

# Melhorias em um Sistema de Bombeamento Municipal Visando à Eficiência Energética – Estudo de Caso

Rafael Fernando Dutra\* e Carlos Roberto Altafina†

## Resumo

Com o rápido e desordenado crescimento ocorrido na cidade de Caxias do Sul-RS nas últimas duas décadas, tem-se verificado muitos problemas de abastecimento de água em determinadas regiões, principalmente em horários e dias de pico de consumo. Com o objetivo de solucionar o problema citado e tendo como foco a eficiência energética, neste trabalho foram propostas duas melhorias no sistema de bombeamento Santa Fé, o qual é responsável pelo abastecimento de parte da região norte de Caxias do Sul. As melhorias citadas envolveram troca de conjuntos de bombeamento e utilização de inversor de frequência para controle de velocidade de rotação do sistema. A partir das medições efetuadas em campo e das simulações realizadas em planilhas de cálculo e no software Epanet, constatou-se que as duas melhorias são viáveis técnica e economicamente, proporcionando uma economia mensal estimada de 37,7%.

## Palavras-chave

Eficiência energética, bombas centrifugas, abastecimento público, Epanet 2.0.

# Improvement Analysis in a Municipal Pumping System Aiming the Energy Efficiency – a Case Study

## Abstract

With the rapid and disorderly growth that occurred in the city of Caxias do Sul - RS in the last two decades, many problems of water supply are observed in specific areas, especially in peak times and days of consumption. In order to solve the mentioned problem and focusing on energy efficiency, this study proposed two improvements in the pumping system of Santa Fe, which is responsible for supplying the northern part of Caxias do Sul. The improvements mentioned dealt with the exchange of the pumping system and the use of a frequency converter to control its speed. From the measurements made and simulations in spreadsheets and software Epanet, it was found that the two improvements are technically and economically viable, providing an estimated monthly savings of 37.7%.

## Keywords

Energy efficiency, centrifugal pumps, water public supply, Epanet 2.0.

## I. INTRODUÇÃO

Devido à crise no sistema energético com a qual o Brasil conviveu no ano de 2001, somado ao fato de se estar atingindo recordes de consumo de energia elétrica (EE) no estado do Rio Grande do Sul [1], tornam-se necessárias buscas por soluções que atendam à demanda crescente de EE no país. Agindo nesse sentido e objetivando a modernização do sistema elétrico brasileiro, devem-se implantar novas fontes de geração, bem

como ampliar e adequar os sistemas de transmissão e distribuição existentes. No entanto, complementarmente, uma solução mais econômica e de resultados mais imediatos está na eliminação do desperdício de EE, ou seja, na eficiência energética.

Para qualquer sistema, o termo “eficiência energética” pode ser definido como a obtenção do melhor desempenho na produção de um serviço com o menor gasto de energia [2]. Desta forma, pode-se gerar e utilizar a EE com menores custos, de forma mais limpa e mais rápida, dado ser uma alternativa de curto prazo de implantação. Sabendo disto, o Governo do Brasil vem, desde 1985 com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), agindo no sentido de reduzir o consumo e a demanda de energia elétrica no país [3].

\* SAMAE – Serviço Autônomo Municipal de água e Esgoto – Caxias do Sul; † Centro de Ciências Exatas e Tecnologia – Universidade de Caxias do Sul.

rafa.f.dutra@hotmail.com, craltafi@ucs.br

Data de envio: 20/02/2014

Data de aceite: 15/04/2014

<http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v2iss1p1>

Desde 2003, dentro do PROCEL, foi instituído o

PROCEL SANEAR — Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, o qual, dentre outras atribuições, atua na eliminação do desperdício de EE em prestadores de serviço de saneamento [4]. Neste setor, as despesas com EE acentuaram-se significativamente nas últimas duas décadas e já se constituem como o segundo item nas despesas operacionais [5].

De acordo com [4], mais de 2% do consumo total de EE do Brasil, o equivalente a sete bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadores de serviços de água e esgotamento sanitário. Este consumo refere-se aos diversos usos nos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, com destaque para os equipamentos utilizados em estações elevatórias (motores elétricos e bombas centrífugas), que são, normalmente, responsáveis por 90% do consumo destas instalações.

Nos últimos dez anos, principalmente devido à criação do PROCEL-SANEAR, tem-se desenvolvido diversos trabalhos na área de eficiência energética voltados ao setor de saneamento. Estudos foram realizados por Arenhardt [6], Lorenzi [7] e DeBenedictis *et al.* [8], nos quais foram analisadas as reduções do consumo de EE em estações elevatórias de água através do uso de variadores de frequência. Em [9] foi efetuado um estudo objetivando a diminuição dos custos de EE, em sistemas de bombeamento a partir do desligamento de estações elevatórias no horário de ponta estabelecido pela concessionária, favorecendo-se assim das tarifas horo-sazonais. Trabalhos realizados em [2], [3], [10]–[18], compararam o desempenho elétrico, mecânico e hidráulico, sob o enfoque da eficiência energética, de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento ou por inversores de frequência. Já Machado [19] realizou análises de viabilidade técnico-econômica para implementação de medidas de eficiência do uso de EE as quais incluíam: substituição dos motores tipo standard por motores de alto rendimento; readequação das potências dos motores elétricos e uso de inversores de frequência no controle de vazão através de controle de velocidade.

Viholainen, et al. [20] estudaram o emprego de inversor de frequência na associação em paralelo de bombas centrífugas. A principal razão de se utilizar bombas de funcionamento em paralelo é para permitir uma gama mais vasta de fluxo do que seria possível com uma única bomba. Segundo os autores, quanto maior for a perda de carga do sistema, menor será o incremento no valor da descarga (vazão de bombeamento) causado pela associação em paralelo. Por essa razão, deve-se estudar com atenção um sistema com bombas trabalhando em paralelo, para se evitar que elas trabalhem com valores de descargas muito abaixo de seu valor nominal, o que causará cavitação, aquecimento excessivo e baixa eficiência.

Além disso, de acordo com [5], normalmente, os desperdícios de EE nos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário são decorrentes de fatores como: a) formas contratuais indevidas; b) procedimentos operacionais inadequados; c) desperdícios de água; d) mau dimensionamento de sistemas; e) idade avançada dos equipamentos; f) tecnologias mal utilizadas; g) erros de concepção dos projetos; e h) manutenções precárias.

