

# FEM Applied to Evaluation of the Influence of Electric Field on Design of the Stator Slots in PMSM

S. Stefenon, and A. Nied, *Member, IEEE*

**Abstract**—The application of software for the design of electrical equipment has been increasingly used to improve its efficiency. In the project of electric motors the definition of the design of the stator slots is an extremely important feature, since the stator windings are accommodated in this place and for this reason there is a large concentration of electric field. The electric field intensity is usually associated with the presence of faults and must therefore be investigated. Through the Finite Element Method (FEM) it is possible to simulate electric field on surfaces and different geometries. In this paper, an evaluation of electric field will be presented through the variations of design of the stator slots of a Permanent-Magnet Synchronous Machine (PMSM) to evaluate the most efficient profile for this application.

**Index Terms**—Finite Elements. Permanent-magnet Synchronous Machine. Stator Slots. Simulation Software.

## I. INTRODUÇÃO

A eficiência no sistema elétrico vem sendo melhorada com o passar dos anos, cada vez mais se procuram utilizar materiais e métodos de reduzam o consumo de energia [1]. Além da necessidade de produzir produtos com maior eficiência o projetista deve desenvolver equipamentos que sejam robustos evitando a necessidade de manutenção corretiva e reposição de componentes que possuam falhas em campo [2]. Para entender os efeitos das grandezas elétricas sobre os equipamentos na fase de projeto, alguns softwares podem ser utilizados para simulação do estresse, ao qual o equipamento será exposto [3].

O método de elementos finitos do inglês *Finite Element Method* (FEM) vem sendo usado com sucesso para simulação de condições adversas sobre equipamentos elétricos. O software COMSOL *Multiphysics* apresenta uma plataforma simples para simulação através do FEM e será utilizado neste artigo para simulação de variações no projeto das laminas do estator de uma máquina elétrica de ímãs permanentes.

S. F. Stefenon, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (doutorado), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brazil. stefano@uniplages.edu.br.

A. Nied, professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brazil.

## A. Aplicações

Muitos pesquisadores têm utilizado o FEM para avaliação de condições elétricas ou mecânicas sobre o motor [4]. O trabalho de Fonteyn et al. [5] apresenta um estudo sobre o efeito da magnetostrição e do estresse eletromagnético no ferro em máquinas de indução através do método de elementos finitos. Utilizando o mesmo método o trabalho de Parreira et al. [6] mostram uma avaliação de uma Máquina de Relutância Comutada.

Zhang et al. [7] apresentaram um novo método para análise das ranhuras em motores de indução, em que um fator de distorção é introduzido para o cálculo do FEM, em vista que tradicionalmente o FEM aplicado tem alto custo computacional. Torac, Tutelea e Boldea [8] também apresentaram um estudo sobre as variações no projeto do motor utilizando FEM para avaliar o nível de saturação da máquina.

Uma aplicação específica para Motor Síncrono de Ímãs Permanentes do inglês *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM), que é o foco deste artigo, foi realizada no trabalho de Meessen et al. [9], em que é calculada a indutância através do fluxo nos eixos  $d$  e  $q$  a partir do FEM.

É possível avaliar motores monofásicos do tipo PMSM em relação a variação do *gap* para obter um bom torque de partida [10]. A partir destas análises usando um critério que leva em conta o torque por unidade de corrente do estator, projetasse um produto com maior eficiência [11].

O projeto ótimo de dispositivos eletromagnéticos para PMSM pode ser avaliado através de uma análise do FEM, ao qual se avalia parâmetros significativos usando o gradiente de diferença entre as saídas do modelo analítico e as obtidas com o FEM. Os parâmetros são utilizados para construir uma resposta em um espaço de dimensão reduzido em busca de um projeto ótimo [12].

O PMSM está sendo vastamente estudado e utilizado, pois possui aplicação para motorização elétrica de veículos urbanos híbridos [13]. No trabalho de Mai et al. [14] uma avaliação do design do PMSM é apresentado utilizando um software de otimização através do método SQP (*Sequential Quadratic Programming*), neste trabalho o FEM foi aplicado com sucesso para o projeto de um motor integrado com uma roda de 15" de um veículo elétrico. Em [15] a variação do design dos slots através de um processo de otimização também é apresentada utilizando FEM para o projeto de um motor equivalente de uma motocicleta de 250cc. Uma avaliação

completa do PMSM é discutida no Petkovska e Cvetkovski [16] comparando os métodos de simulação com cálculos analíticos e experimentais.

Avaliações de falhas nos enrolamentos do estator do PMSM a partir da análise do FEM podem melhorar o monitoramento de saúde de motores e diagnóstico de falhas [17]. No trabalho de Kim *et al.* [18] é apresentado um estudo a partir do FEM focado na robustez para o torque aplicado a veículos elétricos híbridos de grande porte em que as características após a desmagnetização são analisadas.

