

Capítulo 4

Ensaios de Laboratório realizados na Estação de Trabalho do Sistema de Bombeamento

4.1) Introdução

Neste capítulo são abordados alguns aspectos de eficiência energética relativos às medições e ensaios executados no Laboratório de Sistemas Motrizes da UFU, mais especificamente o sistema de bombeamento, o qual já foi descrito no capítulo anterior. Dessa forma, são apresentados, discutidos e analisados os cálculos necessários à sua fundamentação. São também abordados, o estudo do rendimento de motores, onde as normas reconhecem como válidas as variações de rendimento, bem como as justificativas desta diferença nem sempre ser perceptível, em motores de pequeno porte, quando comparados com a linha padrão e alto rendimento.

Complementando os aspectos anteriores, o objetivo deste capítulo é mostrar a metodologia de comparação do desempenho de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento e a utilização de inversores de freqüência no controle da vazão. Adicionalmente, identificar a redução do consumo de energia elétrica bem como as justificativas para a escolha de um sistema em detrimento do outro.

4.2) O sistema de bombeamento

4.2.1) Os motores: alto-rendimento e convencional

a) Rendimento de placa

O rendimento marcado na placa de um motor representa o nominal médio de uma grande quantidade de motores do mesmo projeto e, devido a isso, apresenta limites de tolerância. Segundo a NBR 7094/1996, não há um limite superior de tolerância de rendimento para valores acima do marcado no motor. Porém, para valores inferiores, os limites de tolerância para motores devem obedecer aos seguintes critérios [30]:

- 1) Para rendimentos marcados tal que $\eta \geq 0,851$, o limite inferior de tolerância é dado por $0,2 \times (1-\eta)$;
- 2) Para rendimentos marcados tal que $\eta < 0,851$, o limite inferior de tolerância é dados por $0,15 \times (1-\eta)$;

b) O motor de alto rendimento do LAMOTRIZ

Modelo: G192961; Grau de Proteção: IP55; Isolação: F; Regime: S1; Potência Nominal: 1,5 [cv]; Tensões: 220/380 [v]; Correntes: 4,02/2,33 [A]; Freqüência: 60 [Hz]; Rotação: 3390 [rpm]; (Ip/In): 7,5; Categoria: N; FS: 1,15; Rendimento: 82,5; cos φ: 0,87.

Como, $\eta < 0,851$, então o limite inferior de tolerância é dado por $0,15 \times (1-\eta)$;

Assim:

$$\eta = 0,825 - 0,15 \times (1 - 0,825) = 0,825 - 0,02625$$

E, portanto, um rendimento mínimo de **79,88%**.

c) Motor Convencional do LAMOTRIZ

Modelo: HE36350; Grau de Proteção: IP55; Isolação: B; Regime: S1; Potência Nominal: 1,5 [cv]; Tensões: 220/380 [v]; Correntes: 4,27/2,47 [A]; Freqüência: 60 [Hz]; Rotação: 3370 [rpm]; (Ip/In): 7,5; Categoria: N; FS: 1,15; Rendimento: 78,6; cos φ: 0,86.

Como, $\eta < 0,851$:

$$\eta = 0,786 - 0,0321$$

Assim, o rendimento mínimo permitido é de **75,39%**.

c) Considerações sobre o rendimento de placa

Como evidenciado nos itens anteriores para motores de pequeno porte, onde a diferença de rendimento entre motores convencional e da linha de alto-rendimento é pequena, a aquisição do motor de maior rendimento pode não significar redução de potência na entrada do motor uma vez que suas tolerâncias podem coincidir em um

determinado momento. Entretanto para motores de grande porte essa possibilidade é mínima.

4.2.2) Altura manométrica

O diagrama referente ao sistema hidráulico da estação de trabalho de bombeamento é mostrado na figura 4.1. Nesta figura é possível visualizar o diâmetro da tubulação, $\frac{3}{4}$ de polegada, bem como, as alturas geométricas de sucção e recalque. A indicação da localização dos vários sensores e atuadores presentes na linha também foram contemplados pela figura 4.1, e os detalhes estão listados e ilustrados no capítulo 3, na tabela 3.1. A tubulação de sucção tem 0,73 m de altura e um comprimento linear de tubulação de 1,24 m, a de recalque tem 1,17 cm de altura geométrica e 2,52 m de tubos instalados.

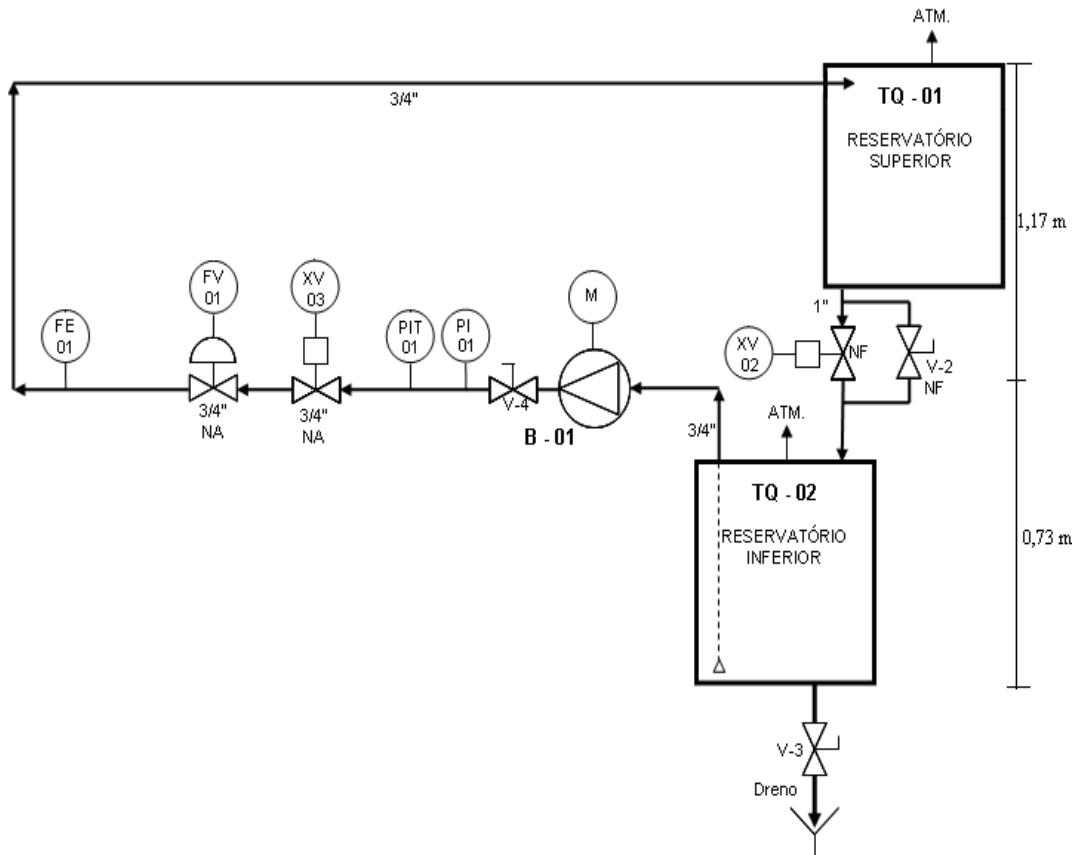


Figura 4.1 - Sistema hidráulico da estação de bombeamento

a) Cálculo das perdas localizadas

Para o cálculo de perdas localizadas foram utilizadas tabelas de conversão de perda de carga nas conexões hidráulicas em comprimento equivalente de tubulação [29]. Estas

tabelas, recomendadas por fabricantes de tubos e conexões, que por serem de uso comum não estão reproduzidas neste trabalho. A tabela 4.1 aponta os valores para as conexões presentes na bancada.

Deve-se salientar ainda que os medidores e sensores presentes na estação de trabalho e estudo em questão, que não apresentaram em seus manuais a perda de carga localizada, teve seu valor estimado como o de uma conexão em “T” com passagem direta. A solução mostrou-se coerente na medida em que os cálculos foram sendo desenvolvidos.

Tabela 4.1 – Valores de comprimento equivalente para as conexões presentes na bancada

Componente	Quant.	Comp. Eq. Unit.	Comp. Eq. Total
União	1	0,01	0,01
Saída de canalização	1	0,5	0,5
Curva de 90°	4	0,4	1,6
Joelho 90°	4	0,7	2,8
Tubo em S	1	0,8	0,8
T - passagem direta	3	0,4	1,2
T - passagem lateral	1	1,4	1,4
Válvula globo	1	6,7	6,7
Registro de ângulo	1	3,6	3,6
Luva de redução	2	0,29	0,58
Válvula de crivo	1	5,6	5,6
Total			24,79 metros

b) Perda de carga distribuída

i) Utilização de tabelas

O atrito exercido na parede interna do tubo quando da passagem do fluido pelo seu interior também provoca perdas, a tabela 4.2 mensura essas perdas através de coeficientes, um valor percentual somado ao comprimento total da tubulação, em função do diâmetro interno da mesma e da vazão desejada [29]. Na referida tabela, 36,5 é o valor percentual de tubulação a ser somado ao comprimento linear de tubos instalados.

Tabela 4.2 – Valores de perda de carga nas tubulações

Perda de carga em tubulações de ferro fundido (%)					
Vazão m ³ /h	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
0,5	1,3	0,4	0,1	0,1	
1	4,8	1,6	0,4	0,2	0,1
1,5	10,1	3,4	0,9	0,4	0,1
2	17,2	5,8	1,5	0,7	0,2
2,5	26,1	8,8	2,3	1,1	0,3
3	36,5	12,3	3,2	1,5	0,5
3,5	48,6	16,4	4,2	2	0,6
4	62,2	21	5,4	2,6	0,8
4,5	77,3	26,1	6,7	3,2	1
5	94	31,7	8,1	3,9	1,2

Assim, a perda de carga na tubulação = (Comprimento linear da tubulação + Comprimento equivalente) x Fator de perda de carga.

$$\text{Perda de carga} = (3,76 + 24,79) \times 0,365 = \mathbf{10,42 \text{ mca}}$$

Para a altura manométrica (H), tem-se a soma das perdas de carga e altura geométrica:

$$H = 1,9 + 10,42 = \mathbf{12,32 \text{ mca}}$$

ii) Pelo método de Hazen-Willians

Pela formulação de Hazen-Willians e tomado-se como base a equação (4.1), o resultado para altura manométrica total é ligeiramente inferior para uma vazão de 3m³/h.

$$H = \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} D^{4,87}} \quad (4.1)$$

Onde:

Q = Vazão em m³/s;

L = Comprimento da tubulação em m;

C = Representa o estado de conservação das paredes do tubo;

D = Diâmetro da tubulação.

H = 9,46 mca

iii) Método de Darcy-Weisbach

A expressão (4.2) utilizada foi a chamada “fórmula de Darcy-Weisbach”, onde apresenta uma conceituação mais precisa e é recomendada pela Norma Brasileira (ABNT - NBR 12218 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público). Também é mais utilizada na Europa [33].

$$H = \frac{8.f}{\pi^2.g} \frac{Q^2.L}{D^5} \quad (4.2)$$

Onde, na expressão, “g” é a aceleração da gravidade local e “f” é o fator que procura representar o estado de conservação das paredes internas da tubulação.

O fator “f” pode ser calculado pela equação (4.3), e associa o coeficiente de rugosidade interna do tubo (ε), que varia para o aço galvanizado novo entre 0,102 a 4,6 [33] com o Número de Reynolds (Re).

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{\pi.D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} \quad (4.3)$$

Por sua vez, Re é um número adimensional que retrata o tipo de movimento de um fluido: se laminar ou turbulento. É calculado em função da velocidade do escoamento (U), do diâmetro interno da tubulação e do coeficiente de viscosidade cinemática do fluido (v), e é representada pela equação (4.4):

$$Re = \frac{U.D}{v} \quad (4.4)$$

O escoamento é considerado turbulento quando esse número é superior a 4000 e laminar quando é inferior a 2000, havendo uma zona considerada de transição entre esses dois limites.

A referência [33] recomenda o coeficiente de viscosidade cinemática da água (v) a uma temperatura ambiente de 20° de 1×10^{-6} . Assim:

Re = 46051,78

De posse de todos os dados necessários, a equação (4.2) apresenta como resultado:

$$H = 16,66 \text{ mca}$$

Observação: Para os três métodos utilizados para o cálculo da altura manométrica, apenas nos de perdas distribuídas foram utilizados métodos diferenciados. Para perda de carga localizada foi utilizado o método dos comprimentos equivalentes.

4.2.3) Curva de carga do sistema

Para o cálculo da curva de carga do sistema mostrada na figura 4.2, foi utilizada a formulação de Darcy-Weisbach, por ser a recomendada pela ABNT - NBR 12218.

Deve-se salientar que essa curva tem influência da ação da válvula de estrangulamento. O limite de vazão em $3 \text{ m}^3/\text{h}$ é imposto pela válvula e, portanto, mais uma perda localizada foi somada a altura manométrica, essa carga de pressão adicional corresponde a 4,34 mca. Assim:

$$H = 16,66 + 4,34 \approx 21 \text{ mca}$$

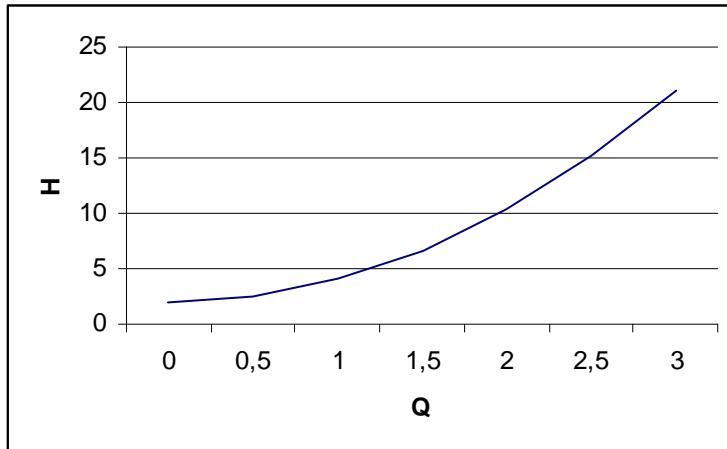


Figura 4.2 – Curva de carga do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ

4.2.4) Determinação do NPSH e verificação de cavitação

Os parâmetros mencionados são calculados com base na equação (4.5).

$$NPSH = (H_o - h - h_s - R) - Hv \quad (4.5)$$

Onde:

H_o = Pressão atmosférica local, em mca, mostrado na tabela 4.3;

h = Altura de sucção, em metros (dado da instalação);

hs = Perdas de carga no escoamento pela tubulação de sucção, em metros;

R = Perdas de carga no escoamento interno da bomba, em metros (dados do fabricante);

H_v = Pressão de vapor do fluido escoado, em metros conforme tabela 4.4;

Tabela 4.3 - Pressão atmosférica para determinadas altitudes

Altitude em relação ao mar (m)	0	150	300	450	600	750	1000
Pressão Atmosférica (mca)	10,33	10,16	9,98	9,79	9,58	9,35	9,12

Tabela 4.4 – Pressão de vapor da água para determinadas temperaturas

Temperatura da água (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Pressão de vapor da água (mca)	0,062	0,083	0,125	0,239	0,433	0,753	1,258	2,033	4,831	10,33

Para o correto entendimento das características da instalação é usual o desmembramento dos termos da fórmula anterior, a fim de obterem-se os dois valores característicos (instalação e bomba) [37]. Nestas condições, tem-se que:

$H_o - H_v - h - hs = NPSH_d$ (disponível), característica da instalação hidráulica; e

$R = NPSH_r$ (requerido), característica da bomba, determinada em seu projeto de fábrica e, fornecido pelo fabricante através das curvas características das bombas (curva de NPSH);

a) $NPSH_r$

Conforme mostrado na curva característica da figura 4.3 e, extrapolando os pontos na busca da vazão de $3m^3/h$, encontra-se:

$$NPSH_r = 0,8 \text{ mca}$$

(fonte: catálogo do fabricante)

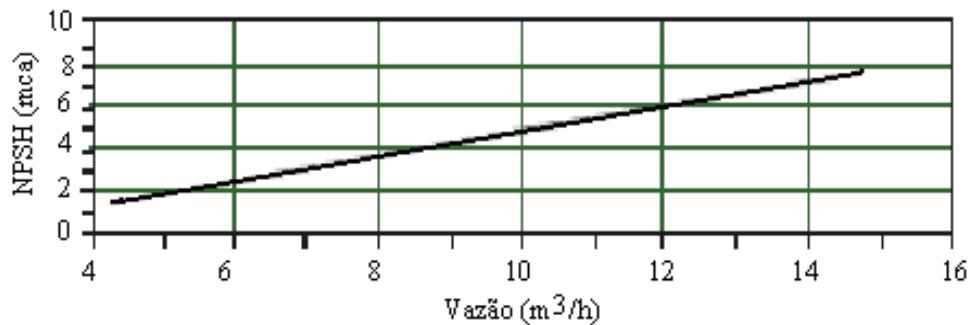


Figura 4.3 – Curva vazão x NPSH

b) **NPSH_d**

Para o cálculo desta grandeza, deve-se lembrar que:

$$\mathbf{NPSHd = H_o - H_v - h - h_s}$$

Onde:

H_o ≈ 9,25 (Pressão atmosférica na cidade de Uberlândia a 863 metros de altitude - tabela 4.3);

H_v = 0,433 (Pressão de vapor d'água para 30°C - tabela 4.4);

h = 0,73 metros (Altura sucção);

h_s = 3,04 metros (Perda calculada para o atrito na sucção).

Nestas condições, tem-se que:

$$\mathbf{NPSHd = 9,25 - 0,433 - 0,73 - 3,04 = 5,047 \text{ mca}}$$

O fabricante Schneider Motobombas, fornecedor da bomba centrífuga utilizada no LAMOTRIZ, recomenda que NPSH_d seja maior que (NPSH_r + 0,6), para que seja evitado o efeito de cavitação na bomba. Os cálculos mostram que ainda, tem uma reserva de vazão na qual pode-se trabalhar sem que ocorra tal efeito indesejado.

4.2.5) Potência absorvida (BHP) e rendimento (η)

BHP é a potência absorvida pela bomba para o transporte de um fluido com uma vazão desejada, a uma determinada altura e com o rendimento esperado. A obtenção da

potência motriz é necessária para se chegar ao motor de acionamento da bomba, cuja expressão matemática é expressa por:

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot 0,37}{\eta_b} \quad (4.6)$$

Onde:

BHP = Potência motriz absorvida pela bomba, em cv;

Q = Vazão desejada, em m^3/h ;

H = Altura de elevação, em mca;

0,37 = Constante para adequação das unidades;

η_b = Rendimento da bomba, esperado ou fornecido através da curva característica em valores percentuais (%).

