

## OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

**Celso Rogério Schmidlin Júnior, Ricardo Silva Thé Pontes, Adson Bezerra Moreira, Felipe Azevedo Guimarães, Victor de Paula B. Aguiar**

*Universidade Federal do Ceará, Av. Eng. Humberto Monte, s/n, Campus do Pici*

**Abstract:** This paper aims to experimentally quantify, in LAMOTRIZ, the reduction of the active power required by the drive of a centrifugal pump that opts for the operation according to the outflow reduction method by speed variation instead the one that uses strangulation valve. Thus, the methodology applied in this work could be used as base for the determination, of a more precise way, of the financial viability of the above-mentioned option.

**Keywords:** Flow and speed control.

**Resumo:** Este artigo visa, por meio de ensaios realizados no LAMOTRIZ, quantificar a redução da potência ativa requerida pelo elemento acionador de uma bomba centrífuga que opta pela operação segundo o método de redução de vazão via variação de velocidade ao invés do que usa válvula de estrangulamento. Assim, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser usada como base para a determinação, de forma mais precisa, da viabilidade financeira da opção supracitada.

**Palavras Chaves:** Controle de vazão e velocidade.

### 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério das Minas e Energia (2005), dentre os setores consumidores de eletricidade brasileiros, a indústria foi responsável por 47,9% de todos os 359,6 TWh de energia elétrica consumida no país no ano de 2004. Por sua vez, dentre os diversos equipamentos utilizados na indústria, os sistemas motrizes são responsáveis por 61,8% do consumo de eletricidade na indústria.

Dentre as estratégias de redução do consumo de eletricidade na indústria, este trabalho estuda a utilização do conversor de frequência no controle de vazão de sistemas de bombeamento, o qual é proposto em substituição ao método de controle de vazão por estrangulamento de válvula, normalmente utilizado nestes sistemas.

Assim, este trabalho apresenta os resultados obtidos através de experimentos realizados na bancada de bombeamento do Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais (LAMOTRIZ), a qual opera segundo dois métodos de controle de vazão apresentados. Com isso, visa-se determinar qual dos dois métodos de controle de vazão garante que o sistema de bombeamento opere com menor consumo de energia elétrica, além de mensurar a economia alcançada.

### 2 BANCADA DE BOMBEAMENTO

A Figura 1 descreve, por meio de um diagrama esquemático, a configuração da bancada de bombeamento instalada no LAMOTRIZ, cujos elementos estão detalhados na Tabela 1.

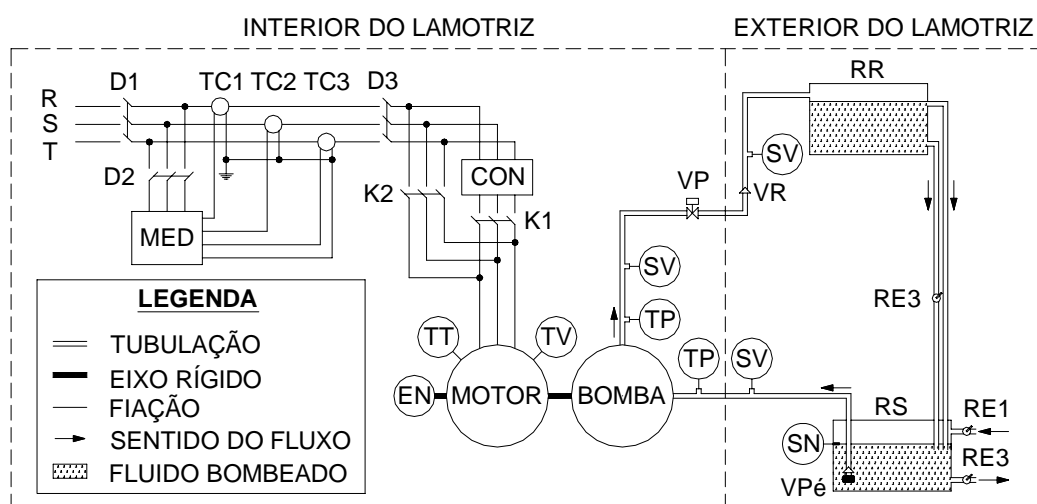


Figura 1: Bancada de bombeamento do LAMOTRIZ.