O diagnóstico de falhas em PMSM usando FEM também pode ser realizado através análise das harmônicas, em que a falha causa um aumento na componente harmônica [19]. Além disto é possível aplicar técnicas como redes neurais artificiais para complementar esta análise [20]. Hrabovcová *et al.* [21] também apresentaram a aplicação de FEM para avaliação de parâmetros de desempenho no PMSM em relação a diferença de enrolamento concentrado e distribuído.

No PMSM o projeto das ranhuras tem grande impacto na eficiência do motor Li *et al.* [22] em seu estudo avaliaram o desempenho na partida destes motores de alta tensão utilizando FEM. Bakhtiarzadeh, Polat e Ergene [23] realizaram uma avaliação do design de PMSM utilizando FEM em motores de elevadores em relação as componentes harmônicas, número de ranhuras e seu passo fracionado.

Com base na literatura e nas demandas de projetos de máquinas com alta eficiência, o objetivo geral deste estudo é avaliar a influência de variações no design das ranhuras do estator de um motor síncrono de ímãs permanentes. Para esta avaliação serão comparadas possíveis variações de design e sua influência sobre a distribuição de campo elétrico utilizando o método de elementos finitos para esta comparação.

A seguir nesta seção serão apresentados os cálculos necessários para o projeto de um estator de um motor elétrico do tipo PMSM. No capítulo 2 serão apresentados os materiais considerados para realização das simulações, assim como o procedimento realizado para configuração da avaliação e amostras selecionadas para serem analisadas. Em sequência, no capítulo 3 serão discutidos os resultados e ao fim do capítulo serão avaliadas as variações com uma análise específica em uma seção transversal da base do estator e também em um dente da ranhura do estator. Ao fim do trabalho uma conclusão será discutida com base nas análises realizadas.

**B. Geometria da Máquina**

O motor elétrico tipo PMSM pode ser analisado em partes, ou seja, dividido em regiões conforme pode ser visualizado na Fig. 1. Para esta figura tem-se:  $d_{sb}$  – profundidade do estator,  $s_{st}$  – profundidade dos dentes do estator,  $g$  – profundidade do gap,  $d_m$  – profundidade do ímã permanente,  $d_{rb}$  – profundidade do rotor,  $d_i$  – profundidade da região inerte,  $r_{rs}$  – raio do eixo do rotor. Todas estas variáveis, com exceção do raio do rotor, podem ser ajustadas para alterar o design da máquina e melhorar sua eficiência.

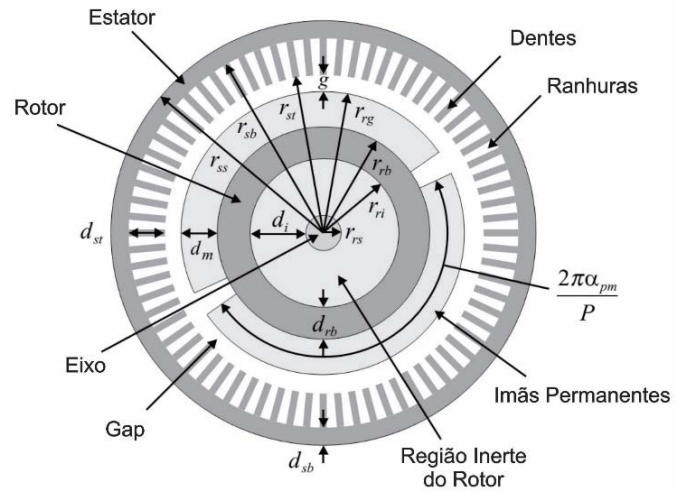


Fig. 1. Seção transversal do PMSM [24].

A partir destes valores é possível calcular:  $r_{ri}$  – raio da região inerte do rotor,  $r_{rb}$  – raio do fundo do rotor,  $r_{rg}$  – raio do entreferro do rotor,  $r_{st}$  – raio do dente do estator,  $r_{sb}$  – raio da região inerte do estator,  $r_{ss}$  – raio do invólucro do estator (usado para proteção, resistência mecânica e transferência térmica).

Na Fig. 2 é apresentado um dente de uma ranhura do estator e suas dimensões, as variáveis deste são:  $S_s$  – número de ranhuras,  $\theta_{ti}$  – ângulo até a ponta do dente em relação ao raio  $r_{st}$ ,  $\theta_{st}$  – ângulo até a ranhura em relação ao raio  $r_{st}$ ,  $r_{si}$  – raio interno do dente,  $\theta_{ti}$  – ângulo até o raio  $r_{si}$ ,  $\theta_{tb}$  – ângulo até o raio  $r_{sb}$ ,  $w_{tb}$  – largura da base do dente,  $d_{tb}$  – profundidade da base do dente,  $d_{tte}$  – profundidade até a borda do dente,  $d_{ttc}$  – profundidade do centro da ponta dos dentes.

