potencial da economia de energia.

A utilização de energia pode ser avaliada através da análise de dados documentados, avaliação em campo e dos testes necessários para a mensuração da situação atual de um sistema.

Em unidades de abastecimento, é desejável obter as seguintes informações:

- Funcionamento do sistema;
- Dados da carga elétrica instalada;
- Procedimentos de operação;
- Procedimentos de manutenção;
- Contas de energia elétrica;
- Locais de instalação dos equipamentos de medição;
- Informações obtidas com medições de campo;
- Levantamento de indicadores de eficiência energética.

2.4.1.1 Funcionamento do Sistema Hidráulico

Deve-se levantar informações a respeito da operação do sistema de abastecimento e tratamento local, com informações como:

- Local de captação;
- Cotas das unidades;
- Existência de um reservatório de regularização ou distribuição direta na rede;
- Existência de micromedição e macromedição;
- Mapeamento das tubulações.
- Dados e diagramas do sistema elétrico e hidráulico.

2.4.1.2 Dados da Carga Elétrica Instalada

Devem ser levantadas as informações sobre os equipamentos consumidores de energia, tais como iluminação e, principalmente, os conjuntos motobombas. Sobre as motobombas, verificar:

- Dados de placa dos motores (fabricante, modelo, potência, tensão, corrente, rotação, rendimento, fator de potência, carcaça, grau de proteção, etc);
- Dados de placa das bombas (fabricante, modelo, potência, vazão, altura manométrica, rotação, diâmetro do rotor, diâmetro do flange, etc);
- Curvas de desempenho dos motores e bombas;

2.4.1.3 Procedimentos de Operação

Um dos grandes potenciais de economia de energia, além da utilização de equipamentos mais eficientes, diz respeito à operação da unidade. Práticas comuns que auxiliam o desperdício de energia em sistemas de bombeamento são:

- Não deixar o reservatório atingir seus limites inferiores durante a operação, pois é uma prática comum dos operadores deixarem o reservatório sempre cheio;
- Realizar várias partidas dos motores durante o dia;
- Ausência de automação dos processos;

2.4.1.4 Procedimentos de Manutenção

A manutenção tem por objetivo garantir o funcionamento de uma instalação. Em instalações de bombeamento existem equipamentos sujeitos a desgastes por incrustação, forças de atrito e agentes corrosivos. Deve-se ter um programa de manutenção preditiva, preventiva e corretiva.

2.4.1.5 Levantamento das Contas de Energia

As contas de energia permitem visualizar as condições de suprimento, fornecendo informações relativas à qualidade da energia entregue pela concessionária (DIC, FIC, DMIC) e ao uso da energia. Devem ser estudadas no mínimo as contas dos últimos 12 meses e os seguintes itens indicam possibilidade de redução dos custos:

- Pagamento de multas por excesso de energia reativa (baixo fator de potência);
- Multas por ultrapassagem da demanda contratada;
- Sobredimensionamento da demanda contratada;
- Baixo fator de carga.

2.4.1.6 Local de Instalação dos Equipamentos de Medição

Para se realizar as medições de campo é necessário que se verifique os pontos de instalação dos equipamentos e o tipo de equipamentos que deverão ser utilizados. Desta forma, devem ser verificados:

- Diagramas elétricos e hidráulicos;
- Pontos de instalação dos medidores de grandezas elétricas (pontos para a tomada de tensão, faixa de corrente a ser medida e a largura dos cabos);
- Pontos de tomada de pressão (verificar existência de bujões ou a necessidade de realizar furos para a instalação de manômetros);
- Pontos para a instalação de medidores de vazão (trechos retos e distantes de curvas);
- Verificar a existência de tomadas piezométricas para medição de nível no reservatório e nas tubulações de entrada e saída do reservatório.

2.4.1.7 *Medições de campo.*

As medições de campo têm a finalidade de confirmar e evidenciar o desempenho dos equipamentos e instalações. Devem ser utilizados equipamentos calibrados e, preferencialmente, com possibilidade de aquisição de dados.

É recomendável consultar as normas para a realização dos ensaios de rendimento dos equipamentos. Para uma melhor compreensão do funcionamento do sistema e utilização do reservatório, recomenda-se aquirir os dados durante 15 dias e então realizar as simulações com os dados do dia de maior consumo de água. O capítulo 3 trará mais informações sobre o assunto.

2.4.1.8 *Indicadores de eficiência energética*

É recomendado obter valores mensais de indicadores de EE para comparar seus valores em função da sazonalidade ou procurar desvios em sua operação. Além disso, a não utilização de indicadores pode fazer com que haja comparação direta entre as faturas de energia. Segundo Gordic (2010), o melhor indicador de eficiência energética é o consumo específico de energia, ou seja, quanto de energia é necessário para produzir uma unidade de produção ou prestação de um serviço.

Em sistemas de abastecimento, a utilização do consumo específico de energia normalizado permite comparar instalações de diferentes alturas manométricas.

2.5 Identificação de oportunidade de EE e elaboração do plano de ação

Após a coleta e análise de dados podem ser identificadas as áreas com maior potencial para economia de energia. As medidas de ações de EE podem variar entre ações de baixo custo (alterações operacionais simples, manutenção) e ações que demandam investimento de capital (substituição de equipamentos). O diagnóstico energético fornece as ações de EE disponíveis para a empresa, permitindo uma comparação entre elas e a

priorização das ações. O tipo de auditoria, básica ou detalhada, irá fornecer o nível e precisão das informações.

A decisão pela implementação das ações de EE normalmente é de responsabilidade do gestor de energia da empresa com a aceitação da alta gerência da empresa. Ações simples como a mudança nos procedimentos de operação necessitam ser analisadas pela alta gerência para verificação da continuidade da qualidade do produto/serviço, entre outros motivos.

Quando necessário investimento, o gestor de eficiência energética irá decidir qual a fonte dos recursos para sua implementação. As opções são: recursos próprios, recursos de um investidor externo (uma ESCO, por exemplo) ou utilizar recursos do Programas de Eficiência Energética – PEE – da ANEEL.

Destinar recursos próprios em projetos de eficiência energética é um fator complicador em projetos de EE, pois alocar recursos para a EE significa deixar de investir em outras áreas. Segundo Russell (2005), a alta gerência da empresa tende a priorizar investimentos para a atividade principal da empresa, em detrimento de funções auxiliares, incluindo energia.

O financiamento de projetos de EE através de recursos de terceiros através de um investidor externo requer a assinatura de contratos de performance que estabelecem condições para a remuneração das implantações financiadas, através do montante da economia obtida com a redução efetiva nos custos de consumo de energia e água na operação da empresa.

Para utilizar recursos do PEE da ANEEL a empresa deve atender aos requisitos estabelecidos e obter a aprovação da ANEEL, presentes no Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética. Segundo a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, as empresas concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica devem aplicar um percentual mínimo da receita operacional líquida em Programas de Eficiência Energética.

2.6 Medição e Verificação (M&V)

Segundo Schiller et al.(2011), a M&V se refere à coleta, ao monitoramento e a análise dos dados associados com o cálculo do total da economia de energia de um projeto

de eficiência energética. Segundo a EVO (2011), o objetivo principal de um protocolo de M&V é demonstrar o desempenho energético das implementações de um projeto de EE.

Os protocolos de M&V padronizam a forma de calcular a energia economizada, conferindo credibilidade na apuração dos resultados e possibilitando o acompanhamento do desempenho das ações de EE realizadas, dando segurança para o investidor do retorno do investimento (LEITE, 2010).

A M&V surgiu da necessidade de que os envolvidos em um projeto de eficiência energética (a empresa executora e a empresa auditada) necessitam saber o quanto de economia elas irão obter e por quanto tempo estas economias irão durar. Normalmente, em um contrato para implementação de projetos de eficiência energética, as partes envolvidas precisam concordar sobre o que demonstrar no desempenho energético, em quanto a instalação consumia antes e no que passou a consumir após a execução das ações de eficiência energética.

Em uma unidade de geração de energia a medição de energia é simples: basta instalar um medidor e pode-se obter o montante gerado de energia. Porém, em projetos de EE, para medir a economia de energia existem alguns obstáculos, que requerem, além da medição, a utilização de uma metodologia fornecida por um protocolo de M&V. A economia de energia não pode ser medida diretamente, pois representa a ausência de consumo. Desta forma, segundo a EVO (2011), pode-se determinar a economia de energia comparando o consumo antes e depois da implementação das ações de eficiência energética, realizando-se ajustes adequados para as novas condições de operação da instalação.

2.6.1 Histórico da Medição e Verificação

Durante a década de 80, segundo o documento para introdução da eficiência energética do INEE (1997), com o crescimento das ESCOS e de programas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda na América do Norte, surgiram diversas tentativas de se normalizar a M&V. Porém, as publicações desta época negligenciavam a longevidade das melhorias obtidas através das ações de eficiência energética, focando somente nas ações de conservação de energia (LEITE, 2010).

Em 1984 foi publicada pelo IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) a “*IEEE Recommended Practice for Energy Conservation and Cost Effective Planning in Industrial Facilities*” (Norma IEEE 739 – 1984 – The Bronze Book), que começou a ser elaborada nos anos 70, após choque do petróleo. Esta publicação não dava enfoque na gestão da energia como um processo único, focando em ações isoladas, não coordenadas. Reconhecendo a necessidade de se realizar um gerenciamento aprofundado de um insumo importante, a energia elétrica, em 1995, a IEEE publicou uma reedição revisada da IEEE 739/95, agora com o nome de “*IEEE Recommended Practices for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities*”. Embora esta publicação fornecesse muitas informações e alternativas sobre projetos eficientes, ainda segundo Leite (2010), esta norma pecava por ser carente em informações de mostrar como a energia estava sendo realmente economizada, além de negligenciar o tratamento das incertezas das estimativas.

Da necessidade de quantificar a economia de energia e de resolver os problemas de inconsistência entre as metodologias disponíveis, em 1996, com o apoio de agências governamentais e pesquisadores da área, do Canadá, do México e dos Estados Unidos, foi publicado o “*North American Energy M&V Protocol – NEMVP*” (Protocolo Norteamericano de M&V de Energia) pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Em 1997, com apoio internacional, o NEMVP foi revisado e republicado como a primeira versão do “*International Performance Measurement and Verification Protocol*” – (no Brasil, Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético – PIMVP). O PIMVP foi revisado diversas vezes, sendo a última em 2010, cuja versão em português foi publicada em 2011.

Em 2002, foi publicado o guia “*ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings*” pela “*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.*” (em português: Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) que continha grande parte dos autores do PIMVP.

O PIMVP e o ASHRAE 14-2002 são os protocolos mais utilizados atualmente e serão melhor detalhados nesta dissertação.

2.6.2 Definição do Plano de M&V

O plano de ação da empresa deverá incluir o plano de Medição e Verificação (M&V) que deverá especificar qual o nível de precisão será necessário para a comprovação dos resultados e qual o protocolo de M&V será utilizado, seja ele o PIMVP ou o ASHRAE 14-2002.

Estes protocolos fornecem opções para a escolha da estratégia para a M&V, a partir da qual deverão ser selecionadas as variáveis independentes a serem registradas e o tempo de registro, para a elaboração da linha de base. Estas variáveis serão utilizadas na elaboração do modelo para projeção do consumo e demanda no período pós-reforma. É importante que o gestor considere que ações de EE diferentes devem ter estratégias e metodologias diferentes.

Segundo Leite (2010), o plano de M&V deverá revisitar as projeções de economia realizadas durante o diagnóstico energético para compor junto com as estimativas de investimento uma análise econômica mais precisa que dará suporte à decisão sobre qual ação de EE será tomada.

2.6.3 PIMVP - Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (2011)

O PIMVP é um guia publicado pela EVO (Efficiency Valuation Organization – em português, Organização de Avaliação da Eficiência) e foi desenvolvido em um esforço conjunto entre indústria, governo e outras organizações.

É a principal referência para projetos de EE, sendo o mais atualizado e mais citado dos protocolos. Traz também informações para M&V do consumo eficiente de água. Segundo o FEMP (2008), este protocolo define termos importantes e outras recomendações que precisam ser considerados na elaboração de um plano de M&V, mas não fornece detalhes sobre medições e tecnologias específicas.

Segundo a EVO (2011), a M&V deve seguir alguns princípios essenciais, que seguem a seguir (Tabela 2.3):

Tabela 2.3 - Princípios do PIMVP

Abrangência	O relatório deve levar em consideração todos os efeitos de um projeto
Conservadorismo	Devido à incerteza inerente nas medições, a economia deve ser avaliada considerando a hipótese de pior expectativa.
Consistência	O relatório de M&V deve ser consistente entre diferentes tipos de projetos de EE, entre diferentes profissionais de EE, entre diferentes períodos de tempo para o mesmo projeto.
Precisão	A M&V deve ser tão precisa quanto o seu custo permita ser.
Relevância	Deve-se medir os parâmetros mais relevantes, ou menos conhecidos, enquanto os parâmetros de menor importância ou com maior previsibilidade podem ser calculados
Transparência	As atividades de M&V devem ser claras e completamente divulgadas, para que outros profissionais possam compreendê-las.

Fonte: EVO (2010)

2.6.4 ASHRAE Guideline 14-2002

O ASHRAE 14-2002 é um guia elaborado por um comitê da ASHRAE (sigla em inglês para Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado) e contou com boa parte da equipe que elaborou o PIMVP.

O ASHRAE 14-2002 informa os requisitos mínimos necessários para assegurar um desempenho mínimo aceitável. Não contém normas de medição e cargas industriais.

O ASHRAE 14-2002 também fala sobre a importância da gestão das informações utilizadas para a tomada de decisão da implantação das medidas de eficiência energética, onde deve-se elaborar um planejamento de execução do projeto de eficiência energética. Outra ponderação é sobre a atualização das informações da economia de energia obtida, onde uma empresa terceirizada (uma ESCO, por exemplo) deve atualizar o relatório para comprovar ao cliente a economia de energia. Estes relatórios devem ter um sincronismo com as faturas de energia para comprovar ao cliente a economia obtida.

2.6.5 Comparação entre os protocolos

Com o objetivo de facilitar a mensuração da economia de energia tanto o PIMVP quanto o ASHRAE 14-2002 fizeram algumas considerações, e segundo Leite (2010) as mais importantes são a de considerar trabalhar com dados limitados e a estratificação da estrutura para a elaboração do plano de M&V.

A consideração de trabalhar com dados limitados é muito importante, uma vez que guias e normas anteriores eram impossíveis de serem seguidos na prática. A estrutura para a elaboração do plano de M&V, tanto do PIMVP (2011) quanto do ASHRAE 14-2002 é semelhante: o PIMVP é dividido em quatro abordagens que se assemelham às três abordagens do ASHRAE 14-2002, conforme pode ser visto abaixo, Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Comparação entre as estruturas do PIMVP e ASHRAE 14-2002

PIMVP	ASHRAE 14-2002	Comparação
Reforma Isolada: Medição dos parâmetros-chave	Abordagem para instalação reformada	Estratégias da ASHRAE 14-2002 são mais rigorosas e detalhadas em comparação a abordagem do IPMVP. O PIMVP permite que quando os custos da M&V para sejam maiores do que o retorno, a estimativa possa ser feita a partir de parâmetros-chave
Reforma isolada: Medição de todos os parâmetros		
Medição de toda a instalação	Abordagem para toda a instalação: prescritiva e desempenho	São modelos parecidos. A estratégia do PIMVP é menos rigorosa e detalhada, permitindo comparações diretas simples sem modelos de regressão
Simulação calibrada	Abordagem de simulação calibrada	Modelos parecidos, mas sua utilização não é bem exemplificada. O PIMVP tem um exemplo simplificado de sua utilização e o ASHRAE 14-2002 não tem exemplo de aplicação.

Fonte: Adaptado de LEITE (2010)

Conforme a tabela 2.4, acima, o ASHRAE 14-2002 não contém exemplo algum sobre a simulação calibrada, de forma que quem utilizar este guia e optar por esta opção deve procurar por literatura adicional para obter mais informações.

O texto do PIMVP tem maior coesão, diferentemente do ASHRAE 14-2002. O PIMVP apresenta uma discussão sobre o que é M&V, quem pode utilizá-lo, os benefícios de sua utilização e orientações para a utilização do guia, além de sua relação com outros protocolos.

O ASHRAE 14-2002 não apresenta informações sobre por onde começar ou qual abordagem utilizar. Embora existam citações, cada capítulo parece ser isolado dos outros, com diversas informações repetidas ao longo do guia.

Segundo Leite (2010), um ponto negligenciado em ambos os protocolos é a elaboração do diagnóstico energético com a quantificação e identificação das oportunidades de economia de energia na instalação, que precisa ser realizado antes do início de qualquer ação de EE. Além disso ambos os protocolos não fazem menção sobre a necessidade de se realizar auditorias na linha de base quando houver alterações no uso e na operação da instalação.

Ao contrário dos diversos guias elaborados na década de 80, os protocolos de M&V mais recentes focam na gestão, sustentabilidade e confiabilidade da economia atingida.

2.7 Monitoramento do desempenho das ações de EE

O monitoramento do desempenho pode ser realizado de diversas maneiras (LEITE, 2010):

- Monitoramento financeiro: comparação entre os resultados dos custos financeiros antes e após a implementação das ações de EE e os resultados atuais;
- Comparação de indicadores de EE: permite comparar o custo da produção/serviço antes e após a implementação das ações de EE e os resultados atuais. Permite realizar comparação de instalações semelhantes ou um benchmark (meta de referência) para comparação.

Conforme comentado anteriormente, o consumo de energia normalizado (CEN) permite comparar instalações de diferentes alturas manométricas.

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Segundo o PROCEL (2005b), as principais ações para o setor de saneamento básico são a modulação da carga em relação à ponta dos sistemas elétricos, o controle das vazões de recalque em relação às demandas da rede de distribuição de água, o dimensionamento adequado dos equipamentos eletromecânicos e a automação operacional.

Sobre o assunto, Tsutiya (2001) diz que as ações básicas de eficiência energética podem ser agrupadas em duas fases, onde a primeira consiste em ações administrativas (em geral, ações sem investimento financeiro) e a segunda em ações operacionais (em geral, ações com investimento financeiro). Observa-se que “ganhos decorrentes da adequação tarifária das instalações e da compensação do baixo fator de potência não são considerados estritamente ganhos em eficiência energética, sendo antes um requisito de boa gestão” (GOMES, 2009).

A Tabela 3.1 descreve as ações básicas para a redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento, enquanto a Tabela 3.2 fornece as ações operacionais mais comuns em sistemas de abastecimento.

Tabela 3.1 - Ações básicas para redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

	Análise tarifária
Ações administrativas (1ª fase)	Desativação das instalações sem utilização
	Ajuste dos equipamentos
	Diminuição da potência dos equipamentos
Ações Operacionais (2ª fase)	Controle operacional
	Automação do sistema de abastecimento de água
	Alternativas para geração de energia elétrica

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2001)

Tabela 3.2 - Ações operacionais de eficiência energética em sistemas de abastecimento

Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento do conjunto motobomba Redução das perdas de carga nas tubulações Melhoria do fator de carga das instalações Redução do índice de perdas de água, uso racional da água
Controle operacional	Alteração no sistema de bombeamento e reservação Utilização do inversor de frequência Alteração nos procedimentos operacionais das ETAs
Automação do sistema de abastecimento de água	
Alternativas para autoprodução de energia elétrica	Implementação de micro centrais hidrelétricas aproveitando os potenciais energéticos da adução por gravidade ou no controle de pressão Uso de geradores diesel nos horários de ponta

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2001)

3.1 Análise Tarifária

A análise tarifária é uma ação administrativa que em geral não necessita de nenhum recurso financeiro e, de forma geral, compreende a conferência da leitura da conta de energia elétrica, obter um entendimento com as companhias de energia para a redução de tarifas.

3.1.1 Estrutura tarifária

Segundo a ANEEL (2005), os consumidores são identificados por classes e subclasses de consumo em função da atividade exercida pelas mesmas (Tabela 3.3): residencial; industrial; comercial, serviços e outras atividades, rural, poder público, iluminação pública, consumo próprio e serviço público, no qual se enquadra os serviços de água, esgoto e saneamento.

Além disso, os consumidores são divididos em dois grupos de faturamento: Grupo A e Grupo B. O Grupo A consiste em consumidores de alta tensão, ou seja, com tensão de fornecimento de 2,3 a 230 [kV]. O grupo A é caracterizado pela estrutura tarifária binômia, onde é cobrado o consumo de energia e de demanda e existem três modalidades de fornecimento para este grupo: convencional, horossazonal azul e horossazonal verde.

O Grupo B consiste nos consumidores de baixa tensão (tensão de fornecimento menor do que 2,3 [kV] e é caracterizado pela estrutura tarifária monômia, onde é cobrado apenas o consumo de energia.

Tabela 3.3 - Classes de consumo por grupo

Grupo A	Grupo B
A1 - 230 kV ou mais	B1 - Residencial
A2 - 88 a 138 kV	B2 - Rural
A3 - 69 kV	B3 - Outras Classes (Industrial, comercial, serviços e poder público, serviço público e consumo próprio)
A3a - 30 a 44 kV	
A4 - 2,3 a 25 kV	
AS - Subterrâneo	B4 - Iluminação Pública

Fonte: Adaptado de ANEEL (2005)

3.1.2 Componentes da conta de energia

As contas de energia elétrica apresentam uma nomenclatura própria. A seguir, os itens mais importantes:

O consumo de energia pode ser dividido no consumo de energia ativa e reativa. A energia ativa, expressa em [kWh], representa o consumo de energia capaz de produzir trabalho. Corresponde ao valor acumulado pelo uso da potência elétrica disponibilizada ao consumidor ao longo de um período de consumo, normalmente de 30 dias. O consumidor paga este consumo no mês seguinte à sua utilização. Esta potência elétrica ativa, expressa em kW, é a quantidade de energia elétrica solicitada da rede em um dado instante. A energia reativa, expressa em [kVAr], que é a energia solicitada pelos equipamentos elétricos para a manutenção do fluxo magnético nos mesmos. Esta energia não produz trabalho útil e seu consumo da rede deve ser a menor possível.

A demanda, expressa em, [kW] é média da potência elétrica solicitada pela carga instalada em operação na unidade consumidora ao sistema elétrico, durante um intervalo de tempo especificado (normalmente 15 minutos). Para uma análise das contas de energia, encontram-se os seguintes itens de demanda: A demanda contratada, que é a demanda colocada continuamente e obrigatoriamente à disposição do consumidor por parte da concessionária e deve ser paga mensalmente pelo consumidor em sua totalidade; a demanda de ultrapassagem, que é a parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada (existe uma tolerância de 10% para consumidor atendido por níveis de tensão inferiores a 69 kV); e a demanda faturada, que é a demanda considerada para fins de faturamento, consistindo no maior valor entre a demanda medida e a contratada.

Na figura a seguir, Figura 3.1, segue um exemplo de tarifação da demanda medida (coluna azul), da demanda contratada (linha vermelha) e da demanda faturada (coluna verde).

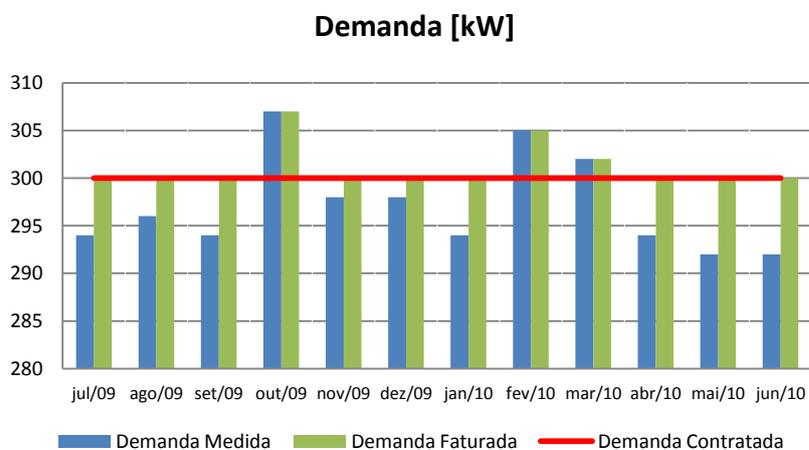


Figura 3.1 - Tipos de demanda de energia elétrica

Fonte: Elaborado pelo autor

O fator de potência é uma relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S). Ele representa a quantidade de potência ativa que um equipamento elétrico utiliza e pode ser utilizado para se medir o quanto a energia elétrica está sendo eficazmente utilizada. Será melhor explicado, no subitem 3.5, Correção do Fator de Potência.

O horário de ponta é definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais. Normalmente, quando o cliente adota a tarifa horossazonal, as contas de energia têm valores diferenciados de consumo de energia e de demanda para o horário de ponta e para o horário fora de ponta.

Além dos termos acima, existem outros itens que compõe a tarifa de uma conta de energia:

- Período Seco: 7 meses consecutivos (maio a novembro).
- Período Úmido: 5 meses consecutivos (dezembro a abril)

O fator de carga não representa nenhuma variável que compõe o custo da energia, mas pode ser entendido como o grau de utilização da energia disponível. Em outras palavras, quanto menor for o fator de carga, menor a utilização da demanda disponibilizada pela concessionária ao consumidor e maior é o valor médio pago pela utilização da energia. Seu valor é obtido ao dividir o consumo de energia pelo tempo de utilização da demanda máxima. Pode ser obtida através da Equação 3.1.

$$F.C. = \frac{D_{\text{média}}}{D_{\text{max}}} = \frac{D_{\text{média}} \times \Delta t}{D_{\text{max}} \times \Delta t} = \frac{\text{kWh (consumo)}}{D_{\text{max}} \times \Delta t} \quad (3.1)$$

onde:

F.C.: fator de carga;

D: demanda

A Figura 3.2 apresenta a relação do custo médio da energia paga com o fator de carga. Percebe-se que quando não se utiliza o máximo possível da demanda disponibilizada pela concessionária, maior o valor médio pago pela utilização da energia.

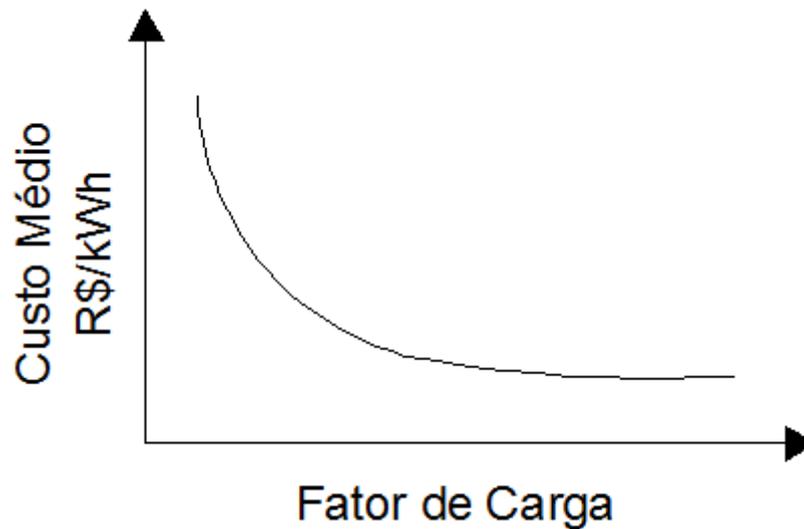


Figura 3.2 - Relação do fator de carga com o custo médio pago pela energia

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Formas de Redução do Custo da Energia com o Enquadramento Tarifário

Ao se analisar as tarifas e contas de energia devem-se observar os seguintes potenciais de economia de energia: realizar um enquadramento da demanda contratada e escolher do sistema de tarifação adequado.

3.1.4 Enquadramento da Demanda Contratada

Para a adequação da demanda contratada, deve-se verificar a possibilidade de redução das cargas instaladas (utilização de equipamentos com alto rendimento e bem dimensionados) e de introdução de controles automáticos para modulação de carga. Além disso, deve-se avaliar as contas de energia para verificação da demanda faturada, procurando constatar o pagamento de multas por ultrapassagem da demanda contratada ou de uma contratação superior ao realmente necessário.

3.1.5 Escolha do Sistema de Tarifação Adequado

Para a correta escolha do sistema de tarifação, deve-se avaliar os itens a seguir, realizando uma simulação para a comprovação da economia:

- Regime de funcionamento da empresa;
- Possibilidade de mudanças de turnos;
- Possibilidade de remanejamento total ou parcial das cargas para fora do horário de ponta.

Desta forma, para a escolha entre as tarifas azul e verde, pode-se observar as seguintes condições para a escolha do sistema tarifário, Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Comparação entre as tarifas azul e verde

Tarifa Azul	Tarifa Verde
Empresas que não modulam a carga na ponta	Quando é possível modular a carga no horário de ponta
Empresas com elevado consumo de energia ativa;	Empresas sem consumo de energia ativa alto, mas com uma demanda elevada
Fator de carga na ponta maior do que 0,65	Fator de carga na ponta menor do que 0,65

Fonte: Elaboração do autor

As Tarifas Horossazonal Azul e Verde são modalidades tarifárias com tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano (seco e úmido). A tarifa azul é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência. Já a tarifa verde é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de uma única tarifa de demanda de potência.

O período seco compreende as leituras de maio a novembro e o período úmido compreende as leituras entre dezembro a abril do ano seguinte.

3.1.5.1 Tarifa Verde

Considera-se a seguinte estrutura tarifária:

- Demanda de potência [kW]: um preço único.
- Consumo de energia elétrica [kWh]:
 - Um preço para o horário de ponta no período seco;
 - Um preço para o horário fora de ponta no período seco;
 - Um preço para o horário de ponta no período úmido;
 - Um preço para o horário fora de ponta no período úmido;

O custo financeiro é calculado pelas equações 3.2 e 3.3.

No período seco:

$$VCTVs = (CEfs \times TCfs) + (CEps \times TCps) + (TD \times D) \quad (3.2)$$

No período úmido:

$$VCTVu = (CEfu \times TCfu) + (CEpu \times TCpu) + (TD \times D) \quad (3.3)$$

onde:

VCTV = Valor da conta [R\$] com a tarifa horo sazonal Verde

CE = Consumo de energia no horário fora de ponta [kWh];

TC = Tarifa de consumo de energia elétrica [R\$/kWh];

TD = Tarifa da demanda [R\$/kW];

D = Demanda média [kW];

f = índice que indica o horário fora de ponta;

p = índice que indica o horário fora de ponta;

s = índice que indica o período seco.

u = índice que indica o período úmido.

3.1.5.2 Tarifa Azul

Considera-se a seguinte estrutura tarifária:

- Demanda de potência [kW]:
- um preço para o horário de ponta;
- um preço para o horário fora de ponta;
- Consumo de energia elétrica [kWh]:
 - Um preço para o horário de ponta no período seco;
 - Um preço para o horário fora de ponta no período seco;
 - Um preço para o horário de ponta no período úmido;

- Um preço para o horário fora de ponta no período úmido;

O custo financeiro é calculado pelas equações 3.4 e 3.5.

No período seco:

$$VCTAs = (CEfs \times TCfs) + (CEps \times TCps) + (TDfs \times Dfs) + (TDps \times Dps) \quad (3.4)$$

E para o período úmido:

$$VCTAu = (CEfu \times TCfu) + (CEpu \times TCpu) + (TDfu \times Dfu) + (TDpu \times Dpu) \quad (3.5)$$

onde:

VCTA = Valor da conta [R\$] com a tarifa horo sazonal Azul;

CE = Consumo de energia no horário fora de ponta [kWh];

TC = Tarifa de consumo de energia elétrica [R\$/kWh];

TD = Tarifa da demanda [R\$/kW];

D = Demanda média [kW];

f = índice que indica o horário fora de ponta;

p = índice que indica o horário fora de ponta;

s = índice que indica o período seco.

u = índice que indica o

período úmido.

3.1.5.3 Tarifa Convencional A4

Considera-se a seguinte estrutura tarifária:

- Demanda de potência [kW]:
 - Um valor único para o horário de ponta e fora de ponta;
- Consumo de energia elétrica [kwh]:
 - Um valor único para o horário de ponta e fora de ponta;

O custo financeiro é calculado pelas equação 3.6.

$$VCTCA4 = (CE \times TC) + (TD \times D) \quad (3.6)$$

onde:

VCTCA4 = Valor da conta [R\$] com a tarifa convencional A4;

CE = Consumo de energia no horário fora de ponta [kWh];

TC = Tarifa de consumo de energia elétrica [R\$/kWh];

TD = Tarifa da demanda [R\$/kW];

D = Demanda média [kW];

3.1.5.4 Tarifa Convencional B3

Considera-se a seguinte estrutura tarifária:

- Demanda de potência [kW]:
 - Um valor único para o horário de ponta e fora de ponta;
- Consumo de energia elétrica [kWh]:
 - Um valor único para o horário de ponta e fora de ponta;

O custo financeiro é calculado pelas equação 3.7.

$$VCTCB3 = (CE \times TC) \quad (3.7)$$

onde:

VCTCB3 = Valor da conta [R\$] com a tarifa convencional A4;

CE = Consumo de energia no horário fora de ponta [kWh];

TC = Tarifa de consumo de energia elétrica [R\$/kWh];

O custo mensal médio foi obtida através de uma média ponderada onde atribuiu-se peso 7 para o período seco e peso 5 para o período úmido e dividiu-se os resultados por 12.

3.2 Utilização de conjuntos motobombas mais eficientes

Os conjuntos motobombas são equipamentos que podem ser utilizados para a captação de água bruta, para um posterior tratamento, e para bombear a água tratada na rede

de distribuição de água. Eles representam os maiores gastos com energia elétrica em unidades de abastecimento de água. E segundo dados do Plano Nacional de Eficiência Energética, MME (2010), entre 90 e 95% do consumo total de energia elétrica no setor de abastecimento de água é atribuído ao sistema de bombeamento de água, sendo então o maior potencial de economia no consumo de energia.

Segundo a Europump e o Hydraulic Institute (2004) e Saidur (2010), cerca de 75% dos sistemas de bombeamento são superdimensionados em relação a demanda real, prática comum justificada pela necessidade de uma margem de segurança e, pelo fato destas instalações serem especificadas para operar em condições de máxima carga onde, na maioria das vezes, operam sob carga máxima somente por curtos períodos de tempo, resultando em uma operação ineficiente pela maior parte do tempo. Sobre o assunto, Sahoo (2009a) diz que:

A maioria dos sistemas de bombeamento funciona fora de seu ponto de rendimento ótimo. Para antecipar o crescimento da carga, o usuário final e o fornecedor costumam adicionar de 10 a 50 % de margens de segurança para assegurar que o motor e a bomba acomodem o crescimento da demanda. (SAHOO, 2009, p. 35).

Sahoo (2009a) ainda diz que bombas sobredimensionadas operam longe do seu ponto de máximo rendimento (PMR), fato que demonstra a necessidade de se realizar um dimensionamento adequado da motobomba à sua carga.

De maneira geral, as medidas de eficiência energética em conjuntos motobombas estão apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Eficientização energética em conjuntos motobombas

	Dimensionamento adequado do motor em relação à carga acionada
Motor	Utilização de motores de alto rendimento
	Utilização de bancos de capacitores para correção do fator de potência
	Manutenção
	Seleção e dimensionamento adequados
Bomba	Utilizar uma bomba ao invés de duas e destinar uma terceira de reserva
	Utilizar rotação variável quando necessário
	Manutenção e Limpeza

3.2.1 Seleção e dimensionamento adequados da bomba

Para selecionar uma bomba centrífuga objetivando a eficiência energética, é necessário ter um bom conhecimento das condições de trabalho (vazão e pressão) a qual a bomba estará sujeita. Segundo Kaya (2008), a seleção de uma bomba não deve ser realizada somente para a capacidade máxima de trabalho, mas também, para a capacidade real necessária para a maior parte do tempo.

Antes de selecionar o modelo da bomba, é importante examinar sua curva de rendimento, que mostra a dados importantes como a vazão (m^3/h), altura manométrica (m), eficiência (%), potência necessária (kW). A curva de rendimento indica o tamanho e tipo da bomba, rotação de trabalho (rpm) e tamanho do rotor (mm). A curva também mostra o ponto de maior rendimento da bomba. Para minimizar o consumo de energia elétrica, deve-se selecionar uma bomba em que o ponto de trabalho interseccione a curva da bomba dentro de 20% de seu ponto de maior rendimento. (HYDRAULIC INSTITUTE, 2008)

Sobre o assunto Viana (2011) diz que os pontos a considerar durante a seleção da bomba são:

- Ponto de funcionamento, pois uma bomba que opera longe de seu ponto de funcionamento perde rendimento na operação.
- Ter alta eficiência, pois a eficiência da bomba afeta diretamente os custos operacionais, significando que a energia está sendo melhor aproveitada;
- Potência consumida e potência do acionador: se a margem entre elas for pequena, pode-se impedir o atendimento das condições operacionais e se for muito grande pode aumentar os custos iniciais e operacionais;
- Flexibilidade operacional: a flexibilidade é importante para o caso de se necessitar trocas futuras;
- Condições de sucção: o NPSH disponível tem que ser maior do que a margem de segurança especificada;
- Padronização: possibilidade de utilização de bombas similares para intercâmbio de componentes age como fator de redução dos custos de operação e manutenção;

- Característica de construção: procurar equipamentos com facilidade de desmontagem e deslocamento, e acessibilidade para seus componentes para manutenção;
- Estabilidade da curva: ou seja, utilizar bombas com curvas de carga versus vazão estáveis;
- Tradição do fabricante: verificar as condições de garantia, assistência técnica e confiabilidade do equipamento.

3.2.2 Localização correta da instalação da bomba

A correta localização da bomba é importante para o seu funcionamento e manutenção. Segundo Sahoo (2009b), deve-se procurar instalar o mais perto possível da fonte do líquido de trabalho e, quando possível, instalar a entrada da bomba abaixo do nível da fonte do líquido. Deve-se evitar locais onde a sujeira, poeira e umidade sejam excessivas, procurando por lugares limpos e secos. Segundo Girdhar (2005), deve-se observar condições ergonômicas e procurar deixar um espaço livre para possibilitar inspeções e manutenções futuras.

3.2.3 Instalação adequada dos conjuntos motobombas

Um dos fatores de grande influência para a operação adequada é a sua correta instalação, ou seja, bombas bem niveladas, alinhadas desenvolvem menos falhas em sua estrutura e vibram menos.

3.2.4 Dimensionamento adequado do motor em relação à carga acionada

O carregamento de um motor pode ser compreendido como a potência de trabalho em relação à potência nominal do motor. Segundo o US DOE (1997) e a UNEP (2006) a maioria dos motores são designados para operar na faixa entre 50% a 100% da carga nominal. A Figura 3.3 demonstra que a eficiência da maioria dos motores diminui drasticamente abaixo de 50%. Um motor quando bem dimensionado trabalha em uma região de operação em que os rendimentos são elevados (a curva conjugado versus rotação se aproxima de uma reta nesta faixa de operação).

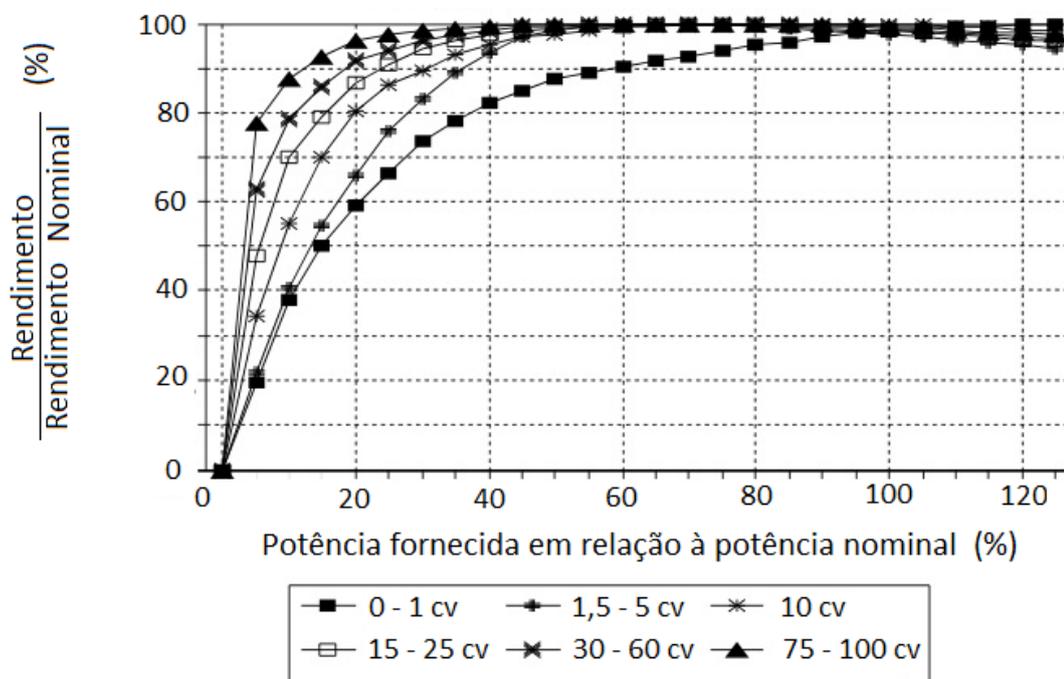


Figura 3.3 – Rendimento percentual do motor em relação ao rendimento deste operando com 100 % da potência nominal

Fonte: Adaptado de US DOE (1997)

3.2.5 Seleção de motores de alto-rendimento

A Portaria MME/MCT/MDIC 553/05 estabeleceu os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética para motores elétricos trifásicos de indução, rotor gaiola de esquilo, conforme previsto pela Lei de Eficiência

Energética (Lei nº 10295 de 17 de outubro de 2001). Os rendimentos nominais mínimos estabelecidos para os motores de indução seguem no Anexo B.

3.2.6 Análise da operação dos conjuntos motobombas operando com rotação constante

A seguir, apresenta-se uma metodologia para a análise da operação de conjuntos motobombas operando com rotação constante.

3.2.6.1 Altura geométrica e altura de elevação

As Figura 3.4 e Figura 3.5 ilustram as duas instalações mais comuns no saneamento.

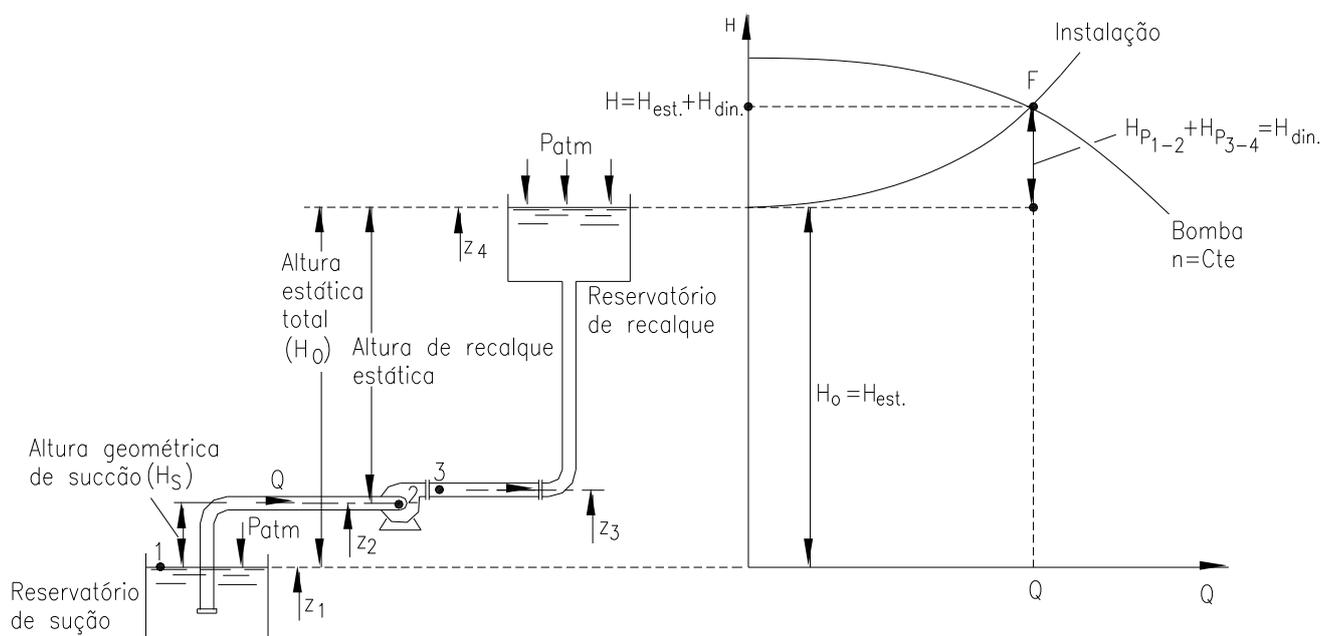


Figura 3.4 - Instalação com reservatório de sucção com líquido abaixo da bomba (bomba não afogada)

Fonte: Viana (2011)

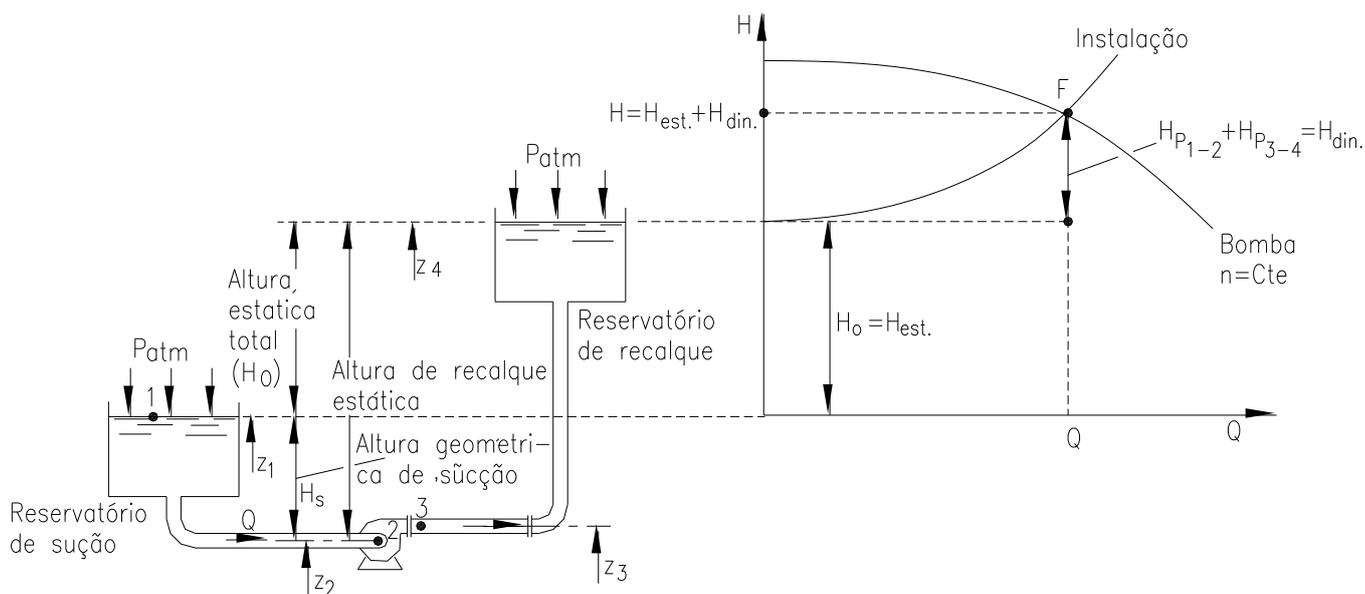


Figura 3.5 - Instalação com reservatório de sucção com nível do líquido acima da bomba (bomba afogada)

Fonte: Viana (2011)

As definições das alturas geométricas ou estáticas seguem a seguir:

- Altura geométrica de sucção H_s é a cota do nível de água no reservatório de sucção até a linha de centro do eixo da bomba;
- Altura geométrica de recalque H_r é a cota da linha de centro do eixo da bomba até o nível de água no reservatório de recalque.

Na instalação da Figura 3.4, o nível da água no reservatório de sucção está abaixo da linha de centro da bomba. Essa instalação é denominada não afogada. No caso da instalação da Figura 3.5 o nível da água no reservatório de sucção está acima da linha de centro de eixo da bomba e por isso é denominada como afogada.

