



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

**A TÉCNICA DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA APLICADA AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS E MODELAGEM
DE TRANSFORMADORES AUXILIANDO NA GESTÃO DE ATIVOS**

**GABRIELA SAMPAIO RÊMA(1); BENEDITO DONIZETI BONATTO(2); ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE
LIMA(3); ANDRÉ TOMAZ DE CARVALHO(1)**

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1); UNIFEI(2); COPPE/UFRJ(3)

RESUMO

O artigo apresenta a técnica de resposta em frequência aplicada ao diagnóstico de falhas e modelagem em altas frequências de transformadores dando subsídio à etapa de projeto e, sobretudo, às áreas de operação e manutenção na gestão dos ativos. São apresentadas medições em campo de resposta em frequência e a modelagem através da matriz de admitância de um transformador de potência de 200 MVA, até 10 MHz, e propõe-se a validação do modelo através da medição de transferência de tensão na frequência.

PALAVRAS-CHAVE

Resposta em Frequência, Diagnóstico de Falhas, Modelagem de Transformadores, Análise de Fenômenos de Altas Frequências.

1.0 INTRODUÇÃO

O planejamento e a programação eficiente das atividades de manutenção e da gestão de ativos do setor elétrico dependem de uma avaliação confiável quanto à condição dos equipamentos. Objetiva-se, primeiramente, o aumento da disponibilidade e confiabilidade do sistema e, também, contribuir para a sustentabilidade do negócio das empresas de energia elétrica. O que é ratificado tratando-se do setor de transmissão, onde a sustentabilidade está diretamente ligada à disponibilidade dos ativos e instalações.

Levando-se em consideração o cenário atual da transmissão, em que grande parte dos ativos está chegando ao final da sua vida útil regulatória, a avaliação quanto à vida útil física dos equipamentos ganha ainda mais relevância. O Relatório de Análise de Impacto Regulatório (AIR) nº 5/2019 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) (1) destaca o impacto que a substituição massiva e simultânea dos equipamentos depreciados causaria, tornando-se inviável do ponto de financeiro. Por outro lado, há o risco em que o sistema elétrico está exposto, caso estes ativos permaneçam em operação. O que enfatiza a importância do monitoramento e avaliação da condição operativa dos equipamentos, para que seja possível uma tomada de decisão baseada em dados e uma gestão da manutenção baseada na condição do ativo.

Dada a complexidade e importância do transformador de potência, principal ativo da função transformação e do setor de transmissão como um todo, um diagnóstico de falha mais assertivo deve ser composto pela integração de técnicas de monitoramento. Este artigo destaca a resposta em frequência como uma das técnicas para diagnóstico de falhas em equipamentos de alta tensão, sobretudo em transformadores de potência. Além da análise de falhas, a caracterização dos equipamentos na frequência é utilizada para modelagem nos estudos de fenômenos de altas frequências, principalmente, transitórios eletromagnéticos, dando subsídio às áreas de O&M e engenharia das empresas de energia elétrica.

E, dando continuidade ao trabalho (2), são apresentadas medições de resposta em frequência em campo de um transformador de potência de 200 MVA até 10 MHz e sua modelagem através da matriz de admitância. Propõe-se, uma vez que a modelagem é feita através de dois pontos de acesso, a validação do modelo através da simulação e medição de transferência de tensão na frequência.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Resposta em frequência, segundo a IEC 60076-18: *Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response* (3), é definida como a relação de amplitude e diferença de fase entre as tensões medidas em dois terminais do objeto sob teste em uma faixa de frequências quando um dos terminais é excitado por uma fonte de tensão. Trata-se da transferência de tensão entre terminais. A análise a partir da resposta em frequência (FRA – *Frequency Response Analysis*) é a técnica utilizada para detectar danos através de tais medições.

O ensaio de FRA pode ser feito a partir de dois métodos: varredura em frequência, através da aplicação de sinais senoidais de diferentes frequências, ou a partir da aplicação de um impulso de tensão, denominados, respectivamente, SFRA – *Sweep Frequency Response Analysis* – e IFRA – *Impulse Frequency Response Analysis*. O termo SFRA é amplamente difundido no meio técnico e a técnica largamente utilizada em comparação à IFRA, uma vez que, esta última, possui limitação quanto à frequência alcançada e requer tratamento matemático pós ensaio.

