

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

C. R. Schmidlin Jr., A. B. Moreira, T. N. Cavalcante Neto, E. S. Pitombeira, R. S. T. Pontes
 Universidade Federal do Ceará: R. Eng. Humberto Monte, s/n – Campus do Pici, Bloco 705
 CEP: 60.455-760, Caixa Postal 6001, Fortaleza, CE - Brazil
 celso@dee.ufc.br

Abstract – The present paper looks for quantifying the energy saving due to the use of rated flow variation method through the change of speed in detriment of that one that makes use of throttling valve (constant speed). For such, it is made an analysis of these two methods for two hydraulic installations: one with reduced geometric height and another with high. Still, for the analysis of the system efficiency, the losses in the frequency inverter and the additional losses in the motor due to the no-sinusoidal voltage source are considered.

Index Terms – Energy conservation, centrifugal pumps, PWM inverters, flow control.

I. INTRODUÇÃO

A conservação de energia, em especial a de energia elétrica, é uma preocupação do mundo moderno, devida à sua ligação direta com questões econômicas e ambientais. Dado que o setor que mais consome energia elétrica é o setor industrial e que grande parte desta energia é destinada a alimentar seus sistemas motrizes, estes sistemas têm sido apontados como alvos principais das ações que visam garantir a economia de energia elétrica.

Neste contexto, o LAMOTRIZ – Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes Industriais (fruto de uma parceria da ELETROBRÁS e do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará) – vem analisar as características de operação das diversas cargas motrizes industriais – tais como esteiras transportadoras, bombas centrífugas, ventiladores centrífugos e axiais e compressores – e propor formas de maximizar o aproveitamento da energia elétrica.

Assim, este trabalho se propõe a analisar a operação de sistemas de bombeamento no que concerne à variação de vazão, com o objetivo de garantir economia de energia elétrica. Desta feita, são comparados, por meio de experimentos e simulação computacional, os dois principais métodos de variação de vazão, os quais se baseiam: na variação da curva característica da instalação (por meio de válvula de estrangulamento) ou na variação da curva da bomba (por meio de variação de velocidade de rotação do motor).

II. DESCRIÇÃO DA BANCADA DE TESTES

A maior parte da bancada de testes desenvolvida encontra-se localizada no interior do laboratório, estando os reservatórios de sucção e recalque alocados no seu exterior. A Figura 1 mostra um diagrama esquemático da bancada de testes – cujos dispositivos estão detalhados na Tabela I –, a

Figura 2 mostra a parte da bancada que se encontra no interior do laboratório e a Figura 3, a que está no exterior.

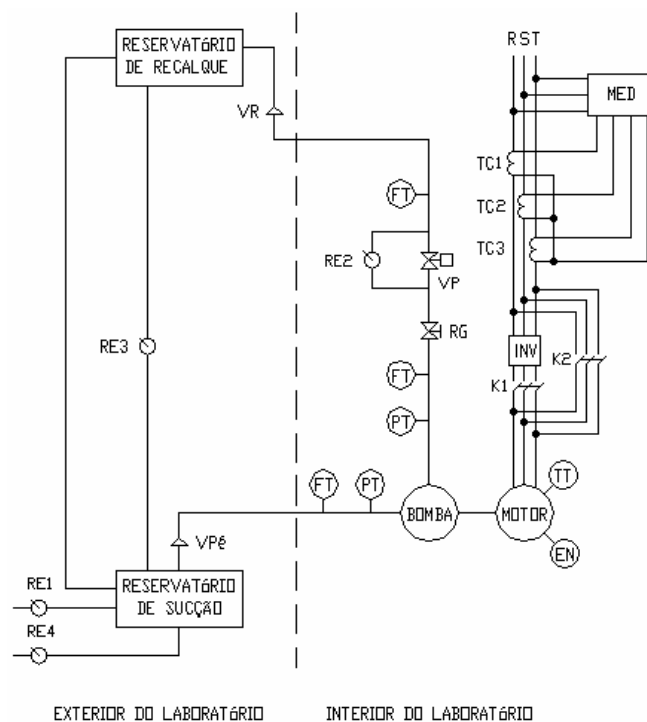


Fig. 1. Diagrama da bancada de testes.