Para as duas instalações tem-se que a altura geométrica total H_0 é a diferença das cotas dos níveis dos reservatórios de sucção e de recalque. Assim, tem-se as equações 3.8 e 3.9, respectivamente, para as Figura 3.4 e Figura 3.5, definindo a altura geométrica total.

$$H_0 = z_4 - z_1 = H_r + H_s \quad (3.8)$$

$$H_0 = z_4 - z_1 = H_r - H_s \quad (3.9)$$

Considerando que a entrada da bomba é na posição 2 e a saída é na posição 3 nas Figura 3.4 e Figura 3.5 tem-se por definição que a altura total de elevação H de uma

bomba é a diferença de altura total na saída H_3 e altura total na entrada H_2 , representada na equação 3.9.

$$H = H_3 - H_2 = \frac{p_3}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_3^2 - v_2^2}{2g} + z_3 - z_2 \quad (3.10)$$

Onde:

H [m] – altura total de elevação da bomba;

p_3 [N/m²] – pressão na saída da bomba, medida por um manômetro ou transdutor de pressão instalado na posição;

p_2 [N/m²] – pressão na entrada da bomba, medida por um manômetro ou transdutor de pressão;

v_2 [m/s] e v_3 [m/s] – velocidades médias de escoamento da água, respectivamente, na entrada e saída da bomba;

z_2 [m] e z_3 [m] – cotas de posição em relação a uma mesma referência fixa, na entrada e saída da bomba;

g [m/s²] – aceleração da gravidade;

ρ [kg/m³] – massa específica da água.

Para a determinação das velocidades médias na entrada e saída da bomba, considerando que as seções são circulares, tem-se a equação 3.11, obtida da equação de continuidade.

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} \quad v_3 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_3^2} \quad (3.11)$$

Onde:

Q [m³/s] – vazão medida;

D_2 [m] – diâmetro interno da seção 2;

D_3 [m] – diâmetro interno da seção 3.

Levando a equação 3.11 na equação 3.10 tem-se a equação 3.12.

$$H = \frac{p_3}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{8}{\pi^2 \cdot g} + \left(\frac{1}{D_3^4} - \frac{1}{D_2^4} \right) \cdot Q^2 + (z_3 - z_2) \quad (3.12)$$

As equações 3.10 e 3.12 representam a altura total de elevação da bomba ou altura manométrica total (AMT). Essas equações são utilizadas quando pretende-se determinar a altura total de elevação da bomba através de ensaio da bomba, seja em

laboratório ou seja em campo. Nas Figura 3.4 e Figura 3.5 a curva (QxH) representa as equações 3.10 e 3.12 para a bomba operando com rotação constante.

Utilizando as Figura 3.4 e Figura 3.5 pode-se aplicar a equação de Bernoulli entre os reservatórios de sucção (nível 1) e recalque (nível 2) e obter a equação para a altura total de elevação H em função da altura geométrica total H_0 e as perdas de carga na linha de sucção (de 1 a 2) e na linha de recalque (de 3 a 4) da instalação.

$$H = H_0 + H_{p_{1-2}} + H_{p_{3-4}} \quad (3.13)$$

Onde:

H[m] – altura total de elevação ou altura manométrica total;

$H_{p_{1-2}}$ [m] – altura referente a perda de carga na linha de sucção;

$H_{p_{3-4}}$ [m] – altura referente a perda de carga na linha de recalque.

De preferência deve-se determinar a perda de carga pela equação universal ou de Darcy-Weisback, equação 3.14 e 3.15, considerando que os diâmetros das linhas de sucção e recalque tenham valores diferentes, respectivamente, D_s e D_r , e ainda colocando-se em função da vazão.

$$H_{p_{1-2}} = f_s \cdot \frac{8 \cdot L_s}{\pi^2 \cdot D_s^2 \cdot g} \cdot Q^2 \quad (3.14)$$

$$H_{p_{3-4}} = f_r \cdot \frac{8 \cdot L_r}{\pi^2 \cdot D_r^2 \cdot g} \cdot Q^2 \quad (3.15)$$

Levando-se as equações 3.14 e 3.15 na equação 3.13 tem-se a equação 3.16.

$$H = H_0 + \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \cdot \left(f_r \cdot \frac{L_r}{D_r^4} - f_s \cdot \frac{L_s}{D_s^4} \right) \cdot Q^2 \quad (3.16)$$

Onde:

H[m] – altura total de elevação obtida na instalação;

H_0 [m] – altura geométrica total;

g [m/s^2] – aceleração da gravidade;

f_s [1] e f_r [1] – fatores de atrito das linhas de sucção e recalque;

L_s [m] e L_r [m] – comprimentos equivalentes, respectivamente, das linhas de sucção e recalque;

D_s [m] e D_r [m] – diâmetros internos, respectivamente, das linhas de sucção e recalque;

Q [m³/s] – vazão.

O fator de atrito de cada linha pode ser determinado pelo diagrama de Moody ou pela equação 3.17, sugerida por Nackab (1988). Nackab (1988) explicitou o fator de atrito f , utilizando a equação de Colebrook-White para escoamento turbulento, que são os escoamentos que ocorrem para a água nas instalações de bombeamento no saneamento.

A equação 3.17 mostra a desenvolvida por Nackab (1988).

$$f = \left[2 \log \left(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{0,4 \cdot (Re)^{-0,3} + 0,0053}} \right) \right] \quad (3.17)$$

Onde:

f [1] – fator de atrito da linha considerada;

ε [m] – rugosidade absoluta (tabelada em função do material da tubulação);

D [m] – diâmetro interno da tubulação considerada;

Re [1] número de Reynolds.

O número de Reynolds em função da vazão e da seção circular de um tubo é determinado pela equação 3.18.

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\nu \cdot \pi \cdot D} \quad (3.18)$$

Onde:

Q [m³/s] – vazão;

ν [m²/s] – viscosidade cinemática da água (função da temperatura da água);

D [m] – diâmetro interno da tubulação considerada.

As equações 3.13 e 3.16 representam a altura total de elevação que a bomba tem que ter para vencer as alturas solicitadas pela instalação, ou seja, é a equação da instalação. Nas Figura 3.4 e Figura 3.5 a curva $Q \times H$ da instalação mostra o comportamento da altura total de elevação variando-se com a vazão. O ponto F representa o ponto de funcionamento da bomba e instalação com altura total de elevação H e vazão Q .

3.2.6.2 Potência hidráulica

Seja a Figura 3.6 um motor elétrico de potencia P_{el} acionando diretamente uma bomba de potencia de eixo P_e e potencia hidráulica P_h .

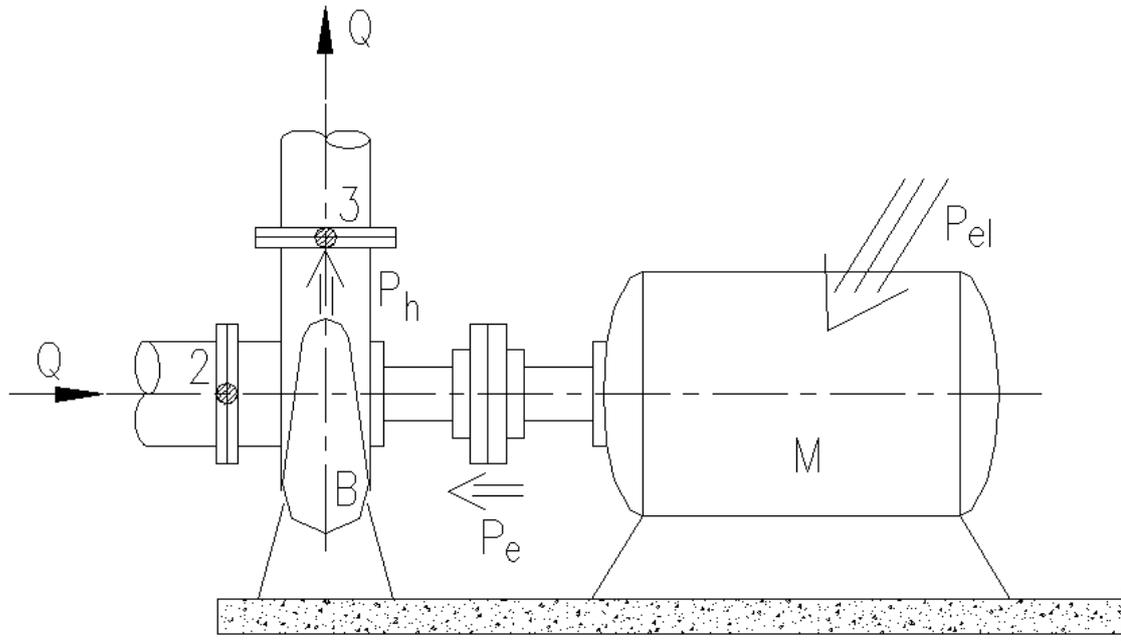


Figura 3.6 - Bomba acionada por um motor elétrico

Fonte: Viana (2011)

A potencia hidráulica da bomba é aquela utilizada no recalque da vazão Q à altura total de elevação H , equação 3.19.

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (3.19)$$

Onde:

P_h [kW] – potencia hidráulica da bomba;

ρ [kg/m³] – massa específica da água;

g [m/s²] – aceleração da gravidade;

Q [m³/s] – vazão da bomba;

H [m] – altura total de elevação da bomba.

3.2.6.3 *Rendimento do conjunto motobomba*

É a relação percentual entre a potencia hidráulica da bomba (saída) e a potencia elétrica do motor (entrada). É dada pela equação 3.20.

$$\eta_t = \frac{P_h}{P_e} \cdot 100 \quad (3.20)$$

Onde:

η_t [%] – rendimento total da bomba;

P_h [kW] – potencia hidráulica da bomba;

P_e [kW] – potencia de eixo da bomba.

3.2.6.4 *Determinação do carregamento dos motores elétricos*

Segundo McCoy (1993), não há uma única norma que apresente a metodologia para testes de determinação da eficiência em motores elétricos, sendo as mais comuns a IEEE 112 (EUA e América Latina), IEC 34-2 (International Electrotechnical Commission), JEC-37 (Japanese Electrotechnical Committee), BS-269 (British) e C-390 (Canadian Standards Association).

Porém, segundo Nailen (1989), mesmo quando os testes de determinação da eficiência de um motor são realizados sobre as melhores condições, eles produzem resultados variáveis. Bortoni (2009, 2007) propõe que, ao invés de se utilizar metodologias que irão fornecer resultados discutíveis para a determinação da eficiência do motor, pode-se determinar o fator de carregamento do mesmo, pois motores corretamente dimensionados trabalham na sua região de melhor rendimento.

O carregamento, segundo Ramos (2009), UNEP (2006) e US DOE, pode ser determinado a partir dos valores da potência ativa e rendimento, determinando-se assim a potência mecânica exigida pela carga, equação 3.21:

$$P_m = \frac{P \cdot \eta}{0,736} \quad (3.21)$$

Onde:

P_m = Potência mecânica exigida pela carga [cv];

P = Potência ativa [kW];

η = rendimento do motor elétrico (obtido através de gráficos de curvas de rendimento dos motores, fornecido pelos fabricantes);

Com estas informações, o carregamento pode ser obtido, de acordo com a equação 3.22:

$$Fc = \frac{P_m}{P_N} \cdot 100 \quad (3.22)$$

Onde:

Fc = Fator de carregamento [%];

P_m = Potência mecânica exigida pela carga [cv];

P_N = Potência nominal do motor elétrico [cv];

Segundo Bortoni (2009, 2007), um método prático e eficiente de se calcular o carregamento de um motor, pode ser realizado sem a medição dos parâmetros elétricos do motor, através da medição da rotação do motor utilizando um tacômetro, equação 3.23, ou através da medição da corrente com um amperímetro, equação 3.24. Este método será utilizado neste trabalho, devido à sua praticidade e à sua confiabilidade.

$$Fc = \left(\frac{n_T}{n_N}\right) \cdot \left(\frac{n_S - n_T}{n_S - n_N}\right) \quad (3.23)$$

Onde:

Fc – Fator de carregamento [%];

n – rotação em [rpm];

índices T, N e S – trabalho, nominal e síncrona.

$$Fc = \frac{2 \cdot I_T - I_0}{2 \cdot I_N - I_0} \quad (3.24)$$

onde:

I – corrente em [A];

índices T e N e 0 – trabalho e nominal;

I_0 – corrente em vazio.

A corrente em vazio pode ser medida na partida do motor, quando a válvula está fechada. Na impossibilidade de desacoplar a carga do motor, pode-se estimar o valor da

corrente em vazio percentual pela equação 3.25 (Bortoni, 2009, 2007).

$$I_0 = [0,5470 + 0,1453 \cdot \ln(2p) - 0,0723 \cdot \ln(P_N)] \cdot I_N \quad (3.25)$$

onde:

I_0 – corrente em vazio;

$2p$ – número de pares de pólo;

P_N – potência nominal;

I_N – corrente nominal.

3.2.6.5 *Consumo específico de energia elétrica (CE)*

O consumo específico de energia elétrica (CE) indica a energia requerida para que um metro cúbico de água seja elevado pelo conjunto motobomba. Este indicador mostra a qualidade do conjunto motobomba e também do sistema de tubulações à jusante da bomba, pois a melhoria do rendimento do conjunto ou a redução da perda de carga da tubulação irão reduzir a potência necessária para elevar o metro cúbico de água. Quanto menor for seu valor menos energia é gasta. É calculado pela seguinte equação 3.26:

$$CE = \frac{EE_{cons}}{V_{bom}} \quad (3.26)$$

onde:

CE – consumo específico de energia elétrica [kWh/m³];

EE_{cons} – energia elétrica consumida no período [kWh];

V_{bom} – volume bombeado no período [m³];

3.2.6.6 *Consumo específico de energia elétrica normalizado (CEN)*

É um indicador utilizado para comparar diferentes instalações, que possuem alturas manométricas próprias. Assim foi definido o CEN como a energia gasta para elevar um metro cúbico de água a 100 metros de altura manométrica, e é dado pela equação 3.27:

$$CEN = \frac{EE_{cons}}{V_{bom} \cdot (H_{man}/100)} \quad (3.27)$$

onde:

CEN – consumo específico de energia elétrica [kWh/m³/100m];

EE_{cons} – energia elétrica consumida no período [kWh];

V_{bom} – volume bombeado no período [m³];

H_{man} – altura manométrica [m]

Como referência este indicador é da ordem de 0,5 kWh/m³ para 100 m. Sistemas com valores inferiores ainda podem ser melhorados, porém se o resultado for maior indica que há uma grande chance de reduzir o gasto com energia.

3.3 Desequilíbrios de Tensão

A operação do motor sob tensões desequilibradas não é desejável e pode reduzir a sua eficiência e danificar o motor, pois, provocam um aumento na temperatura. Estudos demonstraram que um pequeno desequilíbrio de 3,5 % na tensão pode aumentar, em 20%, as perdas do motor de indução trifásico. Um desequilíbrio de 5% ou mais pode destruí-lo rapidamente. A

Figura 3.7 mostra um exemplo da redução da eficiência para um motor de 20 cv.

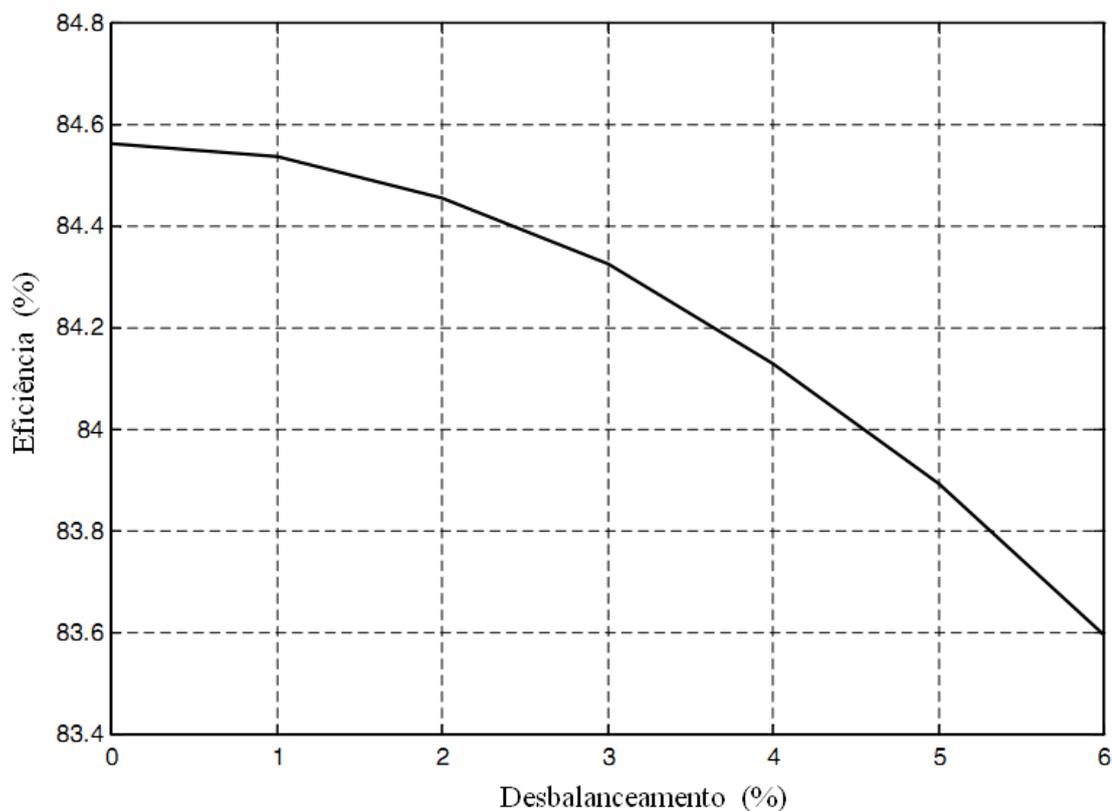


Figura 3.7 - Redução da eficiência de um motor x Desbalanceamento de tensão para um motor de 20 cv
 Fonte: Gnacinski (2008)

Segundo Gnacinski (2008), as principais causas de desbalanceamentos de tensão podem ser a existência de cargas monofásicas presentes no sistema, desbalanceamento de transformadores e da linha de transmissão e a compensação não uniforme das três fases com bancos de capacitores.

Equipamentos trifásicos que operam com tensões desequilibradas podem operar de forma inadequada, resultando em falhas e redução da vida útil. Em sistemas de bombeamento, os motores de indução são os equipamentos mais afetados por estes desequilíbrios, que geram problemas como a adição de perdas no motor, sobreaquecimento, aumento da vibração e ruído, e, conseqüentemente, a redução da vida útil do motor. (Abreu et al, 2000; Donolo et al, 2010; Lee et al, 1999; Gnacinski, 2008, Dymond, 2007). É interessante notar que a eficiência de motores padrão e de alto rendimento decai com o desbalanceamento de tensão, mas a superioridade do motor de alto rendimento sobre o padrão não é afetada por ele. (ELTOM, 2005).

Segundo a ABNT NBR 17094-1 (2008) os efeitos de desequilíbrios de tensão em motores de indução trifásicos são indução de desequilíbrios de correntes, que sob

rotação nominal podem ser de 6 a 10 vezes o valor do desequilíbrio de tensão;

A National Electrical Manufacturers Association (NEMA) na norma NEMA MG1-1993 recomenda que, em motores de indução, o desequilíbrio não deve ser maior do que 1%. As normas do International Electrotechnical Commission (IEC) também recomendam que o desbalanço permitido para motores de indução seja inferior a 1%.

3.3.1 Determinação dos desequilíbrios de tensão

Segundo Garcia et al (2009), para analisar os desbalanceamentos de tensão, quatro métodos podem ser utilizados: NEMA, IEEE, componentes simétricas e CIGRÉ. O método das componentes simétricas é o mais rigoroso e requer o conhecimento da magnitude e diferença angular entre as fases. O método CIGRÉ oferece os mesmos resultados do método por componentes simétricas, mas necessita somente da magnitude da tensão entre as fases. Devido ao fato de que nem todos os medidores de parâmetros elétricos são habilitados a medir a diferença angular entre as fases os métodos da NEMA e IEEE foram desenvolvidos.

Ambos os métodos, NEMA e IEEE, dizem que o desequilíbrio de tensão pode ser determinado a partir da medição da tensão nas três fases, e calculado como sendo o máximo desvio da tensão em uma fase em relação a tensão média, dividido pela tensão média, conforme as equações 15 e 16.

Segundo o método da NEMA (Norma NEMA–MG–14.34), o desequilíbrio de tensão pode ser calculado (equação 3.26) como a divisão do máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio das tensões de linha pelo valor médio das tensões de linha (equação 3.27):

$$dV = \frac{\max(|V_{ab} - V_{med}|; |V_{bc} - V_{med}|; |V_{ca} - V_{med}|)}{V_{med}} \quad (3.28)$$

onde:

$$V_{med} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (3.29)$$

e:

dV – desequilíbrio de tensão [%]

V_{ab} – Tensão na fase A [V];

V_{bc} – Tensão na fase B [V];

V_{ca} – Tensão na fase C [V];

V_{med} – Tensão média [V];

O método da IEEE (Norma IEEE Std. 141) é semelhante ao método da NEMA, mas ao invés de tensões de linha, são utilizadas tensões de fase, equação 3.28.

$$\text{Desequilíbrio de tensão} = \frac{3 \cdot (V_{\text{máx}} - V_{\text{min}})}{V_a + V_b + V_c} \quad (3.30)$$

onde:

V_{máx} – maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas

V_{min} – menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas

V_a, V_b, V_c – Módulo das tensões trifásicas;

3.4 Operação da bomba utilizando rotação variável

3.4.1 Utilização do inversor de frequência

Para atender a solicitação de redução da vazão em uma instalação de bombeamento, com a bomba operando sob rotação constante, as formas mais comuns são: ligar a bomba somente em parte do tempo; utilização de uma válvula de controle na saída da mesma (estrangulamento da válvula), para alterar o ponto de funcionamento com o aumento da perda de carga; utilização de by-pass na saída da bomba com recirculação de parte da água para o reservatório de sucção; utilizar uma configuração com duas ou mais bombas em paralelo; e utilizar um inversor de frequência.

O estrangulamento da válvula é uma das alternativas mais comuns, onde o controle de vazão é realizado com a inserção ou a retirada de perdas de carga no circuito hidráulico. Porém, das alternativas acima, a utilização do inversor de frequência é a melhor, pois, permite que seja feito o controle da rotação do conjunto motobomba. Segundo Viana (2011), bombas centrífugas são regidas pelas Leis de Afinidade, que estabelecem relações linear, quadrática e cúbica com – respectivamente – vazão, pressão e potência, de forma que

se pode reduzir a vazão e pressão da bomba e, conseqüentemente, a potência demandada, diferentemente de outras técnicas adotadas, como o uso de válvulas e by-pass, que inserem perda de carga e recirculam a água bombeada, respectivamente, gerando um desperdício de energia.

Rodrigues (2007), Wu (2007), Braghiolli (2005) e Ilinski (2000) enumeram uma lista de vantagens obtidas com a utilização do inversor de frequência em sistemas de bombeamento, onde as principais são:

- Economia de energia: economias de energia de 30% a 50% são obtidas na maioria das instalações que utilizam os inversores;
- Redução da corrente de partida;
- Melhoria no controle do processo: ajuste de vazão e pressão para as condições de operação necessárias ao processo, onde pequenas variações podem ser corrigidas mais rapidamente pelo inversor de frequência do que por outra forma de controle, o que traz uma melhoria na performance do processo, porque permite a ela operar não muito longe de seu ponto de melhor rendimento;
- Redução do índice de vazamentos;
- Redução de problemas de cavitação no sistema de bombeamento associados à operação de válvulas de controle a baixo fluxo;
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico. Como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios, aumentando a vida útil e reduzindo os gastos com manutenção.

Porém, Pemberton (2005) ressalta que o investimento inicial é relativamente alto, e, portanto, se seu uso não for feito da maneira adequada pode não haver retorno. Segundo Rodrigues (2007), cada sistema deve ser analisado individualmente para avaliar a viabilidade técnica e econômica do investimento. Gomes (2009, p.311) diz que, a pressurização direta das redes de distribuição de água por meio de boosters é uma prática bastante comum e pode indicar o uso de inversores de frequência, pois a demanda de água varia ao longo do dia (fornecendo condições de vazão e pressão variáveis).

3.4.2 Variação da altura geométrica total

A altura geométrica ou altura geométrica estática até o momento foi considerada constante, mas no saneamento a mesma pode variar. A Figura 3.8 ilustra uma instalação de bombeamento que apresenta variações de níveis nos reservatórios de sucção e recalque, tendo uma mudança da altura geométrica total e em consequência uma variação de vazão na bomba. Na seleção da bomba deve-se prever estas variações.

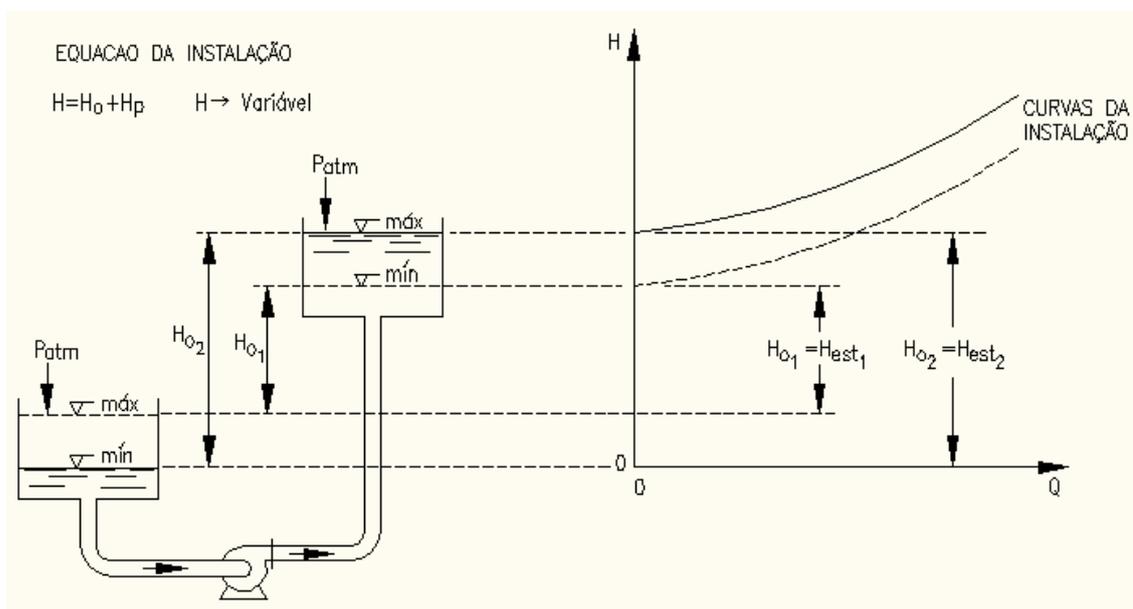


Figura 3.8 - Influência das variações de níveis nos reservatórios de sucção e recalque

Fonte: Viana (2011)

3.4.3 Variação da vazão através da abertura e fechamento de uma válvula

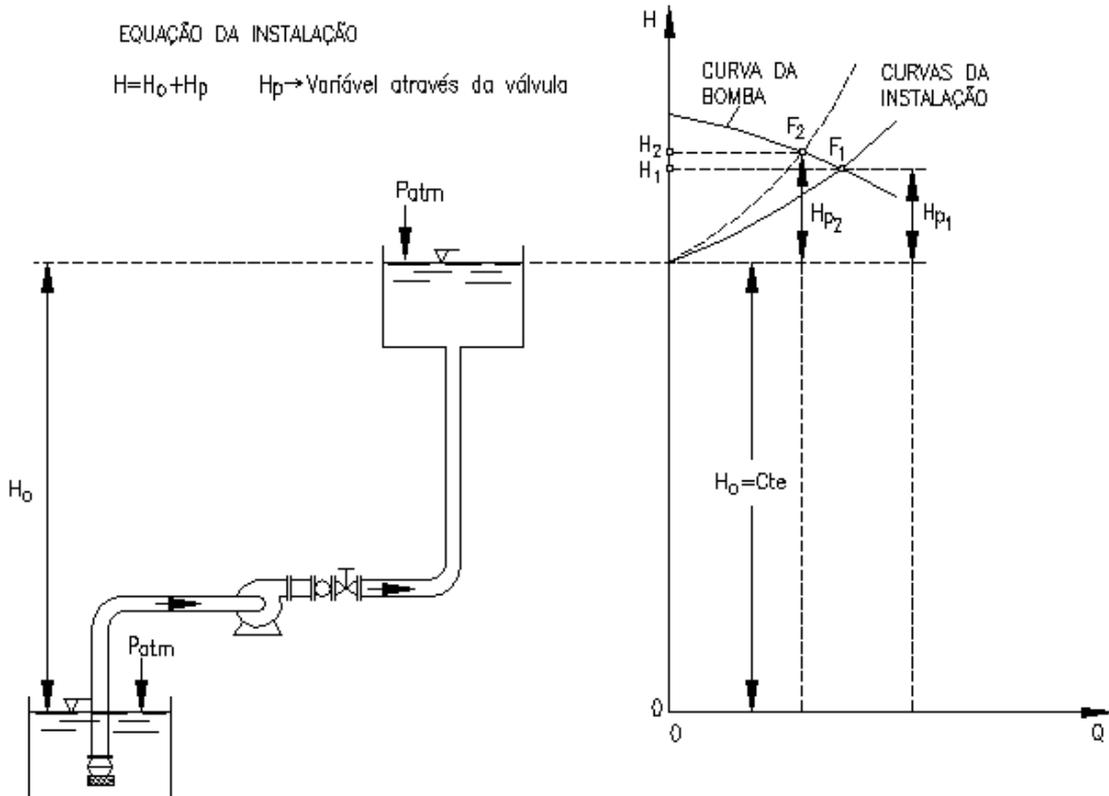


Figura 3.9 - Influência da abertura e fechamento da válvula

Fonte: Viana (2011)

A Figura 3.9 ilustra a influencia da abertura e fechamento de uma válvula instalada na saída da bomba. Considerando que no ponto de funcionamento F_1 a válvula esta totalmente aberta e o sistema está operando com uma vazão Q_1 e uma altura total de elevação H_1 , correspondendo a uma perda de carga H_{p1} . O sistema solicita uma vazão Q_2 menor que Q_1 , ou seja, operar no ponto de funcionamento F_2 . A válvula é fechada e cria uma perda H_{p2} , que obriga a bomba a aumentar a altura total de elevação H_2 para vencer a essa perda de carga e conseqüentemente diminuir a vazão para Q_2 .

A variação da vazão utilizada para variar a vazão em uma instalação de bombeamento de água.

3.4.4 Variação da vazão através da diminuição do diâmetro externo do rotor

O fabricante de bombas, principalmente o de bombas centrífugas aproveita a mesma carcaça, de tal forma que possa receber motores de vários diâmetros externos, sem afetar sensivelmente a hidráulica do conjunto. Desta forma, os rotores são fornecidos em diâmetros padrões, cobrindo uma faixa operacional das bombas, como mostra a Figura 3.10. É importante salientar que neste caso, a rotação da bomba permanece constante, ou seja, a bomba é testada com rotores diferentes e os resultados são apresentados nos catálogos dos fabricantes.

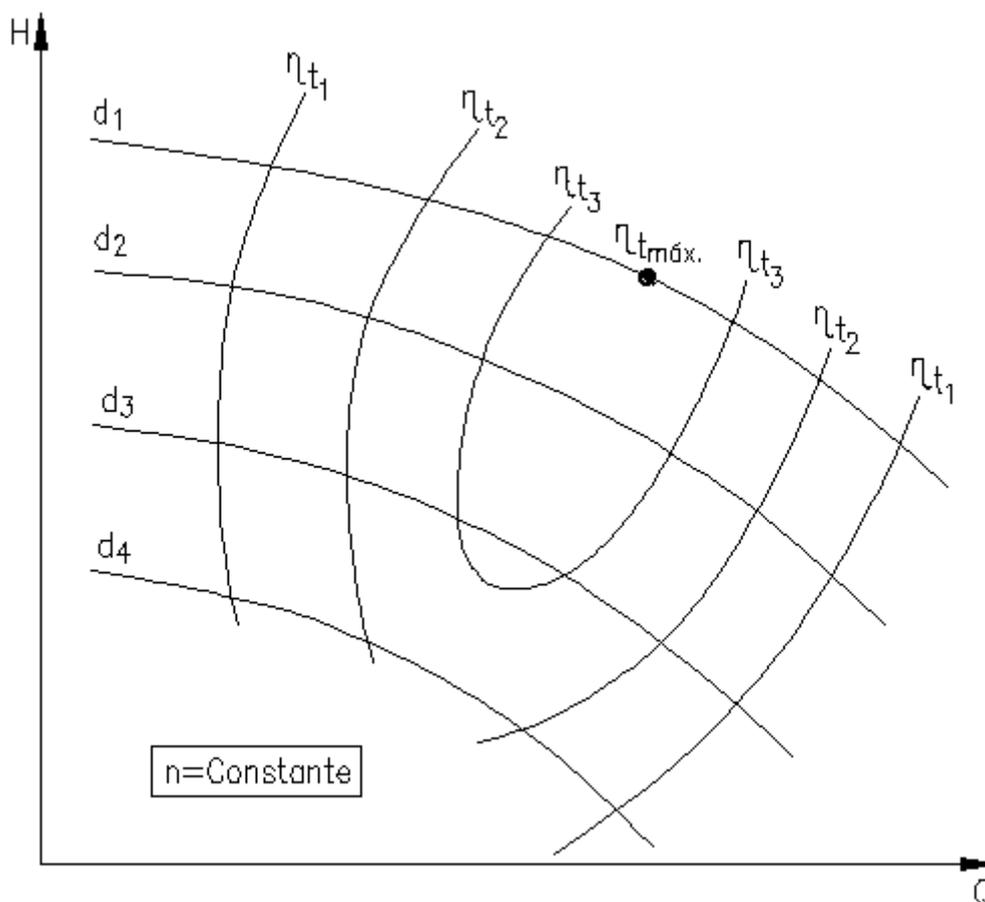


Figura 3.10 – Campo de funcionamento de uma bomba com diâmetros de rotor diferentes com rotação constante

Fonte: Viana (2011)

Note que na Figura 3.10, o rendimento máximo da bomba ocorre normalmente no diâmetro maior, onde existe menor folga entre rotor e carcaça, portanto menores perdas por folgas da água. Assim, ao atender um ponto especificado, fora do diâmetro maior, a bomba perderá rendimento. Sugere-se para a questão da eficiência energética escolher sempre que possível, bombas com rotores externos maiores próximos do seu rendimento máximo.

3.4.5 Rotação variável

3.4.5.1 Equações de semelhança

As equações 3.31 representam a variação da vazão Q , da altura total de elevação H e da potência de eixo da bomba Pe com a variação da rotação n . Essas equações são válidas para pontos homólogos, ou seja, considerou-se que não há variação de rendimento da bomba na variação da rotação. Por essa razão as equações 3.31 devem ser utilizadas dentro de certos limites, pois para limites maiores o rendimento pode variar bastante.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad \frac{Pe_2}{Pe_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (3.31)$$

Onde:

Q_1 [m³/s] – vazão da bomba na rotação n_1 ;

Q_2 [m³/s] – vazão da bomba na rotação n_2 ;

n_1 [m³/s] – rotação 1 da bomba;

n_2 [m³/s] – rotação 2 da bomba;

H_1 [m] – altura total de elevação da bomba na rotação 1;

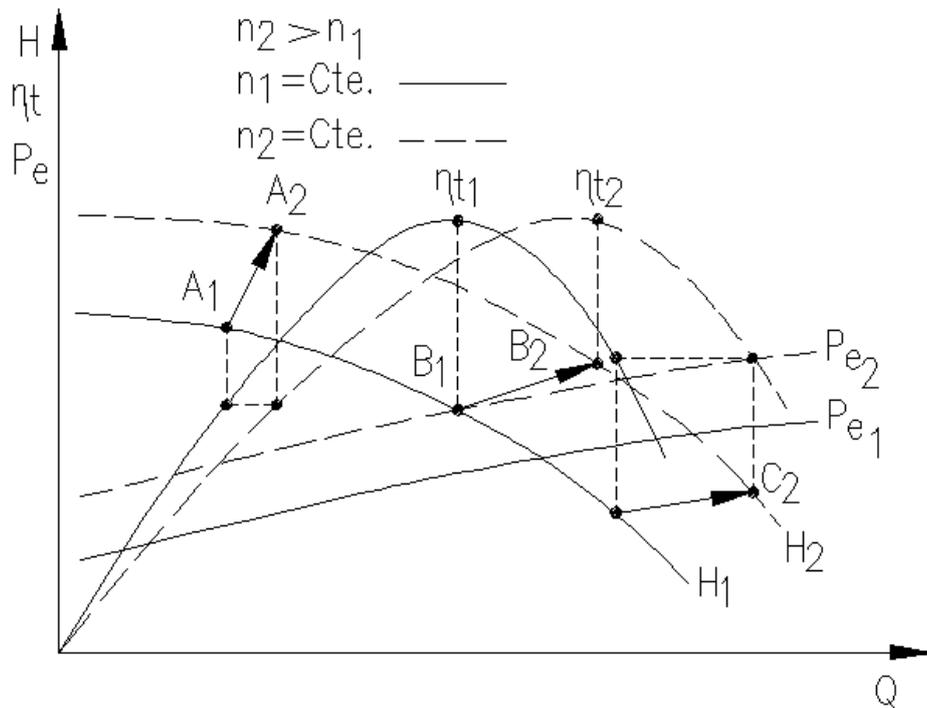
H_2 [m] – altura total de elevação da bomba na rotação 2;

Pe_1 [kW] – potência de eixo da bomba na rotação n_1 ;

Pe_2 [kW] – potência de eixo da bomba na rotação n_2 .

A Figura 3.11 mostra o comportamento de uma bomba centrífuga, conhecido o comportamento da vazão Q_1 versus a altura H_1 , o rendimento total η_{t1} e a potência de eixo Pe_1 de uma bomba na rotação constante n_1 , pode-se determinar o comportamento da altura, rendimento e potência de eixo para a rotação $n_2 > n_1$, utilizando as

equações 3.31. Note que o rendimento total da bomba permanece constante e somente desloca de posição.



Pontos A₁,B₁,C₁são homólogos respectivamente a A₂,B₂,C₂

Figura 3.11 - Equações de semelhança

Fonte: Viana (2011)

A utilização da variação da rotação aplicando as equações 3.31 é uma pratica bastante utilizada na variação da rotação em bombas no saneamento, mas deve-se ter cuidado quanto aos seus limites, pois incertezas poderão ocorrer. Karassik (2008) recomenda utilizar até 10 % da rotação conhecida.

Normalmente, os fabricantes apresentam em seus catálogos bombas operando com rotação constante, pela razão de que o acionamento de bombas com rotação variável em laboratório apresenta um custo maior do que a bomba com rotação constante.

3.4.5.2 Campos de funcionamento obtidos em bancadas de testes

A Figura 3.12 ilustra o campo básico de funcionamento mais comum de uma bomba centrífuga – vazão Q versus altura total de elevação H com curvas de rendimento total η_t e rotação n constantes.

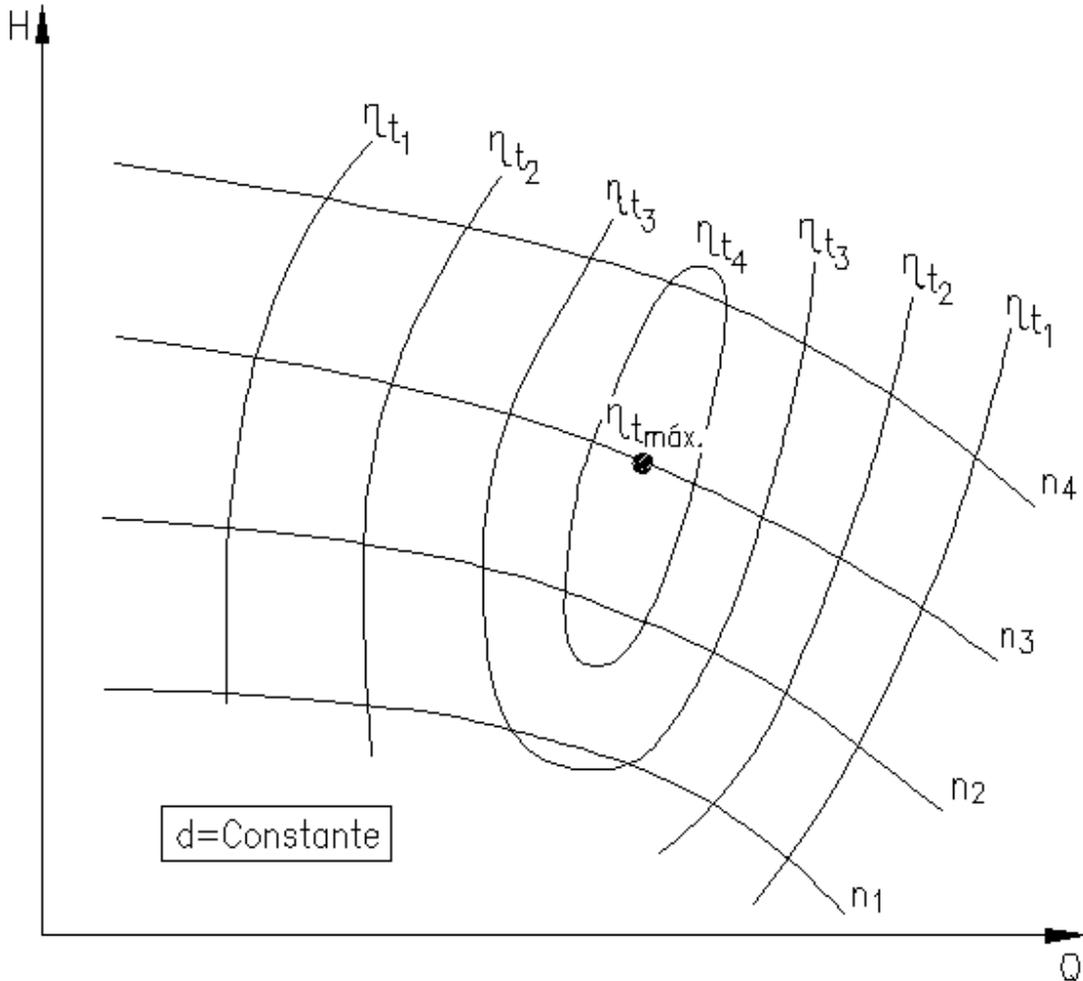


Figura 3.12 - Campo de funcionamento de uma bomba com diâmetros de rotor diferentes com rotação constante

Fonte: Viana (2011)

3.4.5.3 Comparação de uma bomba operando com rotação constante e com rotação variável

Para atender a solicitação da instalação em se tratando de uma diminuição de vazão, tendo a bomba operando com rotação constante n é comum utilizar um estrangulamento na válvula de saída da mesma, alterando o ponto de funcionamento para suprir a perda de carga, como foi visto no item 3.4.3. Outra forma de variar a vazão é através da rotação variável através da utilização de inversores de frequência, mostrado no item 3.4.1.

Seja Figura 3.13 ilustrando a operação de uma bomba centrífuga na rotação constante n no ponto de funcionamento $F_1 (Q_1, H_1)$.

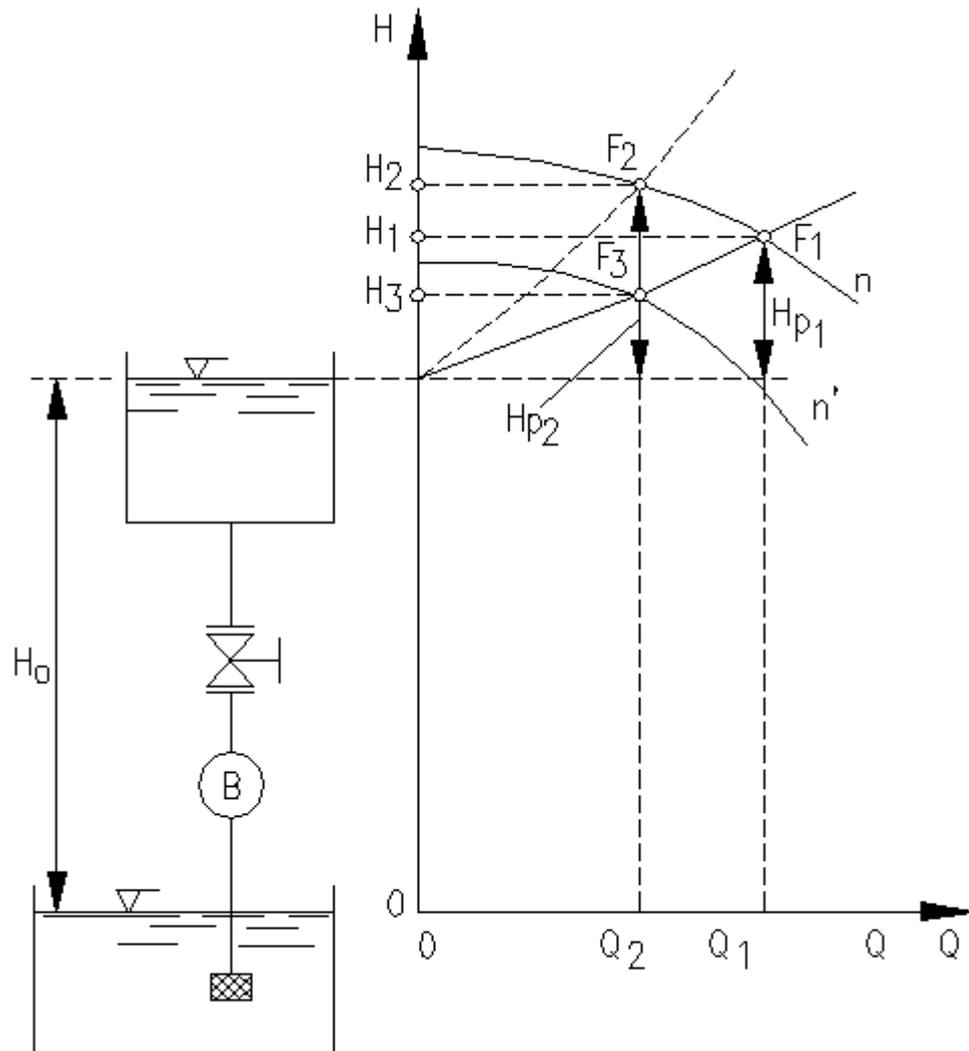


Figura 3.13 - Comparação de uma bomba centrífuga operando com rotação constante e variável

Fonte: Viana (2011)

A instalação solicita da bomba operar com uma vazão Q_2 menor que Q_1 e através do estrangulamento da válvula, mantendo-se a rotação n , a bomba passa a operar no ponto $F_2 (Q_2, H_2)$, com uma perda de carga H_{p2} .

A diminuição da vazão solicitada pela instalação também pode ser realizada pela diminuição da rotação de n para n' mantendo-se a válvula aberta, que proporcionaria a bomba operar no ponto $F_3 (Q_3, H_3)$. Considerando o rendimento do motor elétrico η_m e da bomba η_t , ambos constantes, a potencia elétrica economizada seria aquela mostrada na equação 3.30.

$$P_{el\ economizada} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot (H_2 - H_3)}{\eta_t \cdot \eta_m} \quad (3.32)$$

E a energia elétrica economizada correspondente está apresentada na equação 3.31.

$$E_{el\ economizada} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot (H_2 - H_3)}{\eta_t \cdot \eta_m} \cdot t \quad (3.33)$$

A seleção de bombas operando com rotação variável muitas vezes é preterida pelos projetistas pelo alto custo do inversor de frequência, se comparando o sistema de rotação constante. Entretanto, se trata de um custo inicial, com necessidade de análises dos custos de operação e manutenção do equipamento, relativos respectivamente, ao menor consumo de energia e ao menor desgaste da bomba. Devem ser analisados também as solicitações da instalação de bombeamento no que se refere as variações da vazão e da altura e o tempo de permanência de uma determinado ponto de operação, principalmente na diminuição da vazão, Viana (2001)

3.5 Correção do Fator de Potência

O fator de potência representa a quantidade de potência ativa que um equipamento elétrico utiliza e pode ser utilizado para se medir o quanto a energia elétrica está sendo eficazmente utilizada. Cargas elétricas indutivas em sistemas elétricos de corrente alternada, como os motores de indução trifásicos (MIT), demandam potência ativa e potência reativa da rede elétrica. A potência ativa, expressa em W, é a potência que efetivamente realiza o trabalho e a potência reativa, expressa em VAR, é distribuída nos elementos indutivos e capacitivos do circuito, estabelecendo o campo magnético nas indutâncias e os campos elétricos nos capacitores. Desta forma, pode-se dizer que a potência reativa não produz trabalho, mas que sem ela o trabalho não se realizaria. A potência aparente, expressa em VA, é soma dos vetores da potência ativa e da potência reativa e ativa, e também pode ser obtido pelo produto da tensão pela corrente total em sistemas elétricos de corrente alternada.