Na literatura há uma gama de trabalhos na área de resposta em frequência. Destaca-se, neste artigo, além da IEC 60076-18 (3) já citada, o IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers (4) e Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA) (5) do Cigrè. A IEC 60076-18 (3) descreve, além dos termos e propósitos do ensaio de resposta em frequência, o método, equipamentos e registros de medição. O guia do IEEE (4) aborda, principalmente, a medição de resposta em frequência e a análise e interpretação destas. Assim como a brochura técnica do Cigrè (5) que fala da interpretação dos resultados dos ensaios e de boas práticas de medição.

Quanto ao tipo de medição, além da transferência de tensão, há a possibilidade da medição da impedância e admitância dos terminais na frequência, através da aplicação de sinais de tensão senoidal e medição da corrente. Mede-se a impedância, ou admitância, do terminal para o referencial de terra. Quanto à relação entre a impedância terminal e a transferência de tensão, de acordo com (6), numa primeira aproximação, os polos das curvas de resposta em frequência são zeros correspondentes nas curvas de impedância. Isto deve-se ao fato de que a transferência de tensão está diretamente ligada com o efeito magnético. Na frequência em que há a mínima impedância, há a maior transferência de tensão entre os terminais.

Tratando-se de aplicação, a resposta em frequência é utilizada na identificação de defeitos e para fins de modelagem para análise de fenômenos em altas frequências, sobretudo transitórios eletromagnéticos. A análise da curva de resposta em frequência para fins de diagnóstico é realizada, geralmente, até 2 MHz. Já para modelagem, a faixa de frequências depende do fenômeno que se quer analisar.

2.1 Resposta em Frequência utilizada no Diagnóstico de Falhas

A primeira medição de resposta em frequência realizada é dita como “assinatura do transformador”, informação de suma importância, uma vez que, a técnica é realizada de forma comparativa: a assinatura do equipamento é comparada às medições de resposta em frequência realizadas após eventos no sistema e/ou sinistros no transporte que possam vir a danificar o transformador. Geralmente, realiza-se o ensaio em fábrica e após chegar à subestação a fim de verificar se eventuais deslocamentos durante o transporte causaram mudanças na caracterização do equipamento no domínio da frequência.

A técnica é utilizada para identificar, principalmente, deslocamentos mecânicos nos enrolamentos e no núcleo de transformadores. A Figura 1 (5) mostra um deslocamento radial (a) e o colapso no suporte (b) de enrolamentos de transformadores, exemplos de danos identificados por ensaios de SFRA.



(a) (b)
 Figura 1: Exemplos de danos identificados por ensaios de SFRA: deslocamento radial (a) e o colapso no suporte (b) de enrolamentos de transformadores. (5)

Diante das análises e comparações realizadas, foi estabelecida uma relação entre as regiões de frequências e estrutura dos transformadores. A Figura 2 mostra esta relação segundo a IEC 60076-18 (3). Sendo região A (até 2 kHz) referente ao núcleo, região B (de 2 a 20 kHz) devido à interação entre os enrolamentos, região C (de 20 kHz a 2 MHz) com influência dos enrolamentos e região D (a partir de 2 MHz) devido ao arranjo de medição e conexões, incluindo a conexão à terra. Ou seja, variações na resposta em frequência até 2 kHz refere-se, provavelmente, há alterações no núcleo do transformador, e assim sucessivamente.

