

ASPECTOS IMPORTANTES NA UTILIZAÇÃO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS EM VELOCIDADE VARIÁVEL PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

André L. Amarante Mesquita¹; Lázaro J. S. da Silva¹; Otávio Abraham Júnior¹;
José Almir R. Pereira²; Aldo Cezar P. Silva³

Resumo – Com a crescente necessidade de se aperfeiçoar a operação dos sistemas de abastecimento de água, visando, entre outros, a redução do consumo de energia, tem conduzido à implantação de sistemas de bombeamento em velocidade variável, que permite uma solução eficaz para este problema. O presente trabalho apresenta uma análise sobre diversos aspectos importantes sobre a aplicação de sistemas em velocidade variável, abordando tanto os princípios fundamentais, quanto os aspectos tecnológicos, quanto à questão de viabilidade econômica. Como exemplos de aplicação dos conceitos são apresentados dois casos de estudo, um tratando da operação de bombas associadas em paralelo, e outros de bomba operando com controle de nível.

Abstract – With the growing need to improve the water distribution systems, aiming energy saving, has conducted to use of variable speed pumping systems that allows a good solution for this problem. This work presents an analysis on several important aspects of the variable speed pumping systems application, discussing the basic principles as well the technological aspects as the economical viability question. As demonstration of these concepts two cases were presented, one about the parallel pumping system operation and other on level control mode pump operation.

Palavras-Chave: bomba centrífuga, velocidade variável, inversor de frequência.

¹Universidade Federal do Pará – GTDEM - Grupo de Turbomáquinas – Depto. de Eng. Mecânica - Centro Tecnológico – Belém - PA CEP: 66.075-900 Fone: 0xx91-32017960 Fax: 0xx91-32017325 E-mail: andream@ufpa.br ; lazarojs@ufpa.br

²Universidade Federal do Pará – GPHS - Grupo de Pesquisa em Hidráulica e Saneamento – Depto. de Hidráulica e Saneamento - Centro Tecnológico – Belém - PA CEP: 66.075-900 Fone: 0xx91-32017960 Fax: 0xx91-32017325 E-mail: rpereira@ufpa.br

³ Solve Engenharia – Coordenação de Tecnologia e Serviços – Belém – PA CEP 66.110-010 Fone 0xx91-32573301 Fax 0xx91-325760225 E-mail: aldo.cezar@solveengenharia.com.br

INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população e a expansão do setor industrial vêm demandando água em quantidades maiores e com qualidade em padrões bastante restritivos. A água disponível na natureza não atende essas exigências, o que obriga as empresas de saneamento a encontrarem alternativas técnicas que sejam viáveis economicamente para o abastecimento de água de áreas urbanas.

Como as reservas de água são distantes dos pontos de consumo e existe a necessidade de elevação da água entre diferentes cotas das unidades de tratamento e reservação, nos sistemas de abastecimento de água são utilizados equipamentos eletromecânicos, como os conjuntos motor e bomba para recalque de água bruta, de água de lavagem dos filtros, de água tratada etc.

Apesar da permanente utilização desses equipamentos garantir a confiabilidade do abastecimento de água, o grande consumo de energia elétrica dificulta a manutenção do equilíbrio financeiro, já que essa 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.

Essa situação tem motivado os gestores a implementarem programas de eficiência hidráulica e energética em sistemas de saneamento, o que, além de melhorar a rotina de operação e manutenção, reduz o repasse dos custos com energia elétrica na tarifa encaminhada aos usuários. Gomes (2005) comenta que deve ser procurado o uso eficiente de energia elétrica nos sistemas elevatórios, enfatizando que as perdas de energia ocorrem, principalmente, por conta da baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos, por procedimentos operacionais inadequados e por falhas na concepção de projetos.

Nesse sentido, o uso de inversores de frequência é uma alternativa para a operação das bombas em velocidade variável, o que, além de possibilitar a redução do consumo de energia elétrica em elevatórias de água, facilita a adequação do volume bombeado com o de água demandado pela população.

O presente trabalho faz uma revisão nos princípios básicos para a compreensão e utilização de sistema de bombeamento em velocidade variável, analisando os seus principais aspectos. Como aplicação, dois casos são analisados e discutidos em detalhes.

PRINCÍPIOS BÁSICOS

Abaixo são apresentados os princípios básicos da operação de bombas centrífugas em velocidade, da redução do consumo de energia em sistemas de bombeamento e das formas de implementação utilizando inversores de frequência.

Operação de Bombas Centrífugas em Velocidade Variável

A operação de bombas em velocidade variável obedece ao princípio da semelhança, onde uma bomba é sempre homóloga a ela própria em velocidades de rotação distintas. Neste caso, as leis de similaridade, que governam as relações entre a velocidade, N , a vazão, Q , a altura manométrica, H , e a potência hidráulica, P , podem ser expressas por

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

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

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

onde os subscritos 1 e 2 referem-se às condições inicial e final.

Entretanto, para a determinação do ponto de operação, deve-se empregar essas leis sempre em conjunto com a curva do sistema (evolução da perda de carga da tubulação e componentes com a vazão). A não consideração da curva do sistema conduz a valores incorretos da velocidade (Carlson, 2000; Mircevski et al., 1998), como será mostrado a seguir.

Redução do Consumo de Energia em Sistemas de Bombeamento em Velocidade Variável

A figura 1 ilustra um exemplo de como se obtém a redução do consumo de energia em um sistema em velocidade variável. Nesta figura o ponto de operação 1 representa a condição do sistema operando com a válvula de controle totalmente aberta, estando a bomba em sua velocidade nominal. Na necessidade de uma redução de vazão, a válvula de controle é fechada parcialmente até se atingir o ponto desejado, no caso o ponto de operação 2. Este mesmo valor de vazão pode ser obtido através da redução da velocidade da bomba, mantendo-se a válvula de controle totalmente aberta, atingindo-se o ponto de operação 3. Esta diminuição de velocidade implica em uma redução de potência hidráulica, conforme equação (3). É importante ressaltar que a altura manométrica também será reduzida, entretanto as condições hidráulicas para se atingir a vazão desejada serão sempre satisfeitas.

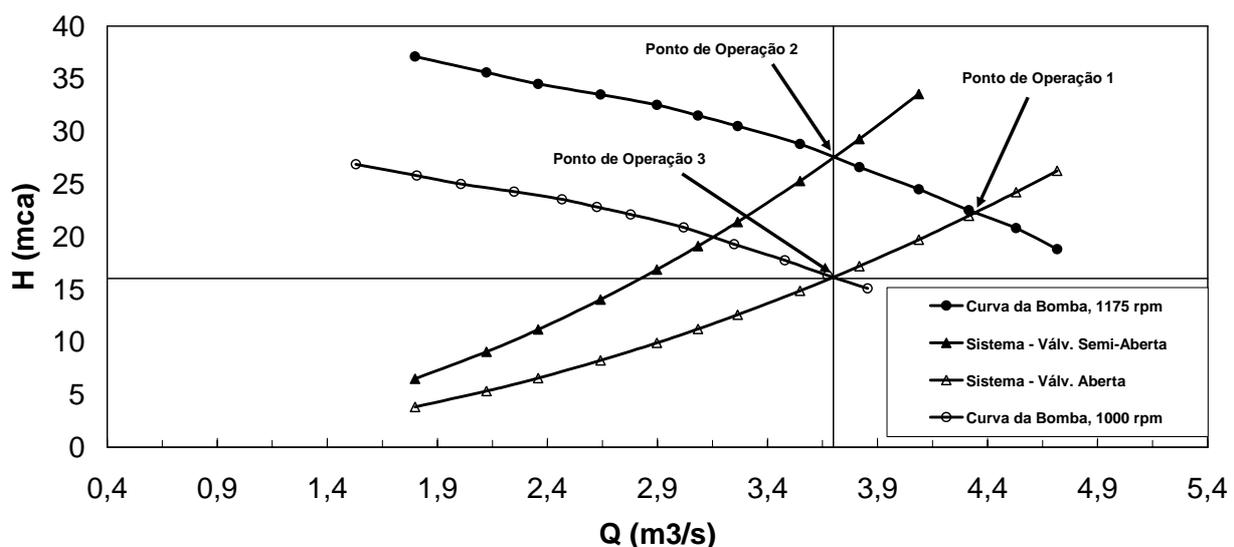


Figura 1 – Controle do ponto de operação – válvula de controle x velocidade da bomba.

