



XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e
Transmissão de Energia Elétrica

GRUPO X

SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TRANSFORMADORES FRENTE A SURTOS ATMOSFÉRICOS, USANDO O MÉTODO TLM - TRANSMISSION LINE MODELLING

Sérgio Henrique Lopes Cabral

Adroaldo Raizer

UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de enrolamentos de transformadores frente a surtos atmosféricos, através de uma ferramenta simplificada, baseando-se em dados experimentais. Essa ferramenta baseia-se no método numérico TLM-*Transmission Line Modelling*, cujo uso tem sido intensificado recentemente na análise de diversos problemas de propagação de ondas. Os resultados obtidos demonstram que o método aplica-se eficientemente à análise de surtos em enrolamentos, graças à sua inerente simplicidade, que permite o desenvolvimento de programas de análise em planilhas eletrônicas. Com isso, pretende-se tornar acessível ao Engenheiro de concessionárias e de empresas fabricantes de transformadores o entendimento dos processos de falhas de isolamento ao longo do enrolamento, quando da incidência de surtos. Assim, o mesmo poderá prontamente analisar que especificações são necessárias para o isolamento elétrico, quando da compra ou fabricação de transformadores. Pretende-se também que o Engenheiro de concessionárias possa simular situações relativas à coordenação de isolamento, considerando a presença do transformador, através de programas simples, desenvolvidos por ele mesmo.

PALAVRAS-CHAVE : Enrolamentos, transformadores, surtos atmosféricos, sobretensões, coordenação de isolamento.

1.0 INTRODUÇÃO

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é das mais importantes solicitações ao isolamento de enrolamentos de transformadores, conectados nessas linhas. Para o Engenheiro que lida com transformadores é importante conhecer o comportamento do enrolamento do transformador

frente a esses surtos, entendendo como desenvolvem-se os potenciais distribuídos ao longo do mesmo, dos quais decorrem as falhas de isolamento. Igualmente importante é que o Engenheiro conheça quais são as características dos defeitos decorrentes desse tipo de solicitação, de forma que ele possa avaliar a eficácia do sistema de proteção da subestação e, também, ter condições de especificar, para compra ou venda, o transformador correto para atender às necessidades de isolamento pertinentes a cada projeto de coordenação de isolamento. Atualmente, para estudos dessa natureza existem *softwares* tradicionais, tais como o EMTP e ATP, por exemplo, que são bem difundidos, mas que requerem máquinas de algum porte e, principalmente, significativo tempo de treinamento para o uso adequado dos mesmos. A necessidade desses investimentos acabam por inviabilizar a análise precisa para esse tipo de problemas, em muitas das concessionárias e fabricantes nacionais. Recentemente, tem sido difundido o uso de novos *softwares* de análise, mais simples, mas que ainda apresentam problemas para seu pronto uso, devidos à necessidade desses em contemplar a análise de diversos outros tipos de circuitos. Isto reflete-se nos custos de aquisição, implica na necessidade de algum treinamento e os torna subutilizados. Como uma solução alternativa para esse problema, este trabalho apresenta uma ferramenta numérica computacional que permite ao próprio Engenheiro desenvolver seus programas de análise. A ferramenta numérica é baseada no método numérico TLM - *Transmission Line Method*, que devido à sua natureza inerentemente simples pode ser implementado em planilhas eletrônicas comerciais, permitindo uma pré-avaliação precisa, enquanto requer uma estrutura computacional relativamente modesta.

2.0 BASE TEÓRICA

Classicamente, a análise de enrolamentos frente a

surtos atmosféricos baseia-se na consideração de serem esses surtos da forma de degrau de tensão, incidente em enrolamento homogêneo, solidamente aterrado em seu extremo oposto ao da aplicação, tal como em (1). Embora essas premissas não estejam de acordo com a prática, importantes conclusões obtidas podem ser adequadas aos casos reais. Assim sendo, surtos incidentes em transformadores estabelecem instantaneamente tensões distribuídas ao longo de seus enrolamentos. Essa distribuição é um primeiro fator de solicitação ao enrolamento, cuja severidade vai depender de características do projeto do enrolamento. As principais delas estão representadas na constante $\alpha\lambda$, dada por :

$$\alpha\lambda = \sqrt{\frac{N C_g}{C_s \lambda}} \lambda$$

Onde λ é o comprimento do enrolamento, em metros; C_g é a capacitância do enrolamento distribuída ao potencial de terra, em F/m; C_s é a capacitância entre espiras, em Farad, e N é o número total de espiras do enrolamento. Portanto, a forma como se distribui inicialmente a tensão ao longo do enrolamento depende de fatores geométricos e materiais desse. Idealmente, quanto mais $\alpha\lambda$ aproxima-se da unidade mais uniforme será a distribuição inicial de tensão e, conseqüentemente, mais constante será o campo elétrico ao longo do mesmo. Em caso contrário, o campo elétrico tenderá a concentrar-se nas espiras iniciais, causando uma maior solicitação ao isolamento do enrolamento.