Ao se trabalhar com a bomba centrífuga próxima ao seu ponto de melhor rendimento, como indicado em vermelho na figura 4.4, obtém-se um rendimento aproximado de 60%. Esse valor pode ser conferido pela aplicação da equação 4.6, tomando-se como base os seguintes parâmetros:

$$\eta_b = \frac{10 \cdot 24,5 \cdot 0,37}{1,5}$$

$$\eta_b = 60,43\%$$

Ou ainda, pode-se obter o rendimento pela equação 4.7, como indicada pela referência [27]:

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{75 \cdot \eta_b} \quad (4.7)$$

Onde:

BHP => cv

Q => m^3/s

H => m

γ => kgf/ m^3

De posse desses valores e substituindo-os na equação (4.7), obtém-se:

$$\eta_b = 60,494\%$$

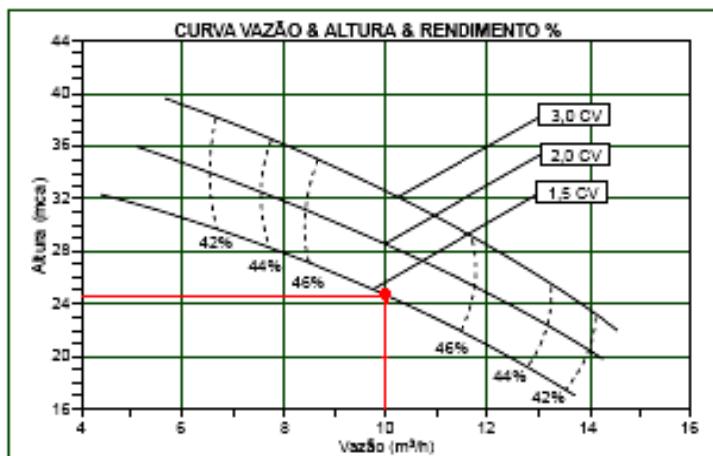


Figura 4.4 – Curva que relaciona altura manométrica e vazão com o rendimento

Portanto, o melhor rendimento para a bomba centrífuga do LAMOTRIZ é de, aproximadamente, 60%.

Para a condição de carga da estação de trabalho do laboratório da UFU, a potência e o rendimento foram calculados a partir de medições realizadas na própria bancada.

$$\eta_b = 19,17\%$$

4.2.6) Os conjugados médios e o momento de inércia da carga

O gráfico mostrado na figura 4.5, foi levantado e obtido através da instrumentação do LAMOTRIZ, discutida e apresentada em capítulos anteriores, e representa o conjugado mecânico da bomba centrífuga em função da sua velocidade angular. No mesmo processo

de medições, também foi estimado o tempo de partida ou de aceleração ($t_a = 6 \pm 1$ s) para o motor da linha padrão. De posse desses valores, foi calculado o momento de inércia da carga, a partir da equação (4.7).

$$t_a = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \left(\frac{J_m + J_c}{C_{mm} - C_{cm}} \right) \quad (4.7)$$

Onde:

n = rotação em rps;

J_m = momento de inércia do motor;

J_c = momento de inércia da carga;

C_{mm} = Conjugado médio do motor;

C_{cm} = Conjugado médio da carga;

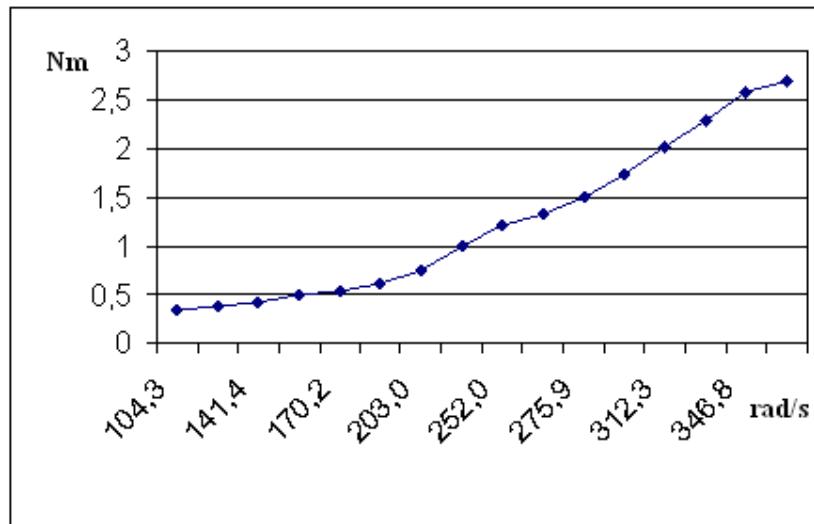


Figura 4.5 – Curva de conjugado mecânico x velocidade angular da bomba centrífuga

Tomando-se como base as equações apresentadas e discutidas no capítulo 3, pode-se calcular os conjugados médios do motor e da bomba e consequentemente o seu momento de inércia.

$$C_{cm} = C_{reg} \times (1/3) = 1,06 \text{ Nm}$$

$$C_{mm} = 0,5 \cdot (C_p + C_{max}) = 9,54 \text{ Nm}$$

$$J_m = 0,00079 \text{ kgm}^2$$

$$J_c = 0,143385 \text{ kgm}^2$$

4.3) A eficiência energética pela comparação entre os motores da linha padrão e de alto-rendimento utilizando a válvula de estrangulamento

As tabelas 4.5 e 4.6 registram os valores obtidos para grandezas elétricas no LAMOTRIZ para os motores convencional e de alto-rendimento, respectivamente. Para obtenção destas vazões, usou-se apenas o método de estrangulamento de válvula e posteriormente foram coletados os valores. O objetivo foi avaliar o consumo de energia elétrica apenas pela comparação entre o uso do motor da linha padrão e da linha alto-rendimento.

Tabela 4.5 – Valores elétricos do motor da linha padrão

Q (m³/h)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	η
0,5	219	3	0,74	855	770	1153	0,77
1	219,2	3,2	0,76	919,43	777	1201	0,774
1,5	219,2	3,3	0,78	971,7	788	1250	0,776
2	218,9	3,4	0,79	1008,5	791	1288	0,778
2,5	218,8	3,6	0,8	1082	802	1338	0,78
3	218,9	3,8	0,82	1140	816	1417	0,782

Tabela 4.6 – Valores elétricos do motor de alto-rendimento

Q (m³/h)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	η
0,5	218,3	2,7	0,77	801	663	1038	0,803
1	218,4	2,9	0,79	859	672	1089	0,805
1,5	218,8	2,9	0,79	891	682	1129	0,806
2	217	3	0,81	922	674	1127	0,807
2,5	218,5	3,3	0,82	1031,67	705	1237	0,81
3	215,8	3,4	0,82	1033	704	1233	0,81

A comparação entre a energia elétrica consumida pelos dois motores, conforme mostra a tabela 4.7, mostra que de fato há uma redução do consumo, no caso do laboratório, em média 10%.

Tabela 4.7 – Comparação de consumo de energia entre motores LP e AR

	Q(m ³ /h)	P(W)	Dias	Horas	Energia	Economia%
LP	1,5	971,7	30	24	699624	-9,05724
AR	1,5	891	30	24	641520	
LP	2	1008,5	30	24	726120	-9,38178
AR	2	922	30	24	663840	
LP	3	1140	30	24	820800	-10,35818
AR	3	1033	30	24	743760	

Um outro aspecto ao qual se deve atentar quando se pretender trocar um motor convencional por um da linha alto-rendimento, é que nestes, em geral, a velocidade é ligeiramente superior. Tal fato pode reduzir a economia de energia elétrica prevista em cálculos e retardar o tempo de retorno de investimento, quando se tratar de carga centrífuga.

Para os motores do LAMOTRIZ, 3370 rpm e 3390 rpm, são as velocidades no eixo dos motores, sendo a maior para o motor de alto-rendimento. Pelas equações de similaridade, (2.13) a (2.16) no capítulo 2, percebem-se que todos os parâmetros variam com a velocidade.

Assim, por exemplo, em um sistema de bombeamento, como representado na figura 4.4, teria sua condição ideal de trabalho tomando-se como base os seguintes parâmetros:

$$Q = 10 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$H = 24,5 \text{ mca}$$

$$\eta_b = 60\%$$

$$\mathbf{BHP = 1104 W}$$

Com a variação da velocidade imposta pelo motor de alto rendimento e aplicando as leis de afinidade, determinam-se as outras condições de operação do sistema de bombeamento, ou seja:

$$Q = 10,06 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$H = 24,79 \text{ mca}$$

$$\mathbf{BHP = 1123,77 W}$$

Supondo-se que a pequena variação dos parâmetros não afete o funcionamento do sistema, a potência na entrada do motor de alto rendimento é calculada conforme a expressão a seguir:

$$P = 1123,77 / 0,825 = 1362,15 \text{ W}$$

Desta maneira, encontra-se para a potência absorvida pelo motor, um valor maior que a sua potência elétrica nominal (1338,18 W).

Portanto, há um incremento de 23,97 W, o qual é exigido pela carga mecânica.

Neste sentido, ao se proceder a comparação entre os motores de alto-rendimento e convencional, na sua condição nominal, a redução de potência elétrica instalada é de 66,4 W. Neste contexto, o incremento de 23,97 W exigido pela carga centrífuga, quando acionada pelo motor de alto-rendimento é representativo. Caso o sistema seja monitorado de modo a garantir uma vazão constante, existirá ainda, uma maior atuação da válvula de estrangulamento, o que provocará alteração na curva de carga do sistema acarretando em maiores perdas.

4.4) Comparação da eficiência energética utilizando inversores de freqüência

A utilização do inversor de freqüência, em cargas centrífugas, nas quais são necessários vários valores de vazão, possibilita grande economia de energia elétrica quando comparada com a mesma vazão obtida pelo estrangulamento de válvula. As tabelas 4.8 e 4.9 relacionam velocidade com a vazão e apontam os efeitos nos outros parâmetros do sistema de bombeamento, para acionamento com motor de linha padrão e alto rendimento, respectivamente.

Tabela 4.8 – Variação da velocidade em função da vazão com um motor LP

Q (m³/h)	H (kgf/cm²)	n (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)	FP	C (Nm)
1,5	0,45	1700,43	1,2	219,2	238	0,88	0,61
2	0,9	2193,57	1,9	218,8	409	0,88	0,97
2,5	1,3	2642,71	2,8	217,8	635	0,92	1,43
3	1,7	3135,75	4,1	218,3	1013	0,92	2,09

Tabela 4.9 – Variação da velocidade em função da vazão com um motor AR

Q (m ³ /h)	H (kgf/cm ²)	n (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)	FP	C (Nm)
1,5	0,4	1693,2	1,1	218,5	209	0,87	0,56
2	0,8	2154,2	1,7	217,9	355	0,9	0,87
2,5	1,2	2590,86	2,6	217,7	570	0,9	1,34
3	1,7	3127	3,8	217,6	909,13	0,92	1,94

A comparação entre as tabelas 4.8 e 4.5 está indicada na tabela 4.10, enquanto a comparação entre as tabelas 4.9 e 4.6 está ilustrada na tabela 4.11. Destas comparações vêm a justificativa principal para o uso de inversor de freqüência de modo a controlar a vazão pela variação da velocidade em detrimento do processo pelo qual se aciona válvulas de estrangulamento com o mesmo objetivo. Quanto mais distante da condição nominal mais se percebe a redução da potência instalada e seu consequente efeito sobre a energia elétrica contabilizada na fatura da concessionária de energia elétrica.

Tabela 4.10 – Comparação de consumo entre inversor de freqüência e válvula de estrangulamento no controle de vazão com a utilização do motor LP

	Q(m ³ /h)	p(kgf/cm ²)	P(W)	Dias	Horas	Energia	Economia %
Inversor	1,5	0,4	238	30	24	171360	75,5
Válvula	1,5	2,8	971,7	30	24	699624	
Inversor	2	0,9	409	30	24	294480	59,4
Válvula	2	2,6	1008,5	30	24	726120	
Inversor	2,5	1,3	635	30	24	457200	41,3
Válvula	2,5	2,5	1082	30	24	779040	
Inversor	3	1,8	1013	30	24	729360	11,1
Válvula	3	2,1	1140	30	24	820800	

Tabela 4.11 – Comparaçāo de consumo entre inversor de freqüência e válvula de estrangulamento no controle de vazão com a utilização do motor AR

	Q(m ³ /h)	p(kgf/cm ²)	P(W)	Dias	Horas	Energia	Economia %
Inversor	1,5	0,4	209	30	24	150480	78,3
Válvula	1,5	2,6	965	30	24	694800	
Inversor	2	0,8	355	30	24	255600	65,9
Válvula	2	2,5	1041	30	24	749520	
Inversor	2,5	1,2	570	30	24	410400	47,7
Válvula	2,5	2,3	1091	30	24	785520	
Inversor	3	1,7	909,13	30	24	654573,6	23,9
Válvula	3	2,1	1195	30	24	860400	

Para uma vazão de 3m³/h, valor limítrofe da estação de trabalho do LAMOTRIZ da UFU, a economia encontrada é devida ao fato de que é necessária uma limitação de vazão produzida pela válvula globo ali existente. Nesta condição, a economia de energia elétrica atingiu 23,9%, quando o motor utilizado foi o de alto-rendimento, enquanto que para a mesma vazão a economia foi 11,1% quando a operação foi realizada com o motor convencional. Uma análise para outras vazões é quantificada facilmente comparando-se as tabelas 4.10 e 4.11.

Graficamente, a figura 4.6 demonstra os efeitos causados pelo inversor de freqüência e pela válvula globo de contorno, responsável pelo controle de vazão por estrangulamento. As curvas representativas de variação de velocidade são denominadas na figura 4.6, relacionada ao motor convencional, como 60 Hz, 45Hz e 30 Hz, os efeitos do método de estrangulamento de válvula, representado pelas curvas do sistema, onde a curva em azul representa a condição nominal da bancada, enquanto as outras curvas do sistema indicadas com os sub-índices 2 e 3 apontam vazões de 2,5 e 2 m³/h na curva de bomba para 60 Hz.

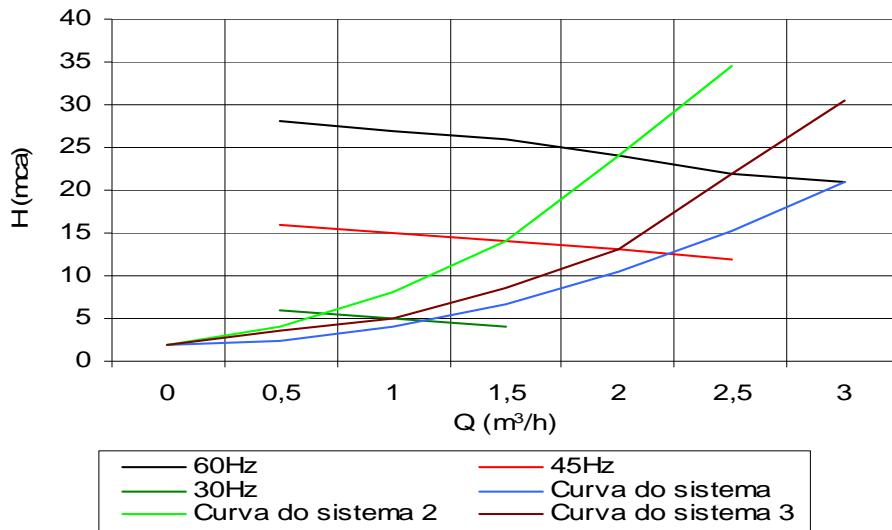


Figura 4.6 – Efeitos causados pela variação de velocidade e pelo estrangulamento de válvula para um sistema acionado pelo motor LP

A figura 4.7 é similar à figura 4.6, porém, nesta o sistema é acionado por um motor de alto-rendimento. O estudo aqui demonstrado apresenta as curvas para 60 Hz e 38 Hz, no inversor de freqüência, portanto para velocidades de 3390 rpm e 2150 rpm respectivamente.

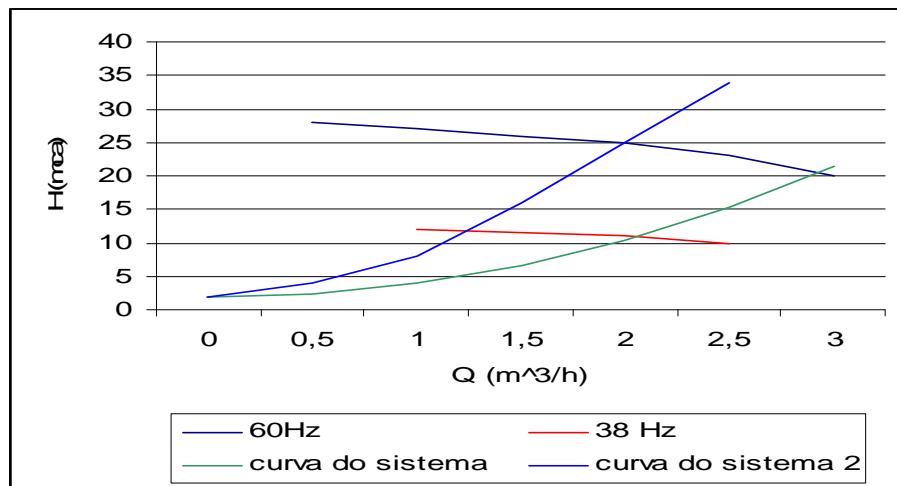


Figura 4.7 – Efeitos causados pela variação de velocidade e pelo estrangulamento de válvula para um sistema acionado pelo motor AR

Fica evidente, nas curvas encontradas via medições em laboratório, o efeito sobre o consumo de energia elétrica no sistema de bombeamento da estação de trabalho. Um

estudo dos gráficos apresentados indica o melhor método a ser utilizado no controle de vazão.

Nas figuras 4.8 e 4.9, observa-se as comparações entre os dois métodos de controle por meio de gráficos de potência elétrica de entrada em função da vazão. Aqui também, está contemplado o acionamento por ambos os motores. Pela análise destas figuras, nota-se a grande diferença na potência exigida para valores menores que a vazão nominal, quando observados os dois métodos de controle e a tendência a se igualarem em condições próximas às nominais.

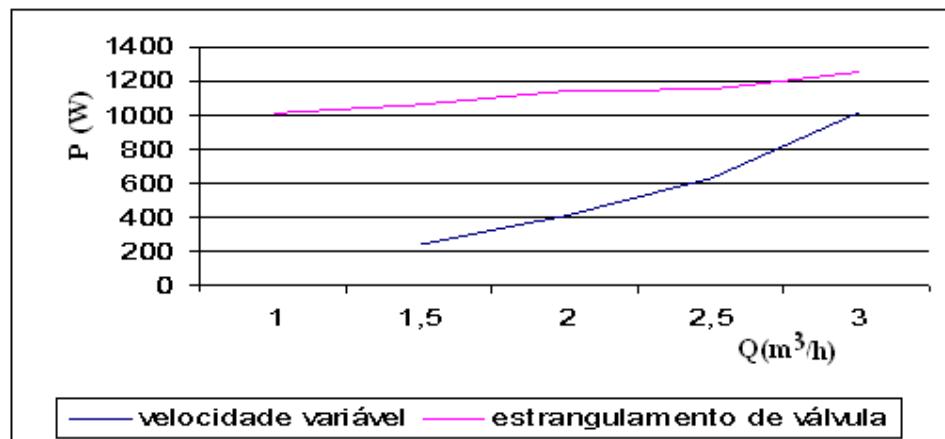


Figura 4.8 – Potência versus vazão utilizando motor LP

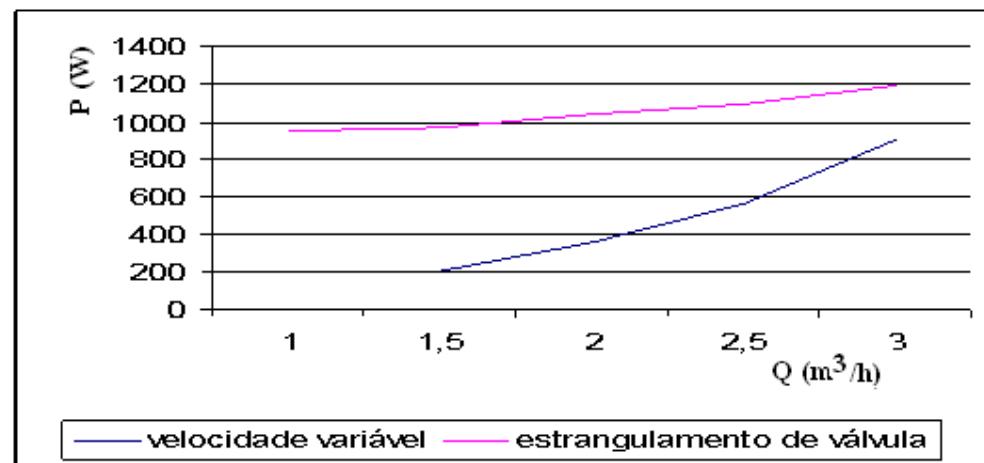


Figura 4.9 – Potência versus vazão utilizando motor AR

Deve-se aclarar aqui que a potência referente à alimentação do inversor de freqüência esta contabilizada, ainda assim, para a condição mais distante do regime de trabalho, ou seja, vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ encontrou-se, em média, 77% de economia de energia

elétrica quando comparado com a metodologia utilizando válvulas de estrangulamento. Assim, demonstra-se que o efeito da variação de velocidade é consistente para cargas centrífugas e neste caso deve ser utilizada sempre que possível.

