

XII Simposio Iberoamericano Sobre Planificación de Sistemas de Abastecimiento y Drenaje

“AVALIAÇÃO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS EM CIDADES COM POPULAÇÃO FLUTUANTE”

Gustavo Meirelles Lima (1), Augusto Nelson Carvalho Viana (2), Renato Swerts Carneiro Dias Júnior (3)

(1) Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho – Itajubá – MG – CEP: 37500-903 – Brasil – Tel. (35) 3629-1625 – email: gustavo@soesco.com.br;

(2) Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho – Itajubá – MG – CEP: 37500-903 – Brasil – Tel. (35) 3629-1625 – email: augustonelsonviana@yahoo.com.br;

(3) Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho – Itajubá – MG – CEP: 37500-903 – Brasil – Tel. (35) 3629-1625 – email: renato@soesco.com.br.

RESUMO

Cidades turísticas sofrem com a grande variação da população na alta e baixa temporada. O sistema de abastecimento de água deve ser capaz de suprir a demanda máxima, mas também deve ser capaz de operar com boa eficiência nos períodos de baixo consumo. Estudos feitos com o objetivo de reduzir o consumo de energia destes sistemas devem levar em consideração estas variações. Neste trabalho será apresentado um estudo realizado no sistema de abastecimento de cinco cidades litorâneas do Rio de Janeiro: Cabo Frio, Arraial do Cabo, São Pedro da Aldeia, Iguaba Grande e Búzios. Foram estudadas as duas principais estações elevatórias do sistema.

Palavras-chave: eficiência energética, estações elevatórias, conjuntos motobombas.

ABSTRACT

Tourist cities suffer with great population change in high and low season. The water supply system must be able to meet peak demand, but also must be able to operate with good efficiency during periods of low consumption. Studies aiming to reduce energy consumption of these systems should take into account these variations. This work presents a study on the water supply system of five coastal cities of Rio de Janeiro: Cabo Frio, Arraial do Cabo, São Pedro da Aldeia, Iguaba Grande and Búzios. The two main pumping stations of the system were studied.

Key words: energy efficiency, pumping stations, centrifugal pumps.

SOBRE O AUTOR

Gustavo Meirelles Lima: Graduou-se em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde também obteve o título de Mestre em Engenharia da Energia. Atualmente é pesquisador do Grupo de Energia (GEN) da UNIFEI e engenheiro na S.O. ESCO, tendo como principais linhas de atuação: recursos hídricos, hidrometria, geração de energia, sistemas hidráulicos, uso racional de água e energia elétrica.

INTRODUÇÃO

O uso racional de água e energia em todos os setores produtivos da economia é indispensável para aumento da competitividade, desenvolvimento econômico e social e preservação do meio ambiente. No setor de saneamento esta premissa tem ganhado cada vez mais importância, já que seus dois principais insumos são exatamente água e energia. De acordo com Gomes (2012), cerca de 3 % da energia gasta no mundo é utilizada neste setor, e destes, 90 % é utilizada em estações elevatórias.

Existem diversas formas de se reduzir o consumo de energia em estações elevatórias. A primeira delas é a substituição dos conjuntos motobombas por equipamentos mais eficientes. Segundo a Europump (2007) cerca de 75 % dos conjuntos motobombas em operação estão superdimensionados em relação a demanda real, o que é uma prática comum, sendo justificada pela necessidade de uma margem de segurança, mas que acarreta queda de rendimento do conjunto, já que este irá operar fora do ponto ótimo.

Outra forma de reduzir o consumo de energia é através da setorização, conforme recomenda a NBR 12211 (1992). Com a setorização apenas os locais que estiverem em uma cota mais elevada utilizarão sistemas de bombeamento (boosters), enquanto que os mais baixos poderão ser atendidos por gravidade ou por um sistema de bombeamento de menor potência. Entretanto esta medida deve ser considerada na fase de projeto do sistema, já que após sua implantação, a divisão de setores torna-se mais complexa.

Outra alternativa que pode ser adotada em conjunto com a setorização é a utilização de 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*, onde há grande variação da vazão e pressão de acordo com a demanda. Porém a viabilidade técnica e econômica desta alternativa deve ser avaliada individualmente.