Implementação Através de Inversores de Frequência

A figura 2 apresenta o esquema básico da configuração de um sistema utilizando-se um inversor de frequência dedicado ao acionamento de bombas, com o respectivo diagrama de interligação elétrica de força e controle. A figura mostra um sensor de pressão na linha de recalque, que também poderia um sensor de vazão, ou mesmo um sensor de nível de um reservatório de montante, que envia um sinal de controle para o inversor. Este sinal representa o *feedback* para um controlador do tipo PID *built-in*, portanto sem precisar de um *hardware* extra, como um PLC. Assim, por exemplo, o sinal de 0-10 bar da linha de recalque corresponderia a um sinal, por exemplo, de 4-20 mA do sensor de pressão. O *set-point* seria, neste exemplo, um valor de pressão especificado pelo usuário. O controlador ao perceber um aumento de pressão na rede, reduz automaticamente a velocidade do motor para manter o valor desejado de pressão. Nos inversores modernos, a programação do controlado PID é rapidamente realizada, bastando-se ajustar poucos parâmetros via IHM do inversor.

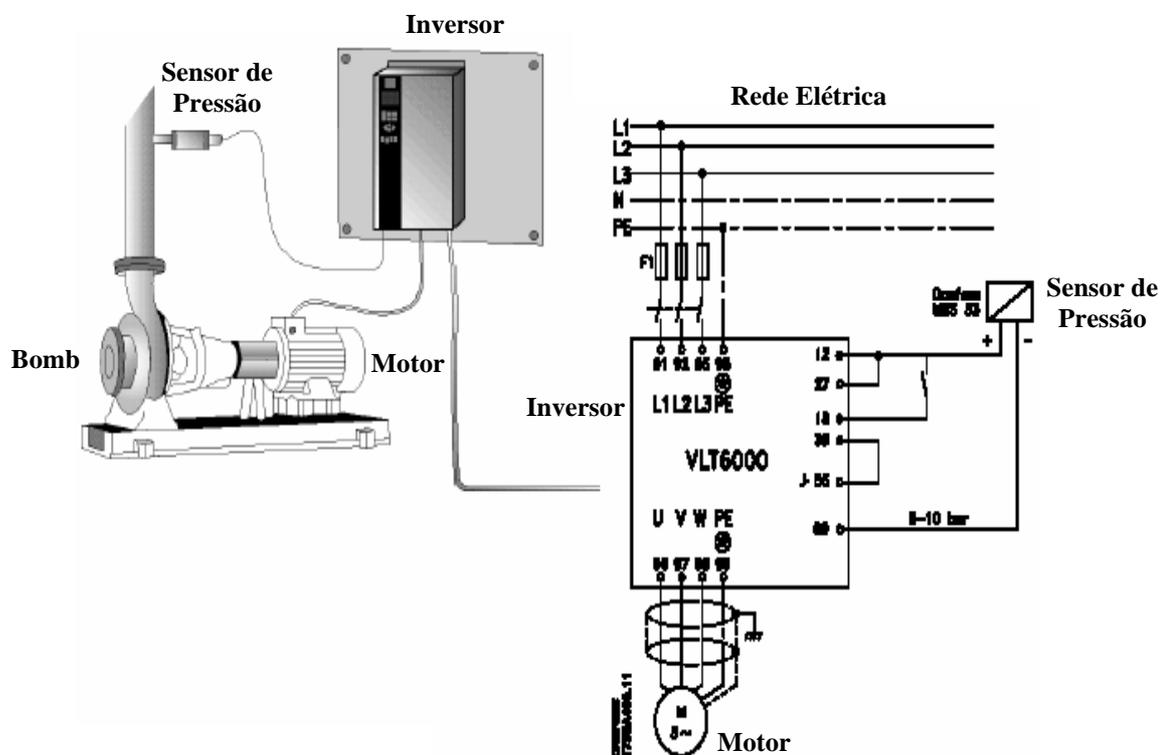


Figura 2 - Esquema do sistema de controle para uma bomba acionada por um inversor.

É importante observar, durante a seleção de um inversor de frequência, para acionamento específico de bombas centrífugas, se o mesmo permite a operação com cargas chamadas de quadráticas (torque variando com o quadrado da rotação) e se esta operação é automática e otimizada, possibilitando uma redução ainda maior de energia. Outra característica importante é a possibilidade do inversor parar a bomba, sem desligar o motor elétrico, quando se atinge um valor mínimo do sinal de *feedback*. Este sinal ao atingir um nível pré-estabelecido para operação, coloca a bomba novamente em regime de velocidade variável. Também, com conhecimento da curva da bomba, existem inversores que possibilitam a operação do tipo *sensorless*, ou seja, pode operar através de controle PID sem necessidade de um sensor de pressão, por exemplo (Danfoss, 2006)..

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

A determinação da velocidade de operação em um sistema em velocidade variável é importante para a análise de viabilidade econômica. O cálculo é realizado com o auxílio das leis de similaridade, ou afinidade. Para ilustrar este cálculo, a figura 3 apresenta um sistema operando em uma rotação N1, demandando 260 m³/h de vazão e precisará mudar para 160 m³/h. As curvas características do sistema de bombeamento, a curva de afinidade e o ponto de acoplamento inicial entre o sistema e a bomba estão destacados. Nestas condições, a questão é qual deverá ser a nova rotação da bomba?