4.5) Estudo das leis de afinidade para cargas centrífugas

4.5.1) As leis de afinidade aplicadas ao sistema de bombeamento do LAMOTRIZ

Freqüentemente é necessário estimar as condições de trabalho de um sistema centrífugo sem que se possam realizar medições diretas, como é o caso das maiorias das aplicações industriais. Neste sentido, para estas estimativas recorre-se as chamadas leis de afinidade ou de similaridade, já detalhadas no capítulo 2 (equações 2.13 a 2.16).

Nas tabelas 4.12 e 4.13, os valores relacionados na coluna *medido (1)* e *medido (2)*, foram retirados das tabelas 4.8 e 4.9. A coluna *calculado* foi preenchida pela aplicação das leis de afinidade sobre a coluna *medido (1)*, ou seja, usou a velocidade nominal como referência. Na última coluna está anotado o erro percentual obtido na comparação entre o valor medido (2) e o valor calculado. No cálculo da potência, onde existe a influência do consumo na alimentação do inversor de freqüência. Um maior erro ficou evidente. Para amenizar esse efeito, na linha Pij SIF, onde SIF significa *Sem Inversor de Freqüência*, foram abatidos 70 W referentes à alimentação deste equipamento. O erro para a potência diminuiu, nas duas tabelas, para valores aceitáveis.

Outros efeitos que contribuíram para o maior erro na potência são: a variação do rendimento para sistemas funcionando em velocidades diferentes daquela para o qual foi projetado e o constante desequilíbrio nas tensões durante as medições. A relação entre rendimentos é apontada na equação 2.18 e reescrita a seguir. Com o motor convencional trabalhando em condições de carga nominal, seu rendimento é de 78,6%, porém quando se procede a estimativa através da equação para uma rotação de 1700 rpm, a eficiência cai para **76,6%**. Para uma mesma condição, o motor de alto rendimento, que tem sua eficiência em 82,5%, reduz o rendimento para **80,74%** na mesma velocidade mencionada.

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{0,1}$$

Tabela 4.12 – Relações das leis de afinidade em um motor convencional

	Calculado	medido(1)	medido(2)	erro %
Q21 =	1,62672088	3	1,5	-8,44806
H21 =	0,499841711	1,7	0,45	-11,0759
P21 =	161,5045659	1013	238	32,14094
P21 SIF	150,3443294	943	168	10,50933
Q22 =	2,098607989	3	2	-4,9304
H22 =	0,831896037	1,7	0,9	7,567107
P22 =	346,7685052	1013	409	15,21552
P22 SIF	322,8062195	943	339	4,776926
Q23 =	2,528304233	3	2,5	-1,13217
H23 =	1,207438656	1,7	1,3	7,120103
P23 =	606,3643736	1013	635	4,509547
P23 SIF	564,4635778	943	565	0,094942

Tabela 4.13 – Relações das leis de afinade em um motor de alto-rendimento

	Calculado	medido(1)	medido(2)	erro %
Q21 =	1,62443236	3	1,5	-8,29549
H21 =	0,49843632	1,7	0,45	-10,7636
P21 =	144,333494	909,13	209	30,94091
P21 _{SIF}	133,220293	839,13	139	4,158063
Q22 =	2,06670931	3	2	-3,33547
H22 =	0,80679872	1,7	0,8	-0,84984
P22 =	297,235317	909,13	355	16,27174
P22 _{SIF}	274,349182	839,13	285	3,737129
Q23 =	2,05946011	3	2,5	17,6216
H23 =	1,1670274	1,7	1,2	2,747717
P23 =	517,099578	909,13	570	9,280776
P22 _{SIF}	477,284623	839,13	500	4,543075

Outros efeitos que contribuíram para o maior erro na potência são: a variação do rendimento para sistemas funcionando em velocidades diferentes daquela para a qual foi projetado e o constante desequilíbrio nas tensões durante as medições. A relação entre rendimentos é apontada na equação 2.18 e reescrita a seguir. Com o motor convencional trabalhando em condições de carga nominal, seu rendimento é de 78,6%, porém quando se procede a estimativa através da equação para uma rotação de 1700 rpm, a eficiência cai para **76,6%**. Para uma mesma condição, o motor de alto rendimento, que tem sua eficiência em 82,5%, reduz o rendimento para **80,74%** na mesma velocidade mencionada.

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{0,1}$$

4.5.2) Obtenção das curvas características para diversas velocidades a partir da curva para uma rotação conhecida

A figura 4.10 relaciona a curva característica da vazão em função da pressão, enquanto que a figura 4.11 ilustra o gráfico da potência elétrica em função da vazão do sistema. Deve-se salientar que estas curvas características são obtidas tanto experimentalmente quanto analiticamente, neste caso, através da aplicação das leis de afinidade. O levantamento das curvas para 30 Hz e 45 Hz foram obtidos a partir da curva em 60Hz, normalmente fornecida pelo fabricante da bomba. O trabalho foi executado com o sistema acionado pelo motor de linha padrão. A proximidade entre as curvas mostra que o método é mais eficiente para valores não muito distantes da condição de velocidade nominal. A curva para 45 Hz se mostra com melhor qualidade, enquanto a de 30 Hz já demonstra um distanciamento maior entre as curvas medida e calculada.

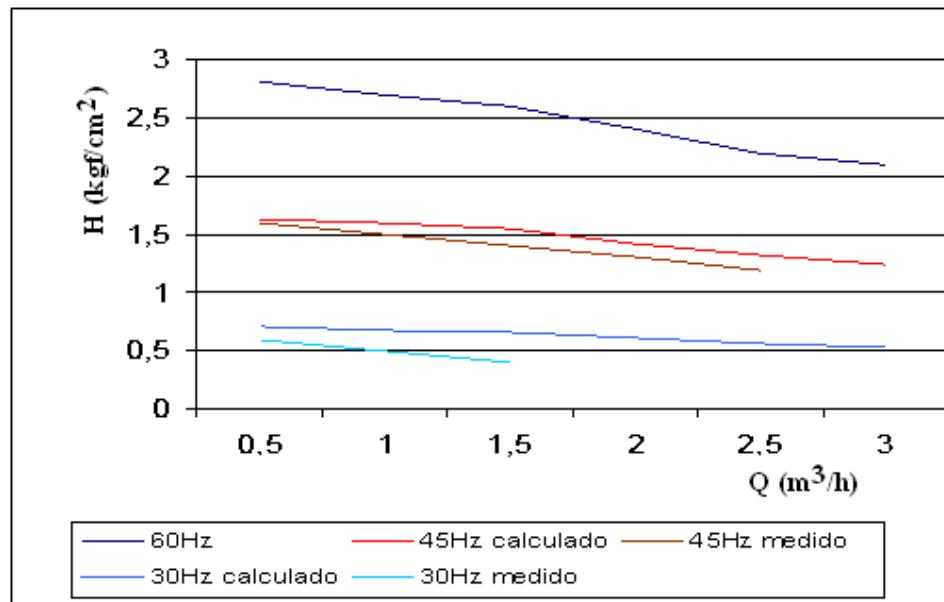


Figura 4.10 - Relação vazão versus carga de pressão

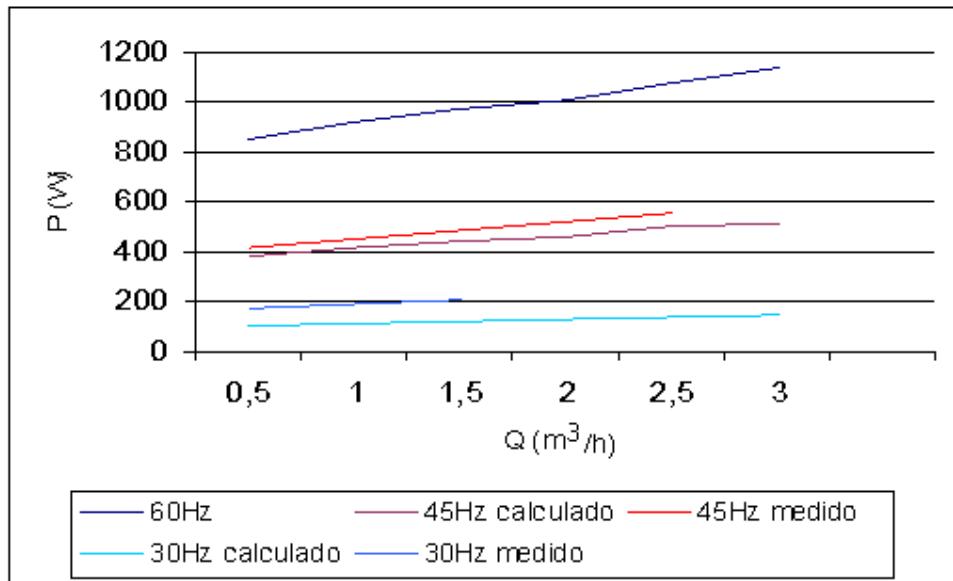


Figura 4.11 – Relação potência elétrica em função da vazão

Deve-se salientar que, o método de cálculo utilizado e suas considerações teóricas estão devidamente aclarados no item 2.7.2, no capítulo 2. Por este motivo não foram reescritas as equações nem elucidadas as teorias que envolvem este assunto.

4.6) Considerações finais

No capítulo presente foram analisadas e apresentadas as variações nos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ, quando o controle de vazão é realizado pela válvula de estrangulamento ou quando se utilizou inversores de freqüência. Nestas condições, pode-se constatar que:

- Para a utilização do estrangulamento de válvula, encontrou-se uma economia de energia de 10% quando da substituição do motor convencional pelo de alto-rendimento;
- Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, a economia de energia elétrica, para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ foi de 78% quando o motor utilizado foi o de alto-rendimento;
- Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, a economia de energia elétrica, para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ foi de 75% quando o motor utilizado foi o convencional;
- Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, em todos os casos estudados, a economia de energia elétrica foi acentuadamente reduzida, tanto para o motor convencional, quanto o de alto-rendimento;
- Os estudos mostraram que, com a utilização dos conversores de freqüência, a economia de energia elétrica é mais acentuada à medida que a vazão do sistema se distancia de seu valor nominal;
- Os estudos mostraram que a lei de afinidade pode ser utilizada na obtenção das curvas características para outras velocidades, a partir da curva original;
- Identificou-se uma possibilidade de estimar o momento de inércia das cargas mecânicas em plantas industriais em funcionamento.

Capítulo 5

Simulação Computacional do Sistema de Bombeamento (LAMOTRIZ) na Plataforma ATP

5.1) Introdução

Modelar e simular sistemas físicos são técnicas utilizadas pelas engenharias em diversas situações. O domínio dessas técnicas permite o maior entendimento das características de funcionamento de um sistema a baixo custo ao permitir a representação de um fenômeno real, para análise e estudos. A simulação também permite comparar e identificar, entre as soluções, as mais adequadas a serem aplicadas quando necessárias.

Normalmente, na engenharia elétrica toda simulação computacional é baseada em duas técnicas, quais sejam: técnica no domínio da freqüência e no domínio do tempo. O estudo no domínio da freqüência, baseado no princípio da superposição dos efeitos, é principalmente utilizado para as análises em regime permanente. Em relação a técnica que estuda o domínio do tempo é útil quando se deseja estudar os regimes transitórios. Dentre as principais plataformas convencionais no domínio do tempo, destacam-se: ATP, SABER, MATLAB, PSPICE, EWB, etc. Neste trabalho a escolha recaiu sobre o programa EMTP (ATPDraw).

O desenvolvimento do programa EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) iniciou-se a partir da década de 60, com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo, tornando-se uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos. Em 1984 foi criada uma nova versão do EMTP, denominada ATP - *Alternative Transient Program*, que constitui a continuação das versões anteriores do programa [50].

O ATP, sempre se mostrou um programa de difícil manejo, entretanto, durante os últimos anos foram desenvolvidos vários programas de apoio que têm facilitado a sua utilização para qualquer tipo de usuário. Entre as facilidades mais recentes podem ser citadas as novas versões do pré-processador gráfico ATPDraw, o programa de suporte LCC e o programa gráfico PLOUTXY, além das diferentes opções de versões para o próprio ATP [51].

O capítulo atual tem por objetivo apresentar a simulação computacional, na interface ATPDraw, de um sistema de bombeamento, acionado por motor de indução trifásico de 1,5 cv- 2 polos. Os resultados oriundos de medições também serão mostrados e analisados de modo a buscar a comparação com valores teóricos buscando a validação do modelo computacional proposto e justificar o seu uso no estudo do sistema de bombeamento contido no Laboratório de Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ da Universidade Federal de Uberlândia.

5.2) O sistema de bombeamento

5.2.1) A representação do motor de indução trifásico - MIT

O motor proposto para a simulação é um motor WEG de linha padrão, cujos dados de placa estão descritos na Tabela 5.1. A metodologia utilizada nos cálculos dos parâmetros do circuito equivalente não será abordada neste trabalho, uma vez que é de amplo conhecimento e pode ser encontrada, por exemplo, na referência [13]. Deve-se destacar apenas que a determinação dos parâmetros foi obtida a partir de ensaios a vazio e com o rotor bloqueado, os quais estão indicados nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 [13].

Tabela 5.1: Dados de placa do MIT

P(cv)	n(rpm)	V(V)	In(A)	Ip/In	Cn(Nm)	Cp/Cn	H	Fp
1,5	3370	220	4,27	7,5	3	3	78,6	0,86

Tabela 5.2: Ensaio a vazio

V(V)	f(Hz)	I(A)	P(W)
220	60	1,576	105,7

Tabela 5.3: Ensaio de rotor bloqueado

V(V)	f(Hz)	I(A)	P(W)
220	60	29,6	8500

Tabela 5.4: Parâmetros para o circuito equivalente

Rs(Ω)	Ls(mH)	Rr(Ω)	Lr(mH)	Lm(mH)
5,6	14,063	4,26	11,324	620

O circuito equivalente usado como base para a simulação está representado pela Figura 5.1. Onde os índices r , s e m significam, respectivamente, rotor, estator e magnetização.

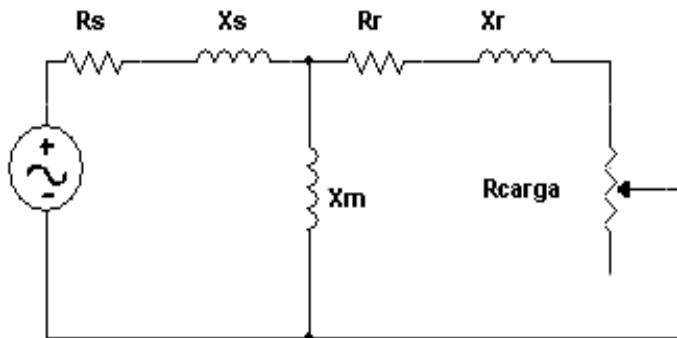


Figura 5.1 – Circuito elétrico equivalente para motor

5.2.2) A representação do sistema de bombeamento

A carga que representa o sistema de bombeamento é acionada por uma bomba centrífuga. Uma das formas eficientes de se identificar esse tipo de carga é através de curvas em função da velocidade. A figura 5.2 mostra o gráfico do torque mecânico em função da velocidade do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ. A característica da bomba foi construída através de valores obtidos em laboratório, conforme já explanado nos capítulos anteriores, e foi utilizada para as modelagens na plataforma ATP Draw.

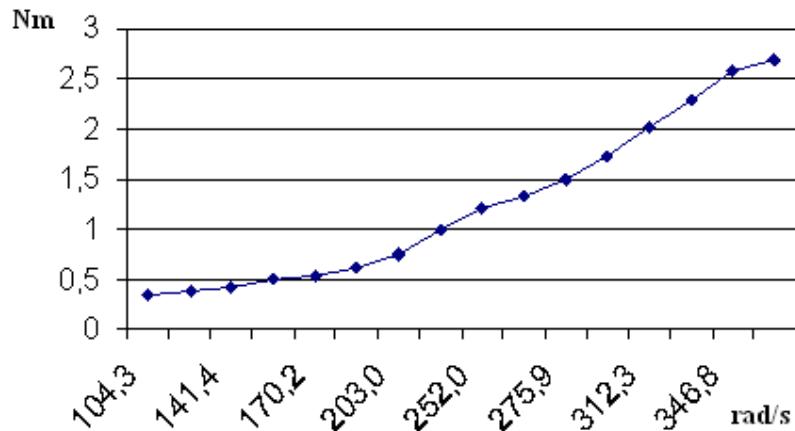


Figura 5.2 – Curva do Sistema de Bombeamento

5.3) A modelagem do sistema

5.3.1) Representação do sistema no ATPDraw

A modelagem do sistema de bombeamento utilizada no *software* para representar a estação de trabalho do LAMOTRIZ pode ser visualizada na figura 5.3.

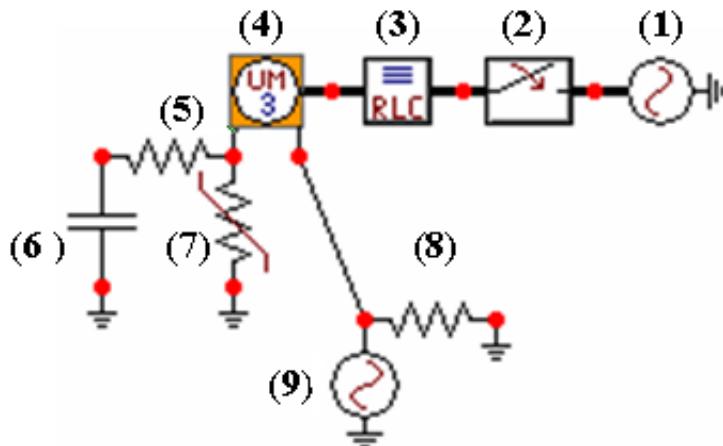


Figura 5.3 – O sistema de bombeamento representado no ATP

Onde:

- (1) é uma fonte trifásica *sources- Ac3ph, Type 14*;
- (2) é uma chave trifásica *Switch time 3-ph (SWIT_3XT)*;
- (3) é um componente *Branch Linear - RLC3-ph*;
- (4) é um motor trifásico *Machines - UM3-Indution*;

- (5) é um componente *Branch linear – resistor* de 1×10^{-6} ohm;
- (6) é um componente *Branch linear – capacitor* de 144175 uF, representando a inércia do sistema;
- (7) é um componente *NLINRES - nonlinear current-dependent resistor, TYPE 99*, representando a carga mecânica;
- (8) é um componente *Branch linear – resistor* de 1 k ohm, utilizado para evitar flutuações;
- (9) é uma fonte monofásica *sources- Ac1ph, Type 14* utilizada como fonte de corrente com um pequeno valor (-1×10^{-5} A), apenas para indicar uma magnetização prévia e uma freqüência próxima à zero (0.001 Hz).