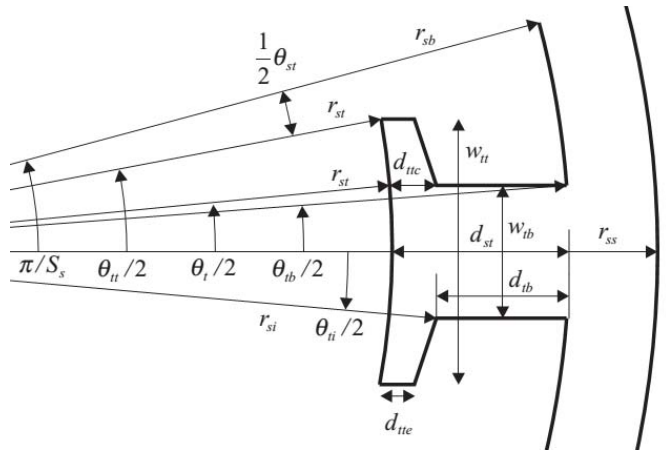


Fig. 2. Dimensões da ranhura e dentes do estator [24].

Com isto é possível calcular:

$$r_{ri} = r_{rs} + d_i \tag{1}$$

$$r_{rb} = r_{ri} + d_{rb} \tag{2}$$

$$r_{rg} = r_{rb} + d_m \tag{3}$$

$$r_{st} = r_{rg} + g \quad (4)$$

$$r_{si} = r_{st} + d_{ttc} \quad (5)$$

$$\theta_t = 2\pi\alpha_t/S_s \quad (6)$$

$$\theta_{tt} = 2\pi\alpha_{tt}/S_s \quad (7)$$

$$\theta_{st} = 2\pi/S_s - \theta_{tt} \quad (8)$$

$$w_{tb} = 2r_{st}\sin(\theta_t/2) \quad (9)$$

$$w_{tt} = 2r_{st}\sin(\theta_{tt}/2) \quad (10)$$

$$r_{sb} = \sqrt{(w_{tb}/2)^2 + (r_{st}\cos(\theta_t/2) + d_{tb} + d_{ttc})^2} \quad (11)$$

$$\theta_{tb} = 2 \cdot a \cdot \sin\left(\frac{w_{tb}}{2r_{sb}}\right) \quad (12)$$

$$d_{st} = r_{sb} - r_{st} \quad (13)$$

$$r_{ss} = r_{sb} + d_{sb} \quad (14)$$

No estator o fluxo entra e sai das ranhuras com direção tangencial [24]. Nas ranhuras do estator se acomodam os condutores que são o foco deste estudo. Na Fig. 3 é apresentada em corte uma aproximação retangular da ranhura na qual também pode ser visualizado os dentes das ranhuras do estator.

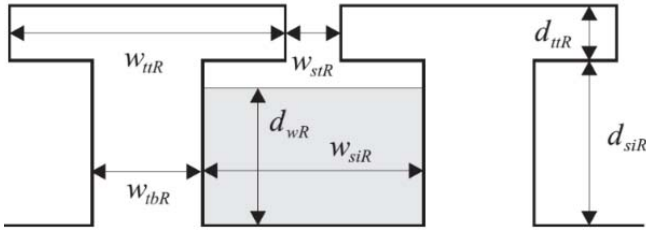


Fig. 3. Aproximação retangular da ranhura do estator da máquina [24].

Para cálculo de indutância de dispersão a geometria da ranhura é aproximada de um retângulo da mesma forma a largura da ponta do dente é aproximada como o comprimento circunferencial.

$$w_{ttR} = r_{st}\theta_{tt} \quad (15)$$

A profundidade retangular da ponta do dente é ajustada de modo que tenha a mesma área da seção transversal.

$$d_{ttR} = \frac{a_{tt}}{w_{ttR}} \quad (16)$$

A largura entre as pontas dos dentes é aproximada da distância circunferencial entre os dentes.

$$w_{stR} = r_{st}\theta_{st} \quad (17)$$

A largura das bases da ranhura do estator, onde se acomodam os enrolamentos, é a média da distância do comprimento da corda dos cantos internos.

$$w_{siR} = r_{si}\sin\left(\frac{\pi}{S_s} - \frac{\theta_{ti}}{2}\right) + r_{sb}\sin\left(\frac{\pi}{S_s} - \frac{\theta_{tb}}{2}\right) \quad (18)$$

Por fim, mantendo a área da ranhura e da base dos dentes, a profundidade e largura dos dentes devem obedecer às seguintes razões:

$$d_{siR} = \frac{a_{stt}}{w_{siR}} \quad (19)$$

$$w_{tbR} = \frac{a_{tb}}{d_{siR}} \quad (20)$$

## II. MATERIAIS E MÉTODO

### A. Características da Máquina

Com base nos cálculos apresentados na seção anterior, a especificação das dimensões geométricas fixas e do tipo de material a ser utilizado são apresentadas na Tab. I.