TABELA I
Dispositivos da bancada de testes

Código	Descrição
FT	Transdutor de Vazão
PT	Transdutor de Pressão
TT	Transdutor de Temperatura
EN	“Encoder”
RG	Registro de Gaveta
VP	Válvula Proporcional
VR	Válvula de Retenção
VPé	Válvula de Pé com Crivo
RE1	Registro de Entrada de Água
RE2	Registro de Manutenção da VP
RE3	Registro de Esvaziamento do Reservatório de Recalque
RE4	Registro de Esvaziamento do Reservatório de Sucção
K1, K2	Contactores
TC1, TC2, TC3	Transdutores de Corrente
MED	Medidor Multi-Grandezas

No atual estágio de desenvolvimento do laboratório, já são possíveis as leituras de tensão e corrente de alimentação do sistema, seja este operando com válvula ou a partir do uso de inversor de frequência.



Fig. 2. Bancada de testes – Interior do laboratório.

Em contrapartida, os sinais de saída de todos os transdutores (detalhados na Tabela I) ainda não podem ser determinados, devido estes serem enviados para um controlador lógico programável que, atualmente, encontra-se em estágio de programação.

III. MODELAMENTO MATEMÁTICO

Com o objetivo de determinar previamente a economia de energia advinda da utilização de um inversor de tensão para o controle de vazão em detrimento do controle por válvula de estrangulamento, é feito o modelamento dos elementos componentes de um sistema de bombeamento que seja capaz de operar segundo os dois métodos de variação de vazão.

A. Inversor de Tensão

Dado o rendimento deste dispositivo ser praticamente constante para uma mesma frequência de chaveamento, o seu modelo se restringe à determinação da forma de onda da tensão de saída, a qual é então decomposta em componentes de Fourier.

O modelo proposto restringe-se aos dispositivos comumente utilizados em baixas e médias potências, ou seja, um conversor trifásico CC-CA de tensão, fazendo uso de IGBT's, os quais são chaveados segundo a técnica de modulação por largura de pulsos senoidal.

Ainda, de forma a ser o mais próximo do sinal de saída do inversor utilizado na bancada de testes, considerou-se a tensão no barramento CC apresentando uma leve oscilação,



Fig. 3. Bancada de testes – Exterior do Laboratório.

resultado da utilização de um capacitor sub-dimensionado na saída da ponte retificadora.

Desta feita, a Figura 4 mostra a tensão de linha recomposta a partir das componentes de Fourier determinadas.

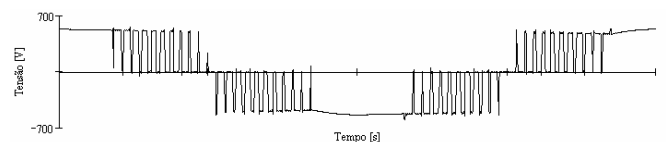


Fig. 4. Tensão de linha de saída do inversor.

B. Motor de Indução Trifásico

Dado que o presente trabalho visa estudar o desempenho de um sistema de bombeamento depois de estabelecidas as condições de regime, faz-se uso do modelo do MIT no domínio da frequência, sendo que são implementadas modificações a este modelo de forma que considere a influência dos harmônicos da tensão de alimentação do motor.

Neste trabalho, faz-se uso do modelo apresentado em [1], onde é feita a modelagem elétrica do MIT no domínio da frequência a partir da decomposição de Fourier do sinal de tensão e da utilização do teorema da superposição, que somente é possível por meio da consideração do motor como apresentando um comportamento linear. Conforme apresentado em [1], ao serem efetuados os ensaios para determinação dos parâmetros da máquina (em especial o

ensaio a vazio) o motor encontra-se trabalhando na saturação, fato este que considera implicitamente este efeito.

Assim, pode-se considerar o motor alimentado por um sinal não-senoidal como sendo semelhante a este mesmo motor alimentado por uma fonte de tensão contínua e diversas outras senoidais. Desta feita, a Figura 5 mostra o circuito equivalente do MIT para a frequência harmônica n .

