

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS E DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE ROTOR EM GAIOLA

Ernesto Ruppert Filho

DSCE/FEE/UNICAMP
C.P. 6101 - 13081-970 Campinas-SP

Antonio Tadeu Lyrio de Almeida

EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá

RESUMO: A obtenção das características de desempenho dos motores de indução trifásicos de rotor de gaiola é fundamental para estudos de viabilidade econômica de substituição de motores por motivos de conservação de energia ou de manutenção. Existem diversos procedimentos para determinar as características de desempenho, previstos em normas técnicas internacionais e nacional. Entretanto, são procedimentos baseados em ensaios de laboratório que empregam equipamentos dificilmente transportáveis para o campo e dificilmente disponíveis nas fábricas ou nas oficinas elétricas, sendo também ensaios caros e, muitas vezes, demorados. Este trabalho apresenta uma alternativa aos procedimentos existentes. O método se baseia na estimação dos parâmetros do circuito equivalente, a qual é realizada através da geração de valores pseudo-aleatórios e solução simultânea das equações do circuito equivalente para cada condição de operação. A sua validade foi verificada através de ensaios de 94 motores em uma faixa de potência compreendida entre 3 e 2250 cv.

Squirrel-Cage Induction Motors Parameters Estimation and Performance Characteristics Evaluation

ABSTRACT: The performance characteristics of three-phase squirrel-cage induction motors determination is important for economic feasibility studies for motor substitution due to energy conservation and maintenance subjects. The national and international motor standards present procedures to determine that performance characteristics. However they are based on laboratory tests using special equipments hard to be moved to the site and rarely available in shops and workshops, being in general very expensive and time-consumption tests. This paper presents an alternative to the existing procedures. The proposed method is based on the equivalent circuit parameters estimation that is done through the generation of pseudo-random values and simultaneous solution of the equivalent circuit equations for each operation condition. The validity of the method was tested in a range of 94 different motors with rated power between 3 and 2250 cv.

1 INTRODUÇÃO

As características de desempenho de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola são as funções: a) $M = f_1(n)$, b) $I = f_2(n)$, c) $P_{el} = f_3(n)$, d) $\cos\phi = f_4(n)$, e) $\eta = f_5(n)$, onde: M = conjugado motor (N.m), I = corrente elétrica do motor (A), P_{el} = potência ativa absorvida pelo motor da rede (W), $\cos\phi$ = fator de potência do motor, η = rendimento do motor, n = velocidade do motor (rpm).

Pode-se observar que as três primeiras são independentes entre si, sendo as outras duas dependentes das três anteriores.

Muita atenção tem sido e deve ser dedicada aos motores de indução trifásicos pois, constituem a carga mais significativa dos processos industriais com uma participação em torno de 50%. Além disso, levantamento executado por empresas concessionárias de energia elétrica brasileiras (Procel - 1988), mostra que cerca de 75% destes motores podem ser considerados inadequados para as cargas que acionam, ou seja, não operam segundo as características de projeto do motor.

Muitos procedimentos tem sido empregados para a determinação de tais características, os quais se concentram em dois grandes grupos: os executados em laboratórios especiais e os realizados no próprio ambiente de trabalho.

Os ensaios de laboratório baseiam-se em normas técnicas nacional (NBR 5383 -, 1987) e internacionais (IEEE std. 112, 1986) e (IEC Publication 34-2 - , 1972) e empregam equipamentos dificilmente disponíveis nas fábricas ou nas oficinas como dinamômetros, freios dinamométricos, isolamentos térmicos especiais, sistemas de aquisição de dados ou registradores sendo ensaios caros e demorados também devido à necessidade de transporte do motor para outro local.

Este trabalho apresenta uma alternativa aos procedimentos existentes. O método se baseia na estimação dos parâmetros do circuito equivalente, a qual é realizada através da geração de valores pseudo-aleatórios e solução simultânea das equações do circuito equivalente.

