

## **XI-036 - OTIMIZAÇÃO EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA EM SERIES DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA BUSCANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**Hudson Tiago dos S. Pedrosa<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Mestre em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC/UFPE). Analista de Saneamento da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

**Jose Almir Cirilo<sup>(2)</sup>**

Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com Mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico do Agreste.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Oscar Pinto, 300, Apart. 201 – Casa Amarela - Recife - PE- CEP: 52051-350 - Brasil - Tel: (81) 98182-2335 - e-mail: [huksontiago@compesa.com.br](mailto:huksontiago@compesa.com.br)

### **RESUMO**

O crescimento da população vem demandando água em quantidades maiores, o que obriga as empresas de saneamento a encontrarem alternativas técnicas que sejam viáveis economicamente para o déficit de água das áreas urbanas. Na sua maioria essas alternativas modificam o comportamento operacional do sistema de bombeamento, geralmente aumentando o tempo de bombeamento e/ou aumentando os números de conjuntos motor-bomba em funcionamento. Os conjuntos elevatórios são responsáveis pela maior parte do consumo de energia elétrica e embora estes equipamentos sejam necessários para transportar a água através dos sistemas e garantirem a confiabilidade do abastecimento de água, o grande consumo de energia elétrica dificulta o equilíbrio financeiro das empresas de saneamento. Com esta preocupação, o presente estudo apresenta uma otimização na rotina operacional das estações elevatórias, buscando a operação ótima que minimize o custo com energia elétrica e atenda os limites físicos e operacionais envolvidos no sistema elevatório. Aplicando-se a plataforma de otimização em elevatórias reais, obteve-se uma redução na potência utilizada de 20% se comparada à potência nominal dos conjuntos motor-bomba das estações elevatórias, originando economia de aproximadamente 6% no custo com energia elétrica das unidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização Operacional, Eficiência Energética.

### **INTRODUÇÃO**

A demanda da água no meio urbano cresce aceleradamente, acompanhando o aumento da população, das indústrias e de todas as atividades que utilizam a água em algum ponto de seu processo. Logo os sistemas de abastecimento de água ficam defasados ao passar dos anos, ultrapassando a estimativa de demanda do projeto inicial.

Muitas vezes, estas mudanças afetam a operação das estações elevatórias, aumentando o custo de energia elétrica. Estima-se que 2,5% de toda energia elétrica produzida no Brasil seja usado para manter as empresas de saneamento operando (ALBANEZE, 2012).

Nos Estados Unidos o saneamento é responsável por cerca de 3 a 4% do consumo total de energia do país. Esses sistemas são responsáveis por 30 a 40% do consumo total de energia dos governos municipais (EPA, 2012 apud BEHANDISH, 2014).

No entanto, o grande consumo de energia elétrica dificulta o equilíbrio financeiro das empresas de saneamento, já que este passivo é a segunda maior despesa das empresas e 90% desta energia elétrica devem-se às estações elevatórias (TSUTIYA, 2004).

A preocupação quanto à possibilidade da falta de suprimento de energia elétrica remete à necessidade de se avaliar de que maneira esse tipo de energia vem sendo utilizada. Isso torna evidente que o problema não se limita apenas à necessidade de gerar cada vez mais energia, mas, primeiramente, a eliminar desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo (SOUSA, 2010).

A energia elétrica é necessária para transportar a água através dos sistemas, por isto, tão importante quanto as medidas de diminuição do consumo de água, são as ações operacionais no processo de melhoria dos sistemas de distribuição (GOMES, 2005). Logo implantações de programas e medidas que reduzem o custo com energia é de suma importância para a saúde financeira das empresas que operam os sistemas de água e esgoto.

Um equipamento encontrado para a redução no consumo de energia elétrica é a utilização de inversores de frequência para o acionamento e operação dos conjuntos motor-bomba. O controle de vazão através do domínio da velocidade do rotor dos motores em substituição aos métodos de controle de vazão tradicionais, além de diminuir o desgaste mecânico dos equipamentos envolvidos, permite encontrar a operação ótima que minimize o custo com energia.

A utilização de softwares como ferramenta na gestão operacional de sistemas de distribuição de água tem se tornado cada vez mais frequente, visto que os mesmos nos fornecem uma visão sistêmica do abastecimento de água e o acompanhamento contínuo dos parâmetros hidráulicos.

