



HAL
open science

Modelagem eletromagnética e cálculo do hot-spot em reatores do tipo shunt através do Método de Elementos Finitos em 2-D

Anderson S Nunes, Alvaro Portillo, Federico Portillo

► **To cite this version:**

Anderson S Nunes, Alvaro Portillo, Federico Portillo. Modelagem eletromagnética e cálculo do hot-spot em reatores do tipo shunt através do Método de Elementos Finitos em 2-D. IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting, Nov 2018, Salto Grande, Uruguay. 10.1109/EPIM.2018.8756419 . hal-02023927

HAL Id: hal-02023927

<https://hal.science/hal-02023927>

Submitted on 18 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modelagem eletromagnética e cálculo do *hot-spot* em reatores do tipo *shunt* através do Método de Elementos Finitos em 2-D

Anderson S. Nunes¹, Álvaro Portillo², Federico Portillo²

¹GeePs - Group of Electrical Engineering - Paris / CentraleSupélec
3 & 11 rue Joliot Curie, 91192 Gif sur Yvette, France

²Transformer Consultant - Brenda 5920, Montevideo, Uruguay

A complexa geometria de reatores tipo *shunt* torna sua análise de forma analítica pouco trivial. Assim, o Método de Elementos Finitos (MEF) 2-D surge como uma ferramenta robusta capaz de modelar esse tipo de geometria, através da resolução da equação de Poisson com simetria axissimétrica. Com o objetivo de validar esta metodologia, obtêm-se os valores de reatância indutiva para alguns reatores através do MEF 2 e 3-D. Os resultados obtidos são comparados entre si e com valores medidos. Então, propõe-se uma metodologia para modelar a distribuição do fator de *hot spot* ao longo da seção transversal do enrolamento, que permite analisar a diferença de temperatura devido as correntes induzidas pelo fluxo magnético de espraiamento em consequência dos entreferros.

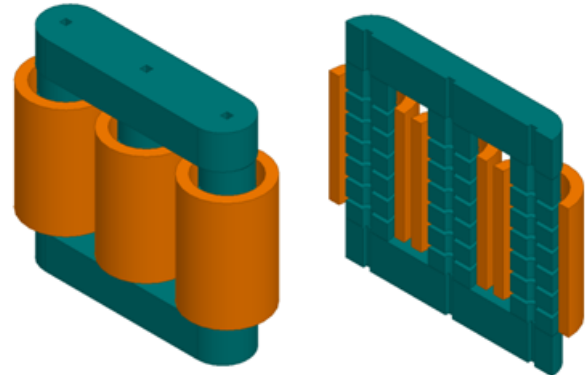
Index Terms—Reator *Shunt*, Método de Elementos Finitos, Reatância indutiva, fator de *hot spot*

I. INTRODUÇÃO

Os reatores tipo *shunt* se aplicam para compensar o efeito capacitivo das linhas de transmissão longas e de cabos subterrâneos. Caso este efeito capacitivo não seja controlado, este fato pode fazer com que ocorram efeitos de sobre tensão ao longo da linha ou cabo, podendo levá-los a falha [1].

Estes reatores podem ser monofásicos ou trifásicos, com núcleo de ar ou com núcleo formado através de entreferros [1], [2]. Além das características construtivas, as particularidades operacionais também os diferenciam dos transformadores [1], [2], [3], [4], [5].

Tendo em vista a complexidade geométrica do núcleo dos reatores do tipo *shunt*, sua análise através de métodos analíticos se torna complexa, principalmente devido às simplificações que precisam ser aplicadas. Por outro lado, considerando-se a larga aplicabilidade do Método de Elementos Finitos (MEF) na resolução de problemas eletromagnéticos [6], este se torna uma ferramenta suficientemente robusta para a modelagem de reatores tipo *shunt* proposta neste trabalho, pois permite considerar a geometria do núcleo com razoável precisão. A Fig. 1 apresenta uma geometria utilizada para a modelagem em 3-D através do MEF. Esta geometria está simplificada, se comparada com a geometria real, mas não ao ponto de influenciar nos resultados da modelagem em questão.



(a) Geometria completa.