A redução do índice de perdas de um sistema, resultado de vazamentos nas tubulações, extravasamento de reservatórios e ligações clandestinas, também irá reduzir de maneira indireta o consumo de energia, já que será necessária uma vazão menor para atender a população. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

(SNIS, 2011), esta perda representa em média 40 % da água captada e tratada.

Lima et al (2011) mostram que a redução do bombeamento no horário de ponta também é uma alternativa interessante do ponto de vista econômico, já que a tarifa neste período chega a ser 4 vezes maior.

Por fim, a redução da perda de carga das tubulações também pode ser feita através de sua limpeza ou até mesmo da troca. Assim, a altura de elevação das bombas é reduzida e conseqüentemente a potência consumida também.

Todas estas alternativas devem ser avaliadas técnica e economicamente antes de serem implantadas. Neste contexto surge o problema encontrado em cidades turísticas, onde a população flutuante causa um grande impacto na operação do sistema.

Assim, neste trabalho será apresentado um estudo de caso realizado em um sistema de abastecimento de água de cinco cidades turísticas, onde avaliou-se a substituição dos conjuntos motobombas de duas estações elevatórias, considerando todas as variações impostas pela população flutuante.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Ensaio de Rendimento

O ensaio de rendimento de uma bomba centrífuga tem como objetivo principal avaliar suas condições de operação atuais. Durante a realização dos ensaios podem ser observados diferentes problemas como desgaste do equipamento (gaxetas, mancais, rolamentos), cavitação, perda de carga excessiva, operação fora do ponto nominal. Todos estes fatores irão afetar diretamente no rendimento do conjunto, ou seja, no consumo de energia da estação elevatória. Portanto é de fundamental importância saber as condições de operação dos conjuntos em suas diferentes configurações, a fim de determinar as melhores opções de operação, ou até mesmo propor a substituição dos conjuntos.

Para avaliar a operação do conjunto motobomba, é necessária a medição dos seguintes parâmetros, conforme estabelece a ISO 9906 (1999): vazão, pressão de entrada e saída, desnível entre os medidores de pressão e potência elétrica consumida, conforme mostra a Figura 1.

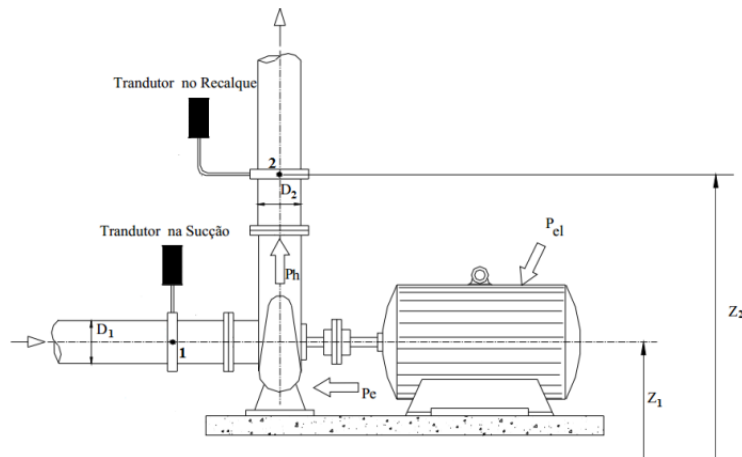


Figura 1. Medições necessárias para o ensaio de rendimento

Com estes dados, primeiramente calcula-se a altura total de elevação da bomba através da Equação 1 e em seguida, o rendimento do conjunto pela Equação 2.

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + z_2 - z_1 \quad (1)$$

$$\eta_c = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_{el}} \quad (2)$$

onde:

- H [m] – altura total de elevação;
- $p_1/\rho \cdot g$ [m] – pressão na entrada da bomba;
- $p_2/\rho \cdot g$ [m] – pressão na saída da bomba;
- v_1 [m/s] – velocidade na seção de medição de pressão na entrada da bomba;
- v_2 [m/s] – velocidade na seção de medição de pressão na saída da bomba;
- z_1 [m] – cota do medidor de pressão da entrada da bomba;
- z_2 [m] – cota do medidor de pressão da saída da bomba;
- η_c [%] – rendimento do conjunto motobomba;
- ρ [kg/m^3] – massa específica da água;
- g [m/s^2] – aceleração da gravidade;
- Q [m^3/s] – vazão bombeada;

É importante ressaltar que as diferentes configurações em paralelo também devem ser levadas em conta, já que nesta operação, seu ponto de operação é diferente, o que pode representar uma queda significativa de seu rendimento.