Em seguida, a distribuição de tensão ao longo do enrolamento poderá sofrer oscilações até atingir o regime final, o qual enrolamentos homogêneos apresentam-se uniforme, independentemente do valor de $\alpha\lambda$. Desta forma, conclui-se que enrolamentos que apresentem características tais que a distribuição de tensão inicial seja já uniforme alcançarão prontamente o regime permanente. Essa é, entretanto, uma condição necessária, mas não suficiente. Por outro lado, enrolamentos homogêneos que não apresentem uniforme distribuição inicial de tensão somente alcançarão o regime permanente após a ocorrência de oscilações de tensão ao longo dos mesmos. Essas oscilações têm as freqüências naturais de ressonância do circuito e devem-se à interação entre os elementos de acúmulo de energia magnética e elétrica. Respectivamente, indutâncias série e mútuas entre espiras, bem como capacitâncias. Essa oscilações dão origem a elevações de tensão ao longo de todo o enrolamento que constituem no segundo fator de solicitação ao isolamento do mesmo.

Resultados que confirmam esse comportamento de enrolamentos homogêneos podem ser obtidos analiticamente, pelo uso de cálculo operacional avançado, representando entretanto significativo esforço de cálculo. Por outro lado, utilizando-se o método TLM, o esforço, computacional, é relativamente pequeno e pode ser realizado em planilhas eletrônicas, que permitem pronta interação gráfica, portabilidade e são bastante difundidas.

Considere, então, um degrau de tensão, de amplitude V_0 , incidente num dos extremo de um enrolamento uniforme, localizado em $x = 0$, enquanto que o outro extremo está solidamente aterrado em $x = \lambda$, sendo λ o comprimento do mesmo. A simulação dessa situação é então realizada através do método TLM, visando reproduzir os resultados clássicos, disponíveis na literatura. A Figura 1 mostra o comportamento da distribuição inicial de tensão ao longo de três tipos de enrolamentos uniformes, tendo cada um desses diferentes valores de $\alpha\lambda$.

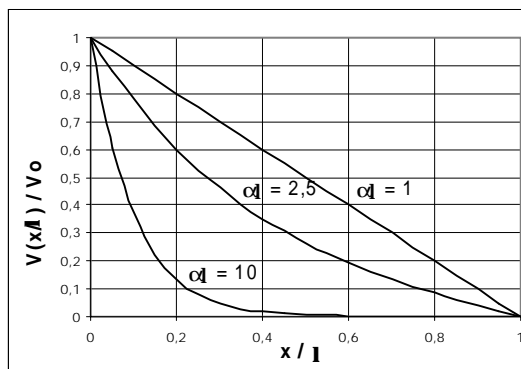
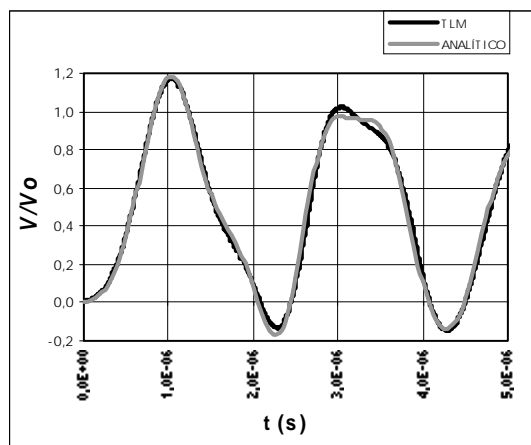


FIGURA 1 - Distribuição inicial de tensão para três diferentes enrolamentos uniformes

Para os instantes seguintes à incidência do degrau, a Figura 2 mostra o comportamento da tensão ao longo do tempo, no meio de um enrolamento homogêneo que apresenta as seguintes características :

- Indutância série, L_s : 8,75 μ H/m ;
- Razão entre o valor da capacitância entre espiras e o número total de espiras, C_s / N : 3pF/espira ;
- Capacitância à terra, C_g : 750 pF/m;
- Comprimento do enrolamento, λ : 40 cm;
- Resistência série nula;

FIGURA 2 - Comportamento da tensão ao longo do tempo, no meio do enrolamento. Resultados Analítico



e TLM

Conseqüentemente, o valor de $\alpha\lambda$ torna-se igual a 10 (dez). Para fins de melhor comparação de resultados,

na Figura 2 também é apresentado o resultado analítico do mesmo enrolamento. Ratificando a complexidade do método analítico de solução, a solução do mesmo se dá através de séries, e tem a seguinte forma :

$$\frac{V(x,t)}{V_0} = \left(\frac{\lambda-x}{\lambda} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ k_n \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{\lambda} \right) \cos \left(\frac{n\pi t}{\lambda \sqrt{L_s C_g + \left(\frac{n\pi}{\lambda} \right)^2 \frac{C_s \lambda}{N}}} \right) \right\}$$

Onde

$$k_n = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} \left(\frac{\operatorname{senh}(\alpha(\lambda-x))}{\operatorname{senh}(\alpha\lambda)} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{n\pi x}{\lambda} \right) dx$$

Que não é uma forma prática de lidar. Para a obtenção dos resultados analíticos da Figura 2 foi considerada a série contendo 20 termos ($n = 20$) e o cálculo dos coeficientes k_n se deu por integração numérica, seccionando-se o enrolamento em 100 (cem) trechos. Ainda assim, essa solução analítica somente se aplica a enrolamentos homogêneos, que são essencialmente teóricos. A consideração de fatores reais, tal como a variação das capacitâncias entre espiras, devido ao efeito de borda, representa extrema complexidade analítica. Entretanto, esse tal consideração é perfeitamente factível, em se usando o método TLM. O programa TLM, desenvolvido em planilha eletrônica para os cálculos desse exemplo, requereu um espaço de disco de 3,26 MB., incluindo-se os gráficos.

Ainda quanto à Figura 2, verifica-se que efetivamente ocorrem oscilações de tensão, bem como sobretensão em relação à amplitude da tensão de entrada. Essas oscilações têm frequências dependentes dos parâmetros anteriormente citados e, neste caso, apresenta a frequência de cerca de 440 kHz como fundamental e predominante.

Após o amortecimento das oscilações, todo enrolamento homogêneo apresentará uma distribuição uniforme de tensão, tal como correspondente a $\alpha\lambda = 1$, mostrado na Figura 1. Essa condição é verificada em não se considerando como nula a resistência série do enrolamento, que garante a atenuação das oscilações, através da dissipação de energia, por efeito Joule.

3.0 OBTENÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

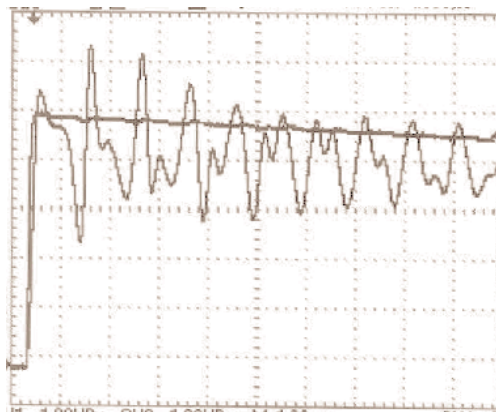
Tendo sido verificado que os resultados obtidos pela simulação TLM apresenta resultados satisfatórios, condizentes com aqueles conhecidos na literatura sobre o assunto, realiza-se um experimento para a comparação com os resultados do método TLM. Um enrolamento-protótipo com núcleo de ar é então construído, apresentando o máximo de

homogeneidade possível. As principais características construtivas desse enrolamento estão descritas na Tabela I. O enrolamento é contínuo e possui 09 (nove) terminais, sendo dois extremos e os intermediários para a medição de tensão. Cada par de terminais está separado por 31 espiras. Para fins de garantir uniformidade de capacitância à terra, o enrolamento apresenta em seu interior um cilindro oco de alumínio, centrado, com diâmetro externo de 175 mm, solidamente aterrado, de comprimento de cerca de 50 cm, colocado de forma que seus extremos sobressaiam em 10 cm cada extremo do enrolamento. O enrolamento é então ensaiado, tal como no arranjo mostrado na Figura 8, apresentada no fim do texto. Segundo a numeração dos terminais apresentada na Figura 8, aplica-se em seu primeiro terminal um degrau de tensão, a partir de um gerador de onda quadrada, com saída de 50 Ω . Essa tensão é registrada num canal do osciloscópio. No outro canal do osciloscópio registram-se a tensão entre os terminais 2 a 8, em relação à terra. O último terminal é conectado ao cilindro interno e ao terra da fonte, havendo somente um ponto ligado ao aterramento do laboratório. O conjunto está a cerca de 1,5 m do solo.

TABELA 1 - Características construtivas do enrolamento-protótipo.

Diâmetro do condutor (mm)	1,00
Camada de verniz (mm)	0,1
Número de espiras (cobre)	248
Diâmetro interno (mm)	200
Isolamento externo	Papel <i>Presspan</i>
Isolamento interno	Bobina de papelão

As Figuras 3 e 4 apresentam o comportamento da tensão de entrada e da tensão nos terminais 2 e 8, respectivamente, ao longo do tempo, obtidas experimentalmente. Para as mesmas, considere a escala de tempo como 1 μ s / divisão e a de amplitude



de tensão como 1 V/divisão.

FIGURA 3 - Tensão de entrada e do segundo terminal, ambas em relação à terra.

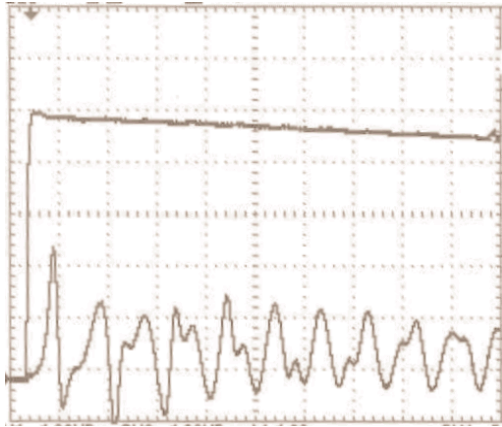


FIGURA 4 - Tensão de entrada e do penúltimo terminal, ambas em relação à terra.

Pelos resultados obtidos, percebe-se que a tensão de entrada sobre uma relativa atenuação, constante. Já a tensão nos terminais apresenta comportamento oscilatório, com frequência fundamental e predominante de cerca de 1MHz. No segundo terminal ocorre sobretensão da ordem de 30 % em relação à amplitude máxima da tensão de entrada.

Os resultados obtidos são utilizados para a simulação por TLM.

4. SIMULAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Considerando os dados experimentais obtidos, a simulação TLM é realizada através do sectionamento do enrolamento em 08 (oito) trechos iguais ao mostrado na Figura 5, de cujo os respectivos parâmetros concentrados são :

$$\Delta C_s = 20 \text{ pF}, \Delta C_g = 500 \text{ pF} \text{ e } \Delta L_s = 7,5 \text{ } \mu\text{H}$$

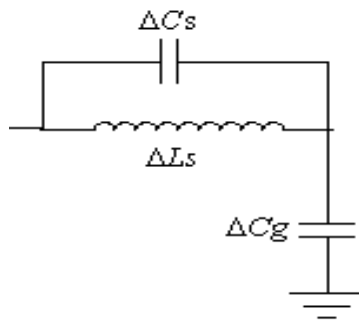


FIGURA 5 - Trecho representativo de uma das oito seções do enrolamento

Os valores dos parâmetros foram obtidos a partir de uma avaliação inicial, baseando-se na geometria do enrolamento, e corrigidos no sentido de que o

comportamento da tensão fosse o mais próximo do resultado experimental, nos sete terminais intermediários. As Figuras 6 e 7 mostram o comportamento da tensão nos terminais 2 e 8, obtido pela simulação TLM. Para tanto, consideram-se conectados em série oito trechos iguais ao da Figura 5, sendo o último deles solidamente conectado a um aterramento. O primeiro trecho esteve ligado uma fonte constante de 5,2 V através de um resistor de 0,8 Ω, responsável pelo decrescimento da tensão de entrada. As Figuras 6 e 7 comparam-se às Figuras 3 e 4, respectivamente e deve-se considerar os mesmos valores de escala, anteriormente citados.