(b) Geometria em corte.

Figura 1. Geometria básica de reator tipo *shunt* trifásico.

Em transformadores, as regiões mais quentes dos enrolamentos, conhecidas como *hot spot*, normalmente são verificadas nas regiões superiores. Este efeito ocorre porque há a uma concentração de perdas nos condutores nestas regiões, devido à componente radial de campo magnético, e devido ao fato de o óleo estar em uma temperatura mais elevada, se comparado com a região inferior dos enrolamentos.

Em reatores, o fluxo magnético de espraiamento devido aos entreferros, também conhecido como (*"fringing effect"*), pode causar correntes induzidas nos condutores dos enrolamentos e consequentemente regiões com temperaturas mais elevadas. Sendo assim, tal fato sugere que o *hot spot* pode não ocorrer necessariamente na região superior dos enrolamentos de reatores *shunt*, como esperado no caso de transformadores. Este fenômeno é, normalmente, mais evidente em reatores com menores níveis de tensão, pois nestes casos a distância entre os enrolamentos e o núcleo é menor.

A modelagem magnética de reatores *"shunt"* através do MEF 2-D e com simetria axissimétrica é razoavelmente conhecida. Contudo, para analisar a precisão no cálculo dos valores de indutância obtidos através desta metodologia, comparam-se tais valores com aqueles obtidos em 3-D e com valores de medições.

Um dos fatores limitantes da vida útil dos equipamentos elétricos é a temperatura. Neste caso, o cálculo da distribuição das perdas ôhmicas nos enrolamentos assume um papel preponderante durante o projeto do reator. Com a distribuição de densidade de fluxo magnético obtida em 2-D, a qual leva em consideração o efeito dos entreferros, estima-se a distribuição

de perdas nos condutores dos enrolamentos através das componentes radial e tangencial do campo densidade de fluxo magnético. De posse desta distribuição de perdas, propõe-se uma metodologia para calcular a elevação de temperatura ao longo dos enrolamentos e, desta maneira, mapear a real distribuição do fator de *hot spot*, que sugere a posição com temperatura mais elevada do enrolamento.

II. MÉTODOS ANALÍTICOS VS. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os primeiros cálculos de campos magnéticos de dispersão em transformadores foram realizados por Kapp em 1898 [7], considerando-se unicamente a componente axial do fluxo de dispersão em 2-D e supondo $\mu_r \rightarrow \infty$ para as regiões do núcleo magnético. Seu estudo foi complementando por Rogoswki em 1909 [8], quem introduziu um fator de correção para levar em consideração o efeito da componente radial do fluxo magnético de dispersão. Este enfoque, conhecido como a fórmula de Kapp, é utilizado com razoável nível de precisão no cálculo de reatâncias de curto-circuito em transformadores, sempre que a geometria das bobinas seja tal que não surjam componentes radiais importantes de campos de dispersão [9], [10], [11].

A fórmula de Kapp pode ser adaptada para o cálculo de reatância em reatores tipo *shunt*, obtendo-se resultados aceitáveis sempre que levados em conta fatores de correções para a distorção de fluxo magnético devido aos efeitos de borda nos entreferros do núcleo, o fluxo de espraiamento já mencionado [12].

Com o advento da computação, aumentam notavelmente o poder de cálculo e o desenvolvimento de métodos analíticos complexos que permitam determinar com precisão a distribuição de campo magnético de dispersão em 2-D, supondo ainda $\mu_r \rightarrow \infty$ para o núcleo. O método mais conhecido e aplicado é o desenvolvido por L.Rabins em 1956 [13] que possibilita obter o potencial vetor magnético resolvendo-se a equação de Poisson da magnetostática em 2-D, em coordenadas cilíndricas (simetria axisimétrica) e com condições de contorno de Neumann (as linhas equipotenciais incidem perpendicularmente ao contorno), já que para o núcleo tem-se $\mu_r \rightarrow \infty$. Mesmo este método permitindo obter resultados coerentes, está limitado a casos 2-D, não permite considerar a saturação magnética do núcleo devido à sua condição de contorno e a sua adaptação aos reatores tipo *shunt* é complexa, uma vez que para modelar a coluna do núcleo com entreferros é necessário incluir a condição de contorno de Neuman ao longo de todos os discos magnéticos que compõem a coluna, para representar todas as regiões de entreferro.

