



HOLOS

ISSN: 1518-1634

holos@ifrn.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Brasil

Lisita, Luiz Roberto; Miranda Machado, Paulo César; Lima Nerys, José Wilson; Araújo de  
Figueiredo, Sérgio; Silva Figueiredo, Mara Grace  
DETERMINAÇÃO COM PRECISÃO DAS PERDAS E DOS PARÂMETROS DE  
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS  
HOLOS, vol. 3, 2010, pp. 58-68  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Natal, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481549221006>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica  
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

---

## **DETERMINAÇÃO COM PRECISÃO DAS PERDAS E DOS PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

### **Luiz Roberto Lisita**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás - UFG, Prof. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG E-mail: lrlisita@gmail.com.

### **Paulo César Miranda Machado**

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Leeds - UK, Prof. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG. E-mail: pcmmachado@gmail.com.

### **José Wilson Lima Nerys**

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Leeds - UK, Prof. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG. E-mail: jwilson@eee.ufg.br.

### **Sérgio Araújo de Figueiredo**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Prof. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG. E-mail: sergioafig@gmail.com.

### **Mara Grace Silva Figueiredo**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Profª. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – UFG. E-mail: mara@eee.ufg.br.

---

## **RESUMO**

Os ensaios tradicionais para levantamento de parâmetros em motor de indução trifásico utilizam equipamentos de medição muitas vezes não confiáveis e de baixa precisão e quase nunca são realizadas medições em tempo real, podendo levar a erros grosseiros. Neste trabalho os parâmetros do motor de indução trifásico são determinados utilizando-se de medições com transdutores de tensão e de corrente de alta precisão e programação LabVIEW. É analisado o comportamento do conjugado por atrito em função da velocidade e da perda no núcleo em função da tensão e da frequência do estator. Também é calculado o momento de inércia do motor de indução trifásico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaios, modelagem, momento de inércia, perdas, motor de indução trifásico.

## **DETERMINATION WITH ACCURACY OF THE LOSSES AND PARAMETERS OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS**

## **ABSTRACT**

Traditional tests to obtain parameters in three-phase induction motors sometimes make use of unreliable measuring equipments, with low accuracy, and almost never they are carried out in real time, leading sometimes to large errors. In this work the parameters of a three-phase induction motor are calculated using measurements with high precision voltage and current transducers and LabVIEW programming. It is analyzed the behavior of the friction torque as a function of the speed and the core loss as a function of the voltage and stator frequency. It is also calculated the moment of inertia of the three-phase induction motor.

**KEYWORDS:** Testing, modeling, moment of inertia, losses, three-phase induction motor.

## DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS, MOMENTO DE INÉRCIA E PERDAS EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

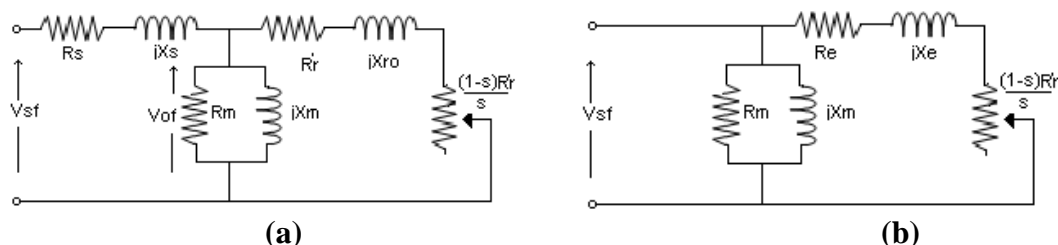
### INTRODUÇÃO

Para representar o funcionamento do motor de indução trifásico (MIT), utilizam-se modelos de circuitos elétricos equivalentes, representados por indutâncias e resistências. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta instruções para realização de ensaios, a partir das quais, obtém-se o modelo L (NBR 5383, 1982). No entanto há pesquisas, como o levantamento de parâmetros para controle vetorial, que exigem a utilização de modelos mais completos e mais precisos do que os apresentados por estas normas (BOFFI *et al.*, 1977), (NERYS *et al.*, 2004) e (LISITA, 2004).

Neste trabalho foram realizados ensaios para obtenção de duas modelagens diferentes para o MIT, sendo uma a proposta pela norma e outra a que utiliza o modelo T equivalente por fase. Devido à importância do conhecimento das perdas em máquinas elétricas é verificado o comportamento da perda por atrito com a variação da velocidade e da perda no núcleo com a variação da tensão e da frequência. É determinado também, de forma precisa, o momento de inércia do MIT.