Desta forma, o presente estudo apresenta uma plataforma para a otimização visando determinar a operação ótima ao longo das 24 horas utilizando um inversor de frequência nas estações elevatórias de água, de forma a minimizar os custos de energia elétrica nestas estações.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A ferramenta de otimização utilizada por este trabalho foi o Evolutionary Solver, baseado em algoritmos genéticos, presente no Excel. Um algoritmo genético é uma técnica de busca utilizada na ciência da computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização. Este algoritmo foi fundamentado principalmente pelo americano John Henry Holland.

## ELABORAÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO

O objetivo a ser alcançado é a minimização dos custos energéticos do sistema de abastecimento de água, com o foco em estações elevatórias de água bruta em sistemas com elevatórias arrançadas em séries, buscando a operação ótima para as bombas no decorrer das 24 horas do dia utilizando a variação de velocidades de rotação dos motores que compõem as elevatórias.

O custo energético de uma elevatória é dado pela multiplicação da potência energética pelo tempo de uso dos equipamentos (conjunto motor-bomba) e pela tarifa da concessionária.

Assim:

$$C_e = n^e . P_e . t . T \quad (1)$$

Onde;

$$P_e = \frac{P_h}{\eta} \quad (2)$$

$$P_h = \gamma . Q . H_{man} \quad (3)$$

$C_e$ : Custo de energia consumida no tempo t;

$n^e$ : Numero de bombas em funcionamento;

$P_e$ : Potência elétrica;

$P_h$ : Potência hidráulica;

$\eta$ : Rendimento do conjunto motor-bomba;

Q: Vazão;

$\gamma$ : Peso específico do líquido;  
Hman: Altura manométrica;  
t: tempo de operação da bomba;  
T: tarifa energética.

Para os conjuntos motor-bomba que contemplam o equipamento de controle de vazão, inversores de frequência, a potência se altera de acordo com a variação da velocidade da rotação do motor conforme a lei de similaridade entre motores. Então a potência do conjunto motor-bomba é representada por:

$$P_2 = P_n \cdot \left( \frac{n_2}{n_n} \right)^3 \quad (4)$$

Onde:

P2: Potência após a variação da velocidade

Pn: Potência nominal do motor

nn: velocidade de rotação nominal do motor

n2: velocidade de rotação final do motor.

Assim, para avaliação do custo total da estação elevatória, deve ser considerado o consumo das bombas envolvidas somado com o conjunto motor-bomba com o inversor de frequência, como também, diferenciando os horários de uso ao longo do dia, devido a variação da tarifa energética da concessionária:

$$\begin{aligned} MinCE = n^o \cdot P_e \left( \sum_{i=1}^{17} t_i \cdot T_1 + \sum_{i=18}^{24} t_i \cdot T_2 + \sum_{i=22}^{24} t_i \cdot T_1 \right) + \left( \sum_{i=1}^{17} t_i \cdot T_1 \cdot P_n \cdot \left( \frac{n_2}{n_n} \right)^3 + \right. \\ \left. \sum_{i=18}^{24} t_i \cdot T_2 \cdot P_n \cdot \left( \frac{n_2}{n_n} \right)^3 + \sum_{i=22}^{24} t_i \cdot T_1 \cdot P_n \cdot \left( \frac{n_2}{n_n} \right)^3 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

CE: Custo Energético de operação em um dia (R\$)

nº: numero de bombas ligadas sem inversor de frequência (kWh)

Pe: potência energética da bomba (kWh)

t: tempo de operação da bomba(h)

T1: tarifa energética fora horário de ponta (R\$/kWh)

T2: tarifa energética no horário de ponta (R\$/kWh)

nn: velocidade nominal de rotação do motor

n2: velocidade de rotação do motor com o inversor de frequência

## VARIÁVEIS DE DECISÃO E DE ESTADO

A variável de decisão é a variação da velocidade da rotação dos motores das estações elevatórias ao longo do dia, expressa na segunda parcela da função objetivo. Então, a notação da variável será:

$n_{2i}$  : velocidade de rotação do motor com o inversor de frequência no período de tempo i.

Sendo i inteiro variando de  $1 \leq i \leq 24$ .