Tabela 1: Elementos da Bancada de Testes do LAMOTRIZ.

Item	Descrição	Item	Descrição
R, S e T	Fases	MED	Multimedidor
D	Disjuntor	K	Contactore
CON	Conversor	EN	Encoder
TV	Transdutor de Vibração	TT	Transdutor de Temperatura
TC	Transdutor de Corrente	TP	Transdutor de Pressão
RE	Registro	SV	Sensor de Vazão
VP	Válvula Proporcional	SN	Sensor de Nível Mínimo
VR	Válvula de Retenção	Vpé	Válvula de Pé com Crivo
RR	Reservatório de Recalque	RS	Reservatório de Sucção

A bomba centrífuga, o motor de indução trifásico e o conversor de frequência apresentam potências nomias de 1,1 kW (1,5 CV).

Os reservatórios de sucção e recalque têm capacidade de armazenar 2 m<sup>3</sup>, estando instalados no exterior do laboratório (conforme indicado na Fig. 1), com altura geométrica ( $H_g$ ) de 5,75 m.

A vazão de projeto da instalação é de 9 m<sup>3</sup>/h, sendo que, para tal, foram adotados diâmetros de 1¼" e 1½" para as tubulações de recalque e sucção. Com isso, a essa vazão, o sistema opera com carga de 18 mca.

O multimedidor utilizado na monitoração das grandezas elétricas apresenta categoria de medição III, sendo que, juntamente com o seu respectivo *software*, são

adquiridas *via* rede as formas de onda das tensões e correntes nas três fases, bem como seus respectivos espectros harmônicos, além de outros dados elétricos como: potência ativa, reativa e aparente; fator de potência; e energia consumida.

Dado a medida da vazão bombeada ser de vital importância para o trabalho, utilizam-se três sensores de vazão que estão localizados imediatamente na entrada e saída da bomba e após a válvula proporcional. Assim, os resultados são comparados (de forma a buscar possíveis desvios) e calculado o valor médio.

De forma a tornar a bancada totalmente automática, os sinais de saída de todos os sensores anteriormente descritos são enviados a um controlador lógico programável (CLP). Ainda, deste saem sinais para o fechamento/abertura dos contactores K1 e K2 e para a operação da válvula proporcional e do conversor.

### 3 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

No estudo de sistemas de bombeamento, diversos valores são apresentados na forma de curvas em função da vazão bombeada ( $Q$ ), sendo a carga ( $H$ ) um valor essencial ao entendimento da operação destes sistemas.

Tanto a bomba quanto a instalação na qual ela está inserida apresentam a sua curva  $H \times Q$ , sendo que, a partir do cruzamento destas curvas de carga, chega-se ao ponto de operação do sistema ( $Q_{op}$ ,  $H_{op}$ ), conforme mostrado na Figura 2.

Para que se possa variar a vazão bombeada, assim como exigido por alguns processos industriais, necessita-se que seja modificado o ponto de operação do sistema, o que se dá somente a partir de variação da curva da bomba ou da instalação. Como será mostrado a seguir, os dois métodos de controle de vazão em estudo operam a partir da variação destas curvas.