O fator de potência pode ser definido pela razão entre a potência e a potência aparente, equações 3.32 e 3.33:

$$\text{Fator de potência} = \frac{\text{potência ativa}}{\text{potência aparente}} = \frac{P}{S} = \cos \theta \quad (3.34)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.35)$$

Onde:

S: potência aparente (VA);

P: potência ativa (W);

Q: potência reativa (VAr).

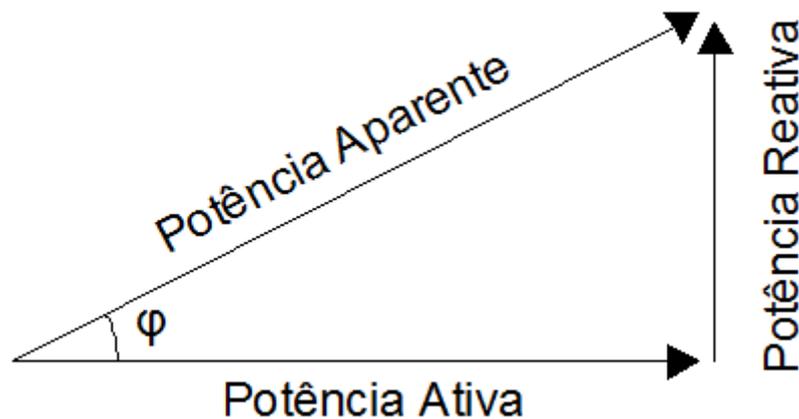


Figura 3.14 - Triângulo de potências

Fonte: Elaboração do autor

Como dito anteriormente, enquanto a potência ativa é convertida em trabalho útil (energia mecânica, calor, etc.), a potência reativa não pode ser convertida. Desta forma, segundo Sagiroglu (2006), o baixo fator de potência implica que cabos, relés de proteção, transformadores e outros equipamentos necessitem serem maiores do que o indicado, além de ocupar a rede de transmissão e distribuição do sistema elétrico. Segundo Bayindir (2008), a melhoria do fator de potência de uma instalação não somente irá economizar dinheiro, pois irá maximizar a capacidade do sistema, melhorando a qualidade da tensão e reduzindo as perdas de energia.

Outro motivo para a correção do fator de potência é a exigência por parte de órgãos reguladores de manter o fator de potência acima de níveis estabelecidos, sob pena de aplicação de uma multa por excesso de consumo de energia reativa. No Brasil, a legislação atual (Decreto nº 479/92) estabeleceu que o fator de potência deve ser o mais próximo possível de 1,00 e determinou o limite mínimo de 0,92 para o fator de potência: das 6h da manhã às 24h o fator de potência deve ser no mínimo 0,92 para a energia e demanda de

potência reativa indutiva fornecida, e das 24h até as 6h no mínimo 0,92 para energia e demanda de potência reativa capacitiva recebida. Introduziu ainda o conceito de faturamento da quantidade de energia ativa que poderia ser transportada no espaço ocupado pelo consumo de energia reativa. Este é o motivo de as tarifas aplicadas serem de demanda e consumo de ativos, inclusive ponta e fora de ponta para os consumidores enquadrados na tarifação horosazonal. Instalações com fator de potência abaixo de 0,92 são penalizadas com um acréscimo em sua conta de energia.

Para diminuir o custo adicional com os equipamentos e com a conta de energia, a energia reativa pode ser fornecida ao equipamento através de fontes externas e a adição de bancos de capacitores é a forma mais econômica de se melhorar o fator de potência. Conjuntos motobombas apresentam um grande potencial de economia, pois o motor de indução converte entre 80 e 90% da potência aparente entregue para realizar trabalho útil e o restante é utilizado para estabelecer o campo magnético que origina a rotação no motor. (SAIDUR, 2009).

3.6 Otimização do uso de reservatórios

O uso de reservatórios em sistemas de abastecimento de água se deve à necessidade de atender às variações do consumo horário, manter uma pressão mínima ou constante na rede e também atender demandas de emergência, como em casos de incêndio ou interrupções nos sistema de captação e tratamento. A principal função dos reservatórios em sistemas de abastecimento de água é atender as variações de consumo horário, ou seja, ele é usado para garantir que no horário de maior demanda não ocorra falta de água. (LIMA, 2010).

Um dos principais problemas em relação à utilização dos reservatórios consiste na operação indevida da unidade de bombeamento que, com diversas partidas durante o dia, objetiva manter o reservatório sempre no nível máximo, não permitindo a variação entre o nível máximo e mínimo, que é desejável.

Uma grande vantagem seria reservar água horas antes do início do horário de ponta. A reservação de água é interessante, pois, além do uso da energia, os custos em sistemas de bombeamento dependem também das tarifas de energia. As tarifas de energia são normalmente estruturadas para promover o uso nos horários fora de ponta, com menores

tarifas, e penalizam a utilização no horário de ponta, que tem tarifas mais altas. Desta forma, torna-se interessante o deslocamento do bombeamento do sistema para o horário fora de ponta e, em unidades de abastecimento de água, pode-se utilizar os reservatórios de armazenamento com a finalidade de se deslocar, total ou parcial, para esta finalidade.

Lima (2010) recomenda verificar a viabilidade da construção de um novo reservatório para atender o consumo no horário de ponta e para suprir a demanda crescente das cidades, principalmente aquelas que em época de férias aumentam sua população devido a grande presença de turistas. Para Gomes (2009), no entanto, a construção de novos reservatórios não é solução automática para se deslocar a demanda de energia do horário de ponta.

Em muitos sistemas é possível otimizar ou ampliar a reserva existente, permitindo que os bombeamentos sejam deslocados para fora do horário de ponta, porém a questão não é tão simples como pode parecer a primeira vista, pois o funcionamento adequado depende de uma boa operação e de um bom nível de controle operacional. (GOMES, 2009).

Ainda sobre o assunto Soler (2008) diz que quando

O problema de planejamento de estoque de água em reservatórios consiste em decidir, para cada período do horizonte de planejamento, as operações (liga/desliga) das bombas hidráulicas que abastecem os reservatórios de modo que a demanda do reservatório seja atendida em cada período e sejam respeitados os níveis mínimos e máximos de água nos reservatórios. (SOLER, 2008).

Os reservatórios podem ser de montante, quando estão localizados antes da rede de distribuição, ou de jusante, quando estão localizados após a rede, recebendo água quando o consumo é mínimo para que possa ajudar o abastecimento no horário de maior consumo.

3.6.1 Cálculo do volume útil do reservatório

Os reservatórios possuem limites operacionais máximos e mínimos. O volume compreendido entre estes limites é chamado de volume útil, ou seja, é o volume que realmente poderá ser utilizado para suprir o bombeamento no horário de ponta. Para avaliar se o volume útil do reservatório é capaz de atender a demanda no horário de ponta é utilizado o método dos volumes diferenciais.

Este método, segundo Gomes (2009), fundamenta-se no fato de que o volume útil do reservatório depende da taxa com a qual este é alimentado e na taxa com a qual é esvaziado, sendo que a soma das diferenças negativas resulta em seu volume útil. Ainda segundo Gomes (2009), “quando a soma das diferenças positivas for igual à soma das diferenças negativas teremos que os volumes diários de entrada e saída no reservatório serão iguais”.

Para se obter a taxa com a qual o reservatório é esvaziado, deve-se observar a curva de demanda de água, que pode ser obtida através da aquisição de dados de vazão de entrada e de saída pela maior quantidade de tempo possível. Seleciona-se então o dia de maior demanda (pior situação) para a realização dos cálculos.

No método dos volumes diferenciais é realizado o somatório das diferenças negativas entre a vazão de entrada e de saída a cada hora, para encontrar assim o volume útil necessário, como mostra a Tabela 3.6. Este valor deve ser igual ao somatório das diferenças positivas. Se o valor for menor pode haver vazamentos no reservatório, e se for maior, a demanda está maior do que a produção.

Tabela 3.6 - Método dos volumes diferenciais

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo ($Q_e - Q_s$)	
	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	Q_{e1}	Q_{s1}	Se positivo	Se negativo
:	:	:	:	:
24	Q_{e24}	Q_{s24}	:	:
Total				
	$Q_{média}$ [m ³ /h]		Volume Útil Necessário [m³]	

Fonte: Adaptado de Gomes (2009)

Caso a soma das diferenças negativas seja menor do que o volume útil atual do reservatório podem ser realizadas as seguintes mudanças:

- Desligamento de todas as bombas no horário de ponta;
- Desligamento de um número de bombas inferior ao total de máquinas instaladas;

- Desligamento das bombas por um período inferior as três horas do horário de ponta.

Em todas estas situações deve ser feita uma simulação para verificar se a capacidade do reservatório é suficiente. O aumento da capacidade de reservação ou a construção de um novo reservatório de regularização dependerá da sua viabilidade técnica e econômica. Os reservatórios elevados são, geralmente, muito caros e serão viáveis somente se a economia de energia elétrica, proporcionada pela parada das bombas no horário de ponta, compensar os custos deste investimento.

4 METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Metodologia

A metodologia proposta para um sistema de abastecimento será dividida em duas etapas: uma para a realização do Pré-Diagnóstico Energético e em outra para as medições do Diagnóstico Energético.

A etapa do Pré-Diagnóstico Energético consistirá em uma visita técnica para conhecer a instalação, os equipamentos consumidores de energia, obter dados como contas de energia, cotas de reservatórios, contas de água, locais para a instalação de equipamentos, entre outros. Após a análise destas informações deverá elaborado um relatório que indicará os sistemas com maior potencia de redução nos gastos com energia.

Já a etapa do Diagnóstico Energético consistirá em medições e análise destes dados para indicar a redução de custos com a implementação de medidas de eficiência energética.

Este trabalho apresenta uma metodologia para:

- Análise tarifária;
- Análise das condições de operação dos conjuntos motobombas;
- Utilização de inversores de frequência;
- Otimização do uso do reservatório, com vistas a parada durante o horário de ponta.

Será utilizado a Opção A do PIMVP, medição de parâmetros chave, devido à sua alta relação custo-benefício.

4.2 Medições de campo

4.2.1 Grandezas necessárias

As grandezas a serem medidas para determinação da eficiência em uma instalação de bombeamento e as grandezas a serem calculadas serão apresentadas em duas partes. A primeira parte é o teste do conjunto motobomba e a segunda parte a instalação de bombeamento como um todo. As grandezas a serem medidas para o ensaio do grupo motobomba são:

- Vazão de bombeamento $Q[\text{m}^3/\text{s}]$;
- Pressão de entrada da bomba $p_2[\text{N}/\text{m}^2]$;
- Pressão na saída da bomba $p_3[\text{N}/\text{m}^2]$;
- Cotas geométricas de posição na entrada e saída da bomba em relação a uma referência fixa $z_2[\text{m}]$ e $z_3[\text{m}]$;
- Potência elétrica ou grandezas elétricas do motor $P_{el}[\text{kW}]$.

4.2.2 Equipamentos utilizados

Para realizar as medições de grandezas elétricas, pode-se utilizar um wattímetro alicate ou um analisador de grandezas elétricas. Enquanto o primeiro realiza, na maioria das vezes, medições instantâneas, o segundo pode, na maioria das vezes, adquirir dados em sua memória ou enviar estes dados para dataloggers e/ou computadores.

A vantagem da utilização do analisador de grandezas elétricas consiste no fato de que estes dispositivos, na maioria das vezes, realizam a análise dos dados lidos (mostrando tensão, corrente, potência, fator de potência), têm memória própria e possibilitam a comunicação com um computador (o que permite realizar as medições das variáveis elétricas e hidráulicas com sincronismo temporal).

4.2.3 Medidor de vazão

Existem vários tipos de medidores de vazão. Neste trabalho utilizar-se-á o medidor do tipo ultrassom de tempo de trânsito, com emissor/receptor não intrusivo. Este medidor é adequado para a medida de líquidos limpos e homogêneos, ou seja, líquidos sem grandes concentrações de partículas suspensas ou bolhas de ar ou gases. Além disso, para uma

medição expedita de vazão em uma estação de bombeamento, há a necessidade de que o medidor utilizado seja de simples instalação, seja eficaz e que tenha uma rápida resposta.

Para a instalação deste tipo de medidor, a tubulação deve ter trechos retos longos. A praticidade da instalação e operação do medidor é bastante interessante, pois não há a necessidade de furar a tubulação e de inserir qualquer corpo ou ponta no interior da mesma.

O princípio funcionamento dos medidores de vazão ultrassônicos é o da propagação das ondas sonoras nos meios, no caso fluido em escoamento, com frequências compreendidas entre 150 (kHz) e 5 (MHz). O cálculo do fluxo do fluido é realizado por meio de um microprocessador. Estes medidores podem ter o sistema emissor/receptor colocado externamente ao tubo ou internamente, denominados então, respectivamente, medidores de vazão ultrassônicos não intrusivos e medidores de vazão ultrassônicos intrusivos.

A Figura 4.1 apresenta o modelo de medição de um medidor de vazão não intrusivo do tipo ultrassônico. Este tipo de medidor efetua a medição dos tempos de duas ondas acústicas emitidas, simultaneamente, no sentido do escoamento e contra a mesmo. Com base no tempo de trânsito destas duas ondas, o medidor de vazão calcula a velocidade média do fluido. A velocidade média de escoamento é determinada em função do tipo de escoamento, que envolve a viscosidade do fluido e o diâmetro do tubo.

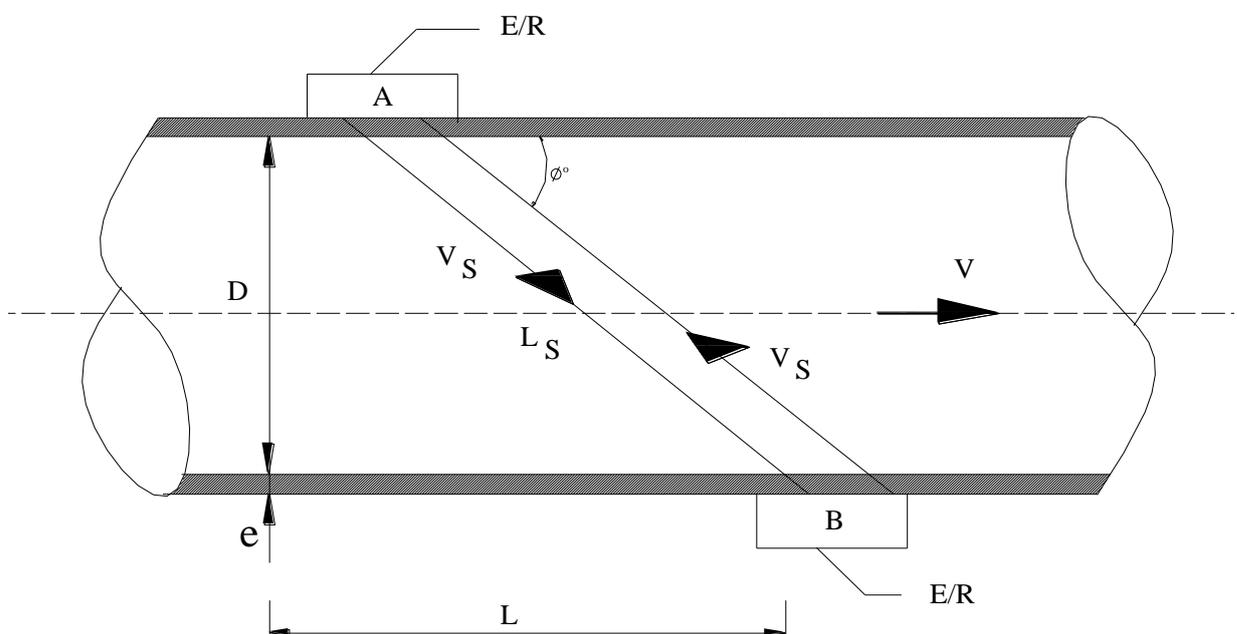


Figura 4.1 - Medidor de vazão ultrassom do tempo de trânsito com sistema emissor/receptor não intrusivo

Fonte: Viana (2011)

4.2.4 Medidor de pressão

As medidas de pressão são necessárias para a determinação da altura total de elevação. Entre os equipamentos comuns para a realização destas medidas estão os manômetros de Bourdon e transdutores de pressão (instrumentos digitais).

Os manômetros de Bourdon são instrumentos analógicos que convertem a pressão medida em um sinal mecânico, sendo utilizados para medidas pontuais. Consiste basicamente de um tubo curvo, flexível e de seção transversal oval, tendo sua tomada de pressão em uma de suas extremidades, fixada, sendo a outra selada e livre para se movimentar.

Já os transdutores de pressão são equipamentos que consistem na junção de um transdutor e um circuito de transmissão de sinal (tensão, corrente, etc.) que permite a aquisição de dados por meio de dataloggers ou a comunicação direta com um computador.

Segundo Viana (2011), para os ensaios de campo é comum instalar na entrada e saída da bomba manômetros e transdutores de pressão em série para realizar leituras manuais e leituras aquisitadas e alguns cuidados devem ser tomados, como segue:

- As pressões deverão ser medidas através da conexão dos transdutores e/ou manômetros as tomadas de pressão (bujões), respectivamente, na posição de entrada (2) e na posição de saída (3) da bomba.
- Cada transdutor de pressão e/ou manômetro deverá possuir na sua conexão, para cada posição de medida, um sistema de válvulas, contendo uma válvula de proteção do mesmo e uma válvula purga para sangria do ar, Figura 4.2.
- Na partida da bomba a válvula de proteção do transdutor deverá estar fechada, sendo somente aberta para as medições de pressão.

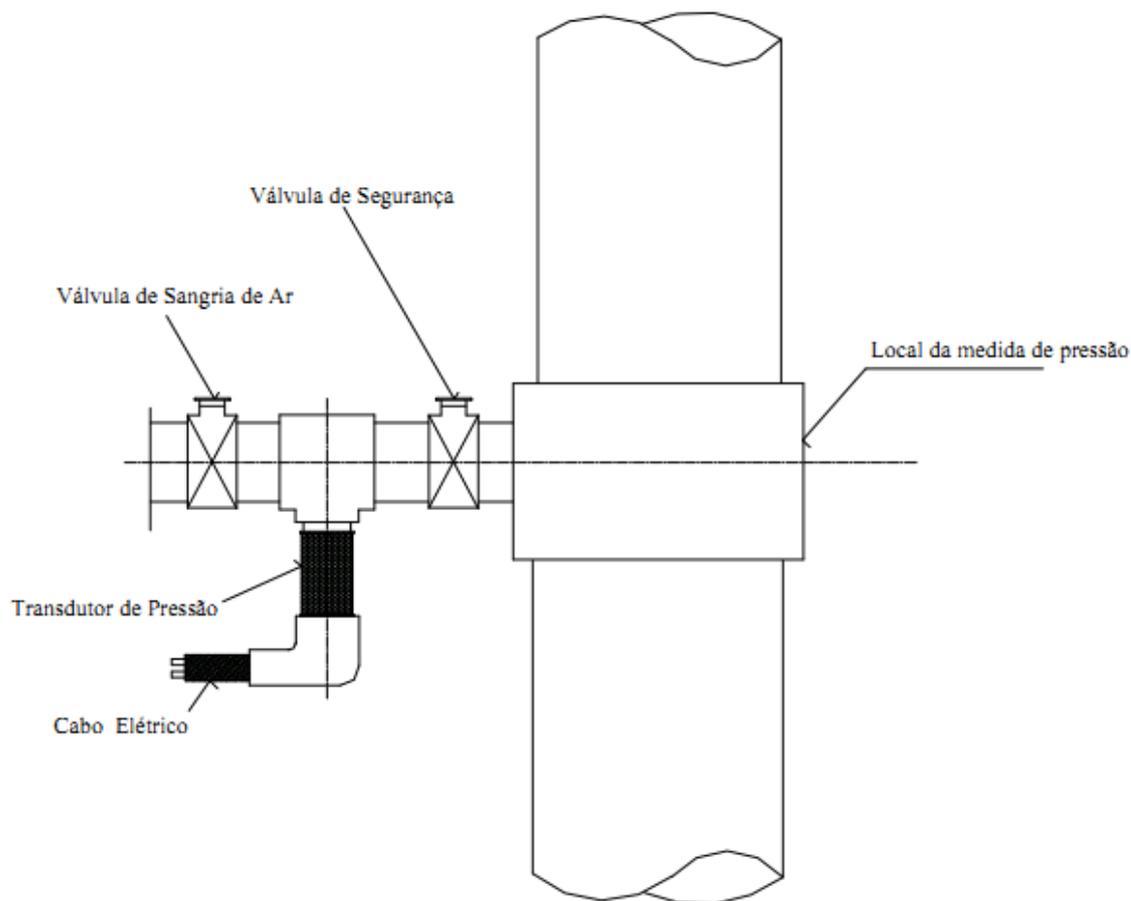


Figura 4.2 - Conexão do manômetro e/ou transdutor de pressão

Fonte: Viana (2011)

4.2.5 Medidor de rotação

Para as medidas de rotação é utilizado o tacômetro. São dois os tipos: tacômetro de contato e a laser. Alguns modelos contem as duas funcionalidades, com um acessório para contato que pode ser acoplado ao equipamento.

4.2.6 Balanço Hídrico

Segundo Lima et al.(2011) em casos, onde não é possível realizar a medição de vazão diretamente na adutora de distribuição, seja por falta de trecho reto ou pela

tubulação estar enterrada, a vazão de entrada/saída pode ser determinada pelo balanço hídrico, realizando uma medição da vazão que chega/sai ao reservatório de distribuição e o nível d'água do mesmo. Desta forma a curva de demanda é obtida pela equação 4.1.

$$Q_s = \frac{\Delta NA \cdot A_r - Q_e \cdot \Delta t}{\Delta t} \quad (4.1)$$

onde:

ΔNA [m] – variação do nível do reservatório (positiva se há aumento e negativa se há redução);

A_r [m²] – área do reservatório;

Q_e [m³/s] – vazão de entrada;

Q_s [m³/s] – vazão de saída;

Δt [s] – intervalo de tempo em tre as medidas;

4.3 Análise tarifária

A análise tarifária avaliará os seguintes itens:

- Enquadramento da Demanda Contratada;
- Escolha do Sistema de Tarifação Adequado.

4.4 Condições de operação dos conjuntos motobombas

A análise das condições de operação dos conjuntos motobombas irá mostrar qual o rendimento do conjunto motobomba, qual o carregamento do motor e a existência de desequilíbrios de tensão.

A determinação do rendimento do motor isoladamente em ensaios de campo é complicada, devido ao fato que se deve desacoplar o motor de sua carga, o que torna inviável a realização deste ensaio em campo. Desta forma, será calculado somente o carregamento dos motores para determinar o quão bem dimensionado está o motor em relação à sua carga.

4.4.1 Condições de operação da bomba

São necessários os seguintes dados:

- Potência elétrica consumida;
- Vazão;
- Valores de pressão de sucção e recalque para determinação da altura total de elevação da bomba.

Os valores de vazão e potência elétrica consumida pelo conjunto serão lidos diretamente dos medidores utilizados. A altura total de elevação da bomba será determinada através das equações 3.10 e 3.12 mostradas no item 3.2.6.1.

A partir destes valores, pode-se determinar a potência hidráulica (equação 3.19) presente no item 3.2.6.2.

4.4.2 Rendimento dos conjuntos motobombas

Utilizando a equação 3.20, no item 3.2.6.3, será calculado o rendimento dos conjuntos motobombas.

4.4.3 Carregamento dos motores

Será necessário medir a rotação de trabalho, além de obter os valores nominais desta rotação. Utilizou-se a equação 3.23 para a determinação do carregamento devido à sua praticidade e à sua confiabilidade.

4.4.4 Comparação por índices de eficiência energéticos

Os conjuntos serão comparados utilizando-se os consumos específicos (CE) e consumos específicos normalizados (CEN) as equações 3.26 e 3.27.

4.4.5 Desequilíbrio de tensão

Neste trabalho, para a determinação do desequilíbrio de tensão será utilizado o método da IEEE (equação 3.30), devido ao fato de que os medidores de grandezas elétricas trifásicos utilizados fornecem os valores das tensões de fase. Desta forma, será necessário as tensões de fase.

4.5 Utilização de bombas com rotação variável

Segundo Silva et al.(2011), para avaliar a viabilidade técnica do uso de inversores de frequência é necessário conhecer os seguintes parâmetros:

- Desnível geométrico
- Ponto de shutoff
- Ponto nominal de operação da bomba,
- Variações de consumo do local, ou seja, é necessário conhecer a curva de demanda do dia de maior consumo.

4.5.1 Determinação da curva da bomba

Conforme dito anteriormente, item 3.4.3, e analisando a Figura 4.3 observa-se que o estrangulamento da válvula provoca uma alteração na curva do sistema e, mantendo constante a rotação do motor, o ponto de operação do conjunto desloca-se sobre a curva da bomba, que permanece inalterada. Assim, com a medição de valores de pressão e vazão em diversas posições de abertura da válvula, adquire-se um conjunto de pontos que representam a curva da bomba, em uma dada rotação.

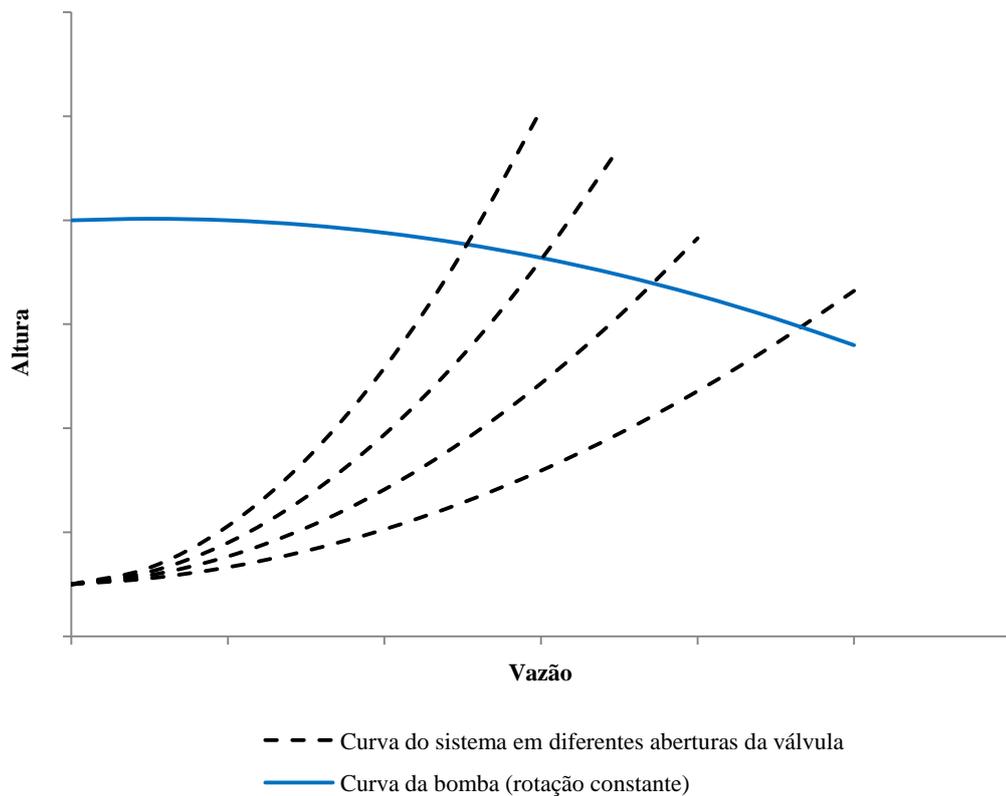


Figura 4.3 - Obtenção da curva da bomba

Fonte: Elaborado pelo autor

O chamado ensaio de recepção, que serve para verificar as condições reais de funcionamento da bomba, é obtido pelo procedimento de ensaio que gera a curva da Figura 4.3, quando realizado para rotação nominal da bomba. Este ensaio normalmente é inviável de ser realizado em campo, pois muitas vezes não é possível variar a vazão devido à demanda de água que deve ser atendida.

4.5.2 Determinação da curva do sistema

A análise da Figura 4.4 mostra que uma alteração na curva da bomba através da regulação de sua rotação, mantendo a mesma abertura de válvula, provoca um deslocamento do ponto de operação do conjunto sobre a curva do sistema, que por sua vez permanece inalterada. Assim, a curva do sistema para uma dada condição de linha de tubulações é obtida medindo os valores de pressão e vazão para diversas rotações da bomba.

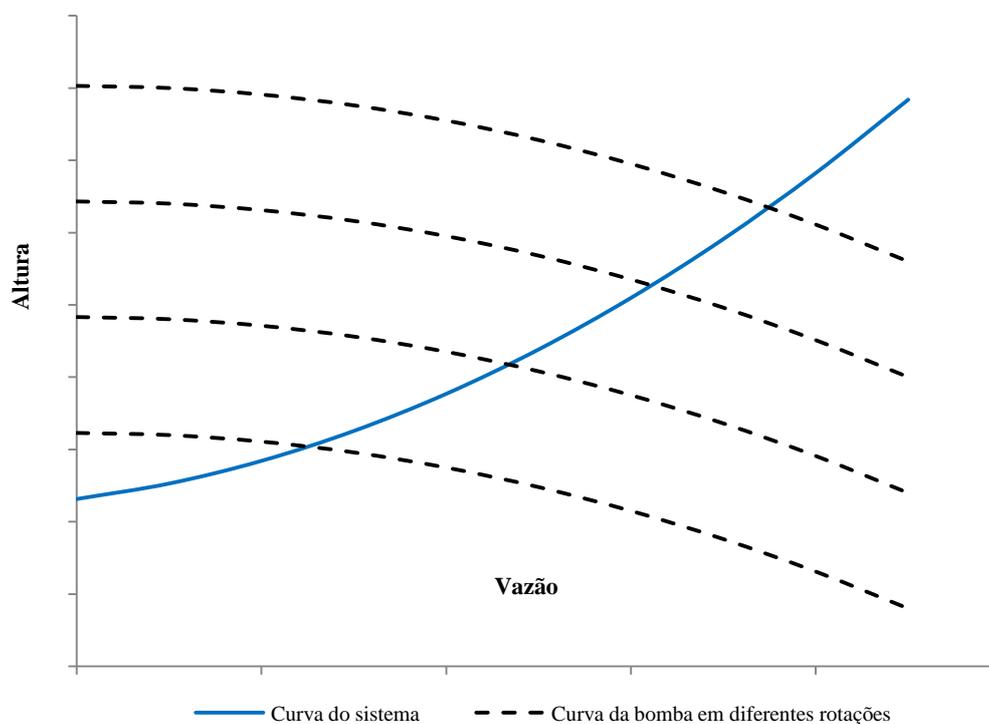


Figura 4.4 - Obtenção da curva do sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

Contudo a bomba a ser ensaiada é acionada por um motor elétrico de rotação constante o que impossibilita o levantamento da curva do sistema. No entanto, mesmo o motor sendo de rotação única, pode-se afirmar que num dado intervalo de tempo, tanto o motor quanto a bomba irão trabalhar com rotação variável. O referido intervalo corresponde

ao instante de tempo em que o motor é desligado, e sua rotação decresce desde a nominal até a rotação igual a zero.

Através de um sistema informatizado, com alguns transdutores e programas computacionais, é possível acompanhar o decréscimo da rotação do conjunto motobomba, lendo e armazenando os valores de pressão e vazão para as diferentes rotações, desde o desligamento do motor até sua parada completa, porém, assim como no ensaio para obtenção da curva da bomba, este procedimento é de difícil realização em campo, pois é necessária a instalação de diversos sensores, sendo mais indicada para testes em laboratório.

4.5.3 Interpolação por três pontos

Em casos onde há a impossibilidade de realização dos testes para levantamento das curvas, seja por dificuldades na implementação do sistema de aquisição de dados ou restrições impostas pelo processo onde a bomba está instalada, Silva (2000) propõe a estimativa das curvas características com base no conhecimento de três pontos distintos.

A Figura 4.5 apresenta a curva de uma bomba instalada em um sistema com ponto nominal de operação representado por N , fornecendo uma vazão Q_N e pressão H_N . A condição de operação com a válvula toda fechada e máxima pressão é p , com vazão zero e pressão H_P , chamado de ponto de shutoff da bomba. As diferenças geométricas de cotas entre os reservatórios de sucção e descarga são representadas pela altura estática H_0 .

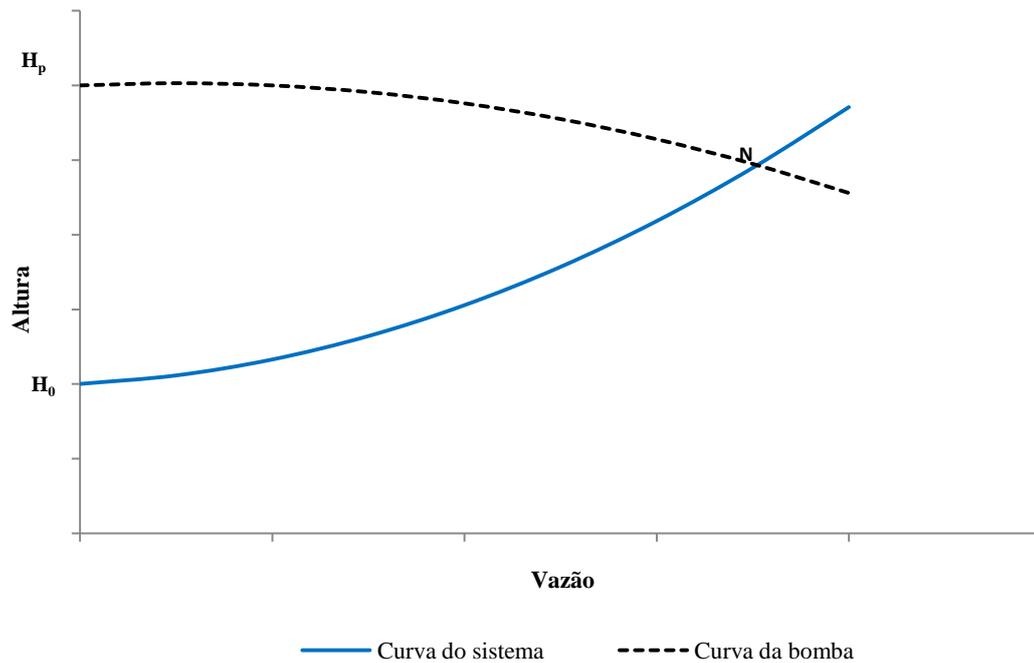


Figura 4.5 - Estimativa das curvas características por três pontos

Fonte: Elaborado pelo autor

Tanto a curva da bomba quanto a do sistema são expressas por um polinômio do segundo grau, isto é, admite-se que a altura de carga total fornecida pela bomba e as pressões impostas pelas linhas de tubulações são expressas com a forma conforme mostra a equação 4.2.

$$H = a + b \cdot Q^2 \quad (4.2)$$

Da curva do sistema, observa-se que para a condição de vazão igual a zero, a equação 4.3 resulta em:

$$H_0 = a \quad (4.3)$$

e para a condição nominal (equação 4.4):

$$b = \frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \quad (4.4)$$

onde: H_N é a altura nominal

Para a curva do sistema a expressão simplificada pode ser definida pela equação 4.5:

$$H_s = H_0 + \left[\frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (4.5)$$

onde: H_s é a altura do sistema

Da mesma maneira, deduz-se que a curva da bomba de forma simplificada é expressa pela equação 4.6.

$$H_B = H_p + \left[\frac{(H_N - H_p)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (4.6)$$

Assim, se forem conhecidas os valores do ponto de shutoff da bomba, a altura estática da instalação e um ponto de operação do sistema, que pode ser a condição nominal de trabalho, através das equações 4.5 e 5.6 é possível estimar as curvas características da bomba e da instalação.

4.5.4 Economia de energia

Para avaliar a economia de energia com a utilização do inversor de frequência, primeiramente calcula-se a altura necessária utilizando a curva do sistema. Em seguida, calcula-se a rotação de trabalho pela equação 4.7, (Porto, 2006).

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (4.7)$$

onde:

n_1 [rpm] e H_1 [m] – rotação e altura no ponto de rotação nominal;

n_2 [rpm] e H_2 [m] – rotação e altura no ponto da nova rotação;

Assim é possível estimar o rendimento da bomba pela equação 4.8 (Macintyre, 1987). No caso dos motores considera-se que sua operação ocorre na faixa de 75 a 100 % de carregamento, onde seu rendimento permanece praticamente constante.

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} \quad (4.8)$$

onde:

n_1 [rpm] e η_1 [m] – rotação e rendimento no ponto de rotação nominal;

n_2 [rpm] e η_2 [m] – rotação e rendimento no ponto da nova rotação;

Portanto, a redução no consumo de energia pode ser calculada conforme mostra a equação 4.9. Para realizar a análise o dia de maior consumo foi dividido em faixas de operação, com vazão e altura, para cada situação (com ou sem o uso de inversores), conhecidas, com duração de uma hora.

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q}{\eta_m} \cdot \left(\frac{H_B}{\eta_{B1}} - \frac{H_s}{\eta_{B2}} \right) \cdot t \quad (4.9)$$

onde:

E [kWh] – energia economizada;

ρ [kg/m³] – massa específica da água;

g [m/s²] – aceleração da gravidade;

Q [m³/s] – vazão requerida pelo sistema;

H_B [m] – altura sem o uso do inversor (obtida pela curva da bomba);

H_s [m] – altura com o uso do inversor (obtida pela curva do sistema);

η_m [1] – rendimento do motor;

η_{b1} [1] – rendimento da bomba sem o uso do inversor;

η_{b2} [1] – rendimento da bomba com o uso do inversor;

t [h] – tempo de operação;

4.6 Otimização do uso do reservatório

Conforme visto anteriormente (item 3.6.1), em reservatórios de montante elevados, ou seja, que possuem cotas piezométricas suficientes para pressurizar as redes de distribuição, de forma que os pontos mais desfavoráveis da rede de abastecimento sejam atendidos, é possível realizar o deslocamento do bombeamento para fora do horário de ponta (entre 18 e 21 h ou entre 19 e 22h), onde a tarifa de energia é mais cara. Porém, para que haja um bom funcionamento do sistema de reservação, é necessário que haja um bom nível de

controle operacional. Além disso, é indispensável conhecer de maneira precisa a curva de demanda da área abastecida pelo reservatório, o que implica realizar a medição contínua da vazão de saída.

Para avaliar a viabilidade técnica de se realizar a otimização do uso dos reservatórios são necessários obter os seguintes parâmetros:

- Variações de consumo do local, ou seja, é necessário conhecer a curva de demanda do dia de maior consumo.
- Obter os volumes de vazão de entrada e saída do reservatório.

De posse destes dados, será montado uma tabela seguindo o modelo apresentado da tabela 3.5.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia foi aplicada em quatro empresas de saneamento e seus resultados são apresentados a seguir. Estes trabalhos foram financiados pelo PROCEL/Eletrobrás, em um convênio com a Universidade Federal de Itajubá (Unifei). Foram escolhidas quatro empresas municipais de abastecimento de água, também conhecidas como SAAEs (Sistema de Abastecimento de Água e Esgoto) das seguintes localidades: Cacoal/RN, Cruzeiro/SP, Passos/MG e São Lourenço/MG.

5.1 Análise tarifária

A análise tarifária foi realizada no SAAE Cruzeiro, que foi o único onde pode-se estudar a contratação da demanda e verificar a comparação entre as tarifas horossazonal azul e verde.

Este SAAE contém três unidades consumidoras de energia elétrica: uma estação de captação de água bruta (Captação), uma estação de tratamento de água (ETA) e uma estação elevatória (Elevatória). O consumo de energia elétrica é caracterizado da seguinte forma, Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Caracterização do consumo de energia

INDICADOR/CARACTERÍSTICA	Captação	ETA	Elevatória
Concessionária	EDP Bandeirante		
Data de referência	Outubro/2009 a Setembro/2010		
Classe tarifária	Horo sazonal azul A4 (Serviço público)	Convencional A4 (Serviço público)	Convencional B3 (Serviço público)
Consumo total [kWh]	40.856	-	-
Consumo – HFP/único [kWh]	37.237	17.678	11.742
Consumo – HP [kWh]	3.618	-	-
UFER – HFP/único [kWh]	3406	1231	852
UFER – HP [kWh]	461	-	-
Demanda contratada [kW]	Fora de	70	-

INDICADOR/CARACTERÍSTICA	Captação	ETA	Elevatória
	ponta: 51 Ponta: 51		
Despesa média mensal com energia (últimos 12 meses) [R\$]	11.115,86	4.973,05	4.210,88
Fator de carga energia (últimos 12 meses) [%]	HFP = 50,3 HP = 51,6	HFP = 63,5 HP = 70,0	

Fonte: SAAE Cruzeiro/SP

Na tabela a seguir, Tabela 5.2, estão os valores das tarifas praticadas pela Concessionária no período analisado:

Tabela 5.2 - Tarifas praticadas pela Concessionária EDP Bandeirante.

	Tarifa Verde	Tarifa Azul	Convencional A4	Convencional B3
Demanda HFP [R\$/kW]	-	6,52	-	-
Demanda HP [R\$/kW]	-	28,58	-	-
Demanda Única [R\$/kW]	6,52	-	20,14	-
Consumo de Energia Ativa - Período Seco Fora de Ponta [R\$/MWh]	148,74	148,74	-	-
Consumo de Energia Ativa - Período Seco Ponta [R\$/kMh]	899,78	238,60	-	-
Consumo de Energia Ativa - Período Úmido Fora de Ponta [R\$/kMh]	135,81	135,81	-	-
Consumo de Energia Ativa - Período Úmido Ponta [R\$/kMh]	877,60	214,22	-	-
Consumo de Energia Ativa Único [R\$/kMh]	-	-	167,32	299,36

Fonte: SAAE Cruzeiro/SP

5.1.1 Captação

Os gráficos a seguir, fFigura 5.1 e Figura 5.2, ilustram os gastos com o consumo de energia e da demanda (contratada e medida) da unidade de Captação.

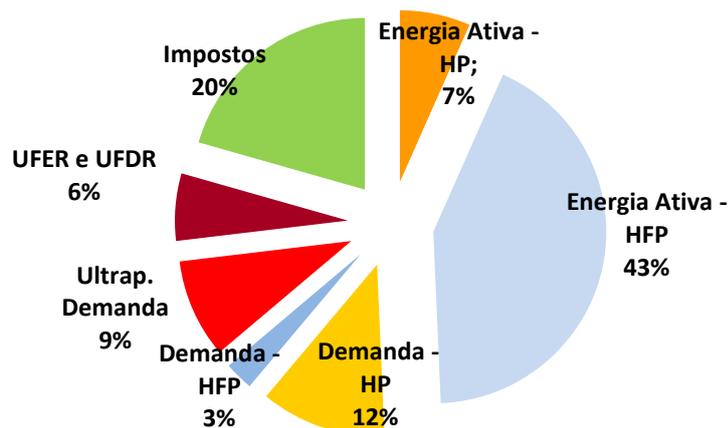


Figura 5.1 - Composição os custos da Captação

Fonte: SAAE Cruzeiro/SP

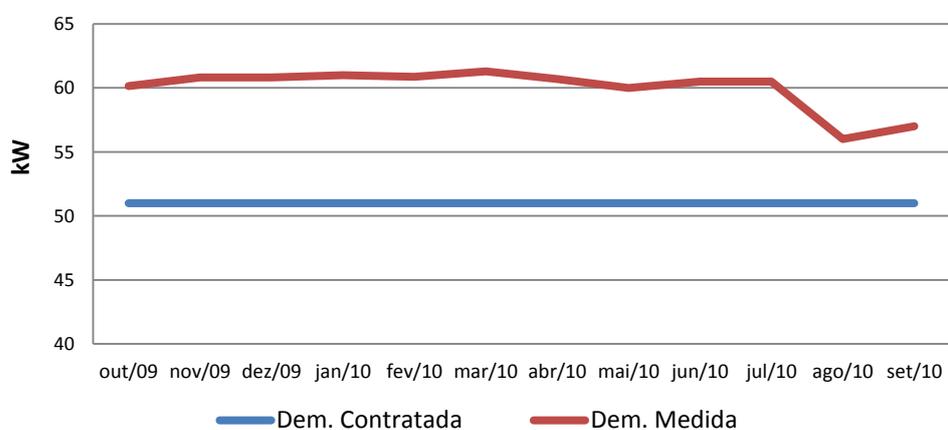


Figura 5.2 - Demanda Contratada x Demanda Medida (Captação)

Fonte: SAAE Cruzeiro/SP

Na Captação, verificou-se a existência de gastos com multas devido ao consumo de excesso de reativo e pela ultrapassagem (UFER) da demanda contratada que são de, respectivamente, 6 % e 9 %. Além disso, verifica-se o mal dimensionamento da demanda contratada (51 kW) diante de uma demanda média consumida de 60 kW (a maior demanda registrada foi de 61 kW).

A partir das contas de energia e medições em campo foram realizadas análises da tarifação. Na Figura 5.3 abaixo tem-se a comparação das Tarifas Horossazonal Azul e Verde para o consumo da Captação. Já a Figura 5.4 mostra o valor da conta de energia após a contratação de uma demanda melhor dimensionada (pelo histórico de contas, 60 kW).

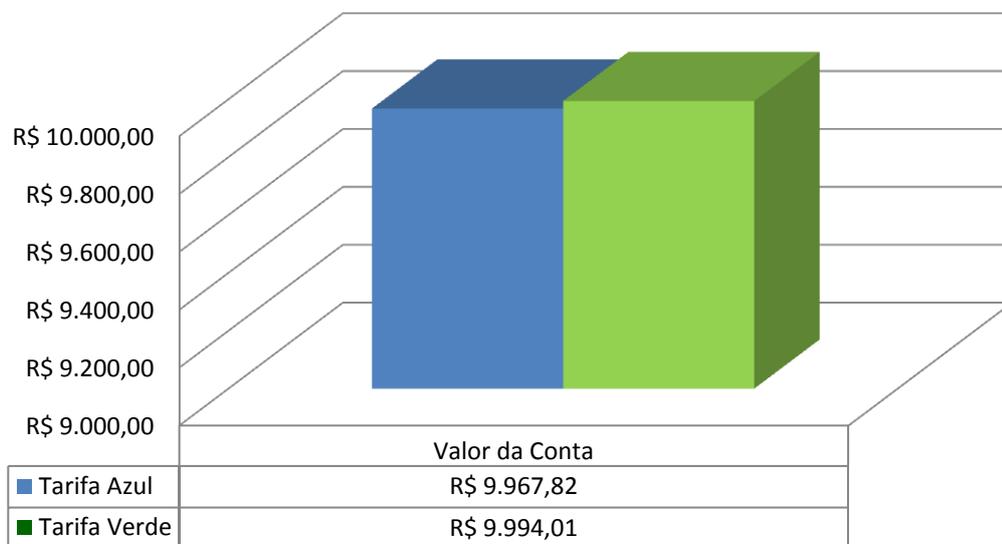


Figura 5.3 - Comparação entre as tarifas azul e verde (Captação)

Fonte: Dados do autor

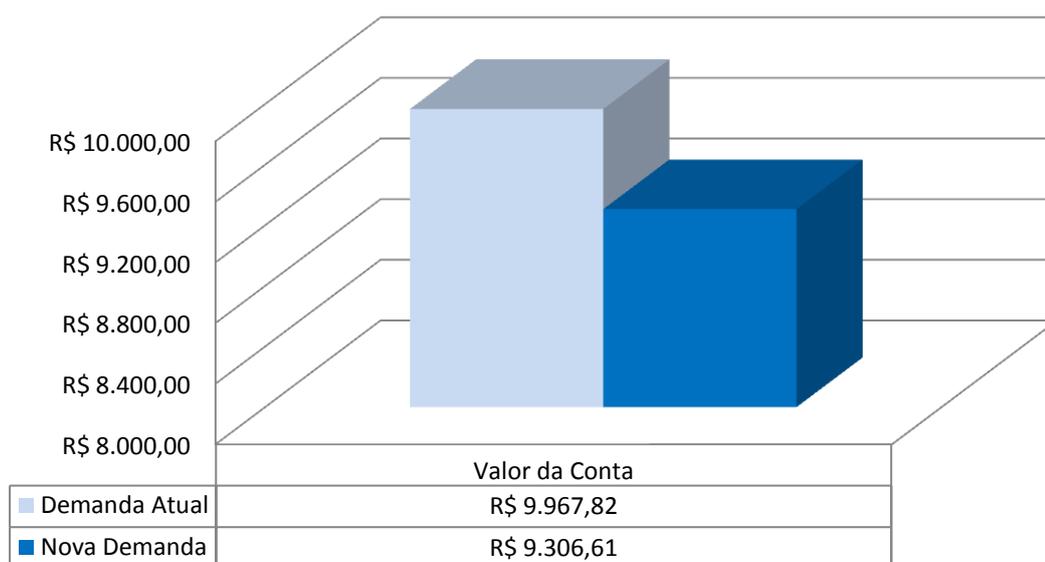


Figura 5.4 - Valor da conta de energia após contratação da nova demanda (Captação)

Fonte: Dados do autor

Conclui-se que a Captação está corretamente enquadrada na Tarifa Horossazonal Azul. Porém, deve-se optar pela contratação de uma demanda maior, visto que está sendo pago mensalmente multas por ultrapassagem de demanda. No período analisado, ilustrado na figura 45, foi gasto em média R\$1.156,00/mês com pagamento de ultrapassagem da demanda, o que representa 10% do valor total da conta de energia. Com o aumento da demanda contratada para 60 [kW] estima-se uma economia de aproximadamente 7 % ao mês.

