

SISTEMAS DE SANEAMENTO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

HEBER PIMENTEL GOMES
organizador



SISTEMAS DE SANEAMENTO

Eficiência Energética

Heber Pimentel Gomes
Organizador

Editora Universitária – UFPB
João Pessoa, Brasil - 2010

6 Utilização de modelo matemática para simulação da operação de sistema de bombeamento de água

Petrônio Vieira Júnior, André Luiz A. Mesquita, Vitor Hugo Pereira de Souza e Gleiciane Costa Moraes

Universidade Federal do Pará – UFPA – Belém - Brasil

INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado dos grandes centros urbanos é apontando como um grande obstáculo a ser vencido pelos sistemas de abastecimentos de água (SAA). Deste modo, objetivando atender as diversas demandas de água com pressões adequadas, as concessionárias de saneamento utilizam em larga escala as estações de bombeamento de água, para manter o sistema de distribuição de água dentro de níveis de pressão e vazão compatíveis as necessidades dos usuários. Isso faz com que a maioria das vezes a operação de bombeamento dos sistemas de abastecimento de água ocorre sem interrupções, elevando-se assim o consumo de energia elétrica.

O consumo de energia elétrica é a segunda maior despesa das empresas de saneamento, perdendo apenas para a despesa com pessoal. Segundo Tsutiya (2004), o consumo de energia elétrica em sistema de abastecimento de água é da ordem de 0,6 kWh por m³ de água produzida, ocorrendo 90% dessa despesa nos motores elétricos utilizados nas estações elevatórias de água. Logo a necessidade de redução de custos de energia elétrica tem sido uma preocupação constante entre as empresas de saneamento.

Em sistema de bombeamento de água há variações na demanda de vazão diária e o reservatório deve ser abastecido de água para atender a demanda solicitada. Se em determinada hora do dia há um elevado consumo de água, baixando o nível do reservatório com maior rapidez, faz-se necessário que o sistema de bombeamento reponha essa água para atender o consumo. Por outro lado, se o consumo de água é baixo, o sistema de bombeamento deverá repor essa vazão na mesma proporção que está sendo usada. Para que este processo ocorra de forma eficiente, utiliza-se métodos para controlar a vazão fornecida ao reservatório.

Alguns controles de vazão, utilizados atualmente nos sistemas de bombeamento de abastecimento de água, onde o controle é realizado mantendo-se a velocidade constante do conjunto motor/bomba, existe um grande desperdício energia elétrica. Segundo Américo (1996), os métodos mais utilizados para controlar a vazão mediante a operação do conjunto motor/bomba com velocidades fixas são chamados de controle *on-off*, *by pass* e válvula de controle e controle com velocidade variável.

No método *on-off*, a vazão é controlada desligando o motor quando a vazão ultrapassa um limite determinado (superior) e ligando quando há vazões abaixo de um outro limite (inferior). Neste ocorre partidas sucessivas do motor, causando maiores solicitações aos circuitos elétricos, devido às elevadas correntes de partida e desgastes mecânicos em função do maior número de operações. O número de partidas é determinado de acordo com a escolha dos níveis onde os sensores estiverem instalados. Para bombas de capacidade de vazão superior ao consumo pode-se instalar o sensor de nível inferior para atendam o nível manométrico mínimo exigido pelo sistema. Neste caso as operações não serão freqüentes, porém o custo da instalação é maior. Para bombeamento com vazão inferior ao exigido pelo consumo o nível inferior não pode estar muito abaixo do nível máximo do reservatório. Neste caso as operações costumam ser mais freqüentes.

O método *by-pass* retorna parte do fluido da descarga da bomba de volta para a sucção. Este desvio é feito através de uma válvula de controle, aumentando a abertura da válvula diminui-se a vazão da tubulação de recalque. É sem dúvida, o método menos eficiente, por isso, o menos usado para controle de vazão em plantas industriais.

No método válvula de controle, a vazão é controlada por uma válvula de estrangulamento de fluxo, chamada válvula de controle. A abertura da válvula muda conforme um sinal elétrico ou pneumático

emitido por uma malha de controle, que pode usar como referencial, a vazão, a pressão, a temperatura ou outro parâmetro do sistema, sendo vazão o referencial mais comum.

O uso da válvula de estrangulamento tem a vantagem de permitir um controle preciso da vazão do sistema, porém com um grande desperdício de energia. Seria como controlar a corrente de um circuito elétrico adicionando resistências em série.

Rodrigues (2007), explica que o uso estrangulado da válvula aumenta a perda de carga no sistema, alterando o ponto de operação (intersecção da curva da bomba com a curva do sistema), sendo progressivamente modificada as condições de funcionamento do conjunto motor/bomba até ser obtido o ponto desejado para uma determinada vazão, com a bomba operando com rotação constante.

No método de controle por velocidade variável é utilizado o acionamento eletrônico para movimentar o conjunto motor/bomba em velocidade variável, eliminando a válvula de controle. O controle da vazão com velocidade variável é feito com acionamento eletrônico que movimenta o conjunto motor/bomba, conforme a variação de demanda, permitindo economizar energia elétrica.

