

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

**MODELAGEM DE BUCHAS CONDENSIVAS PARA TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA**

**LUIZ FERNANDO DE OLIVEIRA(1);ODIRLAN IARONKA(1);JOÃO PAULO VIEIRA(1);GUILHERME  
MASCHIO(1)  
WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A.(1)**

**RESUMO**

Faltas dielétricas em buchas condensivas e nas conexões dessas com as bobinas constituem parte principal das causas de falhas de transformadores de potência, frequentemente expondo o equipamento a ocorrências catastróficas. Uma das causas comuns para esses problemas está relacionada aos esforços dielétricos que sobretensões transitórias de alta frequência exercem no isolamento da bucha capacitiva. Neste contexto, este trabalho traz uma proposta para modelagem de buchas capacitivas com objetivo de melhorar a acuracidade dos estudos elétricos e de seletividade das subestações, proporcionando maior confiabilidade para o sistema elétrico. Um modelo é comparado com medições de SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*).

Modelagem de transformadores, VFTO, resposta em frequência, buchas capacitivas

**1 INTRODUÇÃO**

A aplicação de GIS (*Gas Insulated Substation*) tem crescido ano após ano devido as várias vantagens que a tecnologia apresenta, como a redução dramática das dimensões finais, fácil manutenção e ampla aplicabilidade em diversos ambientes, inclusive naqueles com atmosferas agressivas [1]. Os principais pontos negativos estão relacionados a falhas de isolamento, problemas mecânicos, vazamentos de gás e geração de VFTOs (*Very Fast Transient Overvoltage*) [2]. Não há dúvidas de que as vantagens tendem a fazer com que a tecnologia seja cada vez mais empregada.

Dentre todos as dificuldades relacionados à aplicação de GIS, a geração de VFTOs tem sido objeto de muitos estudos com o objetivo tornar viável e tão preciso quanto possível o cálculo da geração dos transitórios de tensão associados à abertura de disjuntores e que se propagam através do duto da GIS, chegando aos terminais dos transformadores. Em [3], os autores propõem a modelagem do sistema que abrange os componentes da GIS e o transformador, resolvendo as equações diferenciais do sistema, chegando a conclusão de que os VFTOs podem afetar tanto transformadores quando as buchas. Em [4], VFTOs medidos são aplicados à modelos elétricos de transformadores, onde os autores constatarem que a amplitude dos VFTOs é sempre inferior ao do LI (*Lightning Impulse*), mas que são muito mais numerosos e que a impedância do transformador afeta a forma de onda do VFTO devido às reflexões que causa (o modelo não considerou as buchas). Sistemas de medição para VFTO também foram objeto de pesquisa, como em [5] e [6], onde um sensor capacitivo é instalado diretamente na bucha e técnicas de convolução são utilizadas para reconstrução do sinal, que sofre interferência devido à capacitância intrínseca da bucha. Nestes trabalhos, o transformador foi modelado de várias formas diferentes, desde modelos relativamente completos com representação de espiras ou grupos de espiras usando técnicas de linhas de transmissão ou circuitos concentrados, até modelos mais limitados, como uma capacitância para terra.

Um aspecto frequentemente avaliado é a conexão do transformador à GIS, que pode ser feita diretamente com uma bucha Gás/Óleo ou através de uma linha aérea. Todos os trabalhos constataram que transformadores conectados diretamente tendem a sofrer mais com os VFTOs devido à elevada taxa de crescimento (maiores frequências) dos transitórios, que é atenuada pela linha aérea. Alguns estudos [7], [8] apontam para o comprimento de 3m como suficiente para reduzir a frente de onda do VFTO em pelo menos 30%. Além deste detalhe, outras formas de atenuar VFTOs foram estudados, desde técnicas específicas até características intrínsecas dos componentes da GIS.

Vários trabalhos que também modelam o sistema completo da GIS incluindo transformadores [1], [4], [9], [10], [7], [11] citam a distribuição não-linear (tipicamente exponencial como no ensaio de CLI (*Chopped Lightning Impulse*)) de tensão entre espiras como um esforço adicional aplicado às primeiras espiras, nas entradas dos enrolamentos, que podem exigir consideração adicional de isolamento nestes pontos. Estes trabalhos ressaltam, como o principal problema e que deve ser evitado, a coincidência das frequências de ressonância do sistema da GIS com as frequências de ressonância do transformador. Citam que as frequências características típicas para ambos podem variar (com múltiplos valores) entre 2 e 10MHz. Há consenso de que um único evento de VFTO dificilmente irá levar

a isolamento à ruptura devido a energia envolvida ser relativamente baixa, mas o efeito cumulativo devido aos vários eventos sucessivos associados à abertura de disjuntores em GIS contribui para a degradação da isolamento.

Em [10], é citado o fato de que é inviável alterar o projeto do transformador para evitar ressonâncias internas, já que o equipamento é composto por espiras enroladas (circuitos RL) agrupadas próximas umas às outras (gerando capacitâncias parasitas). Essa construção dá origem a diversos circuitos RLC que sempre e invariavelmente possuirão alguma frequência característica.

O objetivo dos autores com este trabalho é contribuir para a acuracidade dos estudos elétricos de subestações propondo a caracterização adequada das buchas capacitivas por modelos circuitais que são adicionados ao modelo do transformador. Aumentando a banda de frequência em que o modelo equivalente do transformador é válido e, assim, permitindo identificar de maneira mais precisa possíveis reflexões e ressonâncias danosas à isolamento do equipamento.