5.1.2 Estação de Tratamento (ETA)

Os gráficos a seguir, Figura 5.5 e Figura 5.6 ilustram os gastos com o consumo de energia e de sua demanda (contratada e medida) da unidade de ETA.

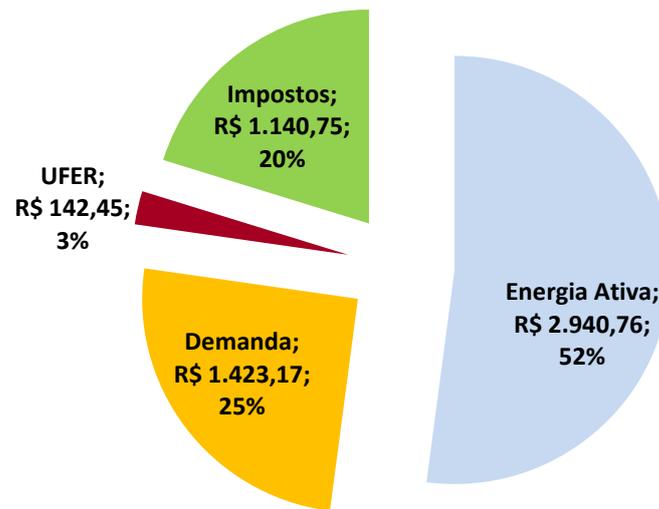


Figura 5.5 - Composição dos custos da ETA

Fonte: Dados do autor

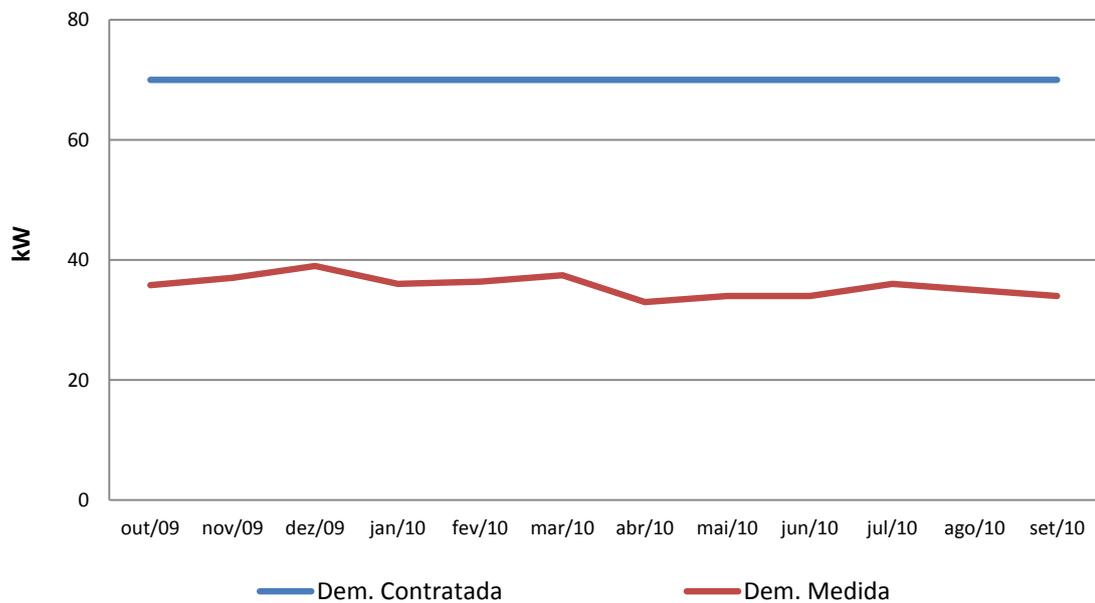


Figura 5.6 - Demanda Contratada x Demanda Medida (ETA)

Fonte: Dados do autor

Na ETA também ocorre a cobrança por excesso de reativos (UFER), porém em menor valor. Pode ser observada uma contribuição expressiva da demanda no valor total da conta (metade do total de energia ativa consumida), indício de provável erro no seu valor contratado, comprovado pelos valores lidos da demanda contratada (70 kW), diante de um gasto médio de, aproximadamente, 37 kW.

A partir das contas de energia e medições em campo foram realizadas análises da tarifação. Na Figura 5.7 tem-se a comparação das Tarifas Horossazonais Azul e Verde e também da Tarifa Convencional A4.

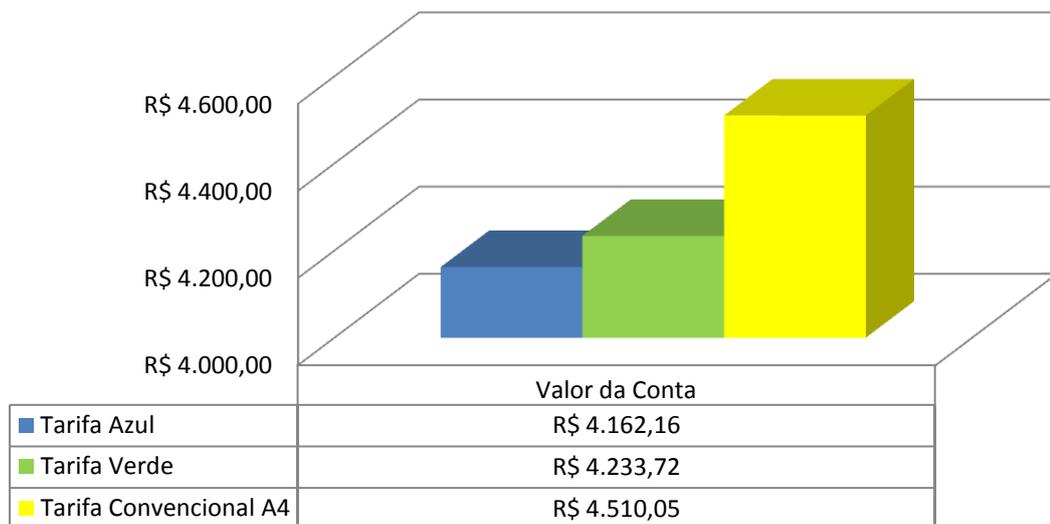


Figura 5.7 - Simulação Tarifária (ETA).

Fonte: Dados do autor

Percebe-se que a Tarifa Convencional A4, contratada, não é a mais adequada para a ETA, pois na simulação a Tarifa Horossazonal Verde oferece uma economia de 6%. Porém, o fato da demanda contratada atual estar sobredimensionada para a instalação pode ocasionar um erro devido a diferença do valor da demanda cobrado pelas tarifas. Então será necessário uma nova simulação, onde a demanda de energia utilizada nos cálculos será a demanda sugerida para contratação de 36 [kW].

A seguir, na Figura 5.8, estão apresentados os valores das contas de energia com a nova demanda contratada.

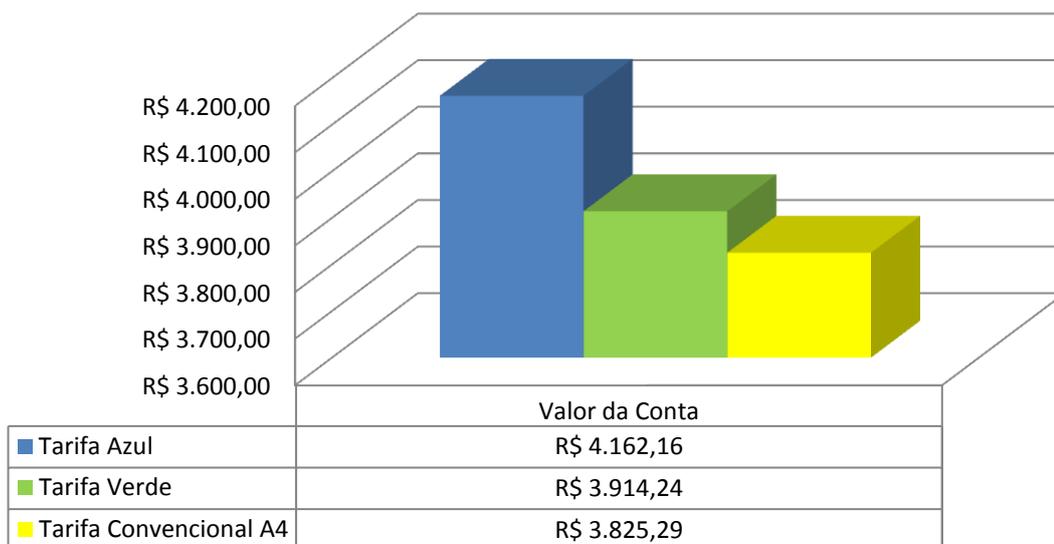


Figura 5.8 - Valor da conta de energia após contratação da nova demanda (ETA)

Fonte: Dados do autor

Com a demanda contratada de 70 [kW] o gasto médio mensal é R\$1.423,17 representando 25% do total da conta de energia. Se contratada a demanda sugerida de 36 [kW] seu gasto mensal passará ser de R\$725,04 uma economia de praticamente 50% na demanda, considerando como base a Tarifa Convencional A4.

A economia na conta de energia com a contratação da nova demanda é de 15% ao mês. Verifica-se que após a contratação da nova demanda a Tarifa Convencional A4 passa ser a mais vantajosa e não mais a Tarifa Horo Sazonal Verde como suspeitou-se inicialmente. Para a ETA fica definido então, manter a Tarifa Convencional A4 e a contratação da demanda de 36 [kW].

O gráfico abaixo ilustra os gastos com o consumo de energia (Figura 5.9) da unidade Elevatória.

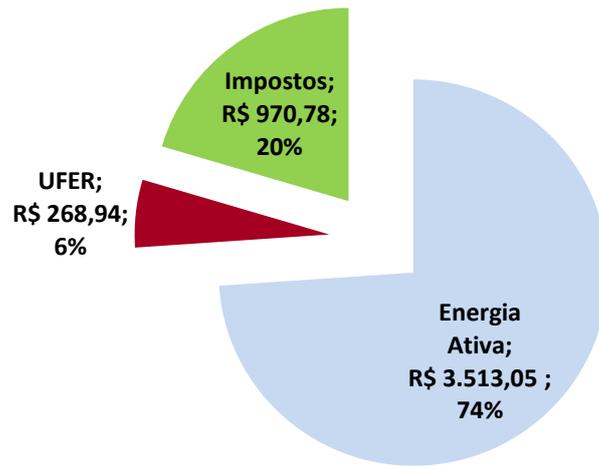


Figura 5.9 - Composição dos custos da Elevatória

Fonte: Dados do autor

Verifica-se multa pelo consumo de energia reativa (UFER) da ordem de 6% do total gasto.

A partir das contas de energia e medições em campo foram realizadas análises da tarifação. Na Figura 5.10 tem-se a comparação das Tarifas Convencional A4 e Convencional B3.

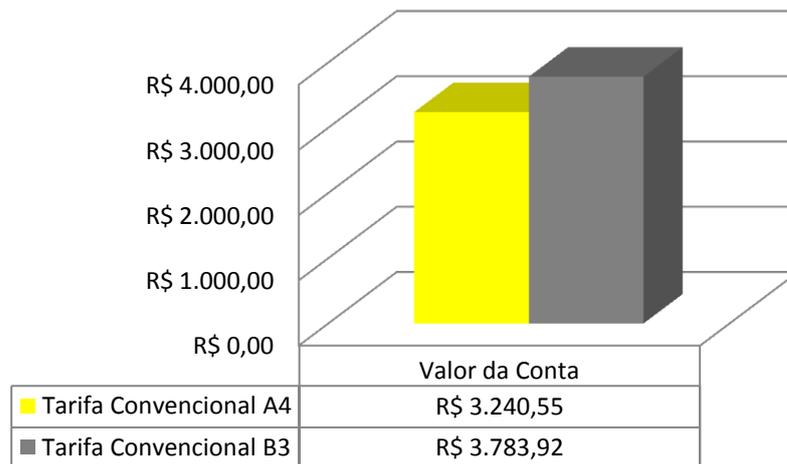


Figura 5.10 - Simulação Tarifária (Itagaçaba)

Fonte: Dados do autor

Após a simulação tarifária, verifica-se que seria mais vantajoso a contratação em Média Tensão, Tarifa Convencional A4 já que ela representa uma redução de

14% em relação a Tarifa Convencional B3. Para tal deverá ser instalado um transformador abaixador de tensão de 13,8 [kV] para 220/127 [V] de 45 [kVA].

Foi feito um orçamento do transformador especificado, marca WEG, seu custo é R\$ 4.020,00. Supondo mais alguns gastos como transporte e instalação com custo de R\$2.000,00 tem-se um valor total para instalação do transformador de R\$6.020,00. Com a diferença no valor da conta de energia de R\$541,43 foi calculado um pay back de 13 meses para o investimento.

5.2 Análise dos conjuntos motobombas

A análise a seguir foi realizada no SAAE São Lourenço que foi o único que trocou conjuntos motobombas e desta forma, pode-se comparar antes e depois da substituição.

Neste SAAE foram avaliadas as condições de operação dos conjuntos motobombas da unidade de Captação de água e da elevatória Vilanova. As informações dos dados de placa dos conjuntos motobombas se encontram na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Dados de placa dos conjuntos motobombas do SAAE São Lourenço

Local	Marca	BOMBAS						MOTORES				
		D _s [mm]	D _r [mm]	n [rpm]	Q [m ³ /h]	H [m]	φ _r [mm]	Marca	n [rpm]	I [A]	V [V]	P _e [cv]
Captação Jardim das Acácias	IMBIL	275	254	1750	432	18	249	Eberle	1770	97	220	40
Jardim das Acácias	IMBIL	121	108	3500	142,27	60,2	186	Eberle	3540	138	220	60
São Francisco	ALBRIZZI PETRY	96	80	3500	63	66	-	WEG	3520	60	220	25
Carioca	IMBIL	200	175	1750	220	50	330	WEG	1770	146	220	60
	KSB	150	125	1770	130	50	318	WEG	1770	120	220	50

Fonte: Dados do autor

5.2.1 *Rendimento dos conjuntos motobombas*

5.2.1.1 *Captação de água bruta*

Para a captação de água é realizada em uma balsa de captação onde são utilizados três conjuntos, sendo que os conjuntos operam dois a dois, e o terceiro fica de reserva. Cada conjunto utiliza uma tubulação de recalque. Foram utilizados dois medidores de vazão para as medições, testando dois conjuntos por vez, além de medir cada conjunto operando sozinho. As Figura 5.11 a Figura 5.14 mostram a balsa de captação, a tubulação e as medições de vazão, pressão e potência elétrica.



Figura 5.11 - Balsa de Captação e sua tubulação

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.12 - Medição de Vazão

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.13 - Medição de Pressão

Fonte: Fotos do autor

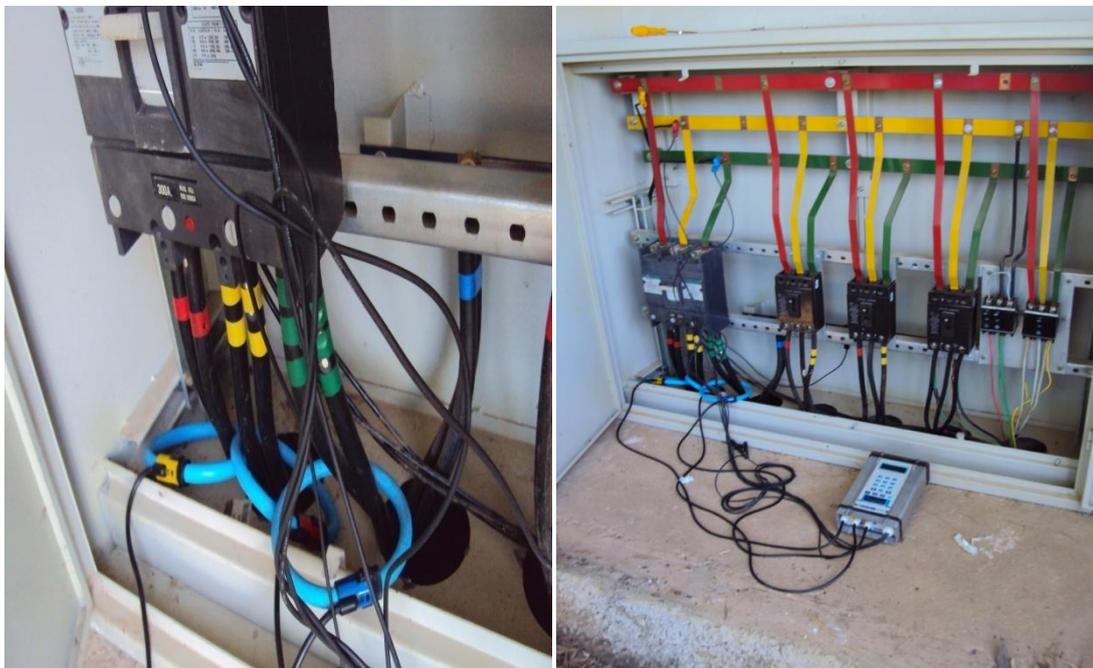


Figura 5.14 - Medição de potência elétrica

Fonte: Fotos do autor

As Tabela 5.4 e Tabela 5.7 mostram os resultados obtidos:

Tabela 5.4 – Ensaios dos conjuntos motobombas 1, 2 e 3 operando isoladamente

Grupos	n [rpm]	Valores Lidos				Valores Calculados						
		$P_2/\rho.g$ [m]	$P_1/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{el} [kW]	H [m]	v_3 [m/s]	v_2 [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]	η_m [%]	η_t [%]
G ₁	1776	16,5	-2,25	437	30,5	18,93	2,40	2,04	22,54	73,9	92	80,3
G ₂	1776	16,2	-1,9	354,7	27,93	17,72	1,97	1,68	17,13	61,3	91	67,4
G ₃	1776	17,9	-1	356	28	19,05	1,95	1,66	18,48	66,0	93	71,0

Fonte: Dados do autor

Tabela 5.5 - Ensaio dos conjuntos motobombas 2 e 3 Operando em Paralelo

Grupos	Valores Lidos				Valores Calculados							
	n [rpm]	$P_3/\rho.g$ [m]	$P_2/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{el} [kW]	H [m]	v_3 [m/s]	v_2 [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]	η_m [%]	η_t [%]
G ₂	1775	16	-1,8	356	29,2	17,95	1,95	1,66	17,42	59,6	91	65,6
G ₃	1775	16	-1,5	348	28,1	17,65	1,91	1,63	16,74	59,6	93	64,1

Fonte: Dados do autor

Tabela 5.6 - Ensaio dos conjuntos motobombas 1 e 3 Operando em Paralelo

Grupos	Valores Lidos				Valores Calculados							
	n [rpm]	$P_3/\rho.g$ [m]	$P_2/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{el} [kW]	H [m]	v_3 [m/s]	v_2 [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]	η_m [%]	η_t [%]
G ₁	1775	16	-1,6	437	27,8	17,78	2,40	2,04	21,17	76,16	92	82,8
G ₃	1775	16,9	-2,2	345	30,3	19,25	1,89	1,61	18,10	59,73	93	64,2

Fonte: Dados do autor

Tabela 5.7 - Ensaio dos conjuntos motobombas 1 e 2 Operando em Paralelo

Grupos	Valores Lidos				Valores Calculados							
	n [rpm]	$P_3/\rho.g$ [m]	$P_2/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{el} [kW]	H [m]	v_3 [m/s]	v_2 [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]	η_m [%]	η_t [%]
G ₁	1775	16,8	-2	412	30,4	18,97	2,26	1,93	21,30	70,06	92	76,2
G ₂	1775	16,2	-1,6	356	29,15	17,95	1,95	1,66	17,42	59,75	91	65,7

OBS.: ($z_3 - z_2$) = 0,10[m]; $D_2 = 0,275$ [m] $D_3 = 0,254$ [m]
Os rendimentos dos motores foram retirados do catálogo do fabricante

Fonte: Dados do autor

Comparando-se os valores medidos de vazão, percebe-se que as bombas não operam em paralelo, ou seja, cada conjunto motobomba opera com sua vazão individual. E apesar dos conjuntos motobombas serem iguais, os resultados obtidos mostram que operam em condições desequilibradas em termos de vazão e conseqüentemente em termos de potência elétrica. Na Tabela 5.8 são obtidos os valores médios dos ensaios realizados e comparados com os valores das condições nominais, retirados das placas dos conjuntos motobombas.

Tabela 5.8 - Valores médios obtidos e valores nominais

Grupos	Valores de Ensaio					Valores Nominais			
	n [rpm]	Q [m ³ /h]	H [m]	η_t [%]	P_{el} [kW]	n [rpm]	Q [m ³ /h]	H [m]	P_{el} [kW]
G ₁	1775	428,7	18,6	79,8	29,6	1750	432	18,0	29,4
G ₂	1775	355,6	17,9	66,2	28,8	1750	432	18,0	29,4
G ₃	1775	349,7	18,7	66,4	28,8	1750	432	18,0	29,4

Fonte: Dados do autor

Pelos valores médios na Tabela 5.8, o conjunto 1 está bastante próximo dos valores nominais, inclusive tendo um rendimento da bomba próximo a 80%. Os outros dois conjuntos apresentam vazões inferiores, que acarretam rendimentos menores das bombas, ou seja, Bomba 2, 66,2%, e Bomba 3, 66,4%.

A Figura 5.15 ilustra as curvas das bombas fornecidas pelo fabricante. São inseridos nessas curvas os pontos correspondentes de altura e vazão das três bombas retirados da tabela 2. O rendimento fornecido pelo fabricante para a Bomba 1, com os valores ensaiados em campo, esta na faixa correspondente de 82%, que está próximo do valor obtido nos cálculos. Entretanto para as bombas 2 e 3 o rendimento previsto pelo fabricante é de 80%, diferente dos determinados em campo que é de 66%.

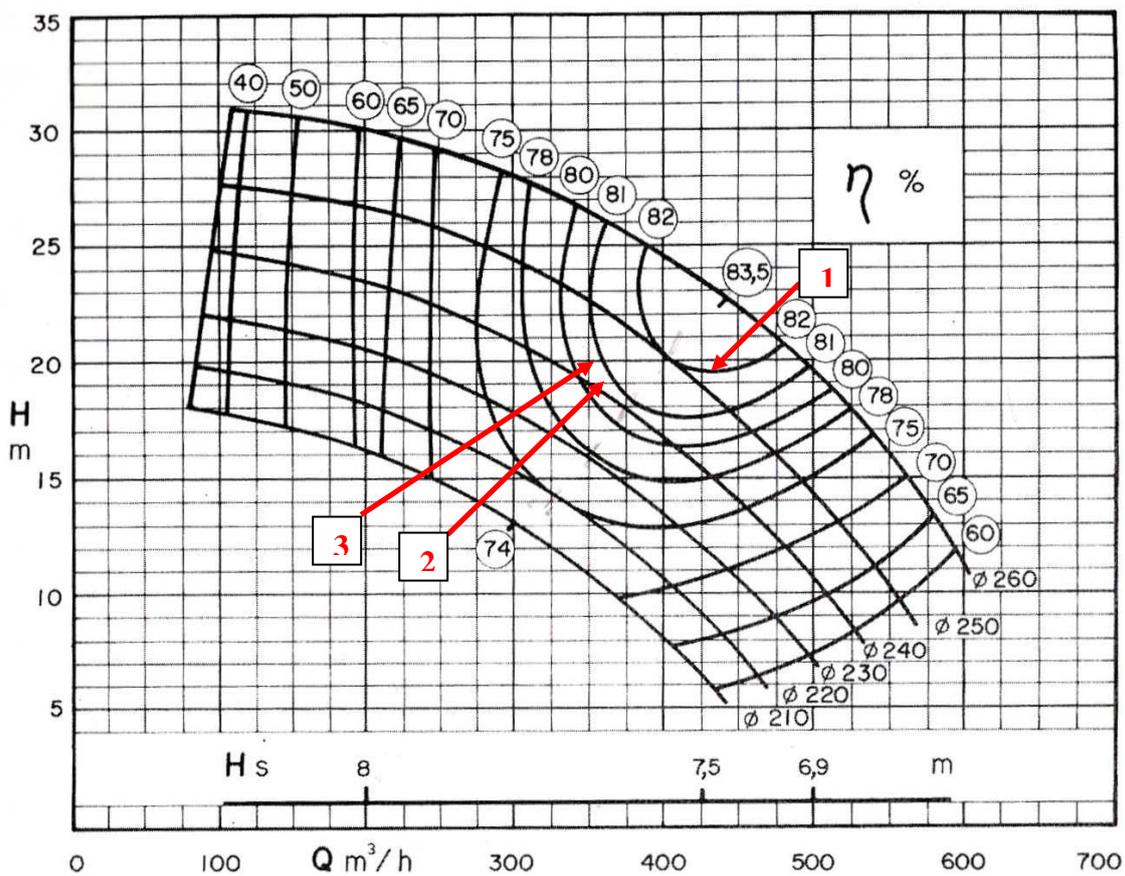


Figura 5.15 – Ponto de operação das bombas da Captação

Fonte: Catálogo da IMBIL

5.2.1.2 Elevatória Vilanova

A estação elevatória consiste de quatro unidades que bombeiam a água para quatro reservatórios nos seguintes bairros: Solar dos Lagos, Jardim das Acácias, São Francisco e Carioca.

Todas as unidades contêm dois conjuntos motobombas, com um conjunto operando por vez, com outro ficando de reserva, com excessão do bairro Jardim das Acácias onde há tubulação para um segundo conjunto que não existe. Assim, com excessão do bairro Jardim das Acácias, foram realizados 2 ensaios conjuntos (um por conjunto) onde um ensaio foi executado com conjunto 1 operando isoladamente e o outro com o conjunto 2 operando isoladamente.

As Figura 5.16, Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 mostram os conjuntos motobombas do Solar dos Lagos, Jardim das Acácias, São Francisco e Carioca, respectivamente. As Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22 mostram as medidas de vazão, pressão e de grandezas elétricas, respectivamente.



Figura 5.16 - Conjuntos motobombas do Solar dos Lagos

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.17 - Conjunto motobomba do Jardim das Acácias

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.18 - Conjuntos motobombas do São Francisco

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.19 - Conjuntos motobombas do Carioca

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.20 - Medições de vazão (Elevatória Vilanova)

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.21 - Medidas de pressão (Elevatória Vilanova)

Fonte: Fotos do autor



Figura 5.22 - Medições de parâmetros elétricos (Elevatória Vilanova)

Fonte: Fotos do autor

Os resultados seguem a seguir (Tabela 5.9):

Tabela 5.9 - Ensaio dos conjuntos motobombas da Elevatória Vilanova operando isoladamente

	Grupos	n [rpm]	Valores Lidos				Valores Calculados						
			$P_3/\rho \cdot g$ [m]	$P_2/\rho \cdot g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{el} [kW]	H [m]	v_3 [m/s]	v_2 [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]	η_m [%]	η_b [%]
SL	G ₁	3583	56	-0,6	131,9	33,2	56,9	4,09	3,26	20,5	61,6	91	67,7
SL	G ₂	3583	71	2,4	8,2	16,8	68,6	0,26	0,20	1,53	9,1	89	10,2
JA	G ₁	3500	62	0,930	40	20,2	61,5	2,21	1,54	6,71	33,2	87	38,2
SF	G ₁	1750	46	1,4	167	46,2	44,6	1,93	1,48	20,3	43,9	91,6	47,9
SF	G ₂	1760	49	0,6	180	49,5	48,5	2,08	1,59	23,8	48	93,8	51,2
Car	G ₁	1778	41,8	-1,2	200	41,8	43,9	4,5	3,1	23,9	57,2	92	62,2
Car	G ₂	1778	41,0	0,25	196,9	39,9	42,5	4,3	3,0	22,8	57,1	92	62,1

OBS.: ($z_3 - z_2$) = 0,0[m]; $D_2 = 0,120$ [m] $D_3 = 0,100$ [m]
Os rendimentos dos motores foram retirados do catálogo do fabricante

Fonte: Dados do autor

A Tabela 5.9 mostra que apesar dos conjuntos motobombas do Solar dos Lagos serem iguais, os resultados obtidos apresentam uma operação em condições desequilibradas em termos altura e vazão na bomba 2, e conseqüentemente, a eficiência do conjunto (η_c) de 9,1%. A razão disso é devido à válvula de saída se encontrar com problemas, ou seja, a mesma opera estrangulada. No Jardim das Acácias a bomba do grupo 1 opera com uma vazão abaixo da vazão nominal e uma altura acima da nominal, com uma potência acima da nominal. Esses resultados demonstram que a bomba opera sem rodízio, o que acarreta um desgaste na mesma, fazendo com que apesar da vazão ser menor, consuma mais energia. No bairro São Francisco a tabela mostra que o rendimento do conjunto motobomba 1 está baixo (43,9%) e a bomba também (47,9%). O conjunto motobomba 2 está um pouco acima, mas continua baixo (48%), assim como a bomba (51,2%). No bairro Carioca, os rendimentos dos conjuntos motobombas 1 estão próximos (57%) e a das bombas (62%). As vazões e alturas das duas bombas estão próximas, bem como suas potências.

A Tabela 5.10 compara os valores nominais informados nas placas das bombas e motores com os valores obtidos nos ensaios.

Tabela 5.10 - Valores obtidos e valores nominais

	Grupos	n [rpm]	Valores de Ensaio				Valores Nominais			
			Q [m ³ /h]	H [m]	η_t [%]	P_{el} [kW]	n [rpm]	Q [m ³ /h]	H [m]	P_{el} [kW]
SL	G ₁	3583	132	56,9	67,7	33,2	3500	142,3	60,2	44,1
SL	G ₂	3583	8,2	68,6	10,2	16,8	3500	142,3	60,2	44,1
JA	G ₁	3500	40	61,5	38,2	20,2	3500	63	66	18,4
SF	G ₁	1750	167	44,6	47,9	46,2	1750	220	49	60
SF	G ₂	1760	180	48,5	51,2	49,5	1760	220	50	60
Car	G ₁	1778	200	43,9	62,2	41,8	1770	130	50	37
Car	G ₂	1778	196	42,5	62,1	39,9	1770	130	50	37

Fonte: Dados do autor

Pela tabela anterior, Tabela 5.10, percebe-se que no Solar dos Lagos, a bomba do grupo 1 opera mais próximo dos valores nominais, mas mesmo assim com altura e vazão reduzidos e conseqüentemente com potência elétrica abaixo da nominal do motor. A bomba do grupo 2 está praticamente inoperante, devido ao problema na válvula de saída, o que acarreta a bomba 1 operar em excesso de tempo e com o desgaste maior, não utilizando o rodízio de operação e o rodízio de manutenção.

Do catálogo do fabricante da bomba foi retirado o gráfico apresentado na figura 5.23, onde a bomba 1 deveria ter um rendimento de 80%, mas que na realidade está operando com 67,7%. Já a bomba 2, a operação está fora do campo da figura 23, ou seja, a bomba inexistente.

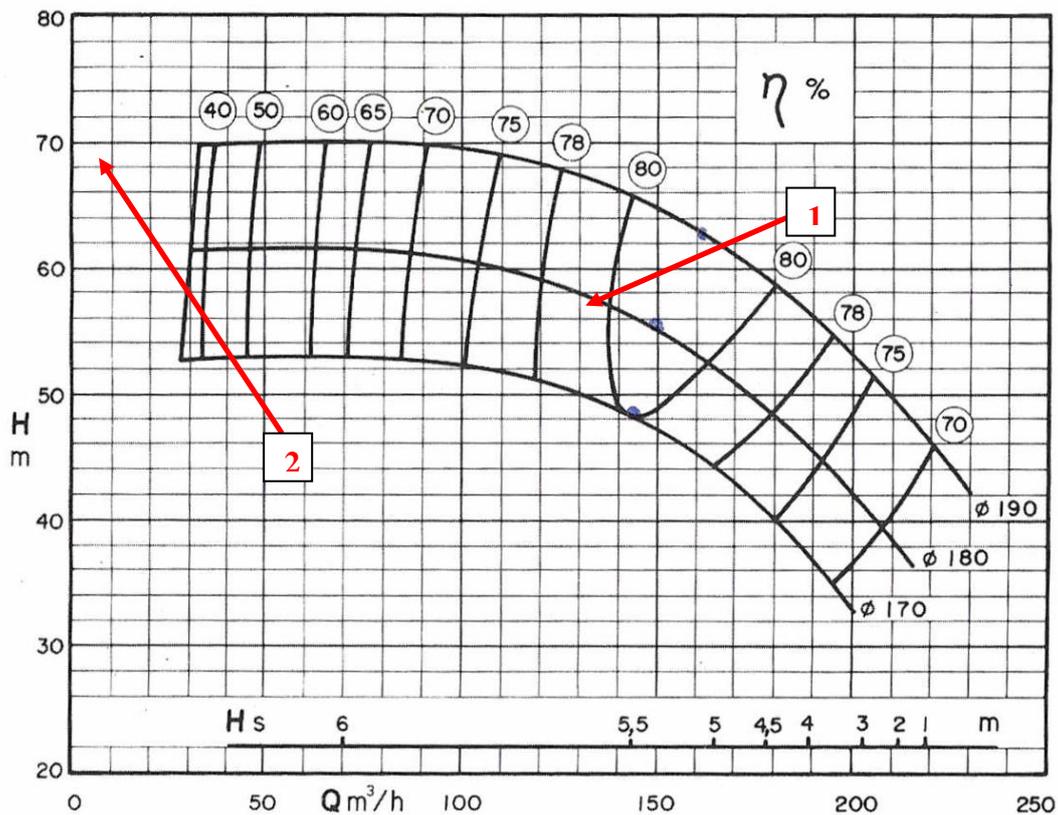


Figura 5.23 - Campo de aplicação da bomba do Solar dos Lagos

Fonte: Catálogo da Imbil

O Jardim das Acácias, a bomba do grupo 1 opera com uma vazão abaixo da vazão nominal e uma altura acima da nominal, com uma potência acima da nominal. Esses resultados demonstram que a bomba, apesar da vazão ser menor, consome mais energia. Do catálogo do fabricante foi retirado o gráfico apresentado na figura 5.24 onde a bomba 1 deveria ter um rendimento de 68 %, mas que na realidade está opera com 38,2%.

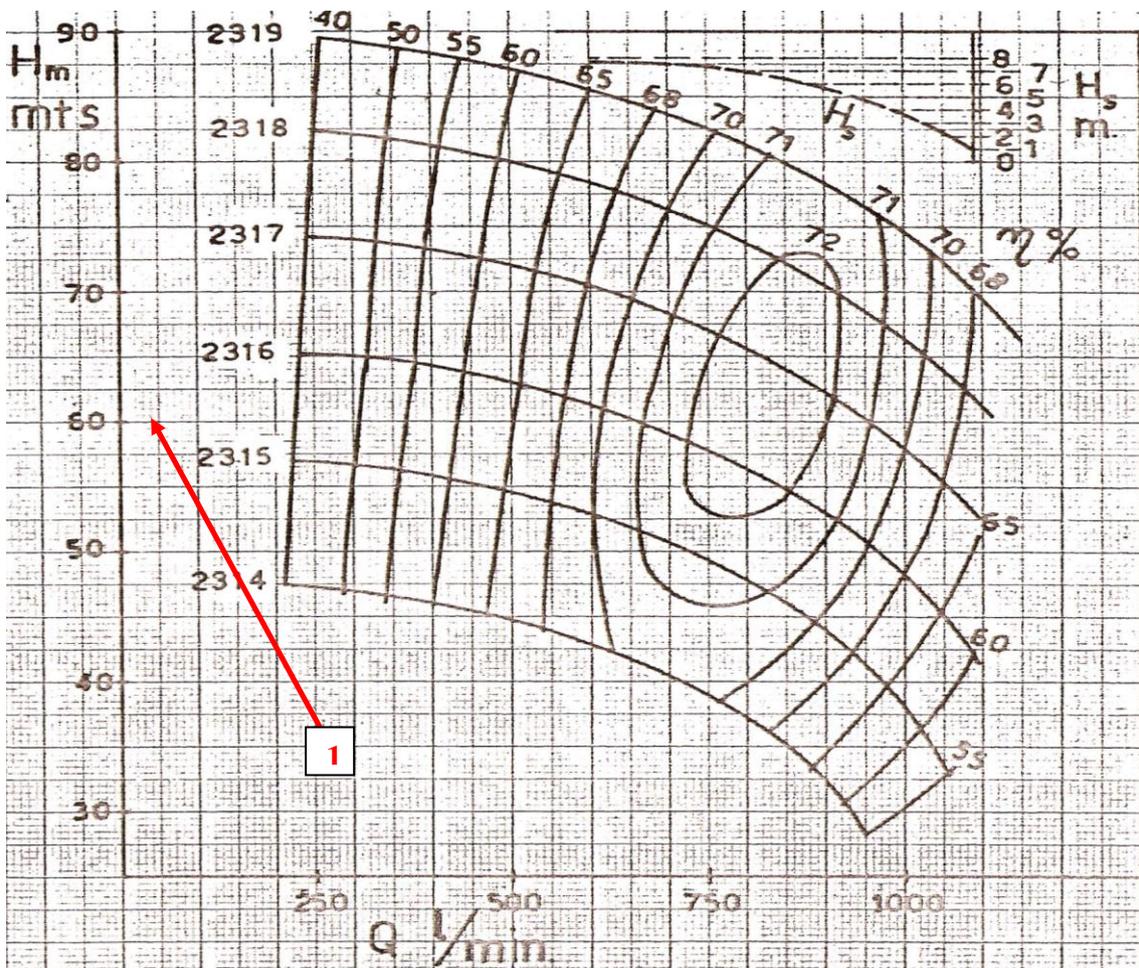


Figura 5.24 - Campo de aplicação da bomba (Jardim das Acácias)

Fonte: Catálogo da Albrizzi Petry

Para o São Francisco, as bombas operam com vazões abaixo da vazão nominal, mesmo operando com alturas próximas as nominais. As potências medidas estão abaixo das nominais. Esses resultados demonstram que os motores estão superdimensionados para o trabalho em questão. Do catálogo do fabricante da bomba foi retirado o gráfico apresentado na figura 5.25, onde as bombas 1 e 2 deveriam ter um rendimento de 77%, mas que na realidade está operando entre 48% e 51%.

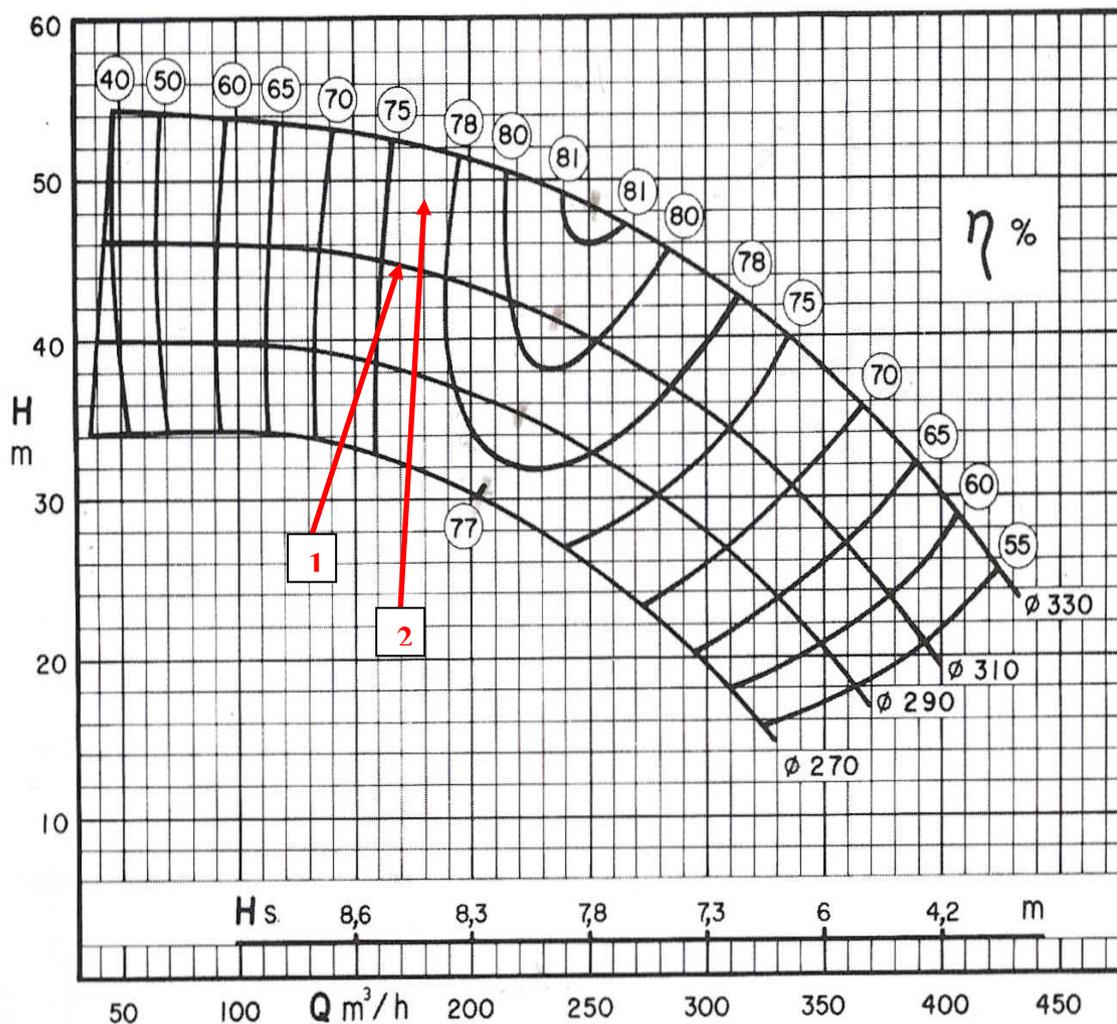


Figura 5.25 - Campo de aplicação da bomba das bombas da unidade São Francisco

Fonte: Catálogo da Imbil

No bairro Carioca, Tabela 5.10 mostra que os rendimentos dos conjuntos motobombas 1 estão próximos (57%) e a das bombas (62%). As vazões e alturas das duas bombas estão próximas, bem como suas potências. Do catálogo do fabricante da bomba foi retirado o gráfico mostrado na figura 5.26, onde as bombas 1 e 2 deveriam ter um rendimento de 76%, mas que na realidade estão operando 62%.

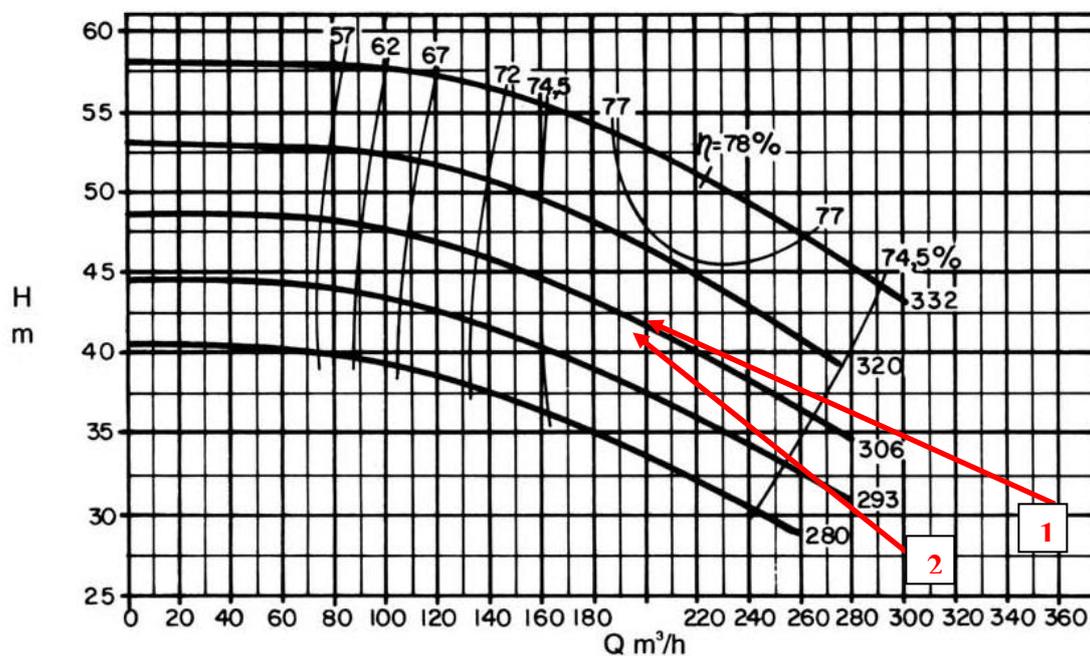


Figura 5.26 - Campo de aplicação da bomba

Fonte: Catálogo da KSB

5.2.2 Análise de carregamento e desequilíbrio de tensão

Tabela 5.11 - Análise de carregamento e de desequilíbrios de tensão no SAAE São Lourenço

Unidade	Grupo	Valores Lidos								Valores Calculados	
		V _A [V]	V _B [V]	V _C [V]	I _A [V]	I _B [V]	I _C [V]	P _{el}	Fator de potência	Desequilíbrio	Carregamento
Captação	1	211,7	230,1	224,6	87,9	91,4	88,3	29,1	82,6	3,6	90
Captação	2	221,1	221,0	222,1	93,0	94,7	95,0	29,3	80,8	0,3	94
Captação	3	222,0	222,7	223,4	92,0	93,3	90,7	29,3	80,6	0,3	91
São Lourenço	1	217,6	218,0	215,9	102,3	105,3	102,3	35,6	92,5	0,4	101
São Lourenço	2	219,7	220,1	218,3	56,5	57,2	55,7	18,2	84,9	0,3	48
Jardim das Ácacias	1	214,8	216,4	216,3	58,5	59,1	58,5	20,5	93,2	0,3	97
São Francisco	1	219,0	218,7	217,6	136,4	138,6	135,7	45,8	88,3	0,3	95
São Francisco	2	217,7	216,4	215,6	151,4	152,4	148,9	49,4	87,5	0,5	104
Carioca	1	216,3	214,6	214,6	123,4	125,6	118,5	40,1	88,1	0,5	103
Carioca	2	217,0	215,5	214,9	131,2	132,8	127,6	42,1	96,5	0,6	111

Fonte: Dados do autor

Verifica-se que somente o motor do grupo motobomba 1 está com desequilíbrio de tensão superior a 1(%), recomendado pela IEEE, tendo o valor de 3,6. Isto pode implicar em perda de rendimento e na deteriorização do motor. Nesta situação recomenda-se ao local auditado uma melhor análise no quadro de comando e distribuição para procurar a origem deste desequilíbrio.

5.2.3 *Substituição dos conjuntos motobombas*

Para realizar análise de troca dos conjuntos, as condições de operação atuais de vazão e altura foram mantidas, e com base nestes parâmetros foram selecionados novos conjuntos motobombas com maiores rendimentos. Devido a dificuldade de realizar a medição do rendimento dos motores e bombas isoladamente, preferiu-se realizar as análises em cima da troca dos conjuntos motobombas.