O controle de vazão mediante a variação da velocidade da bomba atende a solicitação de variação de vazão tão bem quanto o método válvula de controle, inclusive utilizando o mesmo sinal elétrico da malha de controle, porém com uma importante diferença, permite uma considerável economia de energia elétrica. Este método de controle de vazão com velocidade variável permite manter a curva do sistema inalterada, alterando somente a curva da bomba, atuando de maneira precisa no controle da velocidade do conjunto motor/bomba sem desperdício de energia elétrica, utilizando inversores de frequência.

Assim, a partir da utilização de inversores de frequência no sistema de bombeamento, é possível variar a potência requerida pela instalação, possibilitando a regulação das pressões permitindo, ainda, a variação de vazão sem perda de carga elevada. Com isso, o uso do inversor de frequência ocasiona a diminuição do consumo de energia elétrica e eliminação do excesso de pressão no sistema, o que reflete na redução dos valores da perda real de água e dos consumos elétricos, tanto pela redução do volume bombeado como pela operação do conjunto motor/bomba em um ponto de maior rendimento. Como vantagem adicional, os inversores de frequência atuam como dispositivos de partida suave dos motores, minimizando os inconvenientes de surto de pressão no sistema e picos na corrente elétrica. (BARROS et al, 2007).

Com a utilização de inversores de frequência na operação de conjunto motor/bomba, é possível constar um maior controle operacional do circuito hidráulico das estações elevatória, aumentando com isso a flexibilização operacional, impactando numa maior confiabilidade do sistema de bombeamento, e distribuição mais equitativa de pressões em toda a rede de recalque, reduzindo drasticamente as tensões nas tubulações (JOSEPH; FRANCO; FERRARI FILHO, 2004).

De acordo com Barros et al. (2007), o inversor de frequência, ou variador de velocidade, é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, causando uma variação de sua rotação, isso faz com que o consumo de energia elétrica seja proporcional a rotação do motor, utilizando, assim, apenas a energia necessária.

Para Tsutiya (2004) o inversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação dos valores de frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade.

Portanto, a utilização de inversor de frequência é uma das alternativas mais eficientes para otimizar o uso de energia elétrica sem afetar a operação do sistema de bombeamento, pois permite o controle do funcionamento do conjunto motor/bomba em função da variação da demanda de água ao longo das horas do dia, sendo que ao adequar a rotação do motor promove a alteração da curva da bomba sem maiores prejuízos para a curva do sistema ou instalação.

Para se ter avaliação mais precisa e seguras dos ganhos energéticos e hidráulicos com o uso de inversor de frequência são utilizados modelos matemáticos. Assim, se esses modelos forem perfeitamente calibrados, podem reproduzir com muita precisão o desempenho do sistema real, permitindo a simulação de cenários múltiplos de operação antes da implementação de qualquer alteração na rotina operacional.

Os modelos de simulação são modelos matemáticos cujas técnicas permitem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento (TUCCI, 1998).

Silva; Valadão; Barros (2007) ressalta que a simulação computacional tem atingido elevado grau de importância para a aquisição de conhecimento e de controle operacional de sistemas complexos. No caso

da simulação hidráulica são avaliadas as respostas do sistema face às decisões operacionais em termos das suas variáveis (pressão, vazão entre outras), sendo assim uma ferramenta essencial à rotina computacional que quantifica os objetivos estabelecidos.

Segundo Araújo (2002), a principal vantagem da simulação matemática é a flexibilidade em representar sistemas simples e complexos na forma de modelos computacionais, permitindo a tomada de decisão por um conjunto de soluções viáveis que podem ser otimizadas por técnicas específicas.

Nesse contexto, será utilizado modelo matemático para avaliar a eficiência energética de uma estação elevatória de água bruta (EEAB), tendo como foco do estudo conjunto motor/bomba controlado por inversor de frequência que atua de acordo com o nível de água no reservatório.

Para exemplificar a descrição da elaboração do modelo matemático para obtenção da economia alcançada pela utilização de inversores de frequência foram empregados dados de vazão, potência, corrente e tensão coletados durante um período de 7 dias no Sistema Bolonha, localizado na cidade de Belém do Pará.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Utilizou-se o Sistema Bolonha como objeto de estudo, que tem como função o tratamento e fornecimento de água para os vários bairros da cidade de Belém do Pará, tendo como manancial o Lago Bolonha.

A água bruta captada no lago Bolonha é recalca por meio da EEAB, que tem a função de suprir o fornecimento de água não tratada de forma adequada à estação de tratamento (ETA), sendo a água tratada conduzida para os setores da zona central e de expansão, através de estação elevatória de água tratada, conforme mostrado na Figura 1.

