



ANÁLISE DO ROMPIMENTO DAS BARRAS DO ROTOR NO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Ian Robert Luz Pinheiro*¹, Patrick Laurient Cardoso Silva¹, Matheus Garcia Soares¹
e Rafael Rodrigues de Queiroz Freitas¹

¹DCET – Universidade Estadual de Santa Cruz

Resumo - O projeto eficiente de motores elétricos de indução se faz necessário em virtude da sua larga utilização em setores industriais e em fontes alternativas de energia elétrica. Desta forma, este artigo tem como objetivo analisar o comportamento do motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo quando sujeito ao rompimento de barras no rotor que corresponde a uma das mais frequentes falhas observadas neste tipo de máquina. A análise do motor de indução será feita através do método dos elementos finitos como implementado no *software* livre FEMM e com o auxílio da linguagem de programação gratuita *LUAedit*. Esta ferramenta computacional possibilita a análise do comportamento da variação do fluxo magnético, do torque eletromagnético, da indutância e outros parâmetros físicos envolvidos no funcionamento do motor de indução trifásico.

Palavras-Chave – Elementos finitos, modelagem, motor de indução

ROTOR BAR BREAKING ANALYSIS IN THE ELECTROMAGNETIC BEHAVIOR OF THE THREE-PHASE INDUCTION MOTOR

Abstract - The efficient project of electric induction motors is necessary due to its wide use in industrial sectors and in alternative sources of electric energy. Thus, this article objectives to analyze the behavior of the three-phase induction motor of the squirrel cage type when subjected to the rupture of bars in the rotor that corresponds to one of the most frequent failures observed in this type of machine. The analysis of the induction motor will be done through the finite element method as implemented in the FEMM free software and with the aid of the free *LUAedit* programming language. This computational tool makes it possible to analyze the behavior of the variation of the magnetic flux, the electromagnetic torque, the inductance and other physical parameters involved in the operation of the three-phase induction motor.

Keywords - finite elements, induction motor, modeling.

*ianrobert@hotmail.com

I. INTRODUÇÃO

O projeto eficiente, econômico e confiável de motores de indução tem sido um dos mais importantes temas de pesquisa na engenharia elétrica em virtude da sua larga utilização em setores industriais, na geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e mais recentemente no desenvolvimento de motores de indução trifásico para aplicação em veículos elétricos [1,2]. O setor industrial brasileiro, por exemplo, é responsável por cerca de 47% do consumo de energia elétrica do país, sendo que 62% deste valor corresponde ao consumo de energia pelos sistemas motrizes o que corresponde a 28,5% do consumo total deste insumo no país [3]. Além disto, quando se analisa as principais máquinas utilizadas na conversão de energia mecânica em elétrica destacam-se as máquinas síncronas e os geradores de indução [4].

Apesar da sua versatilidade e robustez, é reconhecido que os motores de indução trifásicos quando em operação estão sujeitos a diferentes tipos de faltas que a depender do seu grau de evolução pode levar a sua degradação total [5,6]. Uma das faltas mais frequentemente observadas em motores de indução do tipo gaiola de esquilo é o rompimento das barras do rotor (em torno de 10% das faltas). Este tipo de falta é devido a sua operação em sobrecarga, pois elevados valores de corrente levam ao aquecimento dos condutores que podem fundir do anel de curto-circuito. O rompimento de uma barra pode acarretar no sobreaquecimento das barras adjacentes pela redistribuição das correntes do rotor, o que pode levar ao agravamento do problema com o tempo [7].

O impacto dos principais tipos de faltas no desempenho do motor de indução trifásico pode ser obtido através do método dos elementos finitos que permite determinar desde a variação da densidade do fluxo magnético através do entreferro até o torque eletromagnético desenvolvido pela máquina em diferentes condições de operações. O *software* livre largamente utilizado para a modelagem de máquinas elétricas através do método dos elementos finitos é o *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) [8].

Neste sentido, este artigo tem como objetivo analisar o efeito do rompimento das barras do rotor no desempenho de um motor de indução trifásico através do método dos elementos finito. Para tanto será calculado a densidade de

fluxo magnético, a densidade de corrente no rotor, o torque eletromagnético e a corrente nas barras do rotor.

II. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A. Introdução Teórica

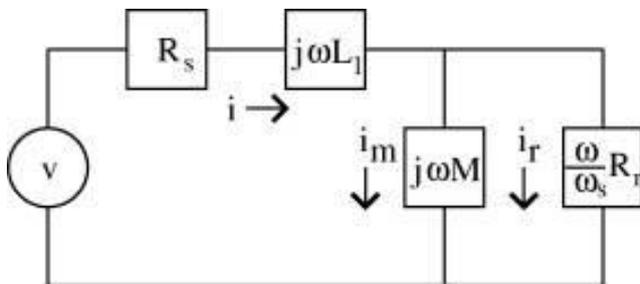
As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e magnéticos acoplados entre si. O circuito magnético é o caminho para o fluxo magnético, bem como um circuito elétrico estabelece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas, os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos resultando na conversão eletromecânica de energia. Quanto aos aspectos construtivos, há dois tipos diferentes de rotores na máquina de indução que podem ser colocados no interior do estator: rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado. O rotor gaiola de esquilo é constituído por barras condutoras paralelas sobre uma superfície cilíndrica, onde as extremidades são curto-circuitadas por dois aros [9, 10].

A troca de energia entre o estator e o rotor de uma máquina de indução é feita através do entreferro. O campo magnético girante criado no estator induz um campo girante no rotor que se opõe ao primeiro. Este comportamento é semelhante ao que ocorre no transformador e, portanto, o circuito equivalente de uma máquina de indução será análogo ao circuito equivalente de um transformador. A Figura 1 ilustra o circuito equivalente simplificado por fase de um motor de indução trifásico com seus parâmetros em função da frequência w aplicada em rad/s e da frequência de escorregamento w_s em rad/s [11]. A frequência de escorregamento corresponde à diferença entre a frequência mecânica do rotor e a frequência elétrica aplicada, ou seja [11],

$$w_s = w - p_p w_r \quad (01)$$

Onde: w é a frequência elétrica aplicada em rad/s ; p_p é o número de pares de polo da máquina; w_r é a velocidade mecânica do rotor em rad/s .

Figura 1. Circuito equivalente simplificado por fase do motor de indução trifásico [11]. V é a tensão de alimentação, R_s é a resistência do enrolamento do estator, L_l é a indutância do enrolamento do estator, M é indutância mútua entre o estator e rotor, R_r é a resistência das perdas no ferro, i_r é a corrente do rotor.



O circuito equivalente por fase é um circuito elétrico que descreve o comportamento em regime estacionário (frequência elétrica constante e velocidade mecânica constante) de um motor de indução. Os diversos fenômenos

físicos envolvidos no funcionamento do motor são representados através de resistências e indutâncias.

O comportamento do torque em função da frequência de escorregamento pode ser calculado a partir do circuito equivalente da Figura 1. Inicialmente, sabe-se que a potência mecânica do motor (P_{mec}) é o produto do torque com a velocidade mecânica do rotor, ou seja,

$$P_{mec} = 3 \left(\frac{p_p w_r}{w_s} \right) R_r |i_r|^2 \quad (02)$$

Portanto, o torque (T) é a razão da potência mecânica do motor pela velocidade mecânica,

$$T = 3 \left(\frac{p_p R_r}{w_s} \right) |i_r|^2 \quad (03)$$

É possível observar que a expressão do torque está em função da frequência de escorregamento. Isto corresponde a um artifício no sentido de acomodar o movimento do rotor em relação à velocidade síncrona e permitir de uma maneira razoável a simulação do motor através do software FEMM [11]. Desta forma, o cálculo do torque do motor de indução trifásico pode ser feito através de um conjunto de simulações estáticas, mas com a frequência aplicada (w) igual à frequência de escorregamento (w_s) [11, 12].