Os dados nominais dos equipamentos seguem na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Dados utilizados na simulação de troca dos equipamentos.

Vida útil do equipamento	15 anos
Taxa mínima de atratividade	12 %
Tempo de operação	11 à 12 horas
Tarifa no período úmido *	0,20269 [R\$/kWh]
Tarifa no período seco *	0,21896 [R\$/kWh]
Tarifa de demanda úmido*	15,94 [R\$/kW]
Tarifa de demanda seco*	16,16 [R\$/kW]

* tarifa média dos 12 meses no período de análise

Fonte: SAAE São Lourenço

Os novos conjuntos foram selecionados utilizando dados do catálogo de motores do Anexo C e curvas das bombas, Anexo D. Como os novos motores e bombas possuem rendimento maior, os motores dos conjuntos Solar dos Lagos, Jardim das Acácias e

São Francisco tiveram sua potência nominal reduzida respectivamente de 60 para 40 CV, 25 para 20 CV e 60 para 50 CV, como mostra a Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Potência dos novos conjuntos

Local	Potência antiga [cv]	Potência nova [cv]
Captação	40	40
Solar dos Lagos	60	40
Jardim das Acácias	25	20
São Francisco	60	50
Carioca	50	50

Fonte: Dados do autor

A Tabela 5.14 e a Figura 5.27 mostram os comparativos da situação atual com a simulação de troca dos conjuntos.

Tabela 5.14. Comparação da operação atual com a troca de motores e bombas.

Local	Demanda		Energia				
	[kW]		Consumida Anual		Gasto Anual de Energia [R\$]		
	Atual	Novo	Atual	Novo	Atual	Novo	Redução [%]
Captação (G1)	29,6	29,47	118844	118316	25222	25110	0,44
Captação (G2)	28,8	22,89	115632	91913	24540	19506	20,51
Captação (G3)	28,8	23,24	115632	93290	24540	19799	19,32
Solar dos Lagos (G1)	33,2	28,94	145416	126736	30861	26897	12,85
Jardim das Acácias (G1)	20,2	13,57	88476	59423	18777	12611	32,84
São Francisco (G1)	46,2	29,33	202356	128483	42945	27414	36,51
São Francisco (G2)	49,5	34,38	216810	150595	46013	32132	30,54
Carioca (G1)	41,8	33,41	183084	146339	38855	31057	20,07
Carioca (G2)	39,9	31,84	174762	139476	37089	29601	20,19

Fonte: Dados do autor

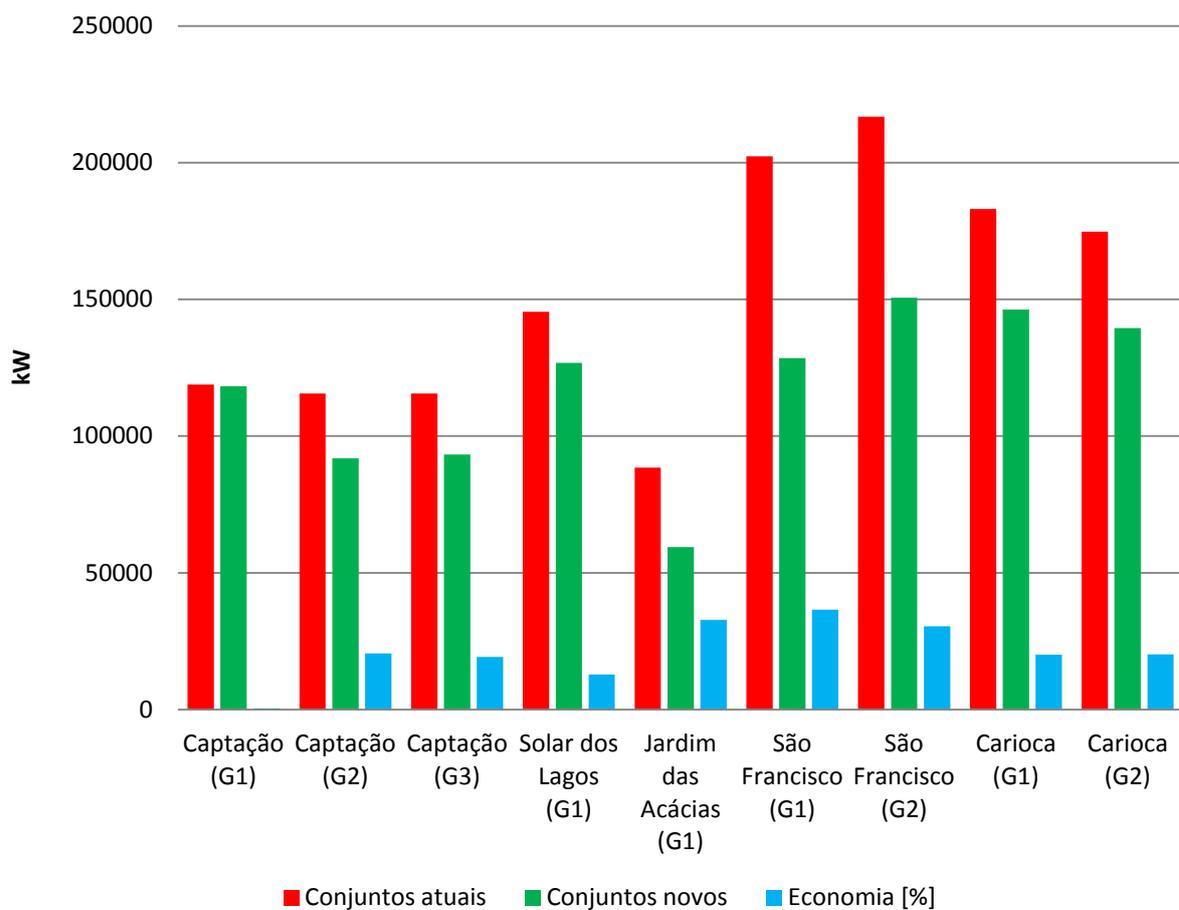


Figura 5.27 – Comparação no consumo de energia para a troca de conjuntos motobombas

Fonte: Dados do autor

A Tabela 5.15 mostra os resultados obtidos através da análise econômica.

Tabela 5.15. Resultados da análise econômica para a troca de motores e bombas

Local	TIR [%]	Payback [anos]	VPL [R\$]
Captação (G1)	-	-	-3214
Captação (G2)	63,31	1,63	23516
Captação (G3)	59,62	1,75	21738
Solar dos Lagos (G1)	55,64	1,88	17754
Jardim das Acácias (G1)	150,85	0,65	33845
São Francisco (G1)	176,85	0,55	86606
São Francisco (G2)	158,06	0,62	76569
Carioca (G1)	106,46	0,94	40882
Carioca (G2)	102,23	0,98	38998

Fonte: Dados do autor

5.2.4 Verificação da substituição dos conjuntos

Após a realização do diagnóstico, o SAAE trocou dois conjuntos motobombas: um na unidade Solar dos Lagos e um na unidade Jardim das Acácias. Porém, o SAAE não seguiu a sugestão de realizar a troca dos conjuntos pelo porte sugerido no diagnóstico. Conforme mostra a Tabela 5.16, o SAAE manteve a potência da unidade Solar dos Lagos e aumentou a potência da unidade Jardim das Acácias.

Tabela 5.16 - Potência dos novos conjuntos

Local	Potência antiga [cv]	Potência nova [cv]	Potência sugerida [cv]
Solar dos Lagos	60	60	40
Jardim das Acácias	25	30	20

Fonte: Dados do autor

Após uma campanha de medição obteve-se os rendimentos dos novos conjuntos, Tabela 5.17:

Tabela 5.17 – Ensaio dos conjuntos motobombas 1, 2 e 3 operando isoladamente

Grupos	n [rpm]	Valores Lidos				Valores Calculados				
		$P_r/\rho.g$ [m]	$P_s/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /h]	P_{ei} [kW]	H [m]	V_r [m/s]	V_s [m/s]	P_h [kW]	η_c [%]
Solar dos Lagos	3500	57,0	-3,6	142	37	60,73	2,456	2,09	23,45	63,4
Jardim das Acácias	3554	65	-0,2	72	23,4	65,6	0,04	0,03	12,9	54,9

Fonte: Dados do autor

As figuras a seguir, Figura 5.28 e Figura 5.29, mostram uma comparação entre os rendimentos dos conjuntos antigos e novos. Durante a visita de verificação de resultados, um dos grupos da unidade Solar dos Lagos estava em manutenção, razão pela qual não aparece na Figura 5.28.

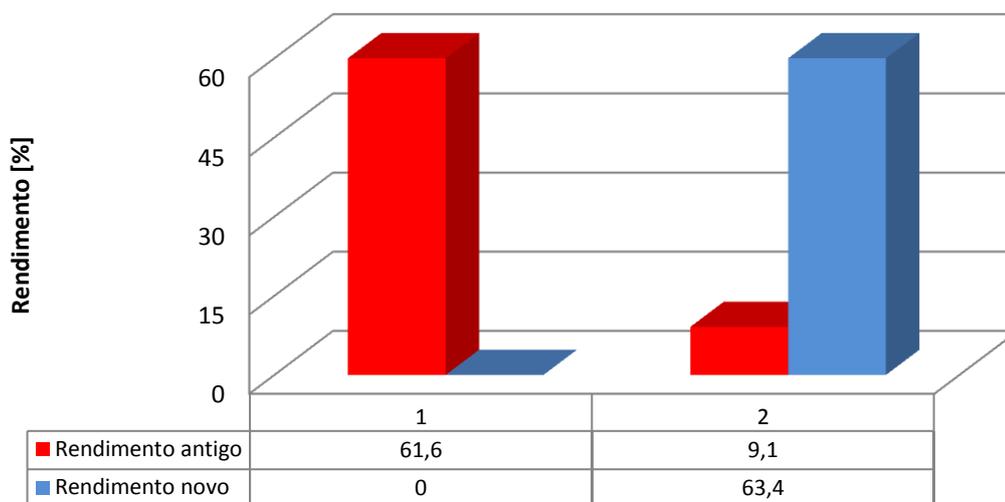


Figura 5.28 - Comparação entre os rendimentos dos conjuntos motobombas (Solar dos Lagos)

Fonte: Dados do autor

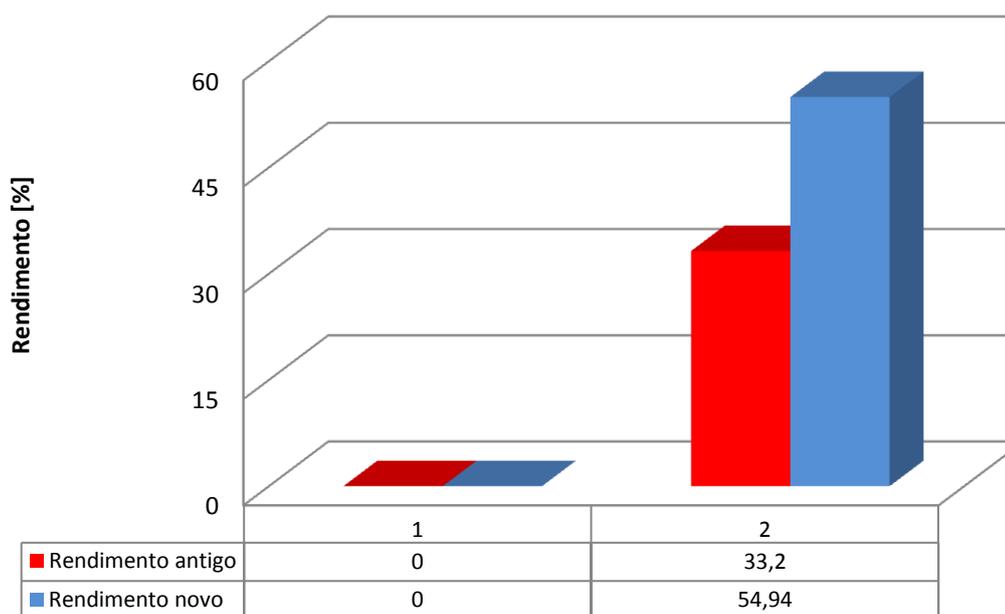


Figura 5.29 – Comparação entre os rendimentos dos conjuntos motobombas (Jardim das Acácias)

Fonte: Dados do autor

Através da comparação dos indicadores de eficiência energética, conforme mostram as Figura 5.30 e Figura 5.31, percebe-se que mesmo não seguindo as sugestões, obteve-se um ganho devido aos equipamentos mais eficientes utilizados.

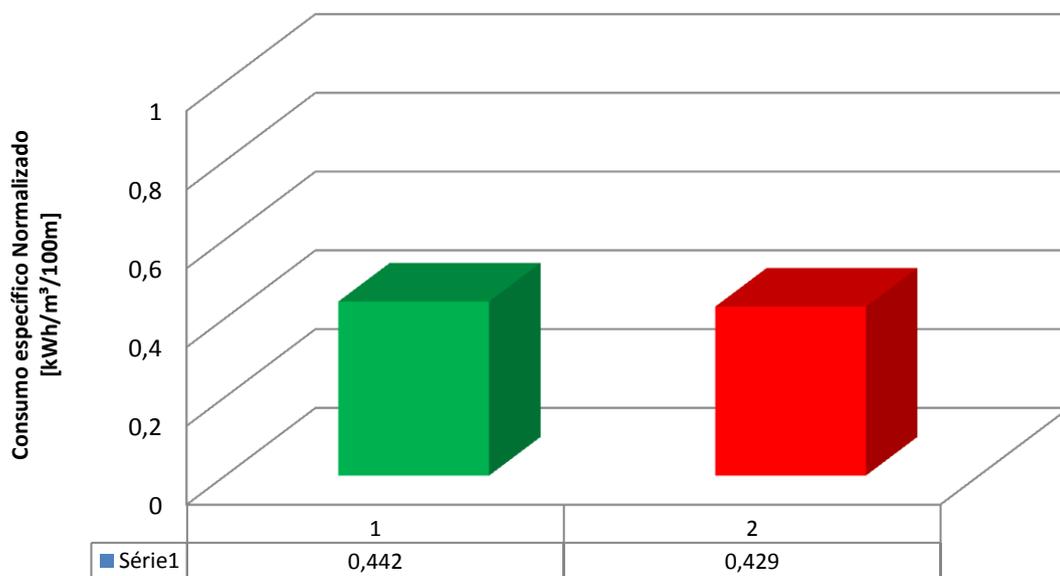


Figura 5.30 – Comparação entre os índices de consumo específico normalizado entre as bombas antigas (1) e as bombas novas (2) (Solar dos Lagos)

Fonte: Dados do autor

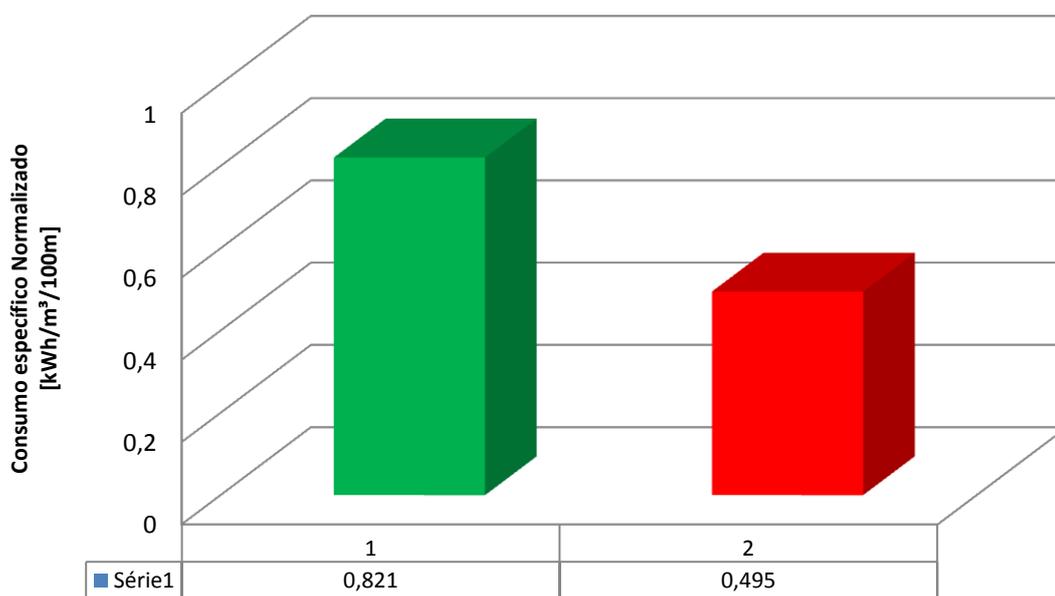


Figura 5.31 – Comparação entre os índices de consumo específico normalizado entre as bombas antigas (1) e as bombas novas (2) (Jardim das Acácias)

Fonte: Dados do autor

A Tabela 5.18 mostra a melhoria obtida no consumo específico dos conjuntos motobombas.

Tabela 5.18 – Melhoria no consumo específico dos conjuntos motobombas

Grupo motobomba	Melhora no consumo específico [%]
Solar dos Lagos - 2	2,9
Jardim das Acácias - 2	39,7

Fonte: Dados do autor

5.3 Uso de inversores de frequência

O estudos abaixo foi realizado nos SAAEs das cidades de Passos/MG, Cruzeiro/SP e Cacoal/RO e analisam a viabilidade ou não do uso do inversor de frequência. O estudo apresentado mostrará um caso onde a utilização do inversor de frequência é inviável, onde é viável, mas existe uma alternativa melhor, e outra onde é viável.

5.3.1 SAAE Passos

A análise do uso de inversores de frequência foi realizada nos conjuntos motobombas da captação de água (300 cv) devido ao seu grande consumo de energia, Figura 5.32. A água destas bombas é enviada à ETA, onde é tratada e então armazenada em um reservatório de 2.000 m³, de onde é distribuída para a população por gravidade.



Figura 5.32 - Captação de água bruta do SAAE Passos.

Fonte: Fotos do autor

A curva do sistema e da associação das bombas em paralelo é apresentada na Figura 5.33 e a curva de demanda na Figura 5.34. A primeira observação feita foi que a perda de carga para o sistema está elevada, o que indica incrustação nas paredes da adutora. Mesmo assim, percebe-se que a maior parcela de altura da curva do sistema refere-se à altura estática, ou seja, há uma pequena contribuição da perda de carga na altura de elevação das bombas. Consequentemente, com a utilização de um inversor de frequência, um pequeno decréscimo na rotação do conjunto causaria uma queda acentuada em sua vazão, e, portanto, não seria possível operar o sistema com segurança. Além disso, como estas bombas abastecem um reservatório, a melhor maneira de operar o sistema é através do controle liga/desliga das bombas, deixando que o reservatório atenda às variações de consumo. Isto pode ser observado na Figura 5.34, onde no início da madrugada duas bombas estão em operação. Às 2:00h uma destas bombas é desligada e a partir das 8:00h a operação ocorre com as três bombas ligadas.

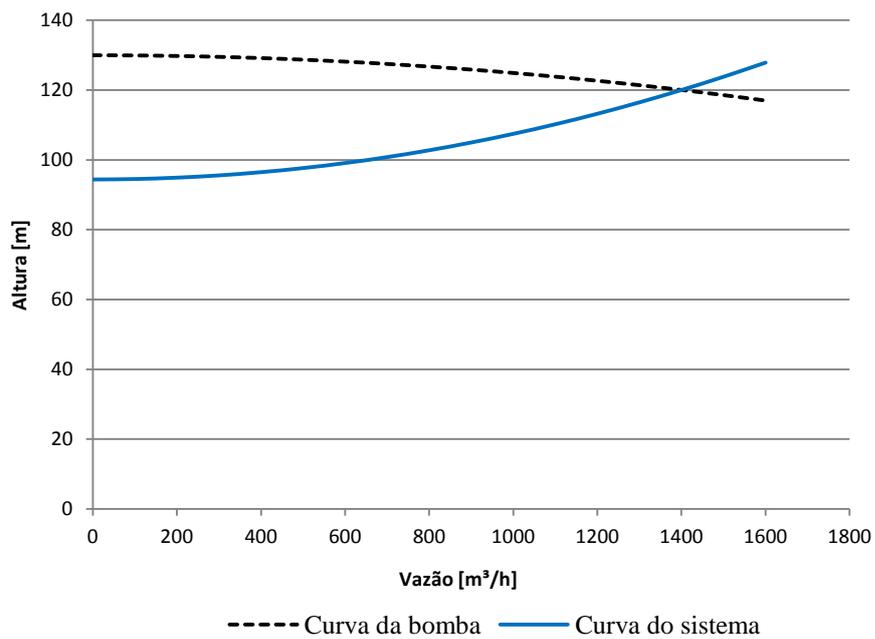


Figura 5.33 - Curva do sistema e da associação das bombas em paralelo da captação do SAAE Passos

Fonte: Dados do autor

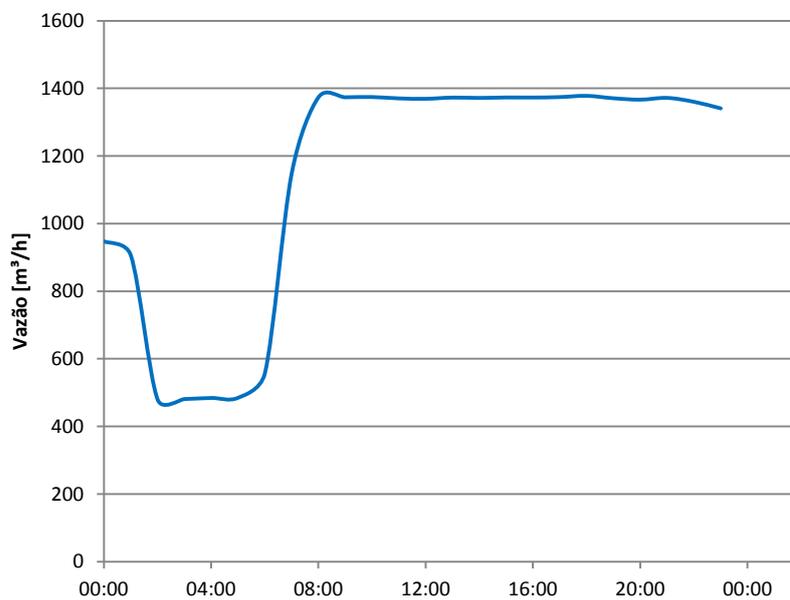


Figura 5.34 - Curva de demanda da captação do SAAE Passos

Fonte: Dados do autor

5.3.2 SAAE Cruzeiro

A ETA de Cruzeiro contém três conjuntos motobombas para bombear a água tratada para um reservatório de 2.100 m³, de onde é distribuída à população por gravidade. Dois conjuntos são de 7,5 cv e operam em paralelo e o terceiro conjunto, de 15 cv, opera isoladamente, como mostra a Figura 5.35.

O terceiro conjunto foi reaproveitado de outra ETA e por isto suas condições nominais não são compatíveis com a situação atual, sendo necessário a sua regulagem com uma válvula de sucção, que é realizada manualmente. Por haver este controle de vazão, será avaliado a viabilidade do uso do inversor de frequência no conjunto 3.



Figura 5.35 - Conjuntos motobomba da ETA do SAAE Cruzeiro

Fonte: Fotos do autor

A Figura 5.36 apresenta a curva do sistema e da bomba, enquanto que a Figura 5.37 apresenta a curva de demanda.

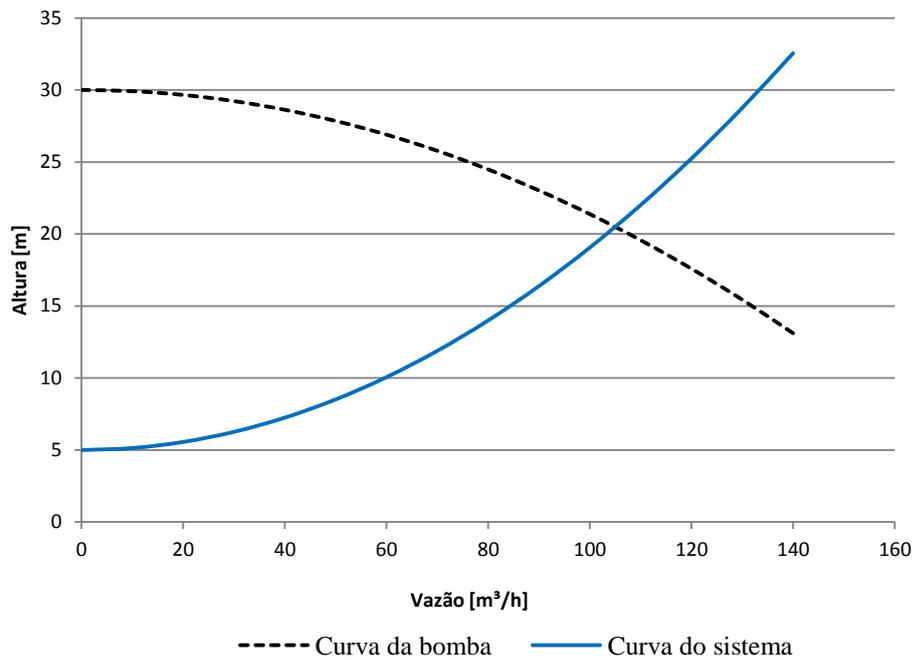


Figura 5.36 - Curva do sistema e da bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro

Fonte: Dados do autor

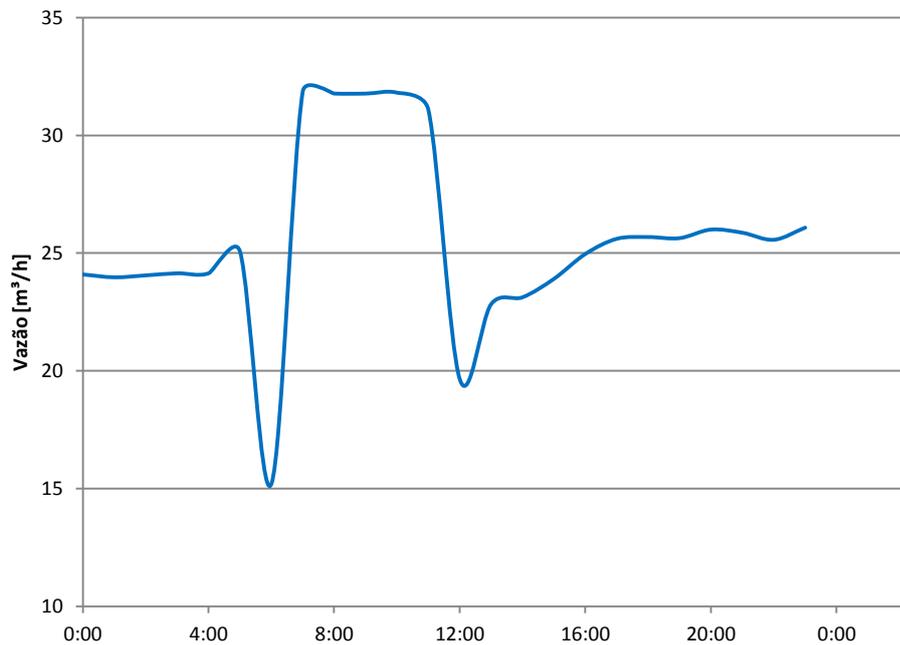


Figura 5.37 - Curva de demanda para a bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro

Fonte: Dados do autor

É possível perceber que a bomba opera com a válvula quase totalmente fechada, pois sua vazão nominal é muito superior vazão de demanda. Além disso, sua altura também é bem superior à requerida pelo sistema. Realizando a análise do uso de inversor de

frequência, chega-se à conclusão de que é técnica e economicamente viável a sua utilização, como mostra a Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Resultados da análise do uso de inversor de frequência na bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro

Investimento [R\$]	Consumo de energia atual [kWh/ano]	Consumo de energia com inversor [kWh/ano]	Economia de Energia [kWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [anos]
3.358	67.376	43.826	23.550	3.940	0,84

Fonte: Dados do autor

Porém, realizando uma análise mais criteriosa, chega-se à conclusão de que a bomba atual está superdimensionada, e que esta deve ser trocada por uma de menor potência, com seu ponto de operação compatível ao necessário. A Tabela 5.20 apresenta os resultados obtidos quando se considera o uso de uma bomba adequada ao sistema.

Tabela 5.20 - Resultados da análise do uso de uma bomba com ponto de operação adequado na ETA do SAAE Cruzeiro

Investimento [R\$]	Consumo de energia atual [kWh/ano]	Consumo de energia com um novo conjunto motobomba [kWh/ano]	Economia de Energia [kWh/ano]	Economia [R\$/ano]	Payback [anos]
1.500	67.376	10.865	55.525	9.455	55.525

Fonte: Dados do autor

Neste caso o uso de inversores é justificável, porém a seleção da bomba adequada às condições de operação, sem que seja necessário o uso do inversor, é economicamente mais viável.

5.3.3 SAAE Cacoal

A captação de água bruta é feita no rio Machado através de 6 conjuntos motobomba, sendo que dois destes conjuntos estão instalados em uma balsa, enquanto os outros quatro, que são de eixo vertical, estão instalados em uma casa de bombas. O uso da

balsa e das bombas de eixo vertical é necessário devido à grande variação de nível do Rio Machado.

Depois de tratada a água é aduzida, por gravidade, para dois reservatórios principais. O reservatório 1 possui capacidade de armazenamento de 2.000 m³ e o reservatório 2 possui capacidade de 500 m³. Destes dois reservatórios a água é bombeada diretamente na rede para abastecer a população. Existem três setores de abastecimento: o da Rodoviária e do Centro, que utilizam a água do reservatório 1 e possuem conjuntos de 75 cv, e o do Teixeira, que utiliza água do reservatório 2 e possui conjuntos de 50 cv. Todas as elevatórias que abastecem estes setores possuem três conjuntos motobombas cada. O setor Teixeira (Figura 5.38) será o local de estudo para avaliar a viabilidade do uso de inversores de frequência.



Figura 5.38 - Estação elevatória Teixeira do SAAE Cacoal

Fonte: Fotos do autor

Neste sistema o bombeamento da distribuição é feito diretamente na rede de distribuição. A Figura 5.39 apresenta a curva do sistema e da bomba, enquanto que a Figura 5.40 apresenta a curva de demanda.

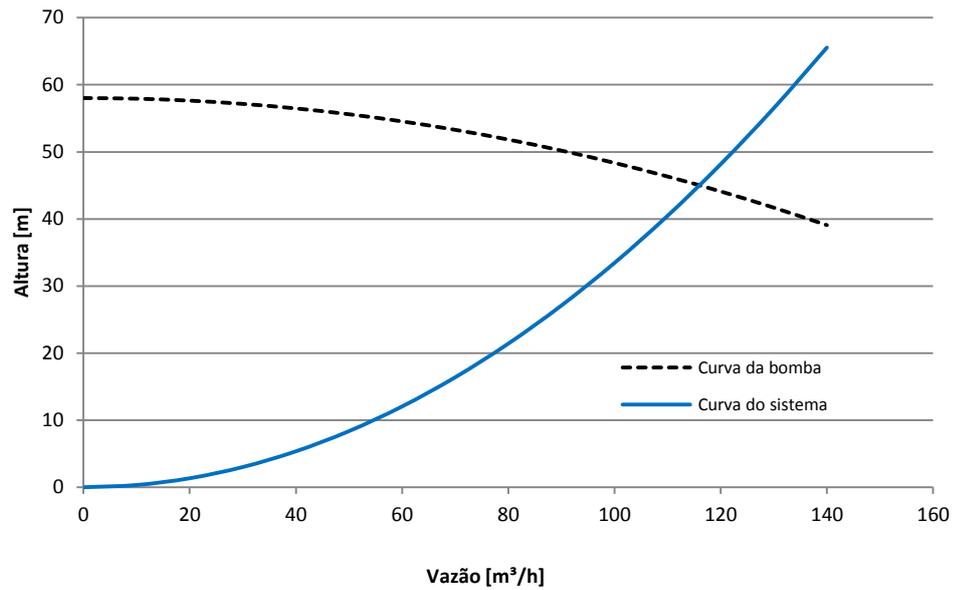


Figura 5.39 - Curva do sistema e da bomba para o setor Teixeira do SAAE Cacoal

Fonte: Dados do autor

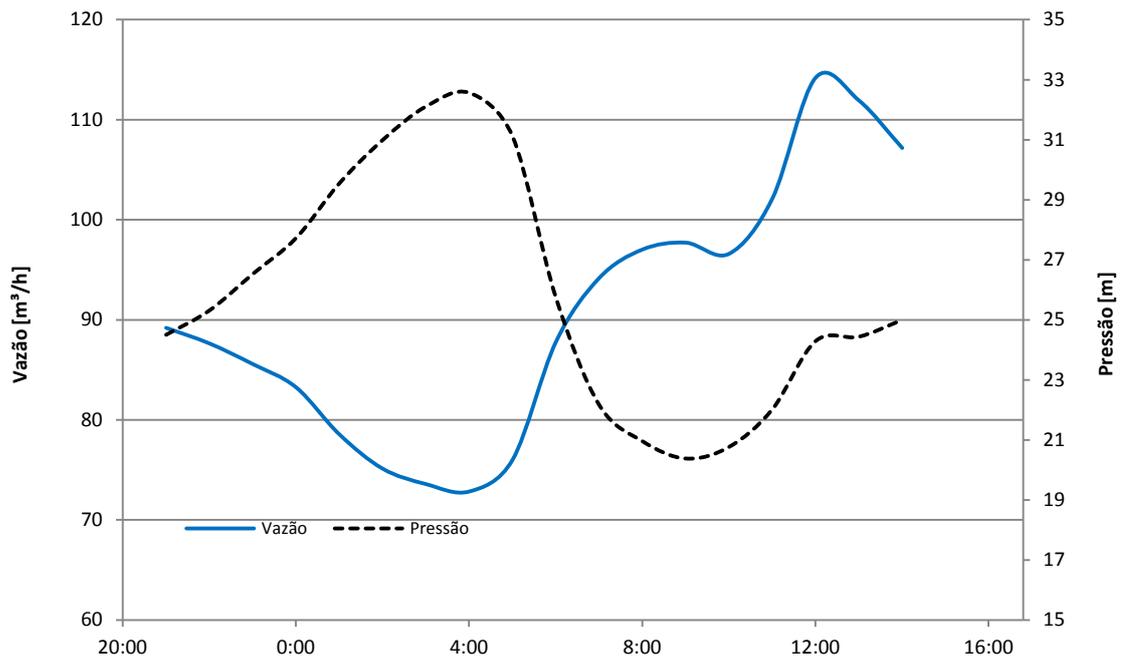


Figura 5.40 - Curva de demanda para o setor Teixeira do SAAE Cacoal.

Fonte: Dados do autor

Neste caso todas as condições são favoráveis ao uso do inversor de frequência, pois o bombeamento é feito apenas para vencer as perdas de carga, pois não existe a parcela de altura estática. A análise feita comprova esta teoria, como mostra a Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Resultados da análise do uso de inversor de frequência para o setor Teixeiraão do SAAE Cacoal

Investimento [R\$]	25.500
Consumo de energia atual [kWh/ano]	179.412
Consumo de energia com inversor [kWh/ano]	122.624
Economia de Energia [kWh/ano]	56.788
Economia [R\$/ano]	16.045
Payback [anos]	1,65

Fonte: Dados do autor

5.4 Otimização do uso dos reservatório

O estudo de otimização do uso de reservatórios foi realizado nos SAAEs São Lourenço e Cruzeiro e seus resultados seguem a seguir:

5.4.1 SAAE de São Lourenço

As medições foram realizadas entre os dias 25/08/2010 e 31/08/2010, Figura 5.41. A Figura 5.42 mostra a curva de demanda da Elevatória Vila Nova para o dia de maior consumo.

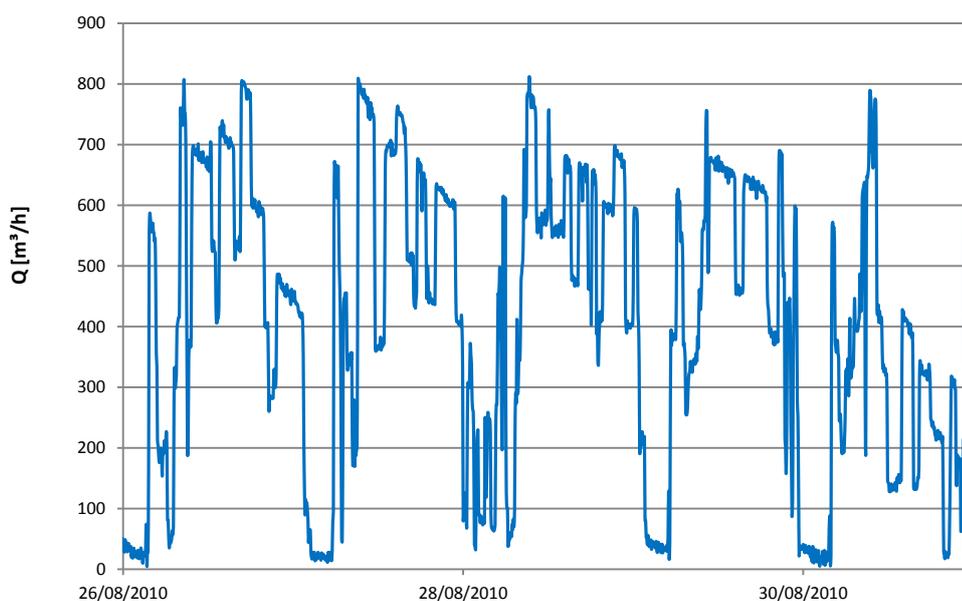


Figura 5.41 - Curva de demanda entre os dias 25/08/2010 e 31/08/2010

Fonte: Dados do autor

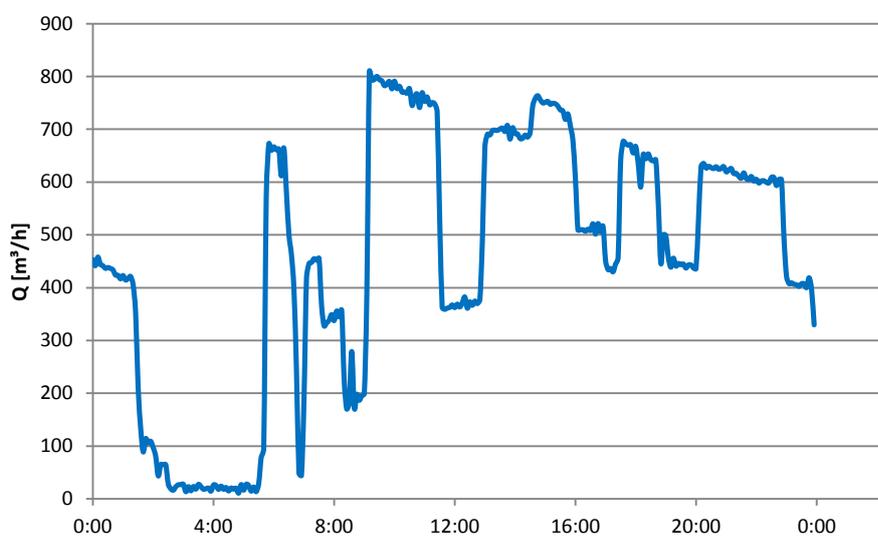


Figura 5.42 - Curva de demanda de vazão

Fonte: Dados do autor

Considerando esta curva de demanda e que a altura e rendimento médio dos conjuntos motobombas da ETA são de 74 m e 70 %, foram analisadas três situações: a condição de operação atual, o desligamento de uma das bombas da ETA no horário de ponta e a parada completa do bombeamento da ETA no horário de ponta.

5.4.1.1 Situação atual

A Tabela 5.22 mostra as condições de operação atual e o volume útil necessário obtido através do método dos volumes diferenciais. O resultado mostra que o reservatório opera perto de sua capacidade máxima, que é de 1.100 m³. É possível perceber pela Figura 5.43, que a operação ocorre sem nenhuma organização, já que não há uma grande variação do nível d'água, sendo que o máximo ocorre durante a madrugada, e no horário de ponta, durante a maior parte do tempo, as duas bombas operam juntas.

Tabela 5.22 - Método dos volumes diferenciais para a situação atual

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q _e -Q _s)	
	Q _e [m ³ /h]	Q _s [m ³ /h]	+	-
1	400,54	437,49		-36,94
2	387,64	267,05	120,59	
3	140,19	46,57	93,62	
4	0,00	20,72		-20,72
5	0,00	20,80		-20,80
6	139,39	186,07		-46,67
7	324,58	462,92		-138,33
8	344,14	381,30		-37,16
9	441,50	250,54	190,95	
10	600,14	708,77		-108,63
11	605,89	768,46		-162,57
12	606,21	569,97	36,24	
13	605,19	380,34	224,85	
14	604,22	694,40		-90,17
15	598,67	715,86		-117,19
16	600,97	733,27		-132,29
17	601,92	519,18	82,74	
18	598,97	553,40	45,57	
19	440,46	606,21		-165,74
20	610,62	449,00	161,62	
21	608,34	604,36	3,98	
22	605,86	613,54		-7,68
23	603,12	593,53	9,59	
24	601,48	401,19	200,29	
Total	11.070	10.981	1.170	1.085
	Q_{média} [m³/h]	457,7	Volume Útil Necessário [m³]	1.085

Fonte: Dados do autor

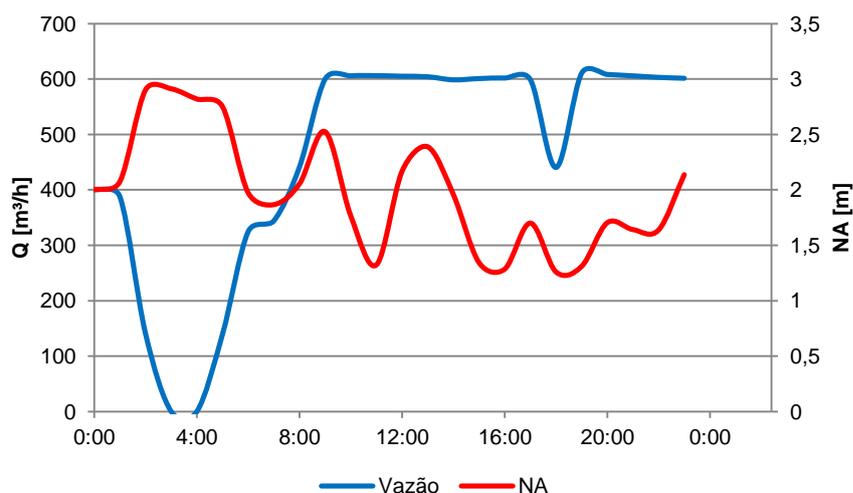


Figura 5.43 - Variação do nível d'água e vazão de entrada na situação atual

Fonte: Dados do autor

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Gastos com energia para a situação atual

Consumo HP [kWh]	478
Demanda HP [kW]	175
Consumo fora HP [kWh]	2.711
Demanda fora HP [kW]	174
Gasto Anual de Energia [R\$]	502.668

Fonte: Dados do autor

5.4.1.2 Desligamento de uma das bombas no horário de ponta

Para a condição em que apenas uma das bombas esteja operando no horário de ponta há a necessidade de aumentar a capacidade do reservatório para cerca de 1.500 m³, como mostra a Tabela 5.24. Nesta condição, é possível observar que há uma melhor programação, já que o nível do reservatório se eleva durante a madrugada para poder atender à demanda no horário de ponta (Figura 5.44).

Tabela 5.24 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 1 bomba no HP.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo ($Q_e - Q_s$)	
	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	270	437,49		-167,49
2	270	267,05	2,95	
3	0	46,57		-46,57
4	0	20,72		-20,72
5	0	20,80		-20,80
6	610	186,07	423,93	
7	610	462,92	147,08	
8	610	381,30	228,70	
9	340	250,54	89,46	
10	610	708,77		-98,77
11	610	768,46		-158,46
12	610	569,97	40,03	
13	610	380,34	229,66	
14	610	694,40		-84,40
15	610	715,86		-105,86
16	610	733,27		-123,27
17	610	519,18	90,82	
18	610	553,40	56,60	
19	340	606,21		-266,21
20	340	449,00		-109,00
21	340	604,36		-264,36
22	610	613,54		-3,54
23	610	593,53	16,47	
24	610	401,19	208,81	
Total	11.050	10.985	1.534	1.469
	$Q_{m\acute{e}dia}$ [m³/h]	457,7	Volume Útil	1.469
			Necessário [m³]	

Fonte: Dados do autor

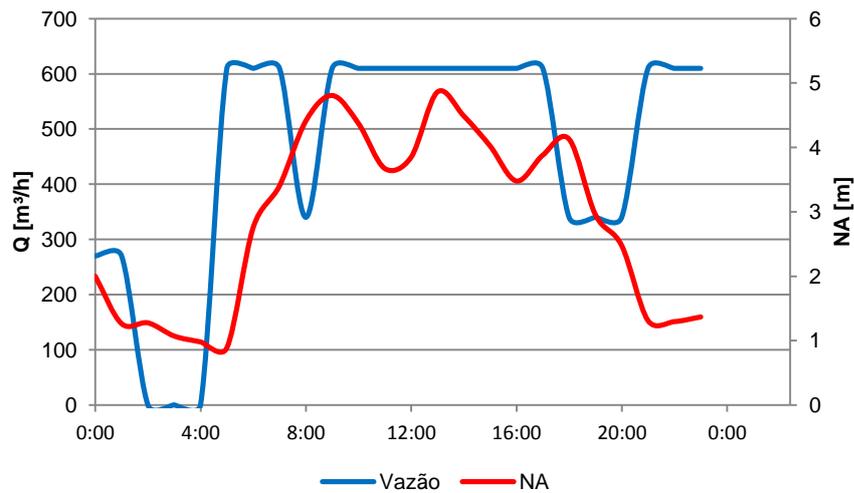


Figura 5.44 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de uma bomba no HP

Fonte: Dados do autor

Neste cenário há uma redução de 19,88 % no gasto com energia com relação à operação atual, como mostra a Tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 1 bomba no HP

Consumo HP [kWh]	294
Demanda HP [kW]	98
Consumo fora HP [kWh]	2.889
Demanda fora HP [kW]	176
Gasto Anual de Energia [R\$]	402.719

Fonte: Dados do autor

5.4.1.3 Desligamento das duas bombas no horário de ponta

Neste cenário não há vazão entrando no reservatório durante o horário de ponta. Para que seja possível atender a demanda durante este período é necessário que o volume do reservatório seja de 2.500 m³ (Tabela 5.26). Assim como no cenário anterior é possível observar a melhor programação da operação (Figura 5.45).

Tabela 5.26 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 2 bombas no HP

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo ($Q_e - Q_s$)	
	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	270	437,49		-167,49
2	270	267,05	2,95	
3	270	46,57	223,43	
4	270	20,72	249,28	
5	270	20,80	249,20	
6	610	186,07	423,93	
7	610	462,92	147,08	
8	610	381,30	228,70	
9	610	250,54	359,46	
10	610	708,77		-98,77
11	610	768,46		-158,46
12	610	569,97	40,03	
13	610	380,34	229,66	
14	610	694,40		-84,40
15	610	715,86		-105,86
16	610	733,27		-123,27
17	610	519,18	90,82	
18	610	553,40	56,60	
19	0	606,21		-606,21
20	0	449,00		-449,00
21	0	604,36		-604,36
22	610	613,54		-3,54
23	610	593,53	16,47	
24	610	401,19	208,81	
Total	11.110	10.985	2.526	2.401
	$Q_{média}$ [m³/h]	457,7	Volume Útil Necessário [m³]	2.401

Fonte: Dados do autor

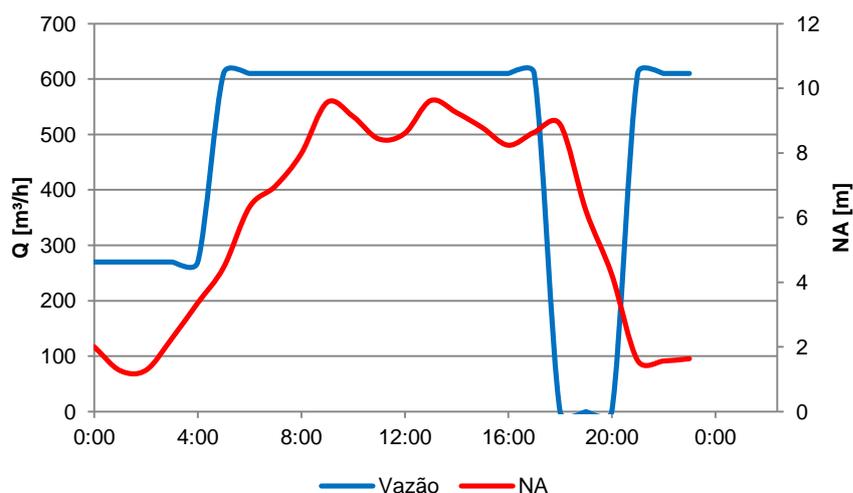


Figura 5.45 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de 2 bombas no HP

Apesar do volume necessário do reservatório ser maior, a redução nos gastos com energia chega a 51,2 %, como mostra a Tabela 5.27.