Curvas Características

Em casos onde há a impossibilidade de realização dos testes para levantamento das curvas, seja por dificuldades na instalação 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 Figura 2 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 .

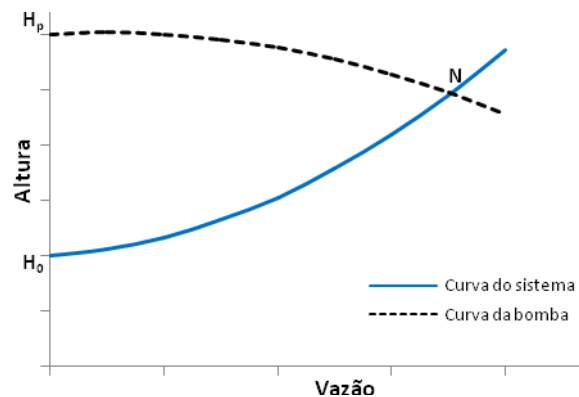


Figura 2. Estimativa das curvas características através da interpolação por três pontos

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:

$$H = a + b \cdot Q^2 \quad (3)$$

Da curva do sistema, observa-se que para a condição de vazão igual a zero, a Equação 3 resulta em:

$$H_0 = \quad (4)$$

e para a condição nominal:

$$b = \frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \quad (5)$$

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

$$H_s = H_0 + \left[\frac{(H_N - H_0)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (6)$$

Da mesma maneira, deduz-se que a curva da bomba de forma simplificada é expressa pela Equação 7.

$$H_B = H_p + \left[\frac{(H_N - H_p)}{Q_N^2} \right] \cdot Q^2 \quad (7)$$

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 das Equações 6 e 7, é possível estimar as curvas características da bomba e da instalação.

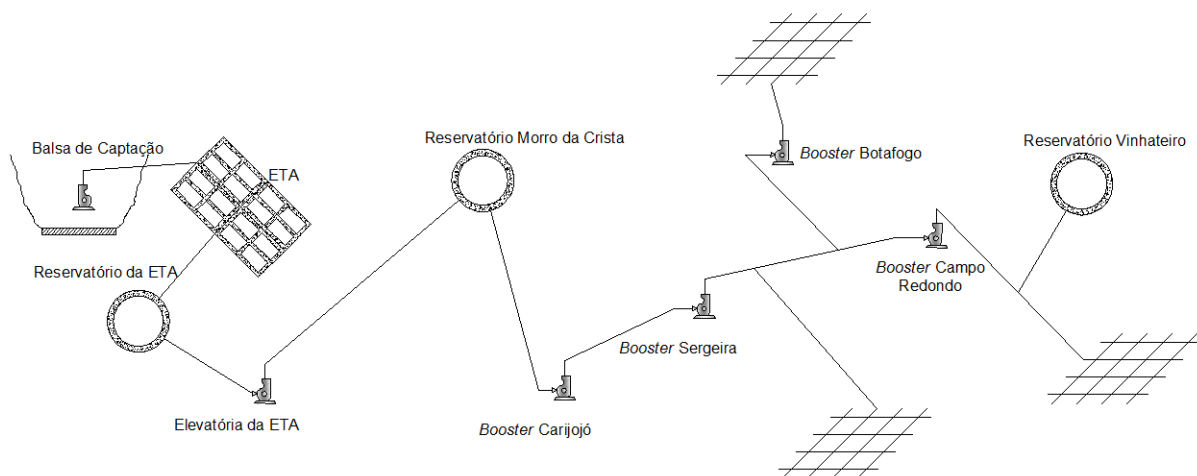


Figura 3. Esquema do sistema de abastecimento de água

Para realizar o estudo, foram selecionadas as duas principais estações elevatórias do sistema: a estação elevatória da ETA, com 3100 cv de potência instalada, e o booster Carijó, com 2550 cv.