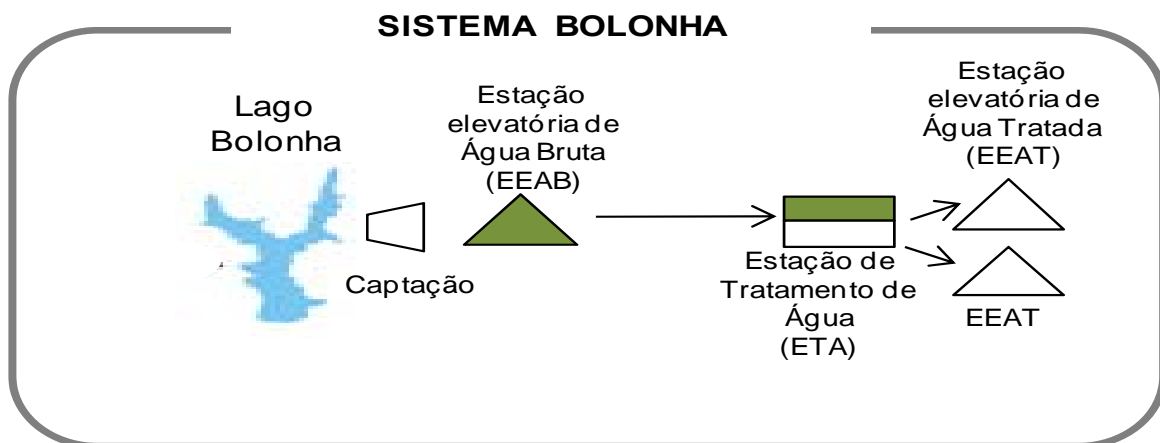


Figura 1 – Sistema Bolonha

De acordo com o consumo exigido na cidade, o controle da vazão para atendimento da ETA está relacionado com o nível de água do reservatório apoiado, operado por manuseio de válvulas controladoras de vazão, uma para cada bomba.

Para o escoamento da água na EEAB são necessárias quatro bombas centrífugas associadas em paralelo do tipo eixo vertical, marca WORTHINGTON, Modelo: 24 QL-19B-1175 rpm, rotor B possuindo vazão nominal unitária de 1,067 m³/s.

DESCRIÇÃO DO EMPREGO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A Figura 2 (a) ilustra o torque aceleração disponível para o motor acelerar a partir do repouso ($T_{motriz}-T_{carga}$). Nesta figura curvas características de torque velocidade arbitraria do motor (T_{motriz}) e da carga (T_{carga}) foram assumidas, e a interseção das curvas características da carga e do motor determinam o ponto de operação em regime.

Em motor de indução, a seguinte relação é válida:

$$\emptyset = \frac{V}{k \times f \times N} \quad (1)$$

Onde:

\emptyset - fluxo por pólo;

V - tensão de alimentação;

N - número de espirais, submetidas a tensão U;

F - frequência de alimentação;

k - constante da máquina.

Caso \emptyset seja mantido constante, o torque motriz também o será. Isto pode ser conseguido variando-se proporcionalmente V e f. A Figura 2 (b) mostra a curva conjugado versus rotação para um motor assíncrono com controle de frequência a fluxo constante.

Podemos ver que toda curva torque versus velocidade move-se ao longo do eixo das velocidades sem alterar sua forma. A condição para que isto ocorra é que a relação entre a tensão e a frequência seja mantida constante (fluxo constante). O torque máximo permanece aproximadamente constante, caso isto não seja feito, haverá uma redução do torque do motor comprometendo o desempenho dinâmico.