O MEF foi aplicado pela primeira vez para análise de transformadores em 1970 [14]. Em 1972 O. W. Andersen [15] o aplicou para determinar o campo magnético de dispersão em 2-D em coordenadas cilíndricas, também supondo $\mu_r \rightarrow \infty$ para o núcleo.

A grande vantagem deste método é que, além de 2-D, pode-se elaborar modelos em 3-D, permite levar em consideração a saturação do núcleo magnético, é possível modelar o tanque e outros possíveis elementos metálicos do transformador e as perdas geradas nestas regiões, em consequência do fluxo de dispersão. Como uma hipótese simplificadora, permite também

aplicar condições de contorno nas regiões dos entreferros do núcleo de reatores *shunt*, o que permite desconsiderar tais domínios e reduzir o esforço computacional necessário para a modelagem.

III. MODELAGEM ATRAVÉS DO MEF

As análises apresentadas são elaboradas através de soluções de campos magnetostáticos. Para a solução destes campos, parte-se das equações de Maxwell para a magnetostática,

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

onde \mathbf{H} é o campo magnético, \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético e \mathbf{J} é densidade de corrente.

A relação constitutiva que relaciona o campo magnético \mathbf{H} e a indução magnética \mathbf{B} é

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

Para a solução do problema magnetostático em 3-D, utiliza-se uma formulação em potencial escalar magnético, ϕ [16], [17]. Para tal, supõe-se um domínio Ω simplesmente conexo e um campo fonte \mathbf{H}_s conhecido e com a sua condição de contorno $\mathbf{n} \times \mathbf{H}_s|_{\Gamma_H} = 0$. O campo magnético pode ser expresso por

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s - \text{grad } \phi \quad (4)$$

Neste caso são utilizados elementos tetraédricos de segunda ordem e a malha é gerada através de um processo auto-adaptativo. Tais casos são resolvidos através do programa Ansys Maxwell [17].

Para a solução dos modelos 2-D, utiliza-se a formulação em em potencial vetor magnético \mathbf{A} , onde

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (5)$$

e conseqüentemente

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (6)$$

A Eq. (6) é resolvida considerando-se uma simetria axisimétrica, ou seja, um domínio como a geometria 2-D apresentada na Fig. 2(a) representa matematicamente um domínio que, em 3-D, seria como a Fig. 2(b), a qual está em corte. Esta geometria confere à modelagem bidimensional uma aproximação monofásica ao modelo real trifásico, apresentado na Fig. 1. Os casos 2-D são resolvidos através do programa FEMM [18].

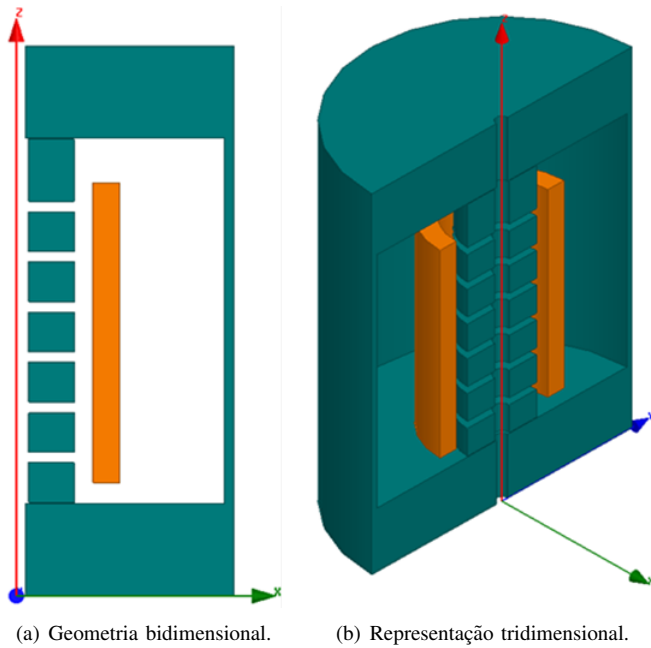


Figura 2. Geometria básica de reator tipo shunt em modelagem axissimétrica.