2 ESTRUTURA BÁSICA DO MÉTODO

O método desenvolvido consiste em se determinar os parâmetros do circuito equivalente para cada ponto de operação do motor, porém o equacionamento não permite uma solução analítica de forma fechada, pois o número de incógnitas é superior ao número de equações. Estima-se os parâmetros através da geração de valores pseudo-aleatórios e minimização de erro.

O modelamento apresentado determina os parâmetros do circuito equivalente em "T" do motor de indução trifásico (figura 1) (Kostenko, M. and Piotrovsky, 1970) para cada condição de operação do motor. Nesse circuito é usual considerar-se como constante os parâmetros R_1 , X_m e R_m respectivamente: resistência elétrica do enrolamento do estator, reatância de magnetização e resistência elétrica que representa as perdas no ferro, desde a condição de partida até a de rotor livre.

Os valores dos demais parâmetros são variáveis, ou seja, a reatância de dispersão do enrolamento de

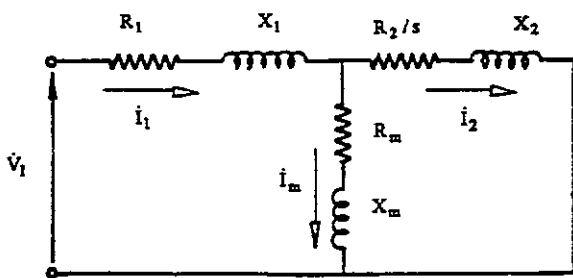


Figura 1: Circuito equivalente do motor de indução trifásico.

estator (X_1) varia devido à saturação e a resistência elétrica do enrolamento do rotor (R_2) bem como a reatância de dispersão do enrolamento do rotor (X_2) variam devido ao efeito pelicular.

Estima-se os parâmetros R_2 , X_1 e X_2 para a condição de rotor livre e para a condição de rotor bloqueado, utilizando os dados obtidos nos respectivos ensaios que devem ser realizados no campo. Estima-se também esses parâmetros para 3 ou 4 outros pontos entre os dois acima mencionados e constrói-se curvas de variação desses parâmetros com a velocidade do motor e com a corrente elétrica de estator utilizando-se como função interpolante a "spline" cúbica.

3 PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA A CONDIÇÃO DE ROTOR LIVRE

O ensaio do rotor livre, na tensão nominal, permite a determinação da corrente de enrolamento de estator (I_{1rl}), do fator de potência do motor ($\cos \phi_{1rl}$), das perdas por atrito e ventilação (P_{av}), do escorregamento (s_{rl}) e da resistência elétrica do enrolamento do estator (R_{1rl}).

As equações (1) a (5) são obtidas do circuito equivalente em T do motor para a condição de rotor livre, onde R_{2rl} e I_{2rl} são a resistência elétrica e a corrente elétrica no enrolamento do rotor, X_{rl} é a reatância de dispersão dos enrolamentos do

estator e do rotor (supostas iguais inicialmente), I_m e ϕ_m são respectivamente a intensidade da corrente de magnetização e o ângulo dessa corrente e V_1 é a tensão de fase nominal do motor.

$$R_{2rl} = \frac{s_{rl}}{1-s_{rl}} \frac{P_{av}}{3I_{2rl}^2} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{3V_1 I_{1rl} \cos \phi_{1rl} - P_{av} - 3R_{1rl} I_{1rl}^2 - 3R_{2rl} I_{2rl}^2}{3I_m^2} \quad (2)$$

$$X_{1rl} = X_{2rl} = \frac{V_1 I_{1rl} \sin \phi_{1rl} - X_m I_m^2}{I_{1rl}^2 + I_{2rl}^2} = X_{rl} \quad (3)$$

$$X_m = \sqrt{\left[X_{rl}^2 + \left(\frac{R_{2rl}}{s_{rl}} \right)^2 \right] \left(\frac{I_{2rl}}{I_m} \right)^2 - R_m^2} \quad (4)$$

$$I_{2rl} = \sqrt{I_{1rl}^2 + I_m^2 - 2I_{1rl} I_m \cos(\phi_m - \phi_{1rl})} \quad (5)$$

São 5 equações com sete incógnitas (R_{2rl} , I_{2rl} , R_m , X_{rl} , X_m , I_m e ϕ_m). Observa-se que R_m , X_{rl} , X_m , I_{2rl} e R_{2rl} são funções de I_m e de ϕ_m .