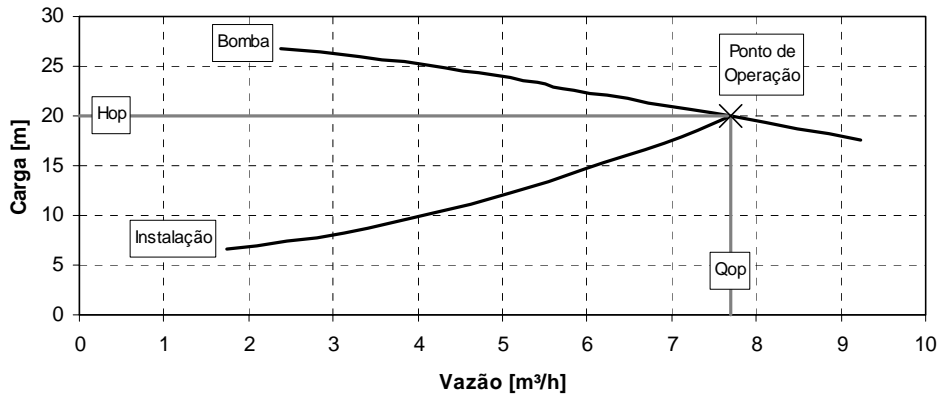


Figura 2: Ponto de operação do sistema de bombeamento.

### 3.1 Variação da Curva da Instalação

Segundo Macintyre (1987), a altura total de elevação da instalação ( $H_{inst}$ ) pode ser entendida como a energia exigida para o transporte do fluido no interior da tubulação, sendo matematicamente obtida (em metros) pela equação (1):

$$H_{inst}(Q) = H_g + J_{inst}(Q), \quad (1)$$

onde a altura geométrica ( $H_g$ ) é praticamente constante com a vazão e a perda de carga existente no deslocamento do fluido no interior da tubulação ( $J_{inst}$ ) é calculada em função da vazão pela equação (2):

$$J_{inst}(Q) = \frac{8 \cdot F_R \cdot (L_r + L_{eq})}{\pi^2 \cdot g \cdot d_e^5} \cdot Q^2, \quad (2)$$

onde  $L_r$  é a distância percorrida pelo fluido nas tubulações retas,  $L_{eq}$  é o comprimento equivalente dos acessórios em metros de tubulação reta,  $d_e$  é o diâmetro do encanamento,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $F_R$  é o fator de resistência da tubulação (adimensional).

Dentre as formas de se variar a curva da instalação, o método de estrangulamento de válvula é o mais utilizado, sendo baseado na inserção/retirada de perdas de carga localizadas em uma válvula por meio do seu fechamento/abertura. A Figura 3 mostra como a alteração da curva da instalação de 1 para 2, através da inserção de perdas de carga ( $H_2 > H_1$ ), altera o ponto de

operação de ( $Q_1; H_1$ ) para ( $Q_2; H_2$ ), obtendo a redução de vazão desejada ( $Q_2 < Q_1$ ).

### 3.2 Variação da Curva da Bomba

Dentre as formas de se modificar a curva de carga da bomba, este trabalho estuda o método de variação da velocidade de rotação.

Visando melhor visualizar as variações dos parâmetros característicos das bombas centrífugas com variação da rotação, além de permitir o uso das curvas fornecidas pelos fabricantes, são utilizadas as relações de Rateaux, dadas, segundo Alves (2002), pelas equações (3) e (4):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (3)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (4)$$

Aplicando-se as equações (3) e (4) a cada ponto da curva de carga da bomba à rotação  $\omega_1$  é obtida a curva para a velocidade  $\omega_2$ . A Figura 4 mostra como a variação da velocidade altera o ponto de operação, que vai de ( $Q_1; H_1$ ) para ( $Q_2; H_2$ ), obtendo a redução de vazão desejada ( $Q_2 < Q_1$ ). Em acréscimo, observa-se uma redução na carga ( $H_2 < H_1$ ).