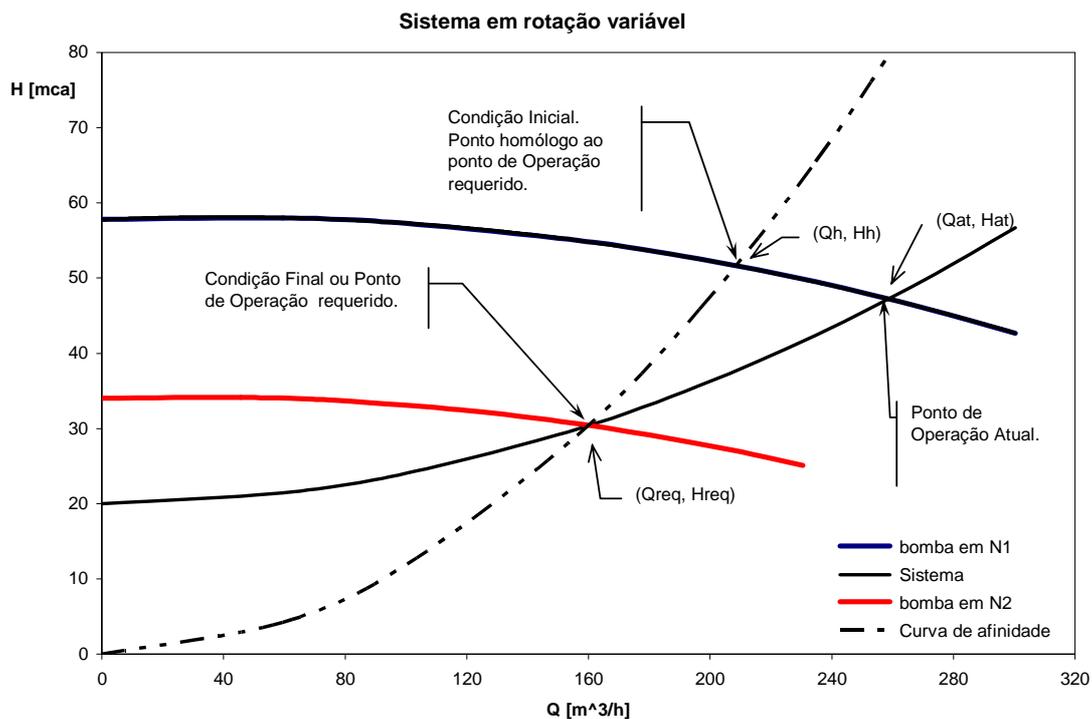


Figura 3 - Representação do sistema de bombeamento em rotações diferentes.

Um modo de se determinar a solução deste problema é encontrar os pontos homólogos (ou pontos de mesmo rendimento) às condições finais (ou ponto de projeto requerido).

O problema pode, para efeito didático, se dividido nos seguintes passos:

- 1) - escrever a equação da bomba na forma polinomial.

$$H_B = a + bQ + cQ^2 \quad (4)$$

sendo Q a vazão. Os coeficientes a, b e c podem ser obtidos usando uma solução numérica através do método dos mínimos quadrados, onde os dados de entrada são justamente os pares (Q_B, H_B) retirados da curva do fabricante da bomba. Em planilha eletrônicas há uma forma muito rápida de se conseguir esses coeficientes através da função do tipo "adicionar linha de tendência", marcando a opção do tipo "mostrar equação no gráfico".

2) – modelar o sistema da seguinte forma

$$H_s = d + eQ^2 \quad (5)$$

sendo d e e, coeficientes que podem ser determinados com base nas informações das condições de operação do sistema. O valor do coeficiente d corresponde ao desnível geométrico entre os pontos de sucção e recalque, H_o , e o valor de E, pode ser obtido verificando-se o ponto atual de acoplamento entre as curvas do sistema e a curva da bomba. Assim a equação (5) pode ser expressa como

$$H_s = H_o + \frac{H_{at} - H_o}{Q_{at}^2} Q^2 \quad (6)$$

3) – a energia específica demandada pelo sistema na vazão requerida é calculada diretamente pela equação 5. Os pontos de mesmo rendimento, também denominados de pontos homólogos, (Q_h, H_h) e (Q_{req}, H_{req}) , onde o primeiro ainda é desconhecido, se relacionam pelas equações (1) e (2), ou seja.

$$Q_h = Q_{req} \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

$$H_h = H_{req} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (8)$$

4) – o ponto (Q_h, H_h) está sobre a curva da bomba e, portanto a equação (4) pode ser usada. Levando-se em consideração (7) e (8) resulta

$$H_{req} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = a + bQ_{req} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) + cQ_{req}^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (9)$$

Observa-se que nesta equação, apenas N_2 é desconhecido, pois H_{req} é dado pela equação (5) conforme observado no item 3. Portanto,

$$\left(H_o + \frac{H_{at} - H_o}{Q_{at}^2} Q_{req}^2 \right) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = a + bQ_{req} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) + cQ_{req}^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (10)$$

Rearranjando a equação (10), resulta

$$\frac{a}{N_1^2} N_2^2 + \frac{bQ_{req}}{N_1} N_2 + \left(c - \frac{H_{at} - H_o}{Q_{at}^2} \right) Q_{req}^2 - H_o = 0 \quad (11)$$

A equação (10) é uma equação do 2º grau em N_2 com coeficientes

$$a_1 = \frac{a}{N_1^2} \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{bQ_{req}}{N_1} \quad (13)$$

$$c_1 = \left(c - \frac{H_{at} - H_o}{Q_{at}^2} \right) Q_{req}^2 - H_o \quad (14)$$

Uma vez determinado N_2 através da resolução da equação (11), pode-se expressar a curva da bomba na rotação N_2 usando as seguintes equações

$$Q_{N_2} = Q \frac{N_2}{N_1} \quad (15)$$

$$H_{N_2} = H \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (16)$$

Onde (Q, H) são pontos da curva do fabricante na rotação N_1 .

ANÁLISE DE CASOS ESPECIAIS

Análise da Operação de Bombas em Paralelo

Uma configuração bastante comum em sistemas de abastecimento é a operação em paralelo. Para este caso, quando se tem as condições hidráulicas que viabilizam a operação em velocidade variável, é necessária uma análise técnico-econômica para se verificar qual o número ótimo de inversores de frequência para o acionamento das bombas. Para ilustrar este caso, considera-se um sistema composto por 4 conjuntos motor-bomba operando em paralelo, com as seguintes características: motor 400 HP, 1.175 rpm, bomba vertical, vazão nominal de 3.350 m³/h, altura manométrica de 26 mca. Para este sistema foi realizado uma série de medidas de vazão envolvendo.

A figura 4 apresenta essas medidas, que representam a variação semanal de vazão do sistema. Através destas curvas de variação de vazão, observa-se uma redução de água bombeada referente ao período de 22 a 6 h, que corresponde ao quadro típico esperado para a redução do consumo de água. Esta variação oferece uma condição apropriada para a implantação de um sistema em velocidade variável, visando adequar a rotação das bombas em função da carga e reduzindo, conseqüentemente, o consumo de energia.

A figura 5 mostra as curvas do sistema para as condições máxima e mínima de vazão, correspondendo às condições extremas de posicionamento da válvula de controle. Nesta figura são mostradas as curvas de uma única bomba e a sua associação com 4 bombas em paralelo, para duas condições rotação, a rotação nominal da bomba, 1175 rpm, e a rotação para a operação de condição de vazão mínima, correspondente a solução em velocidade variável, obtendo-se um valor de 1000 rpm.

A redução do consumo de potência para uma bomba, correspondendo a esta diminuição no valor da rotação, é apresentada na figura 6.

