

Implementação de uma plataforma experimental para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico com base na norma técnica NBR17094-3:2018

Implementation of an Experimental Platform to Obtain the Parameters of the Equivalent Circuit of the Three-Phase Induction Motor Based on NBR17094-3:2018

Vinicius Marcos Pinheiro¹; Luciano Coutinho Gomes²; Cassio Alves de Oliveira³

Resumo: Os motores de indução são as máquinas elétricas rotativas mais utilizadas tanto no âmbito industrial como no doméstico. Diversas são as metodologias que podem ser encontradas na literatura para o estudo desse equipamento, principalmente relacionadas à obtenção dos parâmetros do seu circuito equivalente, dados importantes quando se deseja realizar análises teóricas ou computacionais. Sendo assim, o intuito no presente trabalho é o de apresentar uma plataforma prática, que possibilite obter os respectivos parâmetros, e computacional, por meio da implementação das equações dinâmicas que representam a máquina, para o levantamento das principais curvas de desempenho da máquina, a partir dos dados dos ensaios práticos. Os procedimentos realizados na plataforma experimental têm como auxílio os ensaios apresentados na norma NBR17094-3:2018. Em síntese, os dados obtidos por meio da simulação permitiram averiguar os parâmetros resultantes dos ensaios práticos, por meio das curvas no domínio do tempo, que representam a tensão, corrente, velocidade e conjugado. A adoção de uma metodologia para obter os parâmetros da máquina analisada norteou o estudo, empregando recursos computacionais mais eficiente e mais próximo do comportamento real, fato comprovado por meio da comparação entre os dados obtidos em cada caso.

Palavras-chave: Ensaios; Motor de Indução Trifásico; NBR17094-3:2018; Parâmetros; Plataforma.

Abstract: Induction motors are the most used electrical rotating machines in the industry and domestic scope. Several methodologies can be found in the literature for the study of this equipment, mainly related to obtain the parameters of the equivalent circuit, this data is important to perform theoretical or computational analysis. Therefore, the objective of the present work is to present a practical platform, that allows to obtain the respective parameters, and computational, by implementing the dynamic equations that represent the machine, to obtain the main performance curves of the machine, from the data of the practical tests. The procedures performed in the experimental platform have the assistance of the tests presents in the norm NBR17094-3:2018. In summary, the data obtained through the simulation allowed ascertain the parameters of the practical tests by means of time domain curves, which represent the voltage, current, velocity and conjugate. The adoption of a methodology to obtain the parameters of the analyzed machine made the study using computational resources more efficient and closer to the real behavior, fact proven by means of the comparison between the data obtained in each.

Keywords: Testing; Three-Phase Induction Motor; NBR17094-3:2018; Parameters; Platform.

¹ Graduado em Engenharia Elétrica, com certificação em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Alves de Ávila, 2121, Bloco 1E, Santa Mônica, Uberlândia (MG), CEP: 38400-902. E-mail: viniciusmarcospinheiro@hotmail.com

² Doutor na área de Acionamentos Elétricos e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Alves de Ávila, 2121, Bloco 1E, Santa Mônica, Uberlândia (MG), CEP: 38400-902. E-mail: lcgomes@ufu.br

³ Mestrando em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica, na Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Avenida João Alves de Ávila, 2121, Bloco 1E, Santa Mônica, Uberlândia (MG), CEP: 38400-902. E-mail: kass-07@hotmail.com

Introdução

O motor de indução é o equipamento que processa a maior parcela de energia elétrica, considerando-se o uso final desta, segundo o Ministério de Minas e Energia Brasileiro (2017). Isso deve-se ao fato de ser uma máquina robusta, de baixo custo e que necessita de pouca manutenção (FITZGERALD, 2006).

Determinar de forma eficaz os parâmetros do motor de indução, principalmente de seu circuito equivalente, permite realizar análises teóricas cujos resultados aproximam-se do funcionamento real da máquina. Normalmente, tais estudos são realizados de forma computacional, por permitir melhor interpretação dos dados através da implementação de um modelo matemático (GAVIRA, 2003).

Na literatura, é possível encontrar diversas metodologias empregadas para a obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução. Como exemplo, podem ser citados os trabalhos realizados por Fortes (2013), empregando algoritmo genético implementado no MATLAB® Simulink, por Shindo (2003), aplicando o método de elementos finitos, e por Santana (2015), utilizando as medições instantâneas de tensão e corrente durante a partida do motor.

