

Projeto de Sistema Especialista Para Ensaios de Admitância em Função da Frequência

A. A. C. Arruda, R. L. Tompson, I. N. da Silva, J. A. Ulson, A. N. Souza, R. A. Flauzino, F. R. Dotto, E. Goes

Resumo – Atualmente, a modelagem paramétrica de sistemas elétricos de potência recebe destaque especial no cenário técnico-científico em função dos agregados que tal abordagem fornece ao estudo do referido sistema. Assim, frente à existência de um modelo confiável, é possível se efetuar análises de transitórios e de regime permanente de forma a se avaliar como uma determinada operação ou condição operacional pode afetar o sistema como um todo. Dessa maneira, esse artigo tem por objetivo apresentar o algoritmo de identificação de sistemas denominado por *vector fitting*, bem como ilustrar em detalhes como realizar os ensaios de admitância em função da frequência a fim de aplicar o respectivo algoritmo na modelagem de transformadores de potência para transitórios de alta frequência.

Palavras-chave – identificação de sistemas, transformadores de potência, surtos de alta frequência, medição de admitância em função da frequência.

I. INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos de potência, as sobretensões podem ser agrupadas em três categorias [1]. A primeira dessas categorias agrupa as sobretensões de origem atmosférica que podem ser oriundas de descargas diretas sobre a linha de transmissão ou de descargas indiretas ocorridas próximas às linhas de distribuição. A segunda categoria de sobretensões incorpora as sobretensões de manobra que são decorrentes da modificação estrutural do sistema elétrico por meio da comutação de dispositivos de interrupção ao longo do sistema elétrico de potência. Por fim, a terceira categoria de sobretensões diz respeito às sobretensões temporárias na frequência de 60 Hz. Essas sobretensões são originadas tanto por condições normais como por condições anormais de operação do sistema, podendo-se exemplificar esse fenômeno por situações de rejeição de carga ou faltas à terra.

De forma ampla, as sobretensões de origem atmosférica têm amplitude máxima de 6 p.u. com tempos de frente de até 20 μ s e tempo de decaimento da ordem de 50 μ s a 300 μ s. Em particular, para sobretensões de origem atmosférica, pode-se considerar a existência de componentes em frequências entre 10 kHz e alguns MHz [2].

Por outro lado, as sobretensões de manobra apresentam amplitude máxima da ordem de 4 p.u. com tempo de frente

com valores da ordem de dezenas a centenas de microssegundos. Nesse tipo de sobretensão o espectro de frequência cobre uma faixa compreendida entre 300 Hz e 200 kHz.

As sobretensões temporárias apresentam amplitude máxima da ordem de 2 p.u. com comportamento fracamente amortecido se comparado com sobretensões de origem atmosférica ou de manobra.

Assim, o modelo de um transformador que represente adequadamente seu comportamento para as sobretensões de origem atmosférica e as sobretensões de manobra deve ser tal que a faixa de frequência admissível esteja compreendida, no mínimo, entre 100 Hz e aproximadamente 1 MHz.

A fim de atender esses requisitos de modelagem muitos métodos de identificação aplicados a sistemas elétricos de potência foram desenvolvidos. Dentre esses, destacam-se a modelagem pelo pulso, a modelagem por excitação senoidal e a modelagem pela matriz de transferência de admitância do transformador, cada qual possuindo suas vantagens e desvantagens as quais são ponderadas em função da aplicabilidade do referido modelo.

A modelagem pelo impulso, pressupõe a aplicação de um pulso de curta duração e relativa amplitude aos terminais do transformador. Observando-se as correntes e tensões no transformador é possível se estimar a resposta impulsional do transformador por meio de metodologias determinísticas ou estocásticas. No entanto, o modelo resultante incorpora em sua estrutura perturbações advindas do acoplamento entre fonte de impulso e o transformador sob ensaio. Essa característica restringe a aplicação dos modelos resultantes na simulação de determinados transitórios sendo que, freqüentemente, se utiliza tais abordagens para verificação de suportabilidade do equipamento e, eventualmente, identificação de falhas internas ao mesmo.