Tabela 5.27 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 2 bombas no HP.

Consumo HP [kWh]	0
Demanda HP [kW]	0
Consumo fora HP [kWh]	3.200
Demanda fora HP [kW]	176
Gasto Anual de Energia [R\$]	245.316

Fonte: Dados do autor

5.4.2 SAAE de Cruzeiro

As medições foram realizadas entre os dias 15/10/2010 e 22/10/2010 (Figura 5.46), obtendo-se para o dia de maior consumo a curva de demanda da Figura 5.47.

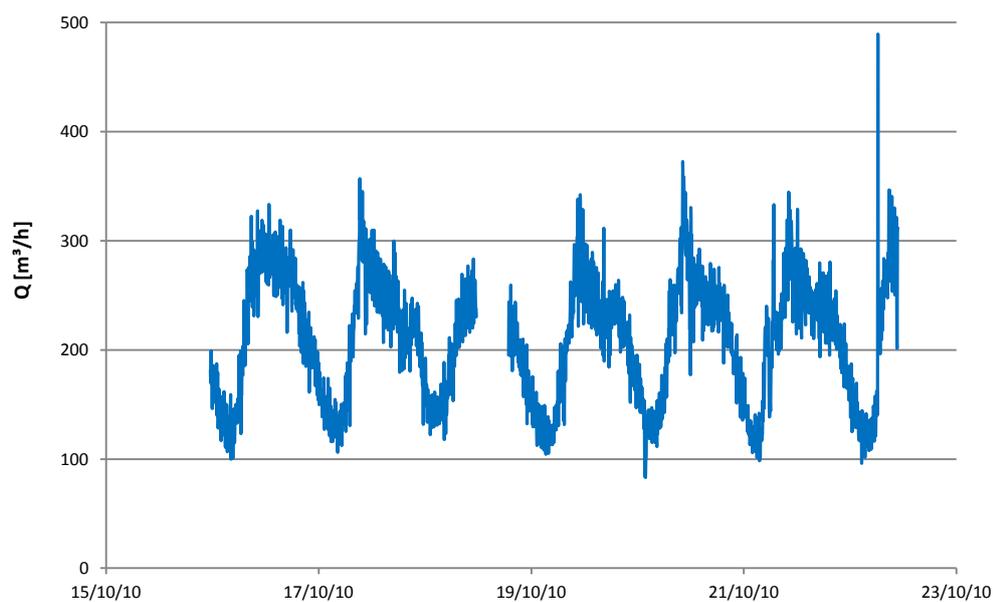


Figura 5.46 - Curva de demanda entre os dias 15/08/2010 e 22/08/2010

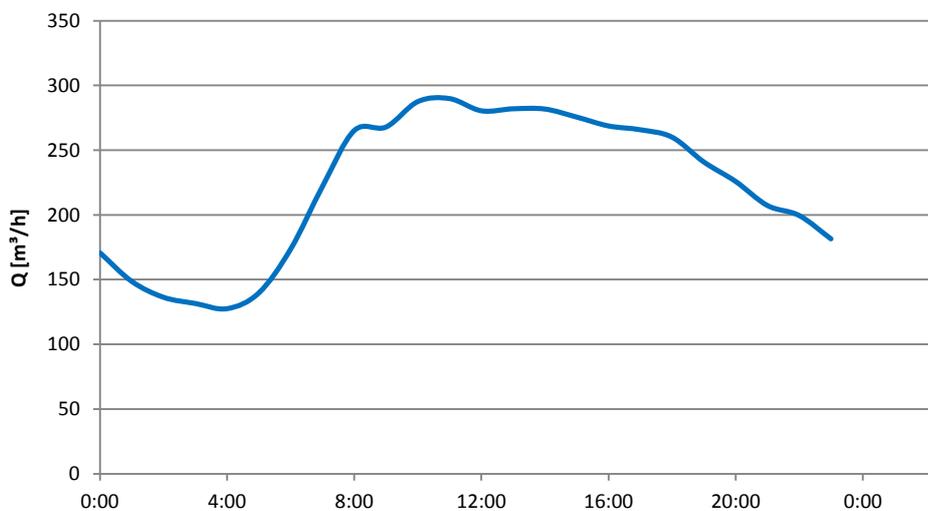


Figura 5.47 - Curva de demanda do dia de maior consumo

Considerando esta curva de demanda e que a altura e rendimento médio dos conjuntos sejam de 56,7 m e 51 %, foram analisadas duas situações: a condição de operação atual e o desligamento de todas as bombas da captação e da ETA no horário de ponta.

5.4.2.1 Situação atual

A Tabela 5.28 mostra as condições de operação atual e o volume útil necessário obtido através do método dos volumes diferenciais. O resultado mostra que o reservatório, que possui 2.100 m³, opera com folga. Porém, é possível perceber que há um déficit da vazão bombeada, que foi menor que a vazão consumida, ou seja, neste dia utilizou-se água acumulada durante os dias anteriores, onde a demanda foi menor. Além disso, o bombeamento ocorre praticamente 24 h em sua capacidade máxima (Figura 5.48). Isto indica que deve haver um aumento na capacidade de bombeamento e tratamento para evitar a falta de água.

Tabela 5.28 - Resultados da operação atual

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q _e -Q _s)	
	Q _e [m ³ /h]	Q _s [m ³ /h]	+	-
1	212,91	170,77	42,14	
2	212,86	148,69	64,17	
3	212,95	136,41	76,54	
4	212,73	131,63	81,10	
5	213,22	127,64	85,58	
6	213,31	139,83	73,48	
7	175,89	173,65	2,24	
8	227,60	222,00	5,59	
9	226,00	265,18		-39,18
10	193,07	267,90		-74,84
11	227,91	287,54		-59,63
12	225,45	289,85		-64,41
13	185,41	280,42		-95,01
14	223,89	281,98		-58,09
15	223,65	281,77		-58,12
16	222,95	275,56		-52,62
17	221,47	268,73		-47,26
18	221,10	265,79		-44,69
19	219,30	260,06		-40,76
20	218,91	240,90		-21,99
21	218,32	225,89		-7,56
22	216,89	207,30	9,59	
23	216,12	199,54	16,58	
24	215,61	181,54	34,07	

Total	5.158	5.331	491,08	-664
Q_{média} [m³/h]	214,90	222,11	Volume Útil Necessário [m³]	664

Fonte: Dados do autor

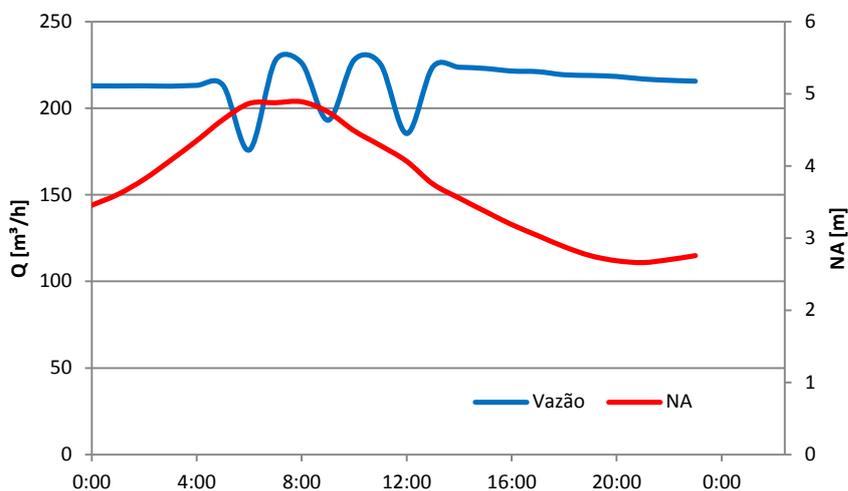


Figura 5.48 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada na operação atual

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 - Gastos com energia na situação atual.

Consumo HP [kWh]	196
Demanda HP [kW]	65,5
Consumo fora HP [kWh]	1.347
Demanda fora HP [kW]	68,19
Gasto Anual de Energia [R\$]	112.525

Fonte: Dados do autor

5.4.2.2 Desligamento das bombas no horário de ponta

Neste cenário não há vazão chegando ao reservatório durante o horário de ponta. Será analisado o caso em que a vazão média da captação seria 30 % maior que a da curva de demanda, permitindo que haja um aumento do consumo. Para que isto seja possível, a ETA deveria ter capacidade de tratar 300 m³/h (Tabela 5.30). Além disso, neste caso existe a

necessidade de se trocar os conjuntos motobombas da captação para atingir a vazão de 300 m³/h. Porém para a análise foi considerado o rendimento médio atual. Nesta situação o volume necessário do reservatório seria de 938 m³, ou seja, ainda há folga no volume do reservatório. A Figura 5.49 ilustra como deve ocorrer a operação.

Tabela 5.30 - Resultados da operação com o desligamento das bombas no HP

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q _e -Q _s)	
	Q _e [m ³ /h]	Q _s [m ³ /h]	+	-
1	300,00	170,77	129,23	
2	300,00	148,69	151,31	
3	300,00	136,41	163,59	
4	150,00	131,63	18,37	
5	150,00	127,64	22,36	
6	150,00	139,83	10,17	
7	150,00	173,65		-23,65
8	150,00	222,00		-72,00
9	150,00	265,18		-115,18
10	300,00	267,90	32,10	
11	300,00	287,54	12,46	
12	300,00	289,85	10,15	
13	300,00	280,42	19,58	
14	300,00	281,98	18,02	
15	300,00	281,77	18,23	
16	300,00	275,56	24,44	
17	300,00	268,73	31,27	
18	300,00	265,79	34,21	
19	0,00	260,06		-260,06
20	0,00	240,90		-240,90
21	0,00	225,89		-225,89
22	300,00	207,30	92,70	
23	300,00	199,54	100,46	
24	300,00	181,54	118,46	
Total	5.400	5.330	1.007	-938
Q_{média} [m³/h]	225	222,11	Volume Útil Necessário [m³]	938

Fonte: Dados do autor

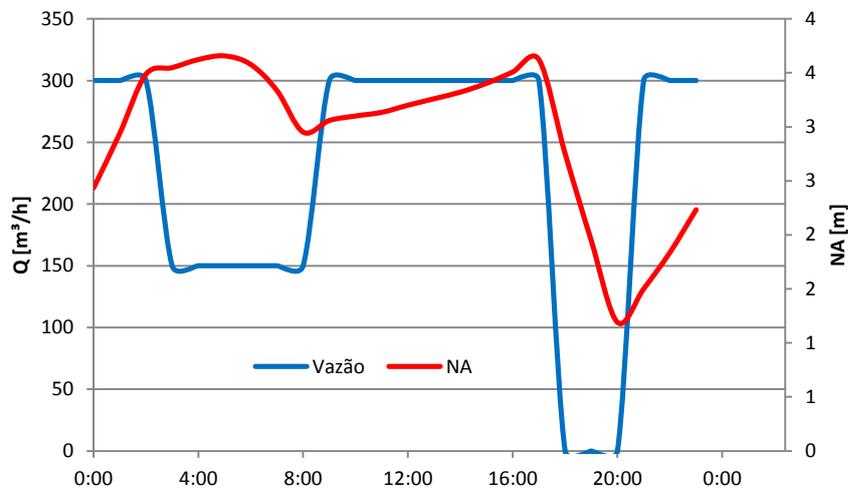


Figura 5.49 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada com o desligamento das bombas no HP

Fonte: Dados do autor

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 5.31. Nota-se que mesmo com um aumento da vazão média em 10,1 m³/h, necessário para atender a atual demanda, ainda há redução de 24,38 % nos gastos com energia, o que representa R\$ 27.443 por ano.

Tabela 5.31 - Gastos com energia na situação de desligamento das bombas no HP.

Consumo HP [kWh]	0
Demanda HP [kW]	0
Consumo fora HP [kWh]	1.525,9
Demanda fora HP [kW]	89,8
Gasto Anual de Energia [R\$]	85.081

Fonte: Dados do autor

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusão

O presente trabalho foi desenvolvido mostrando técnicas para serem utilizadas em campo para elaboração de diagnósticos energéticos visando ações de melhoria a serem implementadas em empresas de abastecimento de água. Foram realizados diagnósticos energéticos em quatro SAAEs (Cacoal/RN, Cruzeiro/SP, Passos/MG e São Lourenço/MG) que serviram de estudos de casos para esta dissertação.

Uma medida que não envolve custos e que pode apresentar grandes potenciais é a análise tarifária. O estudo realizado no SAAE Cruzeiro mostrou que deve-se verificar a demanda contratada para verificar se o dimensionamento com o total consumido está adequado. O estudo também mostrou que é viável adquirir um transformador para utilizar a Tarifa Convencional A4 ao invés da Tarifa Convencional B3.

O procedimento de ensaio de conjuntos motobombas não apresenta grandes dificuldades, podendo ser realizado com aquisição de dados, que é desejável. Permitiu a realização dos ensaios sem parada do bombeamento na instalação. Esta metodologia é uma alternativa ao desligamento do motor, para a obtenção da curva do sistema, que apresenta dificuldades devido a necessidade de aquisição de dados e parada da instalação para a realização do teste.

Sobre a substituição dos conjuntos motobombas, devido à dificuldade de se realizar a avaliação isolada da bomba ou do motor, recomenda-se a troca do conjunto inteiro após um correto dimensionamento. A análise de substituição dos conjuntos foi realizada para o ponto de operação de funcionamento da bomba. Os indicadores de eficiência energética, consumo específico e consumo específico normalizado, são excelentes alternativas para comparar grupos motobombas, pois mesmo para pontos de operação diferentes, a normalização mostra-se eficaz para a padronização.

Observa-se que é comum em empresas de abastecimento de água a desconfiança e medo em diminuir a potência dos equipamentos de bombeamento. Este medo, levou o SAAE São Lourenço, por exemplo, a adquirir equipamentos com potência igual ou

superior a anterior, mesmo o estudo comprovando a possibilidade de diminuição dos equipamentos.

O ensaio dos conjuntos motobombas também permite, junto com análise de outras informações, verificar a viabilidade técnica e econômica da utilização de um inversor de frequência. O trabalho apresentou três diferentes situações de operação de conjuntos motobombas. No primeiro caso, o do SAAE Passos, não há viabilidade técnica, pois a maior parte da altura de elevação das bombas refere-se à altura estática e a operação mais adequada é realizar o controle liga/desliga, deixando que o reservatório atenda às variações de consumo. No segundo caso, do SAAE Cruzeiro o uso do inversor apresentou viabilidade técnica e econômica, porém seu uso só se justifica devido ao sobredimensionamento do conjunto. Neste caso foi possível observar que a seleção da bomba adequada para o ponto de operação gera maior economia. Por fim, o caso do SAAE Cacoal mostrou a situação onde há maior aplicação do inversor de frequência, apresentando viabilidade técnica e econômica, quando o bombeamento é feito diretamente na rede de distribuição.

Portanto, deve ser feito um estudo criterioso antes de fazer a opção pelo uso de inversores de frequência, onde devem ser consideradas outras alternativas que podem se mostrar mais adequadas. De acordo com os resultados apresentados conclui-se que as instalações de bombeamento mais indicadas são aquelas onde existe grande variação na demanda de vazão e aquelas onde existe uma porcentagem elevada da altura estática em relação a altura total. Além disso, a inclinação da curva da bomba também interfere na possibilidade de projeto, pois curvas acentuadas tem grande variação de pressão e pequenas variações de vazão, o que implica que a bomba pode não conseguir atender a situação de vencer uma altura mínima exigida.

Verificou-se que a utilização dos reservatórios não é realizada de forma correta. As empresas costumam bombear a água ao reservatório para que ele continue sempre cheio, sem utilizar os claros benefícios de possibilidade de modulação total ou parcial para o horário fora de ponta.

A metodologia utilizada para a avaliação de possibilidade de otimização dos reservatórios é bastante simples, e também não implica na parada da instalação. Além disso, ela possibilita verificar a possível existência de vazamentos na instalação, além de verificar o tamanho necessário para o reservatório.

Os estudos realizados mostraram a importância do uso de reservatórios para atender o pico de demanda. No primeiro caso do estudo de caso, de São Lourenço, observou-

se que a economia com os gastos de energia pode chegar a 51 %, porém o volume necessário ao reservatório é quase o dobro do atual. Este volume poderia ser ainda maior, caso as bombas das elevatórias de distribuição também fossem desligadas no horário de ponta. Além disso, poderia haver a necessidade de aumentar a capacidade de tratamento da ETA. Já no caso do SAAE de Cruzeiro a economia é um pouco menor, cerca de 24 %. Neste caso o volume do reservatório é suficiente para que seja feito o desligamento das bombas no horário de ponta, porém a ETA não tem a capacidade de tratamento para que seja feita esta operação, e, portanto, investimentos na expansão da ETA e a troca dos conjuntos motobomba seriam necessários. Estes investimentos de expansão têm um alto custo e são de difícil execução, e, portanto, é mais vantajoso serem realizados na etapa inicial do projeto da instalação.

O trabalho atingiu os objetivos propostos de mostrar uma metodologia para implementar ações operacionais de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água, além de realizar uma revisão sobre gestão de energia aplicável para sistemas de bombeamento.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros, recomenda-se verificar a possibilidade de contratação de energia através do ambiente livre pelas empresas de abastecimento de água, analisando os riscos e viabilidade.

Verificar a possibilidade de autogeração de energia através micro e mini usinas hidrelétricas devido aos potenciais hidráulicos que existem entre as diferenças de cotas geográficas dos reservatórios.

Avaliar o rendimento de motores e bombas operando com rotação variável.

Desenvolver um sistema de controle que aplique a otimização de reservatórios, mostrando os níveis dos reservatórios em tempo real.

BIBLIOGRAFIA

ABDELAZIZ, E. A., SAIDUR, R., MEKHILEF, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. n. 15, p. 150-168, 2011, Elsevier

ABREU, J. P. G.; EMANUEL, A. E.; Induction motors loss of life due to voltage imbalance and harmonics: A preliminary study. IEEE. 2000.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, **ASHRAE Guideline 14-2002**: Measurement of Energy and Demand Savings, 2002, Atlanta, GA.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cadernos Temáticos ANEEL 4**: Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução Parte 1: Trifásicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 50001**: Sistemas de gestão da energia – Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BARRETO , M. P. **Eficiência energética em sistemas de abastecimento de água**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2010.

BAYINDIR, R; GÖK, M.; KABALCI, E.; KAPLAN, O. An Intelligent Power Factor Correction Approach Based on Linear Regression and Ridge Regression Methods. **10th International Conference on Machine Learning and Applications and Workshops**, 2011.

BORTONI, E. C.; Are my motors oversized? Energy Conversion and Management. *lol*. 50; p. 2282–2287. Junho, 2009.

BORTONI, E. C.; Motor oversizing outlook. In: ICEMS – International conference on electrical machines and systems, p.1385–96. Seoul, South Korea; Outubro 8–11, 2007.

BRAGHIROLI, M. A. Setor Santana: Um Caso de Sucesso na Redução de Perdas de Água e Consumo de Energia Elétrica, **Revista Saneas**, São Paulo, nº 20, p. 23, 2005.

BRASIL. Decreto no 479, de 20 de março de 1992. Autoriza ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE – estabelecer os limites mínimos do fator de potência; altera a redação do art. 7º do Decreto nº 62.724, de 17 de maio de 1968. Diário Oficial da União, Brasília, 23 de março de 1992.

BRASIL, Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 de julho de 2000, seção 1, p. 1, v. 138, n. 142.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 de dezembro de 2001, Seção 1, p. 1.

BRASIL. Portaria Interministerial nº 553, de 08 de dezembro de 2005. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 de dezembro de 2005, Seção 1, p. 98, v. 142, n. 237.

DONOLO, P.; BOSSIO, G.; DE ANGELO, C.; Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slots. **Energy Conversion and Management** vol. 52; p. 2024–2030. 2011.

DYMOND, J. H.; STRANGES, N.; Operation on unbalanced voltage: one motor's experience and more. **IEEE Transactions On Industry Applications**, vol. 43, no. 3, maio/junho, 2007.

EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação da Performance**. Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e Água, volume 1, 2011.

EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE. Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs, **Elsevier Advanced Technology**, Oxford, Inglaterra, 2004.

FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM. **M&V Guidelines**: Measurement and Verification for Federal Energy Projects. US Department of Energy. Boulder: FEMP, 2008.

GARCIA, D. C.; FILHO, A. L. F.; OLIVEIRA, , M. A. G.; FERNADES, O. A.; NACISMENTO, F. A.; Voltage unbalance numerical evaluation and minimization. **Electric Power Systems Research**. vol. 79; p. 1441–1445. Elsevier. 2009.

GNACINSKI, P.; Windings temperature and loss of life of an induction machine under voltage unbalance combined with over- or undervoltages. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, vol. 23, no. 2, Junho. 2008.

GIRDHAR, P.; MONIZ, O.; **Practical Centrifugal Pumps** - Design, Operation and Maintenance. Elsevier, 2005.

GOMES, H. P. (organizador). **Sistemas de Bombeamento** – Eficiência Energética. 1^a ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009.

GORDIC, D. et al. Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. **Energy Conservation and Management**, n. 51, p. 2783-2790, 2010. Elsevier.

HYDRAULIC INSTITUTE; Select an energy-efficient centrifugal pump. **World Pumps**. Elsevier. Junho, 2008

ILINSKI, N. Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving. **Energy Engineering**, n° 5, Vol. 97, pp. 7-20, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Introdução ao Uso da Medição e Verificação de Economias de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: INEE. 1997.

KANNAN, R., BOIE, W. Energy management practices in SME – case study of a bakery in Germany. **Energy Conservation and Management**, n.44, p. 945-959, 2003. Elsevier.

KARASSIK, I. J; MESSINA, J. P; COOPER, P; HEALD, C. C; Pump Handbook. Fourth Edition. P. 1632. McGraw-Hill

KAYA, D.; YAGMUR, E. A.; YIGIT, K. S.; KILIC, F. C.; EREN A. S.; CELIK, C. Energy efficiency in pumps. **Energy Conversion & Management**. Volume 49, no 6, p. 1662-1673. Elsevier. Junho, 2008.

LEE, C. Y.; Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**. vol. 14; no 2; Junho. 1999.

LEITE, F. C. **Modelamento da eficiência energética para o gerenciamento sustentável no setor industrial pela medição e verificação**. 2010. 94p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIMA, G. M.; VIANA, A. N. C; SILVA, A. Q.; DIAS, R. S. C. Otimização do Uso De Reservatórios para Redução do Bombeamento no Horário de Ponta. **XIX Simpósio de Recursos Hídricos**. Maceió. 2011.

LIMA, G. M.; Conservação de Energia em Sistemas de Abastecimento de Água: Estudo de Caso no SAAE São Lourenço. 2010. Trabalho Final de Graduação da Engenharia Hidrica. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal De Itajubá. Itajubá: 2010.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª ed., Rio de Janeiro: Guanabara, p. 782. 1987.

MCCOY, G. A.; LITMAN, T.; DOUGLASS, J. G.; **Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook**. Department of Energy, EUA, Washington, 1993.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano**. Brasília: MME. 2010.

NACKAB, J. Calcul direct, sans iteration, de la parte de charge en conduite par la formule de Colebrook, **La Houille Blanche**, n° 1, p. 61. 1988.

NAILEN, R. L.; Can field tests prove motor efficiency? **IEEE Transactions On Industry Applications**, Vol. 25, NO. 3, Maio/Junho, 1989.

NOGUEIRA, L. A. H. Auditoria Energética. In: MARQUES, M. HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. **Conservação de energia** – Eficiência energética de equipamentos e instalações. 3 ed., Itajubá: FUPAI, 2006, cap. 4, p. 129-147.

PASHA, M. F. K.; LANSEY, K. Optimal Pump Scheduling by Linear Programming. **World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers**. Kansas City, EUA, Maio; p. 395-404; 2009.

PEMBERTON, M. Variable Speed Pumping: Myths and Legends, **World Pumps Magazine**, p. 22-24, 2005.

PORTO, M. **Hidráulica Básica**, 4ª ed., São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. p. 519, 2006.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Gestão Energética**. Rio de Janeiro: PROCEL. 2005a.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: PROCEL. 2005b.

RAMOS, M. C. E. S. **Metodologia para Avaliação e Otimização de Motores Elétricos de Indução Trifásicos Visando a Conservação de Energia em Aplicações Industriais**. 2009. p. 246. Tese de doutorado do Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**, 2007. p. 234, Tese de doutorado em engenharia civil, Faculdade de engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

RUSSEL, C. Strategic Industrial Energy Efficiency: Reduce Expenses, Build Revenues and Control Risk. **Energy Engineering**, n. 3, vol. 102, p. 7-27, 2005. H. W. Wilson Company.

SAHOO, T.; Energy cost savings with centrifugal pumps. **World Pumps 510**. p. 35-37, Elsevier. Março, 2009a.

SAHOO, T.; Making centrifugal pumps more reliable. **World Pumps 513**. p. 32-36, Elsevier. Junho, 2009b.

SAIDUR, R.; A review on electrical motors energy use and energy savings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. no 14; p. 877–898; 2010.

SAGIROGLU, S; COLAK. I; BAYINDIR. R; Power factor correction technique based on artificial neural networks. *Energy Conservation and Management*. Volume 47, Issues 18–19, November 2006, p. 3204–3215. Elsevier. 2006

SCHILLER, S. R; GOLDMAN, C. A; GALAWISH, E. **National Energy Efficiency Evaluation, Measurement and Verification (EM&V) Standard: Scoping Study of Issues and Implementation Requirements**. SEE Action: State & Local Energy Efficiency Action Network, 2011.

SILVA, A. Q.; LIMA.; G. M. VIANA; A. N .C.; DIAS, R. S. C. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para a Aplicação de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento. The 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2011. Mar Del Plata: 2011.

SILVA, B. C. **Desenvolvimento de metodologia de campo para estimativa do potencial de conservação de energia em instalações de bombeamento**. 2000. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.

SOLER, E. M. **Otimização dos Custos de Energia Elétrica na Programação do Armazenamento e Distribuição de Água em Redes Urbanas**. 2008. p. 86. Dissertação de Mestrado em Ciências da Computação. Instituto de Ciências Matemáticas e Computação da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 739 Std: IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities**. Industry Applications Society. New York, 1995. 297 p.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.** ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: São Paulo, 2001

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Electrical Energy Equipment:** Electric Motors. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia. UNEP, 2006.

MARQUES, M.; HADDAD, J. MARTINS, A. R. S. (coordenadores). **Conservação de Energia:** Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. 3ª Edição. p. 596. Itajubá: FUPAI, UNIFEI. 2006.

WU, Z. A Benchmark Study for Minimizing Energy cost of Constant and Variable Speed pump Operation., **World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat,** 2007.

VIANA, A. N. C., **Conservação de Energia:** Eficiência Energética de Instalações e Equipamento., p. 213. Editora da EFEI. Itajubá. 2001.

VIANA, A. N. C., **Seleção e operação de bombas centrífugas,** Itajubá: Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria (FUPAI). 2011.

ANEXO A - ANÁLISE ECONÔMICA

Para realizar a análise econômica do investimento é necessário construir um fluxo de caixa diferencial (Figura 51), ou seja, o benefício será a economia de energia obtida com as melhorias do sistema. Desta forma existem quatro diferentes métodos que serão usados para avaliar a viabilidade e atratividade do investimento nas melhorias.

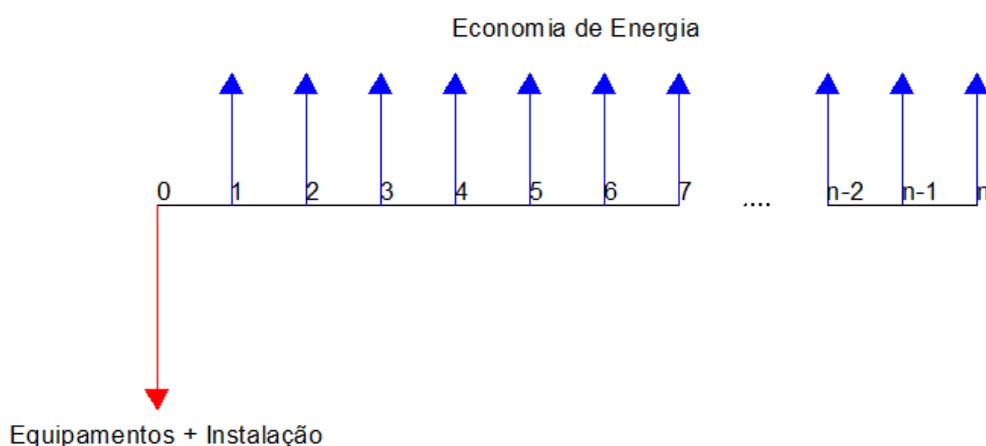


Figura A.1 - Fluxo de caixa diferencial para análise dos investimentos.

Valor presente líquido (VPL)

Este método de análise se caracteriza por transferir para o presente todas as variações de caixa esperadas ao longo da vida útil do investimento, descontando a taxa mínima de atratividade. Se este resultado for positivo a proposta do investimento é viável, sendo mais atrativa quanto maior for o valor.

Valor anual líquido (VAL)

Através deste método todo o fluxo de caixa é transformado em uma série uniforme de pagamentos, indicando o valor do benefício líquido a cada ano. Assim como no VPL o resultado positivo indica a viabilidade do investimento.

Taxa interna de retorno (TIR)

É a taxa de juros para a qual o valor presente das receitas se torna igual aos gastos, ou seja, a TIR é a taxa que torna nulo o VPL, sendo entendida como a taxa de remuneração do capital. A TIR é comparada com a TMA da empresa. Se for maior o investimento se mostra atrativo, mas se for menor entende-se que existem outros investimentos mais vantajosos.

Tempo de retorno (TR)

Indica o tempo necessário para que a somatória dos benefícios sejam iguais à somatória dos custos, considerando uma determinada taxa de juros. Este parâmetro é importante, pois ele indica a rapidez com que o investimento irá gerar lucros, diminuindo os riscos do investimento e permitindo que o lucro seja usado em projetos de maior interesse.

ANEXO B – RENDIMENTOS NOMINAIS MÍNIMOS

Tabela 0.1 - Rendimentos nominais mínimos

Potência nominal		Pólos			
cv	kW	2	4	6	8
1,0	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	
200	150	95,0	95,0	95,0	
250	185	95,4	95,0		

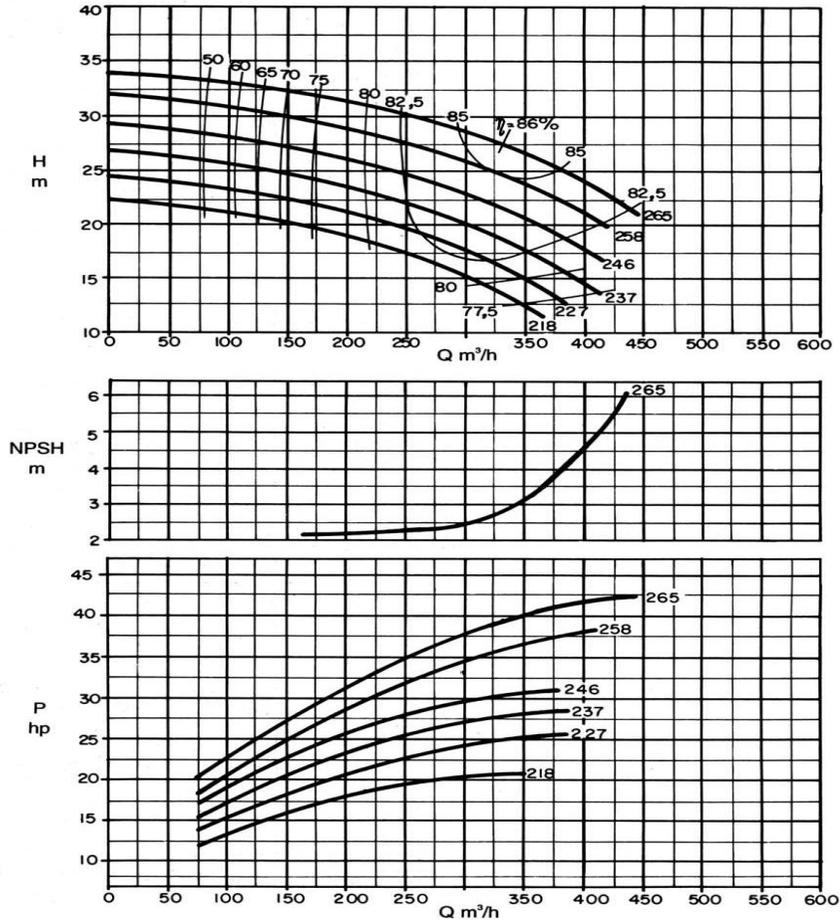
Fonte: Portaria Interministerial nº 553, de 8 de dezembro de 2005

ANEXO C – DADOS DOS NOVOS MOTORES SELECIONADOS

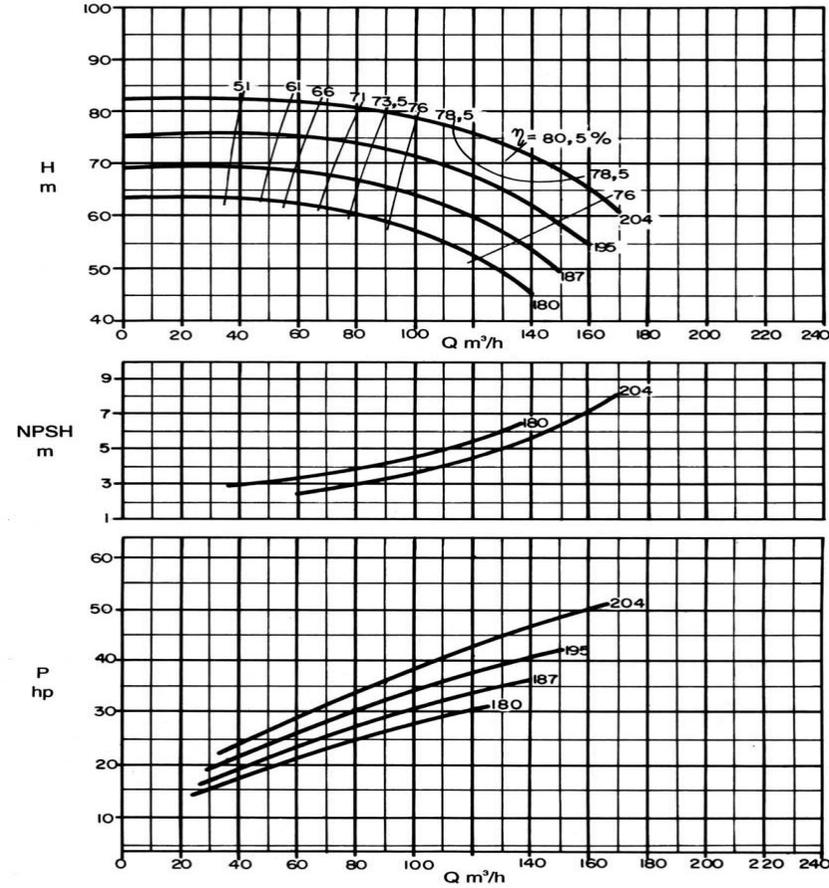
Local	Marca	Modelo*	Potência [CV]	Tensão [V]	Rotação [rpm]	η [%]	Preço [R\$]
ETA (G1, G2 e G3)	WEG	~3 280 S/M	150	220	1785	95	14596,37
Captação (G1, G2 e G3)	WEG	~3 200 M	40	220	1770	92,4	4362,90
Solar dos Lagos (G1)	WEG	~3 200 M	40	220	3560	92,4	4562,90
Jardim das Acácias (G1)	WEG	~3 160 M	20	220	3600	91,5	2654,72
São Francisco (G1 e G2*)	WEG	200 L	50	220	1770	93	4836,99
Carioca (G1 e G2)	WEG	200 L	50	220	3560	93	4976,99

* Todos os motores são motores de alto rendimento do tipo W22 Plus

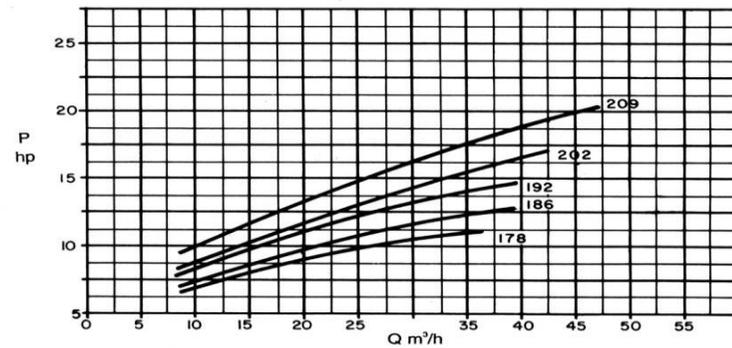
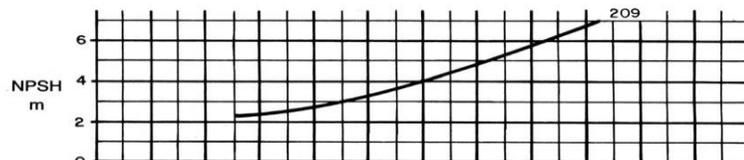
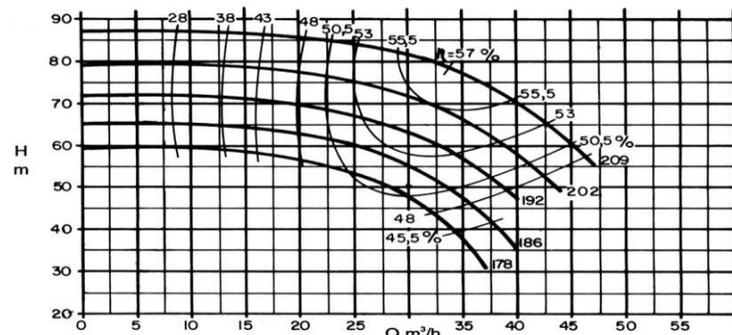
ANEXO D - CURVAS DE RENDIMENTOS DAS BOMBAS



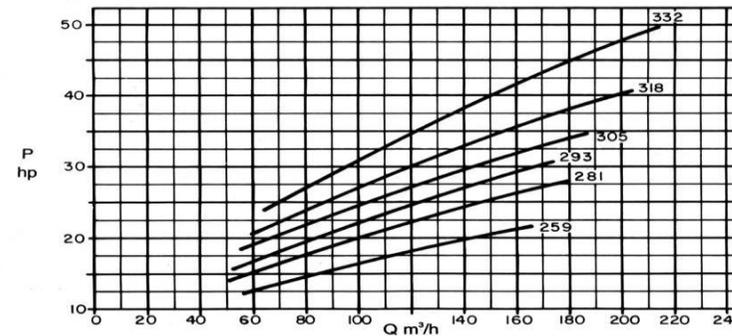
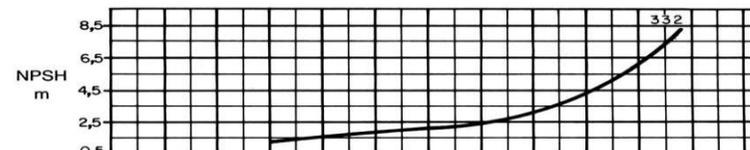
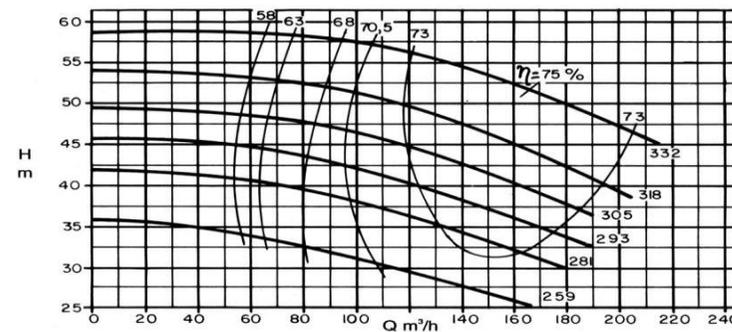
Curvas da bomba Meganorm 125-250.



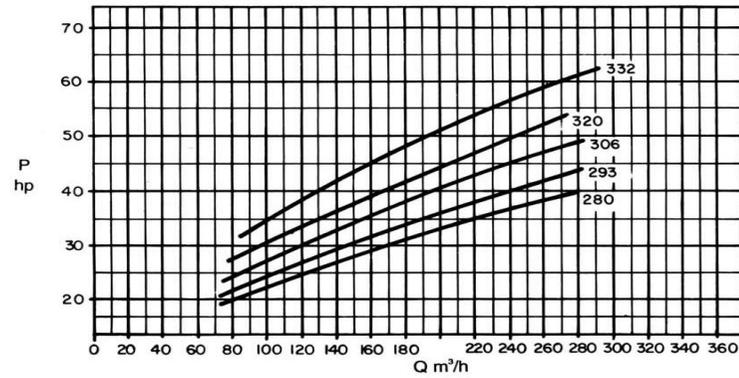
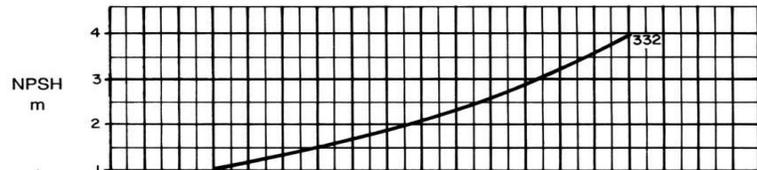
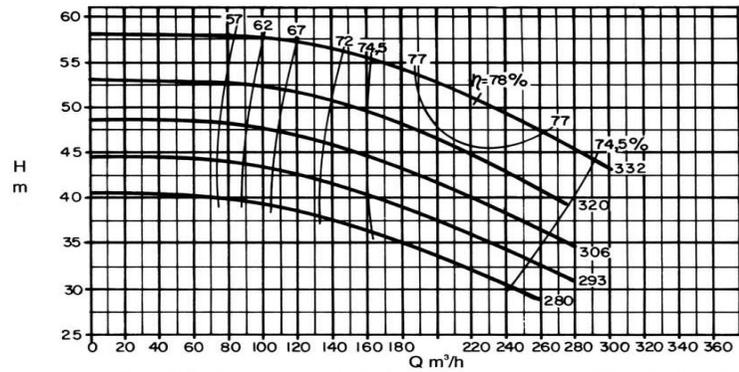
Curvas da bomba Meganorm 65-200



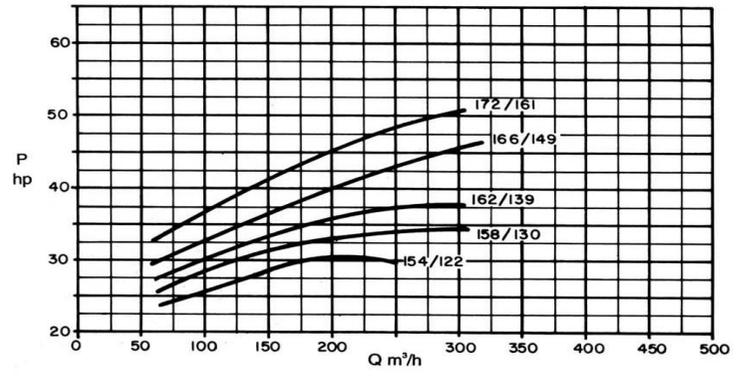
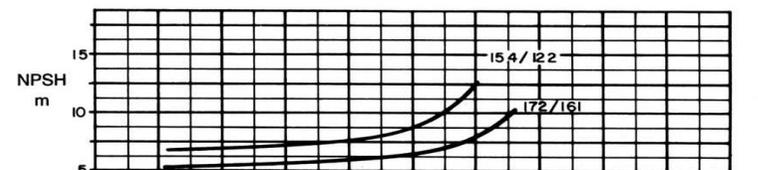
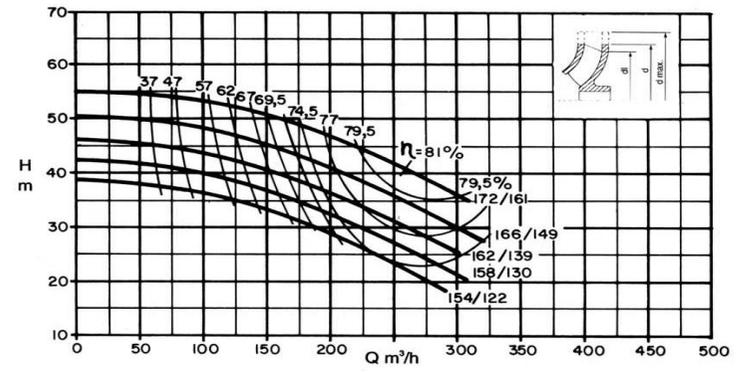
Curvas da bomba Meganorm 32-200



Curvas da bomba Meganorm 80-315



Curvas da bomba Meganorm 100-315



Curvas da bomba Meganorm 80-160

ANEXO E – ARTIGOS PUBLICADOS

A seguir, artigos publicados durante a elaboração desta dissertação.

Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para a Aplicação de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento

A. Q. Silva Filho, G. M. Lima, A. N. C. Viana, R. S. C. Dias Júnior

Resumo--A crescente necessidade da maximização do potencial dos recursos hídricos e energéticos tem intensificado a busca pela utilização racional destes recursos. No Brasil, o setor de abastecimento de água corresponde a 2,6% do total de energia consumida no país, nos quais os sistemas de bombeamento são responsáveis por entre 90% a 95% do consumo total de energia nestes sistemas. É comum encontrar instalações superdimensionadas, com conjuntos motobombas operando fora de seu ponto ideal, onde é uma prática comum realizar o controle de vazão através de válvulas. Este controle por válvulas é uma ação nociva, principalmente com relação ao consumo de energia, pois além de ter seu rendimento comprometido, sua utilização insere perdas de carga desnecessárias ao sistema hidráulico. Para contornar este problema a utilização de inversores de frequência mostra-se adequada, pois é de conhecimento que, quando utilizado em situações onde o bombeamento é realizado diretamente à rede, os inversores de frequência permitem obter um controle sobre a pressão de saída e assim obter um benefício duplo: redução do consumo de energia e redução das perdas por vazamentos, com uma conseqüente elevação do rendimento da operação. Porém, atualmente, os inversores de frequência têm sido utilizados indiscriminadamente, sem o estudo adequado e em situações onde existem alternativas mais viáveis. Este trabalho apresenta uma avaliação sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de inversores de frequência em estações de bombeamento de água. Foram realizados estudos de casos em três Sistemas de Abastecimento de Água e Esgoto (SAAE) que exemplificam três situações comuns encontradas em sistemas de bombeamento.

Palavras-chave--conjunto motobomba, eficiência energética, inversores de frequência, sistemas de abastecimento de água.

1 INTRODUÇÃO

A escassez de energia e a necessidade de se utilizarem fontes limpas e renováveis fez com que aumentassem os estudos para se otimizar grandes sistemas consumidores de energia, reduzindo assim seus gastos com energia e conseqüentemente seus impactos ambientais. Além disso, alguns países europeus e os Estados Unidos já têm oferecido incentivos na forma de redução de impostos e subsídios às indústrias que aderirem aos programas de eficiência energética. No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) realiza iniciativas de eficiência energética. Em 22 anos, o programa ajudou a economizar 28,5 milhões de MWh, o que equivale a uma usina com potência instalada de 6.841 MW, que custaria 19,9 bilhões de reais (Eletrobrás, 2009).

Um dos sistemas que se mostra propício a estudos de eficiência energética são os sistemas de bombeamento para abastecimento de água. De acordo com a Gomes (2009), cerca de 3% da energia consumida no Brasil é utilizada no setor de saneamento, sendo que os sistemas de bombeamento representam 90% deste consumo. Segundo a Europump e o Hydraulic Institute (2004), cerca de 75% destes sistemas estão

Este trabalho foi feito em parceria com a Eletrobrás/Procel/Cepel.