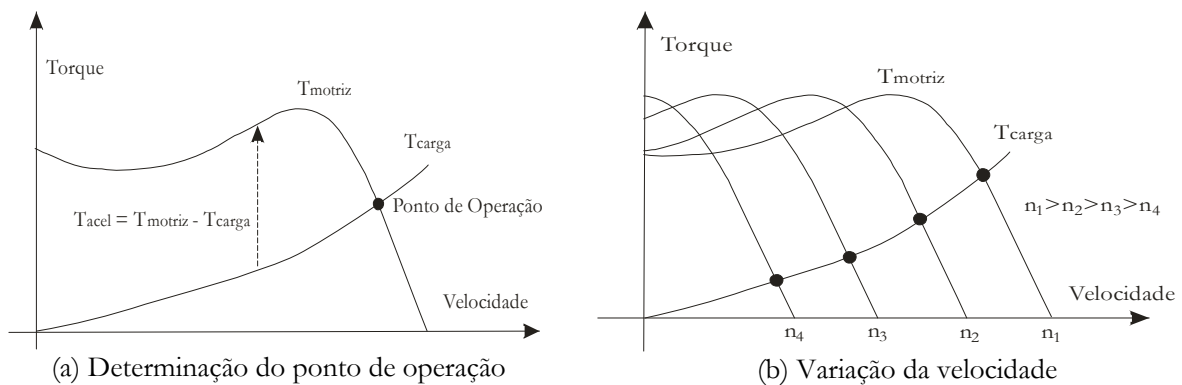
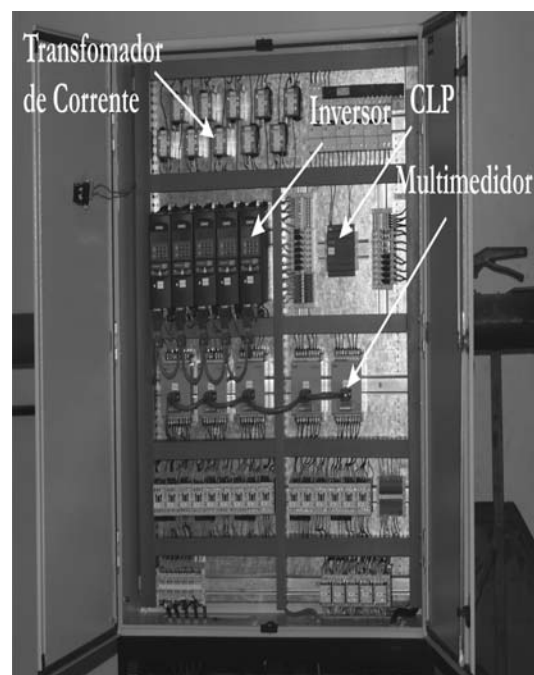
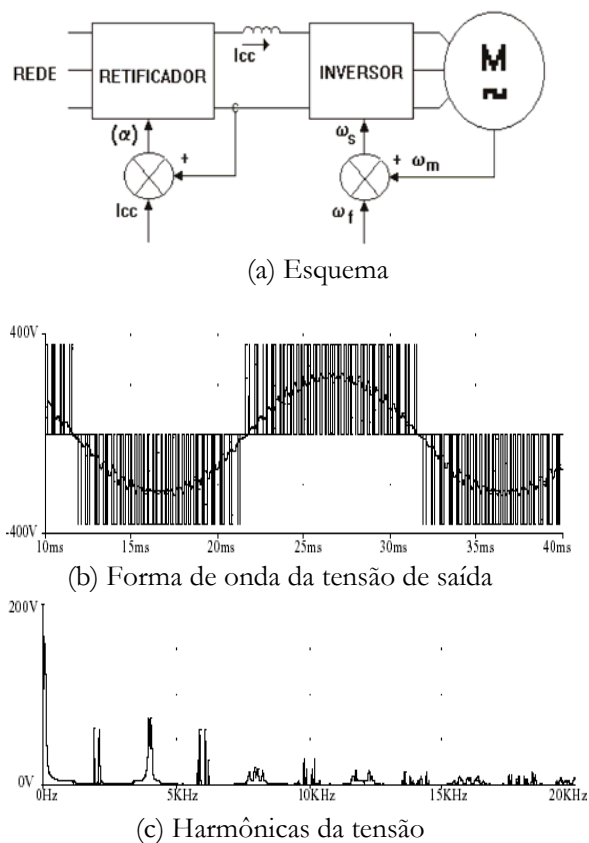


Figura 2– Verificação do comportamento do torque com a variação da velocidade usando inversor.

Inversores ou conversores CC – CA (conversor de Corrente Contínua para Corrente Alternada) são usados em acionamentos de motores CA onde o objetivo é produzir uma saída senoidal CA cuja magnitude e frequência, para alimentação do motor (saída do inversor), possam ser controladas.

Para fornecer CA a partir de uma rede pública de alimentação, cuja frequência é fixa em 60 Hz, é necessário um estágio retificador para alimentar o inversor com corrente contínua CC, como mostra o esquema da Figura 3(a). A denominação inversor de frequência é popularmente empregada para o conjunto retificado mais inversor, onde a entrada de energia é CA e a saída é também CA. A saída do inversor possui uma forma de onda de tensão semelhante ao mostrado na Figura 3(b). Esta forma de onda não é perfeitamente senoidal e, portanto, produz harmônicas, mostradas na Figura 3(c) que podem causar problemas no sistema de energia elétrica, sobre-aquecendo condutores e transformadores elétricos, provocando interrupções indevidas devido a sinais espúrios nos circuitos de proteção, etc. Para evitar estes problemas são instalados filtros de energia. Ao inversor de frequência pode ser agregada tecnologia que permite o controle automático do processo através de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Para funcionamento deste recurso é desejável a instalação, além do CLP, de transformadores de corrente (TCs) e múltiplos medidores para obtenção das medições que permitirão o controle automático, como é mostrado da Figura 3(d).



(d) Instalação de inversores de frequência

Figura 3 – Funcionamento de inversores de frequência.

As principais características do conversor empregado na EEAB do Sistema Bolonha são listadas a seguir:

- Grau de proteção IP22;
- 150 % de sobrecarga por 1 minuto;
- 125 % de sobrecarga contínua;
- Fator de potência da fundamental próximo de 1;
- Baixa pulsação do torque e das características de operação em baixa velocidade;
- Alto rendimento do conversor e do motor;
- Quatro diferentes características V/f que podem ser parametrizada;
- Operação nos quatro quadrantes;
- Retomada automática de operação após falta de energia dentro de um tempo predeterminado.

MODELO MATEMÁTICO

Para determinar todas as condições necessárias para a análise da simulação do sistema foi feito o diagrama do modelo matemático, representado na Figura 4, na qual estão mostradas todas as variáveis envolvidas no processo.