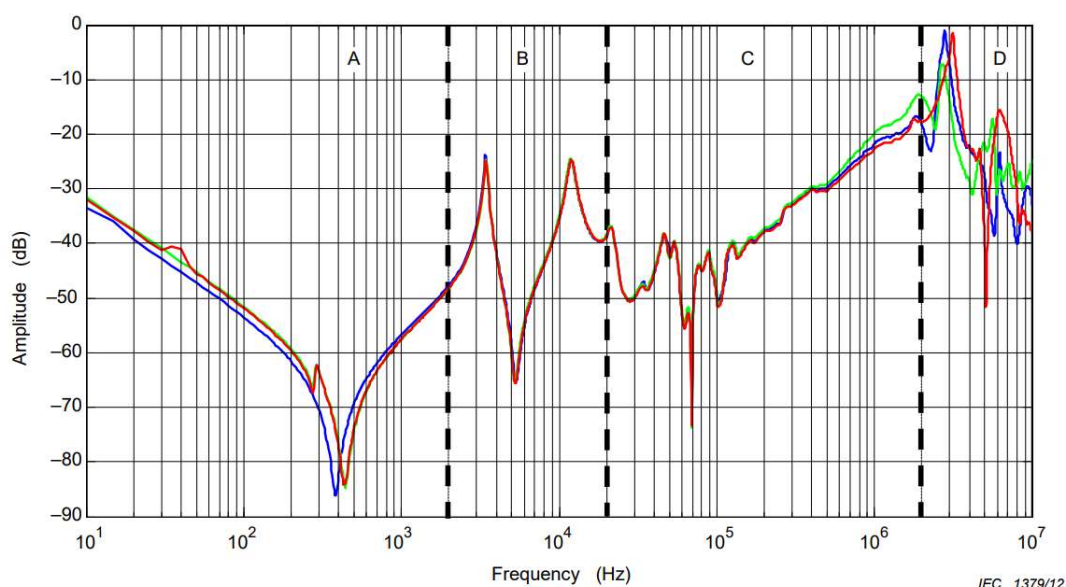


Figura 2: Relação entre a resposta em frequência de um enrolamento de alta tensão de um autotransformador e as regiões de influência, segundo a IEC 60076-18 (3).

A relação segundo o IEEE (4) é semelhante ao definido pela IEC 60076-18 e mostrado na figura acima salvo a frequência inicial da última região, considerada a partir de 1 MHz pelo IEEE. Destaca-se que quanto maior o limite superior da faixa de frequências, maior a influência do sistema de medição e mais significativa a influência das fixações e conexões.

2.2 Resposta em Frequência utilizada para Modelagem em Altas Frequências

Outra aplicação da resposta em frequência é a determinação das matrizes de admitância/impedância próprias e mútuas que fornecem recursos à modelagem de transformadores, uma vez que, as curvas de admitância/impedância terminal na frequência podem ser representadas por circuitos RLC correspondentes.

Há modelos de transformadores disponíveis nos EMTP – *Electromagnetic Transients Program*. Estes, porém, não são capazes de representar o comportamento do transformador para análise de fenômenos transitórios de altas frequências, uma vez que, não se leva em consideração adequadamente o comportamento ressonante do transformador causado por sua geometria (7-8).

Em relação à modelagem a partir da resposta em frequência de transformadores, o *Vector Fitting* é um método consagrada na literatura. Desde 1998 até os dias atuais, *Gustavsen* vem trabalhando neste método de ajuste vetorial de dados no domínio da frequência através de funções polinomiais racionais. Muitos trabalhos foram publicados pelo autor com aperfeiçoamentos e aplicações do método. Em (9) foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o método que será aplicado na seção 4 deste artigo.

Além do *Vector Fitting*, há metodologias mais simples e largamente utilizadas em análises de transientes eletromagnéticos, baseada na análise dos pontos ressonantes das curvas de resposta em frequência de transformadores de potência, como exemplo a metodologia descrita em (10). Em (11) e (12) são apresentadas comparações entre métodos existentes na literatura.

Ressalta-se que a caracterização no domínio da frequência, quando feita para fins de modelagem, deve levar em consideração, por exemplo, a condição dos outros terminais e o nível de interferência na medição de fase, pontos

não tão significativos tratando-se da análise para diagnóstico. Outro ponto importante é que os terminais não considerados como pontos de acesso, devem permanecer inalterados e, se possível, na sua condição de operação.

3.0 METODOLOGIA

Um ponto de relevância da técnica de resposta em frequência é o arranjo para as medições. A reprodutibilidade dos resultados depende deste arranjo e a influência do circuito de medição fica cada vez mais criteriosa em função do aumento do limite superior da faixa de frequência em que se deseja avaliar ou modelar o equipamento (2).

Como destacado na seção 2.2, quanto maior a frequência, maior a influência do sistema de medição. Isso deve-se ao fato de que com o aumento da frequência, aumenta-se a reatância indutiva dos condutores e conexões e a reatância capacitiva possui valor muito baixo, tornando-se um caminho de baixa impedância. O efeito dominante dos cabos nas medições é a capacitância para a terra.

O cabo de aterramento levado até o terminal das buchas de alta tensão na medição de SFRA é um dos limitadores na repetibilidade das medições em altas frequências. Recomenda-se utilizar os cabos mais curtos possíveis e mantê-los o mais próximo às buchas, conforme apresentado na Figura 3 (5).

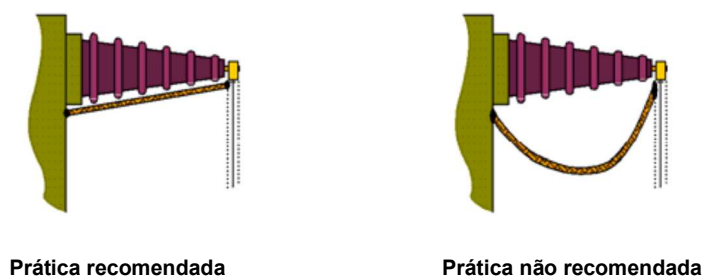


Figura 3: Recomendação quanto ao posicionamento do cabo de terra para medições em altas frequências (5).