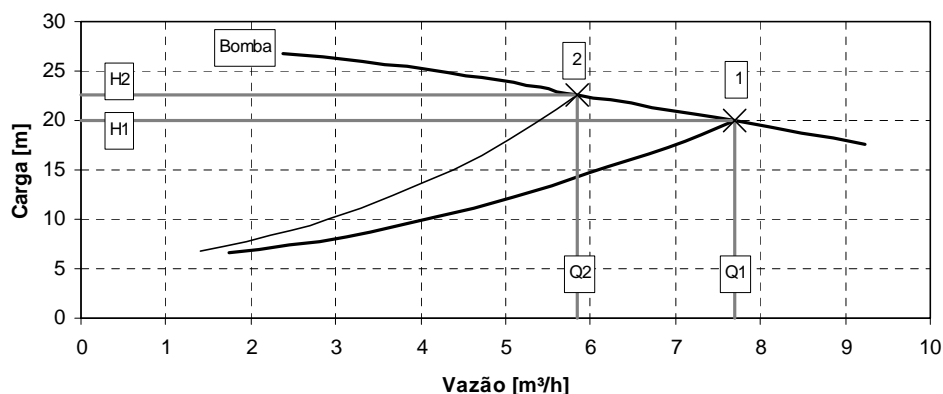


Figura 3: Controle de vazão por estrangulamento de válvula.

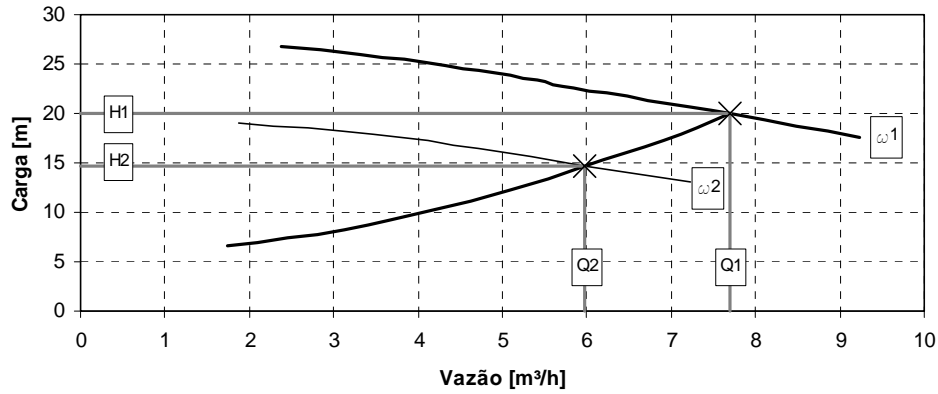


Figura 4: Controle de vazão por variação de velocidade.

A partir das equações (3) e (4), pode-se determinar a frequência mínima de saída do conversor para que haja bombeamento, calculada a partir da equação (5):

$$f_{R-\min} \approx f_{nom} \cdot \sqrt{\frac{H_g}{H_{f-nom}(0)}}, \quad (5)$$

onde  $H_{f-nom}(0)$  é o ponto em que a curva de carga versus vazão da bomba, para rotação nominal, se cruza com o eixo das ordenadas.

Considerando uma mesma bomba, ou seja,  $H_{f-nom}(0)$  constante, a equação (5) mostra que menores frequências serão alcançadas quanto menor for a altura geométrica da instalação.

## 4 POTENCIAL DE ECONOMIA

Para a bomba possa fornecer carga ao fluido, é necessária a inserção de potência mecânica ( $P_C$ ) no seu eixo, comumente denominada de BHP. Como a potência mecânica da carga também é função da vazão de fluido bombeado, esta variável é igualmente apresentada de forma gráfica.

Semelhante à curva de carga, a curva de potência mecânica se mantém inalterada no método de controle de vazão por estrangulamento de válvula.

No caso de utilização do método de variação de rotação, esta se modifica segundo a lei de Rateux dada, segundo Alves (2002), pela equação (6). Assim, aplicando-se as equações (3) e (6) a cada ponto da curva de potência mecânica da bomba à rotação  $\omega_1$ , obtem-se a curva para  $\omega_2$ .

$$\frac{P_{C-1}}{P_{C-2}} = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3 \quad (6)$$

Pela equação (6), percebe-se que a potência mecânica requerida pela bomba tende a reduzir com o cubo da redução de velocidade. Entretanto, vale ressaltar que esta equação não se aplica a um ponto em particular, mas a todos os pontos sobre a curva  $P_C$  vs  $Q$ .