B. Modelo do Motor de Indução no software FEMM

O modelo do motor de indução trifásico utilizado neste trabalho foi obtido através de modificações no formato da geometria das barras do rotor e das características elétricas do motor disponível em [6, 11] como pode ser observado na Figura 2. Após a definição da geometria do motor de indução foram inseridos os materiais, as condições de contorno e a corrente elétrica em cada circuito definido para representar os enrolamentos do estator, conforme mostra a Tabela 1. Durante a simulação foi aplicado correntes trifásicas em cada uma das fases do estator com módulo de 1 A defasadas de 120° uma das outras.

Tabela 1: Características do motor de indução

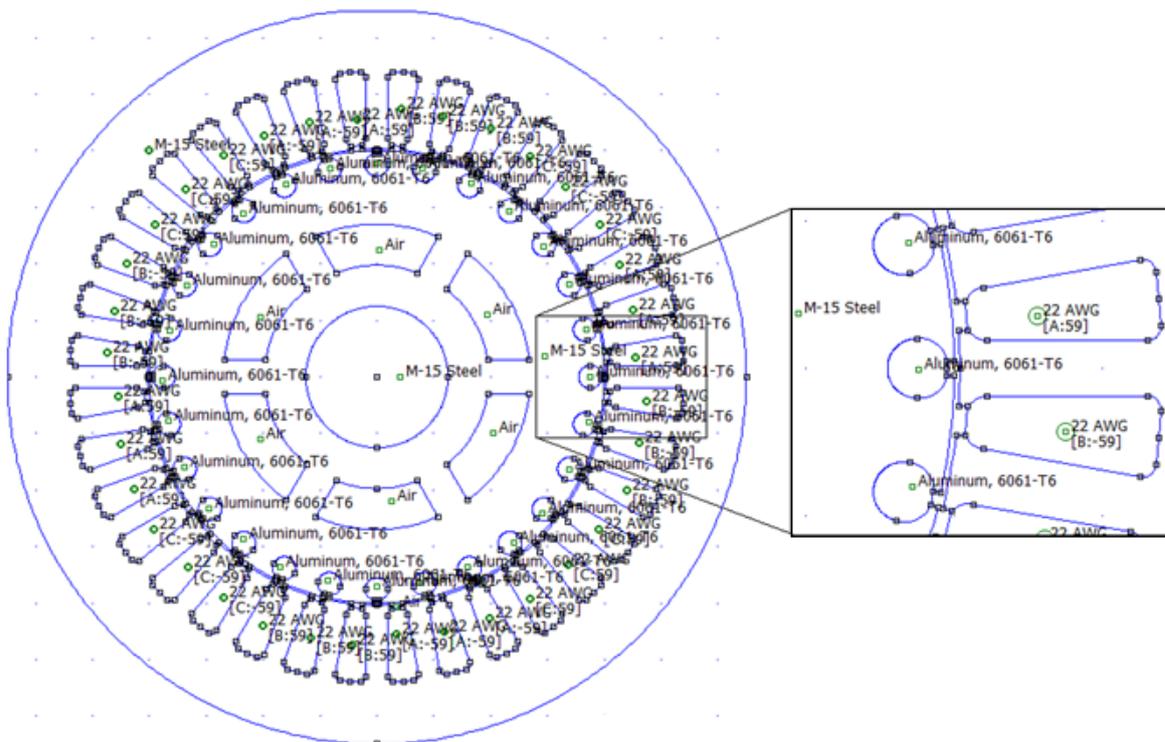
Características do motor	Dados
Potência	7,5 HP
Tensão/Conexão	220V/Triângulo
Espiras	59
Ranhuras no estator	24
Ranhuras no rotor	28
Espaçamento entreferro	0,375 cm
Rotor	M15 steel
Barras do rotor	Aluminum 6061 T6
Estator	M15 steel
Fio do estator	Cu 22 AWG

III. RESULTADOS

A. Motor de Indução Trifásico sem Falhas

O funcionamento do motor de indução trifásico foi simulado com o software FEMM e com o auxílio da linguagem de programação gratuita *LuaEdit*, o qual permite implementar códigos que interajam com as ferramentas do