TABELA I CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E TIPOS DE MATERIAIS DA MÁQUINA		
Parâmetro	Unidade	Valor
Diâmetro externo ( $2 \cdot r_{ss}$ )	cm	16,6
Profundidade da ranhura ( $d_{siR}$ )	mm	23,8
Raio do rotor ( $r_{rs}$ )	mm	34,8
Gap (g)	mm	2,28
Profundidade do estator ( $d_{sb}$ )	mm	13,2
Profundidade do rotor ( $d_{rb}$ )	mm	14,8
Número de polos (P)	-	4
Número de ranhuras ( $S_s$ )	-	24
Material de estator	-	M47
Material de rotor	-	M36
Tipo de condutor	-	Alumínio
Material dos ímãs permanentes	-	SmCo17-R28

Design 1 from Pareto-Optimal Front [24].

Para fins de análise foi considerado um preenchimento total das ranhuras com os enrolamentos, ou seja,  $d_{wR} = d_{siR}$ . Com base nestas dimensões o design da lamina do motor foi desenhado no software SolidWorks que é específico para este fim.

### B. Características do Material

Para avaliação através de simulação dos efeitos do campo elétrico foi considerado um motor padrão, as características dos materiais utilizados são apresentadas na Tab. II.

TABELA II  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS DA MÁQUINA

Aços Magnéticos – M47	Unidade	Valor
$s/r_i$	-	4
$B_{s,lim}/B_{r,lim}$	T	1,49
$\rho_s/\rho_r$	kg/m <sup>3</sup>	7590
Aços Magnéticos – M36	Unidade	Valor
$s/r_i$	-	2
$B_{s,lim}/B_{r,lim}$	T	1,34
$\rho_s/\rho_r$	kg/m <sup>3</sup>	7020
Condutor de Alumínio	Unidade	Valor
$c_t$	-	2
$J_{c,lim}$	M·A/m <sup>2</sup>	6,65
$\sigma_c$	M·Ω <sup>-1</sup> /m	37,7
$\rho_c$	kg/m <sup>3</sup>	2710
Ímãs Permanentes – SmCo17-R28	Unidade	Valor
$m_p$	-	3
$B_r$	T	1,1
$\chi_m$	-	0,094
$H_{lim}$	k·A/m	-1000
$\rho_m$	kg/m <sup>3</sup>	8300

### C. Ajuste Final de Parâmetros para Análise

Antes que seja realizada a simulação do equipamento é necessário especificar o grau de precisão de análise que se dá pela definição do modo de cálculo do software, em que quanto menor a área analisada maior sua precisão.

Neste trabalho foi considerado a malha no modo normal conforme apresentada na Fig. 4, esta configuração foi realizada devido haver pouca variabilidade da geometria da lamina do estator.

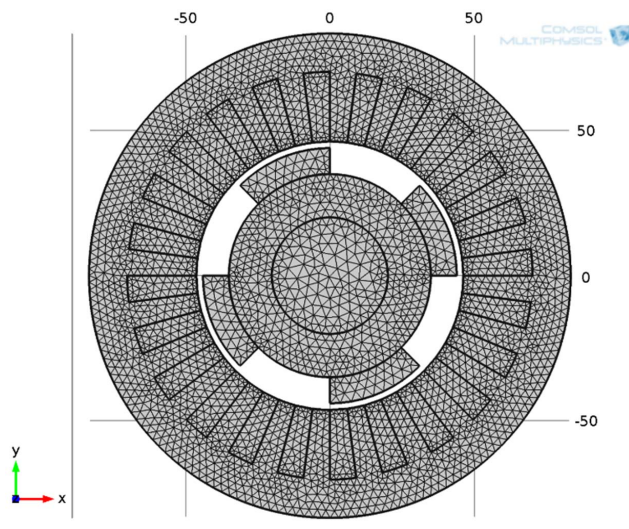


Fig. 4. Malha Normal de Pontos Nodais para Análise de Potencial.

### D. Amostras Analisadas

As amostras utilizadas para simulação foram desenvolvidas para avaliar as condições do campo elétrico devido a variações de design. Não foram considerados custos com material para confecção das laminas, sendo que o objetivo é determinar qual o melhor design para utilização em PMSM.