Por outro lado, a modelagem por excitação senoidal permite se conhecer o comportamento em frequência do transformador tanto nos pontos de operação linear como em condições de saturação. Porém, em função de restrições construtivas, as fontes senoidais de potência com frequência variável não contemplam, em geral, faixas de frequência que compreendam o limite superior desejado de 1 MHz. Assim, os modelos resultantes dessa modelagem não contemplarão, com confiabilidade garantida, situações de transitórios eletromagnéticos com componentes de frequência superior a dos ensaios realizados.

Atualmente, os novos desenvolvimentos de equipamentos de medição de admitância em função da frequência e o advento de novas abordagens de identificação de sistemas têm possibilitado a modelagem por meio da matriz de

A. A. C. Arruda e R. Tompson trabalham na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP (e-mail: aarruda@ctEEP.com.br).

I. N. da Silva, J. A. Ulson, A. N. de Souza, R. A. Flauzino, F. R. Dotto e E. Goes trabalham no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus Bauru (e-mail: ivan@feb.unesp.br).

transferência de admitância do transformador. Em tais abordagens é possível modelar o sistema em toda a faixa de frequência desejada com um baixo erro de modelagem o que resulta em estudos de transitórios confiáveis e passíveis de aplicação em sistemas elétricos de potência reais.

Esse artigo tem por objetivo apresentar, inicialmente, a metodologia conhecida por *vector fitting* a qual, a partir de ensaios de admitância em função da frequência, é responsável por realizar o ajuste paramétrico da matriz de transferência de admitância para transformadores de potência. Essa abordagem e suas considerações práticas serão descritas por meio da Seção II. Na Seção III, os principais aspectos do sistema especialista implementado para automatização do processo de medição da admitância em função da frequência são descritos. A apresentação de resultados práticos da medição da admitância é realizada por intermédio da Seção IV. Por fim, a Seção V pontua as conclusões e trabalhos futuros.

II. MODELAGEM EM FREQUÊNCIA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PELA TÉCNICA DE VECTOR FITTING

O algoritmo de *vector fitting* constitui-se em uma técnica iterativa de ajuste de funções de transferência racionais a partir de dados amostrais referenciados no domínio da frequência. Essa metodologia foi desenvolvida e apresentada por Gustavsen e Semlyen [3, 4]. Atualmente, a técnica do *vector fitting* é maciçamente estudada e empregada em pesquisas correlatas aos sistemas elétricos de potência e aos sistemas de microondas. Desde de seu advento, inúmeras aplicações demonstraram a viabilidade prática no seu uso principalmente pelas propriedades de convergência do algoritmo.

Dessa maneira, nessa seção serão descritos os principais aspectos relacionados ao algoritmo de *vector fitting* e como esse pode ser empregado na modelagem da matriz de transferência de admitância para transformadores de potência.

A. Aspectos Gerais da Metodologia do Vector Fitting

Seja H uma função no domínio da frequência a ser estimada por meio da função \tilde{H} , a qual é definida da seguinte forma:

$$\tilde{H} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i f_i(s)}{\sum_{j=1}^D \beta_j g_j(s)} = \frac{p(s, \alpha)}{q(s, \beta)} \quad (1)$$

onde f_i e g_j são funções base previamente definidas para o numerador e o denominador, respectivamente, e α_i e β_j são coeficientes a serem determinados. A fim de simplificar a notação apresentada, pode-se escrever a combinação linear das funções f_i e g_j por meio das equações $p(s, \alpha)$ e $q(s, \beta)$, respectivamente, com $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$ e $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_D]$.

Considerando-se um conjunto $(s_k)_{k=1}^n$ de pontos amostrais da função H , o objetivo é obter uma função \tilde{H} que aproxime a função H segundo o critério dos mínimos quadrados, ou seja:

$$\arg \min_{\alpha, \beta} \sum_{k=1}^n |H(s_k) - \tilde{H}(s_k)|^2 \quad (2)$$

Dado que por essa formulação tem-se tanto no numerador como no denominador variáveis desconhecidas, as técnicas básicas dos mínimos quadrados podem não ser aplicáveis, fazendo-se necessário, formular o problema de identificação da seguinte forma:

$$\arg \min_{\alpha, \beta} \sum_{k=1}^n \frac{1}{|q(s_k, \beta)|^2} |p(s_k, \alpha) - H(s_k)q(s_k, \beta)|^2 \quad (3)$$

A expressão (3) representa um típico problema de mínimos quadrados exceto pelo fator de ponderação $1/|q(s_k, \beta)|^2$ que, no algoritmo de minimização, geralmente, é iniciado com valor unitário.