As medições apresentadas neste artigo foram realizadas pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, em um transformador de potência monofásico de 200MVA, $500/\sqrt{3}$ / $138/\sqrt{3}$ / 13,8 kV instalado em campo, mostrado na Figura 4. Um cabo coaxial de 9 metros foi utilizado da instrumentação até o terminal da bucha do transformador e foi realizada a compensação de seu efeito, conforme abordado em (2). Aplicou-se um sinal de tensão senoidal de 20 Vpp variando a frequência de 50 Hz a 10 MHz. A tensão e corrente foram medidas e, relacionando as duas grandezas, chegou-se ao valor de admitância terminal. O gerador de sinais e o osciloscópio utilizados foi o Virtual Bench da National Instruments e, para medição de corrente, foi utilizado o HFCT – *High Frequency Current Transformer* – da Pearson Electronics. A Figura 5 representa o arranjo de medição de admitância terminal na frequência.



Figura 4: Transformador de potência monofásico de 200MVA, $500/\sqrt{3}$ / $138/\sqrt{3}$ / 13,8 kV instalado em uma subestação.

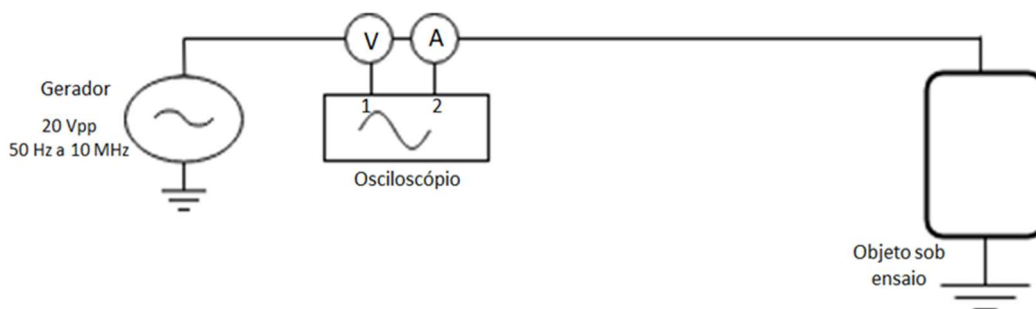


Figura 5: Representação do sistema de medição de admitância terminal na frequência (2).

O modelo do transformador pode ser formulado no domínio de frequência em termos de sua matriz de admitância Y que define a relação entre correntes terminais (I) e tensões terminais (V) de acordo com (1) (13).

$$I(s) = Y(s)V(s) \quad (1)$$

O número de termos na matriz dependerá do número de pontos de acesso – terminais externos considerados na modelagem. Para um transformador com n terminais, Y é uma matriz simétrica de tamanho n por n . Considerando dois pontos de acesso, resulta na matriz de admitância Y 2x2 mostrada em (2).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Foram realizadas as medições de admitâncias próprias dos terminais de alta e baixa tensão do transformador, denominados 1 e 2, respectivamente, e a admitância mútua entre os terminais. A partir das medições de resposta em frequência e utilizando o *Vector Fitting* chega-se ao ajuste do modelo e em seguida à síntese do circuito para utilização em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, como por exemplo, o *ATPDraw / ATP – Alternative Transients Program*.

4.0 RESULTADOS

O transformador pode ser modelado como um número de diferentes circuitos RLC ligados e acoplados uns aos outros (2). A metodologia *black-box* foi utilizada para se chegar ao modelo do equipamento, ou seja, modelou-se o transformador a partir de pontos de acesso externos, através da caracterização na frequência vistas através dos terminais. Em (2) a modelagem foi realizada a partir da admitância terminal de um ponto de acesso – terminal de alta tensão. Em seguida serão apresentados os resultados de medições considerando dois pontos de acesso: as Figuras 6 a 8 mostram os resultados das medições de admitância própria do terminal 1, mútua entre os terminais e admitância própria do terminal 2, respectivamente.