### MODELAGEM

Os modelos que são utilizados para estudos sobre MIT são os apresentados na Fig. 1(a), modelo T, e na Fig. 1(b), modelo L (FITZGERALD *et al.*, 1975) e (DEL TORO, 1994). O modelo T considera as impedâncias de rotor e estator separadas e o modelo L é uma aproximação que considera as impedâncias de rotor e estator em série, substituindo a soma das resistências pela equivalente ( $R_e$ ) e a soma das reatâncias pela equivalente ( $X_e$ ).



**Figura 1 – Modelos para motor de indução trifásico: (a) Modelo T e (b) Modelo L.**

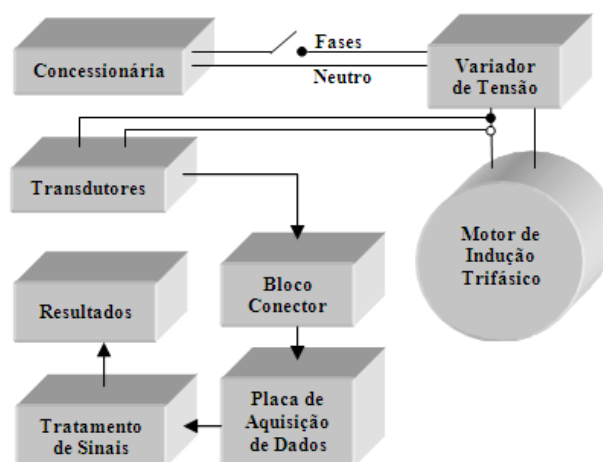
Na Figura 1  $R_s$  é a resistência dos enrolamentos do estator,  $X_s$  é a reatância de dispersão do estator,  $R_m$  é a resistência de magnetização,  $X_m$  é a reatância de magnetização,  $R'_r$  é a resistência do rotor referida ao estator,  $X'_{r0}$  é a reatância de dispersão do rotor referida ao estator,  $s$  é o escorregamento,  $V_{sf}$  é a tensão aplicada pela fonte por fase, e  $V_{of}$  é a tensão no ramo de magnetização por fase.

### METODOLOGIA

#### • ENSAIOS

Para a realização dos ensaios foi montado um sistema de aquisição e tratamento de dados com medições instantâneas temporais utilizando-se de instrumentação virtual baseada no

*software* e programação em LabVIEW (NATIONAL INSTRUMENTS, 2002). Os transdutores de tensão e de corrente utilizados são do tipo compensado em malha fechada, com erro de 0,1% para corrente e 0,2% para tensão. As medidas são feitas através do Conversor Analógico-Digital (ADC) em uma placa de aquisição de dados (DAQ) de 12 bits, com largura de faixa de até 1MHz, PCI-MIO-16E-1 (MOREIRA *et al.*, 2004). O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que usa ícones no lugar de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW usa uma programação tipo fluxo de dados, onde este fluxo determina a execução. O *software* integra os transdutores, bloco conector e *hardware* DAQ em um completo e funcional sistema de aquisição e tratamento de dados. A Figura 2 mostra o esquemático unifilar para os ensaios do motor.



**Figura 2 – Esquemático unifilar para os ensaios do motor de indução trifásico.**

Os ensaios realizados são:

1. Ensaio de resistência dos enrolamentos em *dc* – ensaio realizado com corrente contínua, para encontrar a resistência de estator em *dc* média por fase ( $R_{sdc}$ ) (NERYS *et al.*, 2004) e (LISITA, 2004).
2. Ensaio com rotor bloqueado e frequência variável – Através desse ensaio obtém-se as curvas da resistência e da impedância equivalentes em função da frequência (DEL TORO, 1994). O cálculo de cada ponto da curva de resistência equivalente é realizado dividindo-se a potência ativa dissipada por fase pelo quadrado da corrente. Cada ponto da curva de impedância equivalente é calculado dividindo-se a tensão de fase pela corrente de fase.
3. Ensaio com rotor bloqueado na frequência nominal – Este ensaio é utilizado para a determinação da perda nos enrolamentos e os parâmetros de dispersão por fase, resistência equivalente em *ac* ( $R_{eac60}$ ) e a reatância equivalente ( $X_{e60}$ ) (DEL TORO, 1994).
4. Ensaio em vazio com tensão variável e frequência nominal – O objetivo deste ensaio é determinar a perda por atrito ( $P_a$ ). Varia-se a tensão com a finalidade de se obter a perda em vazio ( $P_o$ ) para cada valor de tensão. Com esses valores, constrói-se a curva da potência em função da tensão. Quando a tensão decresce, a potência dissipada nos enrolamentos e no núcleo tende a zero. A perda total é aproximadamente igual à perda por atrito. Pontos com tensões muito baixas não são tomados porque a velocidade não é mais próxima à velocidade síncrona. A extrapolação da curva até o eixo da ordenada indica a perda por atrito em velocidades normais de operação (DEL TORO, 1994).