A Figura 5 mostra que, ao se reduzir a vazão de  $Q_1$  para  $Q_2$ , a potência mecânica sai de  $P_{C-1}$  para:  $P_{C-2 (val)}$ , para método de controle de vazão por válvula de estrangulamento; e  $P_{C-2 (vel)}$ , para o caso do método de variação de velocidade. Vale ressaltar que nem sempre o valor de  $P_{C-2 (val)}$  será menor do que  $P_{C-1}$ , entretanto, tende a ser sempre menor do que  $P_{C-2 (vel)}$ .

## 5 RESULTADOS

A partir desta perspectiva de economia, foram realizados ensaios na bancada de bombeamento do LAMOTRIZ visando sua comprovação, além de mensurar a economia alcançada. Vale ressaltar que as curvas apresentadas neste trabalho são todas advindas de experimentos, não sendo utilizada nenhuma curva do fabricante. Mais detalhes sobre a obtenção destas curvas, são dados em Schmdlin (2006).

A Fig. 6 mostra as curvas de potência ativa requerida pelo sistema em função da vazão. Pode-se perceber que, para uma dada vazão desejada ( $Q_{des}$ ), quanto menor a frequência, menor a potência ativa requerida pelo acionador. Por exemplo, para  $Q_{des} = 6 \text{ m}^3/\text{h}$ , tem-se que a potência ativa requerida pelo acionador cai de  $PA_{val} = 1.322 \text{ W}$  ( $f_R = 60 \text{ Hz}$ ) para  $PA_{vel 1} = 1084 \text{ W}$  ( $f_R = 55 \text{ Hz}$ ),  $PA_{vel 2} = 860 \text{ W}$  ( $f_R = 50 \text{ Hz}$ ) e  $PA_{vel 3} = 650 \text{ W}$  ( $f_R = 45 \text{ Hz}$ ).

Dado que o principal objetivo deste trabalho é mostrar a economia de energia elétrica advinda da utilização do método de controle de vazão por meio de variação de velocidade em lugar do de estrangulamento de válvula, de forma a garantir uma melhor visualização dos resultados, são traçadas curvas de potência ativa economizada em função da vazão desejada –  $PA_{eco}(Q_{des})$ .

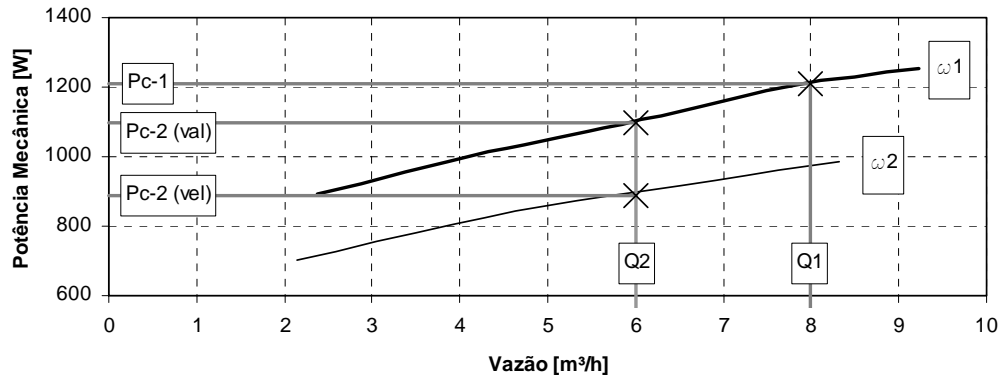


Figura 5: Potência mecânica da bomba em função do método de controle de vazão.