## 2 MODELOS PARA TRANSFORMADORES E BUCHAS

A representação de equipamentos elétricos na forma de circuitos equivalentes é uma técnica antiga e de fundamental importância para calcular o comportamento e a contribuição de cada equipamento no contexto de um sistema elétrico maior, como instalações elétricas ou o sistema de potência.

Nos JWG A2/C4.3 e JWG A2/C4.39 do Cigré, em [12] e [13], é feita uma extensa revisão dos métodos disponíveis e do estado-da-arte para modelagem de transformadores e são classificados os modelos adequados para cada faixa de frequência. Algumas características de transformadores que interferem e que são levadas em conta, ou desprezadas, por cada modelo são destacadas a seguir:

- Saturação do núcleo magnético: a saturação do núcleo interfere nos transitórios de baixa frequência, onde as frequências envolvidas não superam 500 Hz [12];
- Dependência dos parâmetros com a frequência:
  - Indutâncias: a distribuição do campo magnético devido às correntes de carga não é a mesma sob qualquer frequência, em geral, há uma alteração sensível nas indutâncias parciais devido à indução de correntes parasitas nos condutores;
  - Resistências: as perdas por correntes parasitas dependem fortemente da frequência de excitação e proporcionam um efeito fundamental de amortecimento para altas frequências;
- Perdas dielétricas: poucos estudos abordam o tema, mas as perdas dielétricas também contribuem para o amortecimento das altas frequências, já que as correntes de deslocamento aumentam linearmente com a frequência.

Tais características também podem ser extrapoladas para os modelos de buchas. Ainda, vale mencionar as diferenças fundamentais entre dois tipos de modelos: “caixa-branca” e “caixa-preta”.

### 2.1 Circuitos “caixa-branca”

Tais modelos são utilizados principalmente por fabricantes de transformadores como uma forma de avaliar as tensões internas no equipamento quando este é submetido a algum evento transitório eletromagnético. Se encaixam neste contexto os ensaios de SI (*Switching impulse*), o LI e o CLI. Os modelos “caixa-branca” são sempre criados a partir das características geométricas e constitutivas dos equipamentos. O procedimento que utiliza essas características para chegar aos valores utilizados nos circuitos equivalentes é denominado “cálculos dos parâmetros de circuito”, este tema é discutido em [14] e [15].

É possível elaborar modelos com diferentes níveis de discretização e que levam em conta determinadas características (como as citadas anteriormente no item 2), desprezando outras. Em geral, para o fabricante, o quesito mais importante é a máxima diferença de potencial que surge entre elementos próximos (como espiras ou discos dos enrolamentos) durante o transitório temporal, utilizando essa informação para calcular os esforços dielétricos e, assim, dimensionar adequadamente os diversos níveis de isolamento requeridos em cada ponto do projeto de transformadores. Algo muito similar acontece durante o projeto de buchas.

Diferentes recursos matemáticos também podem ser empregados, tipicamente, modelos de circuitos concentrados, modelos de linhas de transmissão (parâmetros distribuídos) ou soluções híbridas, que empregam ambos os modelos. A questão central para os modelos de caixa-branca é permitir que a tensão em cada nó interno do transformador possa ser acessada, contudo, quando o interesse é apenas representar o transformador para obter o transiente no sistema de potência, os modelos “caixa-preta” podem ser mais adequados principalmente devido ao reduzido custo computacional.

### 2.2 Circuitos “caixa-preta”

Modelos denominados “caixa-preta” representam o equipamento elétrico apenas do ponto de vista dos terminais. A informação dos transitórios internos não é representada e não pode ser acessada. Estes modelos podem ser construídos a partir dos parâmetros de projeto, ou seja, partindo do modelo “caixa-branca” utilizando técnicas de síntese de circuitos, como em [16], ou também podem ser elaborados a partir de medições em transformadores (uma

extensa revisão é feita em [17]), utilizando técnicas como a de *Vector-Fitting* [18]. Esta técnica permite a elaboração de modelos que externam todos os terminais nos quais é possível realizar medições de impedância terminal, modelando adequadamente tanto a impedância terminal de cada enrolamento como a transferência capacitiva e indutiva entre eles. Já utilizando a técnica de síntese de circuitos, é relativamente fácil elaborar modelos de admitância terminal para cada enrolamento, mas atender simultaneamente a impedância terminal de cada enrolamento e a transferência entre eles é praticamente inviável.

### 3 MODELO CIRCUITAL PARA TRANSFORMADORES E REATORES

Na brochura [12], “Interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência”, ficou bastante claro que os modelos dos transformadores e reatores afetam de forma decisiva os resultados obtidos nos estudos de transientes no sistema de potência. Desde então, os fabricantes têm desenvolvido modelos que possam ser incorporados nos programas computacionais tipicamente utilizados nestes estudos (ATP e EMTP, na maioria dos casos). Em vários casos, os clientes têm inserido cláusulas nas Especificações Técnicas que exigem o fornecimento de modelos que sejam adequados para uma ampla faixa de frequência, a serem comparados com os ensaios de SFRA durante os ensaios finais inspecionados no fabricante.