Em 2-D, as linhas equipotenciais do potencial vetor magnético possuem um significado físico importante, pois representam a distribuição de densidade de fluxo magnético \mathbf{B} [6]. Assim, para ilustrar o fato de o *hot spot* não ocorrer necessariamente na parte superior dos enrolamentos dos reatores, como no caso de transformadores, pode-se observar na Fig. 3 o espriamento de fluxo magnético nas regiões dos entreferros de ar. As perdas induzidas por este fluxo magnético ao incidir nas camadas internas dos enrolamentos podem gerar sobre aquecimento nestas regiões.

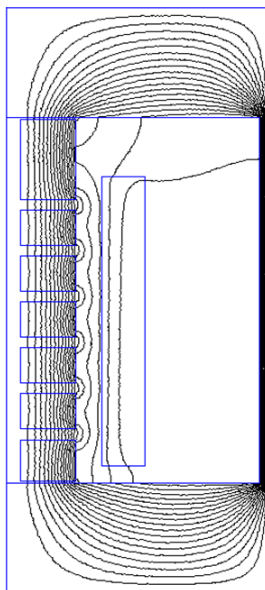


Figura 3. Linhas de fluxo magnético no reator.

IV. ANÁLISE DE REATÂNCIA, PERDAS E TEMPERATURA

A reatância indutiva, calculada através da indutância, confere ao reator as suas características principais. Considerando-se que a formulação utilizada é em potencial vetor magnético, a indutância conferida ao enrolamento pode ser equacionada como

$$L = \frac{1}{I^2} \int_{\Omega} \mathbf{A} \mathbf{J} d\Omega \quad (7)$$

onde I é a corrente no enrolamento.

Para o cálculo de perdas por fluxo disperso nos condutores internos ao enrolamento, necessita-se obter as componentes axial e radial do vetor densidade de fluxo magnético no centro de cada condutor,

$$\mathbf{B} = B_r \mathbf{r} + B_z \mathbf{z} = -\frac{1}{r_0} \frac{\partial A'}{\partial z} \mathbf{r} + \frac{1}{r_0} \frac{\partial A'}{\partial r} \mathbf{z} \quad (8)$$

conforme ilustrado na Fig. 4.

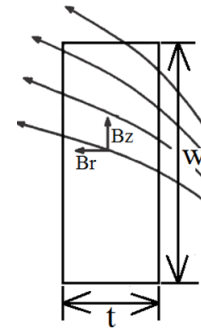


Figura 4. Fluxo de dispersão em um condutor.

As perdas de curto-circuito p_V em W/m^3 em cada condutor incluindo, além das perdas ôhmicas P_{res} , as componentes das perdas por fluxo disperso axial P_{B_z} e radial P_{B_r} podem ser calculadas como:

$$p_V = P_{res} + P_{B_z} + P_{B_r} = \rho \left(\frac{I_{EF}}{S} \right)^2 + \frac{(\omega B_z t)^2}{24\rho} + \frac{(\omega B_r w)^2}{24\rho} \quad (9)$$

onde ρ é resistividade do material condutor, I_{EF} é corrente eficaz que circula pelo condutor, S é seção transversal do condutor. t e w são as dimensões dos condutores, conforme ilustrado na Fig. 4.

É importante salientar que os termos para das perdas por fluxo disperso, P_{B_z} e P_{B_r} , são válidos para dimensões de condutores menores que a espessura de penetração de campo. Uma completa discussão sobre este tema é apresentada em [10].

Pode-se obter o fator de *hot spot* em cada condutor com boa aproximação para circulação natural de óleo através da seguinte equação:

$$H_s = \left(\frac{P_{res} + P_{B_z} + P_{B_r}}{P_{res}} \right)^{0.8} \quad (10)$$

Para exemplificar o efeito do fluxo disperso devido aos entreferros na distribuição do fator de *hot spot* ao longo da

seção transversal dos enrolamentos, analisa-se um reator e apresenta-se a distribuição do fator H na Fig. 5. As regiões indicadas com os retângulos vermelhos representam a seção transversal do enrolamento.