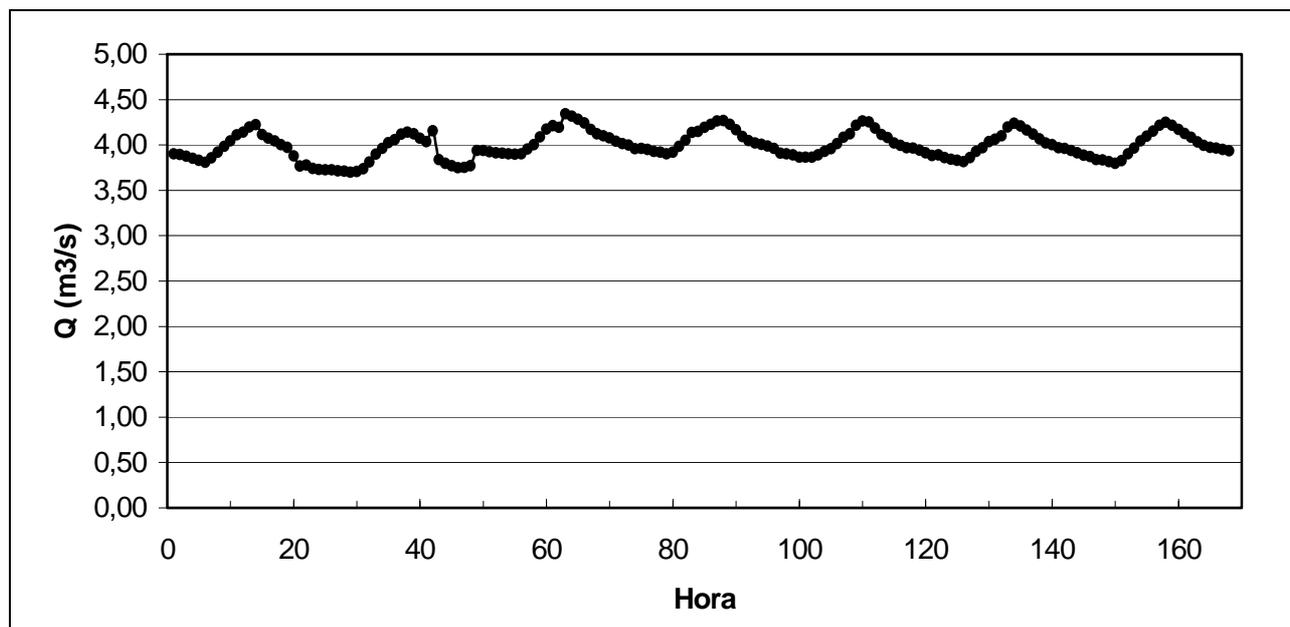


Figura 4 - Caso bombas em paralelo – variação semanal de vazão.

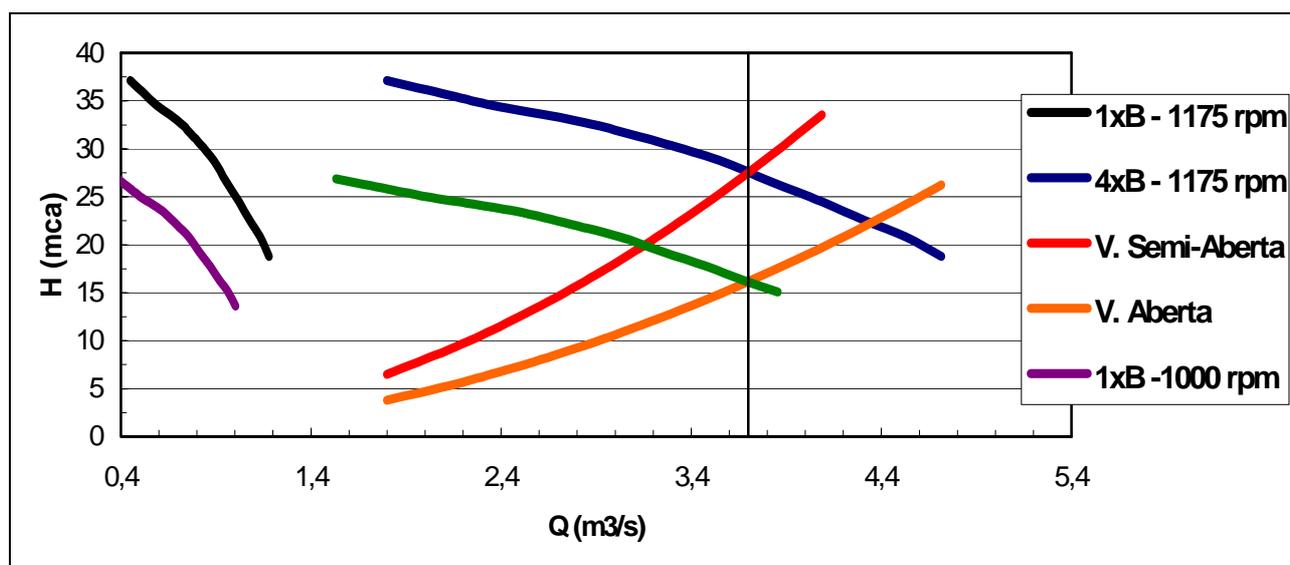


Figura 5 - Caso bombas em paralelo – condições extremas de vazão.

A figura 7 mostra a evolução do valor de rotação das bombas correspondente à variação de vazão, Este valor de rotação foi obtido através da metodologia apresentado anteriormente. A figura 8 apresenta a variação semanal da potência em velocidade fixa e variável, indicando os valores de economia de energia, obtidos, tanto com somente o cálculo da variação de velocidade, corresponde às condições hidráulicas, quanto com a economia adicional máxima obtida pela adequação do fator de potência e de carga do motor elétrico, devido à ação do inversor de frequência nos quatro motores.

Para a configuração final do sistema, tem-se que realizar também um estudo de viabilidade econômica, apresentando-se os indicadores financeiros. Entretanto, outro aspecto importante é a verificação da necessidade de se operar com todas as bombas em velocidade variável, já que se

pode atingir o ponto de operação desejado mantendo-se bombas em velocidade constante, como ilustra a figura 9 (Abrahim Júnior e Fonseca, 2005).

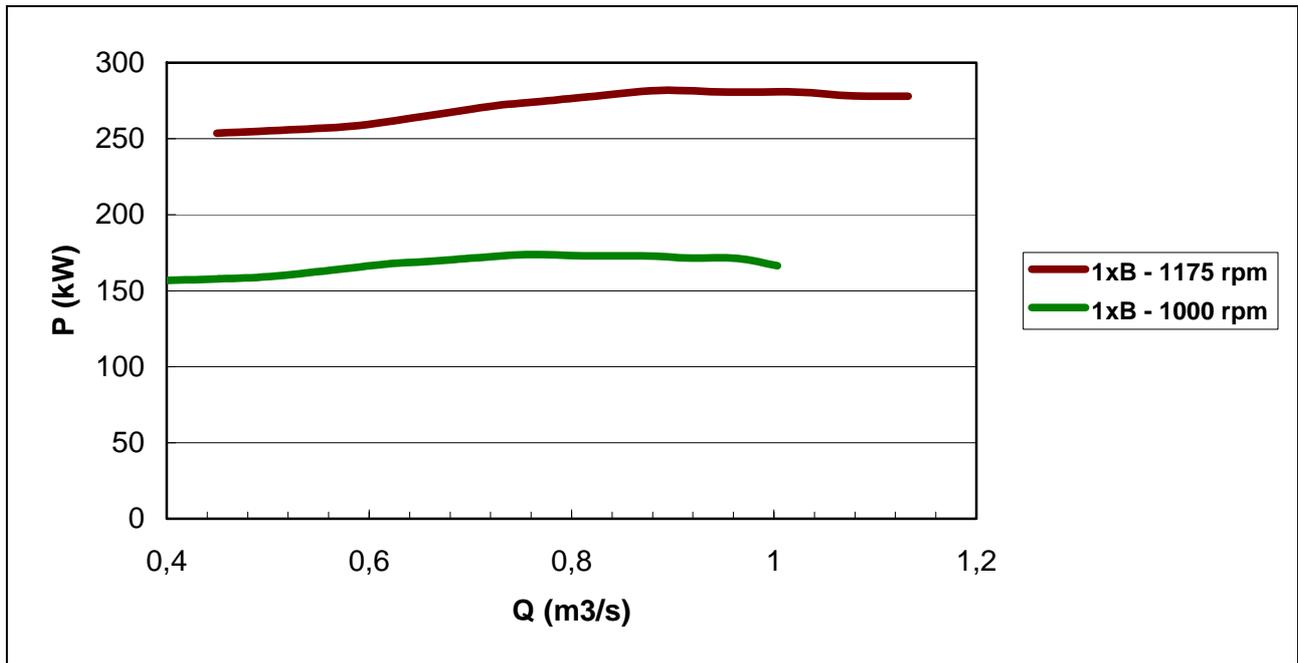


Figura 6 - Caso bombas em paralelo – variação da potência da bomba.