Medição de Vazão

Para realizar a instalação do medidor de vazão ultrassônico é necessário um trecho reto, sem a influência de singularidades, com válvulas ou curvas. No caso do *booster* Carijó a instalação foi feita na linha de recalque para os conjuntos B, E e F, enquanto que para os conjuntos D, G, H e I utilizou-

METODOLOGIA

Descrição do Local

O sistema de abastecimento de água em estudo é responsável pelo fornecimento de água de cinco cidades: Cabo Frio, Arraial do Cabo, São Pedro da Aldeia, Búzios e Iguaba Grande. Neste sistema, a captação de água é feita na Lagoa de Juturnaíba, a aproximadamente 70 km de distância dos centros de consumo. A captação é feita através de 4 bombas de eixo vertical localizadas em uma balsa, que recalcam água até a estação de tratamento. A ETA possui um pequeno reservatório, de onde 6 bombas retiram água e recalcam até o reservatório Morro da Crista. Este reservatório se encontra em uma cota elevada, porém, devido à grande distância a ser percorrida, existem alguns *boosters* no caminho, até que a água chegue ao reservatório principal do Vinhateiro. A partir do reservatório do Morro da Crista a água é conduzida através de duas adutoras, conhecidas como linha Principal e Bacaxá. A Figura 3 apresenta um esquema do sistema.

se a linha de sucção. Na ETA a medida de vazão dos conjuntos B, D e F foi feita na linha de sucção e dos conjuntos C e E na linha de recalque.

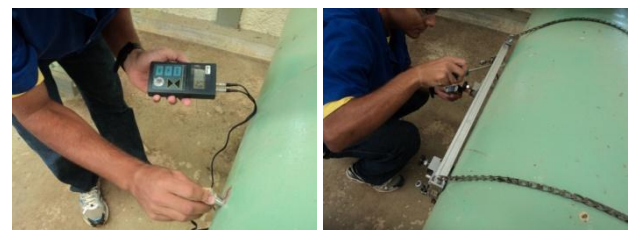


Figura 4. Instalação do medidor de vazão ultrassônico

Pressão de sucção e recalque

A correta instalação de medidores de pressão requer a utilização de um manifold. Esta peça é composta por duas válvulas: a primeira, localizada antes dos medidores de pressão é utilizada para a proteção dos equipamentos, evitando um golpe na partida do grupo gerador, que os danificaria e a segunda, localizada após os medidores é utilizada para purga de ar.

As medidas de pressão foram feitas nas tomadas utilizadas para acionar a válvula da linha de recalque, nos flanges de entrada e saída da bomba, conforme mostra a Figura 5. O transdutor foi conectado ao sistema de aquisição de dados e sua medida foi comparada com a leitura feita no manômetro.



Figura 5. Instalação dos medidores de pressão

Potência Elétrica

A potência elétrica consumida foi medida através da instalação do medidor junto ao quadro de comando. A Figura 6 mostra as garras de tensão e alicates amperímetros instalados e o módulo do medidor de grandezas elétricas.

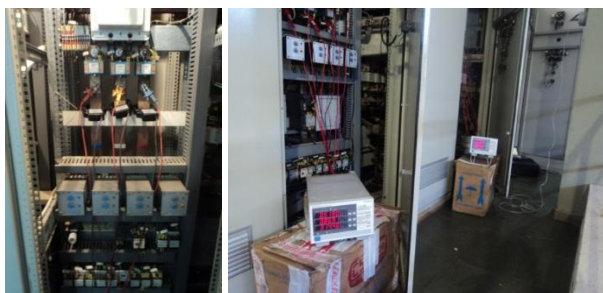


Figura 6. Garras de tensão, alicates amperímetros e módulo do medidor de grandezas elétricas.

Procedimento de Ensaio

Para a linha principal do *booster* Carijó foram feitos ensaios em todas as configurações possíveis de operação em paralelo. Apesar da operação

individual dos conjuntos não ser feita, foi necessário realizar o ensaio nestas condições para determinar a condição crítica do motor (máxima corrente). Para a linha Bacaxá foram feitos apenas os ensaios individuais dos conjuntos G e I, já que nesta linha as bombas não operam em paralelo. Não foi possível realizar o ensaio no conjunto H, pois este apresentou problemas na partida.

Na ETA não foi possível realizar os ensaios em todas as configurações possíveis de operação devido à quantidade de configurações e o tempo necessário para a coleta de dados, o que poderia prejudicar a operação do sistema. Assim, nos ensaios em paralelo optou-se por realizar pelo menos dois ensaios com cada conjunto. Desta forma é possível confirmar o comportamento de cada conjunto quando operam com uma ou mais bombas juntas. A bomba A desta estação não foi ensaiada, pois estava em manutenção.