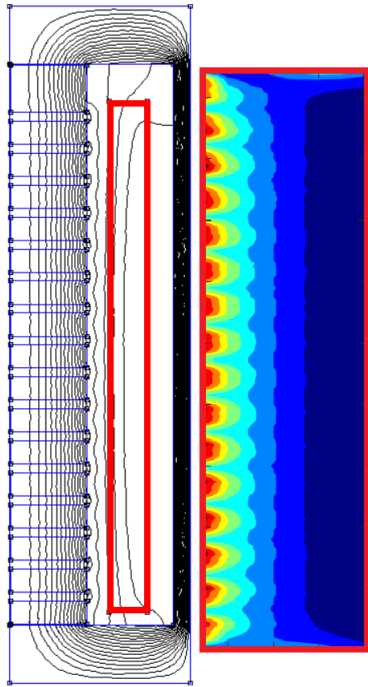


Figura 5. Distribuição do fator de *hot spot*.

Para transformadores, a temperatura de *hot spot* (Θ_{hs}) depende da temperatura do ambiente (Θ_{amb}), da temperatura do topo do óleo (Θ_{to}), do gradiente de temperatura entre enrolamento e óleo médio ($\Delta\Theta_{em-om}$) e do fator de *hot spot* H_s [2],

$$\Theta_{hs} = \Theta_{amb} + \Theta_{to} + H_s \Delta\Theta_{em-om} \quad (11)$$

No entanto, esta equação considera que o fator de *hot spot* se encontra na região superior do enrolamento. Porém, percebe-se através das Figuras 3 e 5 que o fator de *hot spot* pode não estar localizado na parte superior, demonstrando a necessidade da análise da localização do maior fator, cuja temperatura deve ser avaliada através de uma equação na forma de:

$$\Theta_{hs} = \Theta_{amb} + \Theta_{bo} + \Delta\Theta_{to-bo} \frac{h_{hs}}{h_e} + H_s \Delta\Theta_{em-om} \quad (12)$$

e que considere a real posição do *hot spot*. Nesta equação, Θ_{bo} é a temperatura na base do enrolamento, $\Delta\Theta_{to-bo}$ é a diferença de temperatura entre a base e topo do óleo, h_e representa a altura do enrolamento, e h_{hs} é a posição axial do *hot spot*.

V. RESULTADOS

A. Reatância indutiva

Para elaborar uma validação numérica do método de cálculo de reatância indutiva em 2-D com simetria axissimétrica, obtém-se um projeto de um reator trifásico de 16.61 MVAR, 242 kV, e analisa-se este projeto de forma monofásica e

trifásica em 3-D. Para a análise trifásica, o resultado é uma matriz de indutâncias, com indutâncias próprias e mutuas, que não pode ser comparada com uma única indutância própria, que é o caso da análise monofásica. Desta forma, analisam-se os resultados através das correntes que circulam pelo reator, considerando-se que este está submetido a uma dada tensão de fase V_f e deve fornecer uma dada potência reativa indutiva por fase P_{fase} ,

$$I = \frac{P_{fase}}{V_f} = \frac{16610/3}{242/\sqrt{3}} = 39,63 \text{ A} \quad (13)$$

Desta forma, o projeto do reator deve contemplar uma reatância indutiva nominal tal que, sob a tensão nominal, circulem 39.63 A no enrolamento de cada fase. A corrente medida nos testes do reator foi de 38.93A, resultando em um erro de reatância de +1,79%, o que está dentro da tolerância de $\pm 5\%$ estabelecida pela norma [2].