Alguns autores [5], [21], [22] afirmam que as medidas de eficiência energética e redução de custos em sistemas de

saneamento podem ser divididas em ações administrativas e operacionais. As administrativas compreendem a primeira fase de medidas a serem tomadas e praticamente não envolvem custos para serem implantadas. São ações relativas aos contratos existentes com as concessionárias de EE e podem ser resumidas em: a) correção da classe de faturamento; b) regularização da demanda contratada; c) alteração da estrutura tarifária; d) desativação das instalações sem utilização; e) conferência de leitura da conta de EE; e f) entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas. Já as medidas operacionais [5], que correspondem a uma segunda fase do programa de eficiência energética, dizem respeito às seguintes ações de engenharia: a) ajuste dos equipamentos; b) diminuição da potência dos equipamentos; c) controle operacional e automação do sistema de abastecimento de água; d) alternativas para geração de energia elétrica; e) redução da altura manométrica; e f) redução no volume de água distribuído.

Diversas ações propostas acima se referem ao combate das perdas físicas de água, as quais ocorrem em todo o sistema de abastecimento e podem ser divididas em perdas decorrentes de vazamentos, provocados por deficiência nos equipamentos, envelhecimento de tubulações, etc., ou perdas aparentes ou comerciais, que decorrem de falhas nos equipamentos de medição (macro e micro medidores), erros no cadastro do sistema e fraudes nas ligações [22]. Por não se tratar diretamente do objeto de estudo desse trabalho e por se tratar de uma área que exigiria uma análise bastante aprofundada, não foi dado aqui maior enfoque neste tipo de melhorias.

Nesse artigo é apresentado um estudo de caso referente a uma estação de bombeamento de água tratada (EBAT), que atende uma região da cidade de Caxias do Sul. Trata-se da EBAT Santa Fé, localizada na estação de tratamento de água (ETA) Celeste Gobbato, possuindo uma vazão aproximada de 100 L/s e é responsável pelo abastecimento de diversos bairros da zona norte da cidade. Devido ao acentuado crescimento populacional ocorrido nesta região nos últimos anos, e ao sistema de bombeamento atual trabalhar com a mesma capacidade há mais de quinze anos, têm-se registrados diversos problemas de abastecimento na referida região, principalmente em horários e dias de pico de consumo. Com isso, tornou-se necessário efetuar um estudo de melhorias neste sistema de bombeamento, visando solucionar os problemas de abastecimento desta região e melhorar a sua eficiência energética. As melhorias citadas envolveram troca de conjuntos de bombeamento e utilização de inversor de frequência para controle de velocidade de rotação do sistema, verificando-se os resultados no simulador hidráulico Epanet.

Os simuladores hidráulicos estão sendo cada vez mais utilizados pelas empresas de saneamento para fins de planejamento, projeto e diagnóstico do funcionamento dos sistemas [23]. Esses simuladores são ferramentas computacionais capazes de gerar modelos de sistemas de qualidade, transporte e distribuição de água. Atualmente, existem diversos simuladores no mercado, dentre eles pode-se citar WaterCAD, Mike Net, Finesse e o Epanet. Esse último, desenvolvido por Lewis A. Rossman da U.S. *Environmental Protection Agency* (US EPA), dos Estados Unidos, é um dos simuladores mais utilizados no mundo por entidades gestoras, investigadores e acadêmicos. Esse programa foi

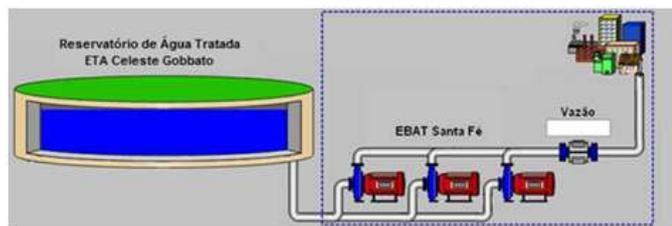


Fig. 1: EBAT Santa Fé.

traduzido recentemente para o português pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), da Universidade Federal da Paraíba – Brasil [24].

Neste trabalho, foi utilizado o modelo hidráulico já existente para o sistema de abastecimento da região estudada, o qual foi gerado no software Epanet. O referido modelo serviu de base para as análises de melhorias visando à eficiência energética.

## II. MATERIAL E MÉTODOS

Nas últimas duas décadas, conforme dados dos Censos de 1991, 2000 e 2010 do IBGE, Caxias do Sul teve um crescimento populacional médio de 7514 habitantes por ano, o que remete a mais 626 habitantes por mês. Complementarmente, segundo dados do SAMAE, são efetuadas mensalmente cerca de 320 novas ligações de água na cidade Caxias do Sul. Estimando-se um consumo per capita de 200 L/hab-dia [21], o consumo de água na cidade de Caxias do Sul cresce cerca de 3756 m<sup>3</sup>/mês. Devido a este rápido e desordenado crescimento, tem-se verificado problemas de abastecimento de água em algumas regiões, principalmente em horários e dias de pico de consumo. Uma dessas regiões, a qual foi objeto de estudo desse trabalho, é a zona norte de Caxias do Sul.

Responsável pelo abastecimento de água de grande parte da zona norte de Caxias do Sul, a Estação de Bombeamento de Água Tratada - EBAT Santa Fé, localizada na ETA Celeste Gobbato, foi a estação elevatória objeto de estudo deste trabalho. A Figura 1 mostra o esquema funcional da EBAT analisada.

Na Figura 1 observa-se que o sistema possuía três grupos motobombas (GMB) operando em paralelo, 24 horas por dia e sem nenhum tipo de controle. Isso faz a bomba operar em diversos pontos de sua curva de desempenho, visto que o consumo de água é variável conforme o período do dia. Neste sistema, as bombas encontram-se trabalhando “afogadas” e succionam água de um reservatório à montante (localizado dentro da própria ETA). Os três GMB instalados na EBAT Santa Fé são constituídas por três bombas idênticas, da marca Imbil, modelo ITAP 100-200, acionadas por motores elétricos trifásicos de 60 cv e por diferentes métodos de acionamento. Tal situação ocorre devido à necessidade atual de se utilizar todos os conjuntos funcionando em paralelo. Anteriormente, eram utilizados apenas os GMB 01 e 02, onde o primeiro era acionado por inversor de frequência, funcionando ininterruptamente e modulando a pressão do sistema, e, o segundo, com *soft starter*, operava durante algumas horas do dia. O GMB 03 era utilizado apenas em paradas de manutenção de um dos dois primeiros conjuntos, sendo acionado por partida compensadora.

Complementarmente, encontram-se em funcionamento, dentro da região abastecida pelo sistema Santa Fé, cinco bombas do tipo *booster*, as quais tem a função de abastecer alguns pontos críticos da referida região. São elas: EBAT Belo Horizonte, EBAT Parque Oásis, EBAT Av. Santa Fé, EBAT Centenário e EBAT Brandalise.