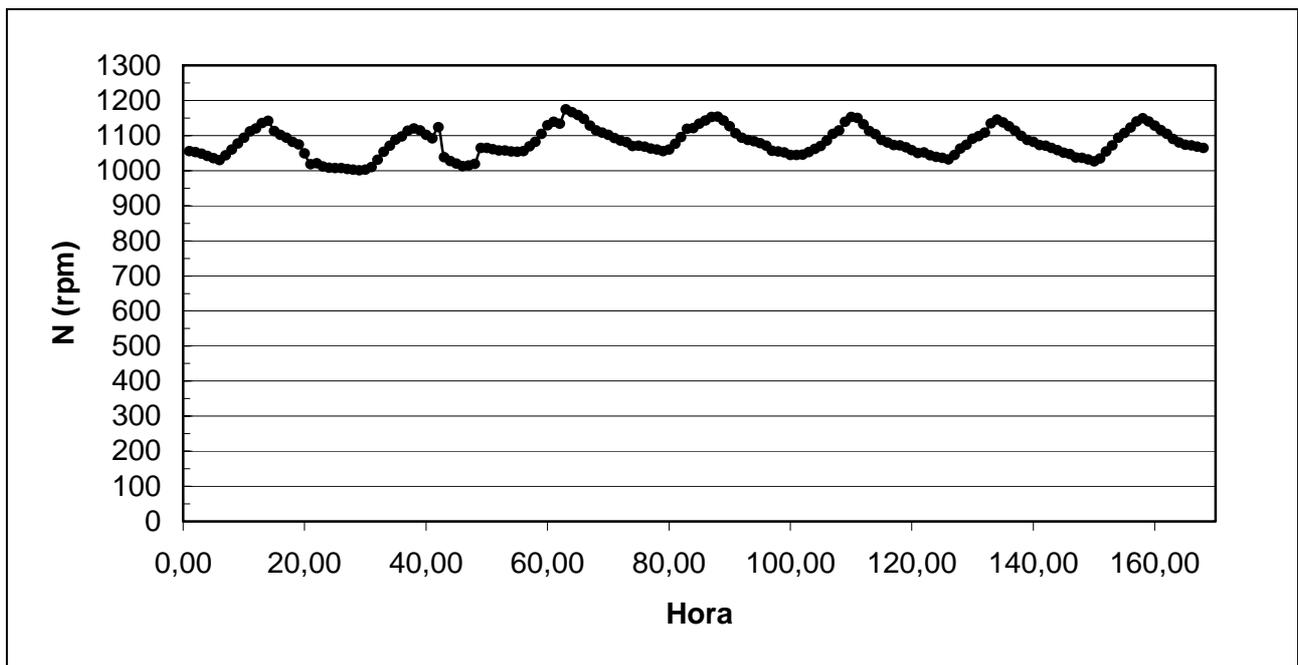


Figura 7 - Caso bombas em paralelo – variação da rotação da bomba.

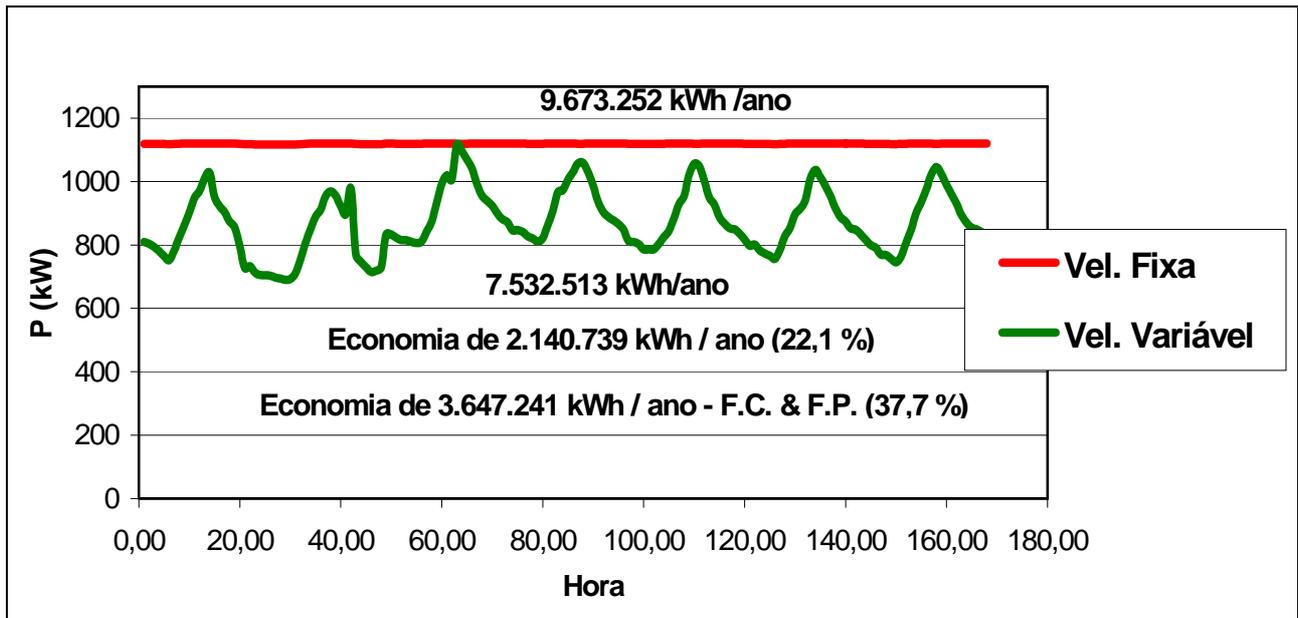


Figura 8 - Caso bombas em paralelo – economia de energia com as 4 bombas em paralelo.

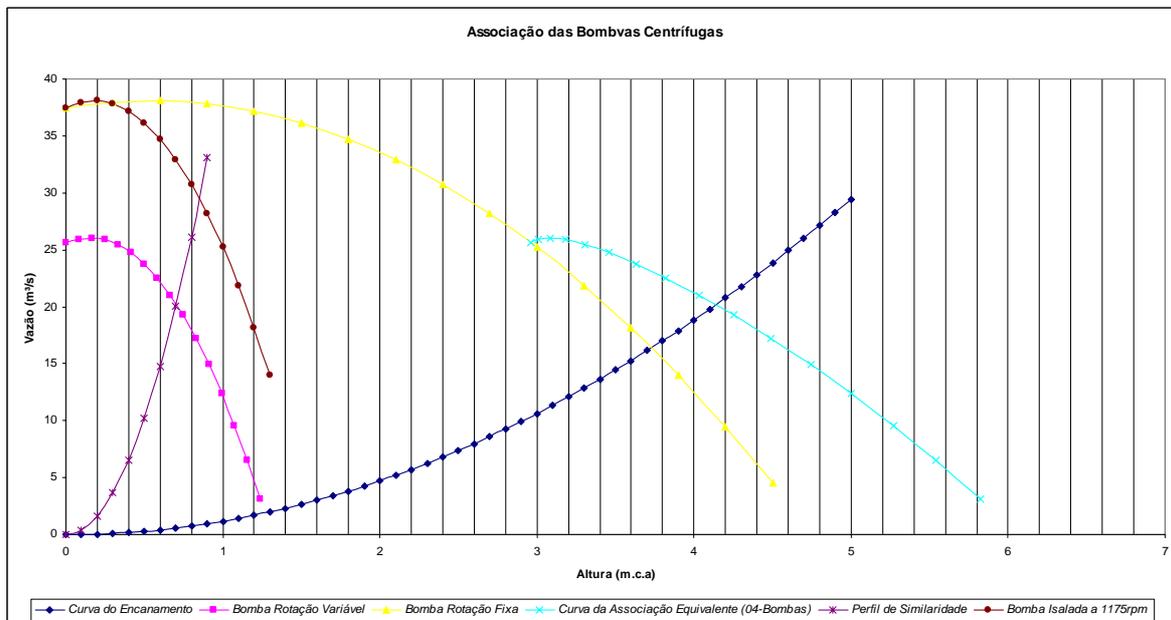


Figura 9 - Caso bombas em paralelo – associação com velocidades diferentes.