Para a análise monofásica, a corrente obtida através da indutância simulada é dada por:

$$I = \frac{V_f}{X_L} = \frac{V_f}{2\pi f L} \quad (14)$$

onde que X_L é a reatância indutiva. Para os casos trifásicos, resolve-se o sistema matricial

$$[I] = [X_L]^{-1} [V_f] \quad (15)$$

1) Análise monofásica - MEF 2-D

O valor de indutância obtida através do método proposto 2-D foi 9,636 H, ou seja, uma corrente elétrica de:

$$I = \frac{V_f}{X_L} = \frac{V_f}{2\pi f L} = \frac{242000/\sqrt{3}}{2\pi 60 9,636} = 38,46 \text{ A} \quad (16)$$

2) Análise monofásica - MEF 3-D

A Fig. 6 abaixo apresenta a geometria tridimensional em corte elaborada para a análise monofásica. Neste caso, o valor de indutância calculado foi 9,773 H, que corresponde a

$$I = \frac{V_f}{X_L} = \frac{V_f}{2\pi f L} = \frac{242000/\sqrt{3}}{2\pi 60 9,773} = 37,92 \text{ A} \quad (17)$$

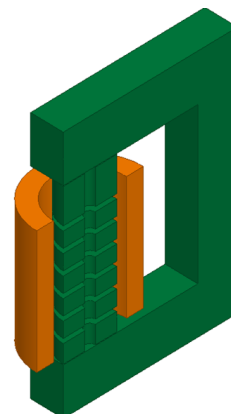


Figura 6. Modelo monofásico tridimensional.

3) Análise Trifásica - MEF 3-D

A Fig. 7 mostra um corte na geometria elaborada para a análise trifásica.

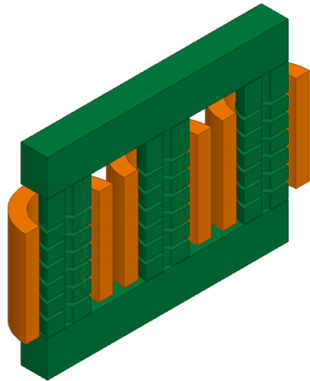


Figura 7. Modelo trifásico tridimensional.

A matriz de indutâncias obtida através da simulação tridimensional e trifásica é

$$L = \begin{bmatrix} 7.8405 & -1.8686 & -1.8387 \\ -1.8686 & 7.8210 & -1.8631 \\ -1.8387 & -1.8631 & 7.8247 \end{bmatrix} \quad (18)$$

e a matriz de correntes calculada através da Eq. (15) é

$$I = \begin{bmatrix} 38.18 e^{j0.004} \\ 38.33 e^{-j1.047} \\ 38.33 e^{j1.047} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Os resultados acima apresentados estão resumidos e comparados com o valor medido na Tabela I. Através da análise destes resultados, verifica-se que estes são coerentes entre si, validando o método em 2-D.

Tabela I
COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O REATOR DE 16 MVAR.

Método	Corrente [A]	Diferença [%]
Medição	38,93	-
MEF 2-D(axissimétrico)	38,46	1,21
MEF 3-D (1Ø)	37,92	2,59
MEF 3-D (3Ø)	38,18	1,93

Os valores de as reatâncias indutivas obtidas através do MEF 2-D axisimétrico são comparados com valores de medições para outros reatores e os dados são apresentados na Tabela II.

Tabela II
COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES REATÂNCIAS INDUTIVAS CALCULADOS COM MEF 2-D AXISIMETRICO E MEDIDOS.

Potência [MVAR]	MEF 2-D(axissimétrico) [Ohm]	Medição [Ohm]	Diferença [%]
16,61	3632,86	3589	1,22
33,2	1779,83	1770,02	0,55
10	1924,64	1939	0,74
20	2702,87	2640,4	2,56

Pode-se verificar que os valores obtidos com o MEF 2-D são coerentes se comparados com os valores medidos para uma ampla gama de potência de reatores.

B. Fator de hot spot

Através da metodologia proposta pode-se obter a distribuição do fator de *hot spot* H_s ao longo dos enrolamentos, levando-se em consideração o efeito do fluxo magnético disperso devido aos entreferros.

Sendo assim, define-se um reator e mapeia-se a distribuição de H_s ao longo da seção transversal de seu enrolamento, analisando-se quatro distâncias entre o enrolamento e o núcleo. Os resultados são apresentados na Fig. 8, onde a distância entre o enrolamento e o núcleo é menor na Fig. 8(a) que na Fig. 8(b) e assim sucessivamente.