5.3.2) Representação do motor no ATP Draw

A figura 5.4 é a representação de um motor trifásico de indução, identificado no ATPDraw como *Machines - UM3-Indution*.

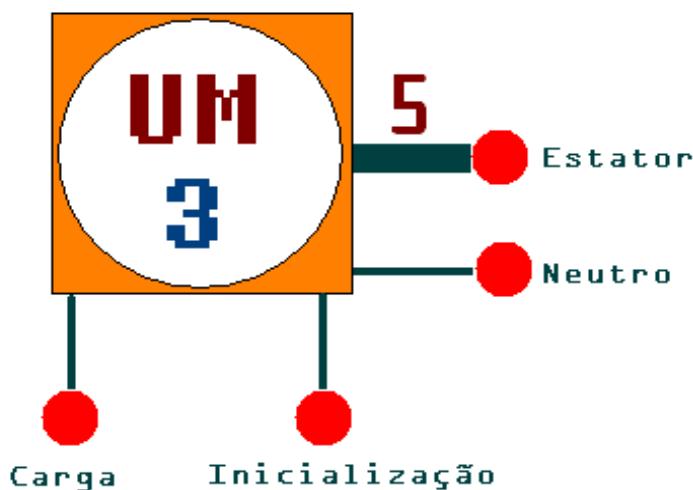


Figura 5.4 – O motor representado no ATP

Onde os nós:

- Estator: Nô de conexão do motor à rede;
- Neutro: Para motores ligados em estrela, esse ponto deve ser aterrado através de uma resistência alta de modo a evitar oscilações numéricas;
- Inicialização: Por este nó é possível indicar condições iniciais do motor, como por exemplo, magnetização remanescente;

- Carga: Por este nó é feito o acoplamento da carga.

5.3.3) Entrada de dados do motor de indução trifásico

A janela de atributos do motor, indicada na figura 5.5, é disponibilizada a partir de dois cliques no ícone identificado na figura 5.4. Por essa janela tem-se acesso aos pontos de entrada de dados do motor no *software*.

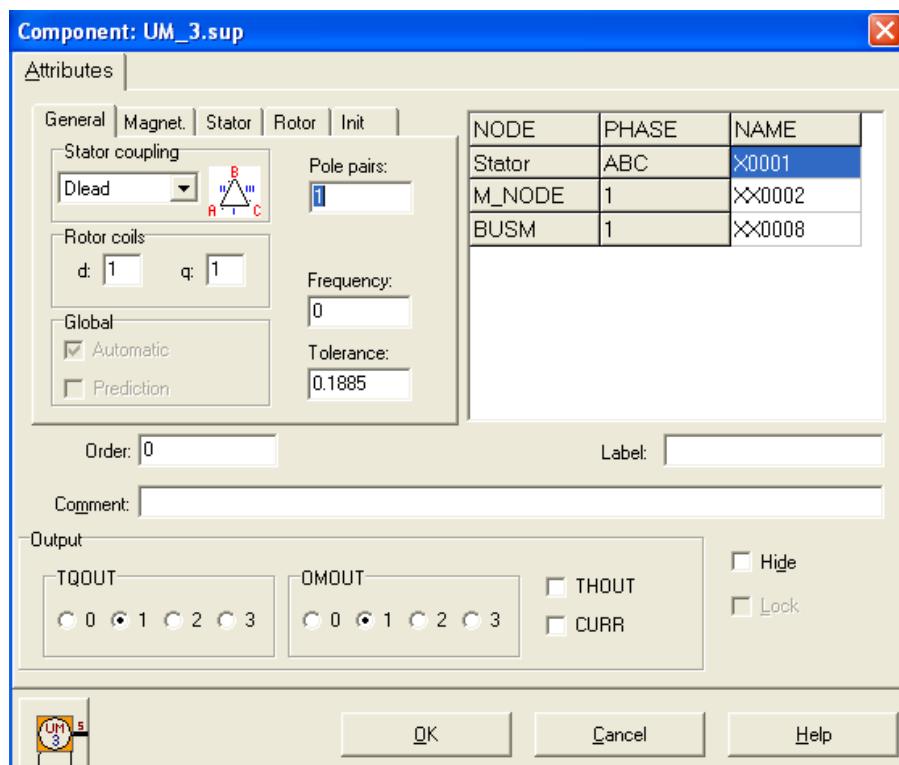


Figura 5.5 - Janela de atributos do motor

Onde, nas abas:

- *General* - foi indicada a ligação delta, existente nos motores do LAMOTRIZ, o número de bobinas nos eixos d e q , (1) apenas indicando o mesmo número de bobinas nos dois eixos;
- *Magnet* - foi introduzido o valor da indutância de magnetização (620 mH), mesmos valores para os eixos d e q ;
- *Stator* – foram introduzidos os valores de resistência ($5,6 \Omega$) e indutância (14,063 mH) de estator, iguais nos eixos d e q . Para a seqüência zero, no ATP draw, o valor é indiferente, uma vez que o motor não tem suas bobinas aterradas;

- *Rotor* – foram introduzidos os valores de resistência ($4,26 \Omega$) e indutância ($11,324 \text{ mH}$) de rotor, para d e q ;
- *Init* – no campo *split [%]* indica o escorregamento inicial, aqui utilizado o valor 100% representando o motor totalmente inerte antes de sua partida.

5.3.4) Entrada de dados da carga

No ATPDraw, a velocidade é representada em forma de tensão ($1V = 1\text{rad/seg}$), enquanto o torque é representado em forma de corrente ($1 A = 1\text{Nm}$), propiciando que a relação torque versus velocidade possa ser obtida na forma de resistência. Assim, a modelagem da carga, foi feita pelo uso de um resistor não-linear, que tem sua resistência dependente da corrente. Esse resistor permite entrar diretamente com os valores de torque e velocidade obtidos empiricamente no laboratório. Outra maneira pela qual se pode representar este tipo de carga pode ser verificada na referência [49].

Na figura 5.6, pode-se visualizar a janela de atributos do resistor não-linear que foi utilizado na modelagem da carga mecânica.

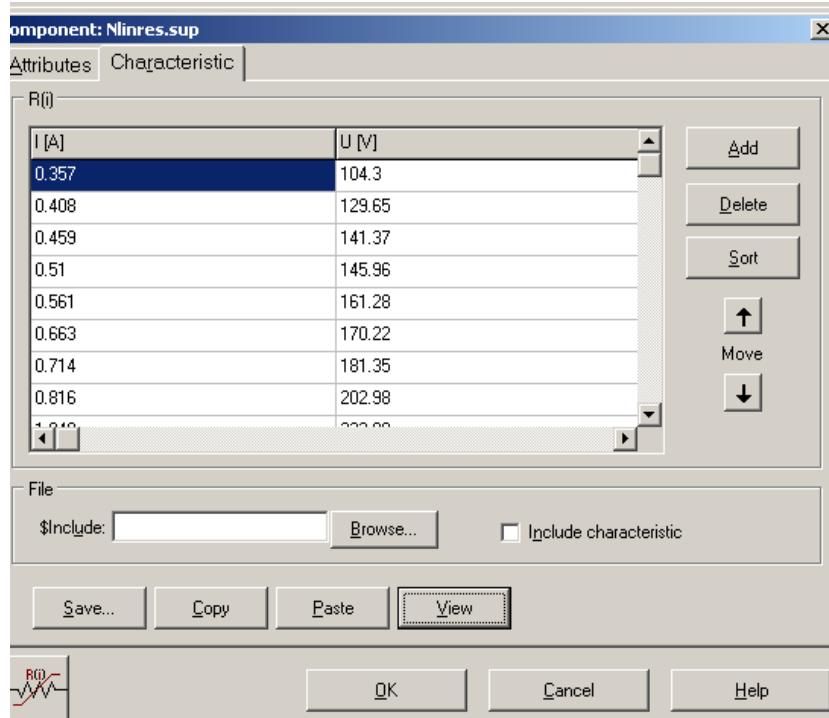


Figura 5.6 – Janela de atributos do resistor não-linear NLINRES

O gráfico plotado na Figura 5.7 indica a resistência de carga inserida no ATP, como representativo do sistema de bombeamento.

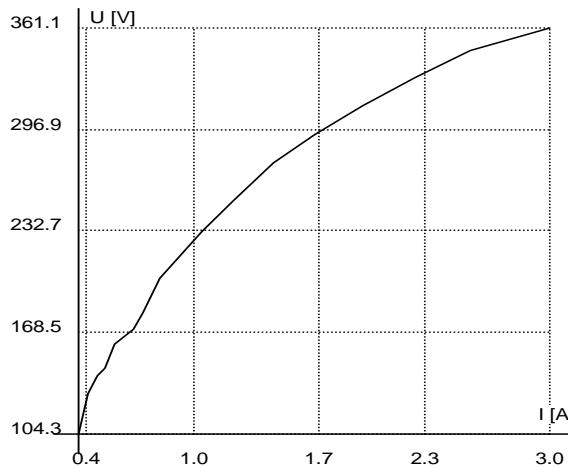


Figura 5.7 – Curva da resistência representativa da carga mecânica

Outro item que deve ser contemplado é o momento de inércia da carga, que no ATP, deve vir somado ao momento do eixo do motor. Para o programa, 1kgm^2 corresponde a 1 Farad. Assim, do capítulo 4, tem-se que:

$$J_m = 0,00079 \text{ kgm}^2$$

$$J_c = 0,143385 \text{ kgm}^2$$

Contabilizando um momento de inércia total de **0,144175 kgm²**

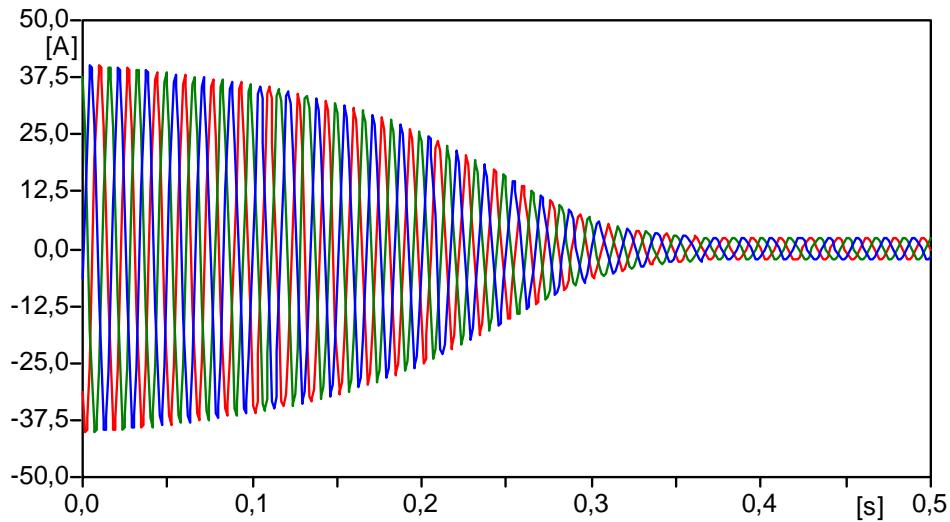
Lembrando, que os dados iniciais, convertidos em capacitância, devem ser indicados em μF , o capacitor indicado por (6), na figura 5.3 deve ter o valor de 144175 μF .

5.4) Simulações

5.4.1) Ensaio a vazio

Este item tem por objetivo realizar uma comparação entre os valores encontrados nas simulações computacionais e aqueles obtidos experimentalmente no ensaio em vazio.

A figura 5.8 apresenta as formas de onda das correntes absorvidas pelo motor em função do tempo de simulação, enquanto que a tabela 5.5 indica os valores numéricos encontrados, onde se observa a coerência com os resultados experimentais, indicado na tabela 5.2.



Figuras 5.8 – Correntes a vazio

Tabela 5.5 – Valores de corrente encontrados via simulação

Ip(pico)	Ip(rms)	Ireg(pico)	Ireg(rms)
39,36	28,48	2,254	1,594

Onde:

Ip = corrente de partida;

Ireg = corrente de regime permanente.

A figura 5.9 oferece o torque mecânico em função do tempo, durante a operação a vazio. Como esperado os torques de partida e máximo não se alteram, o torque de regime (Creg) e o tempo de partida é que devem ser pequenos, pois o acionamento tem apenas o próprio eixo do motor como carga. Numericamente, a tabela 5.6 indica os valores encontrados, onde se observa a coerência com os resultados de placa, indicado na tabela 5.1.

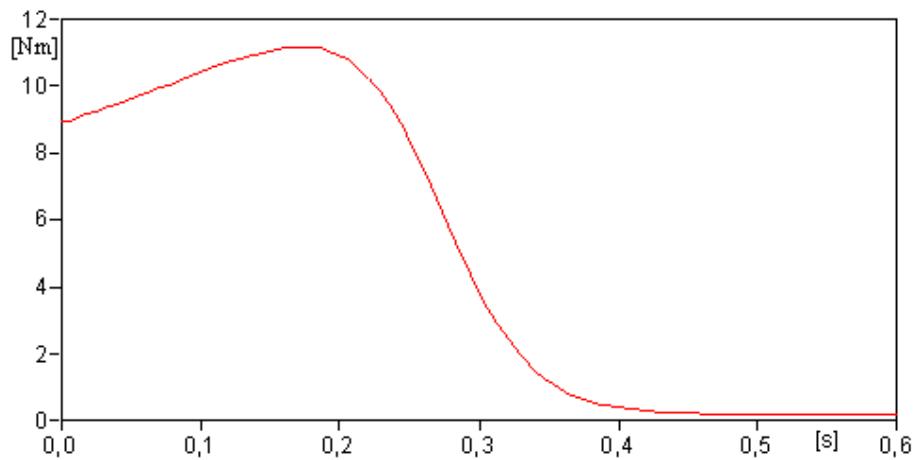


Figura 5.9 - Torque mecânico durante a operação do motor com o rotor livre

Tabela 5.6 – Valores de torque encontrados via simulação

C _p	C _m	C _{reg}
9,58	11,96	0,21

A curva apontada na figura 5.10 traz o valor simulado para a velocidade com o motor a vazio, 376 Rad/seg, ou seja, 3590 rpm. É coerente, pois o valor próximo ao da velocidade síncrona é o esperado, uma vez que é a própria carga mecânica, a responsável pelo escorregamento.

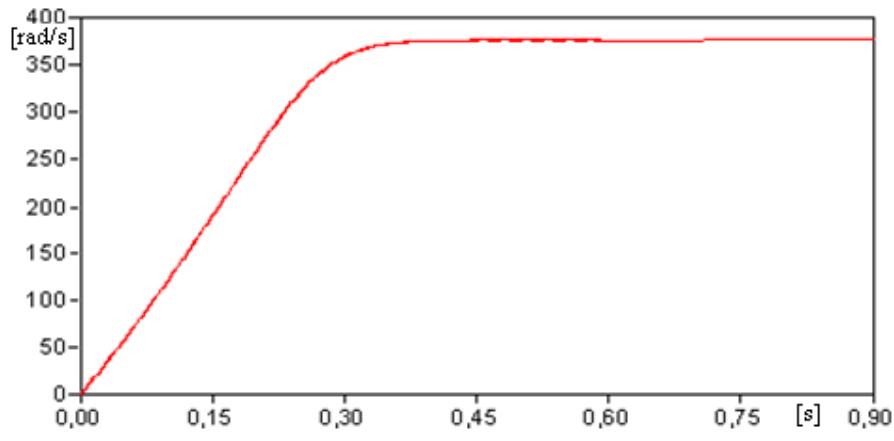


Figura 5.10 – Velocidade do motor com o rotor livre

5.4.2) Ensaio de rotor travado

O ensaio de rotor travado foi executado, mantendo-se por curto espaço de tempo, a tensão nominal e, nestas condições, obteve-se a corrente de partida. A Figura 5.11 apresenta a forma de onda da corrente de rotor travado em função do tempo. O valor eficaz encontrado para esta grandeza é de 28,48 A, enquanto o de pico é 39,36 A. Experimentalmente, o valor encontrado foi de 29,5 A de corrente eficaz na partida.

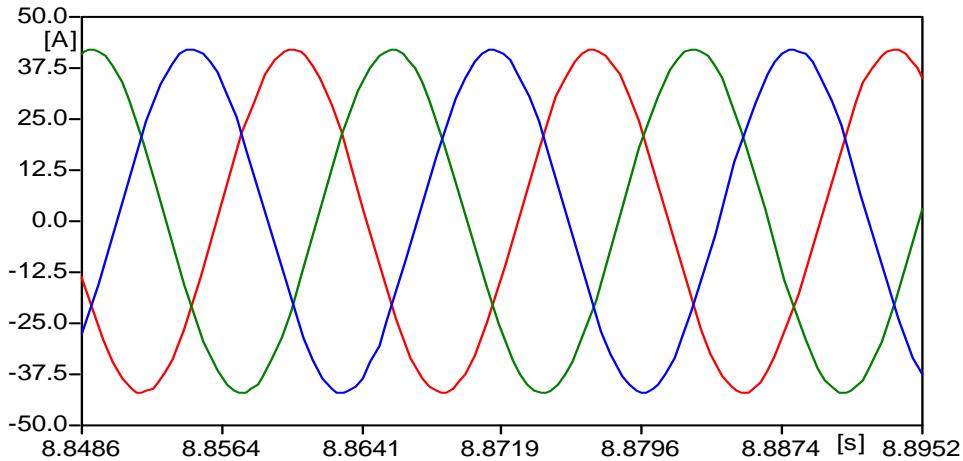


Figura 5.11 – Correntes do motor com o rotor travado

A figura 5.12 oferece o torque mecânico em função do tempo, durante a operação com rotor bloqueado. Como esperado o torque se estabilizou em 9,58 Nm, este é o mesmo encontrado na partida do motor.

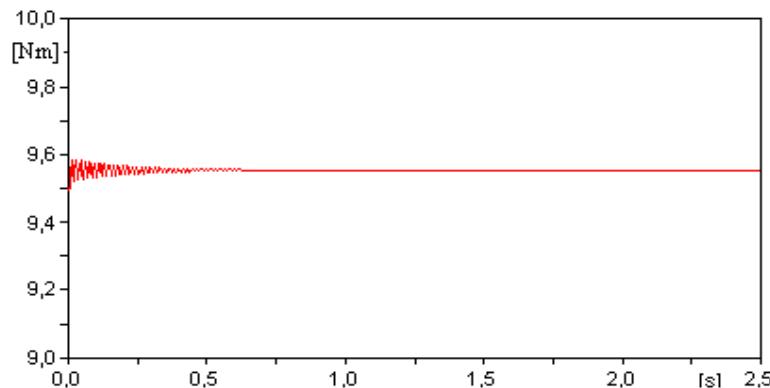


Figura 5.12 – Torque de rotor bloqueado

A figura 5.13 apresenta a velocidade em função do tempo, durante a operação com rotor bloqueado. A velocidade como esperado é zero.