Todas as amostras analisadas foram dimensionadas com a largura dos dentes ( $W_{tbR}$ ) igual à largura das ranhuras ( $W_{stR}$ )

padronizando desta forma a análise.

A primeira amostra considerada “A” tem a ponta dos dentes igual à largura entre os dentes, nesta condição os dentes não mantêm as espiras sob pressão, sendo somente a pressão das próprias espiras que as mantêm fixas contrário a força centrífuga gerada pelo motor.

Na segunda amostra considerada “B” a diferença entre a ponta dos dentes ( $W_{stR}$ ) é igual a metade da largura da ranhura. A altura da profundidade do sobressalto do dente é igual a  $W_{stR}$  tornando o design simétrico. Na amostra “A” e “B” os raios foram considerados retos. Na amostra “C” e “D” foram realizadas variações das amostras “A” e “B” sendo incluídos raios nas bases das ranhuras e na ponta dos dentes conforme apresentado na Fig. 5.

O raio da base da ranhura foi considerado igual a 3mm e o raio da ponta dos dentes foi considerado igual a 1mm devido as características geométricas do desenho. As variações analisadas poderiam ser realizadas na prática tornando o projeto factível. As variações foram realizadas somente nas laminas do estator mantendo-se o rotor idêntico em todas as análises.

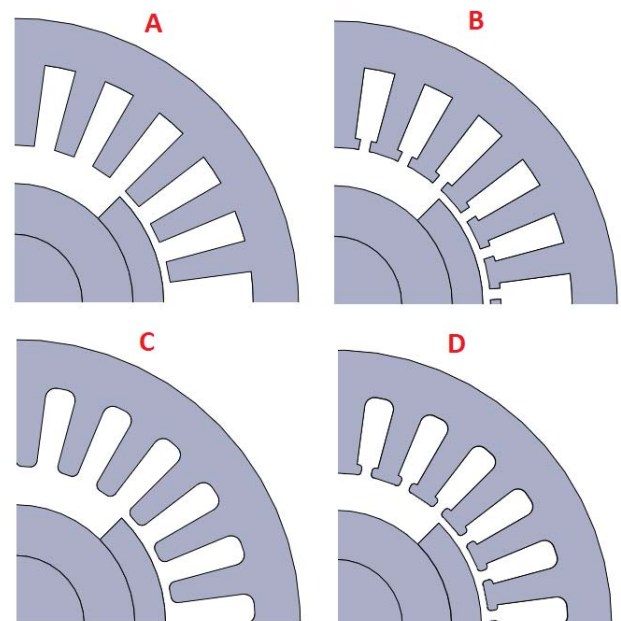


Fig. 5. Design das laminas do estator consideradas na análise: A) Com dentes e ranhuras retos; B) Com dentes e ranhuras retos e sobressaltos retos nos dentes; C) Com dentes e ranhuras arredondados; D) Com dentes e ranhuras arredondados e sobressaltos arredondados nos dentes.

## III. ANÁLISE

Considerando aplicação de potencial elétrico de 380VDC em condutores (com preenchimento total da ranhura), obtêm-se a distribuição de campo elétrico sobre a superfície das amostras consideradas conforme apresentado na Fig. 6. A variação de intensidade do campo elétrico é apresentada na Fig. 6. em cores, variando de vermelho (maior intensidade) para azul (menor intensidade de campo elétrico ou nulo no caso do estator).

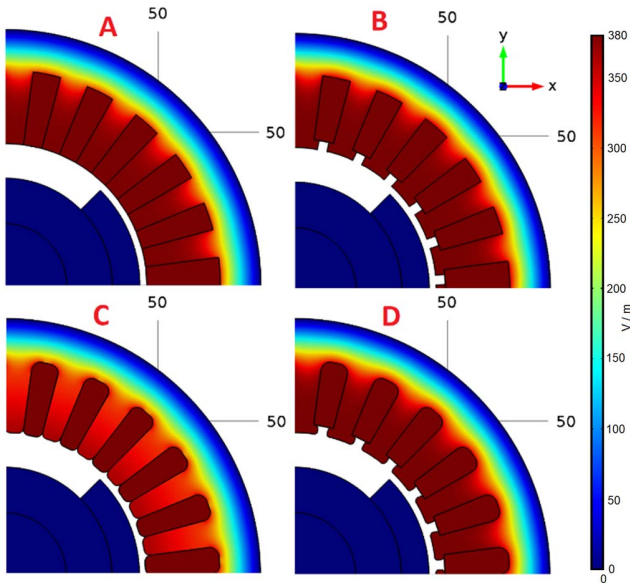


Fig. 6. Distribuição de Campo Elétrico aplicado sobre as amostras.