A figura 10 apresenta, para o nível de variação de vazão mostrada na figura 4, a potência consumida com a operação do sistema com todas as bombas operando em velocidade constante e com o sistema variando o número de bombas operando em velocidade variável. Observa-se que a partir de 3 bombas em velocidade variável o impacto na redução de energia não é significativo. Assim, para este caso, bastariam duas bombas operando em velocidade variável para se obter uma economia de energia viável economicamente. Mais detalhes podem ser encontrados em Chan e Li (1998).

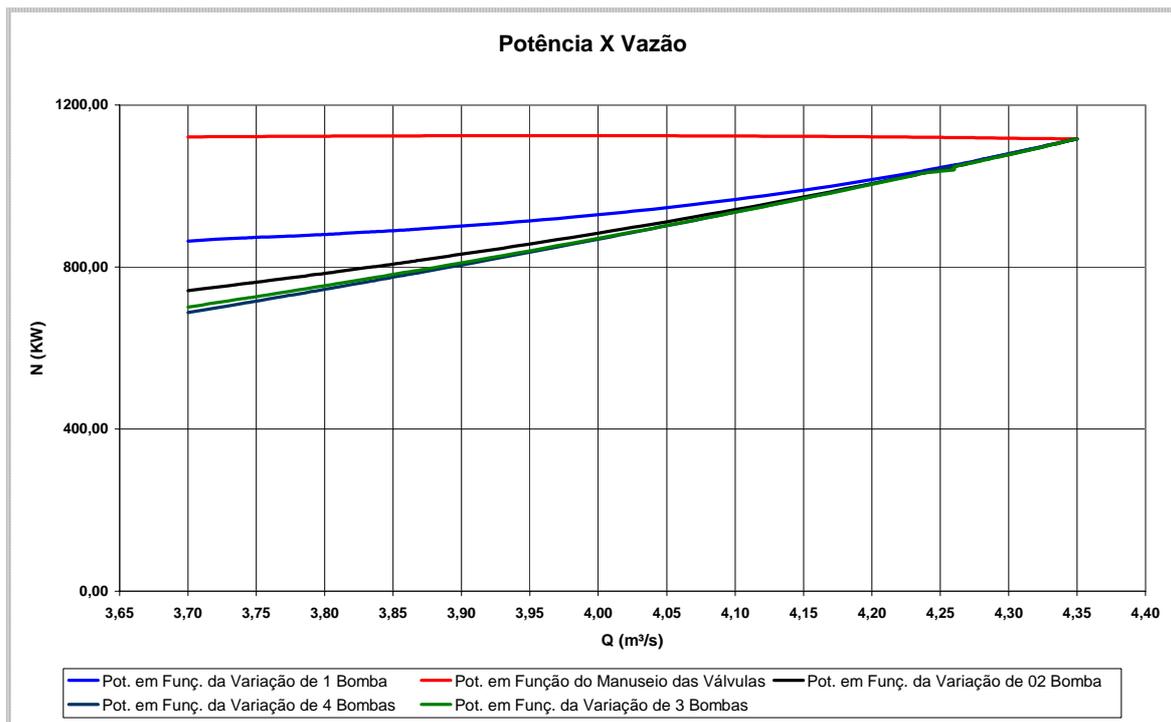


Figura 10 - Caso bombas em paralelo – redução do consumo de energia em função do número de bombas operando em velocidade variável..

Análise da Operação de Bombas com Controle de Nível

Um exemplo muito interessante sobre a efficientização de processo de sistemas de bombeamento, é o caso da operação com controle de nível. Aqui é apresentado um caso extremo encontrado em uma planta de beneficiamento de minério, porém com conceitos plenamente aplicáveis à área de saneamento. A constante partida e parada das bombas conduziu a problemas como: altos picos de corrente devido à partida direta dos motores elétricos; alto custo de energia devido a não adaptação da velocidade da bomba à operação; alta tensão mecânica nos componentes mecânicos, devido à partida brusca dos motores; e diminuição da vida útil dos componentes mecânicos devido à fadiga, ocasionada pelo grande número de partida durante a operação.

Os dados do motor elétrico são potência 125 cv, rotação: 1780 rpm, tensão 440 V. A bomba opera através de um controle on-off, comandada pelo sinal de um sensor de nível do tanque de transferência, ajustado para partir a bomba em um nível de 40 % do volume total e para parar a bomba quando o nível de 70 % é atingido. A alimentação de rejeito para o tanque é contínua. Visando verificar o regime de operação das bombas, foram registrados, através do supervisor da planta, os intervalos de tempo de operação e parada das bombas. As figuras 11 e 12 apresentam um registro típico para um período de 3 h de funcionamento. Desta observação, tem-se de 8 a 9 partidas por hora, um número alto, que justifica as quebras ocorridas nos eixos das bombas, devido ao problema de fadiga. A figura 12 apresenta o tempo médio registrado para a operação e parada da bomba. A variação para o tempo de paradas deve-se às variações no fluxo de massa do processo, ocasionando variações de geração de rejeito, ou seja, menor fluxo de rejeito para alimentação do tanque, maior o tempo de parada da bomba.

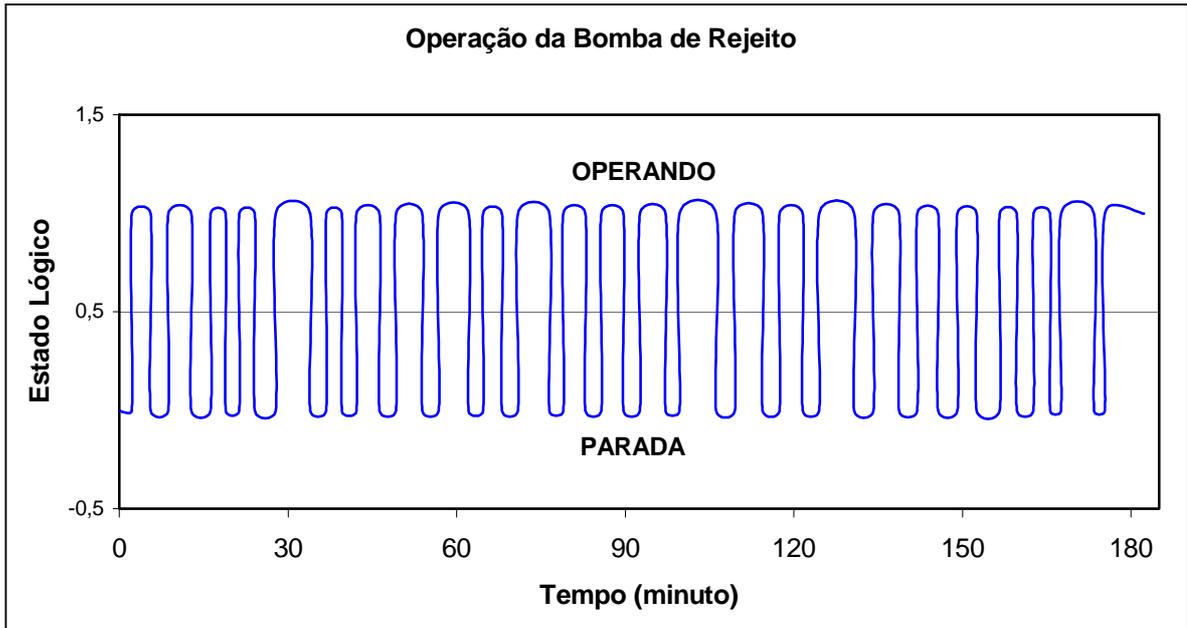


Figura 11 - Caso bomba com controle de nível – regime de operação.