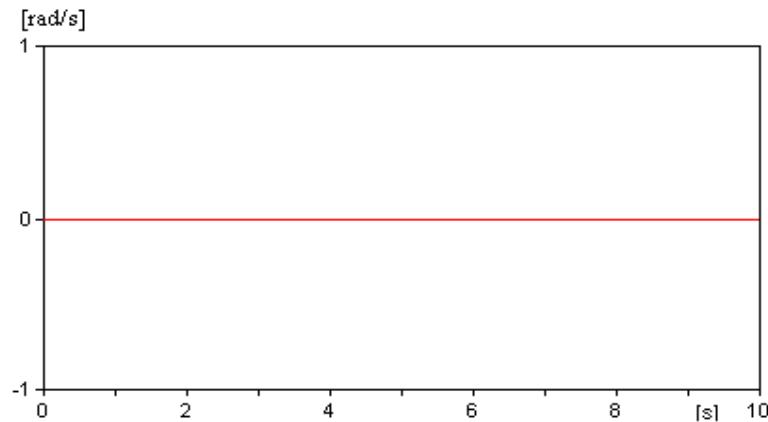


Figura 5.13 – Velocidade do motor com o rotor bloqueado

5.4.3) Ensaio com carga nominal

A carga mecânica aplicada ao motor é ligeiramente menor que a carga nominal, necessitando de 3,7 A, valor abaixo de 4,27 A de placa, porém, esta foi analisada por ser a carga de regime. Os valores de placa do motor e os valores medidos foram os parâmetros utilizados na comparação.

A figura 5.14 apresenta as formas de onda das tensões fase-neutro aplicadas no motor em função do tempo de simulação, tensões próximas às utilizadas nos testes laboratoriais. Na tabela 5.7 estão indicados os valores numéricos para estas tensões impostas.

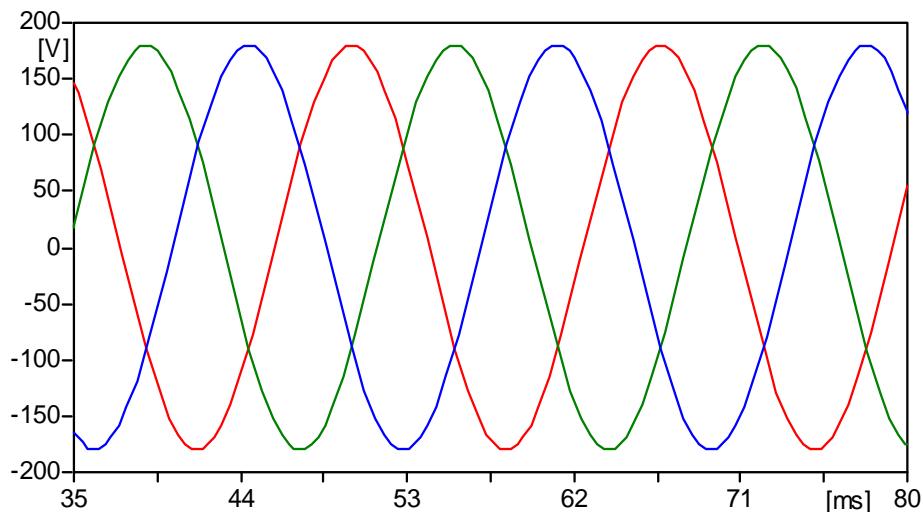


Figura 5.14 – Tensões na partida

Tabela 5.7 – Valores de tensão utilizados na simulação

Vff(pico)	Vff(rms)	Vfn(pico)	Vfn(rms)
311,1	220	179,6	127,1

Onde:

Vff = tensão entre fases;

Vfn = tensão entre fase e neutro.

A figura 5.15 mostra as correntes elétricas em função do tempo, durante a operação com carga nominal. Numericamente, a tabela 5.8 indica os valores encontrados, tanto de pico como de regime permanente.

As correntes na partida, se mostraram bastante coerentes, tanto com os dados de placa quanto com os valores obtidos no ensaio de rotina. Na especificação do motor, a corrente de regime é de 4,27 A, a relação I_p/I_n é de 7,5, portanto a corrente de partida para o qual esse equipamento foi projetado é de 32 A. Pelos dados fornecidos pelo ensaio de rotor bloqueado, a corrente foi de 29,6. Pela análise das correntes pode-se, também, estimar o tempo de partida em 6 segundos. Este tempo observável no gráfico (figura 5.15) é o valor aproximado, conferido no LAMOTRIZ.

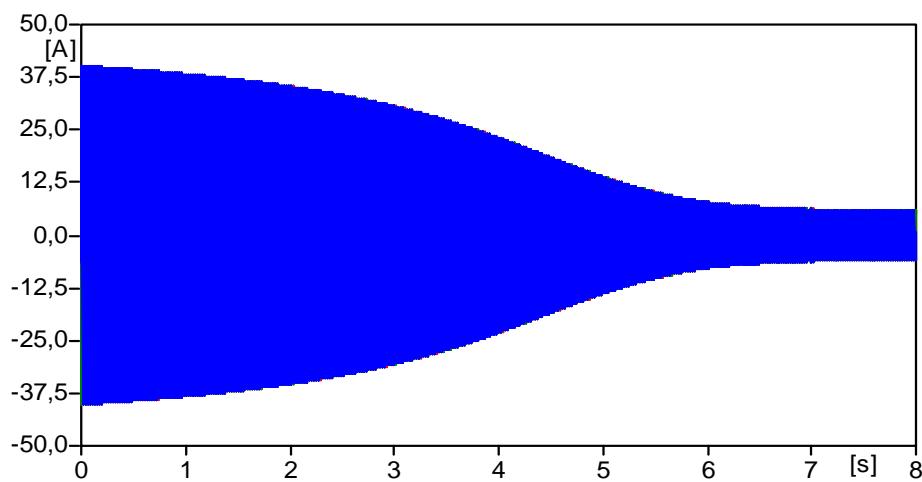


Figura 5.15 – Correntes na partida

Tabela 5.8 – Valores de corrente encontrados via simulação para carga nominal

Ip(pico)	Ip(rms)	Ireg(pico)	Ireg(rms)
39,36	28,48	4,573	3,235

A figura 5.16 oferece o torque mecânico em função do tempo, durante a operação com carga de regime. Como esperado os torques de partida e máximo permanecem constantes, o torque de regime (C_{reg}) e o tempo de partida é que sofreram variações pela imposição da carga mecânica. Numericamente, a tabela 5.9 indica os valores encontrados, onde se observa a coerência com os resultados de placa, indicado na tabela 5.1. Em laboratório o torque encontrado foi de 2,85 Nm, um valor inferior à condição nominal, isto se explica pelo fato de que a carga mecânica utilizada no LAMOTRIZ é menor que a carga para o qual o motor foi projetado. O valor de torque de regime obtido via simulação computacional, apresenta boa aproximação com o encontrado via medição laboratorial, como esperado é um pouco menor, uma vez que algumas das perdas internas do motor não foram contempladas na modelagem.

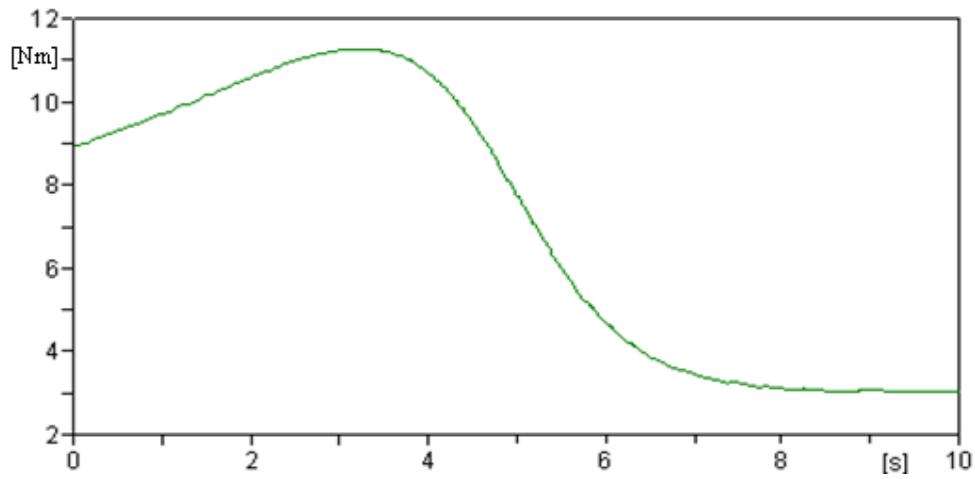


Figura 5.16 – Torque mecânico no eixo do motor

Tabela 5.9 – Valores de torque encontrados via simulação com carga nominal

C _p	C _m	C _{reg}
9,58	11,96	2,73

A figura 5.17 apresenta a curva de torque mecânico do motor e do sistema em função do tempo, durante a operação com carga de regime. A forma parabólica no gráfico, em verde, é característica marcante de cargas centrífugas. O valor em regime de 2,71 Nm mostra que a carga está bem modelada, uma vez que este é bastante próximo do valor de torque de regime do motor, medido no laboratório.

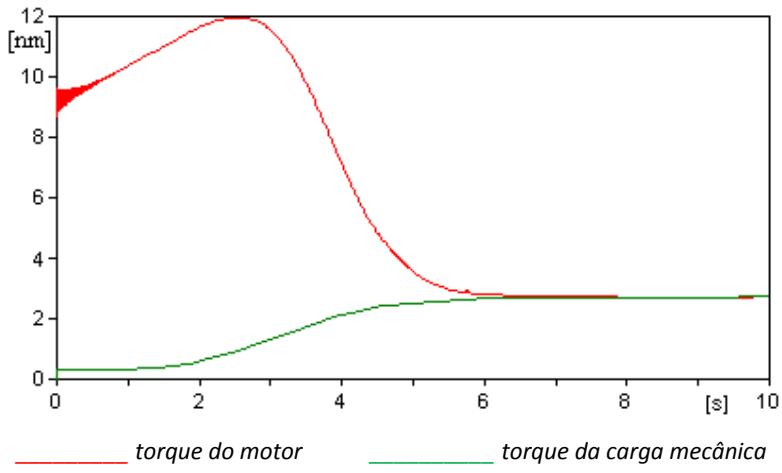


Figura 5.17 - Torque de carga mecânica do sistema

A figura 5.18 indica a velocidade em função do tempo, durante a operação com carga de regime. A velocidade, de 350,3 Rad/seg ou 3345,12 rpm, é menor que a velocidade nominal, que é de 3370 rpm. Entretanto, a velocidade medida para essa carga 3342 rpm, fica evidenciada a proximidade entre a modelagem utilizada e a carga mecânica utilizada no laboratório.

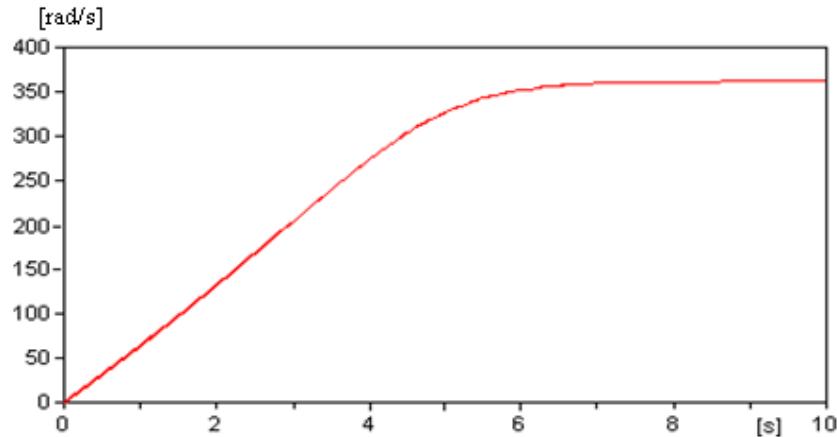


Figura 5.18 – Velocidade do conjunto motor-carga

Posteriormente, em regime permanente, foi conferida a potência elétrica em função do tempo e indicada na figura 5.19. A potência trifásica obtida por meios computacionais é de 1044,9 W enquanto a potência elétrica medida é de 1135 W. Fica demonstrada, mais uma vez, a ausência de perdas na modelagem computacional.

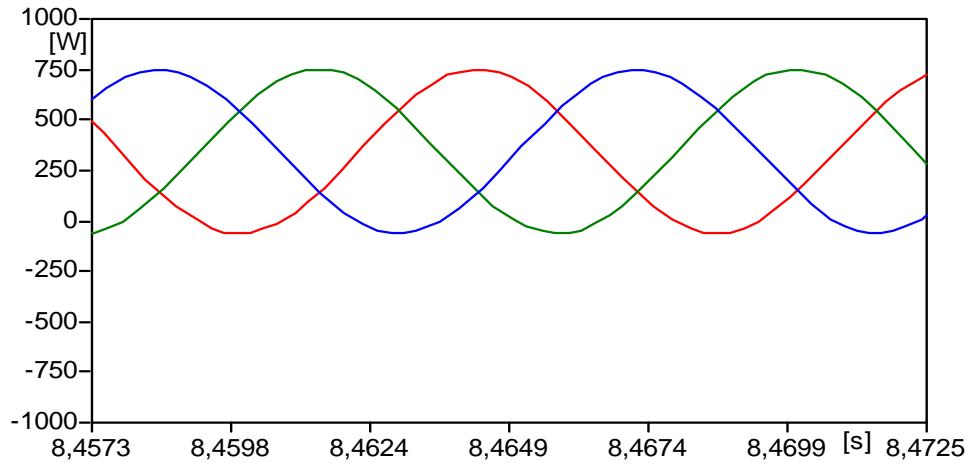


Figura 5.19 – Formas de onda da potência elétrica

A figura 5.20 aponta a potência mecânica, obtida através do produto torque vezes velocidade angular 953,9 W é um valor bastante próximo dos 997,42 W apurados em laboratório, se for utilizado o mesmo processo matemático para se obter essa potência.

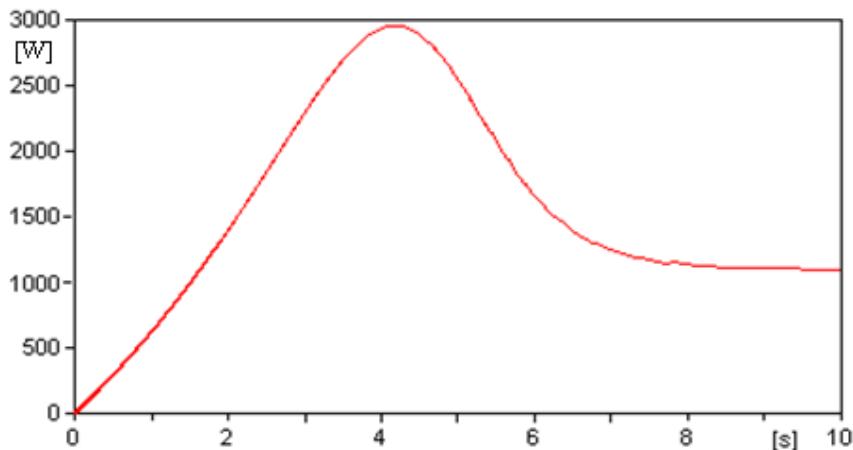


Figura 5.20 – Potência mecânica no eixo do MIT

5.5. Ensaio com carga acionada em 45 Hz

Para essa análise, buscou-se na teoria o conceito de fluxo constante, ou seja, manter constante a relação V/F, teoria, aliás, utilizada em inversores de freqüência.

Assim, por uma regra de 3 simples, chegou-se aos valores 134,5 Vp (tensão fase/neutro) e 43,9 Hz, descontado o escorregamento. Por esse caminho, modelou-se um inversor de freqüência ideal, ou seja, com perdas iguais a zero e, que não impõe distorções harmônicas no sistema.

A tabela 5.10, apresenta os valores obtidos no LAMOTRIZ para a carga acionada em 45 Hz. Esses valores estão na entrada do inversor de freqüência e, trazem embutidas as perdas no equipamento que, por indicação de catálogo, é um valor aproximado de 70 W.

Tabela 5.10 – Valores medidos em laboratório para 45 Hz

n(rpm)	I(A)	V(V)	P(W)	C(Nm)
2576	2,6	217,4	555	1,33

A figura 5.21 apresenta as formas de onda das tensões aplicadas no motor em função do tempo para simulações em 45Hz, condições similares às presentes nos testes laboratoriais. Na tabela 5.11 estão indicados os valores numéricos para estas tensões.

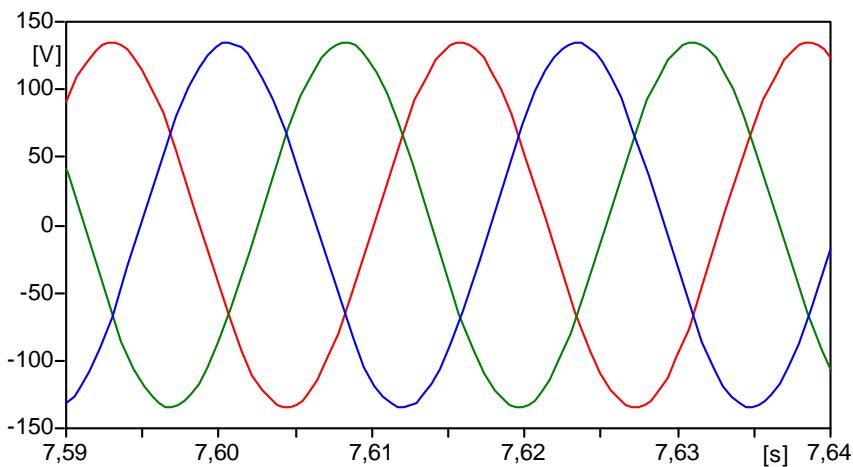


Figura 5.21 – Tensões fase-fase no motor em 45 Hz

Tabela 5.11 – Valores de tensão utilizados na simulação em 45 Hz

Vff(pico)	Vff(rms)	Vfn(pico)	Vfn(rms)
233	164,7	134,5	95,11

A figura 5.22 mostra as correntes elétricas em função do tempo, durante a operação com carga acionada em 45 Hz. Numericamente, a tabela 5.12 indica os valores

encontrados, tanto de pico como de regime permanente. Comparando com valores da tabela 5.10, a corrente de 2,13 A é o valor esperado, uma vez que a simulação foi feita considerando as mesmas condições da carga e, em condições reais também a corrente sofre a influência do inversor de freqüência.

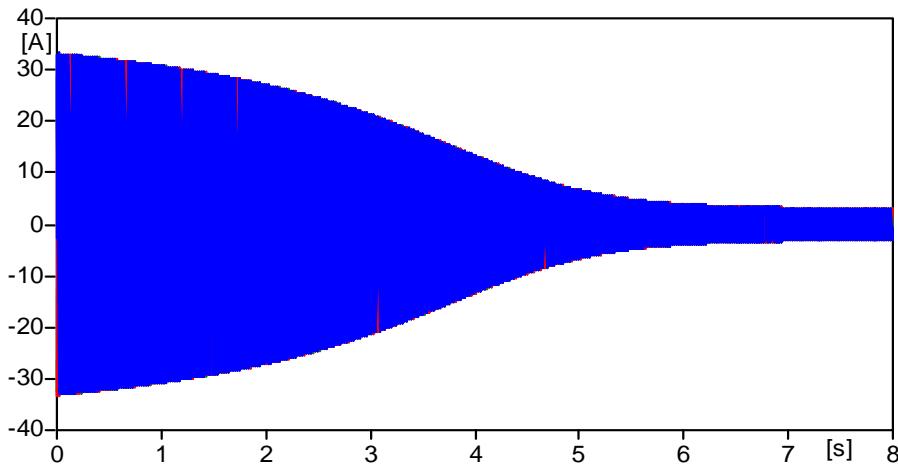


Figura 5.22 – Correntes no motor em 45 Hz

Tabela 5.12 – Valores de corrente obtidos na simulação em 45 Hz

Ip(pico)	Ip(rms)	Ireg(pico)	Ireg(rms)
33,46	23,66	3,01	2,13

A figura 5.23 indica o torque mecânico em função do tempo, durante a operação com carga acionada em 45 Hz. Em laboratório o torque encontrado foi de 1,33 Nm, enquanto que o valor simulado foi 1,371 Nm. O valor de torque de regime obtido via simulação computacional, apresenta boa aproximação, aproximadamente 4 %, com o encontrado via medição laboratorial.