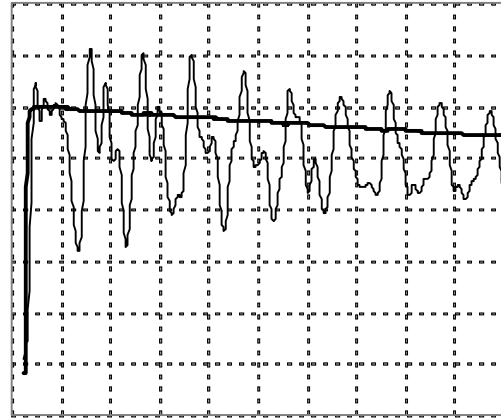


FIGURA 6 - Tensão de entrada e do segundo terminal, ambas em relação à terra - TLM

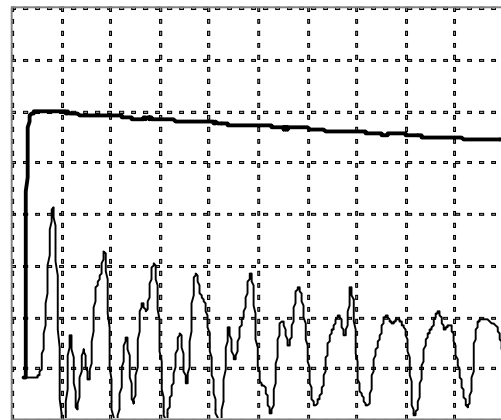


FIGURA 7 - Tensão de entrada e do penúltimo terminal, ambas em relação à terra.

Através da comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos por simulação TLM verifica-se que a simulação apresenta resultados satisfatórios e, portanto, o mesmo pode ser usado para simulações de casos reais, tal como o estudo da incidência de ondas padronizadas, 1,2/50 μs, plena e cortada, e ainda de uma extensa gama de situações de

interesse da Engenharia. O programa de cálculo, também desenvolvido em planilha, requereu um espaço de 2,58 MB, incluindo gráficos.

5. PRINCÍPIOS DE MODELAGEM TLM

A simulação do caso experimental, cujos resultados foram mostrados anteriormente, se deu através de princípios dos mais básicos do método TLM, que é a representação de indutores e capacitores através de fontes de tensão, em série com respectivas impedâncias de onda, tal como em (2) e (3). A resolução do circuito se deu de forma matricial, utilizando-se a análise nodal. Para tanto, cada uma das fontes de tensão foi convertida em fonte de corrente

Os programas de cálculo foram desenvolvidos em planilha eletrônica, que permite a pronta e rica interação gráfica com o usuário, sem a necessidade da compilação do programa de cálculo e do uso de *softwares* gráficos, à cada mudança de parâmetros. Ainda, tais planilhas apresentam diversos recursos matemáticos, tal como o cálculo matricial, que facilitam intensamente seu uso e seus cálculos apresentam resultados precisos. Quanto à sua disponibilidade no mercado, essas planilhas são bastante difundidas, o que facilita o transporte de programas entre máquinas.

6. CONCLUSÃO

Os resultados mostrados levam a concluir que o método TLM permite o desenvolvimento de programas para análise do comportamento de enrolamentos de transformadores frente surtos, sem requerer os tradicionalmente elevados investimentos em computadores. O método é inerentemente simples e sua aplicação em programas desenvolvidos em planilhas contribui singularmente para facilitar a análise do comportamento de enrolamentos. Partindo-se da comparação de seus resultados com resultados analíticos disponíveis na literatura ou, ainda, com resultados experimentais, o método TLM apresenta-se como uma eficiente ferramenta para análise de problemas de surtos em enrolamentos de transformadores. Ou seja, extrapola-se a utilização do método nas muitas situações que não nem apresentem solução analítica nem condições de realização em laboratório.

Esses resultados adicionam ao método TLM mais uma área de aplicação, perfazendo este uma gama cada vez maior de aplicação em problemas de Engenharia Elétrica, especialmente naqueles relacionados com Compatibilidade Eletromagnética, como analisado em (4), (5) e (6).

Dados complementares sobre a comparação entre resultados analíticos e TLM podem ser obtidos em (8).