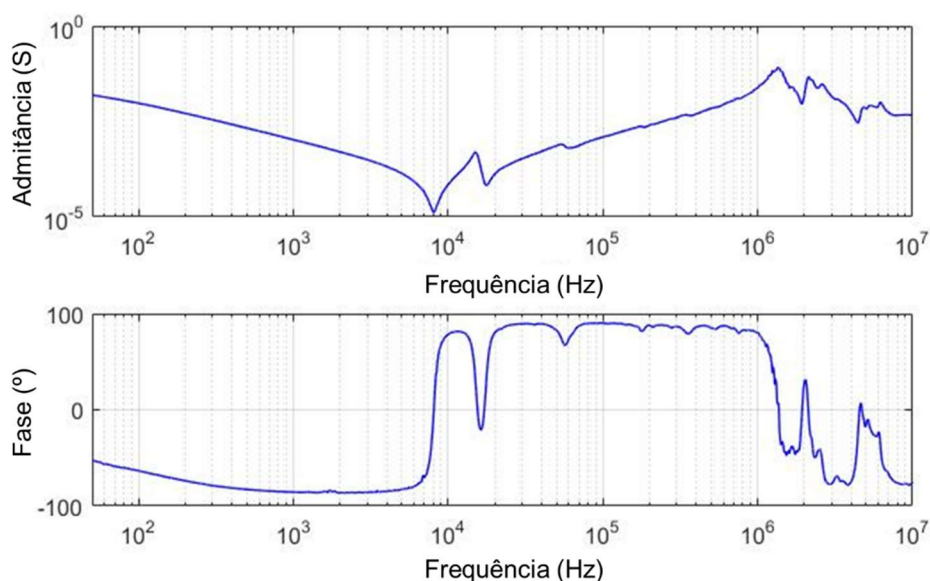


Figura 6: Medição da admitância própria do terminal 1 na frequência.

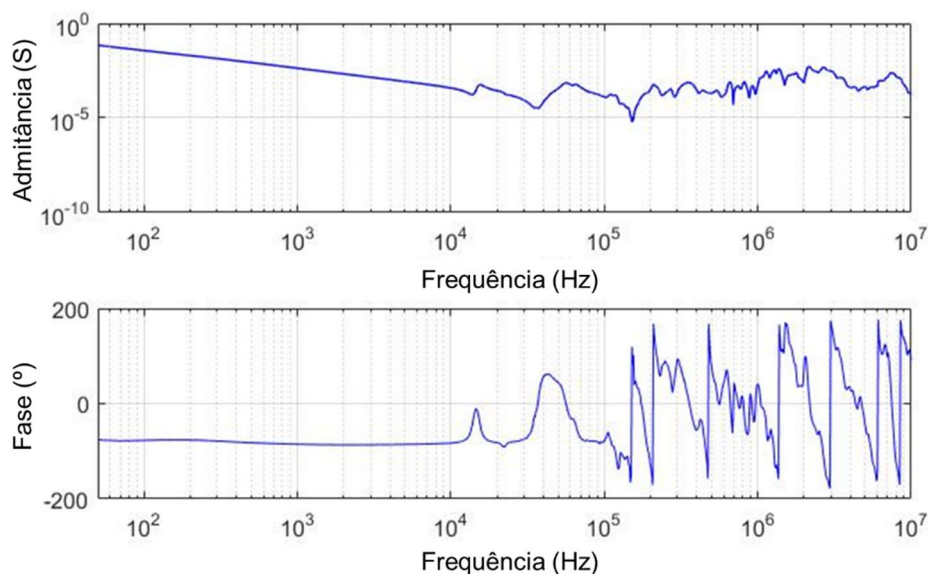


Figura 7: Medição da admitância mútua entre os terminais 1 e 2 na frequência.