5. Ensaio em vazio com tensões e frequências variáveis – Neste ensaio é traçada, para cada frequência, a curva da perda em vazio em função da tensão aplicada. Através da tendência de cada curva, obtém-se a perda por atrito correspondente a cada frequência, de forma análoga à apresentada no ensaio com frequência nominal. Com os valores de perda por atrito, obtém-se a curva da perda por atrito em função da frequência. Como o motor está em vazio, a velocidade é próxima à síncrona. Portanto, a curva pode ser descrita em termos da velocidade mecânica, ao invés da frequência.

6. Ensaio em vazio com tensão e frequência nominais – Determinam-se a perda em vazio ( $P_o$ ), a perda no núcleo ( $P_{NL}$ ), a corrente de excitação ( $I_o$ ) e os parâmetros de magnetização, resistência ( $R_m$ ) e reatância ( $X_m$ ) para os modelos L e T, com tensão e frequência nominais. Para realização deste ensaio, aplicam-se ao motor a tensão e a frequência nominal, estando o eixo do mesmo livre para girar (sem carga). Nesta situação, a velocidade mecânica se aproxima da velocidade síncrona do campo girante.

### • MÉTODO DE CÁLCULO PARA O MODELO L

Do ensaio de rotor bloqueado, obtêm-se os valores da reatância de dispersão ( $X_{e60}$ ) e da resistência de dispersão ( $R_{eac60}$ ) equivalentes em *ac*. Devido a corrente de rotor apresentar frequências muito baixas em velocidades normais, é necessário conhecer a resistência de rotor em *dc*. Para isto, utilizam-se os valores das resistências em *dc* de estator ( $R_{sdc}$ ) e equivalente ( $R_{edc}$ ), obtidos do ensaio de rotor bloqueado com frequência variável. A resistência de rotor ( $R'_{rdc}$ ) pode ser calculada pela diferença entre a resistência equivalente em *dc* ( $R_{edc}$ ) e a resistência de estator em *dc* ( $R_{sdc}$ ). A resistência rotórica em 60 Hz ( $R'_{rac60}$ ), que é a resistência de rotor na condição de partida, é calculada conforme equação (1) (DEL TORO, 1994):

$$R'_{rac60} = \frac{R_{eac60}}{R_{edc}} \cdot R'_{rdc} \quad \text{equação (1)}$$

Na obtenção dos parâmetros do ramo de magnetização para o modelo L não é considerada a queda de tensão no ramo de dispersão do estator. Assim, a tensão no ramo de magnetização ( $V_{of}$ ) é igual à tensão aplicada pela fonte ( $V_{sf}$ ). A perda no núcleo ( $P_{NL}$ ) é determinada pela diferença entre a perda em vazio e a perda por atrito e a resistência de magnetização ( $R_m$ ) pela divisão do quadrado da tensão aplicada pela perda no núcleo. Para o cálculo da reatância de magnetização ( $X_m$ ), determina-se primeiramente o módulo da impedância de magnetização ( $Z_m$ ) utilizando-se da Lei de Ohm e, em seguida, a própria reatância de magnetização, conforme equação (2).

$$X_m = \left( \sqrt{\frac{1}{Z_m^2} - \frac{1}{R_m^2}} \right)^{-1} \quad \text{equação (2)}$$

### • MÉTODO DE CÁLCULO PARA O MODELO T

Os valores das resistências equivalentes em *ac* e em *dc* e da resistência de rotor são obtidos do modelo L. Para o cálculo da resistência de estator em *ac*, utiliza-se a equação (3).

$$R_{sac} = R_{eac} - R'_{rac} \quad \text{equação (3)}$$

Para obtenção do modelo T a partir do modelo L, uma prática muito utilizada é considerar que a metade da reatância de dispersão equivalente é de estator e a outra metade é a reatância de rotor referida ao estator (DEWAN, 1984). Para o cálculo dos parâmetros de

magnetização, considera-se a queda de tensão no ramo de dispersão do estator. Neste caso a perda no núcleo é descrito pela equação (4).

$$P_{NL} = P_o - 3 \cdot R_{sac60} \cdot I_{of}^2 - P_a \quad \text{equação (4)}$$