Em [14] e [15], uma técnica eficiente aplicando os conceitos de permeabilidade complexa é empregada no cálculo dos parâmetros de circuito de alguns transformadores nos quais medição de impedância terminal e impulso recursivo foram executadas em vários terminais da parte ativa (sem óleo e sem as buchas). A principal característica desses modelos é o cálculo dos parâmetros usando MEF (Método dos Elementos Finitos) em uma ampla faixa de frequência, garantindo precisão do cálculo de campo magnético e perdas em toda a faixa de frequências. Em seguida, a técnica *Vector Fitting* é aplicada junto à síntese de circuitos acoplados de Mombello para obter um modelo “caixa-branca”, adequado para simuladores de circuitos (cálculo no domínio do tempo ou frequência) que permite a inserção de componentes externos, como os varistores, e leva em conta o efeito de amortecimento em alta frequência fornecido pelas perdas nos condutores. Contudo, a técnica tem os mesmos percalços das demais e tanto a precisão quanto o desempenho dependem do nível de discretização empregado, no caso, o número de polos utilizados no *Vector Fitting* e consequentemente nos circuitos acoplados de Mombello. Neste modelo, as buchas capacitivas presentes tanto no terminal H1 como no H0 são representadas como capacitâncias (valores de C1 das buchas) conectadas entre os nós dos respectivos terminais dos enrolamentos e a terra.

Para demonstrar os aspectos do nível de discretização, um transformador monofásico 11,667/16,667 MVA (KNAN/KNAF) 13,8 / 138/ $\sqrt{3}$ CST kV (enrolamento de BT em disco contínuo e AT em disco entrelaçado) foi modelado empregando a técnica supracitada. O nível de discretização nos enrolamentos foi de um elemento para cada par de discos.

Por ser um ensaio frequentemente realizado na inspeção final de transformadores o ensaio de SFRA foi reproduzido na modelagem. Como no ensaio, a relação entre o ponto de medição ( $V_{REF}$ ) e o sinal de entrada ( $V_{SRC}$ ) é registrado, de acordo com a Figura 1. O ensaio pode ser realizado tanto pela Alta Tensão (terminal H1) como pelo de Baixa Tensão (Terminal X1). Por limitações de extensão, este trabalho se restringirá aos ensaios realizados pelo terminal H1.

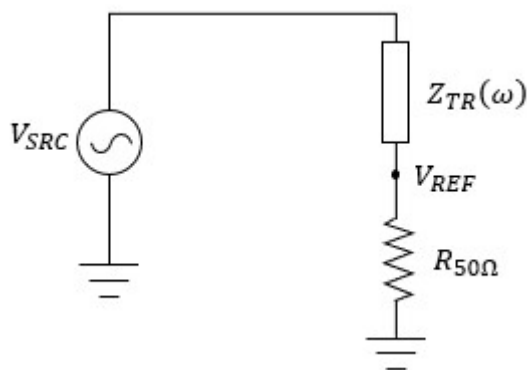


Figura 1 – Circuito para execução do ensaio de SFRA

A Figura 2 exibe o resultado do ensaio de SFRA no transformador monofásico nos terminais de H1 nas frequências compreendidas na faixa entre 10 Hz e 5MHz. Pode-se observar que a frequência de ressonância principal que marca o ponto de transição de fim do comportamento puramente indutivo do transformador fica próxima de 1,5 kHz e as antirressonâncias principais, que geralmente são atribuídas a ressonâncias internas ficam entre 10 kHz e 400 kHz. Finalmente, acima de 1 MHz se percebe a alteração do comportamento do sinal, que é atribuído às buchas.

Na Figura 3 é exibida a resposta que o modelo circuital é capaz de reproduzir para diferentes níveis de amortecimento (diferentes números de polos). O custo do nível mais preciso de amortecimento é a adição de circuitos auxiliares que aumentam as dimensões do circuito. Ao utilizar 1 polo, o número de nós do circuito original dobra, ao adicionar 2

polos obtém-se o triplo do número de nós e assim por diante. Visivelmente, há amortecimento das frequências de ressonância à cada polo que é adicionado e o amortecimento é mais acentuado à medida que a frequência aumenta.

Para possibilitar a comparação entre os valores medidos com os valores calculados usando a metodologia proposta neste trabalho, a Figura 4 é apresentada. Constata-se que o circuito equivalente apresentou excelentes resultados até aproximadamente 250 kHz, caracterizando adequadamente tanto módulo quanto fase. Na principal frequência de ressonância em 1,5 kHz há uma transição descaracterizada no gráfico de fase que pode ser suprimida (ou seja, adequadamente amortecida) caso mais polos sejam adicionados ao circuito. A partir do 1 MHz ocorre clara discrepância entre o modelo circuital e o ensaio real. Não há dúvidas de que a discrepância ocorre pela modelagem simplificada (capacitância para terra) escolhida para as buchas capacitivas.