Nesta análise inicial percebe-se que a utilização de dentes (amostra B e D) em relação a ranhura reta (amostra A e C) tem pouca diferença na distribuição de campo elétrico. Na amostra C o campo elétrico é mais distribuído, esta condição seria melhor para máquina, visto que, a alta intensidade de campo elétrico em um local propensa o desenvolvimento de falhas.

Para uma avaliação pontual destas características foram analisadas as condições das ranhuras através análise da secção transversal, conforme pode ser visto na Fig. 7.

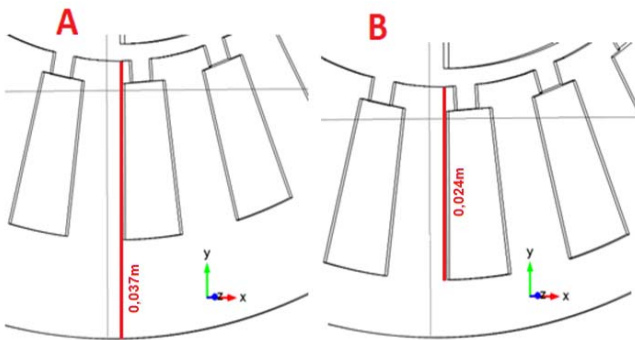


Fig. 7. Linha de análise de secção transversal da lamina do estator; A) Da ponta do dente a base do estator; B) Da ponta do dente a base da ranhura do estator.

A distância de 0,037m apresentada na figura Fig. 7 (A) corresponde a medição de distância da base do estator até a ponta de um dente do estator que encontrasse ao lado de uma ranhura. Na Fig. 7 (B) a distância de 0,024m corresponde à medição de distância da base da ranhura à ponta de um dente do estator ao lado desta ranhura.

A avaliação específica da condição do campo elétrico no estator é apresentada nas Fig. 8 em relação a análise da secção transversal da Fig. 7 (A). Na Fig. 9 é apresentada mais especificamente a avaliação sobre a ranhura do estator conforme secção transversal apresentada na Fig. 7 (B).

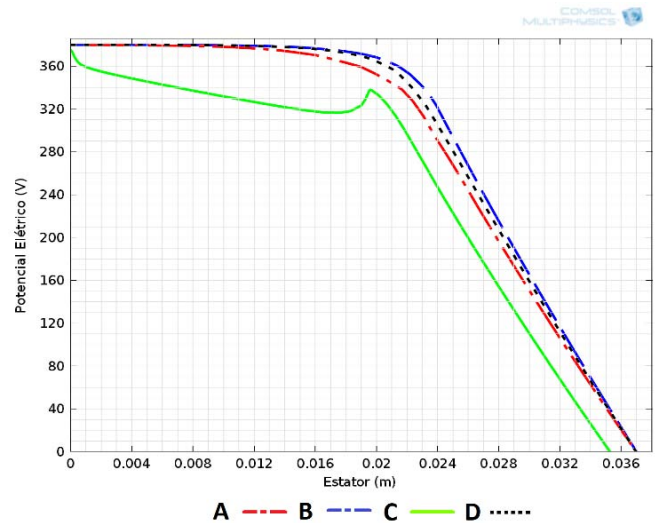


Fig. 8. Comparação da distribuição de potencial no estator considerando secção transversal total (referente a figura 7A).

A partir desta análise percebe-se que a pior condição é na amostra B, na qual o potencial elétrico em relação à distância (equivalente ao campo elétrico em V/m) é maior. Esta condição era esperada, em vista que o campo elétrico é maior em regiões que possuam pontas. Estas regiões possuem maior potencial aplicado, sendo que se mantêm a mesma proporção de potencial por distância (V/m). A presença de pontas nos dentes do estator também evidenciou esta condição, visto que o resultado da análise na amostra D também foi com alta intensidade de campo elétrico.

A utilização de pontas nos dentes na lamina do estator é comum em projetos de motores PMSM conforme apresentado no trabalho de Pisani Teixeira sobre a "metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de ímãs permanentes" [25]. Para observar melhor as diferenças de distribuição de campo elétrico nestes perfis a Fig. 9 traz esta distribuição somente na ranhura, conforme secção transversal da Fig. 7 (B).