Para resolvê-las gera-se um conjunto de valores pseudo-aleatórios de ϕ_m e I_m e resolve-se o conjunto de equações para R_{2rl} , I_{2rl} , R_m , X_{rl} e X_m sujeitas às seguintes restrições: a) todas as variáveis são positivas, b) X_m é maior do que todas as outras variáveis, c) X_{rl} é maior do que R_{1rl} e R_{2rl} .

As faixas de variações utilizadas são $0 < \phi_m < 90^\circ$ e $0 < I_m < I_{1rl}$ com intervalos $\Delta \phi_m$ da ordem de 0,5 e ΔI_m da ordem de 5×10^{-3} .

O conjunto de variáveis $\{ \{R_{2rl}, X_{rl}\}, \{R_m, X_m, I_{2rl}, I_m, \phi_m\} \}$ que constitui a solução do sistema de equações, minimiza o erro dado pela expressão (6) e satisfaz as restrições apresentadas anteriormente.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (6)$$

onde:

$$\varepsilon_1 = |I_{1rl} - I_{1c}| \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = |\cos \phi_{1rl} - \cos \phi_{1c}| \quad (8)$$

$$\varepsilon_3 = |\sin \phi_{1rl} - \sin \phi_{1c}| \quad (9)$$

$$I_{1c} = \frac{V_1}{Z_t} \quad \cos \phi_{1c} = \frac{R_t}{Z_t} \quad \sin \phi_{1c} = \frac{X_t}{Z_t} \quad (10)$$

$Z_t = R_t + jX_t$ = impedância do motor vista pela fonte de tensão no circuito equivalente da figura 1.

O conjunto de variáveis acima definido é usado como condição inicial $\{R_{2rl}, X_{rl}, X_{rl}, R_m, X_m, I_{2rl}, I_m, \phi_m\}$ para a solução, usando o algoritmo de Marquadt (Marquadt, D.W., 1963), do sistema geral de equações do circuito equivalente constituído pelas equações (1), (2), (4) e (5) sendo que a (3) será escrita como:

$$V_1 I_{1rl} \sin \phi_{1rl} = X_{1rl} I_{1rl}^2 + X_{2rl} I_{2rl}^2 + X_m I_m^2 \quad (3')$$

Agora utiliza-se um processo iterativo para minimizar cada erro ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 , ou seja, os valores dos parâmetros ajustados para minimizar ϵ_3 são utilizados como condição inicial para minimizar ϵ_2 e estes para minimizar ϵ_1 .

Com isso obtém-se o conjunto de parâmetros do circuito equivalente para a condição de rotor livre $\{(R_{2r\ell}, X_{1r\ell}, X_{2r\ell}), (R_1, R_m, X_m)\}$. O subconjunto $\{R_1, R_m, X_m\}$ é constituído pelos parâmetros invariantes sendo que R_1 é obtido por medição e o subconjunto $\{R_{2r\ell}, X_{1r\ell}, X_{2r\ell}\}$ é constituído pelos parâmetros variáveis com a condição de operação do motor.

4 PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA A CONDIÇÃO DE ROTOR BLOQUEADO

O ensaio de rotor bloqueado permite determinar a corrente de estator de rotor bloqueado I_{1rb} , na tensão nominal, o fator de potência de rotor bloqueado $\cos(\varphi_{1rb})$ e $\sin(\varphi_{1rb})$.