### • CÁLCULO DAS PERDAS COM A FREQUÊNCIA

Os dados obtidos no ensaio em vazio com tensão e frequência variáveis permitem observar o comportamento da perda por atrito com a variação da frequência ( $P_a(f)$ ). Para cada frequência é calculada a tensão nominal correspondente de forma que a corrente de excitação inicial permaneça quase constante, conforme equação (5):

$$V_N(f) = \frac{f}{f_N} \cdot V_N \quad \text{equação (5)}$$

em que  $V_N(f)$  é a tensão de fase nominal para a frequência  $f$ ,  $V_N$  é a tensão de fase nominal para 60 Hz e  $f_N$  é a frequência nominal igual a 60 Hz. A perda no núcleo em função da frequência ( $P_{NL}(f)$ ), é obtida reescrevendo-se a equação (4), conforme a equação (6):

$$P_{NL}(f) = P_o(f) - 3 \cdot R_{sac}(f) \cdot I_{of}^2 - P_a(f) \quad \text{equação (6)}$$

em que  $P_o(f)$  é a perda em vazio sob tensão nominal para a frequência  $f$  e  $R_{sac}(f)$  é a resistência em *ac* do estator na frequência  $f$ . A resistência do estator em *ac* para a frequência  $f$  é obtida através da equação (7).

$$R_{sac}(f) = \frac{R_{eac}(f)}{R_{edc}} \cdot R_{sdc} \quad \text{equação (7)}$$

em que  $R_{eac}(f)$  é o valor da resistência equivalente em *ac* obtido para a frequência  $f$ , durante o ensaio com rotor bloqueado e frequência variável. Para cada valor de perda por atrito ( $P_a(f)$ ), também se pode calcular o conjugado por atrito ( $T_a(f)$ ) em função da velocidade do rotor ( $n_r$ ), conforme a equação (8):

$$T_a(f) = \frac{60}{2\pi n_r} \cdot P_a(f) \quad \text{equação (8)}$$

### • DETERMINAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA ( $J_M$ )

O momento de Inércia ( $J_M$ ) da máquina de indução pode ser obtido a partir da equação da dinâmica dessa máquina [SLEMON, 1992], conforme equação (9).

$$T_a = -\left(\frac{2\pi}{60}\right) \cdot J_M \cdot \frac{dn_r}{dt} \quad \text{equação (9)}$$

Se na equação (8) a perda por atrito total (mancais e ventilação) variar linearmente com a velocidade, o momento de Inércia ( $J_M$ ) do MIT é determinado pela equação (10), obtida pela combinação das equações (8) e (9):

$$J_M = \left(\frac{60}{2\pi n_o}\right)^2 \cdot P_{aN} \cdot t_{parada} \quad \text{equação (10)}$$

em que  $P_{aN}$  é a perda por atrito na velocidade nominal e  $t_{parada}$  é o tempo de parada do rotor em vazio após ser desconectado da rede de alimentação.

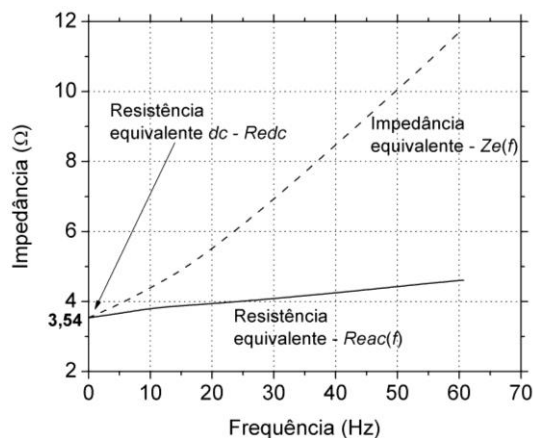
## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O MIT submetido aos ensaios é do tipo gaiola, categoria N de fabricação da WEG e apresenta potência nominal de 3 cv, 1730 rpm, 380 V, 5,04 A e 60 Hz, conectado em Y.

Primeiramente realizou-se o ensaio de resistência dos enrolamentos em *dc* onde foi determinado o valor da resistência média do estator por fase  $R_{sdc} = 2,35\Omega$ . Em seguida foi realizado o ensaio de rotor bloqueado com frequência variável através de um grupo gerador síncrono e motor *dc* com velocidade variável. O esquemático para esse ensaio é obtido substituindo-se, na Fig. 2, a concessionária de energia pelo grupo gerador. Essa máquina gera tensões trifásicas equilibradas com frequência proporcional à velocidade mecânica da máquina primária. A Tabela 1 mostra os valores medidos de tensões e de correntes e os valores calculados de perdas, impedâncias ( $Z_e(f)$ ) e resistências ( $R_{eac}(f)$ ) de dispersões em função da frequência. Com base na Tabela 1 são construídas as curvas de impedância e resistência em função da frequência, mostradas na Fig. 3.