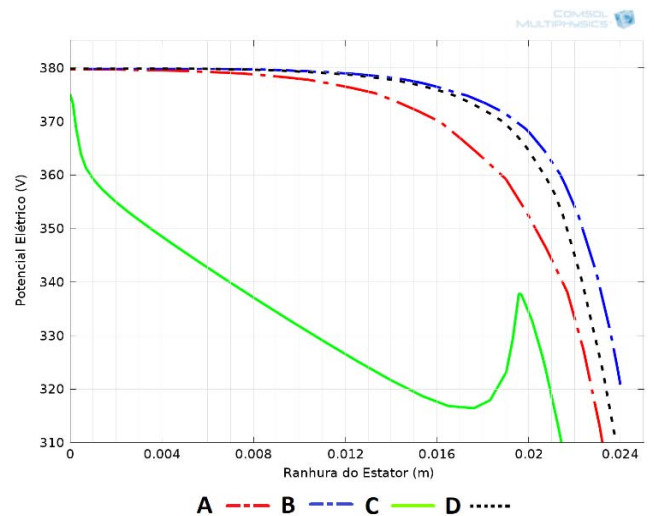


Fig. 9. Comparação da distribuição de potencial na ranhura do estator considerando secção transversal específica (referente a figura 7B).

## IV. CONCLUSÃO

A utilização de FEM para análise e projeto de equipamentos elétricos se mostrou uma excelente alternativa pois através desta é possível criar diversas variações de design e avaliá-las. A partir dos resultados percebeu-se que quanto mais simples o perfil melhor será para a máquina, visto que a variação de design com inclusão de sobressaltos nos dentes do estator pode aumentar a incidência de campo elétrico neste local.

O melhor design para distribuição de campo elétrico, conforme as análises do capítulo anterior, foi na amostra “C” que possui o formato mais simples de dentes do estator. Percebeu-se que a inclusão de saliências piora a distribuição de campo, sendo que nestas o campo se concentra e desta forma podem se tornar suscetíveis a falhas.

Os perfis mais simples das amostras “A” e “C” tiveram resultados melhores, com menor intensidade de campo que as amostras “B” e “D”. Comparando os resultados gerais, as melhores distribuições de campo foram encontradas nas amostras que possuem os cantos arredondados.

Técnicas ainda mais sofisticadas podem ser implementadas para melhorar a análise do PMSM como o algoritmo *deep learning neural network* integrado com a análise do FEM para avaliar defeitos magnéticos em ranhuras do motor [26].