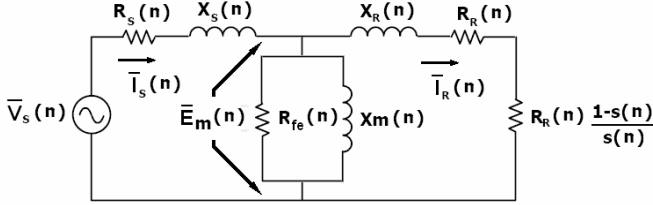


Fig. 5. Circuito equivalente para a frequência harmônica n .

Sabe-se que a resistência do estator é obtida experimentalmente através de ensaios do motor com tensão de alimentação contínua e à temperatura ambiente e que, na prática, quando o motor estiver sendo alimentado por tensões alternadas, este valor será maior devido à ocorrência do efeito pelicular.

Como, em geral, os motores de indução de pequeno e médio porte (alvo deste trabalho) apresentam o enrolamento do estator constituído por condutores de cobre, cilíndricos e de pequeno diâmetro, pode-se desconsiderar o efeito pelicular [1]. Desta feita, a resistência e indutância do estator para o n -ésimo harmônico da tensão de alimentação permanecem inalterados.

Todavia, dado o rotor ser constituído por barras de considerável diâmetro, o efeito pelicular tem uma influencia significativa no aumento da resistência do rotor, principalmente quando estas barras conduzem correntes com frequências harmônicas elevadas. Assim, segundo [1], tanto a resistência quanto a indutância do rotor para o n -ésimo harmônico da tensão de alimentação são dadas pelos seus valores à frequência nominal multiplicados por fatores de correção, conforme mostram as equações (1) e (2):

$$R_R(n) = R_R \cdot \frac{K_{RR}(n)}{K_{RR}(1)} \quad (1)$$

$$L_R(n) = L_R \cdot \frac{K_{LR}(n)}{K_{LR}(1)} \quad (2)$$

Estes fatores nada mais são do que funções exponenciais, uma crescente ($K_{RR}(n)$) e outra decrescente ($K_{LR}(n)$), que visam retratar os respectivos aumento e diminuição destes variáveis com o aumento da frequência.

Por sua vez, a variação da resistência representativa das perdas no ferro com a frequência é dada conforme mostrado na equação (3):

$$R_{fe}(n) = \frac{|E_m(n)|^2}{P_{fe}(n)}, \quad (3)$$

onde $P_{fe}(n)$ é a perda no ferro em função da frequência, obtida em função das perdas nominais por histerese (PH_{nom}) e correntes parasitas (PF_{nom}) conforme a equação (4):

$$P_{fe}(n) = n \cdot PH_{nom} \cdot \left(\frac{E_m(n)}{n \cdot E_m(1)} \right)^{KS} + PF_{nom} \cdot \left(\frac{E_m(n)}{E_m(1)} \right)^2 \cdot K_{fe}(n), \quad (4)$$

onde KS é a constante de Steinmetz do material e $K_{fe}(n)$ é um fator de redução de perdas exponencial, semelhante ao fator $K_{LR}(n)$.

Por fim, devido à complexidade dos cálculos e por fugir do escopo do trabalho, desconsidera-se o efeito da saturação magnética, sendo que, conforme apresentado em [1], a impedância de magnetização pode ser ajustada para uma larga faixa de potências das máquinas de indução conforme a equação (5):

$$X_m(n) = n \cdot 0,25 \cdot X_m(1) \quad (5)$$

C. Bomba Centrífuga

O modelamento do comportamento da bomba em regime permanente foi feito a partir da utilização das curvas do fabricante para rotação nominal (carga, potência mecânica e rendimento), todas em função da vazão de operação.

D. Instalação de Bombeamento

A curva de carga versus vazão da instalação é obtida por meio de um polinômio de segundo grau contendo os pontos (Q1; H1)=(0; Hg) e (Q2; H2)=(Qop; H(Qop)), onde H(Q) é a curva de carga versus vazão da bomba fornecida pelo fabricante.

IV. RESULTADOS

Os resultados obtidos são agrupados em três itens: (a) simulação de variação de frequência para uma tensão senoidal de alimentação; (b) acréscimo, ao modelo anterior, das perdas advindas da forma não-senoidal da tensão de alimentação e; (c) experimentos na bancada de testes.