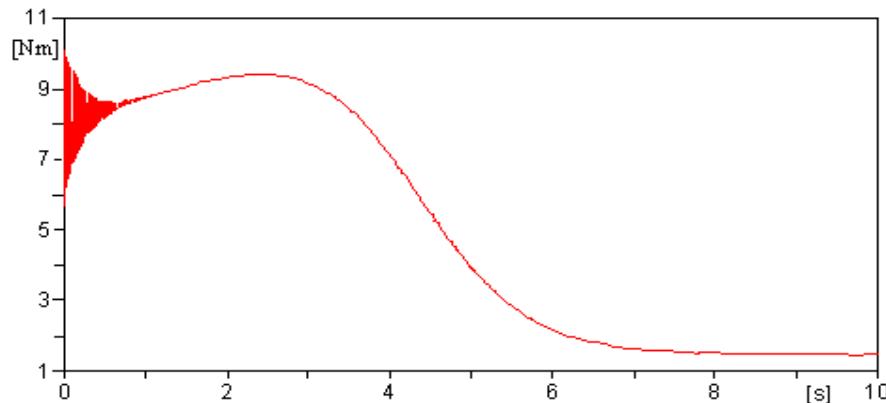


Figura 5.23 – Torque no Motor em 45 Hz

Na figura 5.24 foram apresentados os torques do motor e do sistema, ambos, alcançam o estado de regime em 1,37 Nm.

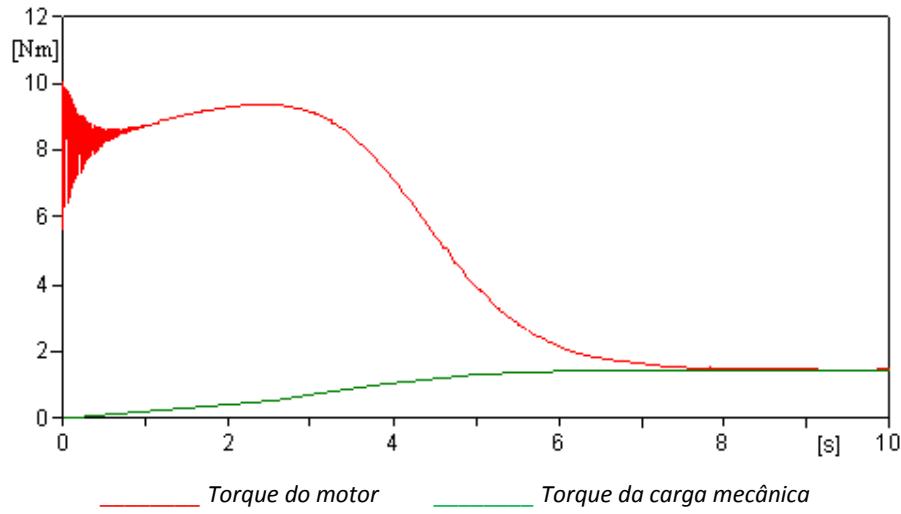


Figura 5.24 – Torques do motor e do sistema em 45 Hz

A figura 5.25 mostra a velocidade em função do tempo, durante a operação com carga acionada em 45 Hz. A velocidade, de 269,7 Rad/seg ou 2575,45 rpm, é valor bastante próximo do medido no LAMOTRIZ, indicado na tabela 5.10.

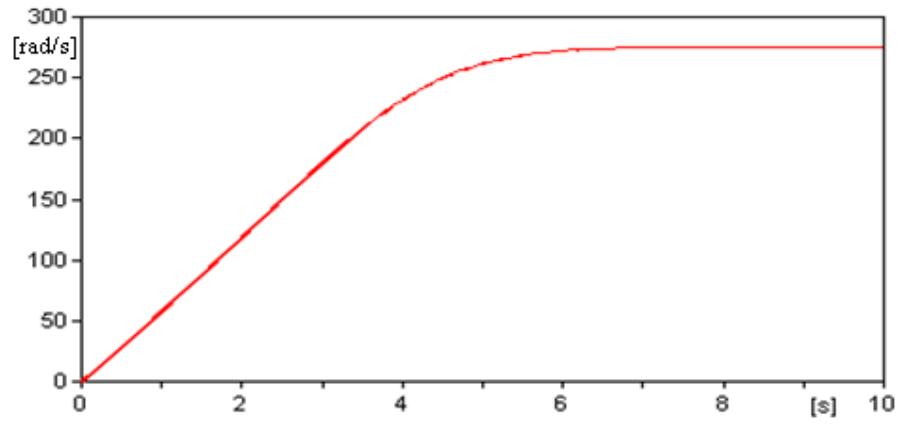


Figura 5.25 – Velocidade do motor em 45 Hz

A potência elétrica, em regime permanente, foi conferida em função do tempo e indicada na figura 5.26. A potência trifásica obtida simulação computacional é de 403,6 W enquanto a potência elétrica medida é de 555 W. A potência adicional existente no sistema mecânico é referente à alimentação do inversor de freqüência.

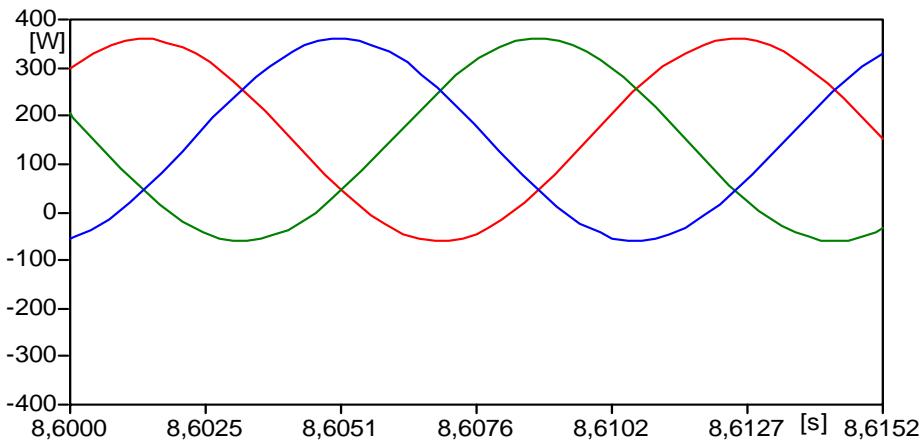


Figura 5.26 – Potência elétrica em 45 Hz

A figura 5.27 aponta a potência mecânica, obtida através do produto torque vezes velocidade angular 369,9 W é um valor bastante próximo dos 358,78 W apurados em laboratório, se for utilizado o mesmo processo matemático para se obter essa potência.

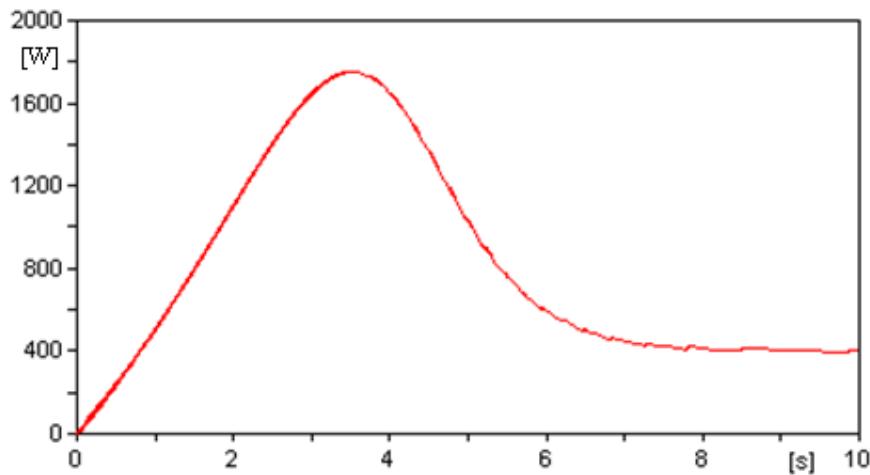


Figura 5.27 – Potência mecânica em 45 Hz

5.6) Validação do modelo computacional

Para validar o modelo computacional foram construídas as tabelas 5.13 a 5.16. A linha referente ao *erro%* compara os valores medidos com valores simulados, uma vez que a carga existente na estação de bombeamento do laboratório é menor que a capacidade nominal do motor. Os dados de placa foram utilizados quando o valor medido não estava

disponível. A potência mecânica (P_{mec}) foi obtida indiretamente, a partir da multiplicação entre a velocidade angular e o conjugado para o referido ponto.

Na tabela 5.13 são tratados valores com o motor em funcionamento a vazio, ou seja, sem carga mecânica acoplada ao seu eixo. O maior erro percentual, evidenciado na potência elétrica de entrada (P_{el}) são devidas às perdas não-joulicas. Para os outros valores é possível visualizar grande proximidade entre eles. O modelo se mostrou eficiente nesta situação.

Tabela 5.13 - Grandezas elétricas medidas e simuladas com o motor a vazio

	$n(\text{rpm})$	$I(\text{A})$	$P_{el}(\text{W})$
medido	3342,00	1,58	105,70
simulado	3343,21	1,59	80,51
erro%	0,04	1,13	-31,29

Na tabela 5.14 são apontados valores para o motor com o rotor bloqueado. Devido à elevada potência necessária neste acionamento, o erro percentual é pouco representativo, as perdas adicionais, entretanto aumentaram em valor absoluto. O modelo se mostrou eficiente, também, nesta situação.

Tabela 5.14 - Grandezas elétricas medidas e simuladas para o motor com rotor bloqueado

	$n(\text{rpm})$	$I(\text{A})$	$P_{el}(\text{W})$
medido	0,00	29,60	8500,00
simulado	0,00	28,48	8393,00
erro%	-	-3,93	-1,27

Na tabela 5.15 são tratados valores com o motor acionado a uma freqüência de 60Hz. O maior erro percentual, aqui, evidente na corrente e na potência elétrica de entrada (P_{el}) é devido a perdas que não foram modeladas, como citado anteriormente. Ainda assim, é possível visualizar grande proximidade entre os valores, em geral erros pequenos, quando comparam medições e simulações. O modelo se mostrou menos eficiente em situações transitórias, observáveis no conjugado máximo e na corrente de partida.

Tabela 5.15 - Grandezas elétricas e mecânicas, medidas, simuladas e de placa referentes a 60 Hz

	C	Cp	Cm	n	I	Pmec	Pel	Ip
medido	2,85	-	-	3342	3,7	997,4	1135	29,6
de placa	3,18	9,54	9,54	3370	4,27	1104	1404,6	32
simulado	2,89	9,56	11,9	3343,21	3,38	1007	1115	28,81
erro%	1,38	0,21	19,83	0,04	-9,47	0,95	-1,79	-2,74

Na tabela 5.16, onde estão indicadas grandezas elétricas e mecânicas, para um motor acionado em 45 Hz, os valores são coerentes. A corrente e a potência elétrica de entrada, na linha *medido*, se distanciam do valor na linha *simulado* por não contemplarem as perdas não-joulicas e a alimentação do inversor de freqüência existente no sistema real e, modelado no software como ideal.

Tabela 5.16 - Grandezas elétricas e mecânicas, medidas e simuladas referentes a 45 Hz

	C (45Hz)	n (45Hz)	I(45Hz)	Pmec(45Hz)	Pele(45Hz)
medido	1,33	2576,33	2,6	358,82	555
simulado	1,39	2575,4	2,14	374,4	411,4
erro%	4,32	-0,03	-21,50	4,16	-34,91

5.7) Considerações finais

O modelo proposto apresenta valores coerentes, é possível identificar as características do sistema real em seus valores simulados. A modelagem dos parâmetros da máquina e da carga mostrou-se confiável permitindo a analogia entre valores simulados, calculados e medidos. A precisão conseguida com os resultados recomenda a utilização do modelo proposto no ATPDraw para simular a bancada de bombeamento instalada no Laboratório de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Uberlândia.

Capítulo 6

Conclusão

Esta dissertação apresentou de forma detalhada, a especificação e as possibilidades de análise oferecidas pelo Laboratório de Sistemas Motrizes da Universidade Federal de Uberlândia proporcionado pelo convênio ELETROBRÁS/PROCEL/UFU, no que tange ao uso de sistemas de bombeamento. Diversas condições operativas de cargas na bomba centrífuga foram estudadas demonstrando os fenômenos eletromecânicos e hidráulicos pertinentes a este sistema.

- No capítulo 2 foram apontados aspectos importantes sobre motores, acoplamentos, bombas, variados tipos de acionamentos, entre outros. Chegou-se a conclusão, que qualquer medida de eficientização energética em uma parte isolada do sistema, pode ou não causar impacto sobre as demais partes. Uma criteriosa avaliação da ação a ser tomada é o único modo de saber se a medida é ou não produtiva, e se, é ou não viável financeiramente.
- O capítulo 3, também trouxe importante colaboração, dentre as quais pode-se citar o estudo teórico na busca de obter:
 - Levantamento da curva característica da bomba, ou seja, conjugado no eixo em função de sua rotação;
 - Levantamento da curva característica dos motores (convencional e alto-rendimento), ou seja, conjugado no eixo em função de sua rotação;
 - Estudo da eficiência energética dos motores sob diferentes condições de carga;

- Estudo da eficiência energética através da comparação dos motores da linha padrão e alto-rendimento;
 - Estudo da eficiência energética dos motores em função da variação da vazão da bomba (estrangulamento da válvula);
 - Estudo de eficiência energética dos motores em função da utilização de inversores de freqüência, através da variação de velocidade do conjunto motor-bomba;
 - Comparação entre as grandezas elétricas e mecânicas considerando as partidas direta, suave e inversor de freqüência.
 - Levantamento das curvas de todos os parâmetros elétricos e mecânicos monitorados em função do tempo de funcionamento do conjunto motor-bomba.
- No capítulo 4, o estudo do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ apontou importantes aspectos sobre os parâmetros elétricos, hidráulicos e mecânicos, tais como:
- Para a utilização do estrangulamento de válvula, encontrou-se uma economia de energia de 10% quando da substituição do motor convencional pelo de alto rendimento;
 - Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, a economia de energia elétrica, para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ foi de 78% quando o motor utilizado foi o de alto-rendimento;
 - Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, a economia de energia elétrica, para uma vazão de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ foi de 75% quando o motor utilizado foi o convencional;
 - Na utilização do controle de vazão pelo inversor de freqüência, em todos os casos estudados, a economia de energia elétrica foi acentuadamente reduzida, tanto para o motor convencional, quanto o de alto-rendimento;
 - Os estudos mostraram que, com a utilização dos conversores de freqüência, a economia de energia elétrica é mais acentuada à medida que a vazão do sistema se distancia de seu valor nominal;

- Os estudos mostraram que a lei de afinidade pode ser utilizada na obtenção das curvas características para outras velocidades, a partir da curva original;
- Identificou-se uma possibilidade de estimar o momento de inércia das cargas mecânicas em plantas industriais em funcionamento.
- Para o capítulo 5, foi demonstrada a modelagem no domínio do tempo, na plataforma ATPDraw, do sistema de bombeamento. Os estudos e análises, mostraram que a eficácia da simulação foi suficiente para validação do modelo proposto, uma vez que os resultados computacionais obtidos se aproximaram daqueles oriundos dos ensaios experimentais.

Finalmente, deve-se destacar que, soluções foram propostas e verificadas, como também, simuladas. Seus resultados são importantes. Porém a avaliação econômico-financeira é tão importante quanto o estudo técnico, de prováveis soluções a se implantar, na busca melhorias, com a intenção de reduzir o consumo de energia elétrica.

6.1) Trabalhos futuros

O desenvolvimento apresentado nesta dissertação levou em conta vários aspectos que envolvem o funcionamento de sistemas de bombeamento. Porém, trata-se de assunto de grande abrangência e, como tal, extrapola os limites de uma dissertação apenas. Muitos aspectos foram abordados e outros ficarão para novos empreendimentos, dentre os itens não estudados e que são de grande valia para o conhecimento desse tipo de sistema pode-se citar:

- 1) O comportamento térmico de sistemas de bombeamento, envolvendo tanto os motores quanto a bomba centrífuga;
- 2) A eficiência energética em sistemas de bombeamento vista sob o enfoque da qualidade de energia;
- 3) A avaliação de perdas provocadas por vibrações no sistema;
- 4) A modelagem computacional, contemplando uma maior gama de perdas internas do motor, que leve em consideração, também, a saturação magnética.

Referências Bibliográficas

- [1] Disponível em: www.eletrobras.com/elb/procel, acesso 10/2007
- [2] MÁXIMA EFICIÊNCIA: *Informativo do Programa Energia Inteligente da CEMIG* No. 3 – 2005
- [3] GELLER, Howard S. *Revolução energética: políticas para um futuro sustentável*. Trad. Maria Vidal Barbosa. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.
- [4] GELLER, H., S. McGaraghan. *Successful government – industry partnership: the U.S. Department of energy's Role in advancing energy – efficient technologies*. Energy Policy, 1998.
- [5] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Ano base 2005. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2006.
- [6] Disponível em: www.cemig.com.br, acesso em 12/07/2007.
- [7] Disponível em: www.envolverde.ig.com.br, acesso em 19/3/2007.
- [8] Jornal de Brasília em 20/02/2007
- [9] WEG – Transformando energia em soluções. *Módulo I comando e proteção*. (apostila)
- [10] PEREIRA, L. A.. *Aplicação de Materiais Sinterizados em Máquinas Elétricas*. Trabalho de Publicação Interna. Depto. Eng. Elétrica. PUCRS. 2000
- [11] FACCO, José Henrique. *Ações de Conservação de Energia Aplicadas a uma Planta Industrial Composta de Motores de Indução*. Diss. de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, fevereiro de 2006.
- [12] *Módulo Metodologia de Realização de diagnóstico energético*. Apostila ELETROBRÁS/PROCEL. s/d.
- [13] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, Charles Jr., UMANS, Stephen D. *MÁQUINAS ELÉTRICAS – Com introdução à eletrônica de potência*. Trad. Anatólio Laschuk. Porto Alegre: Bookman, 2006. 6 ed. 648 p.
- [14] ABNT NBR – 7094. Ano 2000.
- [15] PÁEZ. Gustavo. *Dossiê técnico: Dimensionamento de motores elétricos*. Rede de tecnologia da Bahia – RETEC/BA, 2007.
- [16] ROSA, Alex da. *Simulação de um soft-starter para acionamento de motores de indução*. Diss. de Mestrado. Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2003.
- [17] GARCIA, Agenor Gomes Pinto. *Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria*. Diss. de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2003.