Há no modelo duas variáveis de estado: o nível de partida do poço de sucção dos conjuntos motor-bomba da elevatória e o nível inicial do reservatório de chegada de recalque da elevatória, no início da simulação. Assim a notação dessas variáveis será:

hr: Nível inicial da água do reservatório

## FORMULAÇÃO DAS RESTRIÇÕES

O Nível de partida dos reservatórios tem que estar entre o nível mínimo e o máximo de operação do mesmo. Esta restrição não permite que o modelo inicie a simulação com o nível do poço fora do intervalo de operação, assim:

$$hr(\text{inicial}) \geq hr(\text{mínimo}) \quad (6)$$

$$hr(\text{inicial}) \leq hr(\text{máximo}) \quad (7)$$

Onde:

hr(inicial): nível inicial dos reservatórios, (m);

hr(mínimo): nível mínimo de operação dos reservatórios, (m);

hr(máximo): nível máximo de operação dos reservatórios, (m);

O poço de sucção tem seu nível mínimo de operação como restrição, uma vez que o mesmo não pode ser inferior a este mínimo para evitar a cavitação nos conjuntos CNBs. Esta restrição também se aplica ao reservatório de chegada, para evitar entrada de ar na tubulação. Ainda para os reservatórios, impõe-se como restrição o nível máximo de operação, de modo a evitar extravasamento do reservatório, evitando perda real de água do sistema.

O nível a cada hora do dia nos reservatórios é dado pela soma do volume inicial do reservatório, mais o volume de entrada menos o volume de saída na hora  $i$ , todos dividido pela área do poço de sucção:

$$hps(mínimo) \leq hr(i) = \frac{h_r(i-1)}{1000 \cdot Ar} + \left( \frac{Qchegada(i) \cdot 60 \cdot 60}{1000 \cdot Ar} \right) - \left( \frac{Qsaída(i) \cdot 60 \cdot 60}{1000 \cdot Ar} \right) \leq hps(máximo) \quad (8)$$

Onde:

hr(i): nível da água dos reservatórios na hora  $i$ , (m);

h(i-1): nível dos reservatórios na hora anterior à hora  $i$ , (m);

Qchegada(i): Vazão de chegada nos reservatórios na hora  $i$ , (L/s);

Qsaída(i): Vazão de saída nos reservatórios na hora  $i$ , (L/s);

Ar: Área do reservatório em planta, (m²);

$i$ : instante ao longo do dia, (hora),  $1 \leq i \leq 24$ .

hr(máximo): Nível máximo de operação do poço de sucção, (m);

## CONJUNTO DE RESTRIÇÕES DE PERIODICIDADE

O nível de água no início do período, início do dia à 0 hora, dos reservatórios devem ser iguais aos níveis do final do dia, às 24 horas. Isto garante a existência de um padrão de operação da elevatória ao longo do dia. O modelo considera-se uma margem de diferença de 10% tanto para mais como para menos entre os níveis inicial e o final do dia, assim esta restrição torna-se:

$$hr(inicial)/hr(i) \leq 1,10 \quad (9)$$

$$hr(inicial)/hr(i) \geq 0,90 \quad (10)$$

hr(inicial): Nível do reservatório inicial, (m);

hr(i): Nível do reservatório na hora  $i$ , (m);

$i$ : instante ao longo do dia, (hora),  $i=24$ ;

## ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

De acordo com a teoria de semelhança entre máquinas, quando a velocidade do motor da bomba é reduzida, há uma diminuição na altura manométrica de alcance deste conjunto. Esta redução não pode ocasionar a diminuição da altura manométrica necessária para o recalque. Assim têm-se:

$$H' = H_n \cdot \left( \frac{n_2}{n_n} \right)^2 \geq z_2 - z_1 + j \cdot L \quad (11)$$

Onde;

Hman: altura manométrica, m;

H': altura manométrica com o inversor de frequência, m;

$n_n$ : velocidade de rotação do motor nominal, rpm;

$n_2$ : velocidade de rotação do motor com o inversor de frequência, rpm;

$z_2$ : cota do reservatório de chegada, m;

$z_1$ : cota da estação elevatória, m;

$J$ : perda de carga unitária, m/m;

$L$ : comprimento da adutora, m;

Admite-se variar a velocidade do rotor dos motores buscando a operação ótima para as bombas no decorrer das 24 horas do dia. O modelo divide o dia em cinco períodos para variar a velocidade e considera o horário de pico de energia elétrica das 16:00 as 20:00 horas.

## CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

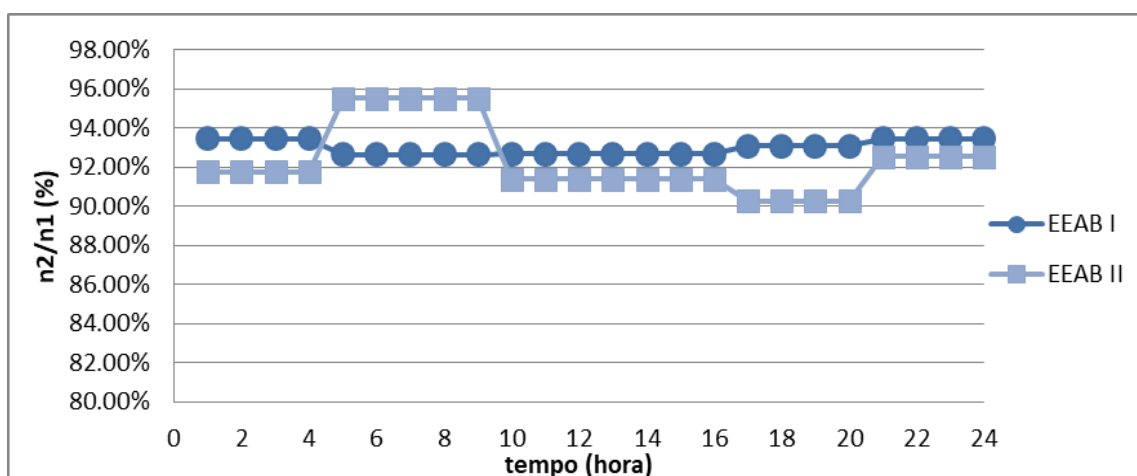
O modelo foi desenvolvido para as elevatórias de água bruta onde se tem as maiores despesas com energia elétrica das empresas de saneamento. Assim entre as estações elevatórias com maiores custos com a tarifa elétrica da empresa foram escolhidas os sistemas elevatórios de Jucazinho e do Prata para a aplicação do modelo de otimização de operação.

O Sistema Adutor de Jucazinho e Prata têm como principais finalidades o abastecimento de água para 23 localidades do Agreste e Zona da Mata Norte. Os SAA Jucazinho e Prata contem seis das dez elevatórias de maior despesa com energia elétrica.

## RESULTADOS

### RESULTADOS EEAB I E EEAB II DE JUCAZINHO

Para a EEAB I, observou-se que a variação da velocidade foi pequena, variando de 92,6% a 93,5%. já para a EEAB II o modelo apresentou como resultados ótimos uma maior variação de velocidade, entre 90,3 A 95,5% (Figura 1).



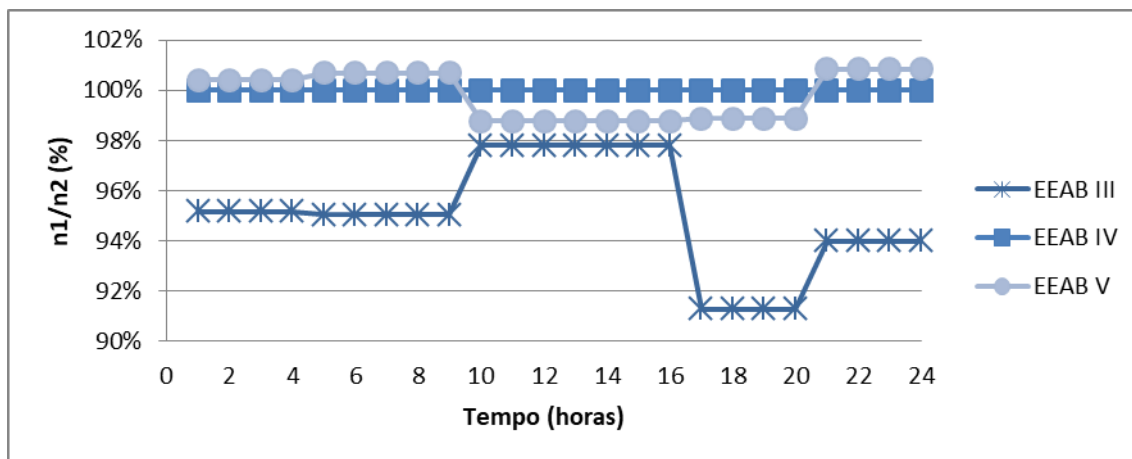
**Figura 1 – Variação da velocidade angular determinada para os motores da EEAB I e II**