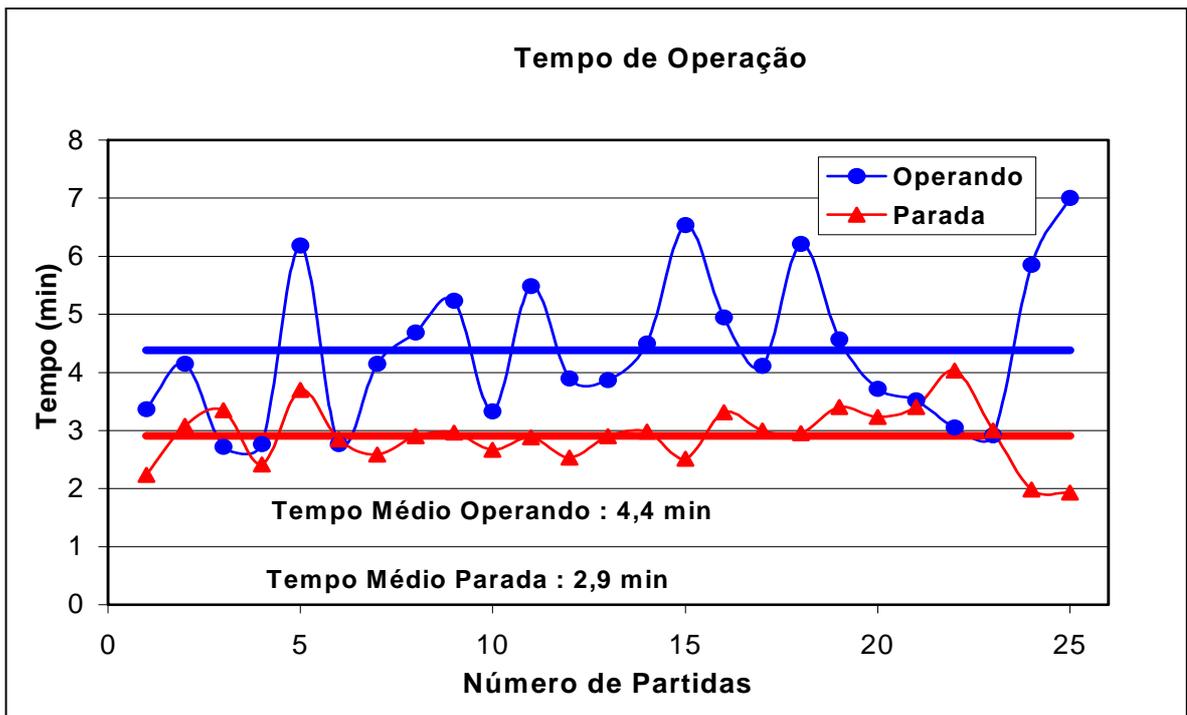


Figura 12 - Caso bomba com controle de nível – regime de operação médio.

O tempo de operação da bomba varia conforme as condições de carga, ou seja, da quantidade de sólidos presentes na mistura líquido-sólido, o que modifica a perda de carga do sistema, variando o ponto de operação.

Para a simulação da bomba em regime de velocidade variável é necessária a obtenção de expressões matemáticas para as curvas $H \times Q$ e $\eta \times Q$, para a velocidade nominal da bomba. As curvas para outras velocidades são obtidas através das leis de afinidade. Para o cálculo da vazão de alimentação do tanque de transferência, inicialmente estimou-se o volume útil do tanque de transferência,

aplicando-se a lei da conservação da massa para as condições de bomba parada e bomba operando. Para a bomba parada tem-se:

$$Q_{in} = V_{\text{útil}} / T_{bp} \quad (17)$$

onde Q_{in} é a vazão de alimentação do tanque de transferência, $V_{\text{útil}}$ é o volume útil do tanque de transferência e T_{bp} é o tempo médio da bomba parada.

Para a bomba operando, tem-se

$$V_{\text{útil}} = (Q_{out} - Q_{in}) T_{bo} \quad (18)$$

onde Q_{out} é a vazão volumétrica de saída de rejeitos do tanque de transferência e T_{bo} é o tempo médio da bomba operando.

Substituindo (17) em (18), pode expressar $V_{\text{útil}}$ como

$$V_{\text{útil}} = (Q_{out} T_{bo}) / [(T_{bo}/T_{bp}) + 1] \quad (19)$$

Com os dados do problema, obtém-se

$$V_{\text{útil}} = 12,24 \text{ m}^3 \quad \text{e} \quad Q_{in} = 253,1 \text{ m}^3/\text{h} \quad (20)$$

Assim, em média, esta seria a vazão que a bomba de rejeito deveria ter para manter o nível do tanque estabilizado, sem necessitar das partidas intermitentes.

Para se evitar as repetitivas partidas da bomba, um sistema de controle PID pode ser implementado, utilizando-se como variável de processo o sinal do nível do tanque. Assim, o sinal de 0-10 bar da figura seria o sinal de nível mínimo-nível máximo do tanque, correspondendo a um sinal, por exemplo, de 4-20 mA do sensor de nível. O *set-point* seria o nível médio do tanque. Neste sistema de controle o inversor ajusta automaticamente a velocidade de rotação da bomba para manter o nível constante. No caso de interrupção da alimentação de rejeito para o tanque, o inversor, com sua função especial modo latente, se ajusta em uma velocidade mínima para não bombear rejeito, sem, entretanto, desligar a bomba, evitando uma situação de partida. Quando a alimentação de rejeito reiniciar, o inversor, com sua função especial modo despertar, aciona a bomba, com uma rampa de aceleração adequada, para a condição de operação normal do sistema. O sistema permite ainda intertravamentos e o acionamento de alarmes. A figura 13 mostra a evolução da rotação da bomba para 3 h de operação. É importante notar que a potência absorvida refere-se a potência hidráulica. Falta ainda considerar os rendimentos da transmissão mecânica e do motor elétrico. Observa-se que pelo nível de toque necessário em função da rotação, pode-se eliminar as correias e ainda utilizar um motor de potência inferior. Entretanto, deve-se guardar uma reserva de potência para eventuais emergências em se tenha necessidade de se obter vazões extremas. Nesta análise será considerada uma vazão extrema igual a $Q_{\text{max}} = 750 \text{ m}^3/\text{h}$. Para esta vazão máxima e para a rotação nominal de 900 rpm da bomba, tem-se uma potência hidráulica absorvida de aproximadamente 65 kW. Pode-se então selecionar um motor de alto rendimento de 100 cv. É importante observar que, com a implementação do sistema de controle, a vazão média será de aproximadamente $250 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo, portanto, a vazão máxima considerada um valor de altíssimo fator de segurança. Entretanto, por não se conhecer detalhadamente o processo e suas possíveis variações, este valor será mantido.

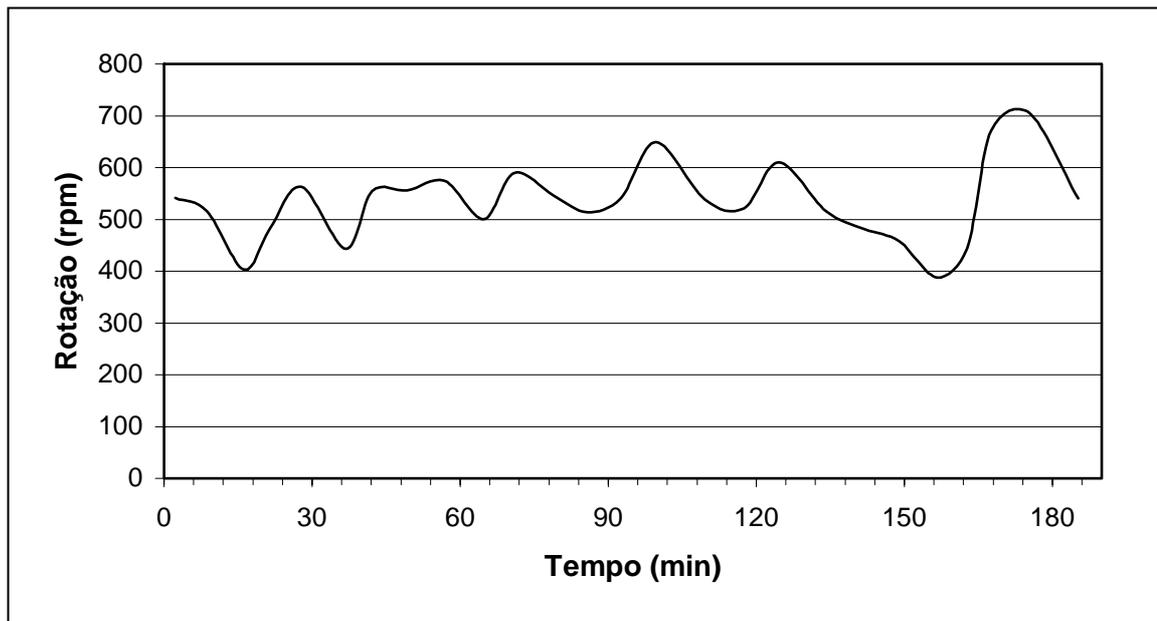


Figura 13 - Caso bomba com controle de nível – variação da rotação.

A configuração final para o acionamento da bomba de rejeito será a utilização de um motor de alto rendimento de 100 cv com um inversor de frequência. Para a análise econômica, visando estimativa de tempo de retorno de capital investido, consideraram-se os seguintes dados: carga de operação da bomba 24 h diárias, número de dias de operação mensal 30 dias, custo da energia: R\$ 0,24/kWh, taxa financeira 1,0 %/mês, custo do inversor R\$ 20.438,25 (impostos inclusos). Para o cálculo do pay-back, considerou-se as condições médias atuais e simuladas. A figura 14 apresenta, de maneira simplificada, a evolução dos custos. Verifica-se que se tem um retorno do capital investido de 9 (nove) meses, demonstrando a grande potencialidade do investimento. É importante observar que neste cálculo não foram considerados os custos de manutenção e das correias.

CONCLUSÕES

Foram apresentados os principais aspectos envolvidos para a análise da implementação de sistemas de bombeamento em velocidade variável, abordando os princípios teóricos básicos e os aspectos tecnológicos e econômicos. Muitos erros podem ser cometidos caso estes aspectos não sejam analisados com a devida atenção.

Verifica-se que, embora o uso de inversores de frequência sempre conduz à economia de energia, deve-se analisar o retorno financeiro, visando adotar a melhor solução sob o ponto de vista econômico. Este fato é bem demonstrado com o caso apresentado sobre a operação de bombas em paralelo.

Para o caso de bombas operando em controle de nível foi apresentado um caso que pode ser aplicado à sistemas de abastecimento de água, em especial para sistemas com baixo volume de reservação, ou mesmos para sistemas de condomínios. O retorno de capital investido é considerado muito bom.

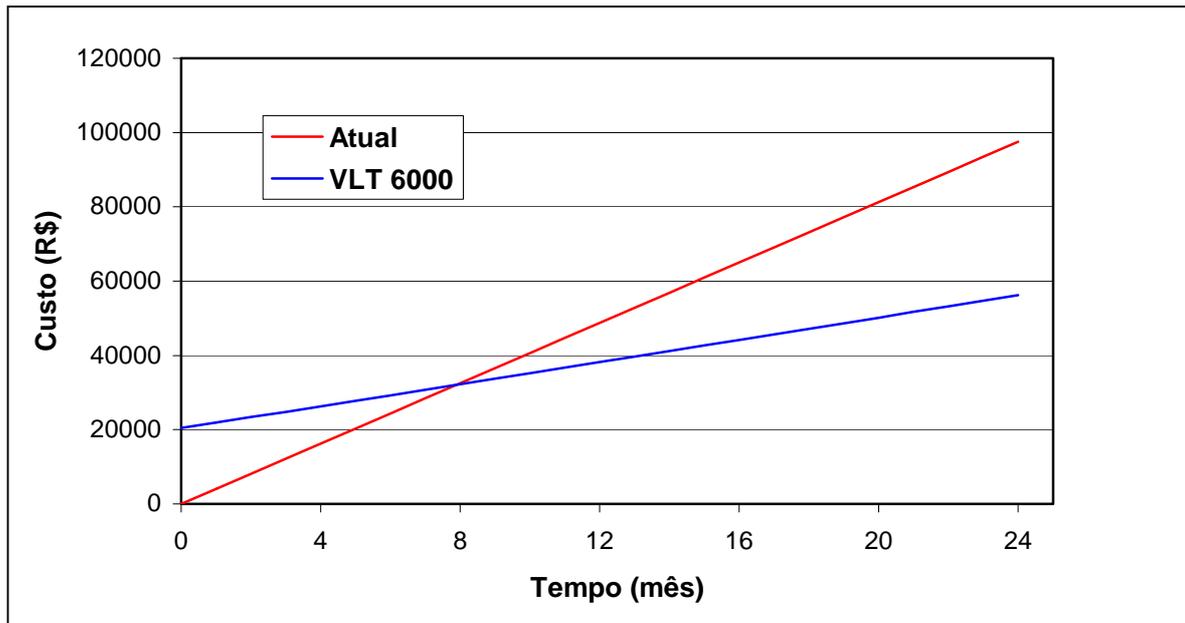


Figura 14 - Caso bomba com controle de nível – retorno de capital investido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHIM JÚNIOR, O.; FONSECA, A. B. 2005. “Redução do consumo de potência em um sistema de bombeamento”. TCC - Depto. de Eng. Mecânica, UFPA.
- CARLSON, R. 2000. “The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pumps”. IEEE Transaction on Industry Application, vol. 36, o. 6, pp. 1725-1733.
- CHAN, D. T. W.; LI, W.. 1998. “Design and implementation of variable frequency regulatory system for water supply”. IEEE paper 0-7803-3547-3-7/16.
- DANFOSS. 2006. “Sensorless pump control for VLT600 HVAC / FCM 300”. Documento MG.10.T1.02.
- GOMES, H. P. 2005. “Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos”. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- MIRCEVSKI, S. A.; KOSTIC, Z. A.; ANDONOV, Z. L. 1998. “Energy saving with pump’s AC adjustable speed drives”. IEEE paper 0-7803-3879-0.
- TSUTIYA, T. M. 2004. “Abastecimento de Água”. Escola Politécnica USP.