**Tabela 1. Ensaio de rotor bloqueado com frequência variável.**

| <i>Freq. (Hz)</i> | <i>Tensão (V)</i> | <i>Corrente (A)</i> | <i>Perda (W)</i> | $Z_e(f) (\Omega)$ | $R_{eac}(f) (\Omega)$ |
|-------------------|-------------------|---------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 5                 | 4,35              | 1,11                | 13,49            | 3,92              | 3,66                  |
| 10,09             | 7,21              | 1,64                | 30,58            | 4,4               | 3,81                  |
| 15,09             | 9,05              | 1,85                | 39,66            | 4,89              | 3,88                  |
| 20,04             | 10,77             | 1,95                | 45,01            | 5,52              | 3,94                  |
| 24,99             | 12,47             | 2,01                | 48,60            | 6,2               | 4,01                  |
| 30,41             | 14,39             | 2,06                | 52,02            | 6,99              | 4,09                  |
| 35,04             | 16,01             | 2,08                | 54,05            | 7,7               | 4,17                  |
| 40,09             | 17,83             | 2,1                 | 56,24            | 8,49              | 4,25                  |
| 45,06             | 19,66             | 2,12                | 58,50            | 9,27              | 4,34                  |
| 50,22             | 21,5              | 2,13                | 60,21            | 10,09             | 4,43                  |
| 54,93             | 23,31             | 2,15                | 62,49            | 10,84             | 4,52                  |
| 60,73             | 25,41             | 2,15                | 64,14            | 11,82             | 4,61                  |



**Figura 3 – Curva para obtenção da resistência equivalente *dc* do motor.**

As duas curvas convergem ao mesmo ponto quando a frequência tende a zero. Através da tendência dessas curvas determina-se a resistência equivalente *dc* ( $R_{edc}$ ) do motor (Tab. 2). No ensaio com rotor bloqueado na frequência nominal determina-se, para o modelo T, a resistência ( $R_{eac60}$ ) em *ac* e a reatância de dispersão ( $X_{e60}$ ) equivalente, conforme Tabela 2.



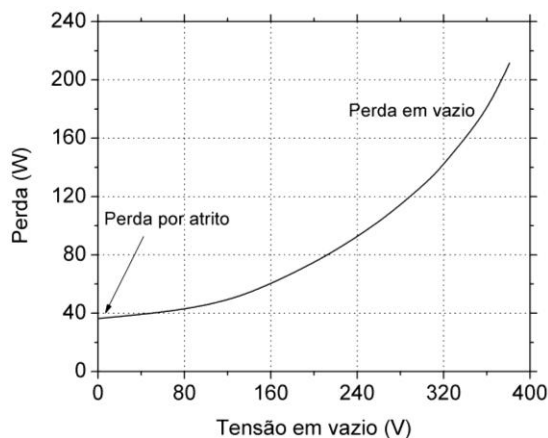
**Tabela 2. Parâmetros de dispersão ( $\Omega$ ).**

| <i>Parâmetro</i>      | <i>Equivalente</i> | <i>Estator</i> | <i>Rotor</i> |
|-----------------------|--------------------|----------------|--------------|
| Resistência <i>dc</i> | 3,54               | 2,35           | 1,19         |
| Resistência <i>ac</i> | 4,55               | 3,02           | 1,53         |
| Reatância             | 8,21               | 4,10           | 4,10         |

No ensaio em vazio com tensão variável e frequência nominal, para cada valor de tensão aplicada determina-se a perda em vazio ( $P_o$ ), conforme Tabela 33. A perda por atrito é dada pela tendência da curva mostrada na Fig. 4. Quando se reduz a tensão aplicada ao motor, a corrente também decresce até um ponto de tensão limite ( $V_{lim}$ ).

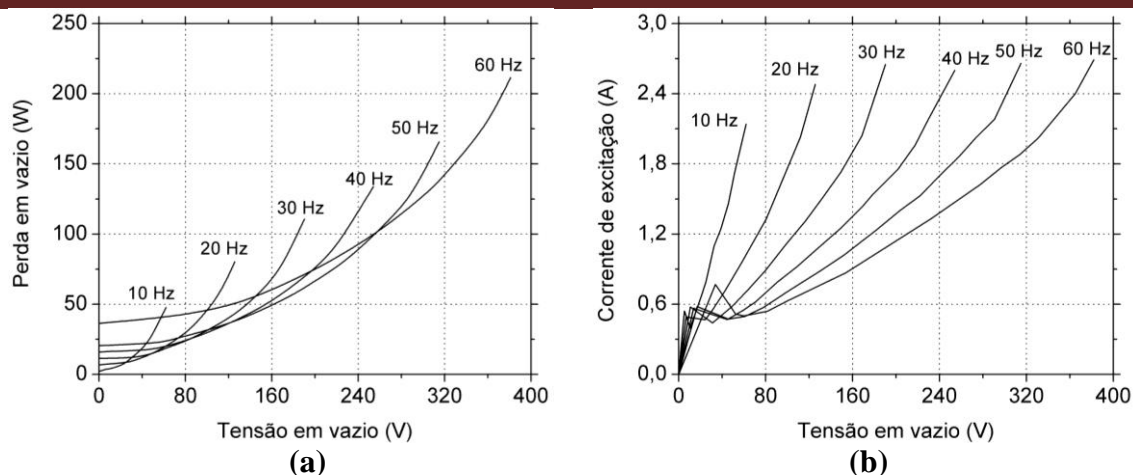
**Tabela 3. Variação da perda em vazio em função da tensão.**