Também foram realizados ensaios com a válvula de recalque fechada, com o objetivo de determinar o ponto de *shutoff* da bomba e verificar o comportamento da rotação e corrente do motor em sua partida e desligamento, praticamente sem carga. Em todos os ensaios apenas as pressões foram adquiridas, com uma taxa de aquisição de 1 segundo. Todos os outros parâmetros: vazão, rotação, potência elétrica, tensões e correntes foram coletados pontualmente. Este procedimento foi adotado pois os ensaios foram feitos em regime permanente, já que as oscilações dos reservatórios de montante e jusante durante o período de coleta dos dados são desprezíveis.

RESULTADOS

Os resultados obtidos durante a realização dos ensaios são apresentados na Tabela 1. São apresentados os valores médios observados para cada um dos conjuntos motobombas nas diferentes configurações de cada uma das estações elevatórias. É possível observar que para a estação elevatória da ETA, em todas as configurações o rendimento do conjunto permanece praticamente constante, pois em todos os casos a operação da bomba ocorre próximo do ponto nominal de 943 m³/h e 88 m. Para a linha Bacaxá da estação elevatória Carijó, a bomba opera um pouco acima de seu ponto nominal de 943 m³/h e 50 m. Já na linha principal observa-se uma grande queda do rendimento para a operação isolada. Nesta condição a bomba apresentou sinais de cavitação. Entretanto esta operação é praticamente inexistente. Nas duas operações em paralelo observa-se a melhor eficiência dos conjuntos quando 3 bombas estão em operação, já

que elas operam próximas ao ponto nominal de 943 m³/h e 88 m. O aumento no consumo específico de energia com o aumento do número de bombas em operação é normal, já que com maior vazão bombeada há mais perda de carga na adutora,

aumentando também a altura de operação das bombas e conseqüentemente sua potência, o que não significa queda de rendimento do conjunto.

Tabela 1. Resultados obtidos nos ensaios

Configuração	Q [m ³ /h]	P _{el} [kW]	p ₂ [m]	p ₁ [m]	H [m]	η _c [%]	CE [kWh/m ³]
Estação Elevatória ETA							
1 bomba	1036	336	79,4	2,0	78,0	65,5	0,3251
2 bombas	1013	332	83,6	2,1	82,0	68,4	0,3276
3 bombas	928	322	85,7	0,2	86,0	67,5	0,3477
4 bombas	877	316	90,3	0,3	90,4	68,5	0,3607
5 bombas	807	307	93,7	0,8	93,3	66,8	0,3810
Estação Elevatória Carijó - Linha Bacaxá							
1 bomba	1020	184	70,0	25,3	45,5	68,7	0,1810
Estação Elevatória Carijó - Linha Principal							
1 bomba	1591	353	58,1	43,4	16,6	20,6	0,2236
2 bombas	1219	339	107,7	35,6	73,2	71,6	0,2791
3 bombas	908	302	126,7	32,6	94,7	77,5	0,3331

Com base nestes resultados buscou-se dentre os diversos fabricantes, bombas com as mesmas características de operação, mas que apresentassem um melhor rendimento. O ponto de operação foi escolhido com base na operação mais freqüente das estações elevatórias. A Tabela 2 apresenta a comparação entre as novas bombas e as atuais.

Figura 7 apresenta as curvas atuais dos três sistemas avaliados. É possível observar a curva do sistema do *booster* Carijó inicia com valores negativos. Isto ocorre pois o reservatório que o abastece se encontra em uma cota mais elevada, o que permite que em alguns períodos de baixa demanda o *booster* possa ser desligado, permitindo o abastecimento por gravidade.