- [18] *Módulo Motor elétrico.* Apostila ELETROBRÁS/PROCEL. s/d.
- [19] BD motor. Banco de dados do software. Versão 4.2. 03/2007.
- [20] BRITO, J. N. LAMIM FILHO, P. C. M. PEDERIVA, R. *Detecção de falhas em motores elétricos através da análise de corrente e análise de fluxo magnético.* IN: X Seminário Brasileiro de manutenção preditiva e inspeção de equipamentos. s/d.
- [21] BORTONI, Edson C., HADDAD, Jamil., SANTOS, Afonso H.N. NOGUEIRA, Luiz A.H., MELONI, Paulo S.R., VASCONCELOS, Eduardo., MARTINS, André Ramon S., AZEVEDO, Erick M. *análise do reparo de motores de indução trifásico.* XV SNPTEE – Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. 1999, PR.
- [22] QUISPE, Henrique C., PEÑALBA, Luis Fernando Mantilla. *Motores eléctricos de alta eficiência: características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad.* Apostila da Universidad nacional de Ingeniería de Lima – Perú. s/d.
- [23] Disponível em www.sbrt.ibict.br, acesso em 04/2007.
- [24] NOGUEIRA, Fábio José Horta. *Módulo: Acoplamento motor carga.* ELETROBRÁS/PROCEL. s/d.
- [25] Disponível em: www.aeportugal.pt, acesso em 07/07.
- [26] MELO, Carlos Rogério., YANAGI, Jr. Tadayuki. *Escolha de bombas centrífugas.* Apostila. Universidade Federal de Lavras – UFL. s/d.
- [27] MATTOS, Edson Ezequiel de., FALCO, Reinaldo de. *Bombas Industriais.* – 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
- [28] *Módulo: Bombas Centrífugas.* ELETROBRÁS/PROCEL. s/d.
- [29] Disponível em: www.feg.unesp.br/~caec/quarto/hg_turbobombas.doc, acesso 07/2007.
- [30] MOREIRA, Helói José Fernandes. et all. *Guia operacional de motores elétricos: versão 2000.* ELETROBRÁS. Rio de Janeiro.
- [31] AMERICO, Marcio. *Acionamento Eletrônico: guia avançado.* ELETROBRÁS/PROCEL. Rio de Janeiro, dezembro/2004.
- [32] RODRIGUES, Wlamir; LUVISOTTO JR, Edevar. *Inversor de freqüência em sistemas de bombeamento - Relatório técnico,* s/d.
- [33] MONACHESI, Marcelo Gaio. *Eficiência energética em sistemas de bombeamento.* Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2005.
- [34] PEREIRA, Luís Alberto. *Análise econômica da aplicação de motores de alto rendimento.* Apostila técnica. PUC- RS.

- [35] CEMIG. *Como estruturar um programa de gestão energética média tensão.* Manual técnico. Elaboração: EFICIENTIA S.A., Leonardo Resende Rivetti Rocha.
- [36] MONACHESI, Marcelo Gaio., MONTEIRO, Marco A. G., ROCHA, Carlos Roberto. *Eficiência energética em sistemas de bombeamento.* Manual Prático. ELETROBRÁS/PROCEL, s/d.
- [37] SCHNEIDER MOTOBOMBAS. *Bombas Hidráulicas.* Manual técnico, s/d.
- [38] SCHNEIDER MOTOBOMBAS. *Bombas centrífugas série BC-92SH.* Catálogo. s/d.
- [39] CONTECH. *Chave de nível tipo bóia magnética.* Catálogo.
- [40] YOKOGAWA. *Model EJA 110 A. General Especifications.* Catálogo.
- [41] SMC *ELETROVÁLVULAS.* Catálogo.
- [42] SMAR. *LD301. Manual de Instruções operação e manutenção,* versão 6, 2005.
- [43] FOX WALL *Série C51.* Catálogo
- [44] TELEMECANIQUE. *TeSys U communitation variables – user manual,* 2006.
- [45] SCHNEIDER ELECTRIC. *Altistart 48 Telemecanique.* – user's manual. s/d.
- [46] TELEMECANIQUE. *Altivar 31 - user's manual.* s/d.
- [47] MELIN GERIN. *Power meter series 850 – Technical data sheet,* 2004.
- [48] TELEMECANIQUE. *Modicon Premium PLCs TX57/PCX57, Safety and Discrete Interfaces Installation manual, Volume 2 – 2006.*
- [49] FERREIRA, Wendell Alves. *Modelagens e simulações de motores de indução trifásicos no programa ATP.* Iniciação Científica. PROCEL/ELETRBRÁS, 2007.
- [50] TAVARES, Maria Cristina Dias., CAMPOS, Paulo Guidetti., PRADO, Paulo. *Guia resumido do ATP – Alternative Transient Program.* Apostila. Universidade Estadual de Capinas, 2003.
- [51] AMON FILHO, Jorge., PEREIRA, Marco Pólo. *Novos desenvolvimentos dos programas ATP/EMTP E ATPDRAW.* Furnas Centrais Elétricas S.A. Divulgação interna. s/d.
- [52] WEG. *Motores trifásicos IP 55 Alto Rendimento Plus.* Catálogo. [s.l.]: [s/d].
- [53] MACHADO CAD, Marcelo. *Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico.* São Carlos: 2000. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP.
- [54] Rule Book ATPdraw.
- [55] SIMÃO, Eduardo Borges., ALMEIDA NETO, Manuel Ferreira de. *Rendimento do conjunto inversor/motor de indução sob diferentes condições de carga.* TCC. Universidade Federal de Goiás – UFG, 2002.

- [56] TAN, Owen T., GERARDUS, C. Paap., KOLLURU, Mahadev. *Thyristor – controlled voltage regulators for critical induction motor loads voltage disturbances*. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 8 no. 1, março de 1993.
- [57] O'CONNELL, Robert M. *ATP-EMTP study off adjustable speed drive DC link properties during voltage sags*. 0-7803-9156-X/05/\$20.00© 2005, IEEE.
- [58] SCHNEIDER ELECTRIC. *Workshop: Instalações elétricas de baixa tensão – eficiência energética e acionamento de motores*. s/d.
- [59] SCHAEFFER, Roberto D.Sc. (coord.) *Avaliação dos índices de eficiência energética para motores de indução trifásico*. Relatório técnico final. PPE/COPPE/UFRJ, 2005.

ANEXO

Artigo “ESPECIFICAÇÃO PARA UM LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA INDUSTRIAL” apresentado no II CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Vitória – Espírito Santo, 2007

ESPECIFICAÇÃO PARA UM LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA INDUSTRIAL

***Sergio Ferreira de Paula Silva, Antonio Carlos Delaiba, Décio Bispo,
Renato Alves Pereira, Ronaldo Guimarães, Alexandre Borges Zappelini
Carlos Aparecido Ferreira

**Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia –
UFU*

*Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica – Uberlândia – MG
CEP- 38400-902
**Eletrobrás*

Abstract: This paper has for objective the specification of an industrial efficiency's laboratory. This specification details components involving four groups of benches, which are: centrifugal pumps, compressors, fans and conveyor's belt. Each one of loads was specified in independent group of benches, with a system of composed drive for automation systems, controlled and integrated measurements. A composed drive for two motors (standard or high-efficiency) and three ways of departure (direct, variable frequency drives and soft start) that connected to the load allow to the visualization of the control forms and equipment operation, on the approach of the industrial efficiency. Copyright © 2007 CBEE/ABEE

Keywords: Specification, Laboratory, Industrial Efficiency, Motor Systems, Tree-phase Induction Motors.

Resumo: Este artigo tem por objetivo a especificação de um laboratório de eficiência industrial . Esta especificação detalha os componentes envolvendo quatro bancadas, quais sejam: bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras. Cada uma das cargas foi especificada em bancada independente, contendo um sistema de acionamento composto por sistemas de automação, controle e medições integrados. Um acionamento composto por dois motores (standard ou alto-rendimento) e três modos de partida (direta, inversor de frequencia e soft start) que acoplados à carga, permitem a visualização das formas de controle e operação de equipamentos, sobre o enfoque da eficiencia industrial.

Palavras Chaves: Especificação, Laboratório, Eficiência Industrial, Sistemas Motrizes, Motores de Indução Trifásico.

1 INTRODUÇÃO

Os problemas ocorridos nos anos 90, no setor elétrico brasileiro, demonstraram que a energia elétrica é um insumo valioso e, como tal, deve ser usado de maneira racional. A necessidade de metodologias e estudos que visem à eficiência energética foi demonstrada de forma cabal pela crise de abastecimento que assolou o país no ano de 2001.

O uso eficiente de energia, que pode ser entendida como a utilização da menor quantidade possível de energia para realizar um trabalho sem que se perca qualidade e segurança na realização, tem como campo de atuação os mais diversos ramos de atividade da sociedade. Utilizar a energia com responsabilidade, sem desperdício, constitui um novo parâmetro a ser considerado no exercício da cidadania. (ELETROBRÁS/PROCEL/EFEI, 2001).

Segundo o Gerente de Utilização de Energia da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG ações que objetivem o uso racional e eficiente de energia correspondem a construção de uma usina virtual de energia (Máxima Eficiência, 2005). Embasando tal opinião, Howard Steven Geller relata: a economia de energia elétrica, em 1998, permitiu que as concessionárias brasileiras evitassem implementar aproximadamente 1560 MW de nova capacidade geradora, o que significou cerca de 3,1 bilhões de investimentos evitados. (Geller 2003). Ainda segundo o mesmo autor, ao se comparar os custos com a energia economizada e os custos para a geração da mesma quantidade houve um coeficiente de custo - benefício global de aproximadamente 12:1 (Geller 1998).

O setor industrial, segundo o Balanço Energético Nacional – BEN de 2005, consumiu 203,48 TWh o correspondente a 47,9% de toda a eletricidade consumida no país. No que se refere ao cenário industrial, a CEMIG nos informa, em seu site que: no Brasil, os Motores elétricos de indução são responsáveis por cerca de 50% das cargas elétricas industriais, chegando a 70% em determinadas regiões.

Dentro deste contexto, a Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Minas Gerais, em parceria com ELETROBRÁS/PROCEL, idealizou um laboratório que, de forma prática e inteligente, permite o estudo das principais cargas motrizes utilizadas no setor industrial. Com vasta e reconhecida atuação nos campos qualidade da energia elétrica e máquinas elétricas, essa universidade reconheceu a necessidade de, também, se avançar no campo da utilização da energia elétrica de forma racional. Os detalhes desse laboratório são apresentados na sequencia deste trabalho.

2 DESCRIÇÃO GERAL DAS BANCADAS

O Laboratório de Sistemas Motrizes é composto por quatro bancadas, sendo que cada uma corresponde a um diferente tipo de carga comumente utilizado em processos industriais. Assim procedendo, as cargas correspondentes à bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras, formam as bancadas mencionadas.

Cada uma das cargas foi instalada em bancada de ensaios independente das demais, formando um sistema de acionamento completo, composto por proteção e medição; sistemas de automação e medição integrados, capazes de controlar automaticamente a execução, a coleta de dados e emissão de relatórios. O acionamento é composto por dois motores e três modos de partida distintos, permitindo a visualização de diversas formas de controle e operação de equipamentos industriais similares e de maior porte.

Cada bancada é composta por duas mesas e um painel, sendo que a primeira mesa contém o micro-computador, a segunda os motores e o módulo de carga e o painel acondiciona os sistemas de comando, medição e acionamento. Na sequência são apresentadas as características/ funcionalidades mínimas para estas bancadas:

- A primeira bancada possui dimensões apropriadas para a instalação de um micro-computador (CPU, monitor, teclado, *no-break* e mouse) e um multifuncional.
- Na segunda bancada foram instalados os motores (de alto rendimento e convencional), e o módulo de carga. Vale ressaltar, que o módulo de carga permiti uma variação controlada via sistema supervisório, entre 0 e 120% da carga nominal do motor elétrico.
- No painel de acionamento e comando estão instalados o inversor de frequência, o soft-start, o controlador lógico programável (CLP) e os elementos de acionamento e proteção como contatores e disjuntores. Adicionalmente, esta bancada também é responsável pela medição dos parâmetros elétricos de entrada dos motores.
- A fixação dos motores na mesa possibilita que os mesmos sejam trocados de posição, ou seja, a carga poderá ser acoplada tanto ao motor de alto rendimento quanto ao convencional.
- O sistema de medição dos parâmetros elétricos, de entrada dos motores, é constituído por um multimedidor de grandezas elétricas, contemplando

valores de tensão fase-fase e fase-neutro; corrente; potências ativa, reativa, aparente e fator de potência trifásicas e monofásicas; frequência e energia ativa e reativa. A comunicação deste instrumento com o elemento de controle (CLP) é realizada via ModBus, sendo que todos os parâmetros mencionados são mostrados e monitorados (histórico, curva no tempo, etc.) no supervisório em tela própria. O multimedidor possui, ainda, funções de osciloscopia e medição de harmônicos até a 50ª ordem de tensão e corrente, sendo que todos estes valores podem ser visualizados em tempo real ou armazenados.

- O tipo de acionamento dos motores (alto rendimento ou convencional) é executado através do supervisório. Assim sendo, o usuário ao escolher o acionamento desejável (partida direta, partida suave ou inversor), o controlador programável aciona os respectivos contadores, sendo que os demais sistemas ficam desconectados.
- Os transmissores de torque e rotação foram instalados de forma a evitar a locomoção dos mesmos quando da troca dos motores.
- Cada motor (convencional e de alto rendimento) possui sensores de temperatura do tipo PT100, instalados na carcaça e em cada enrolamento do estator, permitindo a monitoração deste parâmetro via supervisório.
- Sinais de tensão e corrente (valor de tensão correspondente) estão disponíveis tanto na entrada quanto na saída dos acionamentos, permitindo sua verificação em osciloscópios.

2.1 Descrição Geral do Sistema de Controle e Acionamento

A figura 1 representa o esquema unifilar simplificado de comando considerando partida direta, soft-starter e inversor de freqüência. Contempla também as comunicações em rede via Ethernet (entre PC e o CLP) e Modbus (entre CLP e os dispositivos de partida e medição), juntamente com as entradas analógicas e digitais.

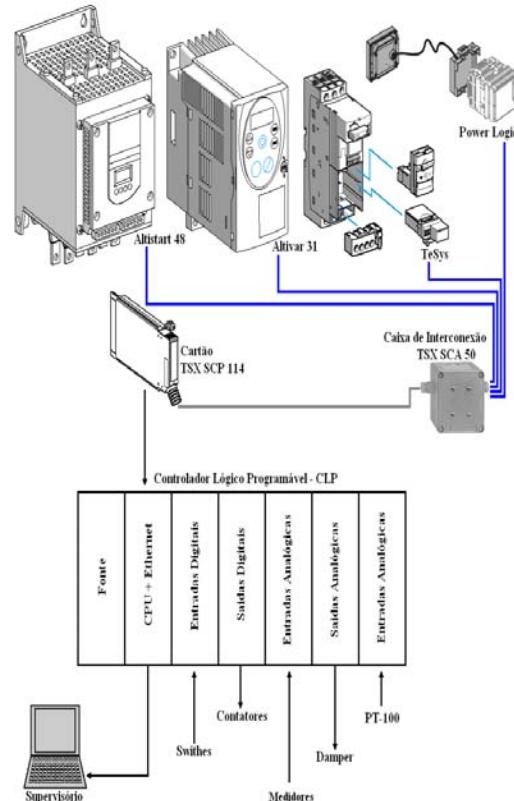


Figura 1 – Esquema unifilar do sistema de comando

- O acionamento via inversor de freqüência e partida suave utiliza dois contadores cada (jusante e montante), inter-travados, sendo acionados pelo controlador programável de acordo com a escolha do tipo de acionamento na tela do supervisório.
- Os controladores programáveis são conectados a um switch configurando uma rede de comunicação em padrão Ethernet.

A seguir estão especificados os elementos (equipamentos e serviços) mínimos constituintes para todas as bancadas do Laboratório de Sistemas Motrizes

Medidor de energia multifunção: trifásico; tensão (fase-fase ou fase-neutro); corrente; frequência; potência ativa, reativa e aparente (por fase e total); fator de potência (por fase e total); THD% de tensão e corrente; demanda; energia ativa; energia reativa indutiva e capacitativa; medição True RMS; exatidão básica 0,5%; comunicação RS-485 e RS232; protocolo modbus RTU; osciloscopia, harmônicos até a 50ª ordem.

Inversor de Frequência: trifásico; para motor de 1,5 cv; 220 V; 60 Hz; controle escalar e vetorial; comunicação via rede Modbus, cabos de comunicação, entrada para encoder; controle PID;

entrada 0-10 V analógica para controle de velocidade.

Dispositivo de partida suave (Soft Start): trifásico; 220 V; para motor de 1,5 cv; comunicação via rede Modbus; cabos de comunicação; entradas e saídas digitais; módulo de economia de energia.

Transmissor de Velocidade: medição de velocidade e ângulo de rotação (360 pulsos por giro) pulso compatível com o controlador programável utilizado. Também pode ser utilizado transmissor analógico com saída 0-10 VDC ou 4 a 20 mA.

Controlador Programável: 16 entradas digitais + 16 saídas digitais + 8 entradas analógicas + 8 saídas analógicas; Placa Ethernet; Placa Modbus; fonte de alimentação; cabos de conexão e programação; software de programação e comunicação (programação em até 3 diferentes linguagens, sendo obrigatório a presença do Ladder). Placa contendo entrada para 4 sensores de temperatura do tipo PT 100. Entrada de pulsos para o sinal de rotação e ângulo. Licença do software de configuração e comunicação. Para a bancada da bomba centrífuga, o CP deverá possuir entradas compatíveis com os sinais disponibilizados pelo transdutor de torque.

Motor elétrico: 1,5 cv; indução, trifásico; 220/380 V; 2 pólos; 60 Hz; IP 21; convencional (*standard*), com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.

Motor elétrico: 1,5 cv; indução, trifásico. 220/380 V; 2 pólos; 60 Hz; IP 21; alto rendimento, com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.

2.2 Descrição Geral do Sistema Supervisório

O sistema supervisório do laboratório é utilizado comercialmente pelos sistemas industriais. Ele foi configurado para realizar o controle de todo o processo apresentando uma capacidade de monitoramento em tempo real através da rede de dados Modbus Ethernet.

Ao acessar o sistema, será apresentada a tela indicada pela figura 2, na qual o operador define qual o tipo de bancada a ser acionada. Deve-se salientar que, cada bancada é acionada individualmente, no entanto o sistema supervisório permite um acompanhamento da operação das demais estações de trabalho.

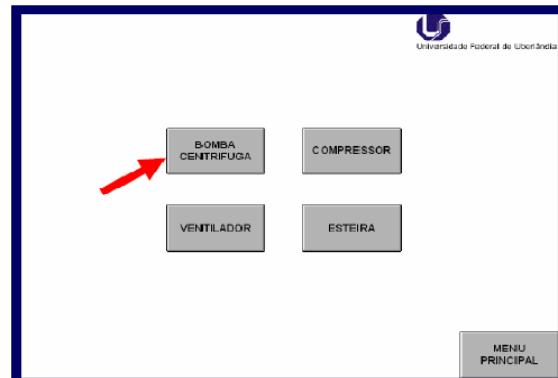


Figura 2 – Tela inicial do sistema supervisório

O supervisório contém uma tela principal para cada bancada, conforme o desenho esquemático representado pela Figura 3. Desta forma, cada elemento constituinte da bancada (multimedidor, acionamento, carga, etc) contém um atalho para abertura das telas de monitoração, ou seja: comando, temperatura, gráficos, medições e banco de dados. Adicionalmente a Figura 3 também fornece informações específicas de cada bancada como, por exemplo, torque, velocidade, pressão, vazão, etc.