O modelo obteve a maior redução de velocidade na EEAB II no horário de maior custo energético, o que não ocorreu na estação EEAB I. Isso se explica: sendo o sistema de estações elevatórias em serie, o modelo apresentou a operação ótima para o sistema integrado. Se reduzisse mais a velocidade da estação EEAB I no horário de pico de energia, a simulação ultrapassaria as restrições dos níveis dos reservatórios. Provavelmente o poço de sucção da EEAB I extravasaria e o poço de sucção da EEAB II atingiria níveis menores, ocasionando um aumento na rotação nos demais horários ao longo do dia, de modo a compensar o rebaixamento do nível neste horário.

Os custos com energia registrados na operação da elevatória EEAB I e EEAB II de Jucazinho são de aproximadamente R\$ 12.277,92 e R\$ 15.915,82 por dia, respectivamente. Com a rotina proposta pelo modelo os custos passariam a ser respectivamente de R\$ 11.077,44 e R\$ 14.205,59 por dia, proporcionando uma economia de R\$ 1.200,48 na EEAB I e de R\$ 1.710,23 reais por dia na EEAB II. Considerando o sistema a economia é de R\$ 2.910,71 por dia.

## RESULTADOS EEAB III, EEAB IV E EEAB V DE JUCAZINHO

Para as EEAB III, IV e V do sistema de Jucazinho o modelo apresentou os resultados abaixo.



**Figura 2 - Variação da velocidade Angular do rotor EEAB III, EEAB IV e EEAB V**

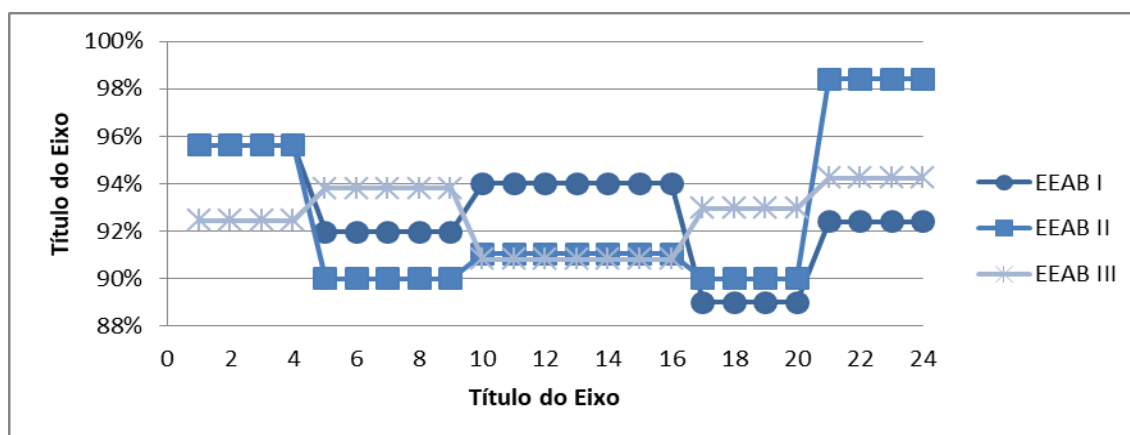
Não foi possível otimizar a variação de velocidade na estação elevatória EEAB IV, pois qualquer diminuição da velocidade acarretaria em uma altura manométrica inferior à necessária para a realização do recalque.

O custo de energia das elevatórias EEAB III, IV e V de Jucazinho atualmente é de R\$31.811,64 por dia. A estratégia proposta pelo modelo indica custo de R\$ 30.984,29 por dia, gerando economia de R\$ 827,35 reais por dia, o equivalente a R\$ 24.820,50 por mês. Para a elevatória EEAB IV não se obteve nenhuma economia, sendo inviável a instalação do inversor de frequência. Enquanto que para a EEAB V obteve-se pequena economia de apenas R\$1.156,50 por mês.