Tabela 2. Comparação de rendimento dos conjuntos atuais com os novos

Local	Q [m ³ /h]	H [m]	η _c novo [%]	η _c atual [%]	Custo [R\$]
ETA	880	94	78,4	68,5	125.108
Linha Principal	1219	76	81,5	71,6	131.829
Linha Bacaxá	1020	48	81,1	68,7	103.126

Em todos os casos é possível observar um aumento significativo do rendimento das bombas. Entretanto, o custo para a troca das bombas é elevado, e, portanto há a necessidade de realizar o estudo de viabilidade econômica do investimento. Para isto, primeiramente foram levantadas as curvas dos sistemas e das bombas em suas diferentes configurações, tanto para as atuais quanto para as novas, através da interpolação por três pontos. A

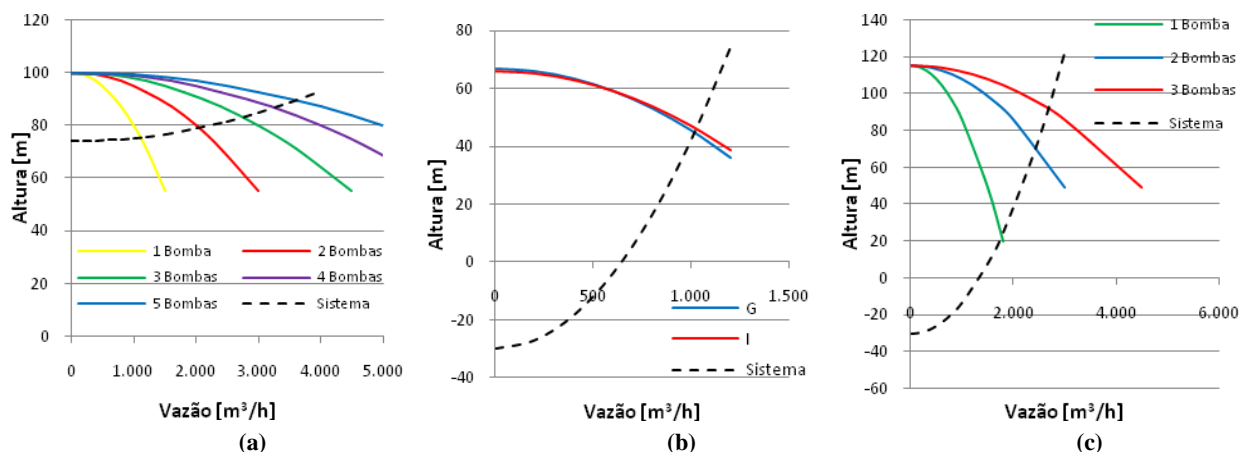


Figura 7. Curvas das bombas e do sistema: a) ETA; b) Carijó - Bacaxá; c) Carijó - Principal

Em seguida determinou-se consumo-base de energia das estações elevatórias. Para isto utilizou-se o histórico de vazão do *booster* Carijó. Considerou-se que o perfil de bombeamento da ETA é igual, já que para um período de análise longo o volume captado é o mesmo do distribuído. Assim, obteve-se o perfil apresentado na Figura 8.

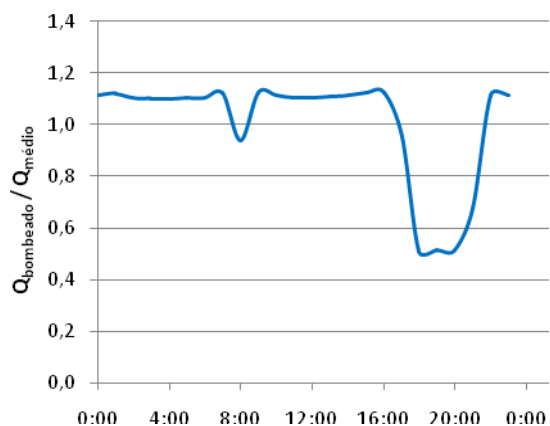


Figura 8. Perfil de vazão bombeada diário

Sabendo-se o volume bombeado a cada hora é possível determinar o número de bombas em operação no período, e conseqüentemente o consumo específico. Assim, calculou-se a energia consumida para o cenário atual e para a troca dos conjuntos. O valor encontrado foi então extrapolado para o período de um mês e em seguida para um ano. Isto foi feito considerando as oscilações na demanda de água devido aos períodos de alta e baixa temporada, conforme mostra a Figura 9.