| <i>Tensão (V)</i> | <i>Perda em vazio (W)</i> | <i>Tensão (V)</i> | <i>Perda em vazio (W)</i> |
|-------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| 220,04            | 211,54                    | 140,62            | 94,33                     |
| 209,97            | 184,69                    | 130,66            | 86,25                     |
| 200,66            | 167,05                    | 120,32            | 78,26                     |
| 190,65            | 151,30                    | 110,74            | 71,83                     |
| 180,44            | 135,52                    | 99,85             | 64,83                     |
| 170,82            | 124,39                    | 89,74             | 58,91                     |
| 159,29            | 111,91                    | 80,86             | 54,26                     |
| 150,59            | 103,35                    | 70,56             | 49,50                     |

**Figura 4 – Curva para obtenção da perda por atrito no motor.**

O ensaio em vazio com tensões e frequências variáveis é realizado na faixa de frequência de 10 a 60 Hz. Para cada caso é levantada uma curva, apresentadas nas Figs. 5(a) e (b).



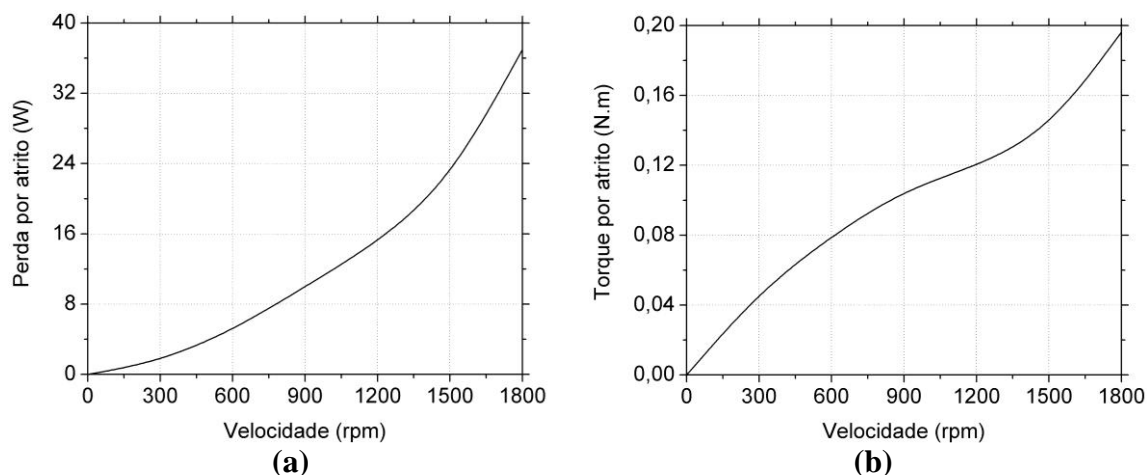


**Figura 5 – Ensaio em vazio para várias frequências: (a) Perdas e (b) Corrente de excitação.**

Pela tendência das curvas da Fig. 5(a) obtém-se a perda por atrito para cada velocidade. Na Fig. 5(b), são mostradas as curvas das correntes de excitação para cada frequência em função da tensão aplicada. Com o decréscimo da tensão, a corrente de excitação também é reduzida até a tensão limite ( $V_{lim}$ ) para cada frequência. A partir deste ponto a corrente sofre um aumento e o motor pára. Em seguida, com o decréscimo da tensão, a corrente vai a zero. Para este ponto limite, cuja corrente é mínima ( $I_{min}$ ), determina-se a perda por atrito ( $P_a$ ) pela tendência da curva da Fig. 5(a). Com o motor girando em vazio, o escorregamento tende a zero e a velocidade do motor fica associada à frequência. Utilizando-se da Fig. 5(a), obtém-se a perda por atrito ( $P_a$ ) em função da velocidade de operação do motor ( $n_r$ ), conforme Tabela 4 e Fig. 6(a). Nesta tabela também é apresentado o valor do conjugado por atrito ( $T_a$ ) em função da velocidade, conforme Fig. 6(b). Verifica-se nestas figuras um comportamento quase linear.