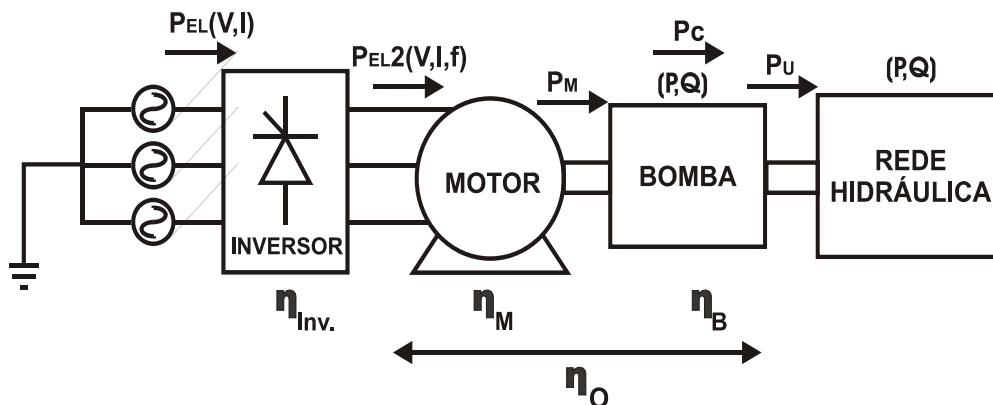


Figura 4 - Diagrama esquemático do sistema

Onde:

P_{EL} - Potência fornecida pela rede de alimentação (W);

P_{EL2} - Potência elétrica fornecida pelo inversor, (W);

P_M - Potência fornecida pelo motor ao eixo da bomba, (W);

P_C - Potência hidráulica, (W);

P_U - Potência aproveitada pelo líquido para seu escoamento fora da própria bomba, (W);

P - Pressão, (m);

Q - vazão, (m³/s);

η_{inv} - rendimento do inversor;

η_m - rendimento do motor;

η_B - rendimento da bomba;

η_O - rendimento global.

VARIÁVEIS DO PROCESSO

A velocidade do conjunto motor/bomba é um dos fatores que influencia nas curvas características das bombas, permitindo assim prever seu desempenho quando operando em condições diferentes das previamente estabelecidas.

Como valem para pontos homólogos, ou seja, pontos de mesmo rendimento, a variação de velocidade atua na vazão (Q), na altura total da elevação (H) e na potência de eixo (P), da seguinte maneira:

A vazão varia proporcionalmente com a velocidade;

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

A pressão varia proporcionalmente com o quadrado da velocidade;

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \tag{3}$$

A potência varia proporcionalmente com o cubo da velocidade.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \tag{4}$$

Com essas relações, é possível construir uma família de curvas de rendimento da bomba para várias velocidades a partir da curva de velocidade nominal. A tabela 1 obtida com o auxílio das relações acima mostra como se comportam as variáveis para diferentes valores de velocidade. Sendo esse o ponto chave para a economia de energia com velocidade variável.

Tabela 1 - Comportamento das variáveis do sistema com a velocidade

Velocidade (%)	Vazão (%)	Pressão (%)	Potência (%)	Redução da potência (%)
100	100	100	100	0,0
90	90	81	72,9	27,1
80	80	64	51,2	48,8
70	70	49	34,3	65,7
60	60	36	21,6	78,4
50	50	25	12,5	87,5
40	40	16	6,4	93,6
30	30	9	2,7	97,3
20	20	4	0,8	99,2
10	10	1	0,1	99,9

CURVA DO SISTEMA

No processo é preciso obter o ponto de operação do sistema adquirido a partir da curva do sistema, que é obtida a partir da equação (5):

$$H = H_0 + K \times Q^2 \quad (5)$$

Onde:

H - altura manométrica do sistema (m);

H₀ - altura geométrica, (m);

k - constante referente às perdas de cargas localizadas;

Q - vazão do sistema, (m³/s).

Nesta curva é apresentada a variação da altura manométrica em função da variação de vazão, ou ainda, que esta exibe o perfil da variação de energia por unidade de peso requerida pelo sistema em função da variação da vazão.

POTÊNCIA DA BOMBA

Na Figura 4 foi apresentado o balanço de energia de um sistema hidráulico. Para este estudo a variável analisada é a potência fornecida ao líquido (P_c), que é adquirido a partir da equação (6):

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta_m \times \eta_b} \quad (6)$$

Onde:

γ - peso específico do fluido (Kgf/m³);

Q - vazão do sistema (m³/s);

H - Altura manométrica do sistema (m);

η_m - rendimento do motor;

η_b - rendimento da bomba.

SIMULAÇÃO

O método para estimar a economia de energia consiste na busca do melhor ponto de operação (ótimo) do conjunto motor/bomba.

O primeiro passo foi obter os dados de vazão do sistema Bolonha para traçar a sua respectiva curva. Esta curva é então combinada com a curva da bomba instalada no local, a qual é obtida nos catálogos do fabricante. A combinação destas curvas nos fornece o ponto de operação da bomba à rotação constante, conforme está ilustrado na Figura 5.