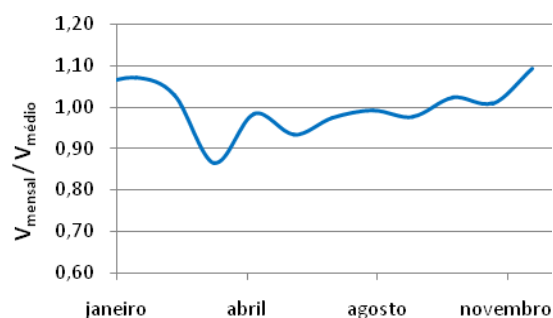


Figura 9. Perfil de demanda anual

Os resultados obtidos no estudo de viabilidade econômica são apresentados na Tabela 3. Devido à seleção das bombas para a maior frequência de operação, as maiores economias na estação elevatória da ETA foram observadas nas operações com 4 e 5 bombas, enquanto que na linha Principal do *booster* Carijó a maior economia ocorreu com duas bombas operando em paralelo. A estação elevatória da ETA apresentou os maiores benefícios da troca, principalmente devido à escolha mais adequada do ponto de operação das bombas. Já para o *booster* Carijó os ganhos não foram tão expressivos devido à dois fatores: o primeiro é que o rendimento atual das bombas, principalmente da linha Principal, estavam mais próximos do rendimento dos novos conjuntos, e o segundo, é que o *booster* é desligado no horário de ponta, quando o abastecimento é feito exclusivamente por gravidade, diferentemente da ETA, que neste período ainda opera com duas bombas.

Tabela 3. Resultados obtidos no estudo de viabilidade econômica

n° de bombas em operação	CE [kWh/m ³]	Economia [kWh/m ³]	Economia [R\$/ano]	Payback [anos]
Estação Elevatória ETA				
1	0,2984	0,0267	326.880	1,92
2	0,3029	0,0248		
3	0,3105	0,0370		
4	0,3210	0,0395		
5	0,3418	0,0390		
Estação Elevatória Carijó - Linha Bacaxá				
1	0,1618	0,0189	35.725	4,38
Estação Elevatória Carijó - Linha Principal				
2	0,2528	0,0257	62.862	8,19
3	0,3200	0,0123		

CONCLUSÕES

O trabalho apresentou o estudo de caso em duas estações elevatórias do sistema de abastecimento de água de cinco cidades litorâneas, demonstrando a relevância da população flutuante na análise da viabilidade econômica dos investimentos em eficiência energética em estações elevatórias.

Os ensaios realizados nos conjuntos motobombas demonstraram que há viabilidade técnica para realizar sua substituição por conjuntos mais eficientes. Para avaliar a viabilidade econômica do investimento foram utilizados dados da macromedição para definir as variações do consumo ao longo de um dia e em seguida ao longo de um ano, devido à influência da população flutuante no período de alta temporada. Duas características importantes foram observadas: a primeira é a redução do bombeamento no horário de ponta, que permite até mesmo o desligamento do *booster* Carijó, e a segunda é a amplitude da demanda do sistema ao longo do ano, que chega a variar 22 %.

Com todas estas informações, o estudo de viabilidade econômica indicou que para a estação elevatória da ETA o *payback* seria de 2 anos, enquanto que no *booster* Carijó, para a linha Bacaxá seria de 4 anos e para a linha principal 8 anos. A maior viabilidade da substituição dos conjuntos da ETA se deve principalmente ao fato desta estação elevatória operar ininterruptamente, variando-se apenas a quantidade de bombas em operação, enquanto que no *booster*, em determinados períodos há a possibilidade de seu desligamento.

BIBLIOGRAFIA

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), NBR 12211 - Estudos de Concepção de sistemas Públicos de Abastecimento de Água.
- Europump and Hydraulic Institute (2004), “Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs”. Elsevier Advanced Technology, Oxford, Inglaterra.
- Gomes, H. P. (2012), Manual de Sistemas de Bombeamento. Editora Universitária UFPB, 1ª Ed. João Pessoa.
- ISO – International Organization for Standardization (1999), ISO 9906 - Rotodynamic Pumps: Hydraulic Performance Acceptance Tests Grades 1 and 2.
- Lima, G. M., Viana, A. N. C., Silva Filho, A. Q. e Carneiro Júnior, R. S. (2011), “Otimização do Uso de Reservatórios para Redução do Bombeamento no Horário de Ponta”, XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió.
- Rodrigues, W. (2007), Crítérios 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.
- Silva, B. C. (2000), Desenvolvimento de metodologia de campo para estimativa do potencial de conservação de energia em instalações de bombeamento. 137 f. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- Silva Filho, A. Q., Viana, A. N. C., Lima, G. M. e Carneiro Junior, R. S. (2011), “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.

SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (2010), Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, Brasília.