A. Tensão de Alimentação Senoidal

Inicialmente, o motor foi simulado como sendo alimentado por tensões senoidais com frequência e valor eficaz variando segundo a relação $V/f = 220 \text{ V}/60 \text{ Hz}$. Para tal, considerou-se que: (a) os valores das resistências e indutâncias permaneciam constantes e (b) os valores das reatâncias de dispersão do estator e do rotor, bem como a reatância de magnetização, variavam proporcionalmente com a frequência.

O resultado desta modelagem é apresentado nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11, bem como nas Tabelas II e III. Por sua vez, na Tabela IV, são apresentados os percentuais de redução das variáveis quando é feita a opção pelo método de variação de

vazão por meio da variação de velocidade em detrimento daquele que faz uso de válvula de estrangulamento.

TABELA II

Operação com variação da velocidade de rotação

Q [m ³ /h]	fr [Hz]	Vel [rpm]	H [m]	Is [A]	PA [W]	PR [VAr]	FP	Rend
3,29	30	1774,62	7,82	0,96	119,05	110,69	0,368	0,301
4,48	35	2049,46	10,21	1,06	234,47	194,70	0,557	0,371
5,50	40	2309,96	12,86	1,31	438,28	297,50	0,734	0,409
6,43	45	2583,77	15,77	1,52	618,55	373,03	0,798	0,427
7,32	50	2854,83	18,94	1,77	839,95	454,02	0,841	0,440
8,17	55	3122,92	22,38	2,05	1106,73	544,07	0,871	0,447
9,00	60	3387,80	26,08	2,37	1422,90	647,70	0,890	0,449

TABELA III

Operação com válvula de estrangulamento

Q [m ³ /h]	fr [Hz]	Vel [rpm]	H [m]	Is [A]	PA [W]	PR [VAr]	FP	Rend
3,29	60	3495,80	31,44	1,44	749,93	481,65	0,767	0,376
4,48	60	3465,90	30,95	1,68	941,56	533,72	0,824	0,401
5,50	60	3442,50	30,40	1,89	1089,20	569,18	0,853	0,418
6,43	60	3423,10	29,72	2,06	1209,00	597,05	0,870	0,431
7,32	60	3407,40	28,83	2,20	1305,10	619,51	0,880	0,441
8,17	60	3395,50	27,65	2,30	1377,20	636,64	0,887	0,447
9,00	60	3387,80	26,08	2,37	1422,90	647,70	0,890	0,449

TABELA IV

Comparação entre os métodos de variação de vazão

Q [m ³ /h]	Vel [%]	H [%]	Is [%]	PA [%]	PR [%]	FP [%]	Rend [%]
3,29	49,24	75,13	33,33	84,13	77,02	52,02	19,95
4,48	40,87	67,01	36,90	75,10	63,52	32,40	7,48
5,50	32,90	57,70	30,69	59,76	47,73	13,95	2,15
6,43	24,52	46,94	26,21	48,84	37,52	8,28	0,93
7,32	16,22	34,30	19,55	35,64	26,71	4,43	0,23
8,17	8,03	19,06	10,87	19,64	14,54	1,80	0,00
9,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

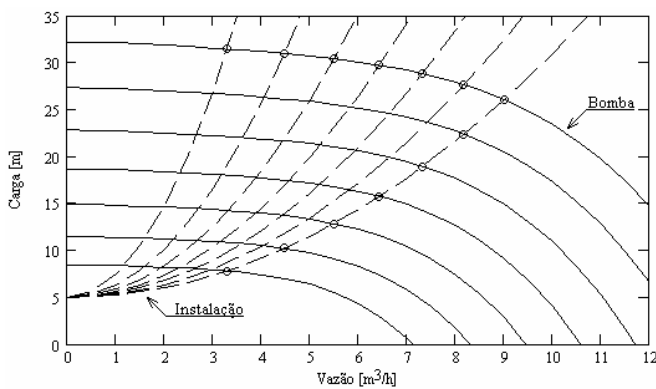


Fig. 6. Curvas de carga versus vazão.