Para o levantamento de dados necessários ao desenvolvimento deste estudo, foi empregada a instrumentação descrita na sequência. Para a medição da carga transferida da bomba ao fluido, fez-se uso de dois manômetros digitais, ambos da marca Gulton, modelo GULpress 1000, faixa de medição 0 a 100 mca. Um dos manômetros foi montado na tubulação de recalque e outro na de sucção da bomba, sendo utilizados no ensaio de desempenho de cada um dos GMB, para se obter as suas curvas características. Para fins de registros ao longo do tempo dos valores de pressão de sucção e recalque do sistema de bombeamento, fez-se uso de um registrador de pressão, que armazena em sua memória os valores lidos para um intervalo de tempo pré-estabelecido. O registrador é da marca Compuway, modelo MaxxiLogger, possuindo as seguintes características: faixa de medição de 0-200 mca, exatidão de 0,25%, memória para 600 mil dados e dois pontos para medição simultânea de pressão.

Para a medição de vazão de saída do bombeamento encontra-se instalado, permanentemente, na tubulação de recalque, um medidor de vazão eletromagnético da marca Conaut-Krohne, modelo OptifluxKC2000F-6. Este medidor possui diâmetro nominal (DN) de 300 mm, faixa de medição de 0,3 a 12 m<sup>3</sup>/s e exatidão de 0,5%, sendo instalado em um trecho reto de no mínimo cinco vezes o DN à montante e duas vezes o DN à jusante. O princípio de operação deste tipo de medidor baseia-se na lei de Faraday, onde uma tensão induzida é gerada por um condutor (neste caso a água) em movimento em um campo magnético. Este tipo de sensor possui um par de bobinas magnéticas situadas em volta do tubo, onde um ou mais pares de eletrodos encontram-se em contato com o fluido. Sendo conhecidas a densidade do fluido e a distância entre os eletrodos, a tensão que se forma entre os mesmos é diretamente proporcional à velocidade do fluido [25]. Um conversor de sinais faz a leitura do medidor de vazão eletromagnético.

Para as medições das principais grandezas elétricas do sistema de bombeamento (tensão, corrente, potência e fator de potência), foi utilizado um analisador de energia digital portátil, marca Instrutherm, modelo AE-100. Este instrumento de medição possui quatro sensores de corrente e quatro de tensão (ambos para medições das três fases e do neutro); exatidão de  $\pm 0,3\%$  para leitura de tensão e  $\pm 0,5\%$  para a de corrente.

Os conjuntos motobombas instalados na EBAT analisada estão operando nas mesmas condições há mais de quinze anos, sofrendo reparos de tempos em tempos. Aliado a isso, existiam problemas de abastecimento ocorridos em determinados dias e horários de alto consumo. Desta forma, foi avaliada a implementação de duas melhorias: 1) troca do sistema de bombeamento; e 2) variação de velocidade de rotação do sistema de bombeamento visando manter a pressão do sistema constante. É importante ressaltar que outras melhorias poderiam ser propostas, no entanto, as mesmas não são o foco do trabalho.

Inicialmente, foram feitas medições das condições atuais de trabalho dos conjuntos motobombas, onde foram monitoradas as principais variáveis do processo: pressões de recalque e sucção, vazão de saída do bombeamento, potência consumida, rendimento e corrente do motor. Para obtenção dos valores de rendimento fez-se uso da equação:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{eixo}}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P_{\text{eixo}}}, \quad (1)$$

em que  $\eta$  é o rendimento da bomba,  $P_{\text{útil}}$  é a potência útil, em watts e  $P_{\text{eixo}}$  é a potência de eixo fornecida pelo motor (obtida através das medições de potência elétrica e valores de rendimento do motor), em watts,  $\gamma$  é o peso específico do fluido, em  $\text{N/m}^3$ ,  $Q$  é a vazão, em  $\text{m}^3/\text{s}$  e  $H$  é a altura manométrica de elevação, em m. Todas as medições efetuadas serviram de base para analisar uma possível troca do sistema de bombeamento. Nesta troca, foram utilizados como fator de decisão os seguintes aspectos: a) pontos de trabalho da bomba ao longo do dia; b) projeção de crescimento do consumo de água do sistema avaliado para os próximos dez anos; c) escolha da bomba com melhores valores de rendimento para os pontos de trabalho do sistema e que se adeque aos valores de altura positiva líquida de sucção (em inglês — *Net Positive Suction Head* — NPSH) disponível no sistema; d) verificação da melhor condição de operação do sistema, ou seja, com somente uma bomba ou com duas em paralelo; e) comparação das curvas de trabalho dos modelos de bombas atuais e daquelas das bombas novas.

Com o propósito de simular os resultados obtidos, inseriu-se a nova bomba escolhida no modelo hidráulico elaborado no software Epanet, onde se pode observar o comportamento hidráulico do sistema estudado, estimando as melhorias no abastecimento ocasionadas por este novo equipamento.

Por ser a EBAT em questão um sistema de pressurização que trabalha sem reservatório à jusante, a variação do ponto de trabalho do conjunto de bombeamento ocorre conforme o consumo de água, ou seja, em horários de maior ou menor consumo do dia a bomba trabalhará em um ponto ou outro de sua curva. Esta variação de pontos de trabalho faz com que ocorra uma variação na pressão de saída do bombeamento e, de consequência, uma variação na pressão de todo sistema. Esta variação de pressão ocorrida ao longo do dia, além dos possíveis danos que pode causar à tubulação, acarretará um elevado desperdício de energia em horários de menor consumo. Por este motivo, foram avaliados os ganhos que o inversor de frequência traria para o sistema de bombeamento, podendo efetuar o controle da velocidade de rotação do sistema de bombeamento através da leitura de pressão. Com isso, foi analisado através do programa Epanet o comportamento do sistema controlando a pressão de saída do bombeamento.

Conforme Gomes (2005) [5], bancos e entidades de fomento que financiam projetos em eficiência energética e hidráulica normalmente estabelecem critérios ou parâmetros econômicos que deverão ser empregados na elaboração das propostas de financiamento. Para este trabalho, utilizando os critérios do PROCEL Sanear, foram adotados os seguintes indicadores de viabilidade: taxa mínima de atratividade (TMA) de 15% ao ano; vida útil do projeto de 10 anos; e valor presente líquido

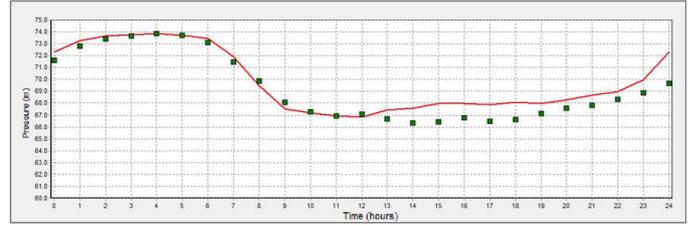


Fig. 2: Pressão da saída do bombeamento: valores reais (pontos em verde) e valores gerados pelo Epanet (curva em vermelho).