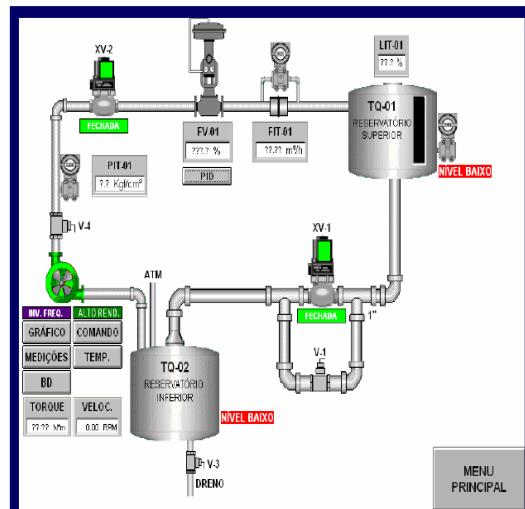


Figura 3 – Bancada da Bomba Centrífuga

Na figura 4 está representada a tela de comandos, nela tem-se acesso aos sistemas de partida direta, suave e por inversor de frequência. Esta têm seus parâmetros determinados pelo supervisório, desta forma, o tempo de rampa de subida e descida, a velocidade e demais parâmetros referentes às características operacionais das máquinas deverão ser configurados através de tela específica no supervisório de cada bancada.

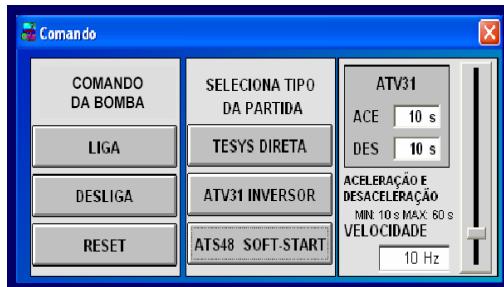


Figura 4 – Tela de Comando

Além das informações apresentadas diretamente na tela (medidas), o sistema também oferece dados numéricos via banco de dados. Complementando ainda, é possível a construção de gráficos de parâmetros do sistema em função do tempo.

Licença de Supervisório: para controle de todo o processo, com capacidade de monitoramento em tempo real; através de rede de dados Modbus Ethernet; interface gráfica em tempo real; publicação em tempo real de telas gráficas dinâmicas; publicação em Internet; ambiente orientado a objeto; ferramenta de elaboração de relatórios; suporte a OPC; armazenamento de dados para histórico; editor de telas; 100 pontos

2.3 Especificação das Bancadas

Adicionalmente ao detalhamento presente no tópico anterior, cada bancada possui diferentes cargas, com sensoriamento e peculiaridades distintas. Assim sendo, faz-se necessário uma complementação tanto ao nível de equipamentos/instrumentos quanto às funcionalidades inerentes a cada processo analisado. Desta forma, na sequência são apresentadas estas características típicas de cada bancada.

2.3.1 Bomba Centrífuga

Conforme mencionado, o presente item retrata as características/funcionalidades mínimas específicas para esta bancada:

- Além da bomba centrífuga, esta bancada é composta por um dinamômetro e este foi instalado no eixo do motor convencional.
- O acoplamento entre o motor de alto rendimento e a bomba é direto, assim como o acoplamento entre o motor convencional e o dinamômetro.
- O dinamômetro também é controlado pelo supervisório. Desta forma, novamente em tela própria, o usuário pode determinar a carga desejável em valores percentuais da potência nominal do motor (1,5 cv), sendo que esta variação deve ser de 0 a 120%.
- O módulo de carga é composto de dois reservatórios com capacidade de 100 litros cada, de

material transparente, sendo que o primeiro foi instalado na parte inferior da bancada e o segundo a uma altura de 2 metros. Entre os reservatórios foi instalado um duto de escoamento com uma válvula elétrica de retenção. Na saída da bomba centrífuga estão presentes uma válvula de retenção, uma válvula elétrica proporcional de estrangulamento e os transmissores analógicos de pressão e vazão. No reservatório superior instalou-se um transmissor de nível. Todos os sensores mencionados têm seus indicativos monitorados (histórico, curvas e valores instantâneos) e mostrados no supervisório da bancada.

O diagrama orientativo mostrado pela Figura 5 permite uma melhor visualização das características desejadas. Vale ressaltar que o diagrama abaixo não apresenta todos os instrumentos utilizados.

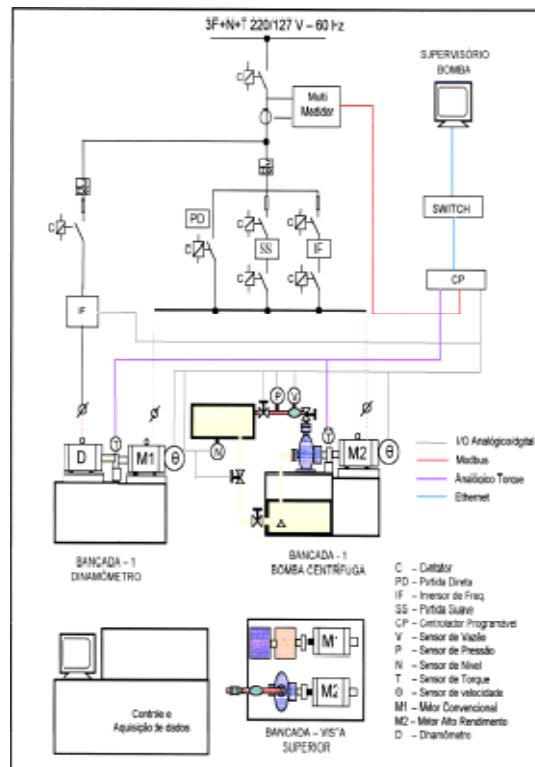


Figura 5 – Diagrama orientativo da bancada da bomba centrífuga

A lista a seguir apresenta os elementos adicionais presentes na bancada da bomba centrífuga.

Dinamômetro: CA 2 cv, 220 V, acionado por inversor regenerativo, com controle da carga via supervisório através de sinais de 0-10 V ou 4-20 mA.

Bomba centrífuga: compatível com motor de 1,5 cv, vazão mínima de 1 m³/h.

Transmissor de torque: 0-10 N.m: saída -10 a 10 V; classe de precisão 0.2; transmissão do sinal sem

contato; para medição de torque em máquinas rotativas; medição de velocidade e ângulo de rotação incorporado (360 pulsos por giro) pulso compatível com o contro-lador programável utilizado; sobrecarga 200%; torque de quebra 280%.

2.3.2 Ventilador

Da mesma forma que para a bomba centrífuga, o presente item retrata a característica/funcionalidade mínima para a bancada do ventilador:

- O módulo de carga é composto por um damper elétrico, permitindo o controle da vazão de ar via supervisório. Um transmissor de vazão de ar instalado no ventilador permite a verificação deste parâmetro e a atuação do damper visando diminuir, aumentar ou mesmo bloquear este fluxo, sendo todas estas ações visualizadas e acionadas via supervisório.

O diagrama orientativo, figura 6, permite uma melhor visualização das características desejadas.

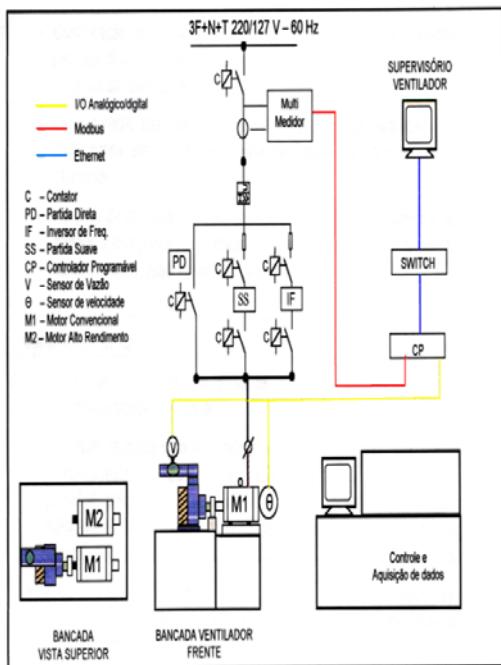


Figura 6 – Diagrama orientativo da bancada do ventilador

A seguir, são apresentados os elementos adicionais presentes na bancada do ventilador:

Ventilador: centrífugo; compatível com motor de 1,5 cv.

Damper elétrico: compatível com o ventilador, variação de 0 a 100%, com indicação da posição atual na tela do supervisório.

Transmissor de Vazão e Velocidade do ar: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 V DC; compatível com o ventilador.

2.2.3 Compressor de ar

Da mesma forma, o presente item retrata as características/funcionalidades mínimas específicas para o compressor de ar:

- O módulo de carga é composto por um compressor com um reservatório de ar comprimido, regulado por uma válvula elétrica de saída de ar (alívio de pressão), permitindo o controle da pressão do reservatório via supervisório. Adicionalmente, o tanque também contém uma válvula de segurança especificada de acordo com as condições de suportabilidade do reservatório.
- A tubulação permite a simulação de perda de carga através de furos de diferentes diâmetros (5 furos). A localização destes furos possibilita a medição das perdas.

A figura 7 ilustra o diagrama orientativo da bancada do compressor.

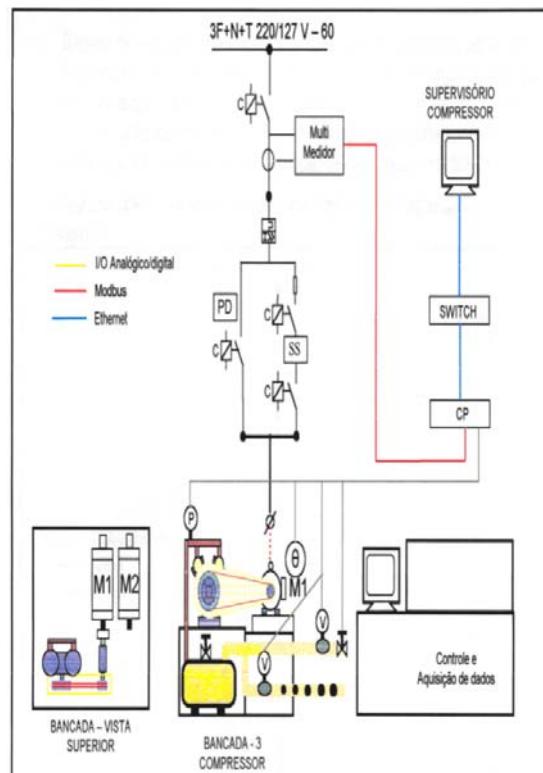


Figura 7 – Diagrama orientativo da bancada do compressor

A configuração mínima da bancada do compressor vem a seguir:

Compressor de ar: a pistão; compatível com motor de 1,5 cv.

Reservatório de ar comprimido: compatível com a pressão máxima do compressor, com pressostato de segurança.

Transmissor de Vazão: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 VDC; compatível com as tubulações do compressor.

Transmissor de Pressão: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 VDC; compatível com a suportabilidade do reservatório

Válvula elétrica proporcional de saída de ar: 24 V DC; compatível com a suportabilidade do reservatório, com regulagem pelo supervisório, 0 a 10 V ou 4 a 20 mA.

Válvula de segurança de saída de ar: compatível com a suportabilidade do reservatório

Vale ressaltar que para a bancada do compressor somente foi utilizado o acionamento direto e o soft start, não sendo utilizado o inversor de frequência.

2.3.4 Correia Transportadora

Finalmente, na sequência são apresentadas as características/funcionalidades mínimas específicas para a bancada da correia transportadora:

O diagrama orientativo ilustrado pela figura 8 permite uma melhor visualização das características desejadas.

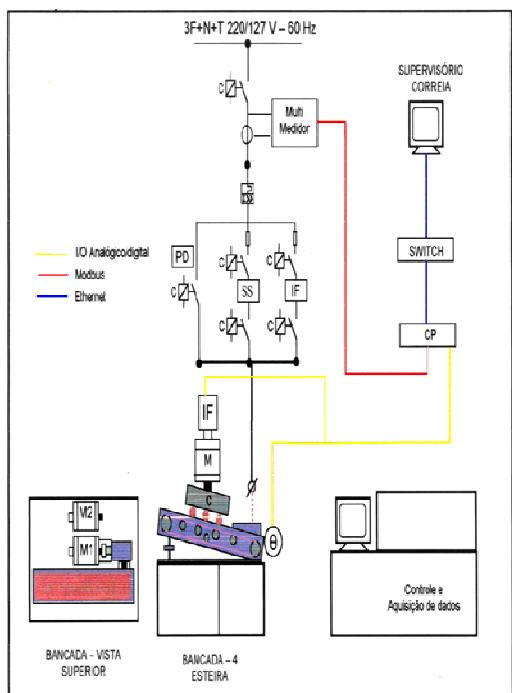


Figura 8 – Diagrama orientativo da bancada da esteira

- O módulo de carga é composto por uma correia transportadora com possibilidade de ajuste de angulação para até 30 graus.

- Sistema de deslocamento linear acionado por um servomotor ou por inversor de frequência e motor, é responsável pela simulação de carga sobre a correia transportadora. Como opção ao sistema de deslocamento linear, pode ser utilizado outro sistema de simulação de carga sobre a correia, desde que este sistema permita a simulação e a repetição de diferentes condições de carga.

A seguir estão os complementos para configuração mínima da bancada da correia transportadora.

Esteira transportadora: comprimento e largura adequados à utilização do sistema de deslocamento linear, inclinação de até 30 graus.

Transmissor de Velocidade da esteira: saída 4 a 20 mA ou 0 a 10 VDC; linear; precisão < 0,5%; 24 V DC; compatível com a velocidade máxima da esteira.

Servomotor: responsável pelo sistema de deslocamento linear. Pode ser substituído por um conjunto inversor/motor. Deve permitir a simulação de carga para até 120% da potência do motor de acionamento da correia, sendo esta simulação controlada pelo supervisório através de entradas analógicas.

Módulo de Carga: responsável pela simulação da carga, exercendo pressão sobre a correia, de acordo com condições de carga da correia estabelecidas via supervisório

Célula de Carga: para medição da pressão exercida sobre a esteira, com saída 4 a 20 mA ou 0-10 VDC com indicação dos valores medidos no sistema supervisório.

3 ENSAIOS E ESTUDOS

As bancadas permitem os seguintes ensaios/estudos:

- Levantamento das curvas características das cargas, ou seja, conjugado no eixo em função de sua rotação;
- Levantamento das curvas características dos motores (convencional e alto rendimento), ou seja, conjugado no eixo em função de sua rotação;
- Estudo da eficiência energética dos motores para variações de carga entre 0 a 120%;
- Estudo da eficiência energética dos motores em função da variação da vazão da bomba (estrangulamento da válvula), variação da vazão de ar (abertura do damper) no ventilador e variação da pressão do reservatório, no compressor, assim

como da variação de carga na correia transportadora;

- Estudo de eficiência energética dos motores em função da utilização de inversores de frequência, atra-vés da variação de velocidade do conjunto motor-carga;
- Comparação entre as grandezas elétricas e mecânicas considerando as partidas direta, suave (soft start) e in-versor de frequência;
- Levantamento das características elétricas e mecânicas monitoradas em função do tempo de funcionamento do conjunto motor-carga;
- No caso de utilização de acoplamento por polia, deverá permitir a análise da eficiência energética considerando diferentes ajustes no acoplamento entre o motor e a carga (ajustes, rendimento e tipo da polia).

3.1 Exemplo de aplicação

Como exemplo de aplicação, foram feitos ensaios na bancada da bomba centrífuga para cinco valores diferentes de vazão. Para obtenção destas vazões usou-se apenas o método de estrangulamento de válvula e posteriormente foram coletados os valores indicados nas tabelas 1 e 2. O objetivo foi avaliar o consumo de energia apenas pela comparação entre o uso do motor da linha padrão e da linha alto-rendimento.

Tabela 1 - Motor linha padrão (bomba)

Q (m ³ /h)	H (kgf/cm ²)	N (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)
1	2.9	3500	4.3	220.7	1011
1.5	2.8	3480	4.4	219.7	1059
2	2.6	3410	4.6	219.9	1136
2.5	2.5	3470	4.9	219.3	1154
3	2.3	3500	5.3	220.3	1248

Tabela 2 - Motor alto-rendimento (bomba)

Q (m ³ /h)	H (kgf/cm ²)	N (rpm)	I (A)	V (V)	P (W)
1	2.9	3416	3.7	221.23	856
1.5	2.9	3460	3.9	221.2	900
2	2.8	3417	4	221.23	946
2.5	2.8	3460	4.2	221.1	983
3	2.7	3450	4.4	221.2	1028

Na tabela 3 foi feita a comparação entre um sistema de bombeamento utilizando ambos os motores. Para um ano de utilização o estudo aponta para uma economia média de 15%.

Tabela 3 - Economia de energia

	Vazão (m ³ /h)	horas/ ano	Potência (W)	Energia (kWh)	Econ. (%)
AR	1	8640	856	7395,84	15,33
LP	1	8640	1011	8735,04	
AR	1.5	8640	900	7776	15,01
LP	1.5	8640	1059	9149,76	
AR	2	8640	946	8173,44	16,73
LP	2	8640	1136	9815,04	
AR	2.5	8640	983	8493,12	14,82
LP	2.5	8640	1154	9970,56	
AR	3	8640	1028	8881,92	17,63
LP	3	8640	1248	10782,72	

4 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a especificação e as metas a serem alcançadas com a implantação do laboratório de eficiência industrial. A aquisição deste laboratório foi possível pela efetivação de um convênio entre a ELETROBRÁS/PROCEL/UFU, visando à cooperação técnica-financeira.

O Laboratório está apto a simular diversas condições operativas de cargas como bombas centrífugas, compressores, ventiladores e correias transportadoras demonstrando os fenômenos eletromecânicos pertinentes a estes sistemas.

Como diferencial, este laboratório traz a possibilidade de se fazer um estudo integrado de sistemas elétrico, mecânico, térmico e hidráulico. Uma vez que, a construção da bancada, se baseia na associação dos vários sistemas, torna-se impossível estudar a eficiência industrial por um sistema isolado.

Assim, tem sua relevância e inovação principalmente para o setor industrial, tornando-o competitivo a partir da redução do consumo e uso eficiente da energia elétrica.

5 AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto foi possível pelo suporte financeiro proporcionado pela ELETROBRÁS / PROCEL.

6 REFERÊNCIAS

- ELETROBRÁS. Acesso em 02/02/2007, disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br>
- GELLER, Howard S. *Revolução energética: políticas para um futuro sustentável*. Trad. Maria Vidal Barbosa. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.
- GOLDEMBERG, José. VILLANUEVA, Luz Donero. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. Trad. André Koch. 2^a. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.
- PROCEL. *Orientações Gerais Para Conservação de Energia em Prédios Públicos*. Brasília, 2001.
- CEMIG. Acesso em 03/02/2007, disponível em: <http://www.cemig.com.br>
- SANTOS, A. H..M. e outros (2001). *Conservação de Energia: Eficiencia Energética de Instalações e Equipamentos* Editora da EFEI. 2^a. Ed. Itajubá. MG
- MÁXIMA EFICIÊNCIA: *Informativo do Programa Energia Inteligente da CEMIG* . No. 3 – 2005