Na abordagem do *vector fitting*, supõe-se a aproximação da função H por uma função polinomial racional f tal que se conhece seus valores em cada um dos pontos amostrais s_k . Considerando-se também uma função σ e supondo que tanto a função $\sigma(s)f(s)$ como a função $\sigma(s)$ possuem o mesmo conjunto de pólos \bar{a}_i com $i = 1, 2, \dots, D$, pode-se formular:

$$\begin{pmatrix} f(s)\sigma(s) \\ \sigma(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^D \frac{c_i}{s - \bar{a}_i} + e + hs \\ \sum_{i=1}^D \frac{\tilde{c}_i}{s - \bar{a}_i} + 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Multiplicando-se a segunda parcela do conjunto de equações (4) por $f(s)$ e computando o sistema para cada dado amostral s_k , pode-se determinar o valor das incógnitas c_i , e , \tilde{c}_i e h , bastando para isso igualar a primeira e a segunda equação do sistema apresentado em (4).

No entanto, pode-se representar as funções $\sigma(s)f(s)$ e $\sigma(s)$ por meio de funções racionais polinomiais em função de seus pólos e zeros da seguinte maneira:

$$\begin{pmatrix} f(s)\sigma(s) \\ \sigma(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - z_i)}{\prod_{i=1}^D (s - \bar{a}_i)} \\ \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - \tilde{z}_i)}{\prod_{i=1}^D (s - \bar{a}_i)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Dividindo-se a primeira equação pela segunda tem-se a seguinte aproximação para a função $f(s)$:

$$f(s) = \frac{\prod_{i=1}^{D+1} (s - z_i)}{\prod_{i=1}^D (s - \tilde{z}_i)} \quad (6)$$

Pode-se observar por meio da equação (6) que os zeros de $\sigma(s)$ vão se tornar os pólos de $f(s)$. O procedimento descrito acima pode ser aplicado de maneira iterativa de maneira que os pólos determinados na iteração anterior podem ser substituídos na equação (5) e utilizados para calcular os pólos da iteração corrente.

Nesse algoritmo, a velocidade de convergência será função da escolha dos pólos iniciais para a função $\sigma(s)$.

Uma descrição detalhada da abordagem de *vector fitting* pode ser encontrada em [3,4].

B. Metodologia do Vector Fitting Aplicada à Modelagem de Transformadores de Potência

Para se modelar um transformador de potência para as altas frequências deve-se observar a existência de acoplamentos entre todos os terminais em função das capacitâncias parasitas existentes. O fenômeno de acoplamento não é significativo para as baixas frequências,

no entanto, para frequências elevadas essas capacitâncias tornam-se pertinentes. Assim, a estrutura do modelo deve ser capaz de agregar tais influências, fator esse motivador do emprego de uma representação por meio de uma matriz de transferência de admitância da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \\ \vdots \\ I_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) & \cdots & Y_{1n}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) & \cdots & Y_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1}(s) & Y_{n2}(s) & \cdots & Y_{nn}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \\ \vdots \\ V_n(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde I_i representa a corrente do i -ésimo terminal do transformador, V_i indica a tensão no i -ésimo terminal do transformador e a função polinomial racional $Y_{ij}(s)$ representa a admitância entre o i -ésimo terminal e o j -ésimo terminal do transformador. Assim, para $i = j$ a função $Y_{ij}(s)$ representará a admitância própria do i -ésimo terminal ao passo que para $i \neq j$ a função $Y_{ij}(s)$ informará a admitância mútua entre o i -ésimo e o j -ésimo terminal do transformador. Como a admitância mútua $Y_{ij}(s)$ será a mesma da $Y_{ji}(s)$ tem-se que a matriz de transferência de admitância será simétrica.

Dessa maneira, para que se possa estimar a função Y_{ij} é necessária a realização de medidas de admitância no transformador a ser modelado. Para ilustrar como o procedimento de ensaio deve ser realizado, será apresentado na seqüência a metodologia para medição de admitância para um transformador monofásico de dois enrolamentos conforme ilustrado por meio da Figura 1.