Com o conjunto de parâmetros obtidos para a condição de rotor livre usados como condição inicial obtém-se, usando o algoritmo de Marquadt, o conjunto de parâmetros que minimizam os erros ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 dados por (11), (12) e (13). Os parâmetros R_1 , R_m e X_m são mantidos constantes em seus valores obtidos no ensaio do rotor livre e são estimados R_{2rb} , X_{1rb} e X_{2rb} .

$$\epsilon_1 = |\sin \varphi_{1rb} - \sin \varphi_{1c}| \quad (11)$$

$$\epsilon_2 = |\cos \varphi_{1rb} - \cos \varphi_{1c}| \quad (12)$$

$$\epsilon_3 = |I_{1rb} - I_{1c}| \quad (13)$$

$\sin \varphi_{1c}$, $\cos \varphi_{1c}$ e I_{1c} são obtidos do circuito equivalente.

5 PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA PONTOS INTERMEDIÁRIOS ENTRE ROTOR LIVRE E ROTOR BLOQUEADO

Para que seja possível encontrar uma função interpolante, tipo "spline" cúbica, para cada parâmetro, que reproduza, com boa precisão, qualquer característica de desempenho da máquina, dentro de toda faixa de operação da mesma, é preciso, ainda, determinar os parâmetros para, pelo menos, três outros pontos de operação distintos. Entretanto, a característica será tanto mais precisa quanto mais pontos de operação forem utilizados.

Os parâmetros R_1 , R_m e X_m são mantidos constantes em seus valores de rotor livre de modo que são estimados R_2 , X_1 e X_2 . Neste caso não há ensaios para obtenção de $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ e I_1 para que se possa calcular erros dos tipos mostrados em (7), (8), (9), (11), (12) e (13) e outro procedimento é adotado.

Do circuito equivalente da figura 1 pode-se obter as seguintes relações:

$$\Delta V_1 = \{[V_1 - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2 + [Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)]^2\}^{1/2} \quad (14)$$

$$\varphi_{\Delta V_1} = \text{tg}^{-1} \left[\frac{-Z_m I_m \sin(\varphi_{zm} - \varphi_m)}{V_1 - Z_m I_m \cos(\varphi_{zm} - \varphi_m)} \right] \quad (15)$$

$$\varphi_{zm} = \text{tg}^{-1} \frac{X_m}{R_m} \quad (16)$$

$$X_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_1}{I_1}\right)^2 - R_1^2} \quad (17)$$

$$\varphi_{a2} = \varphi_m + \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1}\right) - \varphi_{\Delta V_1} \quad (18)$$

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 + I_m^2 - 2I_1 I_m \cos \varphi_{a2}} \quad (19)$$

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_1}{R_1}\right) - \varphi_{\Delta V_1} - \text{sen}^{-1} \left[\frac{I_m \sin \varphi_{a2}}{I_2}\right] \quad (20)$$

$$R_2^* = \frac{R_2}{s} = \frac{I_m}{I_2} \cos \varphi_2 [R_m (\cos \varphi_m + \text{tg} \varphi_2 \sin \varphi_m) + X_m (\sin \varphi_m - \text{tg} \varphi_2 \cos \varphi_m)] \quad (21)$$

$$X_2 = R_2^* \text{tg} \varphi_2 - \frac{I_m}{I_2 \cos \varphi_2} [R_m \sin \varphi_m - X_m \cos \varphi_m] \quad (22)$$

Nas expressões de (14) a (22) aparecem I_m e φ_m , dessa maneira utiliza-se procedimento análogo ao utilizado no caso de rotor livre, ou seja, gera-se valores para I_m e φ_m . Nos ensaios de laboratório em 94 máquinas verificou-se que os intervalos de varredura devem ser:

$$60^\circ \leq \varphi_m \leq 120^\circ \quad (23)$$

$$0,2 I_{1r\ell} \leq I_m \leq I_{1r\ell} \quad (24)$$

Para cada valor de I_1 e cada par (I_m, φ_m) calcular-se X_1 usando (14) a (17), R_2^* usando (18) a (21) e X_2 usando (22). O conjunto de parâmetros $\{R_2, X_1, X_2\}$ que minimiza o erro ϵ dado por (25) é a solução.