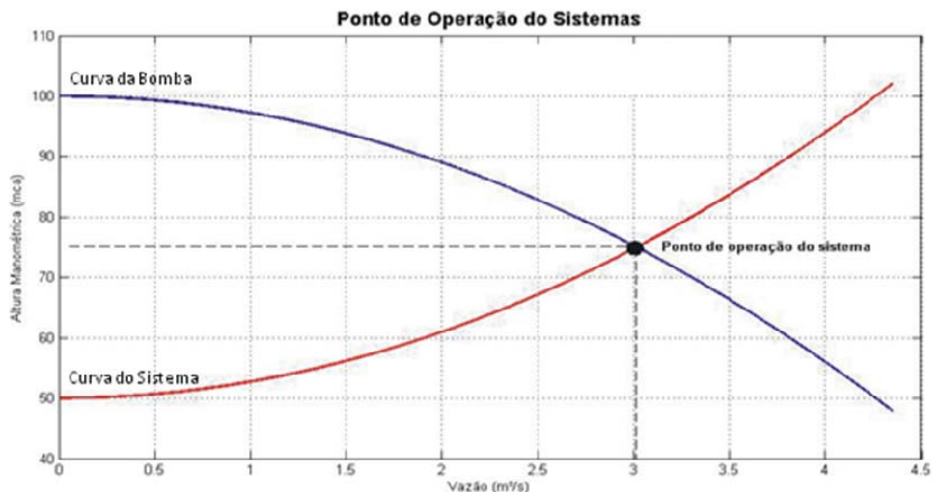


Figura 5 - Ponto de operação do sistema

Como o controle é feito por meio de válvulas ocorre a diminuição na vazão. Logo, fazendo com que ela passe a operar em outro ponto de operação. Em outras palavras, o que acontece é que a energia que se deseja retirar do líquido para que a vazão diminua agora é dissipada na válvula de controle, como está ilustrado na Figura 6.

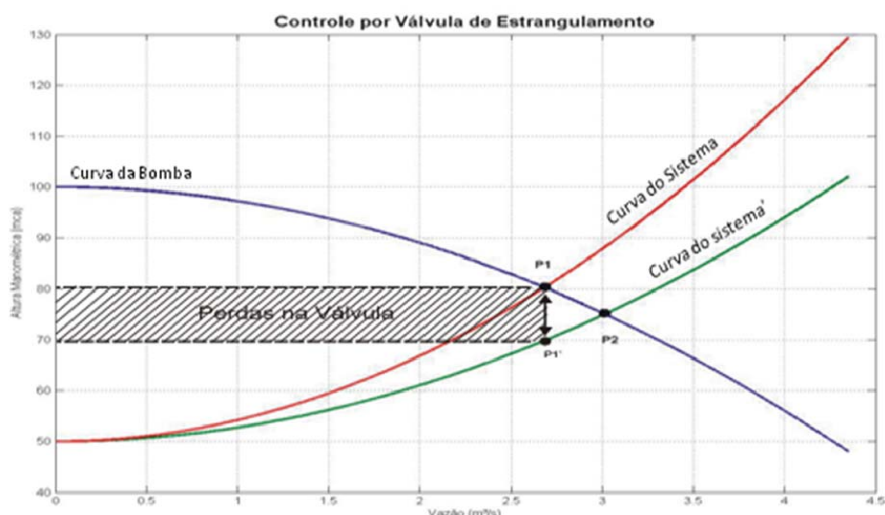


Figura 6 – Controle da vazão por meio de válvulas de estrangulamento

Para verificar como o inversor de frequência irá operar, partiu-se do gráfico do consumo médio do sistema, apresentado na Figura 7, no qual é constatado o máximo e mínimo ponto de consumo. O inversor irá atuar a partir destes pontos, diminuindo ou aumentando a rotação do motor.

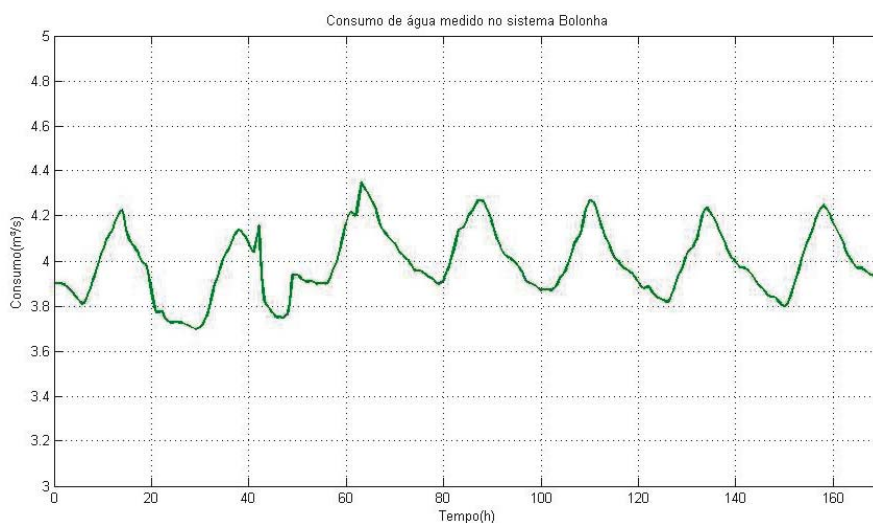


Figura 7 - Consumo Semanal.