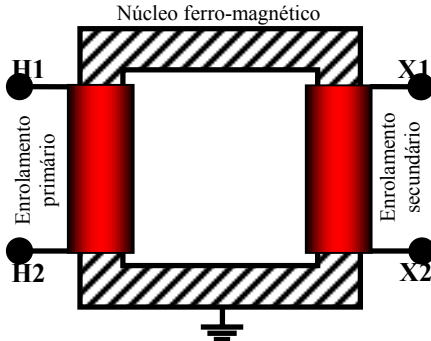


Figura 1. Esquemático de transformador monofásico de dois enrolamentos.

Assim, inicialmente aterra-se todos os terminais exceto o terminal $H1$ e mede-se a admitância entre esse terminal e o terra. Essa primeira medição pode ser representada pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \\ I_{X1} \\ I_{X2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{14} & Y_{24} & Y_{34} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{H1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou ainda:

$$I_{H1} = Y_{11}V_{H1}$$

$$I_{H2} = Y_{12}V_{H1}$$

$$I_{X1} = Y_{13}V_{H1}$$

$$I_{X2} = Y_{14}V_{H1}$$

Na seqüência, se aterra todos os terminais com exceção do terminal $H1$ e do terminal $H2$ e realiza-se a medição da

admitância entre os mesmos, resultando no seguinte conjunto de equações:

$$\begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \\ I_{X1} \\ I_{X2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{14} & Y_{24} & Y_{34} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{H1} \\ V_{H2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou ainda:

$$I_{H1} = Y_{11}V_{H1} + Y_{12}V_{H2}$$

$$I_{H2} = Y_{12}V_{H1} + Y_{22}V_{H2}$$

$$I_{X1} = Y_{13}V_{H1} + Y_{23}V_{H2}$$

$$I_{X2} = Y_{14}V_{H1} + Y_{24}V_{H2}$$

O passo seguinte será a medição da admitância entre o terminal $H1$ e o terminal $X1$. Para isso, os demais terminais são aterrados e a referida admitância é mensurada. Esse procedimento resultará no seguinte conjunto de equações:

$$I_{H1} = Y_{11}V_{H1} + Y_{13}V_{X1}$$

$$I_{H2} = Y_{12}V_{H1} + Y_{23}V_{X1}$$

$$I_{X1} = Y_{13}V_{H1} + Y_{33}V_{X1}$$

$$I_{X2} = Y_{14}V_{H1} + Y_{34}V_{X1}$$

O procedimento é repetido realizando-se a medição da admitância entre o terminal $H1$ e o terminal $X2$. A próxima medida será efetuada entre o terminal $H2$ e o terra estando os demais aterrados, seguido pelo ensaio entre o terminal $H2$ e o terminal $X1$, visto que a admitância entre $H1$ e $H2$ é a mesma entre os terminais $H2$ e $H1$. O ensaio completo de admitância do referido transformador será finalizado após a medição da admitância entre o terminal $X2$ e o terra.

O ensaio completo desse transformador resultará em 10 medidas de admitância, número esse suficiente para a determinação da matriz de transferência de admitância na sua completude.

Generalizando-se para qualquer transformador, o número de medidas a serem efetuadas é função do número de terminais que o transformador possui, podendo ser determinado pela seguinte expressão:

$$m = \frac{T^2 + T}{2} \quad (8)$$

onde m indica o número de medições a serem efetuadas e T representa o número total de terminais do transformador. A fim de ilustrar o número de medidas a serem efetuadas em cada um dos principais tipos de transformadores de potência existentes, apresenta-se por meio da Tabela 1 o tipo de transformador e seu respectivo número de medidas.

No entanto, deve-se observar que cada medição citada compreende o levantamento da admitância em função da frequência dentro de toda a faixa de frequência desejada. Na prática, o incremento de frequência segue uma série logarítmica e o número de pontos amostrais varia entre 200 e 2000 pontos.

TABELA 1
RELACIONAMENTO ENTRE TIPO DE TRANSFORMADORES E NÚMERO DE MEDIÇÕES DE ADMITÂNCIA

Tipo de Transformador	2 enrolamentos	10 medidas
	Monofásico	3 enrolamentos
Trifásico	2 enrolamentos	21 medidas
	3 enrolamentos	45 medidas

III. SISTEMA ESPECIALISTA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE ADMITÂNCIA EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.

Conforme descrito na seção anterior, a modelagem de um transformador de potência por meio de sua matriz de transferência de admitância envolve diversos aspectos. Inicialmente, deve-se realizar o número mínimo de ensaios necessários à construção da matriz de admitância. Nesse contexto, inúmeras dificuldades práticas são encontradas quanto da realização desses ensaios as quais podem ser pontuadas da seguinte maneira:

- i.) O número de pontos amostrais para uma adequada modelagem possui uma grande dimensão e, a maioria dos analisadores de impedância existentes não possuem capacidade de armazenar tal quantidade de dados.
- ii.) A organização das medidas, efetuadas em cada ensaio, pode não ser adequada em função de seu número, fato esse que pode comprometer a modelagem do transformador.

Tais aspectos motivaram o desenvolvimento de um sistema especialista dedicado à automatização do processo de medição de admitância em função da frequência, bem como responsável pela organização de medidas e ensaios realizados.

Assim, o gerenciamento de ensaios de admitância é fundamentado em uma base de dados unificada capaz de correlacionar as informações de transformadores, seus ensaios e as medidas efetuadas em cada um dos ensaios. Para ilustrar detalhadamente a composição do sistema especialista, apresenta-se por meio da Figura 2 o diagrama esquemático de relacionamento entre os diversos módulos constituintes do referido sistema.

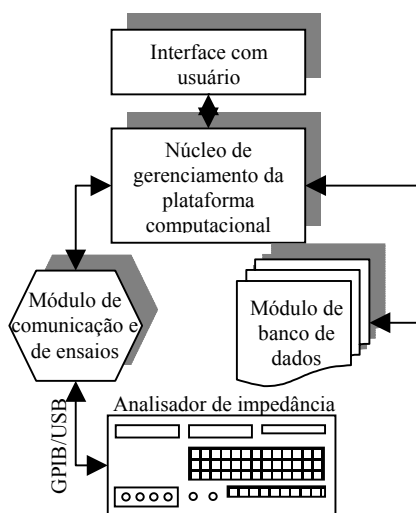


Figura 2. Diagrama esquemático da plataforma computacional.

Desta forma, o núcleo de gerenciamento da plataforma computacional é responsável por controlar o módulo de comunicação e de ensaios, alterar e consultar informações na base de dados e interpretar/disponibilizar informações ao usuário por meio da interface com o usuário.

Por sua vez, o módulo de comunicação e de ensaios é dedicado à comunicação com o analisador de impedância enviando comandos, lendo e interpretando dados advindos do referido equipamento. Além disso, neste módulo foram implementados algoritmos dedicados à solução de problemas de comunicação e de realização de ensaios, sendo

capaz de ajustar o analisador de impedâncias de forma automática com o objetivo de contornar tais problemas.

O módulo de banco de dados armazena todas as informações cadastrais relativas aos transformadores, ensaios e medidas, controlando para que as mesmas não sejam corrompidas ou danificadas de forma não proposital.

A fim de ilustrar a interface com o usuário, apresenta-se por meio da Figura 3 a tela de cadastro de transformadores do sistema especialista.

Figura 3. Tela de cadastro de transformadores.

Ao se cadastrar um novo transformador, é solicitado ao usuário que informe, de forma incondicional, a característica do transformador, ou seja, se o mesmo é monofásico ou trifásico. Caso o transformador seja trifásico, é solicitado ao usuário que seja informada a configuração do primário, do secundário e, para os transformadores de três enrolamentos, a configuração do terciário.

As demais informações cadastrais, tais como a subestação e a posição do transformador na subestação, serão úteis quanto do cadastro de ensaios.

Assim, antes de se iniciar o ensaio em um determinado transformador é necessário que o mesmo esteja cadastrado no sistema. Uma vez que tal requisito esteja satisfeito, pode-se então realizar o cadastro de um novo ensaio. Para ilustrar tal cadastro, apresenta-se por meio da Figura 4 a tela de cadastro de um novo ensaio a ser realizado no transformador cadastrado anteriormente.

Pode-se verificar por meio da Figura 4 que ao cadastrar um novo ensaio será solicitado ao usuário que informe a frequência inicial e a final para realização das medidas de admitância no transformador.