(VPL) dado pela equação [5]:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{B'_j}{(1+i)^j}, \quad (2)$$

onde  $B'_j$  são os benefícios líquidos (benefícios brutos menos os custos) ao longo de  $n$  períodos de tempo e a uma taxa de juros  $i$ . O projeto é considerado atrativo se o  $VPL$  é maior que zero. Outros indicadores são: taxa interna de retorno ( $TIR$ ), que é a taxa de juros que zera o  $VPL$  do empreendimento e pode-se calculá-la também através de (2) e caso o  $TIR$  seja superior à  $TMA$  aplicada no projeto, considera-se o investimento atrativo; tempo de retorno do capital — descontado ( $TRC/\text{Payback Descontado}$ ): é o número de períodos que zera o  $VPL$  do projeto, levando-se em conta a taxa de juros e as parcelas incidentes no fluxo de caixa. Evidentemente, se o  $TRC$  descontado for à vida útil do projeto, o investimento correspondente não será atrativo.

Para fins de análise e validação, foi desenvolvido um modelo hidráulico do sistema de abastecimento em estudo no software Epanet 2.0. Este modelo foi concebido através de diversas informações do sistema, dentre as quais se podem citar: a) dados e traçado das redes de abastecimento (diâmetro, material, comprimento, cota geométrica, etc.); b) dados de consumo de cada quadra obtidos através do sistema comercial do SAMAE; e c) curvas de trabalho das bombas. Para calibrar o modelo hidráulico em comparação ao sistema real, foram feitas medições simultâneas de pressão em nove pontos chave do sistema. Após ajustes, o modelo gerado para o sistema analisado foi considerado calibrado, ou seja, pode ser utilizado para análise das mudanças que foram propostas neste trabalho. A Figura 2 mostra o gráfico de pressão da saída do bombeamento da EBAT estudada, demonstrando a aproximação do modelo com o sistema real.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta um gráfico de medição de pressão efetuado no dia 06/04/2013 (sábado) em uma dada rua na região em estudo. Pode-se perceber nesta figura que, durante o período das 12h00 às 16h00 deste dia, a pressão chegou a valores muito próximos a zero, demonstrando que aquele local não estava sendo abastecido. Além disso, pode-se observar que no período da madrugada (das 1h às 5h) há valores de pressão acima do limite de 50 mca (metros de coluna de água), que é estabelecido pela norma NBR 12218:1994.

A elevada variação de pressão ocorrida neste ponto do sistema, onde durante o horário de maior consumo a região não está sendo abastecida e durante a madrugada há

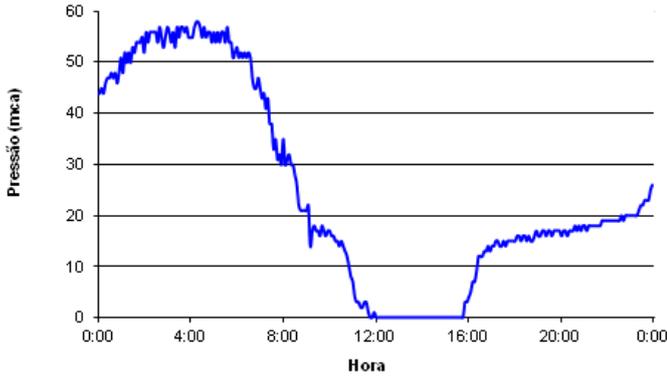


Fig. 3: Gráfico de medição de pressão efetuada no dia 06/04/2013 em uma rua da região estudada.

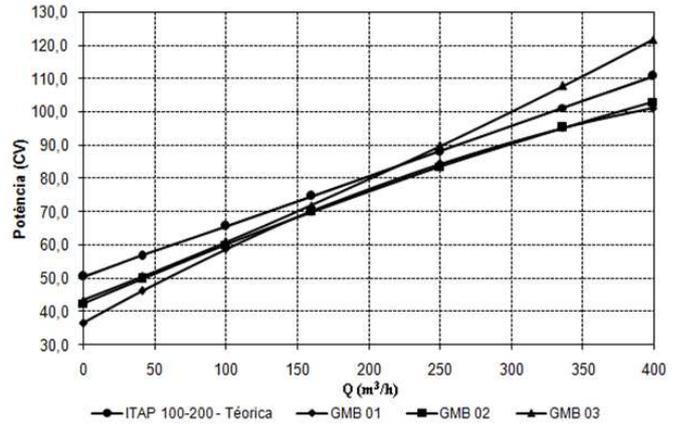


Fig. 5: Curvas de  $P \times Q$ .

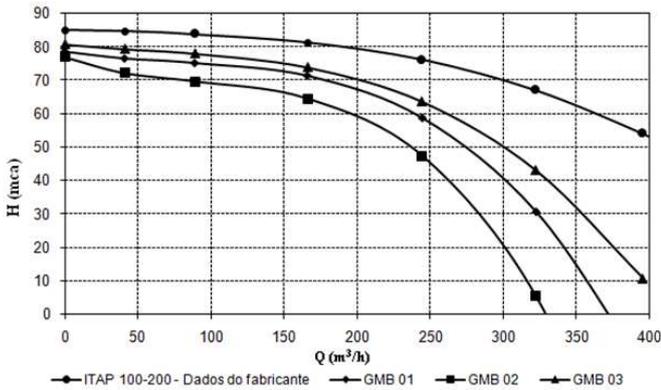


Fig. 4: Curvas de  $H \times Q$ .

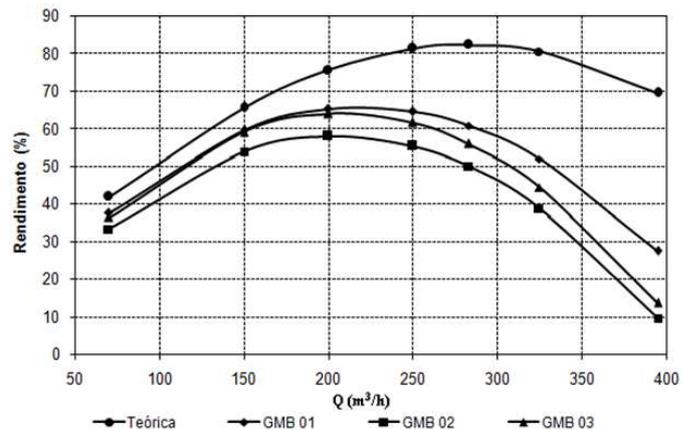


Fig. 6: Curva de  $\eta$  (equação (1))  $\times Q$ .

excesso de pressão, também pode ser observada em outros pontos da região estudada. Tal situação demonstra o mau dimensionamento do sistema de bombeamento desta região, pois este não consegue suprir os picos de consumo e durante a noite há um elevado desperdício de energia.