Sendo assim, neste trabalho tem-se por intuito apresentar uma plataforma experimental prática que adote a norma técnica NBR17094-3:2018 para a realização de ensaios que permitam obter os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico (MIT).

Posteriormente, é realizado o levantamento das principais curvas que representam o funcionamento do motor, sendo elas as curvas de tensão, corrente, velocidade e conjugado. Essas são obtidas de forma computacional, por meio da implementação das equações dinâmicas que representam a máquina estudada, utilizando-se como base os parâmetros obtidos nos ensaios práticos.

Por fim, é realizada a comparação do funcionamento prático da respectiva máquina e da simulação, para diferentes valores de carga acoplada ao eixo. Isso permite averiguar a efetividade da plataforma experimental.

Fundamentação teórica

Circuito equivalente

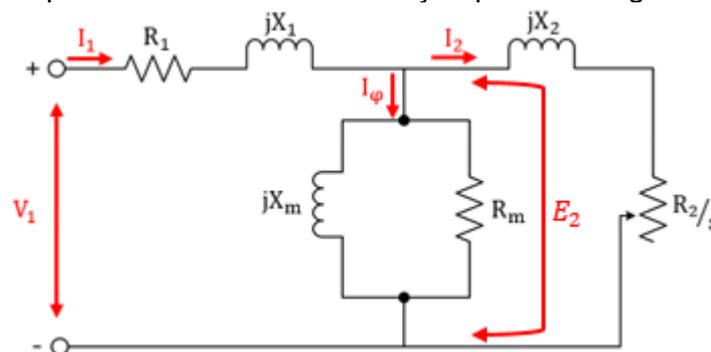
O motor de indução pode ser representado por um circuito teórico, denominado *circuito equivalente*. Esse é constituído por componentes passivos, sendo eles os

resistores e indutores, além das correntes e tensões. Dessa forma, as características elétricas da máquina são representadas de forma simples.

É importante ressaltar que o circuito equivalente, apresentado na **Figura 1**, só é válido quando (FITZGERALD, 2006):

- a máquina for simétrica;
- a alimentação for senoidal e equilibrada;
- o regime de estudo for o permanente.

Figura 1: Circuito equivalente do motor de indução por fase segundo Fitzgerald (2006).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na imagem,

- \hat{I}_1 – Corrente do estator.
- \hat{V}_1 – Tensão no terminal do estator.
- X_1 – Reatância de dispersão do estator.
- R_1 – Resistência do estator.
- R_2 – Resistência do rotor.
- X_2 – Reatância de dispersão do rotor.
- \hat{I}_φ – Componente da corrente de excitação.
- \hat{I}_2 – Corrente no rotor.
- \hat{E}_2 – Força Contra Eletromotriz.
- R_m – Resistência de perda no núcleo.
- X_m – Reatância de magnetização.
- s – Escorregamento.

NBR17094:2018 e os procedimentos dos ensaios

Desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, a NBR17094:2018 é uma norma técnica dividida em quatro partes, as quais são:

- Parte 1 – Motores de indução trifásicos: Requisitos.
- Parte 2 – Motores de indução monofásicos: Requisitos.
- Parte 3 – Motores de indução trifásicos: Métodos de ensaios.
- Parte 4 – Motores de indução monofásicos: Métodos de ensaios.

A análise, no presente trabalho, é realizada com um motor de indução trifásico. Dessa forma, é empregada a terceira parte da norma NBR17094:2018, que, dentre os vários ensaios abordados, apresenta aqueles necessários para se obter os parâmetros do circuito equivalente. Em suma, a norma resume os procedimentos necessários em três ensaios, sendo eles: ensaio para a determinação das resistências dos enrolamentos do estator; ensaio de rotor bloqueado, e ensaio a vazio.

Ensaio para determinar as resistências dos enrolamentos do estator

Este primeiro ensaio visa determinar as resistências dos enrolamentos do estator. Este é realizado aplicando-se corrente contínua nos terminais dos respectivos enrolamentos, observando-se os seguintes pontos abordados pela NBR17094-3:2018:

- os níveis das tensões aplicados devem ser estipulados de forma que as correntes não ultrapassem 15% do valor da corrente nominal;
- devem ser realizados de três a cinco medições para diferentes valores de tensão;
- para cada valor de tensão, a medição deve ser realizada no tempo máximo de um minuto, para que não ocorra dano no isolamento do estator;
- devem ser registradas as temperaturas dos enrolamentos para futuras correções das resistências.