**Tabela 4. Perda por atrito em função da velocidade.**

| $n_r (rpm)$ | $P_a (W)$ | $T_a (N.m)$ | $n_r (rpm)$ | $P_a (W)$ | $T_a (N.m)$ |
|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| 300         | 1,5       | 0,04775     | 1200        | 15,0      | 0,11937     |
| 600         | 5,0       | 0,07958     | 1500        | 22,0      | 0,14006     |
| 900         | 10,0      | 0,10610     | 1800        | 37,0      | 0,19629     |



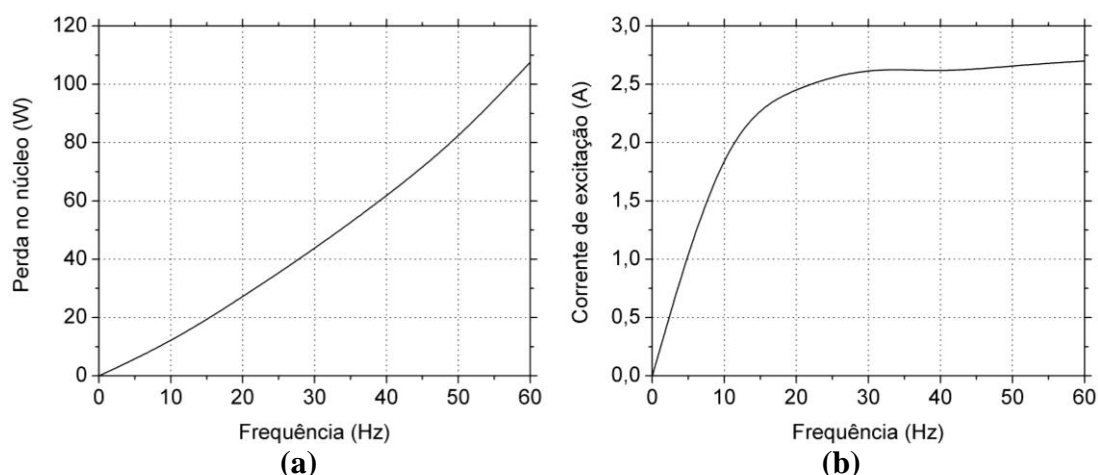
**Figura 6 – (a) Perda e (b) Torque por atrito em função da velocidade do motor.**

Através da Tabela 1 e das equações (3), (6) e (7) obtêm-se os valores da resistência equivalente e da resistência do estator em *ac* ( $R_{sac}$ ), bem como a perda no núcleo para o modelo T ( $P_{NL(T)}$ ) e para o modelo L ( $P_{NL(L)}$ ), para cada frequência analisada. A Tabela 55 mostra, além desses resultados, a corrente de excitação ( $I_o$ ).

**Tabela 5. Perdas no motor de indução trifásico.**

| $f$ (Hz) | $P_o$ (W) | $P_a$ (W) | $R_{eac}$ ( $\Omega$ ) | $R_{sac}$ ( $\Omega$ ) | $I_o$ (A) | $P_{NL(T)}$ (W) | $P_{NL(L)}$ (W) |
|----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-----------|-----------------|-----------------|
| 10       | 47,81     | 1,5       | 3,81                   | 2,529                  | 2,14      | 11,56           | 46,31           |
| 20       | 80,36     | 5         | 3,94                   | 2,616                  | 2,48      | 27,10           | 75,36           |
| 30       | 110,75    | 10        | 4,09                   | 2,715                  | 2,65      | 43,55           | 100,75          |
| 40       | 133,84    | 15        | 4,25                   | 2,821                  | 2,6       | 61,62           | 118,84          |
| 50       | 165,84    | 22        | 4,43                   | 2,941                  | 2,66      | 81,42           | 143,84          |
| 60       | 211,54    | 37        | 4,61                   | 3,060                  | 2,7       | 107,6           | 174,54          |

A perda no núcleo em função da frequência do estator, mostrada na Fig. 7(a), aumenta de forma quase linear. A Fig. 7(b) ilustra a corrente de excitação para a tensão nominal relativa a cada frequência. Observa-se nessa figura que a corrente de excitação permanece quase constante para frequências acima de 30Hz.



**Figura 7 – (a) Perda no núcleo e (b) Corrente de excitação em função frequência.**

Através do ensaio em vazio com tensão e frequência nominal determinam-se os parâmetros do ramo de magnetização e a perda no núcleo para os dois modelos. A Tabela 66 apresenta esses resultados e os erros do modelo L em relação ao modelo T.

**Tabela 6. Parâmetros de magnetização e perda no núcleo para os modelos L e T.**

| Parâmetro          | Modelo T | Modelo L | Erro (%) |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $R_m$ ( $\Omega$ ) | 1260,00  | 827,32   | 34,3     |
| $X_m$ ( $\Omega$ ) | 77,55    | 81,88    | 5,6      |
| $P_{NL}$ (W)       | 107,60   | 174,54   | 62,2     |

O erro de 62,2% da perda no núcleo para o modelo L, com relação ao modelo T, deve-se à perda na resistência do estator ( $R_{sac}$ ), que é considerada no modelo T, mas não o é no modelo L (equação 4). Essa perda aumenta com o quadrado da corrente de excitação. Em

transformadores, por ter modelos semelhantes ao MIT, esse erro é em torno de 5% (LISITA, 2004). Isso se deve à corrente de excitação percentual do transformador ser menor que a corrente de excitação percentual do MIT.

O ensaio em vazio para determinação do tempo de parada do motor por atrito é realizado com tensão e frequência nominal. Liga-se o motor e após este atingir o regime permanente, desliga-se a fonte de alimentação e mede-se o tempo de parada do motor por atrito. Utilizando-se da equação (10) obtém-se o momento de inércia, conforme Tabela 7.

**Tabela 7. Momento de inércia.**

| $n_o$ (rpm) | $P_{aN}$ (W) | $t_{parada}$ (s) | $J_M$ (kg.m <sup>2</sup> ) |
|-------------|--------------|------------------|----------------------------|
| 1797        | 37           | 10,41            | 0,0109                     |

## CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma metodologia de ensaio de motores de indução trifásicos, que utiliza um sistema completo de aquisição de dados e tratamento de sinais composto de transdutores de alta precisão e um software que permite o cálculo dos parâmetros e perdas do motor com equações no domínio do tempo e praticamente em tempo real. Vários ensaios foram realizados e os resultados foram organizados em tabelas e gráficos que permitem uma visão global e uma análise crítica dos resultados. O primeiro ensaio é para determinação da resistência de equivalente por fase. Dois métodos foram utilizados, tendo resultado em valores idênticos: método da lei de Ohm, onde uma tensão contínua é aplicada nos enrolamentos do motor e método da dissipação de potência, utilizado a partir dos resultados do ensaio de rotor bloqueado e frequência variável. Os valores dos dois métodos são equivalentes quando a frequência tende a zero. O maior erro detectado na comparação entre os cálculos para os modelos L e T foi na determinação da perda no núcleo, onde foi verificado um erro de 62,2 %, atribuído ao alto valor percentual da corrente de excitação do motor. As curvas levantadas através do ensaio em vazio para as várias frequências mostram que a perda por atrito e a perda no núcleo aumentam quase linearmente com a velocidade. O mesmo comportamento ocorre com o conjugado por atrito. A partir dessa característica foi determinado o momento de inércia do motor. Em estudos avançados, tais como controle vetorial, estes resultados podem ser utilizados na determinação mais precisa do conjugado líquido de saída. Em síntese, o uso do modelo T e a metodologia de ensaio adotada resultam em valores mais confiáveis para os parâmetros e perdas do motor de indução trifásico.

## REFERÊNCIAS

1. NBR 5383-1982, **Máquinas Elétricas Girantes – Máquinas de indução – Determinação das características.**
2. BOFFI, L.V., SOBRAL JR, M., DANGELO, J.C. **Conversão Eletromecânica de Energia**, São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
3. NERYS, J.W.L., LISITA, OLIVEIRA, A.M., MOREIRA, A.C., BATISTA, A.J. **Perda Adicional no Núcleo em Transformadores Trifásicos Alimentando Cargas Não-Lineares**, Revista IEEE América Latina, vol. 2, n. 1, p.48-56, março de 2004.

4. LISITA, L.R. **Determinação de Perdas, Eficiência e Potência Máxima de Transformadores Alimentando Cargas Não-Lineares**. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Federal de Goiás, 2004.
5. FITZGERALD, A.E., KINGSLEY JR, C., KUSKO, A. **Máquinas Elétricas**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.
6. DEL TORO, V., **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1994.
7. MOREIRA, A.C., LISITA, L.R., NERYS, J.W.L., BATISTA, A.J. **Measurement and Treatment of Signals Using Labview**, Joinville, VI Induscon, p. 1-6, 2004.
8. DEWAN, S.B., SLEMON, G.R., STRAUGHEN, A. **Power Semiconductor Drives**. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
9. NATIONAL INSTRUMENTS, LabVIEW v. 6.1 User Manual, 2002.
10. SLEMON, G. R. **Electric Machines and Drives**. New York, Addison-Wesley, 1992.