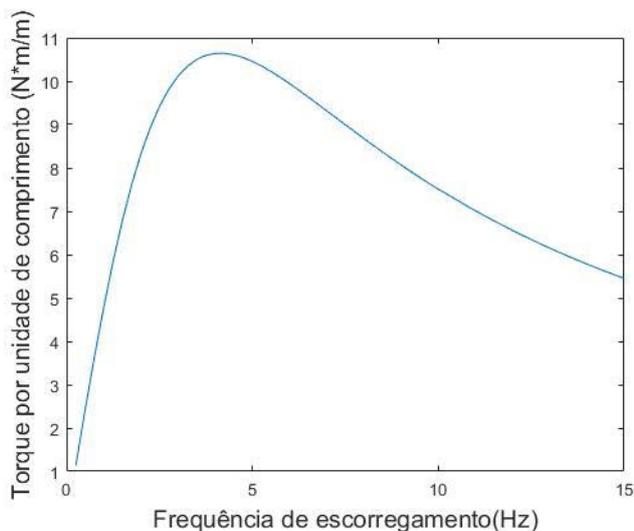
Figura 2: Motor de indução trifásico sem falhas utilizado para simulação no *software* FEMM com uma ampliação ilustrando as ranhuras do rotor e do estator, os materiais e os circuitos representando os enrolamentos do estator.



do *software* FEMM.

O torque em função da frequência de escorregamento foi determinado e está ilustrado na Figura 3. É possível observar que o seu comportamento por unidade de comprimento apresentou uma curva típica para o funcionamento do motor elétrico de indução [9]. Além disto, para uma frequência de escorregamento de aproximadamente de 4,25 Hz é possível observar um torque máximo de cerca de 10,64 N * m/m.

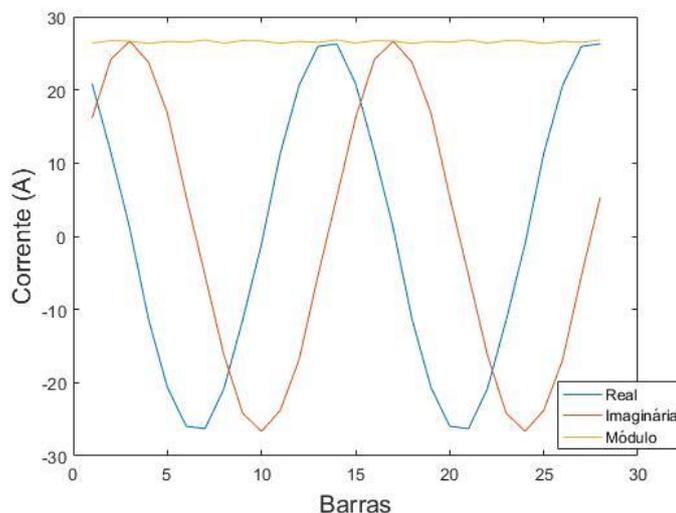
Figura 3: Torque por unidade de comprimento ($N * m/m$) do motor de indução trifásico sem falhas.



A intensidade da corrente induzida nas barras do rotor também foi determinada, conforme mostra a Figura 4. Como esperado, a parte real e a parte imaginária apresentam um

comportamento senoidal com seus valores variando em cada barra. Entretanto, o módulo da corrente do rotor permanece constante com o valor de aproximadamente 26,5 A.