## REFERÊNCIAS

- [1] L. F. Gutierrez Preciado, S. E. Vargas, J. F. Cervantes Alvarez, G. Torres Blanco and F. F. Ramos Corchado, "Simplifying the Design of Interactive Simulations of Deformable Objects," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 1, pp. 391-397, 2016. doi: 10.1109/TLA.2016.
- [2] W. E. Kuchenbecker and J. C. Teixeira, "Procedures to Determine Inductances of Permanent Magnet Generators," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 8, pp. 2646-2652, Aug. 2015. doi: 10.1109/TLA.2015.7332144
- [3] S. Frizzo Stefenon, J. R. de Oliveira, A. S. Coelho and L. H. Meyer, "Diagnostic of Insulators of Conventional Grid Through LabVIEW Analysis of FFT Signal Generated from Ultrasound Detector," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 884-889, 2017. doi: 10.1109/TLA.2017.7910202
- [4] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen and A. Cavagnino, "Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7672-7684, Oct. 2018. doi: 10.1109/TIE.2018.2801805
- [5] K. Fonteyn, A. Belahcen, R. Kouhia, P. Rasilo and A. Arkkio, "FEM for Directly Coupled Magneto-Mechanical Phenomena in Electrical Machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 8, pp. 2923-2926, Aug. 2010. doi: 10.1109/TMAG.2010.2044148
- [6] B. Parreira, S. Rafael, A. J. Pires and P. J. C. Branco, "Obtaining the magnetic characteristics of an 8/6 switched reluctance machine: from FEM analysis to the experimental tests," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1635-1643, 2005. doi: 10.1109/TIE.2005.858709
- [7] D. Zhang, L. Bu, C. He, R. An and T. Wu, "A modified 2-D multislice FEM for computing the airgap flux density of induction motor with skewed slots," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, Miami, FL, 2017, pp. 1-8. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002097
- [8] I. Torac, L. N. Tutelea and I. Boldea, "Closed slot induction machine inductances and rotor resistance characterization versus current and frequency via FEM," in *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, Brasov, 2017, pp. 275-280. doi: 10.1109/OPTIM.2017.7974983
- [9] K. J. Meessen, P. Thelin, J. Soulard and E. A. Lomonova, "Inductance Calculations of Permanent-Magnet Synchronous Machines Including Flux Change and Self- and Cross-Saturations," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 10, pp. 2324-2331, Oct. 2008. doi: 10.1109/TMAG.2008.2001419
- [10] L. I. Iepure, L. Tutelea and I. Boldea, "FEM analysis and control of a tapered airgap single phase PMSM," *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, 2008, pp. 241-248. doi: 10.1109/OPTIM.2008.4602373
- [11] L. Chang, A. R. Eastham and G. E. Dawson, "Permanent magnet synchronous motor: finite element torque calculations," *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, San Diego, CA, USA, 1989, pp. 69-73 vol.1. doi: 10.1109/IAS.1989.96633
- [12] S. Giurgea, D. Fodorean, G. Cirrincione, A. Miraoui and M. Cirrincione, "Multimodel Optimization Based on the Response Surface of the Reduced FEM Simulation Model With Application to a PMSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 9, pp. 2153-2157, Sept. 2008. doi: 10.1109/TMAG.2008.2000497
- [13] S. Henneberger, U. Pahner, K. Hameyer and R. Belmans, "Computation of a highly saturated permanent magnet synchronous motor for a hybrid electric vehicle," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 4086-4088, Sep 1997. doi: 10.1109/20.619671
- [14] H. C. M. Mai, R. Bernard, P. Bigot, F. Dubas, D. Chamagne and C. Espanet, "Optimal design of a PMSM using concentrated winding for application urban hybrid vehicle," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/VPPC.2010.5729015
- [15] G. Teixeira Paula, J. R. Boffino Almeida Monteiro, T. Eugenio Portes Almeida and M. Patricio Santana, "Different Slot Configurations for Direct-Drive PM Brushless Machines," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 3, pp. 634-639, March 2015. doi: 10.1109/TLA.2015.7069085
- [16] L. Petkovska and G. Cvetkovski, "FEM Based Simulation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Performance Characteristics," in *5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, 2006, pp. 1-5. doi: 10.1109/IPEMC.2006.4777986
- [17] J. Nerg, M. Niemela, J. Pyrhonen and J. Partanen, "FEM calculation of rotor losses in a medium speed direct torque controlled PM synchronous motor at different load conditions," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3255-3257, Sep 2002. doi: 10.1109/TMAG.2002.802127
- [18] K. C. Kim, S. B. Lim, D. H. Koo and J. Lee, "The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 3485-3487, Oct. 2006. doi: 10.1109/TMAG.2006.879077
- [19] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, M. Javan-Roshkhar and A. Zargham Nejad, "Static Eccentricity Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motor Using Time Stepping Finite Element Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4297-4300, Nov. 2008. doi: 10.1109/TMAG.2008.2001534
- [20] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim and Jung-Woo Park, "Improved parameter modeling of interior permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000. doi: 10.1109/20.877809
- [21] V. Hrabovcová, P. Rafajdus, P. Lehocký, P. Makyš and D. Moravčík, "Concentrated versus distributed winding in permanent magnet synchronous motors," in *19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, Dubrovnik, 2017, pp. 279-286. doi: 10.1109/EDPE.2017.8123246
- [22] W. Li, Z. Cao, J. Li, X. Zhang and J. Cao, "Influence of Magnetic slot Wedge Defect on Starting Performance of high voltage line-start permanent magnet synchronous motor," in *IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*, Dublin, 2017, pp. 1-3. doi: 10.1109/INTMAG.2017.8007833
- [23] H. Bakhtiarzadeh, A. Polat and L. T. Ergene, "Design and analysis of a permanent magnet synchronous motor for elevator

- applications," in *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov, 2017, pp. 293-298. doi: 10.1109/OPTIM.2017.7974986
- [24] P. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff and S. Pekarek, "Introduction to the Design of Electric Machinery," *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons, 2013, pp. 608. doi: 10.1002/9781118524336.ch15
- [25] Teixeira, F. H. P. "Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de ímã permanente-MSIP" (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo), 2006.
- [26] L. Jin, F. Wang and Q. Yang, "Performance analysis and optimization of permanent magnet synchronous motor based on deep learning," in *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056321.



**Stéfano Frizzo Stefenon**, graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (2012), especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade do Planalto Catarinense (2018), mestre em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela Universidade Regional de Blumenau (2015). Atualmente cursando

Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina. Professor no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), em cursos técnicos e de qualificação profissional. Professor na Universidade do Estado de Santa Catarina no curso de graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Professor e coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade do Planalto Catarinense. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com foco em classificação de isoladores, inspeção do sistema elétrico de potência, viabilidade técnica e econômica em atualização tecnológica industrial.



**Ademir Nied**, graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (1987), especialização em Automação Industrial pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1992), mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela

Universidade Federal de Minas Gerais (2007). De 2015-2016 realizou estágio pós-doutoral na University of Wisconsin-Madison, junto ao Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC), na área de controle avançado de máquinas elétricas, sob a supervisão do Prof. Robert D. Lorenz. Atuou profissionalmente na WEG Máquinas S.A. (1987-1989), na Empresa Brasileira de Compressores-EMBRACO (1990) e na Escola Técnica Tupy (1995-1997). Foi professor Colaborador do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina (1991-1993 e 1995-1996). Entre 1996-2008 foi professor Adjunto e desde 2008 atua como professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina.