



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GTM/09  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -  
GTM**

**REATORES DE DERIVAÇÃO COM ENROLAMENTO AUXILIAR – ESTUDO DE CASOS COM USO DO MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS**

**Juliano Montanha (\*)**  
**SIEMENS**

**Luis Rafael Massaretto**  
**SIEMENS**

**Tamyres L. Machado Jr**  
**SIEMENS**

**Mauricio V. Ferreira da Luz**  
**UFSC**

**RESUMO**

Neste artigo é apresentada a modelagem magnética de um reator de derivação com enrolamento auxiliar usando o método de elementos finitos. Esses reatores são considerados especiais por suprir, através desses enrolamentos auxiliares, a demanda dos circuitos auxiliares de uma subestação. Para calcular a reatância, a tensão e a corrente nos enrolamentos principal e auxiliar, aplica-se uma formulação magnetodinâmica axissimétrica, no domínio do tempo, acoplada com equações de circuito. Assim, a não linearidade do núcleo e a carga no enrolamento auxiliar podem ser consideradas. Neste trabalho foram analisados três reatores e houve boa concordância entre os resultados calculados e medidos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Reator de derivação, enrolamento auxiliar, método de elementos finitos, reatância magnética, acoplamento magnético.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em países de proporções continentais como o Brasil e a China, onde os grandes potenciais hidroelétricos para geração de energia elétrica estão localizados a distâncias muito grande dos principais centros de consumo, são requeridas longas linhas de transmissão. Nos casos onde a transmissão em corrente alternada é utilizada, a injeção de potência reativa indutiva é requerida para compensação da variação da potência capacitiva e da estabilização da tensão nos extremos das linhas que ocorrem devido à variação das cargas e chaveamentos.

Grande parte dessa injeção de potência reativa indutiva é feita de modo tradicional através da instalação de reatores de derivação em varias subestações prevista ao longo dessas linhas. Existem casos onde não existem demandas de energia nas subestações intermediárias (inserção regional) e nenhum transformador ou autotransformador com enrolamento auxiliar é instalado. Nesses casos, alternativas de suprimento dos serviços auxiliares dessas subestações devem ser analisadas.

Os reatores de derivação com enrolamentos auxiliares são uma alternativa para os serviços auxiliares destas subestações [1–3]. A demanda dos circuitos auxiliares de uma subestação da ordem de alguns kVA representa uma parcela muito pequena quando comparada com as potências nominais requeridas para os reatores de derivação e pode ser suprida perfeitamente por esses enrolamentos auxiliares.

Um dos maiores problemas para o projeto desses enrolamentos é a suportabilidade a curtos-circuitos. Certos arranjos entre o enrolamento principal e o auxiliar podem determinar impedâncias que limitem as correntes de curtos circuitos nos enrolamentos dentro de valores admissíveis e economicamente viáveis através do posicionamento do enrolamento auxiliar em locais magneticamente desacoplados ao enrolamento principal.

(\*) Siemens Ltda, Av Eng. João Fernandes Gimenes Molina, nº 1745 – CEP: 13213-080, Jundiaí, SP – Brasil.  
Tel: (+55 11) 4585-2195 – Fax: (+55 11) 4585-2206 – Email: juliano.montanha@siemens.com

A metodologia usualmente utilizada pelos fabricantes para o dimensionamento do projeto de transformadores não pode ser aplicada para este tipo especial de reator em vista do tipo construtivo do núcleo com entreferros.

Devido ao fluxo de dispersão gerado nos entreferros do núcleo, a precisão necessária para o cálculo da impedância do par de enrolamentos principal e auxiliar bem como para o cálculo da tensão induzida nos terminais do enrolamento auxiliar pode ser alcançada satisfatoriamente através da ajuda de ferramentas computacionais. A metodologia usando o método de elementos finitos permite obter uma boa margem de precisão. Além disto, para estes reatores de derivação com enrolamento auxiliar, os requisitos adicionais relativos à suportabilidade de curto circuito e à coordenação de isolamento dos terminais do enrolamento auxiliar devem ser avaliados durante a fase de projeto.

Simulações de campo magnético e de campo elétrico são fatores essenciais e desafiadores para os fabricantes e necessárias para o alcance do desempenho do equipamento especificado. Muitos aspectos como geometria, localização do enrolamento principal e auxiliar devem ser levados em conta durante a fase do projeto e que diferem consideravelmente de um projeto de um reator de derivação convencional. A demanda por este tipo de reator com enrolamento auxiliar tem crescido nos últimos anos no Brasil e na China.

Este artigo apresenta a experiência do fabricante no dimensionamento, construção e testes realizados em pelo menos três diferentes projetos de reatores de derivação com enrolamento auxiliar. A metodologia para a obtenção dos resultados é comparada ao desempenho destes equipamentos durante os testes realizados em fábrica.

Neste trabalho são analisados três casos onde os valores calculados para a reatância no enrolamento principal, as tensões e as correntes no enrolamento auxiliar são validadas através de ensaios realizados em três diferentes projetos de reatores.

## 2.0 - FORMULAÇÃO MAGNETODINÂMICA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Para simular o reator de derivação, uma formulação magnetodinâmica no domínio do tempo é utilizada. Esta formulação permite determinar numericamente a reatância do reator de derivação considerando a não linearidade do núcleo. Em baixas frequências, a corrente de deslocamento pode ser negligenciada por ser pequena se comparadas à corrente de condução. Assim, as equações que caracterizam o problema magnetodinâmico no domínio de cálculo  $\Omega$  com fronteira  $\Gamma$  são dadas por [4]:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (1a-b-c)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2a-b)$$

Equações (1a), (1b) e (1c) são, respectivamente, a lei de Ampère, a lei de Faraday, e a lei de Gauss magnética, onde  $\mathbf{H}$  é o campo magnético (A/m),  $\mathbf{B}$  é a densidade de fluxo magnético (T),  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico (V/m),  $\mathbf{J}$  é a densidade superficial de corrente (A/m<sup>2</sup>), incluindo densidades de correntes fontes  $\mathbf{J}_S$  em  $\Omega_S$  e densidades de correntes induzidas em  $\Omega_C$  (ambos  $\Omega_S$  e  $\Omega_C$  estão inclusos em  $\square$ ),  $\mu$  é a permeabilidade magnética (H/m) e  $\sigma$  é a condutividade elétrica (S/m).

As condições de contorno são definidas em partes complementares  $\Gamma_h$  e  $\Gamma_e$ , os quais podem ser não conectados, de  $\Gamma$  [4],

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H}|_{\Gamma_h} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}|_{\Gamma_e} = 0, \quad \mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\Gamma_e} = 0, \quad (3a-b-c)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o vetor normal unitário exterior à  $\Omega$ .

A formulação magnetodinâmica considera as correntes induzidas, o efeito pelicular e o efeito de proximidade nas regiões condutoras. Ela também considera a característica não linear do núcleo usado pelo fabricante do reator de derivação. A formulação  $\mathbf{A}$ -V, com um potencial vetor magnético  $\mathbf{A}$  e um potencial escalar elétrico  $V$ , é obtida da forma fraca da equação de Ampère (1a) e (2a-b) [4], isto é:

$$(\nu \text{ rot } \mathbf{A}, \text{rot } \mathbf{A}')_{\Omega} + \langle \mathbf{n} \times \mathbf{H}_s, \mathbf{A}' \rangle_{\Gamma_h} + \left( \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \mathbf{A}' \right)_{\Omega_C} + (\sigma \text{ grad } V, \mathbf{A}')_{\Omega_C} - (\mathbf{J}_s, \mathbf{A}')_{\Omega_S} = 0, \quad \forall \mathbf{A}' \in F_a(\Omega), \quad (4)$$

onde  $\mathbf{n} \times \mathbf{H}_s$  é uma restrição aplicada ao campo magnético associada com a fronteira  $\Gamma_h$  do domínio  $\Omega$  e  $\nu = 1/\mu$  é a relutância magnética.  $F_a(\Omega)$  denota o espaço funcional definido em  $\Omega$ , o qual contém as funções base e as funções teste para ambos os potenciais vetores  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{A}'$ .  $(\cdot, \cdot)_{\Omega}$  e  $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\Gamma}$  denotam, respectivamente, uma integral de volume em  $\Omega$  e uma integral de superfície em  $\Gamma$  de produtos de campos escalar ou vetorial.

O campo elétrico  $\mathbf{E}$  e a densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$ , bem como o campo magnético  $\mathbf{H}$  e a densidade de corrente  $\mathbf{J}$ , são expressos em termos dos potenciais  $\mathbf{A}$  e  $V$  por:

$$\mathbf{E} = \sigma^{-1} \mathbf{J} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } V \quad \text{em } \Omega_c, \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A} \quad \text{em } \Omega. \quad (6)$$

A formulação axissimétrica  $\mathbf{A}$ - $V$  é obtida resolvendo (4) em coordenadas cilíndricas, isto é:

$$\left( \frac{v}{r_0} \text{grad } A'', \text{grad } A' \right)_{\Omega} + \left( \sigma \frac{\partial A''}{\partial t}, A' \right)_{\Omega_c} + \left( \frac{\sigma}{r_0} \frac{dV}{d\phi}, A' \right)_{\Omega_c} - (J_s, A')_{\Omega_s} = 0, \quad (7)$$

onde  $A'' = r_0 A$ ,  $r_0$  é a distância do baricentro do triângulo (elemento) ao eixo de rotação, e ainda  $r_0 = (r_1 + r_2 + r_3)/3$ , onde  $r_1$ ,  $r_2$ , e  $r_3$  são os raios dos nós (distâncias dos três nós do elemento em relação ao eixo de rotação).

### 2.1 Acoplamento com Equações de Circuito

O enrolamento principal e o enrolamento auxiliar do reator são representados, matematicamente, como sendo indutores finos. Os indutores finos em elementos finitos são os condutores que possuem dimensões suficientemente reduzidas de maneira que se pode considerar que a corrente é uniformemente distribuída sobre sua seção transversal. Para um indutor fino, a relação de circuito é representada por [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{A}, \mathbf{w}_i)_{\Omega_{s,i}} + R_i I_i = -V_i, \quad (8)$$

onde  $R_i$  é a resistência,  $I_i$  é a corrente, e  $V_i$  é a tensão em cada indutor fino;  $\mathbf{A}$  é o potencial vetor magnético; e  $\mathbf{w}_i$  é conhecido como vetor densidade de condutor.

### 2.2 Considerando a Não Linearidade do Núcleo

A permeabilidade (ou relutividade) do núcleo é dependente da intensidade do campo magnético. Materiais ferromagnéticos são caracterizados pela curva  $B(H)$ , com permeabilidade dependendo da localização na curva  $B(H)$ . Neste trabalho, a não linearidade do núcleo é considerada no método de elementos finitos. A Figura 1 apresenta um exemplo de curva de magnetização (ou curva  $B(H)$ ) de uma amostra de aço silício convencional de grão orientado. Esta curva foi obtida com a bancada "Brockhaus Messtechnik" usando o quadro de Epstein.

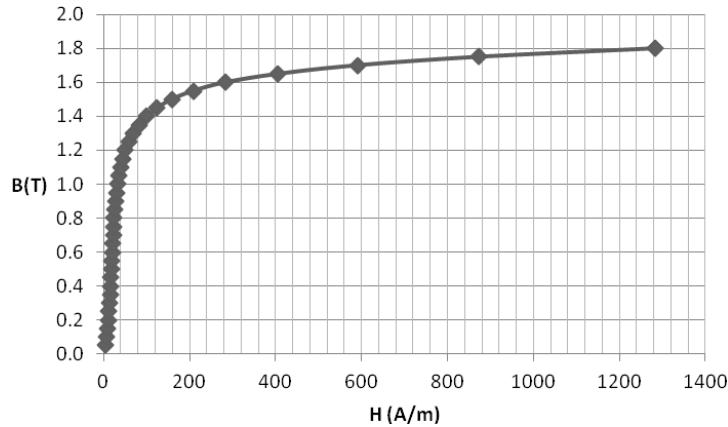


FIGURA 1 – Exemplo de curva de magnetização do aço de grão orientado convencional.

### 2.3 Cálculo da Reatância Magnética do Reator de Derivação

Neste trabalho o cálculo da reatância é baseado na definição da indutância obtida do ponto de vista da energia. Usando o método de elementos finitos, a energia total armazenada ( $W_m$ ) é calculada por:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_{\text{vol}} \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} \, dv, \quad (9)$$

onde  $\mathbf{A}$  é o potencial vetor magnético e  $\mathbf{J}$  é a densidade superficial de corrente. Desse modo, a reatância pode ser calculada pela equação:

$$X = 2 \pi f \frac{2 W_m}{I^2}, \quad (10)$$

onde  $I$  é a corrente elétrica e  $f$  é a frequência. Este cálculo é realizado resolvendo o problema magnetodinâmico considerando o comportamento não linear da curva  $B(H)$  do núcleo.

### 3.0 - RESULTADOS

Neste trabalho, a modelagem magnética do reator de derivação, usando o método de elementos finitos (MEF), é aplicada em três diferentes projetos de reatores com enrolamento auxiliar. As Figuras 2(a) e 2(b) mostram o domínio de cálculo axissimétrico de um reator shunt de 550 kV e 66,65 MVar. Problemas axissimétricos são problemas tridimensionais com estruturas que possuem uma simetria de revolução, ou seja, uma simetria axial. Esses problemas são abordados bidimensionalmente utilizando as formulações descritas anteriormente desde que algumas modificações sejam realizadas. Neste trabalho o eixo  $y$  é considerado como eixo de revolução ou de simetria.

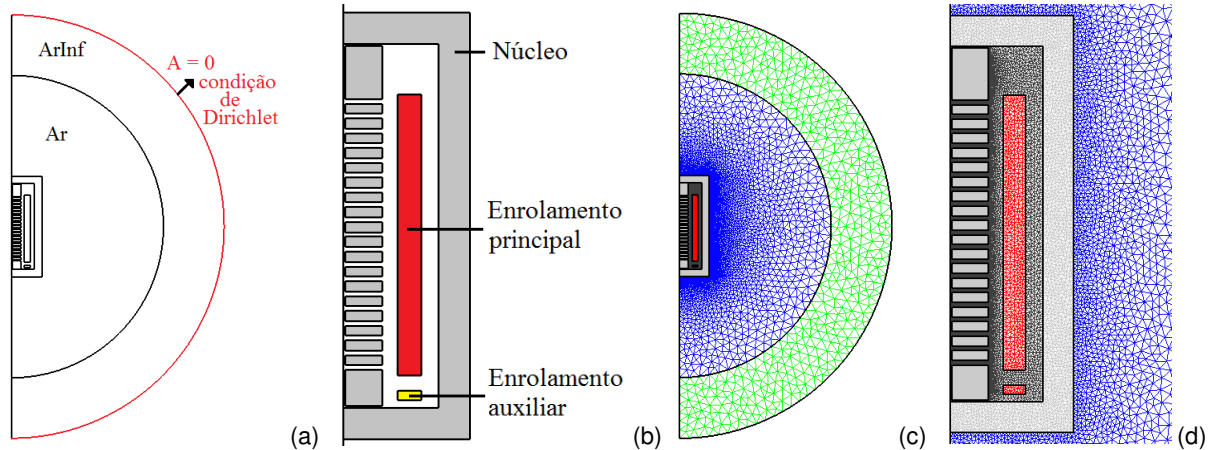


FIGURA 2 – (a) Domínio de cálculo; (b) zoom da geometria do reator; (c) malha do domínio de cálculo; e (d) zoom da malha do reator.

A região ArInf é uma região usada para evitar erros de truncamento de domínio e na linha vermelha aplica-se a condição de contorno de Dirichlet (potencial vetor magnético  $A = 0$ ). Do ponto de vista matemático, essa região ArInf permite considerar que os nós dos elementos que estão localizados na linha vermelha possuem raios em relação ao centro da geometria que tendem ao infinito. Assim, como na linha vermelha é aplicada a condição de Dirichlet, considera-se que no infinito o potencial vetor magnético é nulo. A região cinza representa o núcleo, a região em vermelho representa o enrolamento principal e a região em amarelo representa o enrolamento auxiliar. Como o domínio de cálculo é um domínio axissimétrico, todo o domínio gira em relação ao eixo  $y$  de  $2\pi$ . Essa representação axissimétrica é válida para os enrolamentos e a parte central do núcleo. Todavia os jugos e as pernas de retorno do reator não são regiões axissimétricas.

As Figuras 2(c) e 2(d) apresentam a malha de elementos finitos usada no domínio de cálculo. Note que na região ArInf a malha é menos densa do que na região do núcleo, enrolamento etc. Isso ocorre, pois no método de elementos finitos é importante usar malhas mais densas nas regiões onde se deseja maior precisão dos resultados. Assim, como um dos objetivos do trabalho é determinar a reatância do reator, procurou-se aplicar uma malha mais densa (elementos finitos menores) na região interna (janela) do núcleo.

A Figura 3(a) e a Figura 3(b) mostram, respectivamente, as linhas de fluxo magnético (linhas equipotenciais) e o módulo da densidade de fluxo magnético, considerando o enrolamento principal alimentado por corrente nominal do reator e o enrolamento auxiliar a vazio.

A Figura 3(c) e a Figura 3(d) apresentam, respectivamente, as linhas de fluxo magnético (linhas equipotenciais) e o módulo da densidade de fluxo magnético, considerando o enrolamento principal alimentado por corrente nominal do reator e o enrolamento auxiliar conectado a um resistor de  $10 \Omega$ . Para esses casos, há uma corrente elétrica no enrolamento auxiliar e isso gera uma distribuição de fluxo magnético e de densidade de fluxo magnético diferente na região inferior do reator. Esse resultado evidencia a possibilidade de acoplar um circuito elétrico no enrolamento auxiliar do reator.

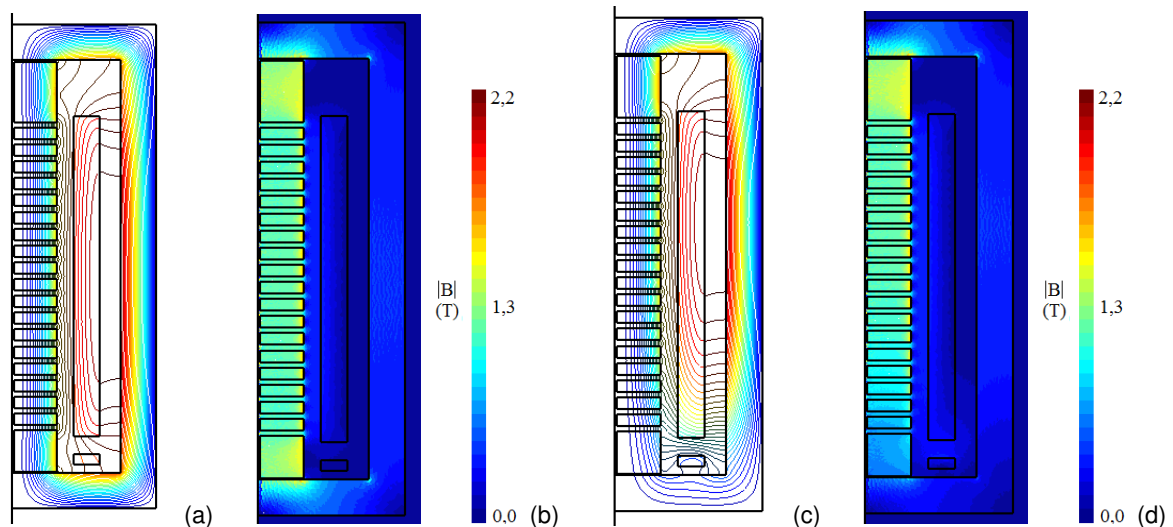


FIGURA 3 – Distribuição das linhas de fluxo magnético (a) e módulo da densidade de fluxo magnético (b) para enrolamento auxiliar a vazio; e distribuição das linhas de fluxo magnético (c) e módulo da densidade de fluxo magnético (d) para enrolamento auxiliar conectado a um resistor.

A Figura 4 e a Figura 5 mostram, respectivamente, a tensão e a corrente no enrolamento principal, considerando o enrolamento auxiliar a vazio. Na Figura 5 é possível observar que até  $t = 0,5$  s há um comportamento transiente na forma de onda da corrente do enrolamento principal.

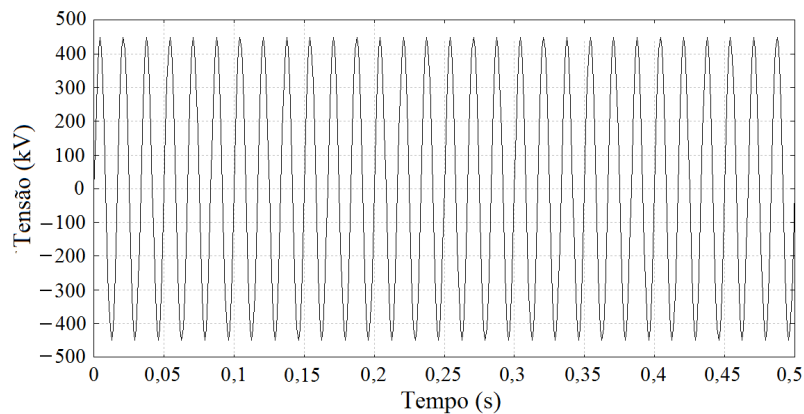


FIGURA 4 – Tensão aplicada no enrolamento principal considerando o enrolamento auxiliar a vazio.

A Tabela 1 apresenta os resultados das reatâncias do enrolamento principal calculadas usando o método de elementos finitos (MEF) e as reatâncias medidas no laboratório da Siemens para dois casos. Esses cálculos foram realizados considerando o enrolamento auxiliar a vazio. Analisando a Tabela 1, observa-se boa concordância entre os resultados das reatâncias para os dois casos.

A Tabela 2 mostra os resultados das tensões no enrolamento auxiliar na condição em vazio. Os resultados da Tabela 2 foram obtidos comparando-se as tensões no enrolamento auxiliar calculadas usando o MEF e as tensões medidas no laboratório da Siemens para três casos. Analisando a Tabela 2, observa-se boa concordância entre os resultados das tensões para os três casos.

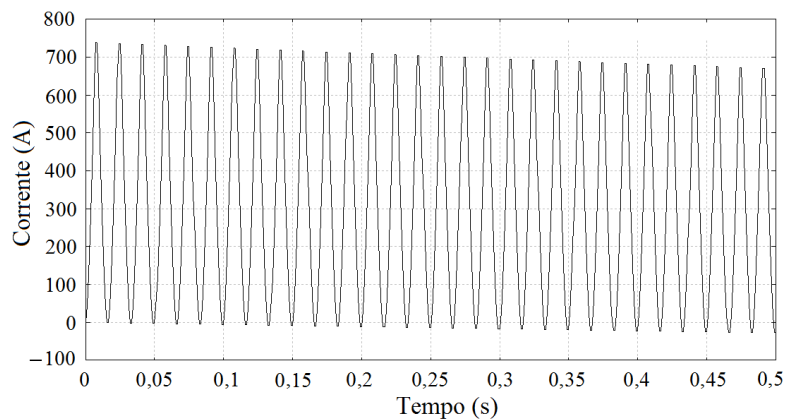


FIGURA 5 – Corrente no enrolamento principal considerando o enrolamento auxiliar a vazio.

Tabela 1 – Comparação entre as reatâncias calculadas pelo MEF e as reatâncias medidas.

Caso	Potência em MVar	Reatância Calculada ( $\Omega$ )	Reatância Medida ( $\Omega$ )	Erro (%)
1	45,33	1893,66	1847,0	-2,5
2	16,67	5088,02	4967,8	-2,4

Tabela 2 – Comparação entre as tensões no enrolamento auxiliar calculadas pelo MEF e medidas.

Caso	Potência Primária em MVar	Potência Secundária em kVA	Tensão (kV)		Erro (%)
			Calculada	Medida	
1	45,33	333	13,887	13,696	+1,37
2	63,33	333	13,210	13,562	-2,67
3	16,67	210	33,020	33,702	-2,02

A Tabela 3 apresenta as correntes no enrolamento auxiliar na condição de curto-circuito. Os resultados da Tabela 3 foram obtidos comparando-se as correntes de curto-circuito no enrolamento auxiliar calculadas usando o MEF e as correntes de curto-circuito medidas no laboratório da Siemens para dois casos. Nota-se, também, boa concordância entre os resultados das correntes para os dois casos.

Tabela 3 – Comparação entre as correntes de curto circuito calculadas pelo MEF e medidas.

Caso	Potência Primária em MVar	Potência Secundária em kVA	Corrente de curto circuito (A)		Erro (%)
			Calculada	Medida	
1	45,33	333	948,20	933,20	+1,61
2	63,33	333	998,78	994,05	+0,48

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou alguns resultados da modelagem magnética de um reator de derivação usando o método de elementos finitos. Essa modelagem foi desenvolvida para: calcular a reatância magnética do reator de derivação; e calcular a tensão e a corrente tanto no enrolamento principal quanto no enrolamento auxiliar. Para isso, utilizou-se uma formulação magnetodinâmica axissimétrica. O domínio de cálculo axissimétrico é uma boa representação para os enrolamentos e para as panquecas do reator. Todavia, essa aproximação não condiz com as geometrias do jugo e das pernas de retorno do núcleo. Desse modo, para se calcular as densidades de fluxo magnético no jugo e nas pernas de retorno é necessário realizar uma modelagem tridimensional (3D) do reator. A formulação magnetodinâmica usada nesse artigo foi acoplada às equações de circuito e, assim, é possível modelar um circuito acoplado ao enrolamento auxiliar do reator.

Os cálculos da reatância magnética, da tensão induzida no enrolamento auxiliar na condição a vazio, e da corrente no enrolamento auxiliar na condição de curto-circuito foram validados com boa margem de precisão para alguns casos práticos através da comparação com resultados de medição.

Os trabalhos futuros prevêem a modelagem 3D do reator de derivação usando a formulação magnetodinâmica acoplada com equações de circuito. Esta modelagem permitirá determinar as densidades de fluxo magnético em todo o núcleo do reator com maior precisão.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Q. Fan, "Application of 500 kV shunt reactors with auxiliary winding system in switching station", *Power System Technology*, pp. 77–79, November 2001.
- [2] T. Egawa and M. Kyono, "Study of a shunt reactor with transformer function", *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 33, n° 2, pp. 1235–1238, March 1997.
- [3] J. Liu, X. Cui, Z. Fei and H. Shao, "3D Non-linear anisotropic magnetostatic field computation in reactor", *COMPEL* 17, pp. 239–243, May 1998.
- [4] M. V. Ferreira da Luz, "Desenvolvimento de um software para cálculo de campos eletromagnéticos 3D utilizando elementos de aresta, levando em conta o movimento e o circuito de alimentação", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2003.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Juliano Montanha:** nasceu em 1975 na cidade de Ubitatã, PR, Brasil. Graduado em 1998 em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, EESC em São Carlos. Trabalha desde 1998 com Transformadores de Potência na unidade da Siemens em Jundiaí-SP onde exerce a função de especialista de alta tensão. Com experiência na área de cálculos transitórios e projeto de isolamento de alta e extra-alta tensão, atua em vários projetos de R&D mundial da Siemens e em suporte técnico para demais unidades do grupo. É membro ativo da CIGRE internacional e IEEE.

**Luis Rafael Massaretto:** nasceu em 1981 na cidade de Itatiba, SP, Brasil. Graduado 2002 em Técnico em Eletrônica pela CTEEP Rosa Perrone Scavone, em Itatiba e em 2010 em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Francisco, em Itatiba. Trabalhou com transformadores para eletrônica e reatores para iluminação entre 1999 e 2007. Trabalha desde 2007 com Transformadores de Potência na unidade da Siemens em Jundiaí-SP onde exerce a função de engenheiro calculista. Com experiência na área de cálculos reatores de derivação, atua em vários projetos de R&D mundial da Siemens.

**Tamyres Luiz Machado Júnior:** Nasceu em 1949 na cidade de São Paulo, SP, Brasil. Formou-se em 1973 na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Iniciou sua carreira profissional no setor de projeto elétrico de transformadores de potência da empresa Transformadores União Ltda (TUSA), na época, uma "joint venture" da Siemens AG e AEG AG da Alemanha. De 1987 a 2007 foi responsável pelo Departamento de Engenharia e Desenvolvimento de Transformadores de Potência da TUSA/Siemens no Brasil. Participou da elaboração de mais de 800 projetos de: transformadores e autotransformadores de até 800 MVA e 800 kV DC, reatores de derivação monofásicos de 120 MVA e 800 kV e transformadores conversores para HVDC. Desde 2007 é responsável pelo Departamento de Tecnologia de Transformadores de Potência da Siemens Ltda, no Brasil. Membro da CIGRE desde 1987 e participou com representante brasileiro do Comitê de estudos de Transformadores da CIGRE Mundial de 1991 a 2001. Membro do Comitê de Estudos de Transformadores da IEEE desde 1995.

**Mauricio Valencia Ferreira da Luz:** nasceu em 1973 na cidade de Jaguariaíva, PR, Brasil. Graduado em 1997 em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Terminou seu mestrado em 1999 e seu doutorado em 2003 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Entre abril 2001 e outubro de 2002 realizou um doutorado sanduíche na Universidade de Liège (Bélgica). O tema do seu doutorado foi o desenvolvimento de um software de campos eletromagnéticos 3D usando elementos de aresta, levando em conta o movimento e o circuito de alimentação. Desde 2005 é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. Participa de projetos de pesquisa financiados pela FINEP, CNPq e CAPES, bem como por empresas privadas.