Para fim de verificação das condições atuais do sistema de bombeamento, foram efetuados dois ensaios de desempenho para cada GMB para se obter as curvas características individuais, variando-se a abertura da válvula de bloqueio no recalque de cada bomba de 0 a 100%. A partir das medições feitas são mostradas as curvas características  $H \times Q$  (Figura 4),  $P \times Q$  (Figura 5) e  $\eta \times Q$  (Figura 6). Nessas figuras também são identificadas as curvas de uma bomba nova, similar as atuais.

Analisando os resultados apresentados nas figuras 4, 5 e 6, observa-se que os GMB instalados apresentam resultados discrepantes com os dados do fabricante, podendo chegar a uma variação de 38% na carga manométrica para uma vazão de 244  $m^3/h$ . Além disso, a diferença de curva entre os GMB usados se deve às manutenções dos mesmos que ocorrem em tempos diversos.

Durante uma semana foram monitorados os valores de vazão, pressão de recalque e pressão de sucção dos GMBs, sendo registrados valores a cada cinco minutos. Estes valores foram coletados da tubulação principal da estação de bombeamento.

A Figura 7 mostra a média dos valores registrados durante uma semana de medições. É importante ressaltar que se escolheu utilizar os valores médios, pois a diferença máxima

entre o dia de maior consumo (sábado) e o dia de menor consumo (3ª feira) foi de 7,1%. Esta baixa diferença é explicada pelo fato do sistema não conseguir suprir a demanda necessária nos horários de pico de consumo.

Observa-se na Figura 7 que a EBAT apresentou durante a madrugada o mínimo consumo de 204,3  $m^3/h$  e a pressão máxima (diferença entre a pressão de recalque e a de sucção) de 76,4 mca. Enquanto que, o consumo máximo de 354,6  $m^3/h$  e pressão mínima de 71,6 mca ocorreu entre às 13h00 e às 14h00. Percebem-se ainda intermitências nos consumos entre às 0h00 e às 8h00, o que é explicado pela operação da EBAT Parque Oásis, a qual é controlada pelo nível de um reservatório, que quando atinge o nível máximo a bomba se desliga e quando atinge o nível mínimo a bomba liga-se

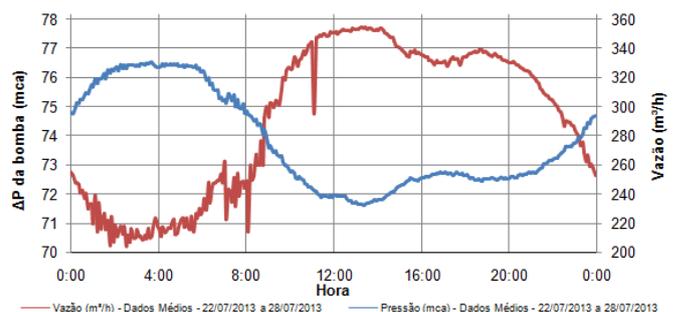


Fig. 7: Registros médios de uma semana de medições.

novamente. Portanto, este funcionamento intermitente dessa EBAT causa uma operação oscilatória das três bombas da EBAT Santa Fé.

A fim de estimar os custos mensais com energia elétrica para o sistema de bombeamento Santa Fé bem como determinar o diagnóstico energético desta estação, foi desenvolvida uma planilha de cálculo que utilizou os dados a seguir.

- Medições de vazão, pressão de recalque e pressão de sucção, efetuadas entre os dias 22/07/2013 e 28/07/2013;
- Curvas características reais do bombeamento Santa Fé, onde foi utilizado o valor médio obtido entre as três bombas BH 119, BH 192 e BH 190;
- Curvas teóricas de NPSH requerido da bomba ITAP 100-200;
- Curvas teóricas de rendimento e fator de potência do motor elétrico utilizado;
- Dados teóricos de peso específico da água, pressão de vaporização da água e pressão atmosférica de modo a obter a altura máxima de sucção desta bomba sem que ocorra o fenômeno da cavitação;
- Tarifa de EE cobrada pela concessionária.

Com base nesses dados e para cada ponto de medição, foram obtidos os custos de energia elétrica teórico e específico por volume de água bombeado, e o fator de carga da instalação.

Para fins de validação da referida planilha, foi feita uma simulação do custo mensal teórico com EE gerado por ela, comparando-se esse valor com o valor real da conta de energia elétrica do período de 25 de Julho de 2013 a 27 de Agosto de 2013, que engloba parcialmente os dias das medições efetuadas. Os resultados obtidos foram os seguintes: valor real cobrado pela concessionária de EE de R\$ 15.263,30; valor teórico simulado de R\$ 16.044,96; diferença de +5, 12%, que se considera satisfatória.

Utilizando os valores de rendimento apresentados pelos fabricantes, os pontos de trabalho mínimo e máximos atuais do sistema, estimando um aumento de 30% no consumo de água na região de interesse, de forma a compensar os problemas de abastecimento atuais e prevendo um aumento populacional para os próximos dez anos, foram escolhidas as seguintes duas opções de bombeamento: 1) apenas uma bomba marca Imbil, modelo INI 150-400, acionado por motor elétrico de potência nominal de 175 cv; e 2) duas bombas operando em paralelo marca Imbil, modelo INI 80-200, acionadas por motores de potência nominal de 100 cv. Para cada uma das opções de bombeamento, já está se considerando a aquisição de um equipamento reserva.

Com base nas medições efetuadas e nas duas opções identificadas foram obtidas as curvas de custo por m<sup>3</sup> mostradas na Figura 8.

Na Figura 8 se verifica que a proposta 1 (uma só bomba INI 150-400) apresentou menor custo por volume de água bombeado, com um custo por m<sup>3</sup> variando ao longo do dia entre R\$ 0,044 e R\$ 0,063. Já o sistema atual com três bombas em paralelo teve um custo entre R\$ 0,060 e R\$ 0,098.

A mesma estimativa feita na planilha de cálculo para o sistema atual com três GMBs do custo mensal com EE (R\$ 16.044,96) é considerada para as duas opções de bombeamento. Ou seja, o custo mensal de EE para a opção com uma única bomba INI 150-400 é de R\$ 11.211,90,

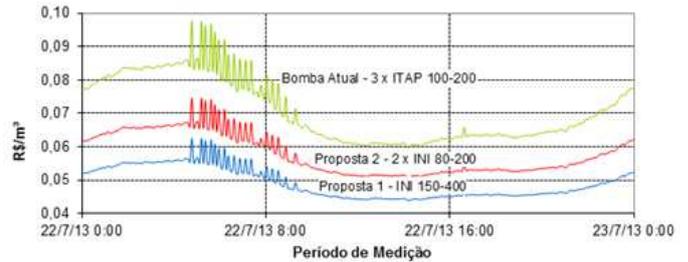


Fig. 8: Custo por volume de água bombeada.

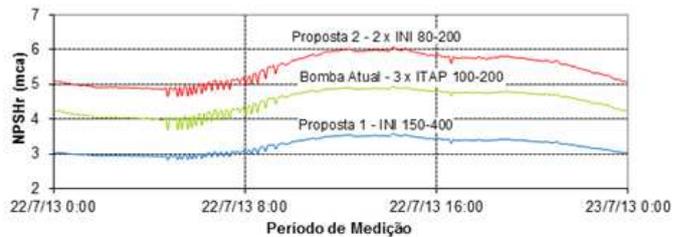


Fig. 9: Valores de NPSH requeridos por cada bomba.

enquanto que, para duas bombas INI 80-200 operando em paralelo é de R\$ 13.135,57.

Além dos resultados econômicos apresentados, também foram considerados como fatores de escolha os valores de NPSH requeridos por cada modelo de bomba, os quais são comparados na Figura 9. Este parâmetro hidráulico é um fator determinante devido à baixa altura de sucção existente entre o reservatório a montante e a linha do eixo da bomba, que fica em torno de 2 a 2,5 metros abaixo do nível da água.

Verifica-se na Figura 9 que a bomba INI 150-400 (proposta 1), que já havia demonstrado os melhores resultados econômicos, também apresentou valores mais baixos de NPSH. Com isso, o sistema com uma única bomba INI 150-400 foi simulado no software Epanet, para verificar se haveria melhorias no abastecimento. As figuras 10 e 11 ilustram os resultados obtidos com o software Epanet.

Nota-se que, no sistema atual, existem diversas regiões com problemas de abastecimento (regiões em vermelho), onde as pressões ficam abaixo do valor de 10 mca no horário de maior consumo. Já com a utilização da bomba INI 150-400, verifica-se uma melhora significativa nos valores de pressão e, conseqüentemente, são sanados os problemas de abastecimento. Nota-se, entretanto, que durante os horários de baixo consumo (madrugada), houve um aumento substancial nos valores de pressão (regiões em azul claro e escuro),

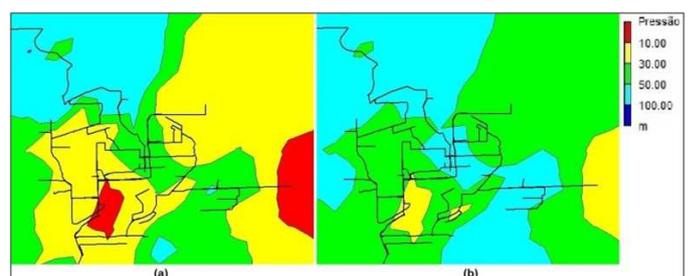


Fig. 10: Sistema Santa Fé no horário de maior consumo: (a) sistema atual; e (b) uma só bomba INI 150-400.

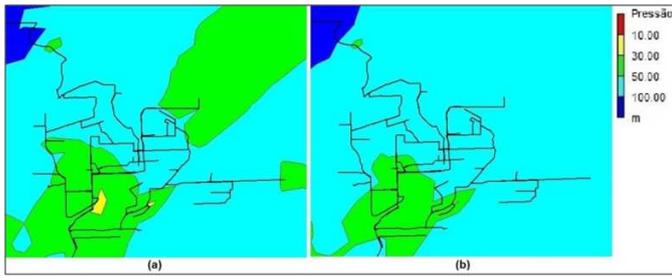


Fig. 11: Sistema Santa Fé no período de menor consumo: (a) sistema atual; e (b) uma só bomba INI 150-400.

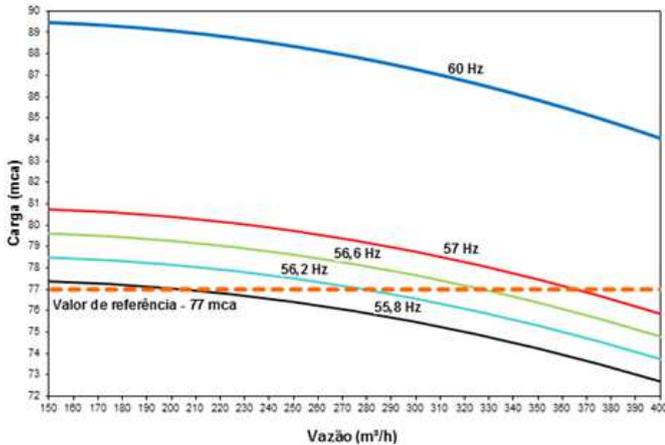


Fig. 12: Curvas de carga da bomba INI 150-400 com a variação da frequência.

proporcionando um desperdício de energia e aumentando a probabilidade de rompimento das tubulações. Estes valores podem ser controlados através do uso do inversor de frequência, o qual, através de uma lógica de controle procura manter a pressão de saída do bombeamento constante.

Utilizando as leis de similaridade aplicadas às bombas centrífugas [26] foram geradas as curvas de trabalho da bomba INI 150-400 variando-se a velocidade de rotação com o uso do inversor de frequência. As curvas de carga deste bombeamento são ilustradas na Figura 12.

Para os pontos de trabalho atuais deste sistema de bombeamento e considerando o escorregamento do motor, verificou-se que as frequências de trabalho deste GMB, variam na faixa de 55,8 Hz (1660 RPM) a 57 Hz (1695,75 RPM), mantendo constante o diferencial de pressão no valor de 77 mca. Este valor foi escolhido por ser o maior valor médio atingido pelo sistema atual no horário de menor consumo (Figura 7), o que garantirá o abastecimento da região.

É importante ressaltar que, para determinar com maior exatidão o valor de pressão a ser mantido constante, deve ser feito um estudo hidráulico bastante aprofundado de todo o sistema, o qual poderá indicar a utilização de válvulas redutoras de pressão em alguns pontos da tubulação. Como o foco deste trabalho é demonstrar os ganhos que o uso do inversor de frequência pode trazer, foram utilizados os valores obtidos mantendo o valor de 77 mca constante, o qual poderá ser alterado mediante o referido estudo. Na Figura 13 comparou-se o custo específico por volume bombeado como sistema trabalhando a 60 Hz (sem controle de pressão) e

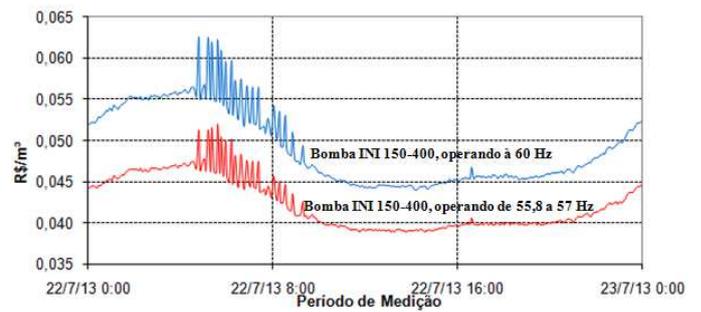


Fig. 13: Custo por volume de água bombeada, com e sem controle de pressão.

variando a frequência para efetuar o controle de pressão (77 mca).

Observa-se que a faixa de custo por volume de água bombeado que era de R\$ 0,044 a R\$ 0,063 reduziu para R\$ 0,039 a R\$ 0,052. Além disso, com base nas medições realizadas para uma semana, se projetou para um mês o custo da EE, controlando ou não a pressão de bombeamento. Os resultados dessa projeção são os seguintes: R\$ 11.211,90 para a bomba INI 150-400, não controlando a pressão, ou seja, operando a 60 Hz; e R\$ 9.685,79 para a bomba INI 150-400, controlando a pressão, ou seja, operando entre 55,8 e 57 Hz. Portanto, verifica-se que controle de pressão efetuado através do uso de inversor de frequência trará para o sistema de bombeamento uma economia mensal estimada de R\$ 1.526,11.

Uma nova simulação no Epanet foi feita a fim de verificar as melhorias no abastecimento ocasionadas pelo controle da velocidade de rotação. Entretanto, foi observado que na situação geral de abastecimento no período de menor consumo, não houve uma redução considerável nos valores de pressão, pois praticamente todo o sistema, durante a madrugada, apresentou valores acima de 50 mca. Portanto, verifica-se com este fato que o valor de frequência mínima calculado para este sistema (55,8 Hz) ainda mantém grande parte do mesmo com pressões bastante elevadas. Por isso, conforme já foi citada anteriormente, a realização de um estudo hidráulico mais aprofundado nesta região pode proporcionar ganhos com eficiência energética ainda maior, alterando-se o valor de pressão de referência do inversor ou analisando-se a utilização de válvulas redutoras de pressão, reservatórios intermediários, dentre outras soluções para diminuir os pontos com elevadas pressões.

De acordo com a análise técnica efetuada até aqui, a escolha recaiu sobre o sistema de bombeamento utilizando a bomba modelo INI 150-400 e efetuando controle de pressão através do uso de inversor de frequência. A seguir é apresentada a análise econômica deste projeto, pois são necessários alguns investimentos para a sua implantação. Na Tabela I são apresentados os materiais e equipamentos necessários para a implementação do projeto de eficiência energética na EBAT Santa Fé. É importante ressaltar que, para fins de manutenção, serão adquiridos dois sistemas de bombeamento, um para ser “reserva” do outro.

Além dos ganhos mensais obtidos com a redução do consumo de EE através da implementação do projeto de eficiência energética, também será reduzida a demanda de energia que é contratada junto à concessionária de EE, pois

TABELA I: Lista de equipamentos e materiais para a implementação do projeto

Material ou equipamento	Valor médio (R\$)*
Sistema de bombeamento composto por:	
– Duas bombas centrífugas INI 150-400;	
– Dois motores elétricos de 175 cv de potência nominal;	157.723,80
– Duas bases estruturais.	
Sistema de acionamento composto por:	
– Dois inversores de frequência de 175 cv de potência nominal;	
– CLP	108.626,05
– Sensores de pressão	
– Quadro elétrico e demais componentes tais como: contadores, CLP, cabos, etc.	
Materiais hidráulicos para adequação da tubulação de sucção e recalque:	74.116,68
– Válvulas borboleta;	
– Conexões de ferro fundido.	
Mão de obra para instalação	15.600,00
<b>Valor total do investimento</b>	<b>356.066,53</b>

TABELA II: Redução de consumo de EE e demanda de energia

Reduções de custo	Valor total (R\$)
Redução mensal no consumo de EE obtido pela troca das bombas ITAP 100-200 pela bomba INI 150-400	4.833,06
Redução mensal no consumo de EE obtido pelo uso do inversor de frequência para controle da rotação da bomba INI 150-400.	1.526,11
Redução mensal da demanda contratada de EE:	
– Demanda com as 3 bombas ITAP 100 – 200 = 142 kW	809,19
– Demanda com a bomba INI 150 – 400 = 103 kW	
<b>Redução de custos mensal</b>	<b>7.168,36</b>

os equipamentos novos, por possuírem maior rendimento, demandarão menor potência consumida.

A Tabela II apresenta os resultados obtidos com a redução de consumo de EE e demanda de energia.

Utilizando como critério de análise a TMA de 15% ao ano e a vida útil do projeto em dez anos, foi determinado o fluxo de caixa para o investimento necessário para a troca do sistema de bombeamento da EBAT Santa Fé e utilização de inversor de frequência para controle da velocidade rotação. A Tabela III apresenta este fluxo de caixa, na qual foram inseridos os valores de investimento mostrados na Tabela I, retorno calculado a partir dos valores da Tabela II e os fluxos de caixa descontado. Os valores do fluxo de caixa descontado utilizam a taxa de juros do projeto de modo a considerar os aumentos das grandezas monetárias durante a análise do projeto.

Os resultados dos indicadores econômicos obtidos com a análise do fluxo de caixa mostrada na Tabela 3 são os seguintes:  $TMA$  (aa) = 15%;  $VPL$  = R\$ 75.649,55;  $TIR$  = 20,38%; e  $TRC$  descontado = 6,94 anos.

É importante salientar na análise econômica que de forma a aumentar a confiabilidade do sistema de abastecimento, foi considerada a aquisição de dois conjuntos de bombeamento, um para ser reserva do outro. Este fato fez com que duplicasse o valor do investimento, não produzindo nenhum benefício econômico. Por isso, caso não fosse considerado o equipamento reserva, os indicadores econômicos seriam ainda mais atraentes. Além disso, não foram considerados os

TABELA III: Fluxo de caixa do projeto

Ano	Invest. R\$	Retorno R\$	Fluxo de caixa desc. R\$	Saldo desc. R\$
0	356066,53		<b>-356.066,53</b>	<b>-356.066,53</b>
1		86.020,32	74.800,28	<b>-281.266,25</b>
2		86.020,32	65.043,72	<b>-216.222,53</b>
3		86.020,32	56.559,76	<b>-159.662,77</b>
4		86.020,32	49.182,40	<b>-110.480,38</b>
5		86.020,32	42.767,30	<b>-67.713,08</b>
6		86.020,32	37.188,96	<b>-30.524,12</b>
7		86.020,32	32.338,22	<b>1.814,11</b>
8		86.020,32	28.120,20	<b>29.934,30</b>
9		86.020,32	24.452,34	<b>54.386,65</b>
10		86.020,32	21.262,91	<b>75.649,55</b>

aumentos anuais no custo da EE que ocorrerão nos próximos dez anos. Este fato também tornaria o investimento mais atraente, pois o retorno seria ainda maior. Por se tratarem de valores bastante irrisórios se comparados ao retorno financeiro, não foram considerados os custos de manutenção deste sistema.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostas duas melhorias no sistema de bombeamento municipal Santa Fé, as quais tiveram por objetivo solucionar o problema de abastecimento da referida região e tornar este sistema de bombeamento mais eficiente em termos de consumo de EE.

A partir das medições efetuadas em campo e das simulações realizadas em planilhas de cálculo e no software Epanet, verificou-se que a possível troca das três bombas atuais modelo ITAP 100-200 por apenas uma bomba modelo INI 150-400, além de solucionar o problema de abastecimento do sistema Santa Fé em horários de pico de consumo, reduzirá os custos mensais com consumo de EE e demanda contratada em aproximadamente R\$ 5.642,25. Do mesmo modo, o uso do inversor de frequência para controlar a velocidade de rotação deste sistema, e desta forma controlar o valor de pressão da saída do bombeamento, trará uma economia mensal estimada em R\$ 1.526,11. Somado ao aspecto econômico, esta segunda melhoria reduzirá os valores elevados de pressão ocorridos em alguns pontos do sistema durante o período da madrugada, tornando o sistema de bombeamento mais eficiente e diminuindo a possibilidade de rompimento de tubulações.

Além de ser viável tecnicamente, verificou-se que o projeto a ser implantado na EBAT Santa Fé também é viável economicamente, pois em dez anos de vida útil, o seu  $VPL$  ficou positivo (R\$ 75.649,55), a sua  $TIR$  (20,38% aa) foi superior a  $TMA$  proposta pelo PROCEL Sanear e o Tempo de Retorno de Capital Descontado (Payback descontado) é inferior a sete anos.

Por fim, pode-se constatar que a utilização do software Epanet, somada ao uso das planilhas geradas neste trabalho, se configurou como importante ferramenta de análise de projeto em sistemas de bombeamento, a qual pode ser aplicada em outros sistemas com características semelhantes ao estudado.

#### V. BIBLIOGRAFIA

- [1] C. d. P. 23 de janeiro de 2012, “CEEE confirma novo recorde de consumo de energia no RS,”

- <http://www.correiodopovo.com.br/noticias/?Noticia=384600> Acesso em: 22 mar. 2013.
- [2] R. Guimarães, “Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2008.
- [3] C. S. Junior, “Operação do conjunto bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica,” Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2006.
- [4] Eletrobras, “Apresentação PROCEL Sanear,” <http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?TeamID=17B0348E-BC5F-44B2-8FB4-6A9BEEF33020> Acesso em: 26 mar. 2013, 2006.
- [5] H. Gomes, *Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos*, ABES, Rio de Janeiro, 2005.
- [6] C. Arenhardt, “Definição da velocidade ótima para bombas de fluxo em sistemas de abastecimento,” Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo - RS, 2008.
- [7] L. Lorenzi, “Eficientização energética de uma instalação de bombeamento,” Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul - RS, 2009.
- [8] A. Debeneditis, B. Haley, et al., “Operational energy-efficiency improvement of municipal waterpumping in california,” *Energy*, vol. 53, pp. 237–243, 2013.
- [9] B. Eleotero, “Redução de custos com energia elétrica em sistemas de bombeamento: estudo de caso sistema de abastecimento de água de capinzal/ouro - sc,” Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2008.
- [10] L. A. F. Souza, D. T. Carmo, et al., “Utilização do inversor de frequência como agente no aumento da eficiência energética em sistemas de bombeamento,” in *Anais do VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, Poços de Caldas - MG, 2008.
- [11] E. Polezi, “Eficiência energética em sistemas de bombeamento: uso do variador de frequência,” Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2010.
- [12] G. Berge, D. Gontermann, and M. Bartels, “Improving efficiency and quality of a steel production by using centrifugal pumps with retrofitted integrated speed control,” in *6th International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Sept 2009, vol. 2, pp. 511–518.
- [13] T. Ahonen, J. Kortelainen, et al., “Generic unit process functions set for pumping systems,” in *7th International Conference eemods '11: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Sept. 2011, pp. 643–654.
- [14] W. Livoti, “Pumping system energy efficiency / performance - you cannot manage or justify what you cannot measure,” in *7th International Conference eemods '11: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Sept. 2011, pp. 655–667.
- [15] T. Ahonen, J. Ahola, et al., “Energy-efficiency-based recommendable operating region of avsd centrifugal pump,” in *7th International Conference eemods '11: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Sept. 2011, pp. 691–696.
- [16] S. Santos, C. Ferreira, et al., “The importance of calculating the efficiency of pumps in systems with adjustable speed drive,” in *8th International Conference eemods '13: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Oct. 2013.
- [17] L. Cordeiro, R. Aquino, et al., “An artificial intelligence approach to the energy efficiency improvement of a pump system,” in *8th International Conference eemods '13: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Oct. 2013.
- [18] T. Ahonen, J. Tamminen, et al., “Sensorless frequency-converter-based methods for realizing life-cycle cost efficient pumping and fan systems,” in *8th International Conference eemods '13: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, Oct. 2013.
- [19] F. Machado, “Eficiência energética de conjuntos motobomba,” in *Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, Vitória - ES, Oct. 2007.
- [20] J. Viholainen, J. Kortelainen, et al., “Energy efficiency in variable speed drive (VSD) controlled parallel pumping,” in *6th International Conference eemods '09: Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, 519–529, Sept. 2009, vol. 2, pp. 519–529.
- [21] M. Tsutiya, *Abastecimento de água*, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 3 edition, 2004.
- [22] M. Vilanova, and J. Balestieri, “Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 701–714, 2014.
- [23] B. Coelho, and A. Andrade-Campos, “Efficiency achievement in water supply systems - A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 59–84, 2014.
- [24] M. Salvino, “Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- [25] A. Gomes, *Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água*, vol. 5, Ministério das Cidades, Brasília, 2007.
- [26] I. Karassik, *Pump Handbook*, McGrawHill, New York, 2 edition, 1976.



**Rafael Fernando Dutra** possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul (2013). Atualmente é Engenheiro Mecânico na Prefeitura Municipal de Caxias do Sul atuando na área de gestão da frota de veículos e máquinas do Município. Tem experiência na área de projeto, simulação computacional, instalação e manutenção de sistemas de abastecimento de água e esgoto (bombas, válvulas, tubulações e sistemas de tratamento).



**Carlos Roberto Altafini** possui graduação em Engenharia Operacional Habilitação “Máquinas” pela Universidade de Caxias do Sul (1975), mestrado em Engenharia Mecânica – Termodinâmica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1980) e doutorado em Energética pela Università degli Studi di Pádova/Itália (1998). Atualmente é Professor Titular da Universidade de Caxias do Sul. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica com ênfase em Sistemas Térmicos e Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética de sistemas motrizes, simulação de sistemas de conversão de energia, análise de processos de combustão, gaseificação e pirólise e aplicação de combustíveis fósseis e renováveis em equipamentos térmicos.