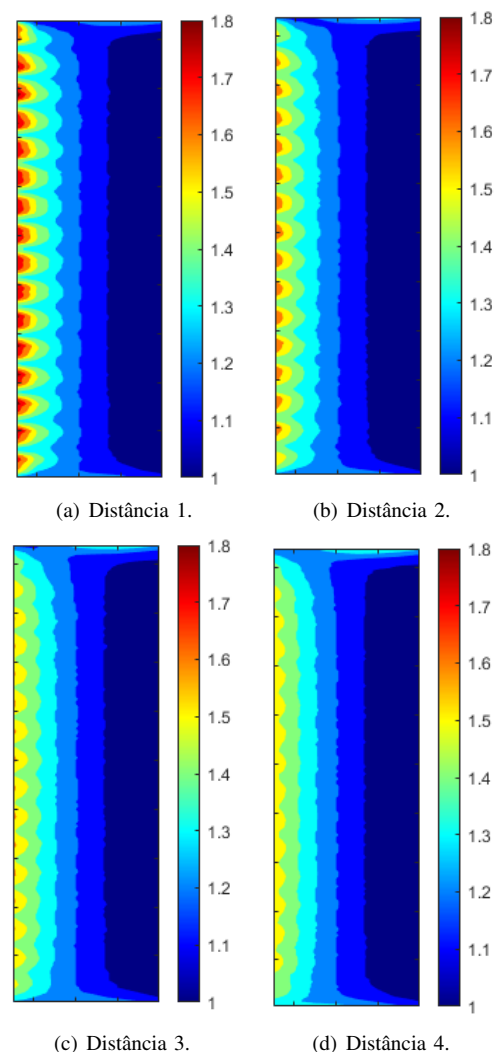


Figura 8. Distribuição do fator de *hot spot* para 4 distâncias entre enrolamento e núcleo.

Percebe-se que ao passo que a distância entre o enrolamento e o núcleo aumenta, os fatores diminuem, conforme esperado. Mesmo este efeito sendo mais pronunciado em reatores sob menores níveis de tensão, devido a distâncias menores entre o núcleo e o enrolamento, a região interna do enrolamento tenderá a uma temperatura superior.

Com esta metodologia pode-se calcular o fator de *hot spot* de uma forma não onerosa computacionalmente, durante a etapa de projeto do equipamento e possibilitando ainda ser implementada em processos de otimização.

A comparação com valores medidos é uma etapa futura à este trabalho, pois demanda protótipos complexos e de altos custos.

VI. CONCLUSÃO

O MEF 2-D e em coordenadas cilíndricas pode ser uma importante ferramenta para modelagem de reatores do tipo *shunt*, pois salvo algumas restrições comentadas, permite determinar com razoável precisão a distribuição de campo magnético no interior do equipamento.

Com tal distribuição, pode-se obter a reatância do reator, que neste trabalho foi validada através da comparação com valores medidos.

Além da reatância, pode-se calcular as perdas nos condutores do enrolamento e, através do método proposto, obter a localização ponto de *hot-spot* no enrolamento. O método utilizado é simples, leve computacionalmente e pode ser implementado inclusive com o MEF 3-D.

Além das características estudadas neste trabalho, a modelagem de reatores *shunt* através do MEF 3-D permite calcular a reatância em núcleo de ar, verificar a linearidade da característica tensão-corrente e calcular as perdas nos elementos metálicos estruturais como consequência do fluxo magnético de dispersão.