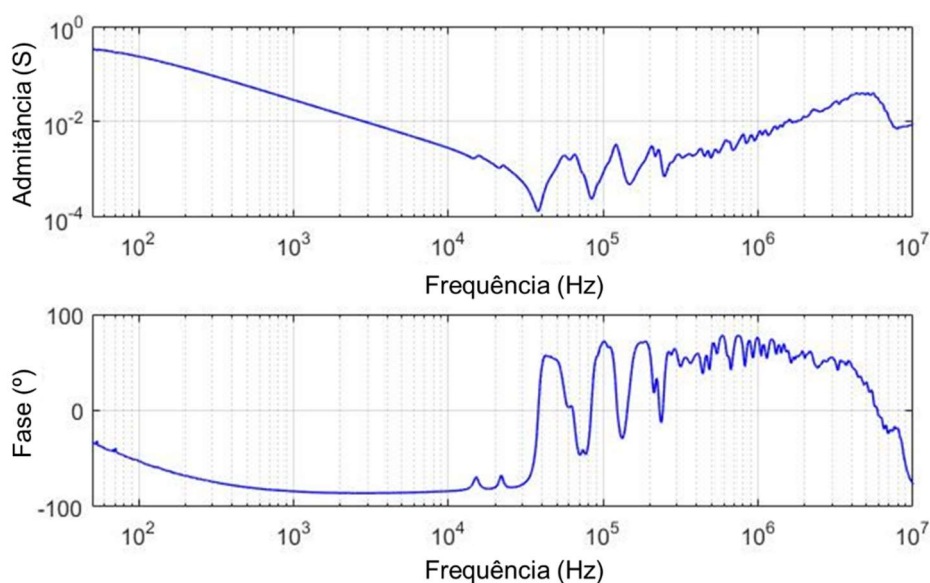


Figura 8: Medição da admitância própria do terminal 2 na frequência.

Observa-se um comportamento indutivo em baixas frequências até o primeiro ponto ressonante próximo a 8 kHz, 15 kHz e 40 kHz para a admitância própria do terminal 1, mútua entre os terminais e admitância própria do terminal 2, respectivamente. As frequências em que as reatâncias se igualam (máxima troca de energia entre capacitor e indutor) são denominadas frequências ressonantes. Nestes pontos o valor da impedância é igual à parcela resistiva. Após a ressonância, é observado um comportamento capacitivo e, após 1 MHz, novamente a caracterização indutiva, influenciada pelas conexões e sistema de medição.

Para modelagem do transformador de potência, analisou-se as curvas de admitância em função da frequência objetivando-se chegar a uma síntese que represente o transformador em altas frequências (9). Para tanto, foi utilizado o *Vector Fitting*. A Figura 9 mostra a aproximação com 84 polos – 6 polos reais e 39 polos complexos conjugados – na faixa de 50 Hz a 10 MHz. Observe-se os bons resultados de ajuste do modelo às curvas medidas.

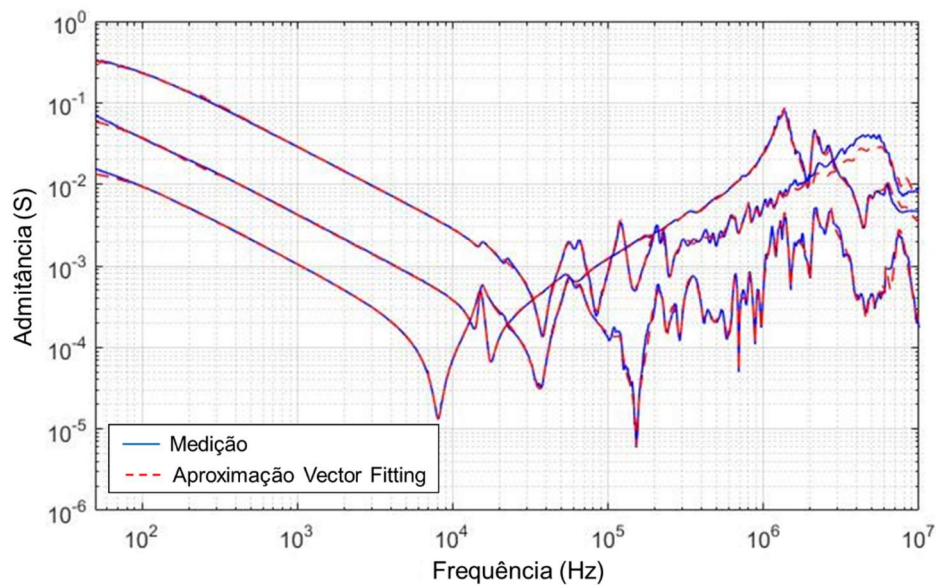


Figura 9: Aproximação utilizando o Vector Fitting.

A partir da rotina *Netgen_ATP* do *Vector Fitting* é gerado um circuito RLC que representa a função para implementação nos programas do tipo *EMTP – Electromagnetic Transients Program*. A Figura 5.10 mostra o circuito sintetizado da função racional aproximada utilizando o Vector Fitting. Os ramos RL representam os polos reais e os ramos RLC equivalem aos polos complexos conjugados (13). Os parâmetros do modelo são dependentes da frequência.