Concluindo, a economia total deste sistema tem seu maior peso a EEAB III, havendo a possibilidade de maior variação de velocidade nos motores.

## RESULTADOS EEAB I, EEAB II E EEAB III DO PRATA

A Figura 3 apresenta a variação das velocidades angulares dos rotores das bombas, para o sistema do Prata. Nesse caso a amplitude de variação das velocidades foi mais significativa que no caso anterior, como se pode observar valores de 89%, o que significa 11% de redução (comparada com a velocidade de rotação nominal).



**Figura 3 - Variação da velocidade Angular do rotor EEAB I, II e III**

O modelo não reduziu ao máximo a rotação da EEAB III, porém apresentou uma solução do sistema integrado, respeitando todas as restrições e o balanço de volume do sistema.

O custo de energia das elevatórias EEAB I, EEAB II e EEAB III do sistema Prata atualmente são de aproximadamente R\$ 40.148,00 por dia. Com a estratégia proposta pelo modelo o custo passaria a ser de R\$ 37.402,00 por dia. A economia diária seria de R\$ 2.745,00, o equivalente a R\$ 82.356,00 por mês em todo o sistema do Prata.

## DISCURSÕES

A tabela a seguir sintetiza a economia ponderada pelo modelo nas estações elevatórias utilizadas neste trabalho. Em média o modelo sinaliza uma economia de 6,47% somando todas as elevatórias envolvidas no estudo.

De acordo com o Relatório Mensal de Demanda, Consumo e Custo com Energia Elétrica da Companhia Pernambucana de Saneamento, em maio de 2015 as dez elevatórias com maior consumo demandaram um valor de R\$ 3.651.606,18 naquele mês. Se aplicada a rotina operacional proposta pelo modelo a economia seria aproximadamente de R\$245 mil/mês.

**Tabela 1 - Resumo de economia com energia para as estratégias propostas**

SISTEMAS	Custo atual(R\$/dia)	Custo otimizado(R\$/dia)	Economia(R\$/dia)	% de Economia
Jucazinho	60.005,38	56.267,32	3.738,06	6,23%
Prata	40.146,01	37.402,79	2.745,22	6,84%
TOTAL=	100.151,39	93.670,11	6.481,28	6,47%

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

O presente estudo discorre sobre a relevância da eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água, a importância de melhorar a eficiência em instalações elevatórias criando procedimentos de otimização que possam reduzir os custos operacionais relacionados à produção de água.

O estudo procura registrar que o controle de vazão através do domínio da velocidade do rotor dos motores em substituição aos métodos de controle de vazão tradicionais, além de diminuir o desgaste mecânico dos equipamentos envolvidos, é mais eficiente quanto à redução do consumo de energia elétrica.

Os resultados apresentados pelo modelo indicam economia na potência utilizada dos motores e no custo de energia, associados a baixa variação dos níveis e volumes dos reservatórios envolvidos dos sistemas elevatórios, o que proporcionaria também maior confiabilidade na continuidade da produção de água, como ganho adicional.

O estudo confirma que a redução na potência utilizada pelos conjuntos motor-bomba se forem instalados os inversores de frequência, será em média 20 %, comparada à potência nominal destes conjuntos.

A variação média da velocidade de rotação apresentada pelo modelo ao longo do dia ficou na ordem de 9 % da velocidade de rotação nominal dos rotores, refletindo em uma economia de também 9 % no custo com energia elétrica das estações elevatórias.

Além do potencial de economia dos valores apresentados acima ser relevante, há um ganho muito importante na sustentabilidade no uso dos recursos naturais, pelo que representam as questões da água e da energia para a sociedade em geral e para as empresas de saneamento em particular.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBANEZE, D. B. Análise do Consumo de Energia Elétrica com a Instalação de Um Inversor de Frequência no Sistema de Abastecimento de Água do Bairro Aero Rancho em Campo Grande – MS. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Ciência Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, 2012.
2. BEHANDISHA, Z.Y. W. Concurrent pump scheduling and storage level optimization using meta-models and evolutionary algorithms. Watertown - USA, 2014.
3. GOMES, H. P.. Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, p.114, 2005.
4. SOUSA, E. C. Inversor de Frequência e a sua Contribuição Para a Eficiência em Sistemas de Bombeamento. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2010.
5. TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e esgoto. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu - PR. 1997.
6. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, p.634, 2004.