A partir destes dados foi feito um estudo para traçar o novo ponto de funcionamento do sistema, com base na teoria da similaridade passando da rotação nominal de 1.175 rpm para 1.050 rpm, apresentado na Figura 8. Ainda nesta figura pode-se determinar a redução no consumo de energia, obtido pela diferença de área nos retângulos, indicada na área hachurada.

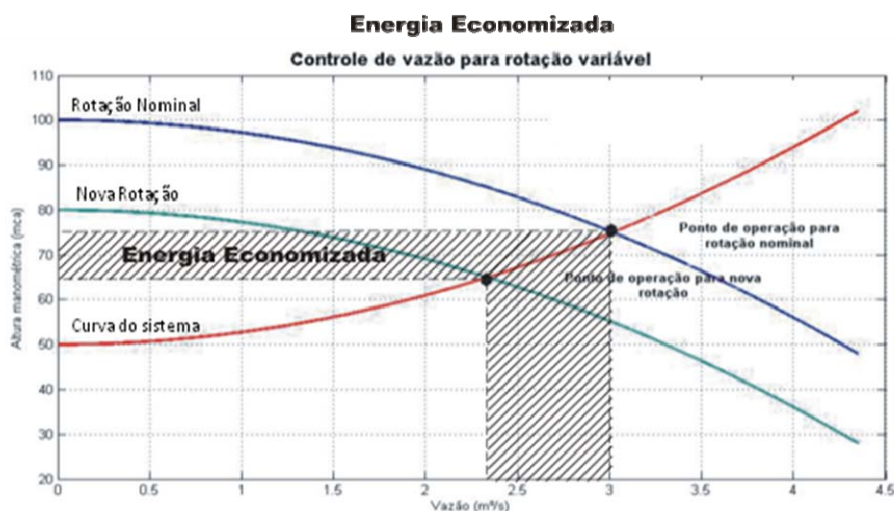


Figura 8 – Curva do Sistema com rotação variável

A partir da equação (3) traçou-se o gráfico da potência consumida semanalmente no sistema, antes e depois da instalação dos inversores. Foi notada a redução de potência consumida pelo sistema, como é visto na Figura 9.

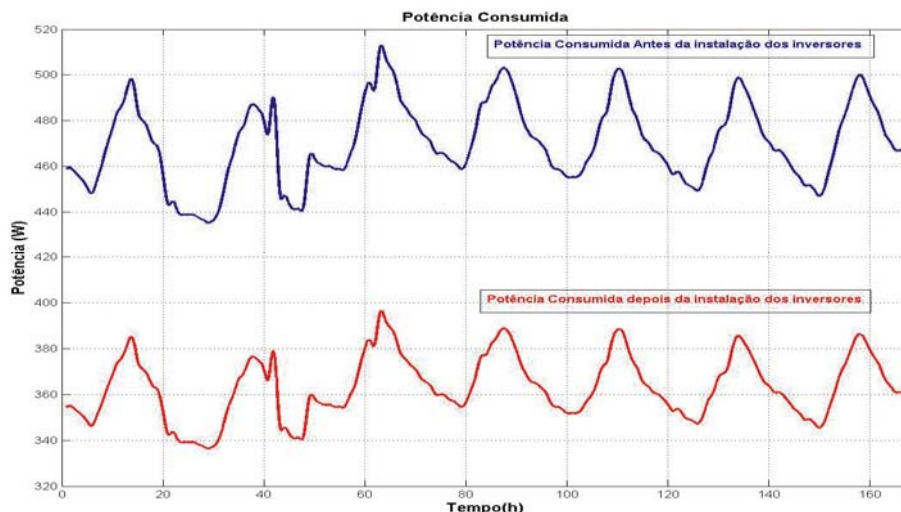


Figura 9 – Potência economizada (linha inferior) depois das instalações dos inversores de frequência

RESULTADOS

A redução no consumo de energia com as instalações dos inversores foi de 22,7 %. A metodologia usada para o cálculo da economia de energia baseia-se na comparação do consumo médio diário (CMD) nas duas situações de teste, ou seja, sem e com acionamento eletrônico.

O percentual de economia de energia (PEE) foi calculado a partir da equação (7).

$$PEE = \left(\frac{CMD \text{ sem } Acion. - CMD \text{ com } Acion.}{CMD \text{ sem } Acion.} \right) \times 100 \tag{7}$$

Onde:

PEE - Percentual de Economia de Energia
 CMD - consumo médio diário

O rendimento da bomba é determinado pela relação apresentada na equação (8). Conforme observado na Figura 6, a potência hidráulica da bomba foi reduzida, logo seu rendimento também foi reduzido, conforme mostrado na Tabela 2. Isso não implica que o rendimento global seja ainda menor sendo que não houve perda adicional no sistema porque as perdas em valores absolutos são menores, pois a bomba irá manejar menos potência em velocidade reduzida.

$$\eta_b = \frac{P_c}{P_{eb}} \tag{8}$$

Onde:

η_b - Rendimento da bomba;
 P_c - Potência fornecida ao líquido, em [W];
 P_{eb} - Potência no eixo da bomba; [W].