Sendo assim, de posse das tensões (V) e correntes (I), as resistências (R_1) dos enrolamentos são determinadas por meio da Primeira Lei de Ohm, dada pela Equação (1).

$$R_1 I = V \quad (1)$$

As correções das resistências com relação à temperatura de referência, são realizadas por meio da Equação (2).

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (2)$$

Onde:

R_s – Resistência do enrolamento corrigida para uma temperatura especificada.

t_s – Temperatura especificada para correção da resistência, em graus Celsius.

R_t – Resistência do enrolamento obtida no ensaio à temperatura t_t .

t_t – Temperatura do enrolamento no momento da medição da resistência, em grau Celsius.

k – Constante baseada no material condutor do enrolamento. (Para cobre eletrolítico com 100% de condutividade $K=234,5$, alumínio com condutividade em volume de 62%, $K=225$).

Ensaio de rotor bloqueado

O ensaio de rotor bloqueado é realizado a fim de obter a reatância de dispersão do estator e do rotor, bem como a resistência deste último.

Esse ensaio consiste em aplicar tensão alternada reduzida nos terminais do estator, com o eixo do motor totalmente bloqueado, com a finalidade de obter corrente nominal.

Para tanto, a NBR17094-3:2018 estabelece algumas diretrizes que devem ser observadas durante o ensaio, são elas:

- o ensaio somente deve ser iniciado se a temperatura do motor for aproximadamente ou igual à temperatura ambiente;
- durante o ensaio, a temperatura deve ser constantemente medida, não devendo ultrapassar o limite de elevação da temperatura nominal somado de 40°C, para não causar dano no isolamento das bobinas do estator;
- o travamento do eixo do motor deve ser realizado de forma segura para não causar dano ao equipamento e às pessoas que estejam próximas.

Nesse sentido, são apresentados, a seguir, os equacionamentos para se obter os parâmetros provenientes do ensaio de rotor bloqueado.

Primeiramente, a Equação (3) permite o cálculo da resistência de rotor bloqueado (R_{rt}) por meio da potência (P_{rt}) e corrente (I_{rt}) mensuradas.

$$R_{rt} = \frac{P_{rt}}{I_{rt}^2} \quad (3)$$

Posteriormente, com a tensão (V_{rt}) e a corrente (I_{rt}), obtém-se a impedância de rotor bloqueado (Z_{rt}), como é descrito pela Equação (4).

$$Z_{rt} = \frac{V_{rt}}{I_{rt}} \quad (4)$$

De posse da resistência e da impedância de rotor bloqueado, tem-se a reatância de rotor bloqueado (X_{rt}), obtida por meio da Equação (5).

$$X_{rt} = \sqrt{Z_{rt}^2 - R_{rt}^2} \quad (5)$$

Sendo assim, as reatâncias de dispersão do estator e do rotor podem ser obtidas aplicando-se as relações apresentadas no **Quadro 1** sobre a reatância de rotor bloqueado, de acordo com a categoria do motor.

Quadro 1: Frações das reatâncias do estator e rotor

Fração X_1/X_2	Categoria do motor
0,58	H
0,68	N
0,78	D e motores de rotor bobinado

Fonte: NBR17094-3:2018.

A resistência do rotor (R_2) é obtida por meio da Equação 6.

$$R_2 = R_{rt} - R_1 \quad (6)$$

Ensaio a vazio

Por fim, tem-se o ensaio a vazio, realizado com o intuito de determinar os parâmetros do ramo magnetizante. Esse é constituído pela resistência de perdas no núcleo e pela reatância de magnetização.

Para a realização desse ensaio é aplicada tensão alternada nominal nos terminais dos enrolamentos do estator. Com relação ao eixo, não pode haver carga acoplada a esse, ou seja, deve estar totalmente livre.

A única recomendação que a NBR17094-3:2018 estabelece é com relação à potência de entrada, a qual não deve variar mais que 3% em um intervalo de tempo de 30 minutos. Isso assegura que o possível excesso de graxa nos mancais e nas demais partes móveis do motor não interfira, de alguma forma, nas medições a serem realizadas.