$$\epsilon = |I_{1c} - I_1| \quad (25)$$

onde I_1 é o valor da corrente de estator no ponto de operação para o qual queremos calcular os parâmetros e I_{1c} é calculado por (26) e (27)

$$I_{1c} = \frac{V_1}{Z_t} \quad (26)$$

$$\dot{Z}_t = R_t + jX_t = \frac{(R_m + jX_m)(R_2^* + jX_2)}{(R_m + R_2^*) + j(X_m + X_2)} + R_1 + jX_1 \quad (27)$$

O valor de R_2 é calculado como sugerido em (Goldemberg, C. e Lobosco, O.S., 1990), através de (28)

$$R_2^* = \frac{R_{2r\ell}}{s} + (R_{2rb} - R_{2r\ell})s^{1/2} \quad (28)$$

$$R_2 = R_2^* s \quad (29)$$

Sugere-se como mínimo estimar os parâmetros para $I_1 = 2I_{1rb}$ e para outros dois pontos igualmente espaçados entre este valor e o valor da corrente de rotor bloqueado.

Com os valores dos parâmetros obtidos para cada escorregamento, ou seja R_2 por (29) e X_1 e X_2 por curvas como nas figuras 2 e 3 e ainda R_1 , R_m e X_m calculados para a condição de rotor livre utiliza-se o circuito equivalente para calcular as características de desempenho do motor através de (30), (32), (33), (34) e (36)

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_t} \quad (30)$$

$$I_2 = \frac{V_1 - Z_1 I_1}{Z_2} \quad (31)$$

$$\cos \phi_1 = \frac{R_1}{Z_t} \quad (32)$$

$$P_{el} = 3V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (33)$$

$$M = \frac{90}{\pi n_s} \frac{R_2}{s} I_2^2 \quad (34)$$

$$P = \frac{2\pi}{60} M s = \text{potência mecânica no eixo} \quad (35)$$

$$\eta = \frac{P}{P_{el}} \quad (36)$$

6 RESULTADOS

As figuras (2) a (6) mostram resultados para um motor de indução de rotor em gaiola de 15 cv, 440 V, 60 Hz, 1169 rpm para o qual se obteve os seguintes valores de parâmetros: $R_1 = 0,4365$ ohms, $R_m = 1,201$ ohms, $X_m = 18,06$ ohms, $R_{2rb} = 0,4619$ ohms, $X_{2rb} = 0,8639$ ohms, $X_{1rb} = 0,7086$ ohms.

A figura (2) mostra o comportamento dos parâmetros variáveis em função da velocidade do motor. Conforme mencionado no item 2 esses parâmetros são a reatância de dispersão do enrolamento do estator (X_1), a resistência do enrolamento do rotor (R_2) e a reatância de dispersão do enrolamento do rotor (X_2).

As figuras (3), (4) e (6) mostram o comportamento de grandezas do motor, respectivamente conjugado, corrente elétrica do estator e potência elétrica ativa em função da velocidade enquanto a figura (5) mostra o comportamento do fator de potência do motor em função da velocidade.

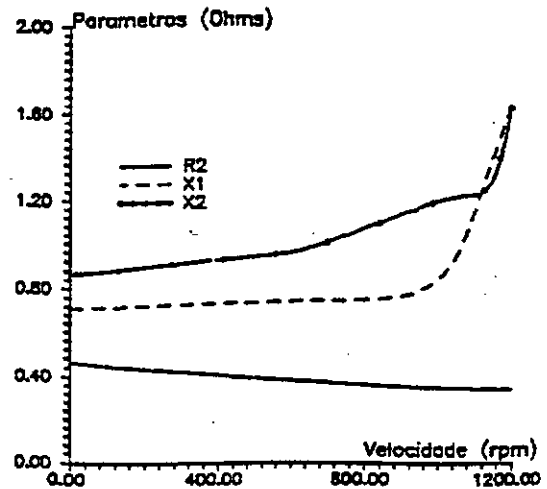


Figura 2: Parâmetros variáveis do motor em função da velocidade.