Tabela 2 - Rendimento da Bomba

Bomba Worthington 24-QL-19B 1175 rpm		
	Potência (kW)	Rendimento (η)
Com inversor	36,85	0,77
Sem inversor	45,53	0,82

É importante ressaltar que em um sistema flexível a curva da bomba precisará adequar-se a determinados valores de demanda, entretanto nem sempre poderá operar no ponto de rendimento máximo, mas no que melhor se adaptar ao sistema projetado.

Além da melhoria no consumo de energia, o controle por variação de velocidade apresenta inúmeras vantagens em relação ao sistema de controle por válvulas, tais como:

- melhoria na eficiência do sistema pela intersecção da curva característica da bomba com a característica do sistema otimizando o consumo de energia com o ponto de trabalho;
- limitação da corrente de partida; partidas e paradas suaves do sistema de bombeamento, evitando picos na rede de energia elétrica e esforços na tubulação;
- aumento da vida útil da bomba devido a eliminação do desequilíbrio interno de pressões, fonte causadora do desgaste mecânico;
- eficiência otimizada de sistema de bombeamento através da obediência às variações de pressão ou fluxo.

CONCLUSÃO

A partir da pesquisa realizada foi possível demonstrar que o método de controlar a vazão a partir da utilização de inversor de frequência permite uma grande economia de energia elétrica. Observou-se que variando a velocidade do conjunto motor/bomba é possível manter um sistema eficiente a um custo menor.

Para entendê-lo é preciso saber que o acionamento eletrônico é inserido no sistema como um elemento regulador de energia, atuando de modo a fornecer ao sistema somente a energia necessária, desde um nível mínimo até um nível máximo e assim garantindo sua flexibilidade, que resulta muito mais eficiência.

A economia de energia não é o único atrativo, há outras vantagens como a eliminação de válvulas e seu custo inicial, além do alto custo de manutenção também simplificam a rede de dutos do sistema. O método de controle da vazão por velocidade variável ainda possibilita a eliminação dos golpes de aríete e cavitação, prolongando a vida das tubulações, válvulas, cotovelos e outros elementos do sistema.

Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico - como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil.

Do ponto de vista ambiental, a bomba operando em velocidade reduzida normalmente produz menos ruído e vibração. Desse modo, o ajuste da velocidade permite operação mais flexível com um melhor controle sobre os parâmetros do processo, ocasionando um aumento da produtividade.

Acrescenta-se que com o motor ligado diretamente à rede, no caso de uma rápida falta de tensão ou uma sub-tensão, o processo pode ser interrompido. Já os acionamentos eletrônicos permitem acelerar novamente a máquina com o torque de plena carga até a velocidade preestabelecida.

Portanto, a utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento mostra-se uma solução importantíssima e decisiva para economia de energia, pois além desse benefício contribui para o aumento da vida útil de todos os componentes envolvidos na planta de bombeamento de água.

REFERÊNCIAS

AMÉRICO, M. **Conservação de Energia Elétrica em Processos de Bombeamento Usando Acionamentos Eletrônicos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.

ARAÚJO, J. K. **Calibração de Redes de Distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**, 2002. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

BARROS, Denise Pereira et al. Aplicações de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água. In: **Congresso Cier De La Energía**, 3., 2007, Medellín. Disponível em: <<http://sg.cier.org.uy/cdi/cier->

zeus.nsf/9a95ace4eb1b3e7b032570ad00553202/5C560ECA53EC5018832574CF00552C48/\$FILE/III%20CONCIER-BR-110-C.pdf> acesso em: 30 mai. 2010.

JOSEPH, Milton. FRANCO, Nilton. FERRARI FILHO, Dóvilio. OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA POTÁVEL INSTALADOS E M OPERAÇÃO NO SEMASA. In: **Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água (SAREA)**, 6, 2006, João Pessoa. Disponível em: <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoO%20%285%29.pdf>> acesso em: 30 mai. 2010.

MACINTYRE, J. A. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**, 2007. Tese de Doutorado (Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SIEMENS, **Catálogo Eletrônico de Produtos**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br>> acesso em 30 mai. 2010.

SILVA, Fernando das Graças Braga da. VALADÃO, Marcus Nante. BARROS, Regina Mambelli. Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do epanet 2.0 – APLICAÇÃO EM SETORES DE ITAJUBÁ – M.G. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste Cuiabá**, 1., 2007, Cuiabá. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/i_simp_rec_hidric_norte_centro_oeste88.pdf> acesso em: 30 mai. 2010.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 1ª edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PROCEL SANEAR / Eletrobrás, a Companhia de Saneamento do Pará, ao Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento - GPHS/UFPA e ao Laboratório de Eficiência Energética em Saneamento - LENHS/NORTE/UFPA.