REFERÊNCIAS

- [1] CIGRE, "CIGRE Technical Brochure N°655: "Technology and utilization of oil-immersed shunt reactors" - Working Group A2.48," International Council on Large Electric Systems - CIGRE, Tech. Rep., May 2016.
- [2] IEC 60076-6 2007: "Power transformers – Part 6: Reactors", International Electrotechnical Commission - IEC Std.
- [3] S. Saizen, K. Hashiba, and M. Iwagami, "500/√(3) kv 50/3 MVA shunt reactors for CTM, argentina," Fuji Electric, Review, 1979, N. 2, Vol. 35.
- [4] Y. Ikeda, H. Naitô, and M. Abe, "Technological trend in the recent development of shunt reactor," Fuji Electric Review, Electric Review, 1982, Vol. 28, N. 2.
- [5] M. Gallay, G. Messé, and J. Poittevin, "UHV shunt reactors technical problems and test facilities," in *CIGRE 1982 Session*, 1982, pp. Paper 12–04.
- [6] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [7] G. Kapp, "Ein Beitrag zur vorausberechnung der streuung in transformatoren," *ETZ bd. 19*, vol. H15, pp. 244–246, 1898.
- [8] W. Rogowski, "Ueber das streufeld und den streuinduktionskoeffizienten eines transformators mit scheibenwicklung und geteilten endspulen," Ph.D. dissertation, Mitteilung ueber Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Berlin, 1909.
- [9] A. L. Morris, "The influence of various factors upon the leakage reactance of transformers," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 86, no. 521, pp. 485–495, may 1940.
- [10] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*, 2nd ed. Taylor & Francis Inc, 2012.
- [11] R. M. D. Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, and R. Ahuja, *Transformer Design Principles*, 3rd ed. CRC Press, 2010.
- [12] A. Balakrishnan, W. Joines, and T. Wilson, "Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a schwarz-christoffel transformation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 4, pp. 654–663, jul 1997.
- [13] L. Rabins, "Transformer reactance calculations with digital computers," *AIEE Trans*, vol. 75, no. 1, pp. 261–267, 1956.
- [14] P. Silvester and M. K. Chari, "Finite element solution of saturable magnetic field problems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1642–1651, sep 1970.
- [15] O. Andersen, "Transformer leakage flux program based on the finite element method," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 2, pp. 682–689, mar 1973.
- [16] G. Meunier, Ed., *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [17] *Maxwell Online Help - Release R19*, ANSYS, Inc., Canonsburg, 2018.
- [18] D. Meeker, "Finite element method magnetics - version 4.2," 2018, accessed 1st Aug, 2018. [Online]. Available: <http://www.femm.info/>

Anderson Santos Nunes nasceu em Santa Maria, Rio Grande do Sul, em 08 de abril de 1986. É doutor (2018) e Mestre (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Pós Graduação (2011) em Projetos de Transformadores e Graduação (2010) pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). É técnico em Eletrotécnica pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM). Atuou de 2004 até 2013 na WEG T&D como projetista e engenheiro de P&D em transformadores. De 2013 até 2018 atuou como Especialista em Aplicações CAE na empresa ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software). Atualmente é pós-doutorando na laboratório GeePs (*Group of Electrical Engineering*, Paris). Suas principais áreas de interesse são métodos numéricos e analíticos para o eletromagnetismo e modelagem de dispositivos eletromagnéticos.

Álvaro Portillo nasceu no Uruguai em 1954. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade do Uruguai em 1979. Trabalhou na empresa elétrica uruguaia (UTE) até 1985 em atividades relacionadas à aceitação, instalação e manutenção de transformadores. De 1985 a 1999, trabalhou na MAK (fabricante uruguaia de transformadores), de 2000 a 2007 como consultor na TRAF0 (fabricante brasileiro de transformadores) e desde 2007 como consultor em desenvolvimento de ferramentas computacionais para projeto de transformadores na WEG (fabricante brasileiro de transformadores). É professor da Universidade da República Uruguai desde 1977, agora responsável por todos os cursos de pós-graduação sobre transformadores. Também trabalha como consultor de serviços elétricos na elaboração de especificações técnicas e revisão de projeto de transformadores e reatores de energia. É o líder do grupo de trabalho do CIGRE JWG A2 / C4.52.

Federico Portillo nasceu no Uruguai em 1990. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade do Uruguai em 2015. Trabalha como consultor em desenvolvimento de ferramentas computacionais para o projeto de transformadores na URUTRANSFOR e PARTILUZ (fabricantes uruguaiois de transformadores), no INATRA (fabricante equatoriana de transformadores) e na Industrias Explorer (fabricante colombiano de transformadores). Também trabalha como consultor de serviços elétricos na elaboração de especificações técnicas e revisão de projeto de transformadores e reatores de potência. Uma das principais áreas de interesse é a aplicação do método dos elementos finitos ao projeto de transformadores e reatores.