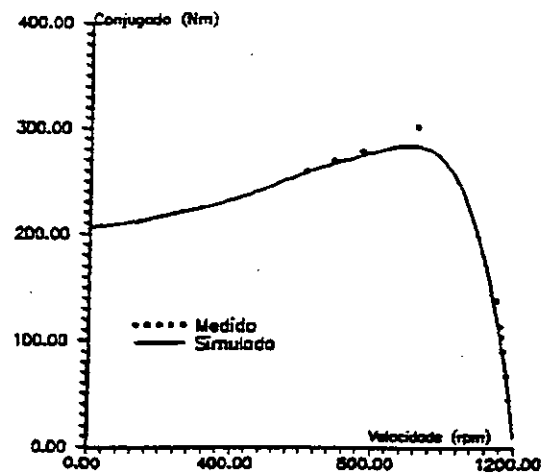


Figura 3: Conjugado do motor em função da velocidade

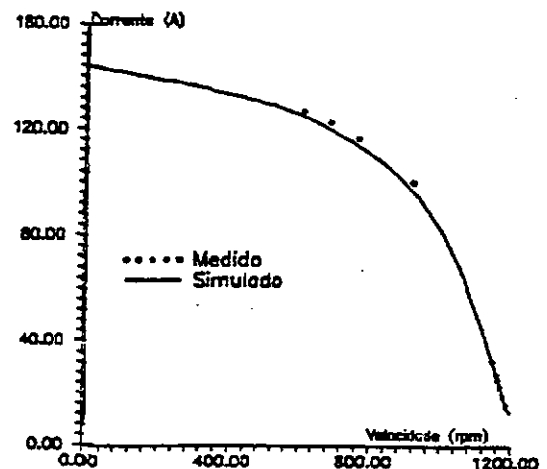


Figura 4: Corrente elétrica do estator em função da velocidade.

Os resultados apresentados tem a finalidade de mostrar a validade do método para o caso específico do motor de 15cv considerado. Entretanto, para comprovação da validade desta metodologia realizou-se um estudo comparativo com os resultados de ensaios de um universo de motores entre 3 e 2250 cv.

As figuras (7), (8) e (9) mostram uma análise de erros médios obtidos quando se compara o conjugado, a corrente de estator e a potência ativa obtidos pela metodologia apresentada e por ensaios normalizados, por faixa de potência do motor.

Na figura (7) apresenta-se os erros médios, ao longo da faixa de velocidade do motor, para o conjugado no eixo do motor quando se compara valores obtidos pela metodologia apresentada e valores obtidos utilizando os ensaios previstos nas normas IEEE std. 112 (1986) e na IEC Publication 34-2 (1972). Foram ensaiados 40 motores pela norma IEEE e 54 pela IEC, número considerado adequado para as conclusões obtidas, principalmente na faixa de 3 a 100 cv.

Observa-se no caso da norma IEEE 112-B que o erro médio, em conjugado, para motores com potências maiores do que 100

cv é de 0,4%. Na faixa de 3 a 10 cv o erro médio é de 0,8%.

7 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida é de fácil aplicação tanto no campo como em oficinas. Entretanto, é necessário que haja facilidades para os ensaios de rotor livre e de rotor bloqueado.

Os resultados e erros obtidos são muito bons e evidentemente incentivam o seu uso como uma ferramenta para verificação da situação de operação de motores com a finalidade de

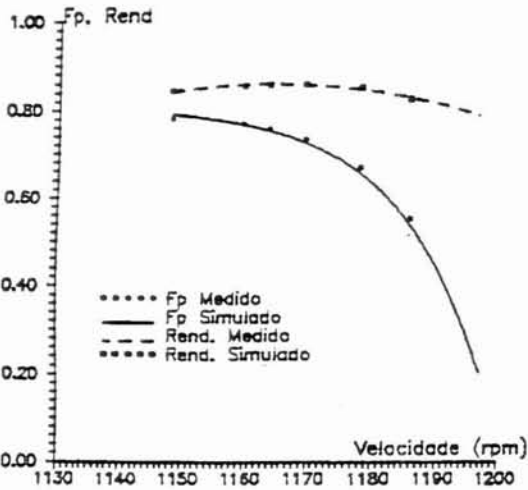


Figura 5: Fator de potência e rendimento do motor em função da velocidade.