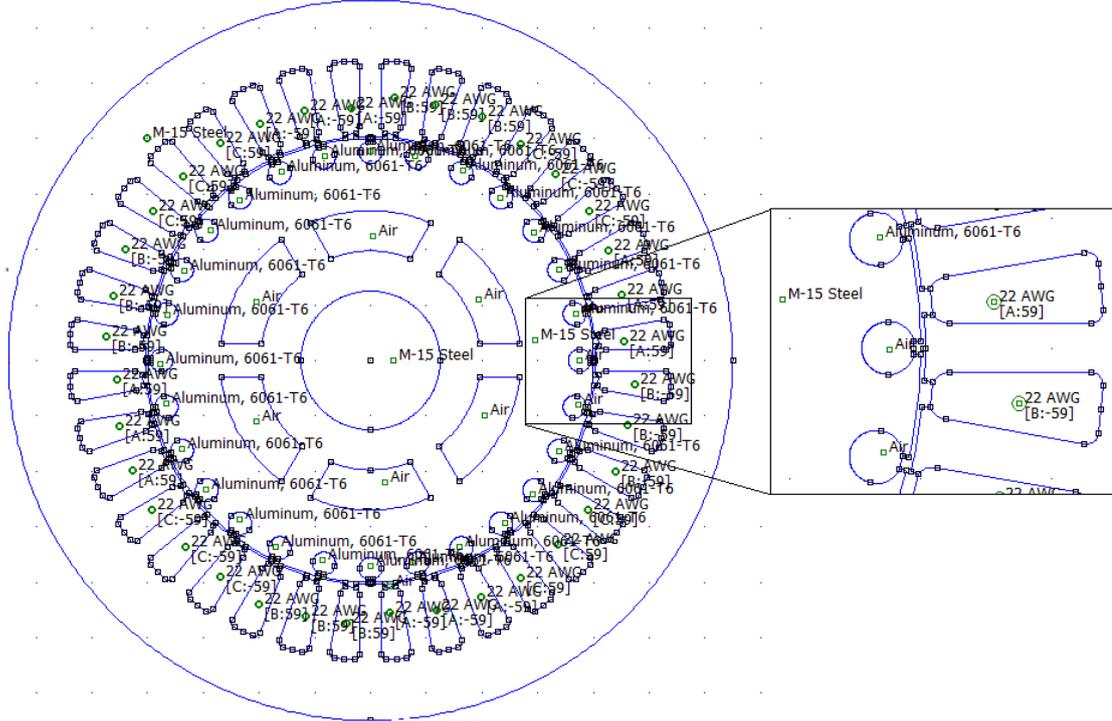
Figura 4: Módulo da corrente do rotor com suas componentes real e imaginária em cada barra para o motor de indução trifásico sem falhas.



B. Motor de Indução Trifásico com o Rompimento das Barras do Rotor

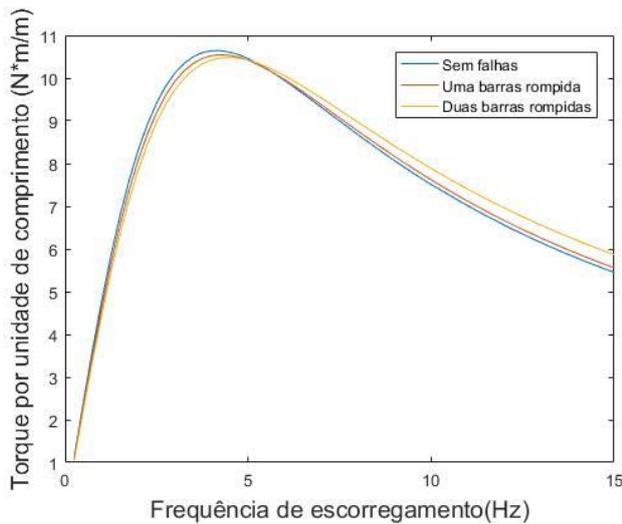
Após a análise do funcionamento do motor sem falta, foi considerado o rompimento das barras do rotor e seus impactos no comportamento da densidade de fluxo magnético, do torque eletromagnético e da corrente no rotor.

Figura 5: Motor de indução trifásico com o rompimento de duas barras do rotor com uma ampliação ilustrando a substituição do tipo de material da ranhura do rotor para representar este tipo de falha no *software* FEMM.



Para representar este tipo de falha, o rompimento de duas barras do rotor do motor de indução trifásico é ilustrado na Figura 5. No *software* FEMM este rompimento é representado através da substituição do tipo de material que constitui a barra do rotor (*Aluminium 6061 T6*) por ar (*Air*). Com isso, não haverá tensão induzida e, conseqüentemente, corrente induzida nas barras do rotor.

Figura 6: Torque por unidade de comprimento do motor de indução trifásico sem falhas e com o rompimento de barras do rotor.

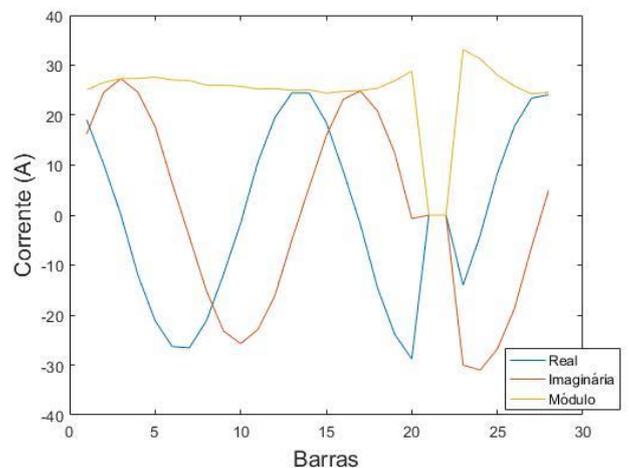


O torque desenvolvido pelo motor de indução com uma e duas barras rompidas foi calculado e comparado com a curva do torque do motor sem falhas (Figura 6). De acordo este gráfico, houve uma diminuição no valor do toque máximo do

motor de indução trifásico quando ele apresenta uma e duas barras rompidas. Tal alteração pode ser explicado pelo fato de ter ocorrido uma redução na corrente induzida nas barras do rotor, Figura 7. Por exemplo, quando foi considerado o motor sem falha a corrente induzida nas barras do rotor era em módulo 26,5A constantes, enquanto na simulação com duas barras rompidas houve um pico de 33,1A.

Além disso, é possível observar também através do gráfico do torque que o rompimento das barras pode levar a um aumento do torque de partida do motor, mas tal acréscimo não é benéfico, uma vez que a distribuição de densidade de fluxo não simétrica provoca trepidações no motor o que, caso não seja corrigido, causa sérios danos aos rolamentos e ao mancal da máquina.

Figura 7: - Módulo da corrente do rotor e suas componentes real e imaginária de cada barra para o motor com duas barras rompidas.



Analisando a Figura 7, nota-se ainda que há uma descontinuidade no valor da corrente nos locais onde houve o rompimento das barras. Esse comportamento pode ser melhor entendido através da análise do gráfico da densidade de fluxo magnético e da densidade de corrente que o *software* FEMM calcula com alta precisão [11]. Na Figura 8 é ilustrado a distribuição da densidade de fluxo na geometria do motor de indução trifásico sem falhas (Figura 8.a) e com o rompimento de duas barras (Figura 8.b) e verifica-se que na região entre as duas barras rompidas há uma grande variação na densidade de fluxo magnético.

Esta variação da densidade de fluxo magnético é refletida na tensão induzida nas barras do rotor e pode ser percebida na comparação entre o gráfico da densidade de corrente do rotor do motor sem falhas (Figura 9.a) e com o motor com duas

barras rompidas (Figura 9.b). Isto é, enquanto o módulo da densidade de corrente no rotor do motor sem falhas é praticamente uniforme na ordem de $3,758 \text{ MA/m}^2$ no motor com as duas barras rompidas este módulo varia entre $3,461 \text{ MA/m}^2$ a $5,058 \text{ MA/m}^2$. Desta forma, os elevados valores de corrente na vizinhança das barras rompidas levam ao aquecimento dos condutores vizinhos que podem fundir e solta-se do anel de curto-circuito. Portanto, o rompimento de uma barra pode acarretar no sobreaquecimento das barras adjacentes pela redistribuição das correntes do rotor, o que pode levar ao agravamento do problema com o tempo caso não seja detectado e solucionado [6].

Figura 8: Distribuição da densidade de fluxo magnético no motor de indução trifásico: (a) sem falhas; (b) com o rompimento de duas barras do rotor.

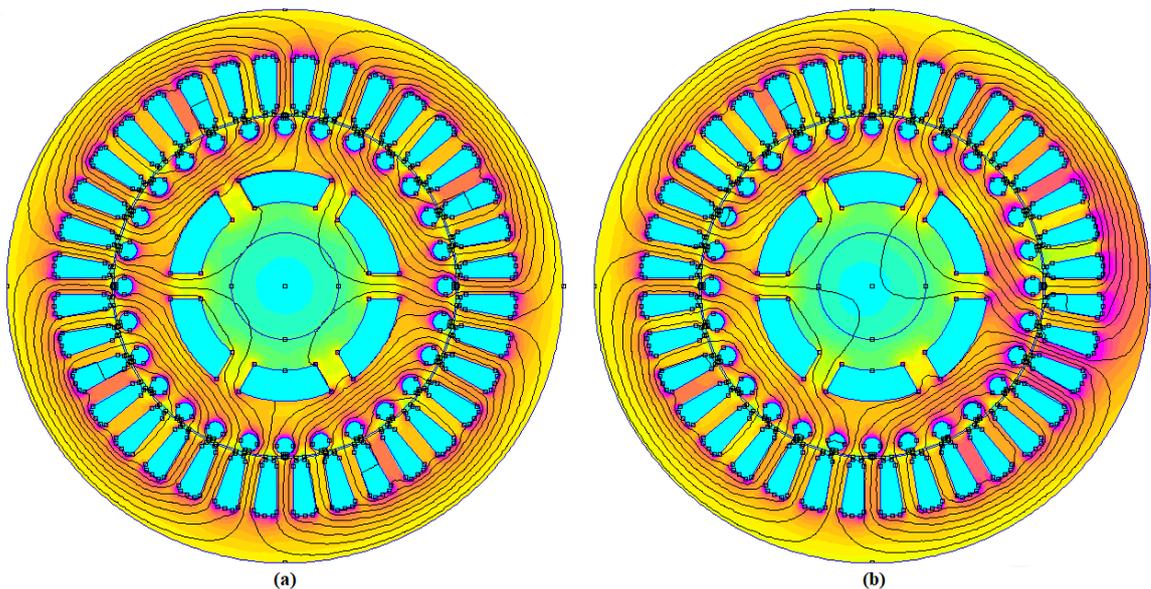
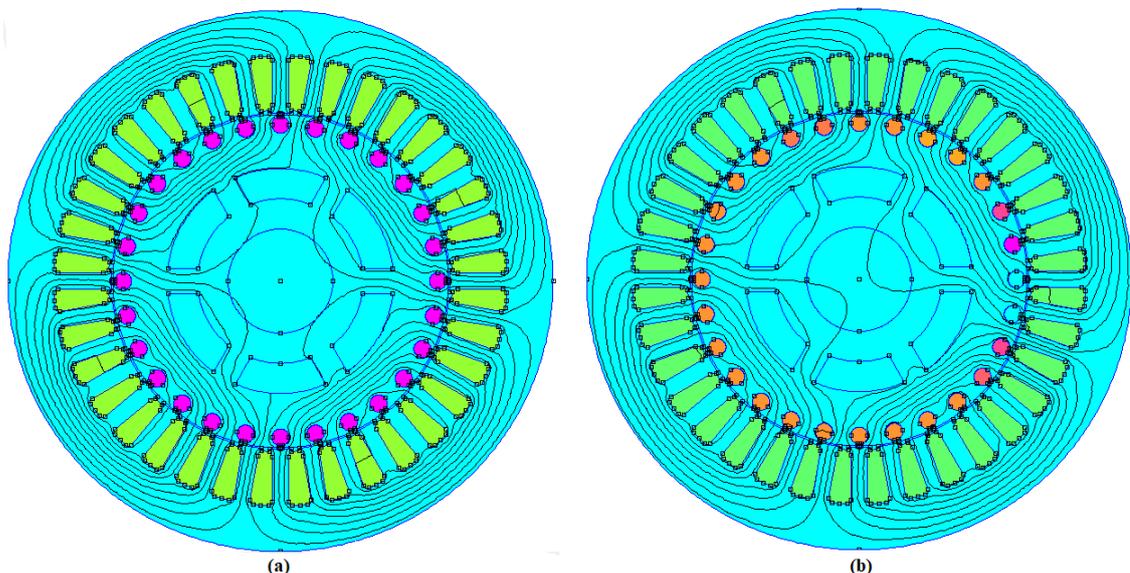


Figura 9: Densidade de corrente no motor de indução trifásico: (a) sem falhas; (b) com o rompimento de duas barras do rotor.



IV. CONCLUSÃO

O modelo eletromagnético do motor de indução trifásico foi analisado através do método dos elementos finitos utilizando o *software* FEMM e seu desempenho eletromagnético foi analisado quando sujeito ao rompimento de uma e duas barras do rotor. A curva do torque por unidade de comprimento obtida indica que as inserções destas falhas ocasionam a diminuição tanto do torque máximo quanto do torque de partida. No que diz respeito ao módulo da corrente do rotor do motor, houve uma variação sensível na amplitude de valores de corrente encontrados nas barras do rotor. Além disto, foi observado uma modificação na distribuição da densidade de fluxo magnético e na densidade de corrente no motor quando sujeito a este tipo de falha. Esta modificação da densidade de fluxo magnético é refletida na tensão induzida nas barras do rotor. Isto é, enquanto o módulo da densidade de corrente no rotor do motor sem falhas é praticamente uniforme na ordem de $3,758 \text{ MA/m}^2$, no motor com as duas barras rompidas este módulo varia entre $3,461 \text{ MA/m}^2$ a $5,058 \text{ MA/m}^2$. Desta forma, os elevados valores de corrente na vizinhança das barras rompidas podem levar ao aquecimento dos condutores vizinhos que podem fundir e solta-se do anel de curto-circuito. Portanto, o rompimento de apenas uma barra pode acarretar no sobreaquecimento das barras adjacentes pela redistribuição das correntes do rotor, o que pode levar ao agravamento do problema com o tempo caso não seja detectado e solucionado.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. K. Kammoun, N. B. Hadj, M. Ghariani, Induction Motor Finite Element Analysis for EV Application, Torque Ripple and Inter-turn circuit. *J. Electrical Systems* 11-4 (2015): 447 – 462.

[2] A. Goedel, Estimativa de Conjugado de Carga Aplicado em Eixos de Motores de Indução Trifásicos Através de Redes Neurais Artificiais. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica), UNESP, Bauru, 2003.

[3] ELETROBRAS, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Acedido em 20 de Agosto de 2019, em: <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={F BFB8D50-65B6-4135-9477-B0B2711D7AD8}>.

[4] E. G. Marra, J. A. Pomolio, Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando com Tensão Regulada e Frequência Constante, 30 SBA Controle & Automação Vol. 11 no. 01 / Jan., Fev., Mar, Abril de 2000.

[5] N. de M. Nascimento, Detecção e Classificação de Falhas de Curto-circuito em Geradores de Indução Aplicados em Geração Eólica utilizando Aprendizado de Máquina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Fortaleza, 2018.

[6] J.R Guzman-Sepulveda, R. Guzman-Cabrera, Evaluation of electromagnetic performance of emerging failures in electrical machines using computational simulation. *Electr Eng* (2018) 100:1491–1496.

[7] M. Rigoni, Desenvolvimento de Um Sistema de Detecção e Avaliação de Faltas em geradores Síncronos Por Meio do Campo Magnético Externo. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

[8] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics: Version 4.2: User's Manual.*, 2015. Acedido em 09 de Abril de 2019, em: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>.

[9] A. E. Fitzgerald, Jr. C. Kingsley, S. D. Umans, *Electric Machinery*. 6ªed., McGraw-Hill Inc, New York, 2003. 599p.

[10] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas/* Stephen J. CHAPMAN; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2013.

[11] D. C. Meeker, *Finite Element Method Magnetics: Induction Motor Example, Version 4.2. 2004.* Acedido em 20 de Agosto de 2020, em: <http://www.femm.info/wiki/InductionMotorExample>.

[12] F. T. Oliveira, M. P. Donsión, A Finite Element Model of an Induction Motor Considering Rotor Skew and Harmonics. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 2017. Málaga, Espanha, v.1, n. 15, p-1-4, Abr 2017. ISSN 2172-038 X.