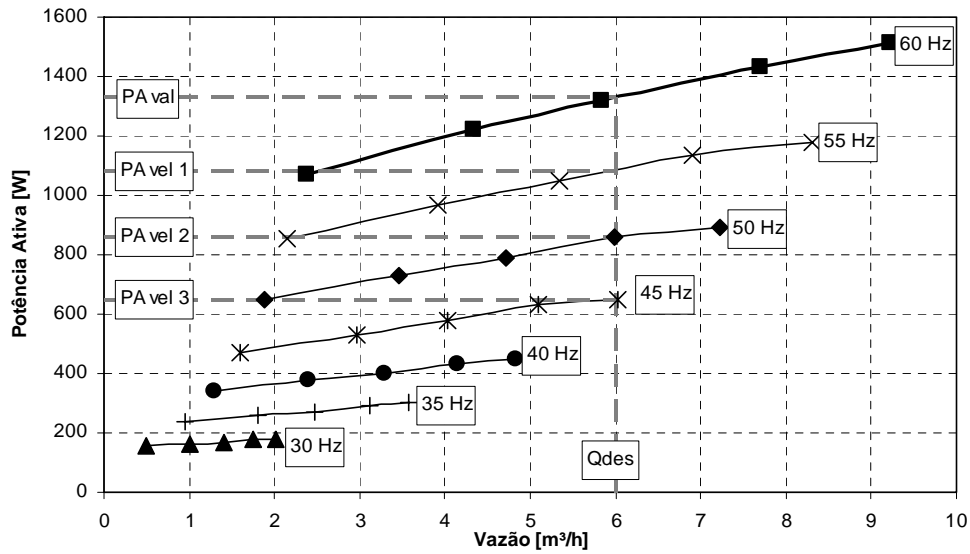


Figura 6: Curvas de potência ativa economizada para várias frequências.

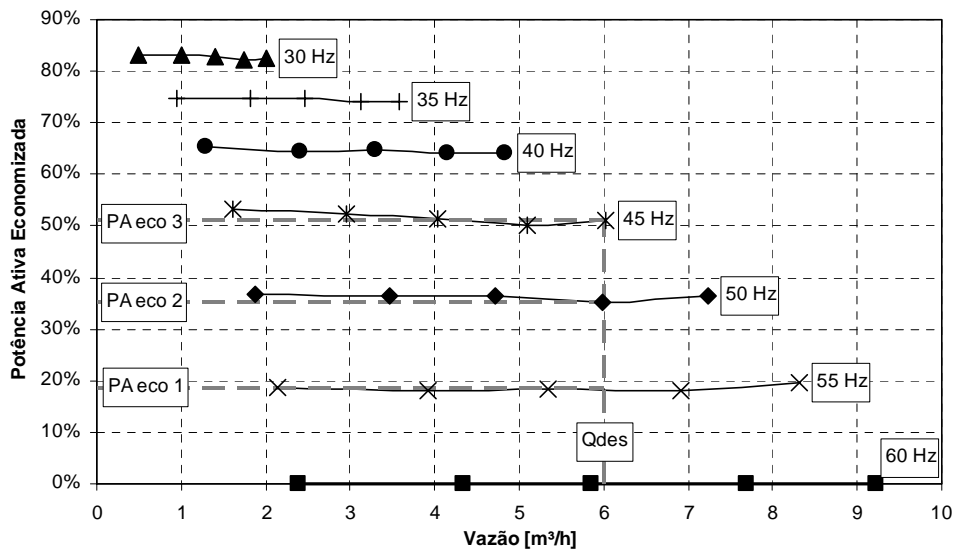


Figura 7: Curvas de potência ativa economizada para várias frequências.

A obtenção dos valores de potência ativa economizada é feita a partir da utilização da equação (7):

$$PA_{eco}(Q_{des}) = \frac{PA_{val}(Q_{des}) - PA_{vel}(Q_{des})}{PA_{val}(Q_{des})}, \quad (7)$$

onde  $PA_{val}$  e  $PA_{vel}$  são, respectivamente, as potências ativas requeridas segundo o método de estrangulamento

de válvula (este valor se encontra sobre a curva para rotação nominal) e variação de velocidade.

Como resultado, são obtidas as curvas de potência ativa economizada mostradas na Fig. 7, que mostra que, para uma mesma frequência, o percentual de potência ativa economizada é praticamente constante com a vazão, ou seja, este depende quase que exclusivamente da frequência.

Assim, a partir dos dados mostrados na Fig. 7, é obtida a Fig. 8, que mostra a potência ativa economizada em função da frequência. A partir desta figura pode-se

confirmar que quanto menor a frequência maior o percentual de potência ativa economizada.