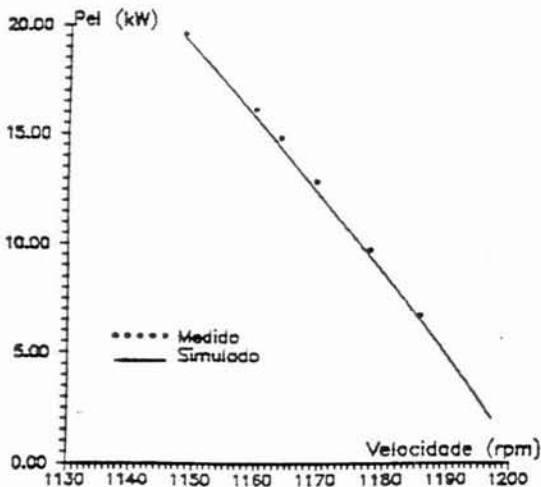


Figura 6: Potência elétrica ativa do motor em função da velocidade

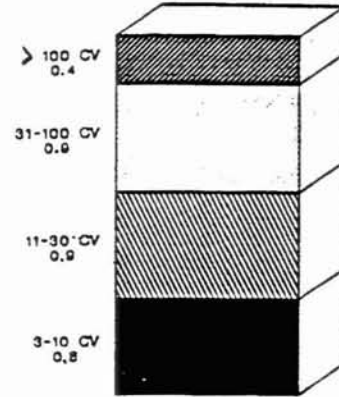


Figura 7: Erros médios na avaliação do conjugado, em porcentagem, para cada faixa de potência do motor.

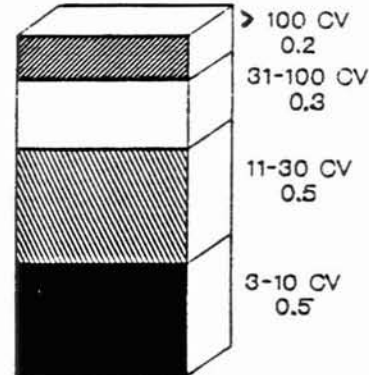


Figura 8: Erros médios na avaliação da corrente elétrica de estator, em porcentagem, para cada faixa de potência do motor

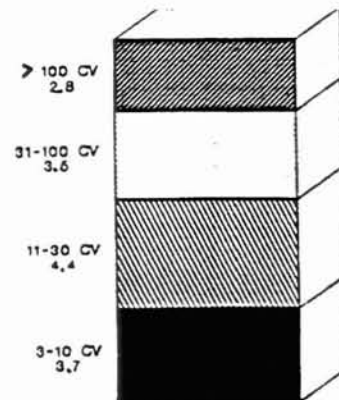


Figura 9: Erros médios na avaliação de rendimento, em porcentagem, para cada faixa de potência de motor.

conservação de energia ou de manutenção.

O trabalho é totalmente, voltado para atividades industriais, especialmente nas áreas hoje emergentes de manutenção e de conservação de energia e mostra a importância da estimação de parâmetros na modelagem de motores de indução.

REFERÊNCIAS

- Goldemberg, C. e Lobosco, O.S., 1990, "Determination of Induction Motor Characteristics from Manufacturers Data Sheets", Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM), Cambridge, USA, pp. 458-463.
- IEC Publication 34-2 - , 1972, "Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests" - Rotating Electrical Machines - Part 2.
- IEEE std. 112 - Institute of Electrical and Electronic Engineers -, 1986, "Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators", USA.
- Kostenko, M. and Piotrovsky, 1970, L., Electrical Machines, part 2, Mir, Russia.
- Marquadt, D.W., June 1963, "An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameter" - J. Soc. Indust. Appl. Math., vol. 11, n° 2, pp. 431-441.
- NBR 5383 -, 1987, "Máquinas Polifásicas de Indução - Método de Ensino", S.P.
- Procel. - Programa Nacional de Conservação de Energia, 1988, "Diagnóstico do Potencial para Auditoria Energética", S.P.