Para determinar os parâmetros provenientes do ensaio a vazio, deve-se, primeiramente, determinar a tensão sobre o ramo magnetizante (E_2). O procedimento é descrito pela Equação (7). Da tensão a vazio mensurada (V_o) é subtraída a queda de tensão no estator, dado pelo produto do módulo da impedância no estator com a corrente a vazio (I_o).

$$E_2 = V_o - (\sqrt{(R_1)^2 + (X_1)^2})I_o \quad (7)$$

Com o valor do fator de potência, é possível obter a corrente que circula pela resistência de perdas no núcleo (I_c) empregando-se a Equação (8) e a corrente que circula pela reatância de magnetização (I_m), utilizando a Equação (9).

$$I_c = I_o \cos\varphi \quad (8)$$

$$I_m = I_o \sin\varphi \quad (9)$$

Por fim, a resistência de perdas no núcleo (R_m) e a reatância de magnetização (X_m) são determinadas por meio das Equações (10) e (11) respectivamente.

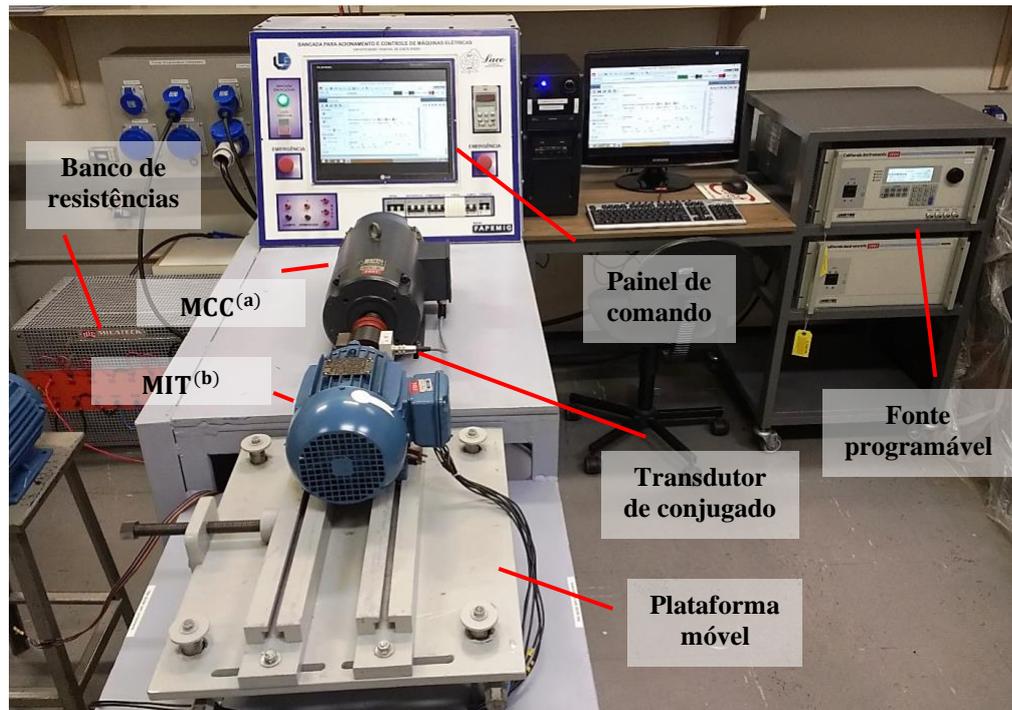
$$R_m = \frac{E_2}{I_c} \quad (10)$$

$$X_m = \frac{E_2}{I_m} \quad (11)$$

Materiais

Plataforma experimental

Figura 2: Plataforma de ensaios com os equipamentos empregados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

(*a*) Máquina de corrente contínua.

(*b*) Máquina de indução trifásica.

Na **Figura 2** é apresentada a plataforma experimental implementada para a realização dos ensaios com o motor de indução trifásico. Como é possível constatar em tal figura, estão indicados os equipamentos empregados durante o estudo, sendo suas principais características apresentadas a seguir.

A alimentação do motor de indução trifásico é realizada por meio de uma fonte programável, modelo CSW5550 da AMETEK Programmable Power®, sendo suas principais características apresentadas no **Quadro 2**.

Quadro 2: Características da fonte programável CSW5550.

Fabricante	AMETEK Programmable Power®
Marca	California Instruments
Modelo	CSW5550
Tensão de saída (CA ou CC)	0-156 $V_{rms}(FN)$ / 0-312 $V_{rms}(FN)$
Corrente de saída	32,16A (por fase)
Frequência de saída	CC, 40-5000Hz

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fonte permite, tanto por seu display frontal, quanto pela interface gráfica presente em um microcomputador, realizar diversas alterações relacionadas à alimentação. Dentre as principais, podem ser citadas a alteração da amplitude, da frequência, defasamento entre as fases e da forma de onda (senoidal, quadrada, triangular e contínua). Além do controle da alimentação, é possível mensurar diversas grandezas tanto pelo display quanto pela interface gráfica. Essa última torna-se mais eficiente do ponto de vista prático, uma vez que permite salvar os dados de forma simples em arquivo texto (extensão .txt) ou planilha (extensão .xml). As grandezas que podem ser medidas são: tensão, corrente, potências (ativa e aparente), fator de potência e defasamento angular.

A imposição de carga ao motor de indução é realizada empregando-se uma máquina de corrente contínua cujos dados de placa estão apresentados no **Quadro 3**.

Quadro 3: Dados de placa da máquina de corrente contínua.

Fabricante	LAVILL
Potência (kW/cv)	3,3/4,5
Velocidade	3600 rpm
Tensão de campo	180V
Tensão de armadura	180V
Corrente de armadura	20,4A

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como a máquina de corrente contínua opera na configuração do gerador, o seu circuito de armadura é ligado diretamente a um banco de resistências, constituído por oito resistências, cada uma podendo dissipar uma potência máxima de 800W.

É empregado o transdutor modelo T22 da fabricante HBM®, **Figura 3**, o qual permite mensurar valores de conjugado de até 50N.m, produzindo como sinal de saída uma tensão CC que varia de -5V a 5V.

Figura 3: Transdutor de conjugado, modelo T22.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O conjugado médio ($C_{médio}$) do transdutor de conjugado é calculado a partir da Equação 12.

$$C_{médio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_c c_i \quad (12)$$

Onde:

K_c – Fator de escala para o conjugado.

c_i – Valor do conjugado instantâneo para a amostragem i .

n – Quantidade total de amostragens.

Da maneira como os equipamentos de medições bem como as máquinas elétricas foram dispostas sobre a plataforma experimental, tornou-se possível a execução dos ensaios de forma segura tanto para os respectivos equipamentos, quanto para as pessoas envolvidas no presente trabalho.

Motor analisado

Os dados de placa do motor analisado, da fabricante WEG®, estão apresentados na **Tabela 1**. É possível conectar os enrolamentos do estator em dois arranjos, sendo eles o arranjo estrela e delta. No presente trabalho optou-se pelo último, devido ao menor nível de tensão requerido.

Tabela 1: Dados de placa do motor analisado

Motor de indução trifásico gaiola de esquilo WEG®	
Categoria N – 60Hz – Clas.Isol F	
Potência (kW/cv)	2,2/3,0
Tensão (Δ/Y)	220/380V
Corrente (Δ/Y)	8,39/4,86A
Fator de Potência	0,84
Velocidade	3450 rpm
I_p/I_n	6,7

Fonte: Elaborada pelo autor.

Resultados e discussões

Valores dos parâmetros do circuito equivalente

Na **Tabela 2** são apresentados os valores dos parâmetros do circuito equivalente do motor analisado, obtidos seguindo as diretrizes apresentadas anteriormente.

Tabela 2: Valores dos parâmetros do circuito equivalente do motor analisado.

Parâmetros	Valor	Temperatura
Resistência do estator	R_1 2,174 Ω	25°C
Reatância de dispersão do estator	X_1 2,954 Ω	-
Reatância de dispersão do rotor	X_2 4,740 Ω	-
Resistência do rotor	R_2 2,004 Ω	36°C
Resistência de perda no núcleo	R_m 598,748 Ω	48°C
Reatância de magnetização	X_m 84,660 Ω	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Análise do motor com carga nominal acoplada

Os níveis das tensões são obtidos por meio da fonte programável, respeitando-se o tempo de estabilização da potência de entrada do MIT, similar ao ensaio a vazio.

As correntes também são obtidas por meio da fonte programável no mesmo instante em que as tensões foram mensuradas. A **Tabela 3** indica os valores das tensões e correntes para cada uma das fases, bem como a média aritmética, quando há carga nominal acoplada ao eixo da máquina.

Tabela 3: Valores das tensões e correntes de cada fase do motor para ensaio com carga nominal.

	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Tensão média	220V	220V	220V	220V
Corrente média	8,69A	8,73A	8,77A	8,73A

Fonte: Elaborada pelo autor

A velocidade do motor de indução indica a rotação do eixo da máquina. Por meio do tacômetro digital, obtém-se a velocidade deste para carga nominal, cujo valor é igual a 3432 rpm.

Por fim, a temperatura registrada por meio de um termopar no interior do motor foi de 141,5°C.

Simulação computacional

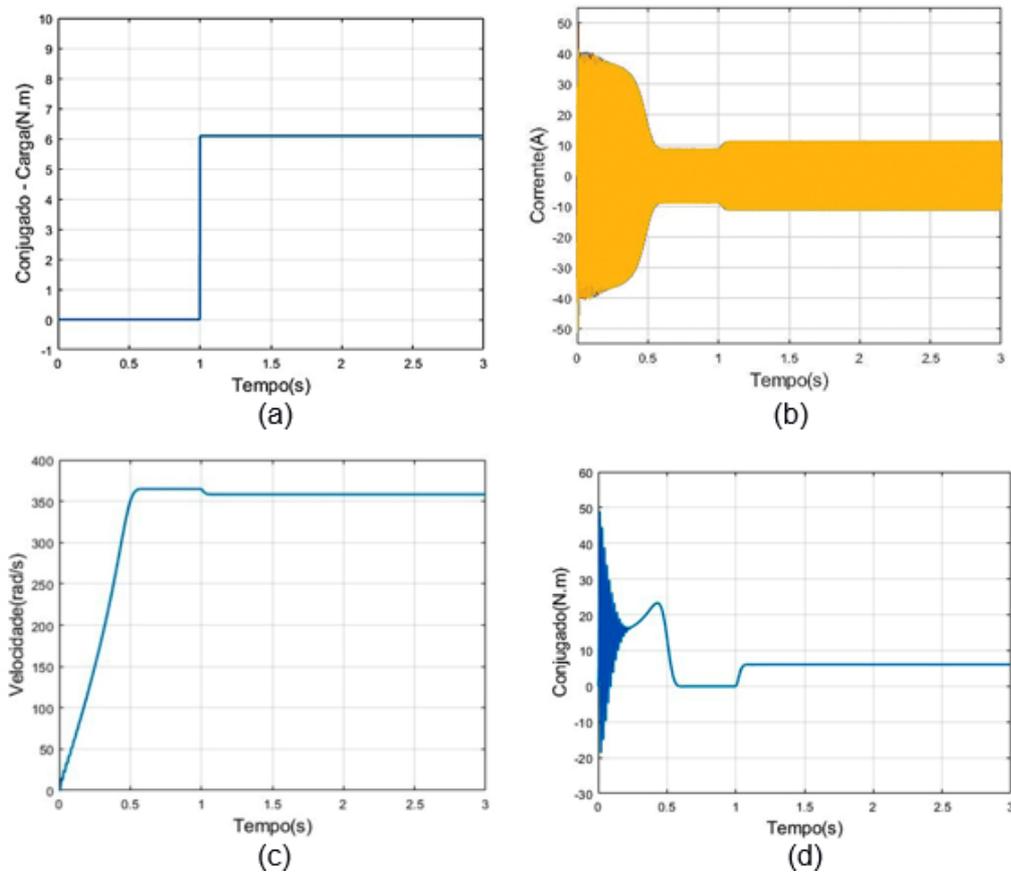
Os resultados a seguir são provenientes da implementação das equações dinâmicas da máquina de indução trifásica (BIM, 2012) no MATLAB® Simulink.

A fim de realizar a comparação com o desempenho da máquina no ensaio experimental, os parâmetros do circuito equivalente obtidos mediante as recomendações da norma foram utilizados como base para a implementação computacional.

Para que os resultados da simulação sejam concisos, é necessário realizar as correções das resistências do estator e do rotor para a temperatura obtida no ensaio experimental com carga nominal, cujo valor é de 141,5°C. A correção é realizada empregando-se a Equação 2.

As **Figuras 4-(a), 4-(b), 4-(c) e 4-(d)**, representam, respectivamente, as curvas de conjugado de carga, corrente, velocidade e conjugado mecânico, provenientes da simulação.

Figura 4: (a) Conjugado - Carga (N.m) x Tempo (s), (b) Corrente (A) x Tempo (s), (c) Velocidade (rad/s) x Tempo (s), (d) Conjugado (N.m) x Tempo (s).



Fonte: Elaborada pelo autor

Comparação entre valores de placa, experimentais e de simulação

Na **Tabela 4** estão apresentados os principais parâmetros que permitem realizar uma comparação direta entre os dados fornecidos pelo fabricante, os dados do experimento realizado seguindo os procedimentos da norma NBR17094-3:2018, e, por fim, os dados da simulação.

Tabela 4: Comparação entre os dados do fabricante, do ensaio experimental e da simulação para a condição de conjugado nominal

	Fabricante	Experimental	Simulação
Tensão média	220V	219,99V	220V
Corrente média	8,39A	8,73A	8,42A
Velocidade média	3450 rpm	3432 rpm	3438 rpm
Conjugado médio	6,08N.m	6,17N.m	6,12N.m

Fonte: Elaborada pelo autor

Pela **Tabela 4** é possível verificar que a simulação corresponde de forma satisfatória com relação ao funcionamento do motor.

Outros pontos de carga

Para efetuar uma avaliação comparativa mais sólida, foram realizados outros dois ensaios, sendo o primeiro com 75% de carga e o segundo com 125%, ambos com relação a carga nominal. Nas tabelas 5 e 6 estão apresentados os respectivos resultados obtidos tanto no ensaio experimental, quanto na simulação.

Tabela 5: Comparação entre os dados do ensaio experimental e da simulação para a condição de 75% de carga em relação a nominal.

	Experimental	Simulação
Tensão média	219,99V	220V
Corrente média	6,613A	6,545 A
Velocidade média	3508 rpm	3493 rpm
Conjugado médio	3,902N.m	3,902 N.m

Tabela 6: Comparação entre os dados do ensaio experimental e da simulação para a condição de 125% de carga em relação a nominal.

	Experimental	Simulação
Tensão média	219,99V	220V
Corrente média	10,530A	9.708A
Velocidade média	3340 rpm	3380 rpm
Conjugado médio	7,403N.m	7.405 N.m

Conclusão

A implementação computacional das equações dinâmicas, que representam o motor de indução trifásico e sua posterior simulação, permitiu o levantamento das principais curvas que auxiliaram na análise do desempenho da máquina, sendo elas as curvas de tensão, corrente, velocidade e conjugado. Posteriormente, a comparação entre os dados de placa do motor, do ensaio experimental e da simulação, permitiu assegurar a confiança da plataforma prática, devido aos resultados que foram alcançados de velocidade, corrente e conjugado, que apresentam grande semelhança entre si.

Com a adoção da NBR17094-3:2018, os parâmetros utilizados na implementação computacional foram obtidos de forma confiável e segura para os equipamentos, como os de medição e o próprio motor.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR17094-3:2018: Máquinas elétricas girantes. Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2018.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamentos.** 2ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência.** 6.ed., Porto Alegre: Bookman, 2006.

FORTES, M. Z.; FERREIRA, V. H.; COELHO, A. P. F. The Induction Motor Parameter Estimation Using Genetic Algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, v.11, n.5, p.1273-78, 2013.

GAVIRA, Muriel de Oliveira. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento.** 2003. Tese de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2003.

MINISTÉRIO de Minas e Energia. MME abre consulta pública sobre eficiências de Motores Elétricos de Indução. **Ministério de Minas e Energia.** Disponível em http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-abre-consulta-publica-sobre-eficiencia-de-motores-eletricos-trifasicos. Acesso em: 25 fev. 2019.

SANTANA, J. W. R. Método para la estimación paramétrica de máquinas de inducción utilizando medidas de tensiones y corrientes instantáneas. **Revista Facultad de Ingenieria.** n. 75, p. 57-67. Universidad de Antioquia, 2015.

SHINDO, R. **Cálculo de parâmetros de motor de indução trifásico utilizando o método dos elementos finitos.** Rio de Janeiro, 2003.