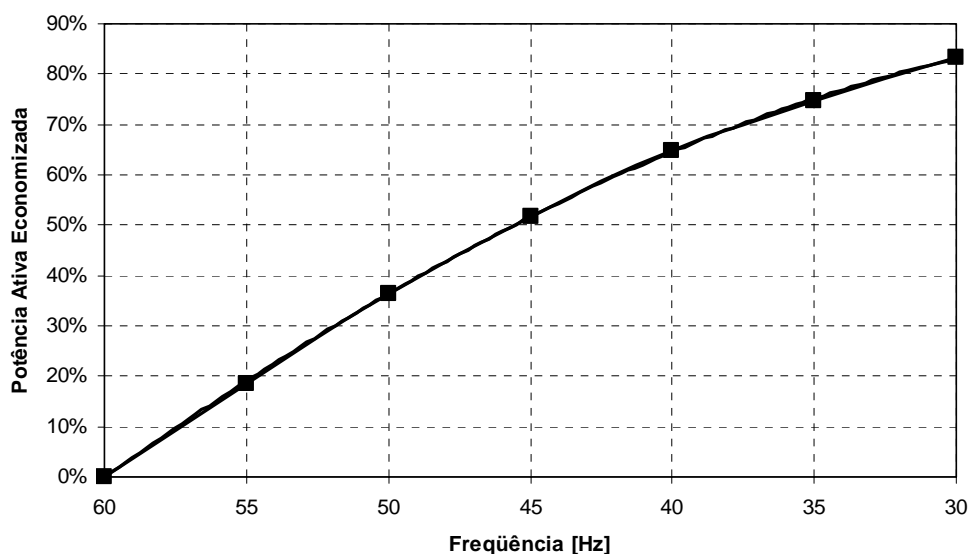


Figura 7: Potência ativa economizada em função da frequência.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados, o presente trabalho confirma que a opção pelo método de redução de vazão por meio da variação de velocidade do conjunto MIT-bomba – alcançada por meio do uso do conversor de frequência trifásico – em detrimento do que usa válvula de estrangulamento acarreta uma significativa redução da potência ativa requerida pelo elemento acionador da bomba centrífuga.

Entretanto, essa redução está intimamente ligada à frequência de saída do conversor: quanto menor a frequência maior o percentual de economia.

Por sua vez, para que sejam alcançadas reduzidas frequências deve-se estar atento à curva de carga da instalação de bombeamento, ou seja, uma maior economia será alcançada em instalações com reduzidas perdas de carga e altura geométrica, dado este tipo de instalação requerer uma menor frequência do conversor para que a vazão desejada seja alcançada. Assim:

- chama-se atenção para que esses dados sejam levados em consideração quando da elaboração de projetos de atratividade financeira da aquisição de conversores de frequência para uso no controle de vazão de sistemas de bombeamento;
- e propõe-se aos projetistas de instalações de bombeamento que, ao projetarem um sistema que vá operar com controle de vazão por meio de variação de velocidade, adotem dutos com diâmetros maiores do que os normalmente

calculados, de forma a permitir que maiores economias sejam alcançadas.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e à ELETROBRÁS por todo o apoio financeiro.

## 8 REFERÊNCIAS

- Alves, A. J., Oliveira, L. F. C. de; Oliveira, A. M. de (2002). Verificação das relações de Rateaux pelo emprego de um inversor de frequência. In: *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 6, no 3, p. 523-525.
- Macintyre, Archibald Joseph (1987). *Bombas e instalações de bombeamento*. RJ, Ed. Guanabara, S.A., 782p.
- Ministério das Minas e Energia (2005). *Balanço de Energia Útil*. Brasília.
- Ministério das Minas e Energia (2005). *Balanço Energético Nacional*. Brasília.
- Schmidlin Jr., C. R. (2006). *Operação do Conjunto Bomba Centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Conversor de Frequência Visando a Eficiência no uso da Energia Elétrica*. Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Fortaleza-CE.