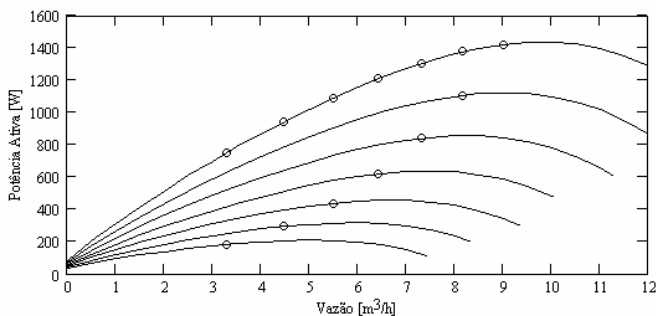


Fig. 7. Curvas de potência ativa versus vazão.

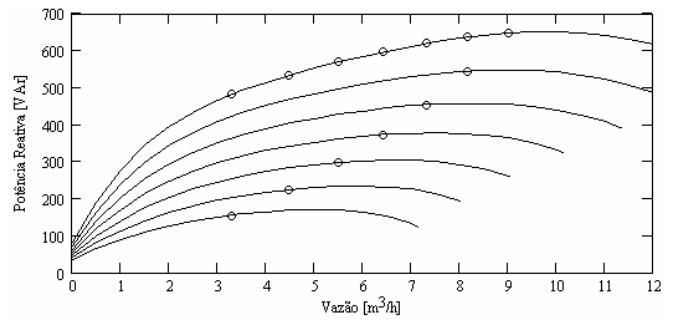


Fig. 8. Curvas de potência reativa versus vazão.

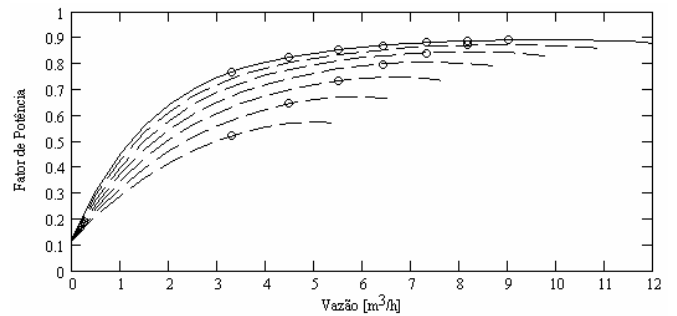


Fig. 9. Curvas de fator de potência versus vazão.

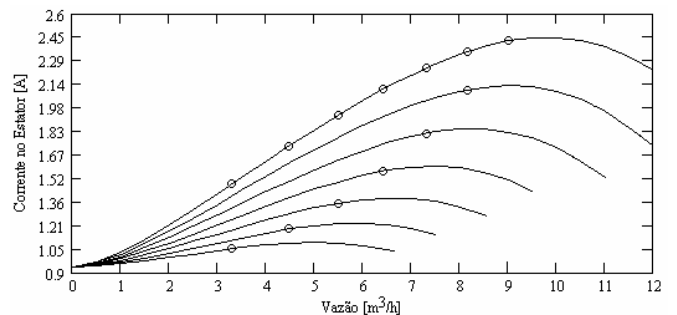


Fig. 10. Curvas de corrente no estator versus vazão.

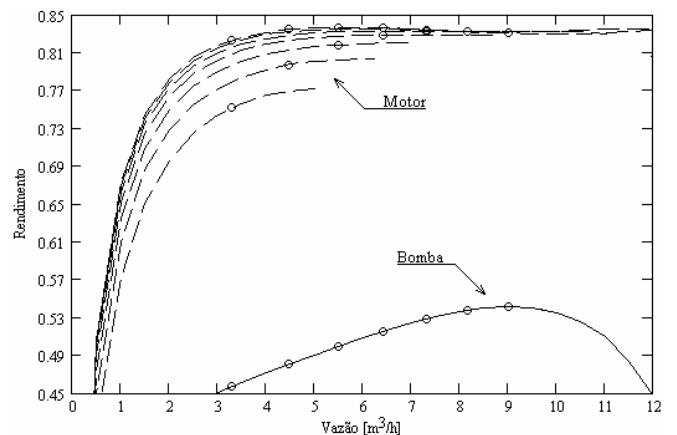


Fig. 11. Curvas de rendimentos versus vazão.

B. Tensão de Alimentação Não-Senoidal

A partir da modelagem anteriormente apresentada, seguiu-se com a determinação das perdas no motor advindas da forma não-senoidal da tensão de alimentação. De forma a que estes valores fossem comprovados experimentalmente,

foi realizada a simulação para uma frequência de 60 Hz. Desta feita, a Tabela V mostra a comparação entre as variáveis elétricas e perdas internas do motor para uma alimentação senoidal e a não-senoidal.

TABELA V
Comparação entre os métodos de variação de vazão

PA		PR		FP		Rend	
[W]	[%]	[VAr]	[%]	-	[%]	[%]	[%]
7,548	0,557	61,957	8,683	-0,016	-1,78	-0,011	-0,014
Pjs		Pjr		Pfe		Pad	
[W]	[%]	[W]	[%]	[W]	[%]	[W]	[%]
0,433	0,535	2,398	3,481	0,266	0,82	4,44	65,588

Vale ressaltar que se consideraram as perdas rotacionais constantes, dado à velocidade de rotação ser praticamente a mesma. Ainda, a determinação do valores das perdas adicionais é baseada em [1], onde estas são tidas como sendo iguais a 0,5% e 0,8% da potência ativa do motor, respectivamente para os casos de alimentação senoidal e não-senoidal (especificamente uma forma de onda de tensão advinda de um inversor de tensão com modulação PWM senoidal). Isso justifica o elevado aumento destas perdas.

C. Ensaios na Bancada de Testes

Dadas algumas das funções da bancada de testes ainda estarem em estado de programação, somente foi possível realizar o ensaio do inversor para uma mesma condição da bancada, ou seja, sem a operação da válvula. A Figura 12 mostra a comparação realizada.

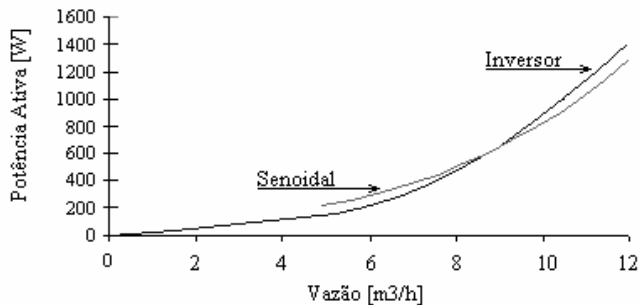


Fig. 12. Potência ativa do motor.

V. CONCLUSÕES

Devido à presença da bancada de testes instalada no LAMOTRIZ, este trabalho vem trazer aos profissionais do

setor um maior conhecimento prático das características de operação dos sistemas de bombeamento além de mostrar a importância do comportamento da carga para a realização de um controle de vazão energeticamente eficiente.

No LAMOTRIZ, são simuladas as variações das características de um sistema bombeamento, proporcionando assim diversas situações particulares de sistemas encontrados nas indústrias. Dessa forma, é feito um estudo do comportamento do conjunto motor-bomba operando à velocidade constante e variável, conseqüentemente, determinando seus pontos de operação que garantam maior eficiência no consumo de energia elétrica.

Como esperado, o controle de vazão por meio da variação da velocidade de rotação do motor ocasiona uma redução acentuada na potência ativa consumida pelo motor, como mostrado na Figura 7. Em contrapartida, há uma redução gradativa do fator de potência e do rendimento do conjunto motor-bomba, como pode ser visto nas Figuras 9 e 11.

Pela análise da Figura 12 percebe-se que a potência ativa quando do uso do inversor é maior do que para uma alimentação senoidal somente para elevadas frequências, sendo menor para baixas frequências. Entretanto, dada a semelhança das curvas mostradas, pode-se concluir que a utilização de simulações senoidais conduz a resultados satisfatórios para potência ativa do motor.

Pela análise conjunta da Figura 12 e da Tabela V, percebe-se que os resultados simulados estão abaixo daqueles encontrados experimentalmente.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, à ELETROBRÁS e à CAPES.

REFERENCES

- [1] O. C. N. Souto, "Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições não Ideais de Alimentação", tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Uberlândia, 2001.