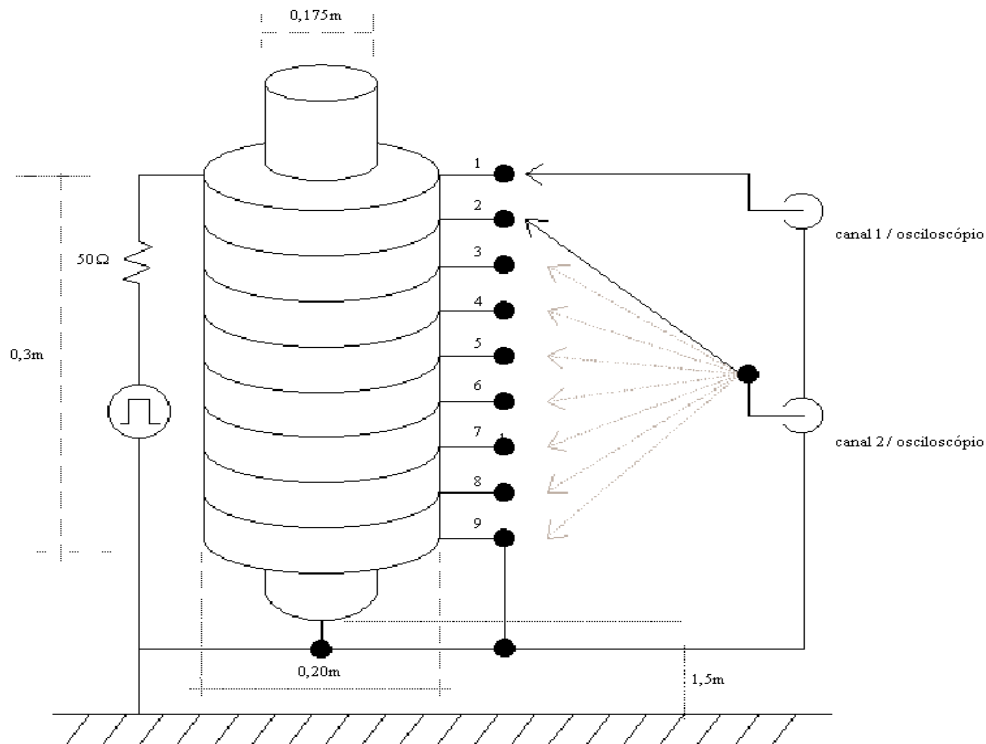


FIGURA 8 - Arranjo experimental para ensaio do enrolamento-protótipo. As escalas não estão proporcionais

7. BIBLOGRAFIA

- (1) GREENWOOD, A. Electrical Transients in Power Systems. 2. ed. New York : John Wiley & Sons, 1993.
- (2) CHRISTOPOULOS, C. The Transmission Line Modeling Method TLM. 1.ed. New York : IEEE Press, 1995.
- (3) FACCIONI, M. F^o. O Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e Aplicações em Compatibilidade Eletromagnética (EMC). Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997
- (4) DOMÍNGUEZ, H. ; RAIZER, A. Using TLM Method to Modeling Plane-Type Hyperthermia Applicators. THE NINTH BIENNIAL IEEE CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC FIELD COMPUTATION. Milwaukee, junho de 2000. p.275-278.
- (5) FERREIRA, G. S. Modelagem Numérica de Problemas de Compatibilidade Eletromagnética Utilizando TLM. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.
- (6) CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Análise de Desempenho do Método TLM em Problemas de Propagação Unidimensional Considerando a Existência de Perdas. IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. Natal, novembro de 2000. p. 200-203.
- (7) CABRAL, S. H. L. ; RAIZER, A. Resposta ao Degrau de Tensão para Enrolamentos Contínuos de Transformadores - Comparação entre o Método Analítico e o TLM. IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. Natal, novembro de 2000. p. 179-182.

8. DADOS BIOGRÁFICOS

Sérgio Henrique Lopes Cabral nasceu em São Paulo - SP, em outubro de 1965. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1989, pela COPPE/Universidade Federal Fluminense. Em 1994 obteve o título de Mestre, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente cursa doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Regional de Blumenau, desde fevereiro de 1994, onde leciona e é pesquisador.

Adroaldo Raizer nasceu em Lages - SC, em agosto de 1963. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1985. Em 1987 obteve o título de Mestre na mesma Universidade. Em 1991, obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica, Ph.D (honors), do Institut National Polytechnique de Grenoble. É professor titular do Dep. Eng. Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, onde leciona disciplinas dos cursos de graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica e é chefe do Grupo de Engenharia de Compatibilidade - GEMCO, tendo sob sua autoria mais de 100 trabalhos técnicos co-relacionados.