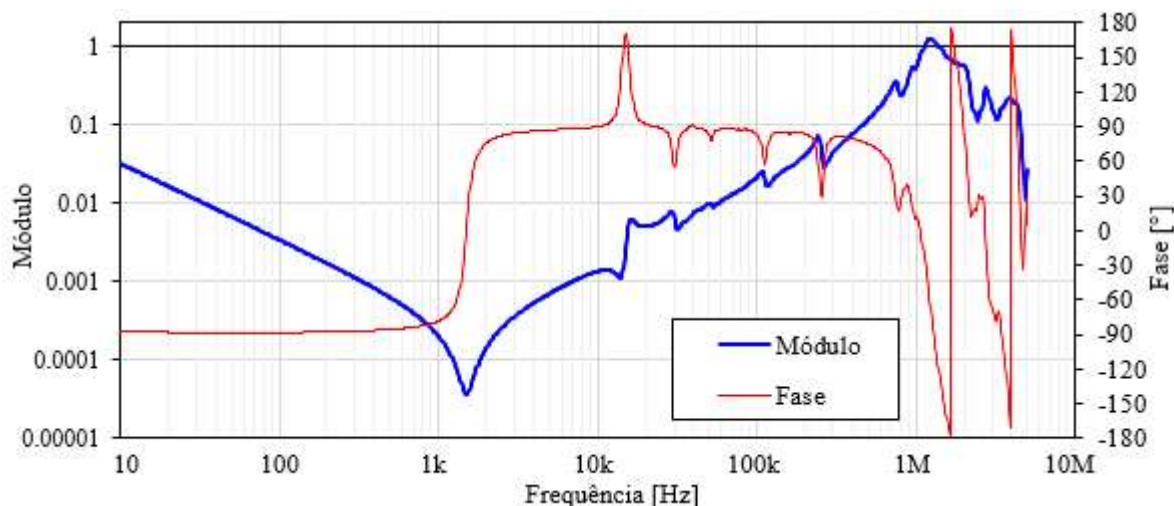


Figura 2 – Registro do ensaio de SFRA no transformador monofásico (terminal H1)

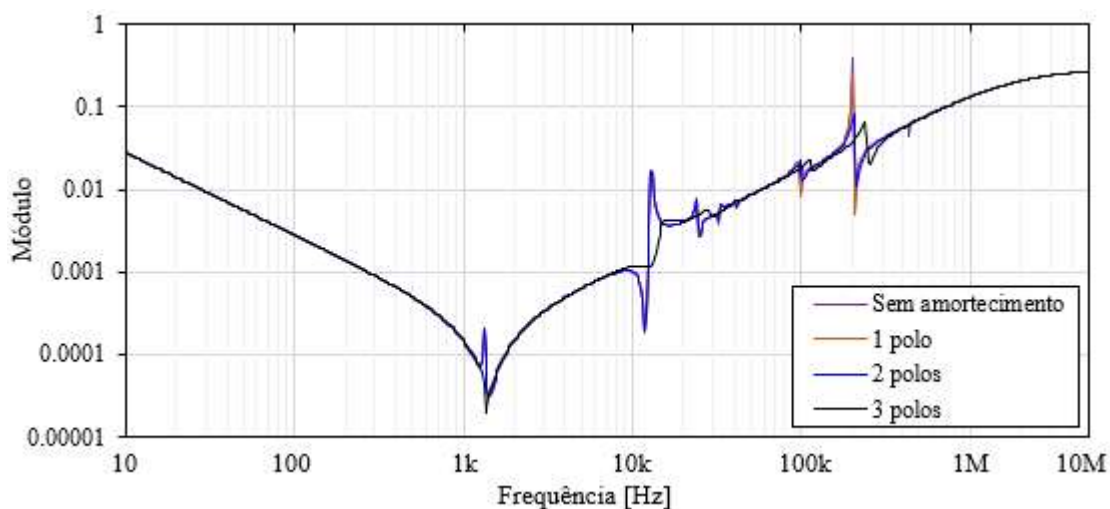


Figura 3 – Módulo das respostas obtidas para o modelo circuital com diferentes configurações de amortecimento

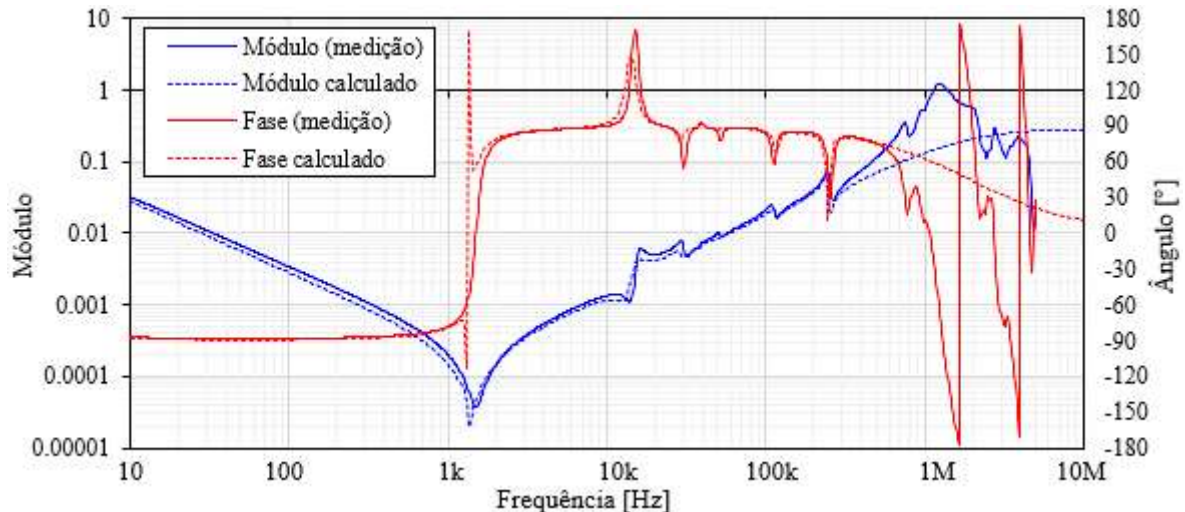


Figura 4 – Comparação entre medições de SFRA e simulação através de circuitos equivalentes “caixa-branca”

#### 4 MODELO CIRCUITAL PARA BUCHAS CAPACITIVAS

Buchas capacitivas (também frequentemente chamadas de buchas ‘condensivas’) têm a tarefa nada simples de levar o potencial do transformador até o sistema elétrico passando pelo tanque que está aterrado, portanto, sendo submetida a elevadas diferenças de potencial e, por consequência, elevados níveis de campo elétrico. São construídas basicamente com diversas camadas de isolamento intercaladas com lâminas de alumínio (há algumas variações) que têm o objetivo de homogeneizar a distribuição do campo elétrico. Estima-se que 80% das buchas capacitivas em operação hoje em dia são do tipo OIP (*Oil Impregnated Paper*) [19]. Em [20], os autores discorrem sobre o elevado número de falhas em buchas capacitivas e sobre os principais desafios de projeto de buchas e propõem uma metodologia para obter a configuração ótima. Ao contrário dos modelos circuitais de transformadores, que têm se tornado um tópico bastante popular, os modelos para buchas são objeto de estudo de um número menor de pesquisadores. Em [21], os autores propõem duas diferentes técnicas para modelagem do corpo capacitivo das buchas utilizando linhas de transmissão de parâmetros distribuídos, como também, circuitos elétricos concentrados, com o objetivo final de calcular a distribuição de tensão ao longo do corpo capacitivo da bucha durante fenômenos transitórios do sistema elétrico. Os resultados obtidos são comparados com medições e identificam uma forte dependência da resposta em função da impedância dos cabos de ligação (principalmente no terminal de tap, conectado à última camada). Outros trabalhos também contribuem com algumas melhorias e avaliam tal influência da terminação de tap, como em [22], [23], [24], [25] e [26]. Assim como para no transformador, há um consenso entre todos os trabalhos de que um único VFTO não pode levar bucha ou transformador à falha, mas que o processo cumulativo devido à vários VFTOs ao longo da vida útil dos equipamentos é que pode danificar a isolamento. Também há evidências de que as buchas capacitivas geralmente possuem uma ou mais frequências de ressonância entre 1 e 20Mhz.

Pode-se destacar ainda o trabalho desenvolvido em [27] em que são feitas medições, modelos e recomendações sobre o processo de ensaio de resposta em frequência na bucha, especialmente considerações sobre a referência para terra. O modelo proposto é bastante discretizado e chega a utilizar até 500 linhas de transmissão para calcular a resposta tanto no tempo como na frequência. Várias não-linearidades constitutivas são consideradas (apenas para a modelagem em frequência) e o ensaio de VFTO é realizado e comparado com os cálculos. Uma importante conclusão é de que o ensaio de VFTO tem validade limitada já que depende completamente das frequências de ressonância do circuito de ensaio, que provavelmente serão diferentes do circuito da GIS onde o transformador, e as buchas, serão instalados. Finalmente, em [28], é proposta uma alternativa para atenuar as frequências de ressonâncias de buchas capacitivas RIP (*Resin Impregnated Paper*).

No presente trabalho, o modelo adotado utiliza circuitos de parâmetros concentrados para modelar o comportamento das buchas capacitivas. A Figura 5 exibe um esquema para o circuito empregado, indicando os diferentes componentes da bucha. Para o condutor e o tubo interno, as indutâncias e resistências foram calculadas utilizando MEF, em seguida, usando *Vector Fitting* e circuitos de Mombello, a variação da resistência (dependência das perdas com a frequência) é modelada também no domínio do tempo, sendo uma contribuição para os modelos de buchas propostos até então. Pode-se observar as divisões ao longo do comprimento do condutor (na figura, são 4 segmentos), invariavelmente, mais divisões levam a melhores resultados, porém também aumentam o custo computacional. Essas divisões são extrapoladas para o corpo capacitivo, que, por sua vez, possui também divisões radiais representando as camadas capacitivas. A altura do corpo capacitivo vai diminuindo à medida que se afasta do tubo interno.

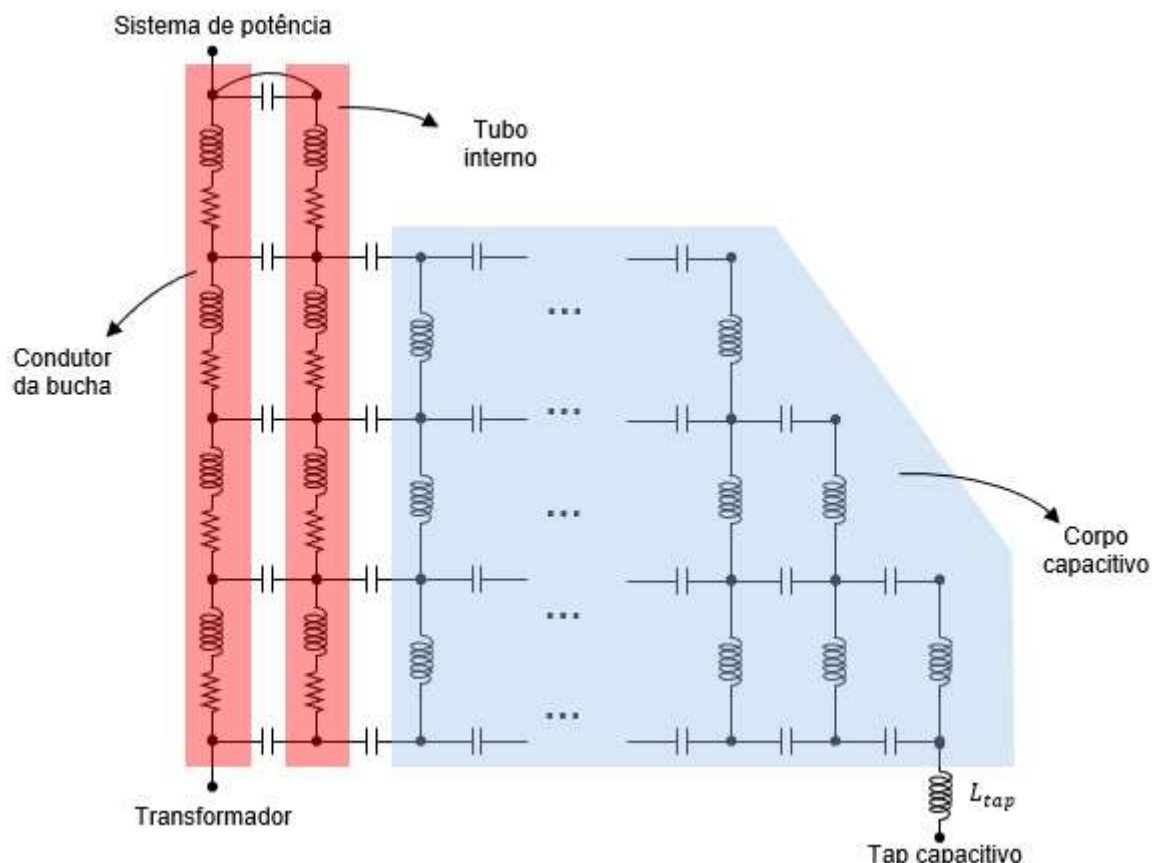


Figura 5 – Esquema circuital do modelo utilizado para bucha capacitiva (indutâncias mútuas omitidas)

Na Figura 6, considerando uma bucha de 138 kV com  $C1^1$  de 556 pF, a resposta obtida pelo modelo é comparada com a resposta de SFRA executado apenas na bucha. Podem ser observadas discrepâncias que são atribuídas pelos autores tanto a imperfeições de modelagem (que não detinham o projeto completo das buchas) como à variáveis intrínsecas das medições, que foram realizadas sem o estabelecimento de uma referência definida para terra através de um tubo metálico (como em [21]) ou de fios aterrados (como em [27]).

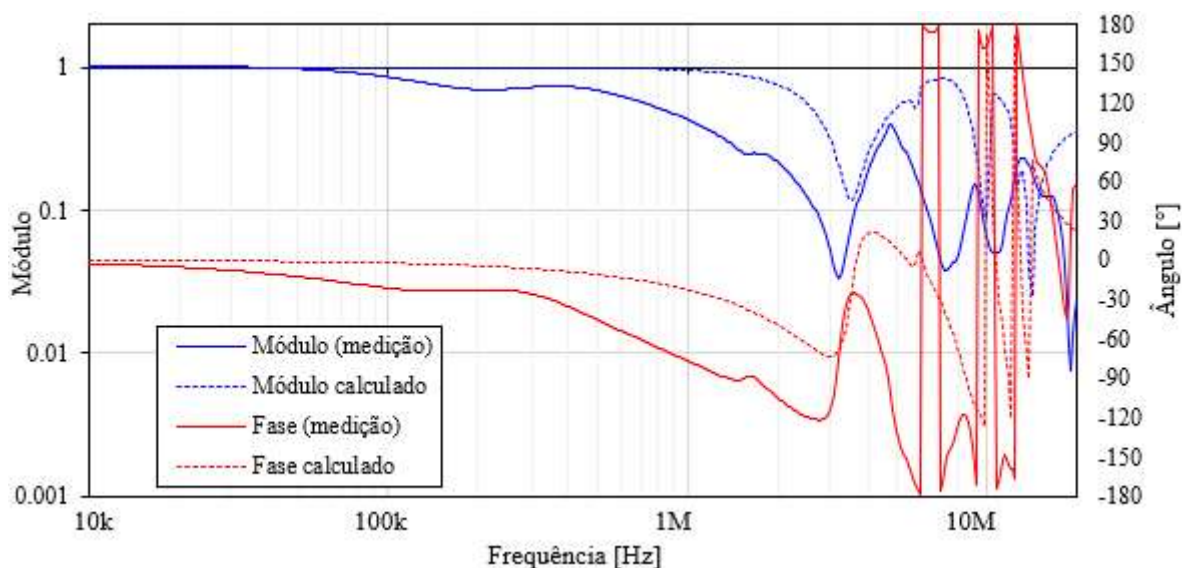


Figura 6 – Comparativo entre resposta obtida no modelo da bucha comparada com medições de SFRA

<sup>1</sup> Capacitância estabelecida entre o tubo interno do corpo isolante da bucha e a camada conectada ao tap capacitivo.



## 5 BANDA DE FREQUÊNCIA DO MODELO COMBINADO

Combinando os modelos do transformador e das buchas, apresentados nos itens 3 e 4, respectivamente, espera-se obter um modelo adequado para a faixa de 10 Hz até 10 MHz, melhorando o resultado apresentado anteriormente na Figura 4.

A Figura 7 exibe o resultado final do modelo do transformador com as buchas de H1 que é conectada à fonte do equipamento de SFRA e de H0 que é conectada à terra e à referência do equipamento de SFRA. Há uma sensível melhora da resposta na faixa de frequência acima de 1 MHz (a medição vai apenas até 5 MHz) que ainda não é tão acurada quando à resposta para frequências menores, mas que, sem dúvidas, caracteriza de forma mais aproximada o comportamento da bucha.

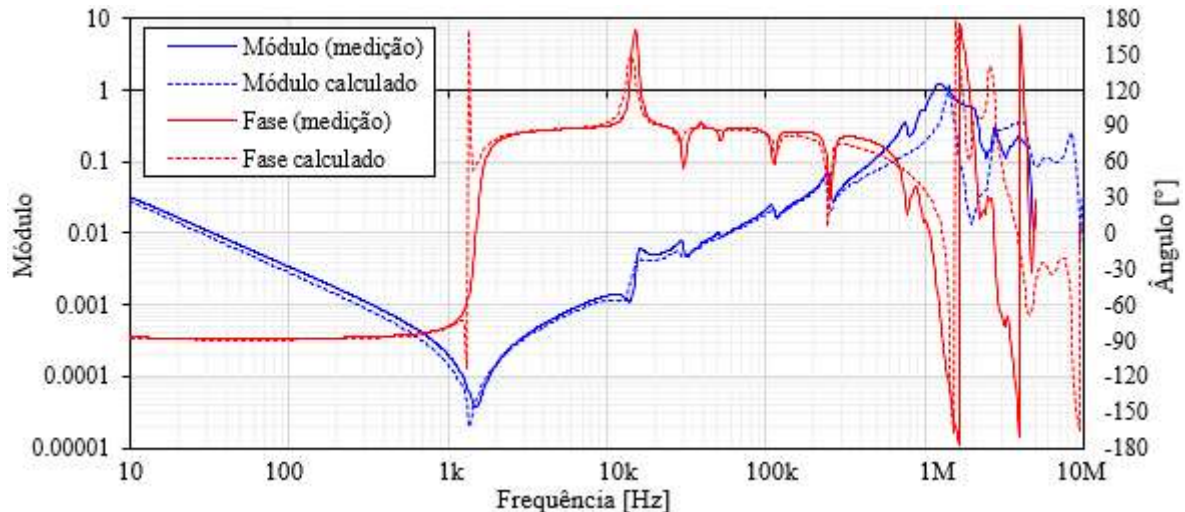


Figura 7 – Comparação entre medições de SFRA e simulação através de circuitos equivalentes “caixa-branca” considerando o transformador e as buchas

## 6 CONCLUSÕES

Os autores empregaram técnicas alinhadas com o estado-da-arte para a modelagem de transformador e buchas com o objetivo de obter modelos representativos para transformadores em ampla faixa de frequência. O objetivo foi atingido de forma satisfatória, mas ainda com várias oportunidades de melhoria.

Quanto à modelagem dos enrolamentos do transformador, o domínio de todos os detalhes do projeto associado às técnicas atuais de modelagem (cálculo dos parâmetros por MEF, *Vector Fitting*, circuitos acoplados de Mombello) permite aos autores elaborar modelos que refletem praticamente todas as características de ressonância de pontos internos do equipamento.

Em relação à modelagem das buchas, a carência de algumas informações específicas sobre o projeto e construção da isolamento, principalmente das camadas capacitivas, obrigou os autores a assumir valores que, embora não divirjam drasticamente dos valores reais, podem não ser precisos o suficiente para reproduzir as medições realizadas. Tais medições também podem ser melhor utilizadas como base comparativa caso a referência para terra seja melhor definida, como em vários trabalhos citados.

O modelo circuital que comporta o transformador e as buchas apresentou desempenho satisfatório para uma ampla faixa de frequência, desde 10 Hz até 10 MHz, o que o torna adequado para praticamente todos os tipos de estudo de transitórios de alta frequência típicos do sistema elétrico.

Para aprimorar ainda mais a validade dos modelos das buchas, os autores acreditam que a parceria entre fabricantes de transformadores e fabricantes de bucha seja de crucial importância para um compartilhamento de informações específicas dos produtos e a obtenção de um modelo mais completo e fidedigno.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Lu e B. Zhang, “Calculation of Very Fast Transient Overvoltages in GIS,” *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, pp. 1-5, Agosto 2005.
- [2] R. Durga e J. Amarnath, “Analysis of VFTO across bushing in 765kV gas insulated substation using EMTP software,” *Conference: 2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*, Setembro 2014.

- [3] G. Youhua, Y. Hong, W. Erzhi e C. Yundong, "Calculation of very fast transient over-voltage and its distribution in transformer windings in 110kV GIS," *2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1300-1303, Outubro 2007.
- [4] K. Raja, F. Devaux, S. Lelaidier e A. Girodet, "Very fast transient voltages & dielectric withstand effects on transformer insulation," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 506-509, Outubro 2002.
- [5] G. Ma, C. Li, J. Quan e J. Jiang, "Calibration of VFTO bushing sensor based on convolution model," *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1631-1635, Julho 2009.
- [6] G. Ma, C. Li, J. Quan e J. Jiang, "Very fast transient oscillation measurement at a 750kV substation," *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4, Abril 2010.
- [7] L. Zhao, L. Ye, S. Wang, Y. Yang, P. Jiang e X. Zou, "Research on very fast transient overvoltage during switching of disconnector in 550kV GIS," *2018 IEEE 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*, pp. 114-118, Dezembro 2018.
- [8] A. Tavakoli e A. Gholami, "Influence of terminal components for suppression of high-frequency transients in GIS," *2010 Conference Proceedings IPEC*, pp. 68-71, Janeiro 2010.
- [9] G. Liang, H. Sun, X. Zhang e X. Cui, "Modeling of Transformer Windings Under Very Fast Transient Overvoltages," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 621-627, Novembro 2006.
- [10] M. Babaei, A. Abu-Siada e M. Babaei, "Suppressing resonance in transformer winding under very fast transient overvoltage," *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, pp. 1037-1042, Dezembro 2016.
- [11] R. Feng, C. Che, J. Zhao, Q. Wang, L. Zhao e W. Yan, "Research on Influencing Factors of Very Fast Transient Overvoltage in EHV GIS," *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1-4, Setembro 2020.
- [12] JWG A2/C4-3, Interação entre transformadores e o sistema elétrico com foco nos transitórios eletromagnéticos de alta frequência, Cigré, 2011.
- [13] JWG A2/C4.39, Electrical transient interaction between transformers and power systems, Cigre, 2014.
- [14] L. F. de Oliveira, A. Portillo, F. Portillo, O. Iaronka e K. J. Salvador, "Cálculo de parâmetros circuitais dos modelos de alta frequência para transformadores de potência," *XXV SNPTTE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Novembro 2019.
- [15] A. Portillo, L. F. de Oliveira e F. Portillo, "Calculation of circuit parameters of high frequency models for power transformers using FEM," *5th International Colloquium on Transformer Research and Asset Management*, pp. 163-182, 2020.
- [16] R. M. Azevedo, M. G. Rodrigues e W. Cerqueira, "Um método prático para representação de transformadores de potência baseado em medições de resposta em frequência," *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, Maio 2013.
- [17] B. Jurisic, I. Uglesic, A. Xemard e F. Paladian, "Difficulties in high frequency transformer modeling," *Electric Power Systems Research*, Fevereiro 2016.
- [18] B. Gustavsen e A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Trans. Power Delivery*, pp. 1052-1061, Julho 1999.
- [19] D. J. Smith, S. G. Mcmeekin, B. G. Stewart e P. A. Wallace, "The modelling of electric field, capacitance and dissipation factor of a high voltage bushing over varying frequency," *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-6, Dezembro 2012.
- [20] M. R. Hesamzadeh, N. Hosseinzadeh e P. Wolfs, "An advanced optimal approach for high voltage AC bushing design," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 461-466, Abril 2008.
- [21] A. Ardito, R. Iorio, G. Santagostino e A. Porrino, "Accurate modeling of capacitively graded bushings for calculation of fast transient overvoltages in GIS," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Julho 1992.



- [22] m. Mohana Rao, T. Prasad Rao, S. S. Tulasi Ram e B. P. Singh, "Simulation of capacitively graded bushing for very fast transients generated in a GIS during switching operations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 461-466, Abril 2008.
- [23] A. R. Ram, J. Amarnath e S. Kamakshiah, "Estimation of very fast transient over voltages on bushing connected in GIS," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2012.
- [24] J. Cheng, P. Werelius, D. Robalino e D. Wang, "The nonlinear behavior of the transformer insulation system," *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2013.
- [25] M. M. Saied, "The frequency and transient analyses of a high voltage bushingTransformer cascade," *Journal of Power Electronics & Power Systems*, Maio 2019.
- [26] M. M. Saied, "A contribution to the frequency and trasient analysis of high voltage bushings," *Journal of Power Electronics & Power Systems*, Maio 2019.
- [27] K. Johansson, U. Gäfvert, G. Eriksson e L. Johansso, "Modeling and measurements of VFT properties of a transformer to GIS bushing," *Bienal do Cigre 2010 (A2\_302)*, 2010.
- [28] J. Czyzewski, J. Rocks, K. Johansson e A. Michalik, "VFT Performance of RIP Bushings with Resistive Field-Grading Layers," *CIGRE SC A2 & D1 JOINTCOLLOQUIUM 2011, KIOTO JAPAN*, 2011.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Fernando de Oliveira nasceu em Blumenau-SC, Brasil em 1988. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2013 e é Mestre em Engenharia Elétrica na UFSC (GRUCAD) desde 2018. Trabalha na WEG T&D desde 2007, onde passou pelas áreas de produção e técnica, entre 2009 e 2013 trabalhou diretamente com cálculo e dimensionamento de transformadores e desde 2013 exerce atividades no departamento de pesquisa e desenvolvimento com foco em pesquisa tecnológica, simulações numéricas e desenvolvimento de softwares para engenharia.

## (2) ODIRLAN IARONKA

Odirlan Iaronka nasceu em Casca-RS, Brasil em 1990. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2014. Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de Eletromagnetismo aplicado em Engenharia Elétrica no GRUCAD em 2019. Desde de 2014 trabalha na WEG - Unidade Transmissão e Distribuição no Setor de Cálculo de Transformadores de Potência. Desempenha também atividades de análise de falhas em equipamentos, pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para transformadores e aplicação de ferramentas numéricas computacionais para análise e otimização do cálculo e projeto dielétrico, magnético e térmico de transformadores e reatores de potência.

## (3) JOÃO PAULO VIEIRA

Nasceu em Blumenau/SC em 1997. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2020 e cursa Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC - GRUCAD). Trabalha na WEG T&D desde 2016, onde iniciou como calculista de transformadores a seco, passando então para cálculo de transformadores imersos em óleo. Atualmente executa atividades no departamento de pesquisa, desenvolvimento com foco em simulações numéricas, software para engenharia e desenvolvimentos de novos produtos.

## (4) GUILHERME MASCHIO

Guilherme Maschio nasceu em Sananduva-RS, Brasil em 1997. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2019. Mestrando pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de Eletromagnetismo aplicado em Engenharia Elétrica no GRUCAD. Desde de 2019 trabalha na WEG - Unidade Transmissão e Distribuição no Setor PDI e Produtos Digitais de Transformadores de Potência. Exerce atividades de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para transformadores e trabalha na aplicação de ferramentas numéricas computacionais para análise e otimização do cálculo e projeto dielétrico, magnético e térmico de transformadores, reatores de potência, transformadores seco e chaves seccionadoras.