A. Q. Silva Filho, artinoquintino@hotmail.com¹.

G. M. Lima, limameirelles@gmail.com¹

A. N. C. Viana, augustonelsonviana@yahoo.com.br¹.

R. S. C. Dias Júnior, rswerts@excen.com.br¹.

¹Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil

superdimensionados em relação a demanda real, prática comum justificada pela necessidade de uma margem de segurança e, segundo Saidur (2010), pelo fato destas instalações serem especificadas para operar em condições de máxima carga onde, na maioria das vezes, operam sob carga máxima somente por curtos períodos de tempo, resultando em uma operação ineficiente pela maior parte do tempo, pois segundo Sahoo (2009), bombas sobredimensionadas operam longe do seu ponto de melhor rendimento (BEP). Desta forma, torna-se necessário controlar a vazão bombeada, com a finalidade de diminuí-la.

Para atender a solicitação de redução da vazão em uma instalação de bombeamento, com a bomba operando sob rotação constante, as formas mais comuns são: ligar a bomba somente em parte do tempo; utilização de uma válvula de controle na saída da mesma (estrangulamento da válvula), para alterar o ponto de funcionamento com o aumento da perda de carga; utilização de by-pass na saída da bomba com recirculação de parte da água para o reservatório de sucção; utilizar uma configuração com duas ou mais bombas em paralelo; e utilizar um inversor de frequência.

O estrangulamento da válvula é uma das alternativas mais comuns, onde o controle de vazão é realizado com a inserção ou a retirada de perdas de carga no circuito hidráulico. Porém, das alternativas acima, a utilização do inversor de frequência é a melhor, pois, permite que seja feito o controle da rotação do conjunto motobomba. Segundo Viana (2011), bombas centrífugas são regidas pelas Leis de Afinidade, que estabelecem relações linear, quadrática e cúbica com – respectivamente – vazão, pressão e potência, de forma que se pode reduzir a vazão e pressão da bomba e, conseqüentemente, a potência demandada, diferentemente de outras técnicas adotadas, como o uso de válvulas e *by-pass*, que inserem perda de carga e recirculam a água bombeada, respectivamente, gerando um desperdício de energia.

Rodrigues (2007), Wu (2007), Braghiolli (2005) e Ilinski (2000) enumeram uma lista de vantagens obtidas com a utilização do inversor de frequência em sistemas de bombeamento, onde as principais são:

- Economia de energia: economias de energia de 30% a 50% são obtidas na maioria das instalações que utilizam os inversores;
- Redução da corrente de partida;
- Melhoria no controle do processo: ajuste de vazão e pressão para as condições de operação necessárias ao processo, onde pequenas variações podem ser corrigidas mais rapidamente pelo inversor de frequência do que por outra forma de controle, o que traz uma melhoria na performance do processo, porque permite a ela operar não muito longe de seu ponto de melhor rendimento;
- Redução do índice de vazamentos;
- Redução de problemas de cavitação no sistema de bombeamento associados à operação de válvulas de controle a baixo fluxo;
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico. Como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios, aumentando a vida útil e reduzindo os gastos com manutenção.

Porém, Pemberton (2005) ressalta que o investimento inicial é relativamente alto, e, portanto, se seu uso não for feito da maneira adequada pode não haver retorno. Segundo Rodrigues (2007), cada sistema deve ser analisado individualmente para avaliar a viabilidade técnica e econômica do investimento. Gomes (2009) diz que, a pressurização direta das redes de distribuição de água por meio de boosters é uma prática bastante comum e pode indicar o uso de inversores de frequência, pois a demanda de água varia ao longo do dia (fornecendo condições de vazão e pressão

variáveis).

Neste trabalho serão apresentados os estudos de caso dos sistemas de bombeamento dos SAAEs (Sistemas de Abastecimento de água e Esgoto) das cidades de Passos, Cruzeiro e Cacoal, mostrando que, devido às particularidades de cada sistema de bombeamento, o uso de inversores de frequência pode ou não ser viável técnica e economicamente.

2 METODOLOGIA

2.1 SAAE Passos

A captação de água bruta é feita no ribeirão Bocaina através de quatro conjuntos motobombas de 300 cv (Fig. 1), que operam em revezamento, com no máximo três deles em paralelo. A água bruta chega até a ETA, onde é tratada e então armazenada em um reservatório de 2.000 m³, de onde é distribuída para a população por gravidade. A análise do uso de inversores de frequência será feita nas bombas da captação devido ao seu grande consumo de energia.



Fig. 1. Captação de água bruta do SAAE Passos.

2.2 SAAE Cruzeiro

O SAAE Cruzeiro possui três sistemas de captação e tratamento de água em locais diferentes. A captação do sistema em estudo é feita no Córrego Água Limpa através de três conjuntos motobombas de 30 cv. A água bruta segue para a ETA João Madureira de Barros, onde passa por um tratamento convencional, utilizando decantadores e filtros. Os dois filtros são alimentados por três conjuntos motobombas, sendo que os conjuntos 1 e 2, de 7,5 cv, operam em paralelo e o conjunto 3, de 15 cv, opera isoladamente, como mostra a Fig. (2). Em seguida a água segue para um reservatório de 2.100 m³, de onde é distribuída à população por gravidade. O conjunto 3 foi reaproveitado de uma outra ETA e por isto suas condições nominais não são compatíveis à situação atual, o que faz com que ela opere com regulagem na válvula de sucção. Por haver este controle de vazão, será avaliada a viabilidade do uso do inversor de frequência no conjunto 3.



Fig. 2. Conjuntos motobomba da ETA do SAAE Cruzeiro.

2.3 SAAE Cacoal

A captação de água bruta é feita no rio Machado através de 6 conjuntos motobomba, sendo que dois destes conjuntos estão instalados em uma balsa, enquanto os outros quatro, que são de eixo vertical, estão instalados em uma casa de bombas. O uso da balsa e das bombas de eixo vertical é necessário devido à grande variação de nível do Rio Machado.

Depois de tratada a água é aduzida, por gravidade, para dois reservatórios principais. O reservatório 1 possui capacidade de armazenamento de 2.000 m³ e o reservatório 2 possui capacidade de 500 m³. Destes dois reservatórios a água é bombeada diretamente na rede para abastecer a população. Existem três setores de abastecimento: o da Rodoviária e do Centro, que utilizam a água do reservatório 1 e possuem conjuntos de 75 cv, e o do Teixeiraão, que utiliza água do reservatório 2 e possui conjuntos de 50 cv. Todas as elevatórias que abastecem estes setores possuem três conjuntos moto-bomba cada. O setor Teixeiraão (Fig. 3) será o local de estudo para avaliar a viabilidade do uso de inversores de frequência.



Fig. 3. Estação elevatória Teixeiraão do SAAE Cacoal.

2.4 Determinação da curva da bomba

Analisando a Fig. (4), observa-se que o estrangulamento da válvula provoca uma alteração na curva do sistema e, mantendo constante a rotação do motor, o ponto de operação do conjunto desloca-se sobre a curva da bomba, que permanece inalterada. Assim, com a medição de valores de pressão e vazão em diversas posições de abertura

da válvula, adquire-se um conjunto de pontos que representam a curva da bomba, em uma dada rotação.

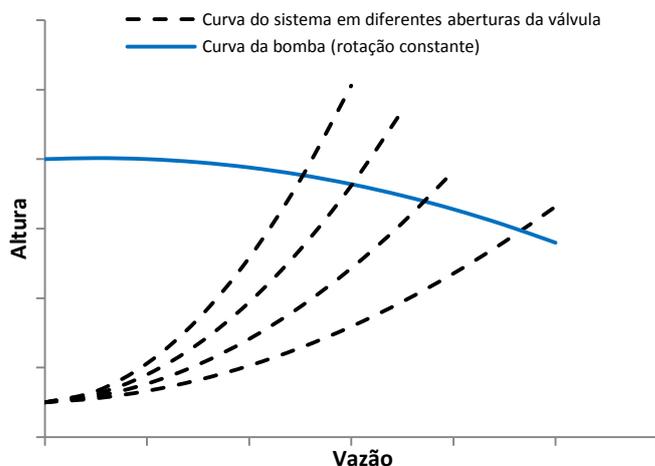


Fig. 4. Obtenção da curva da bomba.

O chamado ensaio de recepção, que serve para verificar as condições reais de funcionamento da bomba, é obtido pelo procedimento de ensaio que gera a curva da Fig. (4), quando realizado para rotação nominal da bomba. Este ensaio normalmente é inviável de ser realizado em campo, pois muitas vezes não é possível variar a vazão devido à demanda de água que deve ser atendida.

2.5 Determinação da curva do sistema

A análise da Fig. (5) mostra que uma alteração na curva da bomba através da regulagem de sua rotação, mantendo a mesma abertura de válvula, provoca um deslocamento do ponto de operação do conjunto sobre a curva do sistema, que por sua vez permanece inalterada. Assim, a curva do sistema para uma dada condição de linha de tubulações é obtida medindo os valores de pressão e vazão para diversas rotações da bomba.

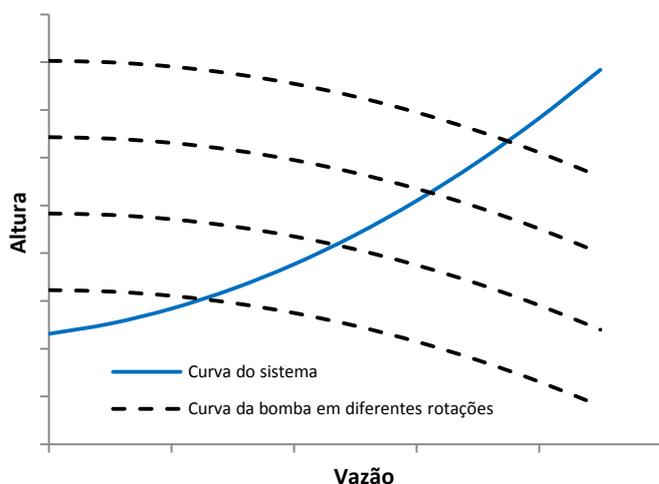


Fig. 5. Obtenção da curva do sistema.

Contudo a bomba a ser ensaiada é acionada por um motor elétrico de rotação constante o que impossibilita o levantamento da curva do sistema. No entanto, mesmo o

motor sendo de rotação única, pode-se afirmar que num dado intervalo de tempo, tanto o motor quanto a bomba irão trabalhar com rotação variável. O referido intervalo corresponde ao instante de tempo em que o motor é desligado, e sua rotação decresce desde a nominal até a rotação igual a zero.

Através de um sistema informatizado, com alguns transdutores e programas computacionais, é possível acompanhar o decréscimo da rotação do conjunto motor-bomba, lendo e armazenando os valores de pressão e vazão para as diferentes rotações, desde o desligamento do motor até sua parada completa, porém, assim como no ensaio para obtenção da curva da bomba, este procedimento é de difícil realização em campo, pois é necessária a instalação de diversos sensores, sendo mais indicada para testes em laboratório.

2.6 Interpolação por três pontos

Em casos onde há a impossibilidade de realização dos testes para levantamento das curvas, seja por dificuldades na implementação do sistema de aquisição de dados ou restrições impostas pelo processo onde a bomba está instalada, Silva (2001) propõe a estimativa das curvas características com base no conhecimento de três pontos distintos.

A Fig. (6) apresenta a curva de uma bomba instalada em um sistema com ponto nominal de operação representado por N , fornecendo uma vazão Q_N e pressão H_N . A condição de operação com a válvula toda fechada e máxima pressão é p , com vazão zero e pressão H_p , chamado de ponto de *shutoff* da bomba. As diferenças geométricas de cotas entre os reservatórios de sucção e descarga são representadas pela altura estática H_0 .

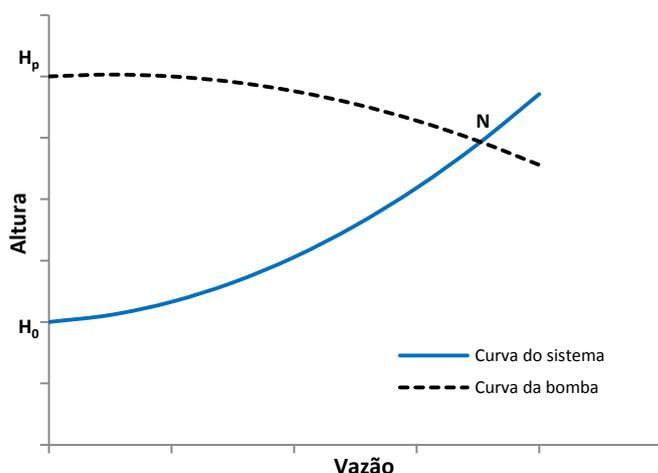


Fig. 6. Estimativa das curvas características por três pontos.

Tanto a curva da bomba quanto a do sistema são expressas por um polinômio do segundo grau, isto é, admite-se que a altura de carga total fornecida pela bomba e as pressões impostas pelas linhas de tubulações são expressas por equações com a forma:

$$H = a + b \cdot Q^2 \quad (1)$$

Da curva do sistema, observa-se que para a condição de vazão igual a zero, (1) resulta em:

$$H_0 = a \quad (2)$$

e para a condição nominal:

$$b = \frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \quad (3)$$

Para a curva do sistema a expressão simplificada pode ser definida como:

$$H_s = H_0 + \left[\frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (4)$$

Da mesma maneira, deduz-se que a curva da bomba de forma simplificada é expressa por (5).

$$H_B = H_p + \left[\frac{(H_N - H_p)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (5)$$

Assim, se forem conhecidas as ordenadas dos pontos de *shutoff* da bomba, a altura estática da instalação e um ponto de operação do sistema, que pode ser a condição nominal de trabalho, através de (4) e (5) é possível estimar as curvas características da bomba e da instalação.

2.7 Ensaios de Campo

Para avaliar a viabilidade técnica do uso de inversores de frequência é necessário, além de determinar o desnível geométrico, o ponto de *shutoff* e o ponto nominal de operação da bomba, conhecer as variações de consumo do local, ou seja, é necessário conhecer a curva de demanda do dia de maior consumo. Para tanto, foram feitos ensaios dos conjuntos motobomba para sua condição nominal e de *shutoff*, levantamentos topográficos, e também o monitoramento do consumo, como mostra a Fig. (7).



Fig. 7. Ensaios dos conjuntos motobombas e monitoramento de vazão para obtenção da curva de demanda.

Em alguns casos, onde não foi possível realizar a medição diretamente na adutora de distribuição, seja por falta de trecho reto ou pela tubulação estar enterrada, foram feitas medidas na vazão que chega ao reservatório de distribuição e o nível d'água do mesmo. Desta forma a curva de demanda é obtida por (6).

$$Q_s = \frac{\Delta NA \cdot A_r - Q_e \cdot \Delta t}{\Delta t} \quad (6)$$

onde:

ΔNA [m] – variação do nível do reservatório (positiva se há aumento e negativa se há redução);

A_{res} [m²] – área do reservatório;

Q_e [m³/s] – vazão de entrada;

Q_s [m³/s] – vazão de saída;

Δt [s] – intervalo de tempo entre as medidas;

2.8 Economia de energia

Para avaliar a economia de energia com a utilização do inversor de frequência, primeiramente calcula-se a altura necessária utilizando a curva do sistema. Em seguida, calcula-se a rotação de trabalho por (7) (Porto, 2006).

$$H_2 = H_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (7)$$

onde:

n_1 [rpm] e H_1 [m] – rotação e altura no ponto de rotação nominal;

n_2 [rpm] e H_2 [m] – rotação e altura no ponto da nova rotação;

Assim é possível estimar o rendimento da bomba por (8) (Macintyre, 1987). No caso dos motores considera-se que sua operação ocorre na faixa de 75 a 100 % de carregamento, onde seu rendimento permanece praticamente constante.

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} \quad (8)$$

onde:

n_1 [rpm] e η_1 [m] – rotação e rendimento no ponto de rotação nominal;

n_2 [rpm] e η_2 [m] – rotação e rendimento no ponto da nova rotação;

Portanto, a redução no consumo de energia pode ser calculada por (9). Para realizar a análise o dia de maior consumo foi dividido em faixas de operação, com vazão e altura, para cada situação (com ou sem o uso de inversores), conhecidas, com duração de uma hora.

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q}{\eta_m} \cdot \left(\frac{H_B}{\eta_{B1}} - \frac{H_S}{\eta_{B2}}\right) \cdot t \quad (9)$$

onde:

E [kWh] – energia economizada;

ρ [kg/m³] – massa específica da água;

g [m/s²] – aceleração da gravidade;

Q [m³/s] – vazão requerida pelo sistema;

H_B [m] – altura sem o uso do inversor (obtida pela curva da bomba);

- H_s [m] – altura com o uso do inversor (obtida pela curva do sistema);
- η_m [1] – rendimento do motor;
- η_{b1} [1] – rendimento da bomba sem o uso do inversor;
- η_{b2} [1] – rendimento da bomba com o uso do inversor;
- t [h] – tempo de operação;

3 RESULTADOS

3.1 SAAE Passos

A curva do sistema e da associação das bombas em paralelo é apresentada na Fig. (8), e a curva de demanda na Fig. (9). A primeira observação feita foi que a perda de carga para o sistema está elevada, o que indica incrustação nas paredes da adutora. Mesmo assim, percebe-se que a maior parcela de altura da curva do sistema refere-se à altura estática, ou seja, há uma pequena contribuição da perda de carga na altura de elevação das bombas. Conseqüentemente, com a utilização de um inversor de frequência, um pequeno decréscimo na rotação do conjunto causaria uma queda acentuada em sua vazão, e, portanto, não seria possível operar o sistema com segurança. Além disso, como estas bombas abastecem um reservatório, a melhor maneira de operar o sistema é através do controle liga/desliga das bombas, deixando que o reservatório atenda às variações de consumo. Isto pode ser observado na Fig. (9), onde no início da madrugada duas bombas estão em operação. Às 2:00 uma destas bombas é desligada e a partir das 8:00 a operação ocorre com as três bombas ligadas.

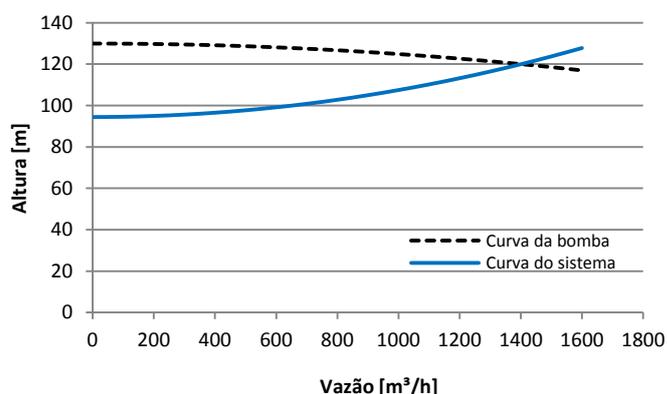


Fig. 8. Curva do sistema e da associação das bombas em paralelo da captação do SAAE Passos.

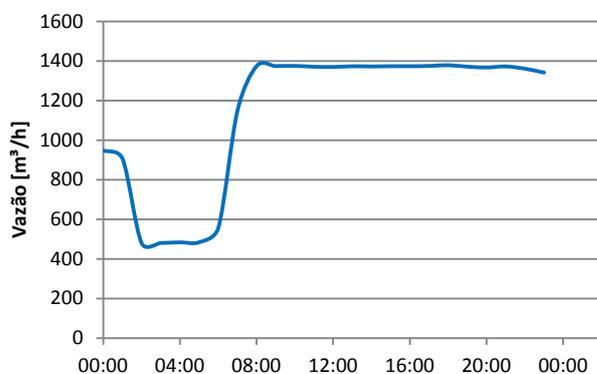


Fig. 9. Curva de demanda da captação do SAAE Passos.

3.2 SAAE Cruzeiro

Neste sistema é feita a regulagem de vazão manualmente em uma das bombas da ETA que abastecem o reservatório de distribuição. A Fig. (10) apresenta a curva do sistema e da bomba, enquanto que a Fig. (11) apresenta a curva de demanda.

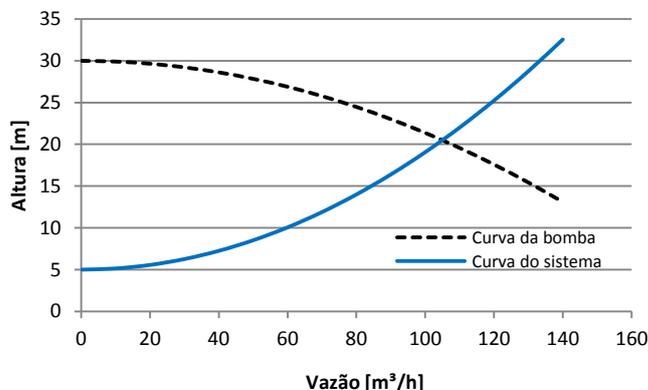


Fig. 10. Curva do sistema e da bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro.

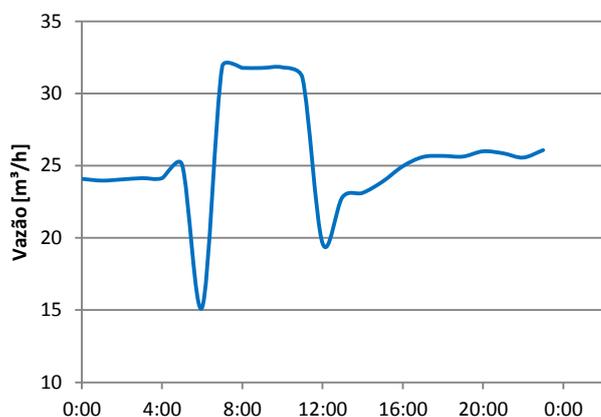


Fig. 11. Curva de demanda para a bomba 3 da ETA do SAAE Cruzeiro.

É possível perceber que a bomba opera com a válvula quase totalmente fechada, pois sua vazão nominal é muito superior vazão de demanda. Além disso, sua altura também é bem superior à requerida pelo sistema. Realizando a análise do uso de inversor de frequência, chega-se à conclusão de que é técnica e economicamente viável a sua utilização, como mostra a Tab. (1).

TABELA I
RESULTADOS DA ANÁLISE DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA BOMBA 3 DA ETA DO SAAE CRUZEIRO

Investimento [R\$]	3.358
Consumo de energia atual [kWh/ano]	67.376
Consumo de energia com inversor [kWh/ano]	43.826
Economia de Energia [kWh/ano]	23.550
Economia [R\$/ano]	3.940
Payback [anos]	0,84

Porém, realizando uma análise mais criteriosa, chega-se à conclusão de que a bomba atual está superdimensionada, e que esta deve ser trocada por uma de menor potência, com seu ponto de operação compatível ao necessário. A Tab. (2) apresenta os resultados obtidos quando se considera o uso de uma bomba adequada ao sistema.

TABELA II
RESULTADOS DA ANÁLISE DO USO DE UMA BOMBA COM PONTO DE OPERAÇÃO ADEQUADO NA ETA DO SAAE CRUZEIRO

Investimento [R\$]	1.500
Consumo de energia atual [kWh/ano]	67.376
Consumo de energia com nova bomba [kWh/ano]	10.865
Economia de Energia [kWh/ano]	56.511
Economia [R\$/ano]	9.455
Payback [anos]	0,17

Neste caso o uso de inversores é justificável, porém a seleção da bomba adequada às condições de operação, sem que seja necessário o uso do inversor, é economicamente mais viável.

3.3 SAAE Cacoal

Neste sistema o bombeamento da distribuição é feito diretamente na rede de distribuição. A Fig. (12) apresenta a curva do sistema e da bomba, enquanto que a Fig. (13) apresenta a curva de demanda.

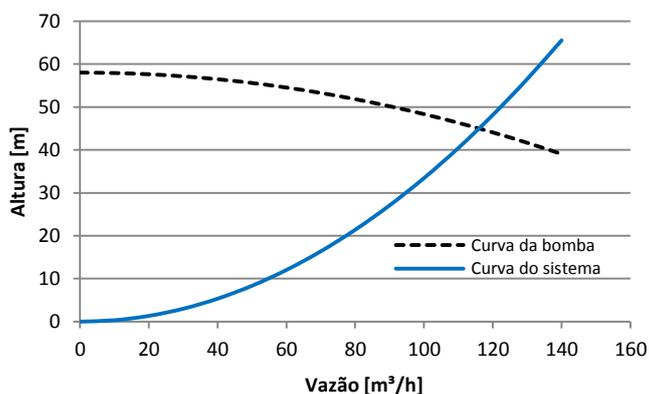


Fig. 12. Curva do sistema e da bomba para o setor Teixeira do SAAE Cacoal.

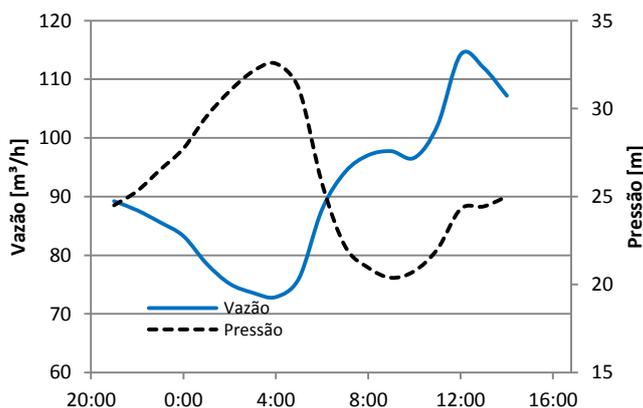


Fig. 13. Curva de demanda para o setor Teixeira do SAAE Cacoal.

Neste caso todas as condições são favoráveis ao uso do inversor de frequência, pois o bombeamento é feito apenas para vencer as perdas de carga, pois não existe a parcela de altura estática. A análise feita comprova esta teoria, como mostra a Tab. (3).

TABELA III
RESULTADOS DA ANÁLISE DO USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA O SETOR TEIXEIRÃO DO SAAE CACOAL

Investimento [R\$]	25.500
Consumo de energia atual [kWh/ano]	179.412
Consumo de energia com inversor [kWh/ano]	122.624
Economia de Energia [kWh/ano]	56.788
Economia [R\$/ano]	16.045
Payback [anos]	1,65

4 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou três diferentes situações de operação de conjuntos motobombas, onde foram avaliadas a viabilidade técnica e econômica do uso de inversores de frequência. No primeiro caso, o do SAAE Passos, não há viabilidade técnica, pois a maior parte da altura de elevação das bombas refere-se à altura estática e a operação mais adequada é realizar o controle liga/desliga, deixando que o reservatório atenda às variações de consumo. No segundo caso, do SAAE Cruzeiro o uso do inversor apresentou viabilidade técnica e econômica, porém seu uso só se justifica devido ao sobredimensionamento do conjunto. Neste caso foi possível observar que a seleção da bomba adequada para o ponto de operação gera maior economia. Por fim, o caso do SAAE Cacoal mostrou a situação onde há maior aplicação do inversor de frequência, apresentando viabilidade técnica e econômica, quando o bombeamento é feito diretamente na rede de distribuição. Portanto, deve ser feito um estudo criterioso antes de fazer a opção pelo uso de inversores de frequência, onde devem ser consideradas outras alternativas que podem se mostrar mais adequadas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobrás/Procel e Cepel pelo apoio técnico e financeiro para a realização dos estudos.

6 REFERÊNCIAS

- Eletrobrás, “Informativo Eletrobrás do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica”, nº 81, 2009.
- H. P. Gomes, “Sistemas de Abastecimento de Água”, 3ª ed., Paraíba, 277 p., 2009.
- Europump and Hydraulic Institute. “Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs”, Elsevier Advanced Technology, Oxford, Inglaterra, 2004.
- R. Saidur, A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. nº 14; p. 877–898; 2010.
- T. Sahoo, Energy cost savings with centrifugal pumps. *World Pumps* 510. p. 35-37, Elsevier. Março, 2009.
- A. N. C. Viana, Seleção e operação de bombas centrífugas, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 2011.
- W. Rodrigues, “Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água”, 234 f, Tese de doutorado em engenharia civil, Faculdade de engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- Z. WU, “A Benchmark Study for Minimizing Energy cost of Constant and Variable Speed pump Operation.”, *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*, 2007.
- M. A. Braghiroli, “Setor Santana: Um Caso de Sucesso na Redução de Perdas de Água e Consumo de Energia Elétrica”, *Revista Saneas*, São Paulo, nº 20, p. 23, 2005.
- N. Ilinski, “Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving”. *Energy Engineering*, nº 5, Vol. 97, pp. 7-20, 2000.
- M. Pemberton, “Variable Speed Pumping: Myths and Legends”, *World Pumps Magazine*, pp. 22-24, 2005.
- B. C. Silva, “Desenvolvimento de metodologia de campo para estimativa do potencial de conservação de energia em instalações de bombeamento”, dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.
- R. M. Porto, *Hidráulica Básica*, 4ª ed., São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 519 p., 2006.
- A. J. Macintyre, *Bombas e Instalações de Bombeamento*, 2ª ed., Rio de Janeiro: Guanabara, 1987, 782 p.

7 BIOGRAFIAS

Artino Quintino da Silva Filho nasceu em Franca/SP, em 07 de setembro de 1982. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei). Suas principais linhas de atuação são: geração de energia; ensaios de rendimento em usinas hidrelétricas; uso racional de água e energia elétrica; medição e verificação em eficiência energética; e análise tarifária. Atua como membro do Grupo de Energia (GEN) na Unifei.

Gustavo Meirelles Lima nasceu em São José dos Campos/SP/Brasil, em 8 de outubro de 1987. Graduiu-se em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde atualmente é mestrando em Engenharia da Energia. É pesquisador do Grupo de Energia (GEN) da UNIFEI, tendo como principais linhas de atuação: recursos hídricos, hidrometria, geração de energia, sistemas hidráulicos, uso racional de água e energia elétrica.

Augusto Nelson Carvalho Viana nasceu em Itajubá/MG/Brasil, em 26 de março de 1954. Graduiu-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde também obteve o título de Mestre em Engenharia da Mecânica. É doutor em Engenharia Civil/Hidráulica pela Escola Politécnica (USP) e pós-doutor em Ciências da Engenharia Ambiental pela USP (São Carlos). É professor associado da Universidade Federal de Itajubá, coordenador do Grupo de Energia (GEN), do Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB) e do Laboratório Móvel de Hidráulica (LM), tendo como principais linhas de atuação: máquinas hidráulicas, centrais hidrelétricas, sistemas hidráulicos, uso racional de água e energia elétrica, eficiência hidroenergética e hidrometria.

Renato Swerts Carneiro Dias Júnior nasceu em Machado/MG, em 10 de novembro de 1982. Graduiu-se em Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde atualmente participa do programa de Mestrado em Engenharia Elétrica. Tem como linhas de pesquisa e áreas de interesse: Eficiência Hidroenergética e Geração de Energia. Atua em projetos de eficiência energética (sistemas de bombeamento, iluminação, refrigeração, aquecimento), ensaios de rendimento em usinas hidrelétricas e microgeração de energia. Participa da equipe do Centro de Excelência em Eficiência Energética (EXCEN) e Grupo de Energia (GEN), na UNIFEI.

OTIMIZAÇÃO DO USO DE RESERVATÓRIOS PARA REDUÇÃO DO BOMBEAMENTO NO HORÁRIO DE PONTA

*Gustavo Meirelles Lima¹; Augusto Nelson Carvalho Viana²; Artino Quintino da Silva Filho³;
Renato Swerts Carneiro Dias Júnior⁴*

Resumo – A concepção de um sistema de abastecimento de água é realizada de forma que a população seja atendida com a quantidade e qualidade necessárias. Porém, com o crescimento da população, esta demanda aumenta, e conseqüentemente existe a necessidade de se produzir mais água, o que pode tornar os componentes do sistema incapazes de atender a demanda. Outro problema que os sistemas de abastecimento enfrentam é o fato de que a demanda máxima de água coincide com o horário de demanda máxima de energia, onde a tarifa é mais cara. Desta forma, sistemas que utilizam o bombeamento têm maiores gastos para atender a demanda. Uma forma de reduzir estes gastos é utilizar reservatórios para que estes atendam ao pico de consumo diário. Assim, este trabalho irá apresentar os estudos de caso no SAAE de São Lourenço – MG e SAAE de Cruzeiro – SP onde foi avaliada a possibilidade de reduzir o bombeamento no horário de ponta, otimizando o uso do reservatório.

Palavras-Chave – eficiência energética, reservatórios, bombeamento.

Abstract – The design of a water supply system is made for the population to be served with the quantity and quality required. But with population growth, this demand increases, and therefore there is a need to produce more water, which can make the system components unable to meet demand. Another problem is the fact that the maximum demand for water coincides with the time of maximum demand of energy, where the fare is more expensive. Thus, the systems that has pump stations spend more with energy to meet demand. A way to reduce these expenses is to use reservoirs to meet peak daily consumption. This work will present case studies on SAAE São Lourenço - MG and SAAE Cruzeiro - SP, where was evaluated the possibility of reducing the pumping at peak hours, optimizing the use of the reservoir.

Keywords – energy efficiency, reservoirs, pumping.

¹ Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN, Grupo de Energia – GEN, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil, fone (35)3629-1301, limameirelles@gmail.com.

² Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN, Grupo de Energia – GEN, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil, fone (35)3629-1382, augustonelsonviana@yahoo.com.br.

³ Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN, Grupo de Energia – GEN, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil, fone (35)3629-1301, artinoquintino@hotmail.com.

⁴ Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN, Grupo de Energia – GEN, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG, Brasil, fone (35)3629-1301, rswerts@excen.com.br

1. INTRODUÇÃO

A escassez de energia e a necessidade da utilização de fontes limpas e renováveis fez com que aumentassem os estudos de otimização de grandes sistemas consumidores de energia, reduzindo assim seus gastos com energia e conseqüentemente seus impactos ambientais. Os sistemas de abastecimento de água têm cada vez mais se preocupado em otimizar suas condições de operação, com o objetivo de reduzir seus custos, principalmente com energia. De acordo com a Eletrobrás (2009), cerca de 2 a 3 % do total de energia consumida no Brasil é utilizada no setor de saneamento, sendo que os sistemas de bombeamento representam de 90 a 95 % deste consumo.

Um dos problemas dos sistemas de bombeamento é que, em muitos casos, devido ao desgaste e à falta de manutenção, os conjuntos motobombas apresentam baixo rendimento. Além disso, segundo a Europump e o Hydraulic Institute (2004), cerca de 75 % dos sistemas estão superdimensionados, prática comum, justificada pela necessidade de ter uma margem de segurança.

Outro problema observado em sistemas de bombeamento que alimentam reservatórios é que normalmente não existe uma rotina de operação preestabelecida, ou seja, os conjuntos operam de acordo com a necessidade. Esta prática faz com que muitas vezes haja a necessidade de operar os conjuntos no horário de ponta, onde a tarifa de energia é mais alta. Diversos estudos como os de Biscos (2003), Wu (2007) e Ostfeld (2008) vêm sendo realizados para otimizar a operação dos sistemas de abastecimento de água. No Brasil, Braghiroli (2005) apresenta o caso do sistema de bombeamento de Santana-SP, onde diversas medidas foram adotadas para melhorar a operação do sistema, dentre elas o desligamento de um dos cinco conjuntos motobombas no horário de ponta.

Neste trabalho serão apresentados os estudos de caso do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de São Lourenço e do SAAE de Cruzeiro, onde foi avaliada a possibilidade de realizar uma mudança nas condições de operação do sistema, permitindo que suas estações elevatórias fossem desligadas no horário de ponta, através da otimização do uso de seus reservatórios.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. SAAE de São Lourenço

O município de São Lourenço, localizado no sul de Minas Gerais, tem uma área territorial de 57 km² e faz parte do famoso Circuito das Águas de Minas. Segundo o IBGE (2010) a cidade tem uma população de 42.688 habitantes. Porém, em épocas festivas, este número chega a dobrar.

O SAAE de São Lourenço é composto de uma captação, uma Estação de Tratamento de Água (ETA), 7 reservatórios e 9 *boosters*, distribuindo água para 20 redes ao longo dos bairros da cidade, totalizando 139,5 km de tubulações que abastecem 18.683 economias.

A captação de água bruta é feita no Rio Verde, através de três conjuntos motobombas

instalados sobre uma balsa. A água captada é aduzida até o sistema de tratamento, com capacidade de tratamento de 240 l/s. Após o tratamento, a água é armazenada no reservatório da ETA, a partir do qual é bombeada através de três conjuntos para o reservatório semienterrado Vila Nova, que possui um volume de 1.200 m³. A partir deste reservatório a água é distribuída, através de quatro estações elevatórias, para outros quatro reservatórios que abastecem os diversos bairros da cidade. Será avaliada apenas a operação do reservatório Vila Nova, Figura 1-a, com os conjuntos motobombas da ETA, apresentados na Figura 1-b. Ambas as unidades, ETA e Vila Nova, são tarifadas pela tarifa Horossazonal Verde.



(a)



(b)

Figura 1 – a) Reservatório Vila Nova; b) Conjuntos motobombas da ETA.

Foram realizados ensaios para verificar os rendimentos dos conjuntos motobombas onde se obteve os seguintes dados: a altura e rendimento médio dos conjuntos motobombas da ETA são, respectivamente, de 74 m e 70 %.

2.2. SAAE de Cruzeiro

O SAAE de Cruzeiro possui três sistemas de captação e tratamento de água em locais diferentes, sendo que em duas delas a captação é feita por gravidade. Portanto o sistema analisado será o do Córrego Água Limpa, onde a captação é feita através de três conjuntos motobombas de 30 cv (Figura 2-a). A água bruta segue para a ETA João Madureira de Barros, onde existem dois filtros que são alimentados por três conjuntos motobombas, dois deles de 7,5 cv, que operam em paralelo, e o terceiro de 15 cv, que opera isoladamente. Em seguida a água segue para um reservatório de 2.100 m³, Figura 3-b, de onde é distribuída à população por gravidade. A análise será feita neste reservatório, considerando apenas os ganhos obtidos na captação (tarifa horossazonal azul), pois a tarifa utilizada na ETA é a tarifa convencional A4, em que não existem vantagens na redução do consumo no horário de ponta.



(a)



(b)

Figura 2 – a) Conjuntos motobombas da captação Córrego água Limpa do SAAE de Cruzeiro; b) Reservatório da ETA.

Foram realizados ensaios para verificar os rendimentos dos conjuntos motobombas onde se obteve os seguintes dados: a altura e rendimento médio dos conjuntos motobombas da ETA são, respectivamente, de 56,7 m e 51 %.

2.3. Método dos Volumes Diferenciais

Os reservatórios possuem limites operacionais máximos e mínimos. O volume compreendido entre estes limites é chamado de volume útil, ou seja, é o volume que realmente poderá ser utilizado para suprir o bombeamento no horário de ponta. Para avaliar se o volume útil do reservatório é capaz de atender a demanda no horário de ponta, é utilizado o método dos volumes diferenciais (Gomes, 2009). Este método pode ser utilizado quando o reservatório é de montante e quando a curva de demanda do dia de maior consumo é conhecida. Quando esta curva não é conhecida, recomenda-se que seja feito o monitoramento do reservatório pelo menos durante uma semana.

No método dos volumes diferenciais é feita a soma das diferenças negativas entre a vazão de entrada e de saída a cada hora, para encontrar assim o volume útil necessário. Este valor deve ser igual a soma das diferenças positivas. Se o valor for menor pode haver vazamentos no reservatório, e se for maior, a demanda está maior do que a produção.

2.4. Ensaios de Campo

Nos dois estudos de caso realizados não foi possível realizar a medição de vazão na saída dos reservatórios, pois em um dos casos a tubulação se encontrava enterrada e no o outro não havia um trecho reto para instalar o medidor de vazão ultrassônico. Optou-se, portanto, por realizar a medida de vazão na entrada do reservatório (Figura 3-b), utilizando um medidor de vazão

ultrassônico, e a medida de nível do reservatório, utilizando um transdutor de pressão no vaso comunicante utilizado para leitura de nível, como mostra a Figura 3-a.

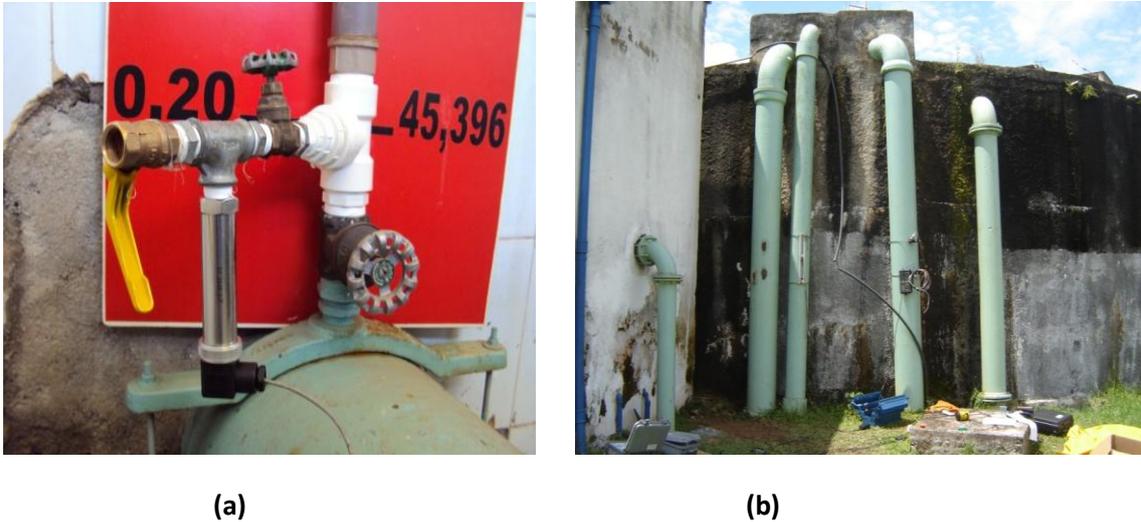


Figura 3 – a) Transdutor de pressão para medida de nível; b) Medidor de vazão ultrassônico na entrada do reservatório.

A determinação dos volumes de entrada e saída pode ser realizada por medição direta ou através do balanço hídrico, Equação 1, onde se pode realizar a medição apenas na entrada e monitorar o nível d'água.. Esta alternativa foi adotada pela dificuldade em realizar a medida de vazão, seja pela tubulação estar enterrada ou pela falta de trecho reto.

$$Q_s = \frac{\Delta NA \cdot A_r - Q_e \cdot \Delta t}{\Delta t} \quad (1)$$

onde:

ΔNA [m] – variação do nível do reservatório (positiva se há aumento e negativa se há redução do nível);

A_{res} [m²] – área do reservatório;

Q_e [m³/s] – vazão de entrada;

Q_s [m³/s] – vazão de saída;

Δt [s] – intervalo de tempo entre as medidas;

3. RESULTADOS

3.1. SAAE de São Lourenço

As medições foram realizadas entre os dias 25/08/2010 e 31/08/2010 (Figura 4-a). A Figura 4-b mostra a curva de demanda da Elevatória Vila Nova para o dia de maior consumo.

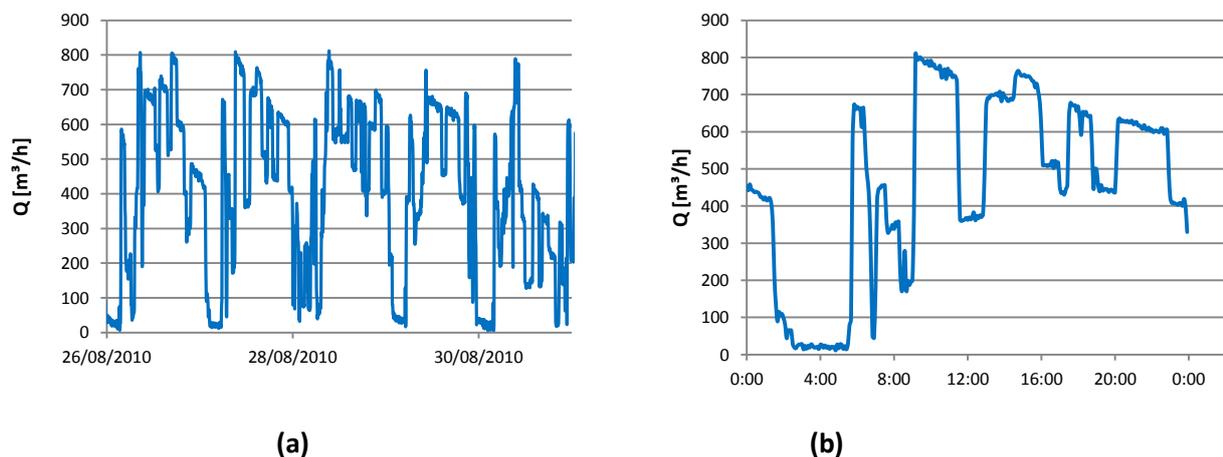


Figura 4 – a) Curva de demanda entre os dias 25/08/2010 e 31/08/2010; b) Curva de demanda do dia de maior consumo.

Considerando esta curva de demanda e que a altura e rendimento médio dos conjuntos motobombas da ETA são de 74 m e 70 %, foram analisadas três situações: a condição de operação atual, o desligamento de uma das bombas da ETA no horário de ponta e a parada completa do bombeamento da ETA no horário de ponta.

3.1.1. Situação atual

A Tabela 1 mostra as condições de operação atual e o volume útil necessário obtido através do método dos volumes diferenciais. O resultado mostra que o reservatório opera perto de sua capacidade máxima, que é de 1.100 m³. É possível perceber pela Figura 5 que a operação ocorre sem nenhuma organização, já que não há uma grande variação do nível d'água, sendo que o máximo ocorre durante a madrugada, e no horário de ponta, durante a maior parte do tempo, as duas bombas operam juntas.

Tabela 1 - Método dos volumes diferenciais para a situação atual.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo ($Q_e - Q_s$)	
	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	400,54	437,49		-36,94

2	387,64	267,05	120,59	
3	140,19	46,57	93,62	
4	0,00	20,72		-20,72
5	0,00	20,80		-20,80
6	139,39	186,07		-46,67
7	324,58	462,92		-138,33
8	344,14	381,30		-37,16
9	441,50	250,54	190,95	
10	600,14	708,77		-108,63
11	605,89	768,46		-162,57
12	606,21	569,97	36,24	
13	605,19	380,34	224,85	
14	604,22	694,40		-90,17
15	598,67	715,86		-117,19
16	600,97	733,27		-132,29
17	601,92	519,18	82,74	
18	598,97	553,40	45,57	
19	440,46	606,21		-165,74
20	610,62	449,00	161,62	
21	608,34	604,36	3,98	
22	605,86	613,54		-7,68
23	603,12	593,53	9,59	
24	601,48	401,19	200,29	
Total	11.070	10.981	1.170	1.085
Q_{média} [m³/h]		457,7	Volume Útil Necessário [m³]	1.085

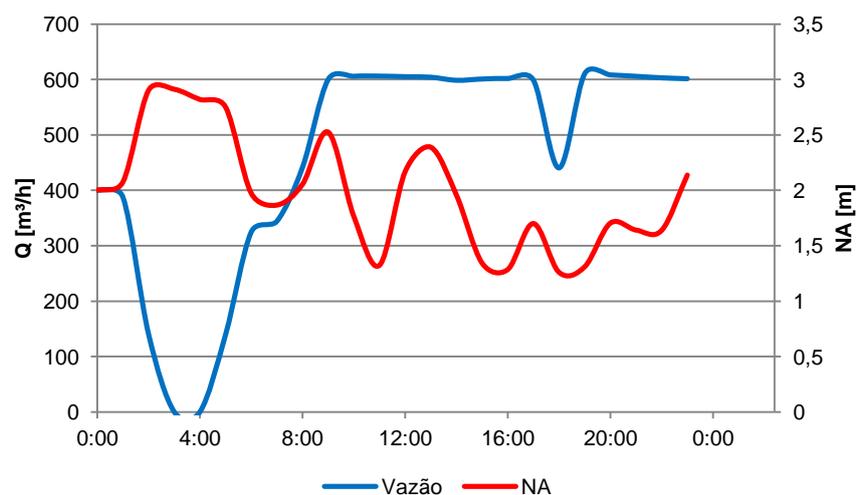


Figura 5 - Variação do nível d'água e vazão de entrada na situação atual.

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Gastos com energia para a situação atual.

Consumo HP [kWh]	478
Demanda HP [kW]	175
Consumo fora HP [kWh]	2.711
Demanda fora HP [kW]	174
Gasto Anual de Energia [R\$]	502.668

3.1.2. Desligamento de uma das bombas no horário de ponta

Para a condição em que apenas uma das bombas esteja operando no horário de ponta há a necessidade de aumentar a capacidade do reservatório para cerca de 1.500 m³, como mostra a Tabela 3. Nesta condição, é possível observar que há uma melhor programação, já que o nível do reservatório se eleva durante a madrugada para poder atender à demanda no horário de ponta (Figura 6).

Tabela 3 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 1 bomba no HP.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q _e -Q _s)	
	Q _e [m ³ /h]	Q _s [m ³ /h]	+	-
1	270	437,49		-167,49
2	270	267,05	2,95	
3	0	46,57		-46,57
4	0	20,72		-20,72
5	0	20,80		-20,80
6	610	186,07	423,93	
7	610	462,92	147,08	
8	610	381,30	228,70	
9	340	250,54	89,46	
10	610	708,77		-98,77
11	610	768,46		-158,46
12	610	569,97	40,03	
13	610	380,34	229,66	
14	610	694,40		-84,40
15	610	715,86		-105,86
16	610	733,27		-123,27
17	610	519,18	90,82	
18	610	553,40	56,60	
19	340	606,21		-266,21
20	340	449,00		-109,00
21	340	604,36		-264,36
22	610	613,54		-3,54
23	610	593,53	16,47	

24	610	401,19	208,81	
Total	11.050	10.985	1.534	1.469
Q_{média} [m³/h]		457,7	Volume Útil Necessário [m³]	1.469

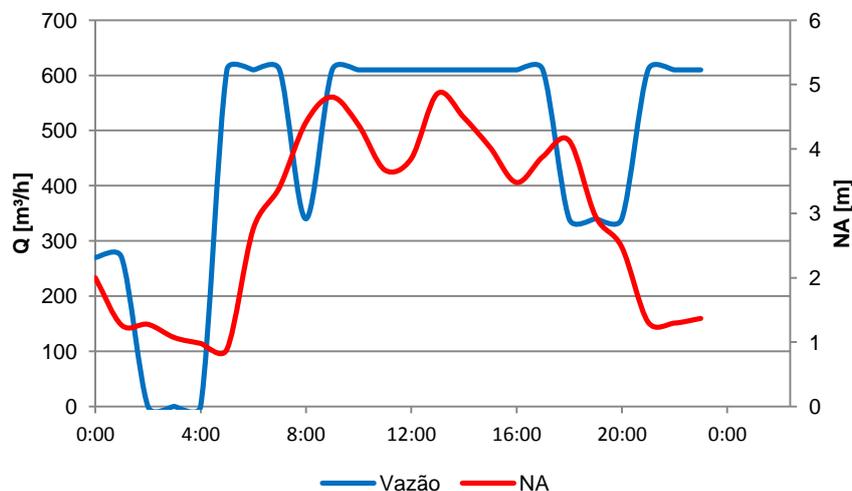


Figura 6 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de uma bomba no HP.

Neste cenário há uma redução de 19,88 % no gasto com energia com relação à operação atual, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 1 bomba no HP.

Consumo HP [kWh]	294
Demanda HP [kW]	98
Consumo fora HP [kWh]	2.889
Demanda fora HP [kW]	176
Gasto Anual de Energia [R\$]	402.719

3.1.3. Desligamento das duas bombas no horário de ponta

Neste cenário não há vazão entrando no reservatório durante o horário de ponta. Para que seja possível atender a demanda durante este período é necessário que o volume do reservatório seja de 2.500 m³ (Tabela 5). Assim como no cenário anterior é possível observar a melhor programação da operação (Figura 7).

Tabela 5 - Método dos volumes diferenciais para a situação de desligamento de 2 bombas no HP.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q_e-Q_s)
-------------	--------------------------	------------------------	--

	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	270	437,49		-167,49
2	270	267,05	2,95	
3	270	46,57	223,43	
4	270	20,72	249,28	
5	270	20,80	249,20	
6	610	186,07	423,93	
7	610	462,92	147,08	
8	610	381,30	228,70	
9	610	250,54	359,46	
10	610	708,77		-98,77
11	610	768,46		-158,46
12	610	569,97	40,03	
13	610	380,34	229,66	
14	610	694,40		-84,40
15	610	715,86		-105,86
16	610	733,27		-123,27
17	610	519,18	90,82	
18	610	553,40	56,60	
19	0	606,21		-606,21
20	0	449,00		-449,00
21	0	604,36		-604,36
22	610	613,54		-3,54
23	610	593,53	16,47	
24	610	401,19	208,81	
Total	11.110	10.985	2.526	2.401
$Q_{\text{m\u00e9dia}}$ [m³/h]		457,7	Volume \u00c3til Necess\u00e1rio [m³]	2.401

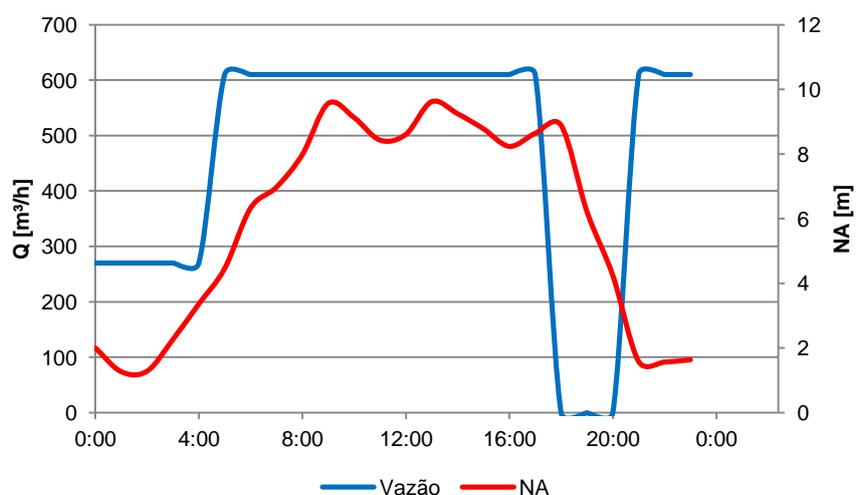


Figura 7 - Variação do nível e vazão de entrada na situação de desligamento de 2 bombas no HP.

Apesar do volume necessário do reservatório ser maior, a redução nos gastos com energia chega a 51,2 %, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Gastos com energia para a situação de desligamento de 2 bombas no HP.

Consumo HP [kWh]	0
Demanda HP [kW]	0
Consumo fora HP [kWh]	3.200
Demanda fora HP [kW]	176
Gasto Anual de Energia [R\$]	245.316

3.2. SAAE de Cruzeiro

As medições foram realizadas entre os dias 15/10/2010 e 22/10/2010 (Figura 8-a), obtendo-se para o dia de maior consumo a curva de demanda da Figura 8-b.

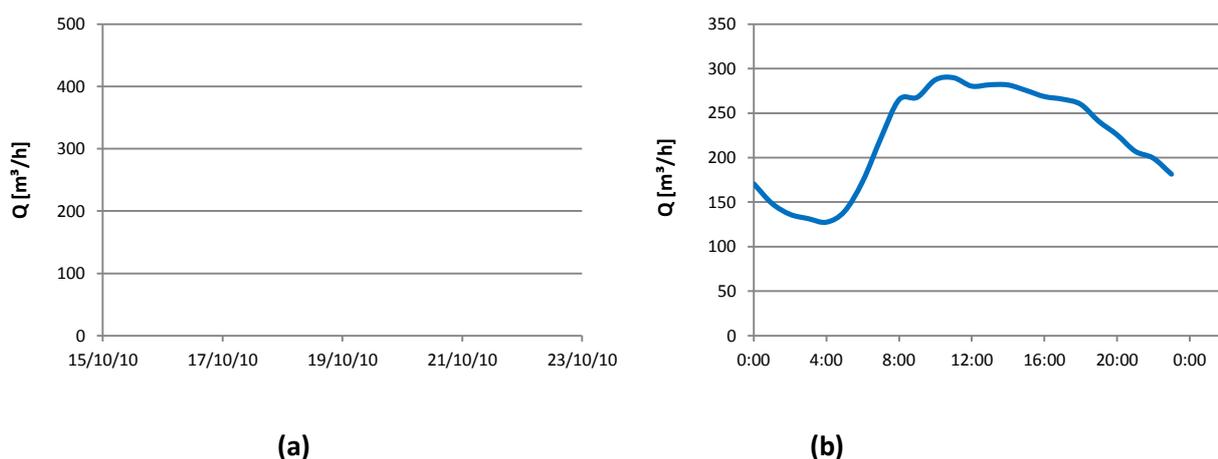


Figura 4 – a) Curva de demanda entre os dias 15/08/2010 e 22/08/2010; b) Curva de demanda do dia de maior consumo.

Considerando esta curva de demanda e que a altura e rendimento médio dos conjuntos sejam de 56,7 m e 51 %, foram analisadas duas situações: a condição de operação atual e o desligamento de todas as bombas da captação e da ETA no horário de ponta.

3.2.1. Situação atual

A Tabela 7 mostra as condições de operação atual e o volume útil necessário obtido através do método dos volumes diferenciais. O resultado mostra que o reservatório, que possui 2.100 m³, opera com folga. Porém, é possível perceber que há um déficit da vazão bombeada, que foi menor que a vazão consumida, ou seja, neste dia utilizou-se água acumulada durante os dias anteriores,

onde a demanda foi menor. Além disso, o bombeamento ocorre praticamente 24 h em sua capacidade máxima (Figura 9). Isto indica que deve haver um aumento na capacidade de bombeamento e tratamento para evitar a falta de água.

Tabela 7 - Resultados da operação atual.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo ($Q_e - Q_s$)	
	Q_e [m ³ /h]	Q_s [m ³ /h]	+	-
1	212,91	170,77	42,14	
2	212,86	148,69	64,17	
3	212,95	136,41	76,54	
4	212,73	131,63	81,10	
5	213,22	127,64	85,58	
6	213,31	139,83	73,48	
7	175,89	173,65	2,24	
8	227,60	222,00	5,59	
9	226,00	265,18		-39,18
10	193,07	267,90		-74,84
11	227,91	287,54		-59,63
12	225,45	289,85		-64,41
13	185,41	280,42		-95,01
14	223,89	281,98		-58,09
15	223,65	281,77		-58,12
16	222,95	275,56		-52,62
17	221,47	268,73		-47,26
18	221,10	265,79		-44,69
19	219,30	260,06		-40,76
20	218,91	240,90		-21,99
21	218,32	225,89		-7,56
22	216,89	207,30	9,59	
23	216,12	199,54	16,58	
24	215,61	181,54	34,07	
Total	5.158	5.331	491,08	-664
$Q_{\text{média}}$ [m³/h]	214,90	222,11	Volume Útil Necessário [m³]	664

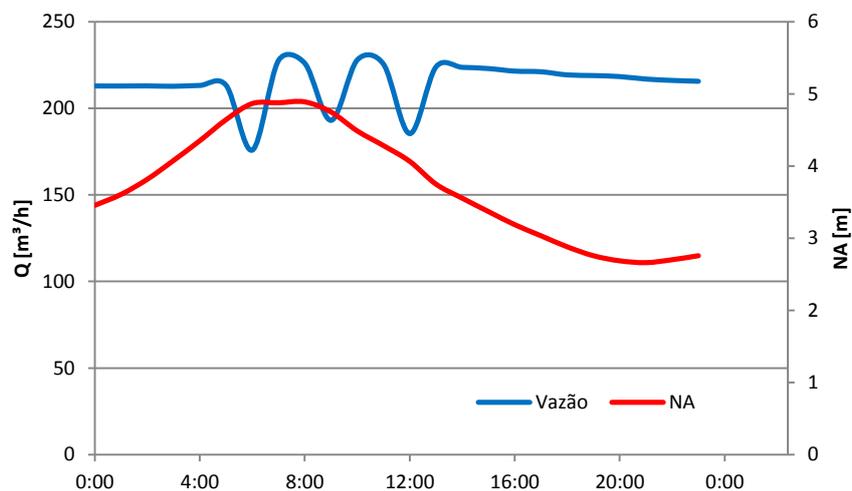


Figura 9 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada na operação atual.

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Gastos com energia na situação atual.

Consumo HP [kWh]	196
Demanda HP [kW]	65,5
Consumo fora HP [kWh]	1.347
Demanda fora HP [kW]	68,19
Gasto Anual de Energia [R\$]	112.525

3.2.2. Desligamento das bombas no horário de ponta

Neste cenário não há vazão chegando ao reservatório durante o horário de ponta. Será analisado o caso em que a vazão média da captação seria 30 % maior que a da curva de demanda, permitindo que haja um aumento do consumo. Para que isto seja possível, a ETA deveria ter capacidade de tratar 300 m³/h (Tabela 9). Além disso, neste caso existe a necessidade de se trocar os conjuntos motobombas da captação para atingir a vazão de 300 m³/h. Porém para a análise foi considerado o rendimento médio atual. Nesta situação o volume necessário do reservatório seria de 938 m³, ou seja, ainda há folga no volume do reservatório. A Figura 10 ilustra como deve ocorrer a operação.

Tabela 9 - Resultados da operação com o desligamento das bombas no HP.

Hora	Volume de Entrada	Volume de Saída	Saldo (Q _e -Q _s)	
	Q _e [m ³ /h]	Q _s [m ³ /h]	+	-
1	300,00	170,77	129,23	

2	300,00	148,69	151,31	
3	300,00	136,41	163,59	
4	150,00	131,63	18,37	
5	150,00	127,64	22,36	
6	150,00	139,83	10,17	
7	150,00	173,65		-23,65
8	150,00	222,00		-72,00
9	150,00	265,18		-115,18
10	300,00	267,90	32,10	
11	300,00	287,54	12,46	
12	300,00	289,85	10,15	
13	300,00	280,42	19,58	
14	300,00	281,98	18,02	
15	300,00	281,77	18,23	
16	300,00	275,56	24,44	
17	300,00	268,73	31,27	
18	300,00	265,79	34,21	
19	0,00	260,06		-260,06
20	0,00	240,90		-240,90
21	0,00	225,89		-225,89
22	300,00	207,30	92,70	
23	300,00	199,54	100,46	
24	300,00	181,54	118,46	
Total	5.400	5.330	1.007	-938
Q_{média} [m³/h]	225	222,11	Volume Útil Necessário [m³]	938

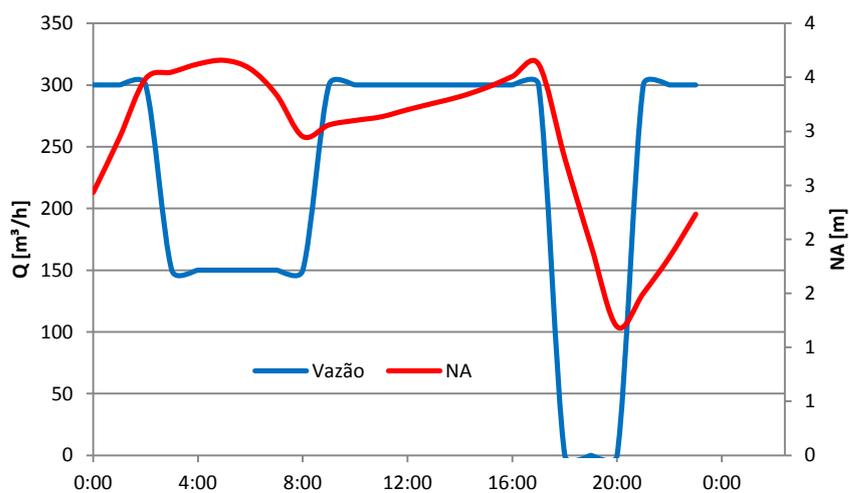


Figura 10 - Variação do nível d'água e da vazão bombeada com o desligamento das bombas no HP.

Os gastos resultantes desta operação estão na Tabela 10. Nota-se que mesmo com um aumento da vazão média em 10,1 m³/h, necessário para atender a atual demanda, ainda há redução de 24,38 % nos gastos com energia, o que representa R\$ 27.443 por ano.

Tabela 10 - Gastos com energia na situação de desligamento das bombas no HP.

Consumo HP [kWh]	0
Demanda HP [kW]	0
Consumo fora HP [kWh]	1.525,9
Demanda fora HP [kW]	89,8
Gasto Anual de Energia [R\$]	85.081

4. CONCLUSÕES

Os estudos realizados mostram a importância do uso de reservatórios para atender o pico de demanda. No primeiro caso, de São Lourenço, observou-se que a economia com os gastos de energia pode chegar a 51 %, porém o volume necessário ao reservatório é quase o dobro do atual. Este volume poderia ser ainda maior, caso as bombas das elevatórias de distribuição também fossem desligadas no horário de ponta. Além disso, poderia haver a necessidade de aumentar a capacidade de tratamento da ETA. Já no caso do SAAE de Cruzeiro a economia é um pouco menor, cerca de 24 %. Neste caso o volume do reservatório é suficiente para que seja feito o desligamento das bombas no horário de ponta, porém a ETA não tem a capacidade de tratamento para que seja feita esta operação, e, portanto, seriam necessários investimentos na expansão da ETA e a troca dos conjuntos motobomba. Investimentos de expansão são de alto custo e de difícil execução, e, portanto, é mais vantajoso prevê-los na etapa de projeto.

5. BIBLIOGRAFIA

BISCOS, C.; MULHOLLAND, M.; LE LANN, M. V.; BUCKLEY, C. A.; BROUCKAERT, C. J. (2003). *“Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP”*, Water SA, Vol. 29, N^o, pp. 393-404.

BRAGHIROLI, M. A.. (2005). *“Setor Santana: Um Caso de Sucesso na Redução de Perdas de Água e Consumo de Energia Elétrica”*. Revista Saneas, São Paulo, n^o 20, p. 23.

ELETROBRÁS. (2009). *Informativo Eletrobrás do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*, n^o 81.

EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE. (2004). *Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs*. Elsevier Advanced Technology, Oxford, Inglaterra.

GOMES, H. P. (2009). *Sistemas de Bombeamento – Eficiência energética*. Editora Universitária UFPB, 1ª Ed. João Pessoa, 2009.

OSTFELD, A.; TUBALTZEV, A. (2008). “*Ant Colony Optimization for Least-Cost Design and Operation of Pumping Water Distribution Systems*”. *Journal of water resources planning and management*, pp. 107-118.

WU, Z. (2007). *A Benchmark Study for Minimizing Energy cost of Constant and Variable Speed pump Operation*. World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat.

8 XI-003 – ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS: ESTUDO DE CASO NO SAAE SÃO LOURENÇO

Gustavo Meirelles Lima¹

Engenheiro Hídrico pela Universidade Federal de Itajubá. Mestrando em Engenharia de Energia na UNIFEI.

Augusto Nelson Carvalho Viana

Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Itajubá. Mestre em Engenharia Mecânica pela UNIFEI. Doutor em Engenharia Civil/Hidráulica pela Escola Politécnica (USP). Pós-doutor em Ciências da Engenharia Ambiental pela USP. Professor associado da UNIFEI.

Artino Quintino da Silva Filho

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá. Mestrando em Engenharia de Energia na UNIFEI.

Renato Swerts Carneiro Dias Júnior

Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Itajubá. Mestrando em Engenharia Elétrica na UNIFEI.

Endereço⁽¹⁾: Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho – Itajubá – MG – CEP: 37500-903 – Brasil – Tel. (35) 3629-1625 – email: gustavo@soesco.com.br

8.1 RESUMO

O uso racional de energia vem sendo cada vez mais incentivado. Em alguns países já existem até subsídios para que indústrias adotem medidas de eficiência energética. Um dos setores com grandes oportunidades de eficientização é o de saneamento, onde grande parte do consumo de energia se refere às estações elevatórias. Para determinar as medidas a serem tomadas para reduzir os gastos com energia é preciso realizar um diagnóstico do sistema, realizando medidas para determinar as condições de operação atuais e, assim, propor medidas viáveis técnica e economicamente. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar avaliar as condições operacionais das principais estações elevatórias do Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município de São Lourenço - MG, avaliando o rendimento dos conjuntos motobombas para uma possível substituição, a perda de carga da adutora de água tratada, com o objetivo de reduzir a altura total de elevação e a operação do sistema elevatória/reservatório para que o bombeamento no horário de ponta possa ser reduzido.

PALAVRAS-CHAVE: Estações Elevatórias, Eficiência Energética, Otimização do Bombeamento,

8.2 INTRODUÇÃO

A escassez de energia e a necessidade de utilizar fontes limpas e renováveis fez com que aumentassem os estudos para otimizar grandes sistemas consumidores de energia, reduzindo assim seus gastos com energia e conseqüentemente seus impactos ambientais. Além disso, alguns países europeus e os EUA já têm oferecido incentivos na forma de redução de impostos e subsídios às indústrias que aderirem aos programas de eficiência energética. No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) realiza

iniciativas de eficiência energética. Em 22 anos, o programa ajudou a economizar 28,5 milhões de MWh, o que equivale a uma usina com potência instalada de 6.841 MW, que custaria 19,9 bilhões de reais (Eletrobrás, 2009). Um dos sistemas que se mostra propício a estudos de eficiência energética são os sistemas de bombeamento para abastecimento de água. De acordo com a Eletrobrás (2009), o equivalente a 2,3 % do total de energia consumida no Brasil é utilizada no setor de saneamento, sendo que os sistemas de bombeamento representam 90 % deste consumo.

Existem algumas maneiras de reduzir os gastos de energia em sistemas de abastecimento de água, atuando de forma direta ou indireta sobre as estações elevatórias. A primeira maneira é reduzir o índice de perdas, que em média representa 40 % da água captada e tratada, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2010). Esta perda de água pode ocorrer devido a vazamentos nas tubulações de abastecimento, extravasamento de reservatórios, ligações clandestinas ou uso não faturado. Reduzindo tais perdas, indiretamente a vazão de água captada e tratada necessária para atender a população irá diminuir, e, conseqüentemente, a potência requerida pelo sistema de bombeamento.

Outra forma indireta de reduzir os gastos com energia é realizar a setorização dos consumidores, definindo zonas de pressão, conforme NBR 12211 (1992). Desta forma, apenas os bairros que estão em locais de maior altitude utilizarão sistemas de bombeamento, enquanto que os mais baixos podem ser atendidos por gravidade ou por um sistema de bombeamento de menor potência. Porém esta é uma alternativa que deve ser considerada na fase de projeto do sistema, já que após a implantação do sistema torna-se complexa a divisão de setores. Uma alternativa que vem sendo utilizada são os conversores de frequência, que permitem o controle da rotação do conjunto motobomba, controlando assim a pressão de acordo com a necessidade do sistema. De acordo com Rodrigues (2007) e Silva Filho (2011) esta alternativa é indicada em *boosters*, que são estações elevatórias colocadas em linha na rede de distribuição, onde há grande variação da vazão e pressão de acordo com a demanda, porém a viabilidade técnica e econômica deve ser avaliada individualmente.

Uma forma direta de aumentar a eficiência das estações elevatórias é avaliar o ponto de operação do conjunto motobomba. Segundo a Europump e o Hydraulic Institute (2004), cerca de 75 % dos sistemas estão superdimensionados em relação a demanda real. Esta era uma prática comum, sendo justificada pela necessidade de uma margem de segurança, mas que acarreta na queda de rendimento do conjunto, já que este irá operar fora do ponto ótimo.

Outras alternativas que podem ser estudadas são o desligamento de bombas no horário de ponta, que necessitam de um reservatório para atender à demanda neste período, e a redução da perda de carga nas tubulações, que pode ser feita através da limpeza ou até mesmo da troca da tubulação.

Neste trabalho, é feito o estudo de caso em estações elevatórias do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de São Lourenço – MG. Serão avaliados os rendimentos dos conjuntos motobombas, a perda de carga da adutora de água tratada e a possibilidade de desligamento dos conjuntos no horário de ponta.

8.2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O município de São Lourenço, localizado no sul de Minas Gerais, tem uma área territorial de 57 km² e faz parte do Circuito das Águas de Minas. Segundo o IBGE (2010) a cidade tem uma população de 42.688 habitantes. Porém, em épocas festivas, este número chega a dobrar. O SAAE São Lourenço é composto de uma captação, uma Estação de Tratamento de Água (ETA), 7 reservatórios e 9 boosters, distribuindo água para 20 redes ao longo dos bairros da cidade, totalizando 139,5 km de tubulações que abastecem 18.683 economias. A figura 1 mostra um esquema simplificado de todo o sistema e o local onde será feito o estudo, que representa a maior parcela do consumo de energia de todo o sistema.

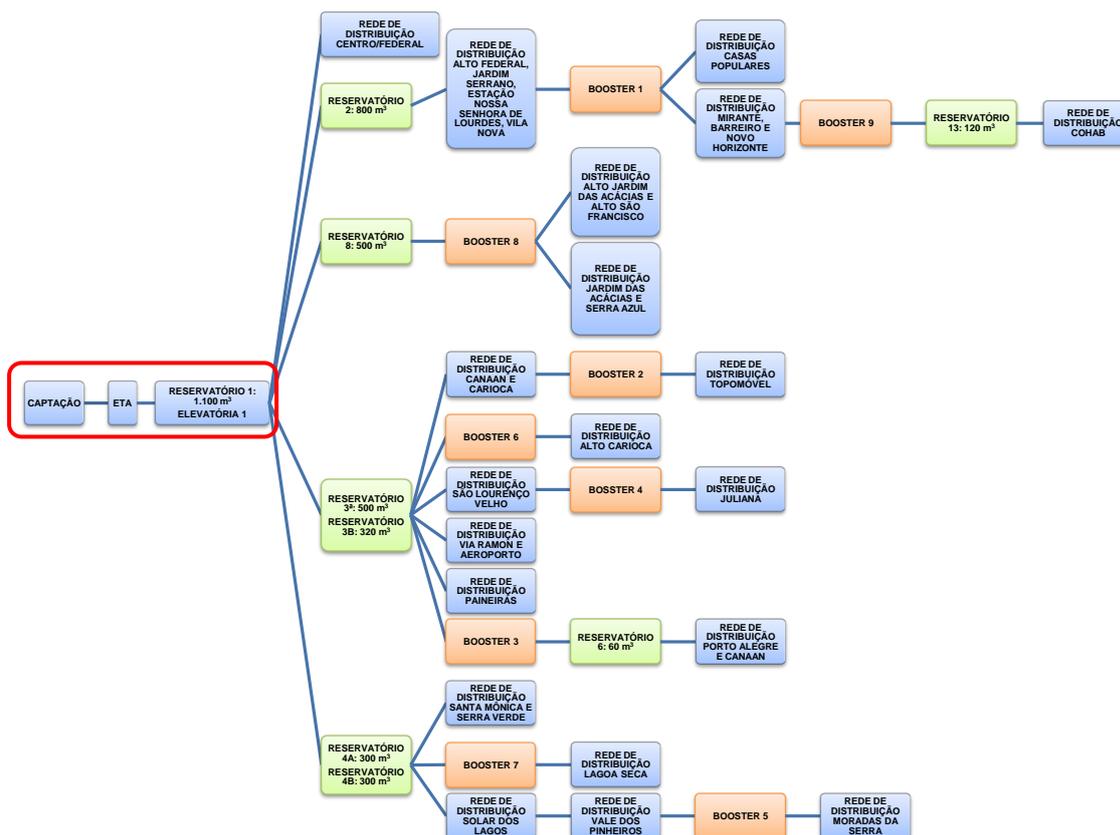


Figura 8.1. Esquema do sistema de abastecimento de água de São Lourenço.

A captação de água para abastecimento de São Lourenço é feita no Rio Verde, através de 3 conjuntos moto-bombas instalados sobre uma balsa (figura 2), o que permite ao sistema adaptar-se às variações de nível.



Figura 8.2. Conjuntos moto bombas da captação.

A água captada é aduzida até o sistema de tratamento convencional (figura 3), composto por floculadores Alabama, três decantadores, seis filtros rápidos por gravidade, dois reservatórios de contato e um reservatório de água para lavagem de filtros. Possui capacidade para tratar 240 l/s. Após o tratamento, a água é armazenada no reservatório da ETA, a partir do qual é bombeada através de 3 conjuntos (figura 3) para o reservatório semi-enterrado Vila Nova, que possui um volume de 1.200 m³.



Figura 8.3. Estação de Tratamento de Água (ETA) e conjuntos motobombas da ETA.

A partir deste reservatório a água é distribuída para os diversos bairros da cidade, parte por gravidade, parte por bombeamento. Além do reservatório existem quatro elevatórias: Jardim das Acácias, Carioca, Solar dos Lagos e São Francisco (figuras 5 e 6).



Figura 8.4. Conjuntos moto bombas do Solar dos Lagos (esquerda) e São Francisco (direita).



Figura 8.5. Conjuntos moto bombas do Jardim das Acácias (esquerda) e Carioca (direita).

8.2.2 ENSAIOS DE CAMPO

Para realizar a análise das estações elevatórias foram feitos o ensaio de rendimento dos conjuntos e também o monitoramento da operação da elevatória da ETA, que abastece o reservatório Vila Nova. Para tanto foram feitas medidas de vazão, pressão, potência elétrica e nível do reservatório, com os equipamentos descritos a seguir.

➤ Vazão

Para realizar a medida de vazão foram utilizados dois medidores ultrassônicos, um da marca Thermo Polysonics e outro da marca GE (Fig.), já que em todos os locais existe uma posição adequada, com trecho reto, para sua instalação. Nos ensaios de rendimento realizados a medição foi feita pontualmente, enquanto que para o monitoramento da operação da elevatória da ETA, os dados de vazão aduzida foram aquisitados com intervalo de 5 minutos através do módulo SCXI da National Instruments. Este tipo de medidor é utilizado na medição de líquidos limpos em tubulações fechadas. A medição de vazão é baseada no tempo de trânsito de pulsos de ultra-som emitidos e recebidos por dois sensores acoplados na parede externa da tubulação. O equipamento deve ser configurado de acordo com o material, espessura e diâmetro da tubulação



Figura 8.6. Medidores de vazão ultrassônicos Thermo Polysonics e GE.

➤ Pressão

Assim como na medida de vazão, durante os ensaios de rendimento a medida de pressão também foi feita pontualmente, utilizando manômetros de Bourdon na sucção e no recalque da bomba. Para realizar esta medida também foram instalados manifolds, que servem para proteção do equipamento e também para a purga de ar.



Figura 8.7. Medidas de pressão na entrada (esquerda) e saída (direita) da bomba.

➤ *Potência Elétrica*

As medidas de potência elétrica foram feitas junto ao quadro de comando e proteção dos conjuntos motobombas, utilizando garras instaladas em paralelo para medição da tensão e alicates amperímetros que envolvem o cabo para medição da corrente elétrica. Assim como para os outros parâmetros, a medição durante o ensaio foi feita pontualmente.



Figura 8.8. Wattímetro instalado no quadro de comando

➤ *Nível d'água*

Para realizar a medida do nível d'água do reservatório Vila Nova foi instalado um transdutor de pressão em um vaso comunicante utilizado para leitura do nível através de régua. Assim, foi possível determinar as oscilações que ocorrem no reservatório. Assim como para a vazão, os dados foram aquisitados com um intervalo de 5 minutos.



Figura 8.9. Medida de nível realizada no reservatório Vila Nova.

➤ *Desnível Geométrico*

O desnível geométrico é necessário para avaliar a perda de carga na adutora de água tratada. Neste estudo foi utilizado o DGPS ProMark 2, onde são utilizados dois receptores GPS: um instalado em local fixo, denominado de base, e outro instalado no local desejado, denominado de móvel. Desta forma é possível realizar a correção diferencial do erro, obtendo precisão centimétrica.



Figura 8.10. DGPS para obtenção do desnível geométrico.

8.2.3 *PROCEDIMENTO DE CÁLCULO*

➤ *Substituição dos Conjuntos Motobombas*

8.2.3.1

8.2.3.2 Para avaliar a viabilidade da troca dos conjuntos motobombas é necessário determinar o rendimento do conjunto, para que possa ser feita a comparação com equipamentos mais eficientes. O procedimento de cálculo descrito a seguir é baseado na norma ISO 9906 (1999). Primeiramente calcula-se a altura total de elevação, através da equação 1.

$$H = \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} - \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + (z_2 - z_1)$$

(1)

onde:

- H [m] - altura total de elevação;
- $p_2/\rho g$ [m] - pressão no manômetro ou transdutor no recalque da bomba;
- $p_1/\rho g$ [m] - pressão na manovacuômetro ou transdutor na sucção da bomba;
- v_2 [m/s] - velocidade média de escoamento no recalque da bomba;
- v_1 [m/s] - velocidade média de escoamento na sucção da bomba;
- z_2 [m] - cota de posição no recalque da bomba;
- z_1 [m] - cota de posição na sucção da bomba.

As velocidades médias na sucção e no recalque da bomba são calculadas em função das áreas das tubulações nas seções correspondentes:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

(2)

onde:

- v [m/s] - velocidade média de escoamento da água nas seções de sucção e recalque da bomba;
- Q [m³/s] - vazão de água no conduto;
- D [m] - diâmetro dos condutos de sucção e recalque da bomba.

A diferença entre as cotas de posição z_2 e z_1 é determinada tomando-se como referência os pontos onde são realizadas as tomadas de pressão na entrada e saída da bomba. Em seguida calcula-se a potência hidráulica da bomba pela equação 3.

$$P_H = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

(3)

onde:

- P_h [kW] - potência hidráulica da bomba;
- ρ [kg/m³] - massa específica da água;
- g [m/s²] - aceleração da gravidade;
- Q [m³/s] - vazão;
- H [m] - altura total de elevação;

8.2.3.3

8.2.3.4 O rendimento do conjunto é então calculado pela equação 4.

$$\eta_c = \frac{P_H}{P_{el}}$$

(4)

onde:

- η_c [%] - rendimento do conjunto moto-bomba;
- P_h [kW] - potência hidráulica;
- P_{el} [kW] - potência elétrica.

Para avaliar o rendimento da bomba isoladamente é necessário conhecer a potência de eixo fornecida pelo motor. Neste caso utilizou-se o rendimento nominal dos motores, obtidos através de catálogos dos fabricantes. Com isso obtém-se a potência de eixo pela equação 5 e o rendimento da bomba pela equação 6.

$$P_e = P_{el} \cdot \eta_m$$

(5)

onde:

P_e [kW] - potência de eixo;
 P_{el} [kW] - potência elétrica do motor;
 η_m [%] - rendimento do motor elétrico.

$$\eta_b = \frac{P_H}{P_e}$$

(6)

onde:

η_b [%] - rendimento total da bomba;
 P_H [kW] - potência hidráulica;
 P_e [kW] - potência de eixo da bomba.

➤ *Redução do Bombeamento no Horário de Ponta*

Para avaliar as condições operacionais do reservatório Vila Nova, e determinar se ele possui volume útil suficiente para reduzir o bombeamento no horário de ponta, é necessário conhecer sua curva de demanda do dia de maior consumo. Como apenas a vazão de entrada foi medida, a vazão de saída (demanda) foi determinada através de balanço hídrico, conforme equação 7.

$$Q_s = \frac{\Delta NA \cdot A_{res} - Q_e \cdot \Delta t}{\Delta t}$$

(7)

onde:

ΔNA [m] - variação do nível do reservatório (positiva se há aumento e negativa se há redução);
 A_{res} [m²] - área do reservatório;
 Q_e [m³/s] - vazão de entrada;
 Δt [s] - intervalo de tempo entre as medidas.

O volume útil necessário do reservatório é determinado através do método dos volumes diferenciais (Gomes, 2009). Neste método se realiza a soma das diferenças negativas entre a vazão de entrada e de saída para encontrar assim, o volume útil necessário. Se este volume for menor do que o volume útil atual do reservatório é possível montar um novo esquema de operação para que haja uma redução do bombeamento no horário de ponta. Caso isto não seja possível, deve-se verificar a viabilidade do aumento do volume útil do reservatório para que o bombeamento possa ser interrompido no horário de ponta.

➤ *Redução da Altura Total de Elevação*

Conhecendo o desnível geométrico entre o reservatório de sucção da elevatória da ETA e o reservatório Vila Nova, e também sua altura total de elevação, obtida durante o ensaio de rendimento, é possível determinar a perda de carga na tubulação através da equação 8.

$$\Delta H = H_b - H \quad (8)$$

onde:

ΔH [m] - perda de carga na adutora;
 H_b [m] - desnível geométrico entre o reservatório de sucção da elevatória da ETA e o reservatório Vila Nova;
 H [m] - altura de elevação total da bomba.

Assim, é possível determinar a rugosidade ε atual da tubulação através das equações 9 e 10. Optou-se pelo uso da fórmula universal (equação 9) pois a NBR 12215 (1991) recomenda que esta seja utilizada para o dimensionamento de adutoras. O resultado obtido deve ser comparado com valores de referência, e assim, é possível avaliar se a perda de carga atual está elevada, indicando a necessidade de limpeza da tubulação.

$$f = \frac{\Delta H \cdot D^5 \cdot \pi^2 \cdot g}{8 \cdot L \cdot Q^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon = 3,7 \cdot \left(10^{-\frac{1}{2 \cdot \sqrt{f}}} - \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \cdot D \quad (10)$$

onde:

f [1] – fator de atrito;
 L [m] – comprimento do trecho considerado;
 Q [m³/s] – vazão;
 ΔH [m] – perda de carga na tubulação;
 D [m] – diâmetro da tubulação;
 g [m²/s] – aceleração da gravidade;
 ε [m] – rugosidade da tubulação;
 Re [1] – número de Reynolds.

8.2.4 RESULTADOS

➤ *Substituição dos Conjuntos Motobombas*

Os resultados obtidos para os ensaios dos conjuntos motobombas são apresentados na tabela 1. Percebe-se que em todos os casos o rendimento obtido está abaixo do determinado pelo fabricante para o ponto de operação. Isto mostra que os conjuntos já estão desgastados, seja

pelo seu tempo de operação ou manutenção inadequada, indicando que pode haver a viabilidade de sua troca.

Tabela 2. Resultados dos ensaios nos conjuntos moto-bomba.

Local	Q [m ³ /h]	H [m]	η_t ensaio [%]	η_t catálogo [%]
ETA	330	58,7	65,5	68
Captação	349,7	18,7	66,4	80
Solar dos Lagos	131,9	56,9	67,7	80
Jardim das Acácias	40	61,5	38,2	68
São Francisco	167	44,6	47,9	77
Carioca	196,9	42,5	62,1	76

Com base nos valores obtidos nos ensaios foram selecionadas novas bombas, com maior eficiência, para o mesmo ponto de operação encontrado, já que não há nenhum controle de vazão nestas estações elevatórias. Assim, avaliou-se a viabilidade econômica da troca destes conjuntos, como mostra a Fig. (4). Considerando o investimento de todos os conjuntos, o *payback* será de 1,93 anos.

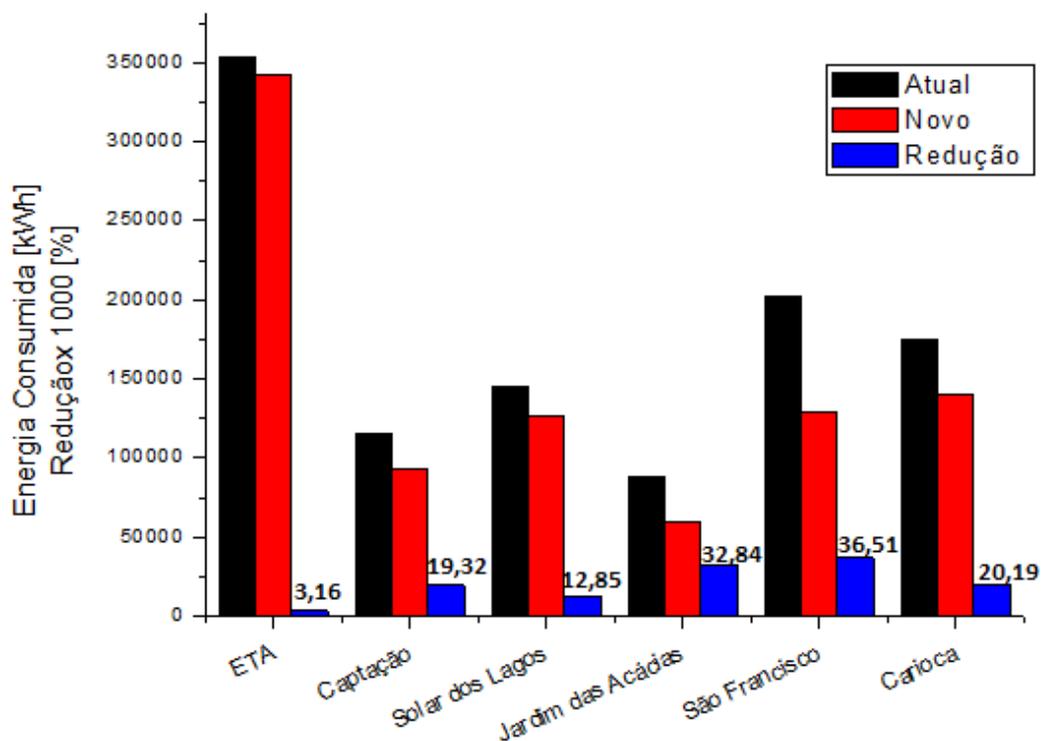


Figura 4. Comparação do consumo de energia atual com o consumo após a troca dos conjuntos.

➤ *Redução do Bombeamento no Horário de Ponta*

Com o monitoramento do sistema durante os dias 25/08/2010 e 31/08/2010, obteve-se a curva de demanda do dia de maior consumo (figura 5).

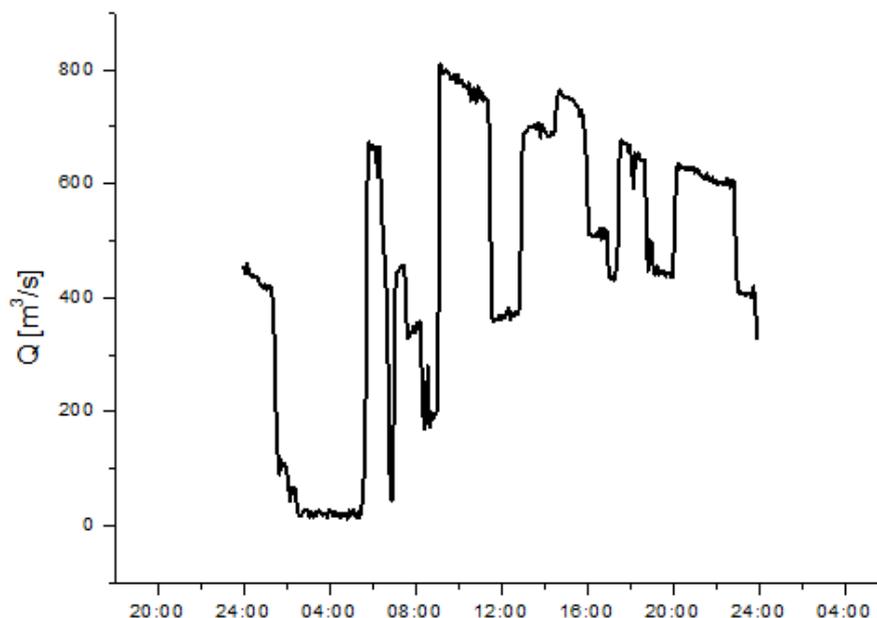


Figura 5. Curva de demanda do dia de maior consumo.

Com base nestes dados avaliou-se a possibilidade de redução do bombeamento da ETA para o reservatório Vila Nova no horário de ponta. Consequentemente também haverá redução no bombeamento feito pela captação, que também deve ser considerado na análise. Foram avaliados os seguintes cenários

- *Cenário 1:* mostra a situação de operação atual, onde o bombeamento da ETA é feito para que o nível do reservatório Vila Nova se mantenha praticamente constante;
- *Cenário 2:* apresenta a possibilidade de desligamento de apenas uma bomba da ETA no horário de ponta. Neste caso é necessário aumento do volume útil do reservatório
- *Cenário 3:* apresenta a possibilidade de desligamento de todas as bombas da ETA no horário de ponta. Neste caso é necessário aumento do volume útil do reservatório
- *Cenário 4:* mostra um cenário otimizado, em que o volume atual do reservatório permite que seja feita a operação. Contudo, neste caso deve ser feito o controle de vazão.

Tabela 3. Gastos com energia para as diferentes situações de operação do reservatório.

Cenário	1	2	3	4
Consumo HP [kWh]	537	330	0	429
Demanda HP [kW]	197	110	0	177
Consumo fora HP [kWh]	3.043	3.243	3.592	2.238
Demanda fora HP [kW]	196	197	197	181
Gasto Anual de Energia [R\$]	564.204	452.020	275.347	482.187
Volume útil [m³]	1.084	1.469	2.401	1.100
Redução [%]	-	19,88	51,20	14,54

➤ *Redução da Altura Total de Elevação*

De acordo com os dados obtidos, o desnível geométrico entre a ETA e o reservatório Vila Nova é de 44 m, enquanto que o comprimento da tubulação é de aproximadamente 1.000 m. Com o resultado obtido no ensaio, obtém-se uma perda de carga total na adutora de 14,7 m. De acordo com Azevedo Netto (1998) quando o comprimento da tubulação for inferior a 4.000 vezes o diâmetro, que é o caso desta adutora, as perdas de carga localizadas não podem ser desprezadas. Gomes (1999) e Sousa (2001) recomendam que, na falta de informações, utilize-se entre 10 a 20 % do valor das perdas distribuídas para estimar as perdas localizadas. Portanto, considerou-se que 10 % da perda de carga total referem-se às perdas localizadas, obtendo um valor de 13,23 m para as perdas distribuídas. Assim, determina-se que a rugosidade da tubulação é de 4,45 mm. O valor de referência para tubulações de ferro fundido antigas, obtido de Porto (2006), é de 3 a 5 mm. Isto mostra que a perda de carga neste caso está dentro do esperado, considerando as incertezas do procedimento adotado, ou seja, não há indícios evidentes de que a limpeza da tubulação seja realmente necessária.

8.2.5 CONCLUSÃO

O estudo de caso realizado mostra que o consumo de energia em estações elevatórias pode ser elevado. As bombas em estudo apresentaram rendimento abaixo do fornecido pelo fabricante no ponto de operação ensaiado. Além disso, em alguns casos este ponto de operação estava fora do ponto de máximo rendimento. Isto ocorre pelo desgaste dos equipamentos e também devido a seleção incorreta do conjunto. Porém o estudo mostrou que, além de avaliar as condições do conjunto motobomba, também é importante avaliar as condições do sistema, que indiretamente influi nos gastos com energia. Observou-se que uma das alternativas mais atrativas neste caso é o uso de reservatórios para redução do bombeamento no horário de ponta, que implica em grande economia nos gastos com energia. Portanto a eficiência de uma estação elevatória não depende apenas do rendimento dos conjuntos motobombas, e sim de uma operação otimizada em conjunto com a manutenção adequada de todo o sistema.

8.2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12215 (NB 591) - Projeto de Adutora de Água Para Abastecimento Público, 1991.
2. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12211 - Estudos de Concepção de sistemas Públicos de Abastecimento de Água, 1992.
3. AZEVEDO NETTO, J. M. et al, Manual de Hidráulica, 8^a Ed., Editora Edgard Blucher, 670 p., 1998
4. ELETROBRÁS, Informativo Eletrobrás do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, n° 81, 2009.
5. EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE, Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs. Elsevier Advanced Technology, Oxford, Inglaterra, 2004.
6. GOMES, H. P., Engenharia de Irrigação: Hidráulica de Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento, Editora Universitária UFPB, 3^a Ed., Campina Grande, 1999.
7. GOMES, H. P., Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. Editora Universitária UFPB, 1^a Ed. João Pessoa, 2009.
8. ISO 9906, Rotodynamic Pumps - Hydraulic Performance Acceptance Tests - Grades 1 and 2, 1999.

9. PORTO, R. M., Hidráulica Básica. 4ª ed. São Carlos, 2006. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 519 p.
10. RODRIGUES, W., Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água, 234 f, Tese de doutorado em engenharia civil, Faculdade de engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
11. SILVA FILHO, A. Q., VIANA, A. N. C., LIMA, G. M. e CARNEIRO JUNIOR, R. S., Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para a Aplicação de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento, IX CLAGTEE - Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, Mar Del Plata, 2011.
12. SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto. Brasília, DF, 2010.
13. SOUSA, E. R., Saneamento Ambiental I – Sistemas de Adução, Universidade Técnica de Lisboa – Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, 2001.