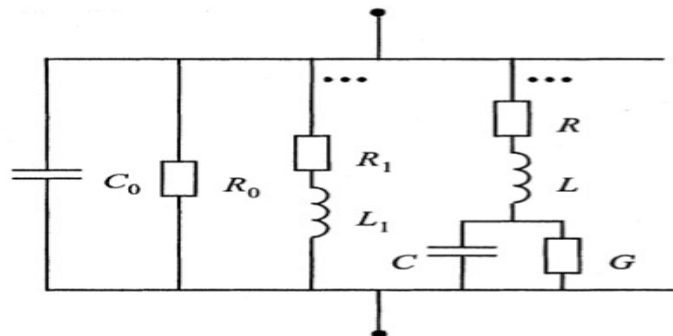


Figura 10: Circuito RLC sintetizado a partir do *Vector Fitting* (14).

5.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez que o modelo foi baseado em dois pontos de acesso, é possível, utilizando a síntese do circuito, simular a transferência de tensão entre os terminais na frequência. Propõe-se esta simulação e a validação do modelo através da medição de transferência de tensão na frequência. A Figura 11 representa a medição transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 na frequência, proposta para validação do modelo.

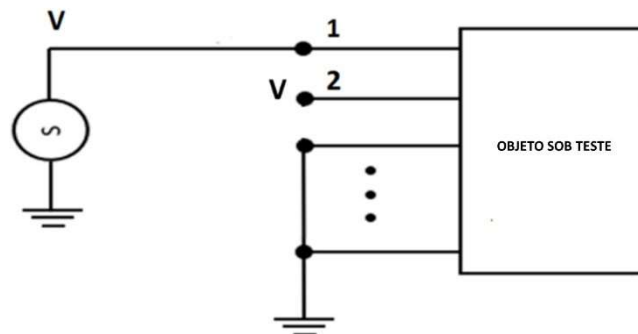


Figura 11: Representação da medição de transferência de tensão entre os terminais 1 e 2 na frequência.

Desta forma, a validação do modelo é realizada através de medições de resposta em frequência e não mais a partir das medições de sobretensões transitórias conforme proposto em (9), (11) e (12), o que garante uma maior confiabilidade ao modelo.

Aplicações como a apresentada neste artigo dão subsídio para simulações e análises de transitórios eletromagnéticos na fase de projeto e de operação e manutenção. Estas análises possuem sua relevância ratificada pelo aumento da complexidade do setor elétrico devido à integração das fontes de energia renováveis e das *Smart Grids*, uma vez que, as sobretensões sobre os equipamentos aumentam devido às topologias de sistemas mais flexíveis, às operações de comutação mais frequentes e a um maior uso de cabos e conversores eletrônicos de potência.

Por fim, ratifica-se que a gestão da manutenção dos ativos do setor elétrico ganha em eficiência quando baseada em sistemas de diagnóstico e prognóstico de falhas que, por sua vez, são alimentados por sistemas de monitoramento da condição dos ativos. Dada a complexidade e importância do transformador de potência um diagnóstico de falha mais assertivo deve ser composto, na maioria das vezes, pela integração de técnicas de monitoramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). "Análise de Impacto Regulatório - AIR da necessidade de aprimoramento dos comandos regulamentares afetos à "vida útil regulatória" de equipamentos de transmissão". Relatório de Análise de Impacto Regulatório nº 5/2019-SRT/SRM/SGT/SCT/SFE/SFF/ANEEL. Anexo da Nota Técnica nº 59/2019-SRT/SRM/SGT/SFE/SFF/ANEEL. Setembro de 2019.
- (2) REMA, Gabriela Sampaio. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. LUZ, Guilherme Sarcinelli. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. DELGADO, Rômulo dos Santos. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. BONATTO, Benedito Donizeti. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. SIXEL, Davi. "Modelagem do Transformador de Potência em Altas Frequências através de Medições em Campo". XXV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Cigre, Belo Horizonte, Novembro de 2019.
- (3) IEC 60076-18 – *Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response*. INTERNATIONAL STANDARD, Ed. 1.0. 2012.
- (4) IEEE *Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers*. March 2013.
- (5) Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA). CIGRÉ - Working Group A2.26. April 2008.
- (6) MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. "Diagnóstico de Transformadores de Potência através de Metodologias no Domínio da Frequência". Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2007.
- (7) JURISIC, Bruno. UGLESIC, Ivo. XEMARD, Alain. PALADIAN, Françoise. GUUINI, Philippe. "Difficulties in high frequency transformer modelling" in Proc. Int. Conf. Power Systems Transients in Cavtat, Croatia, 2015.
- (8) MORCHED, A., MARTÍ, L., OTTEVANGERS, J. "A High Frequency Transformer Model for the EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 3, pp.1615- 1626, July 1993.
- (9) REMA, Gabriela Sampaio. "Modelagem Black-Box de Transformadores de Potência em Altas Frequência". Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá – Unifei. Itajubá, MG. Novembro de 2018.
- (10) Azevedo, Rogério Magalhães. Rodrigues, Marcelo Guimarães. Cerqueira, Walter. "Um Método Prático para Representação de Transformadores de Potência Baseado em Medições de Resposta em Frequência". Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Cepel. XV Eriac – Encontro Regional Ibero-americano do Cigré. Brasil, Maio de 2013.
- (11) REMA, Gabriela Sampaio. BONATTO, Benedito Donizeti. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LUZ, Guilherme Sarcinelli. SIXEL, Davi. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. DELGADO, Rômulo dos Santos. SANTOS, Luiz Eduardo. "Modelagem de Transformadores de Potência para Análise de Transitórios Eletromagnéticos de Frente Rápida - Comparação entre Simulação e Medições em Campo". IX Workshop Internacional sobre

Transformadores de Potência, Equipamentos, Subestações e Materiais, IX Workspot 2018. Foz do Iguaçu - PR.

- (12) REMA, Gabriela Sampaio. SOUZA, Dickson Silva de. VASQUES, Carlos Magno Rodrigues. AZEVEDO, Rogério Magalhães de. LUZ, Guilherme Sarcinelli. BONATTO, Benedito Donizeti. LIMA, Antonio Carlos Siqueira de. DELGADO, Rômulo dos Santos. MARTINS, Helvio Jailson Azevedo. SIXEL, Davi. "Black-Box Modeling of Power Transformers at High Frequencies". International Conference on Power Systems Transients, IPST. Perpignan, França. 2019.
- (13) B. Gustavsen. "Wide Band Modeling of Power Transformers", IEEE Transactions of Power Delivery, v. 19, n. 01, pp.414-422, January 2004.
- (14) B. Gustavsen. "Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 4, pp.1093-1098, October 2002.

DADOS BIOGRÁFICOS



Gabriela Rêma é pesquisadora no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL e professora na Faculdade de Engenharia de Resende-FER. Doutoranda do Programa de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, mestrando em engenharia elétrica pela UNIFEI (2018) e engenheira eletrônica (2015) pela FER. Foi bolsista de pesquisa (2017-2019) e engenheira (2020) no Laboratório de Diagnóstico de Equipamentos Elétricos do CEPEL e professora (2019) na UNIFEI. Atualmente atua no Departamento de Tecnologia em Gestão de Ativos do CEPEL com monitoramento da condição dos ativos e diagnóstico preditivo de falhas em equipamentos de alta tensão, sobretudo do setor da transmissão do sistema elétrico.

(2) BENEDITO DONIZETI BONATTO Benedito Donizeti Bonatto é Engenheiro Eletricista na UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá (1991), MSc. na UNICAMP (1995), Ph.D. in Electrical and Computer Engineering na UBC - The University of British Columbia, Canadá (2001), sob orientação do Prof. Dr.-Ing. Hermann W. Dommel (EMTP). Foi Visiting Associate Professor na UBC (2013) e na UPC - Universitat Politècnica de Catalunya, Spain (2019). Tem experiência profissional e de gestão no setor elétrico. É Professor na UNIFEI desde 2007. Foi Presidente (2019-2021) e é Conselheiro da SBQEE. Atua em redes elétricas inteligentes (Smart Grids), qualidade da energia elétrica, transitórios eletromagnéticos. É Senior Member do IEEE.

(3) ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA Antonio C. S. Lima recebeu o título de engenheiro eletricista pela UFRJ em fevereiro de 1995, o título de mestre e doutor em ciências pela COPPE/UFRJ em 1997 e 1999, respectivamente. Durante o ano de 1998, foi Visiting Scholar no Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. De 2000 até 2002, atuou no Operador Nacional do Sistema, ONS, e a desde 2002 transferiu-se para a UFRJ como professor da Escola Politécnica e da COPPE/UFRJ. Atualmente é professor titular da UFRJ, Senior Member do IEEE e coordenador do PEE, COPPE/UFRJ.

(4) ANDRÉ TOMAZ DE CARVALHO Dr. André Tomaz de Carvalho é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Mestre em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Doutor em Ciências pela COPPE - UFRJ. É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL na área de sistemas embarcados, processamento de sinais e diagnóstico preditivo de equipamentos de alta tensão, e atualmente gerencia o Departamento de Tecnologia em Gestão de Ativos do Cepel.