Ao término do cadastro de um novo ensaio será questionado ao usuário se o mesmo será iniciado na seqüência. Caso assim o deseje, será apresentada ao usuário

a tela de orientação para as medidas conforme se ilustra por meio da Figura 5.

Figura 4. Tela de cadastro de ensaios devidamente preenchida.

Pode-se observar por meio da Figura 5 que o usuário poderá informar a temperatura ambiente, a temperatura do transformador e a umidade relativa observada no início da medição. Em complemento, o sistema especialista informará ao usuário em quais terminais deverão ser conectadas as pontas de prova do analisador de impedâncias.

Figura 5. Tela de orientação para as medidas.

Uma vez que todos os terminais estejam conectados, conforme a recomendação do sistema especialista, a medição pode ser iniciada. O progresso da medição, bem como o gráfico da admitância em função da frequência, serão apresentados ao usuário ao longo da execução da medição conforme se exemplifica por meio da Figura 6.

Ao término de uma medição a tela de andamento permanece ativa para o usuário indicando todos os dados amostrais coletados ao longo da medição conforme se verifica por meio da Figura 7.

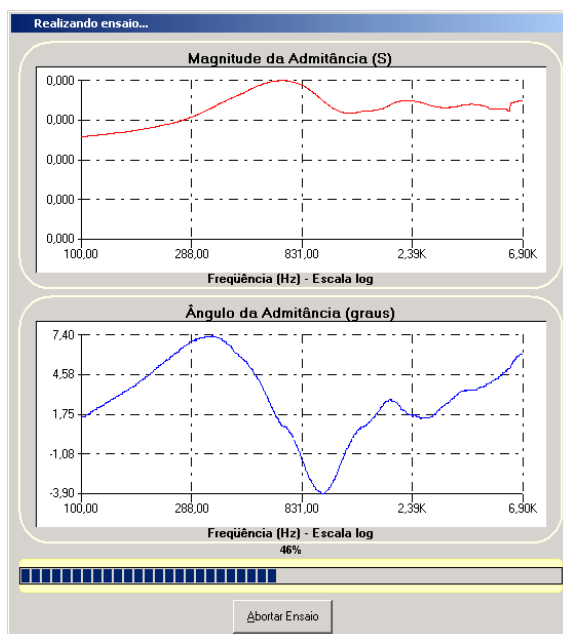


Figura 6. Tela de andamento da medição H1 – GND.

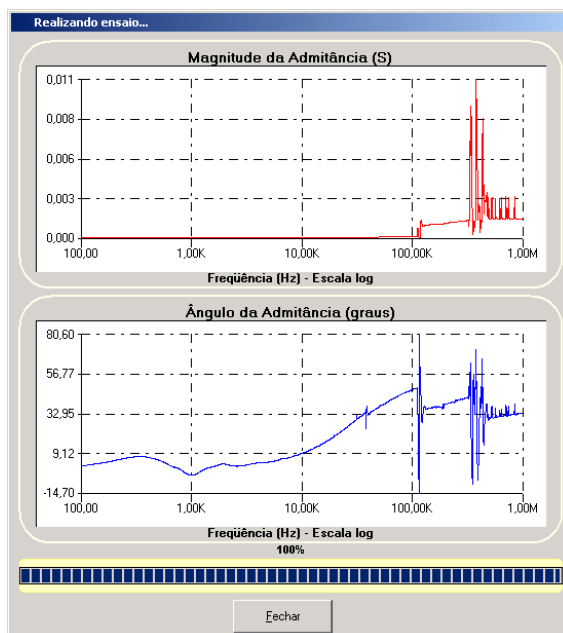


Figura 7. Tela de andamento da medição H1–GND ao término da medição.

Assim, o sistema especialista, ao final de cada medição, informará ao usuário a próxima configuração de ensaio a ser medida a admitância até que finde todas elas. No entanto, caso seja necessária a interrupção do ensaio, o mesmo poderá ser reiniciado, bastando para isso selecionar o respectivo ensaio na árvore de cadastros do sistema a qual é apresentada na Figura 8.



Figura 8. Árvore de cadastros do sistema especialista indicando a medida de admitância entre os terminais H1–GND.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema especialista apresentado na seção anterior foi empregado na realização de inúmeros ensaios de admitância em função da frequência em diversos transformadores de potência se mostrando estável e adequado aos propósitos do seu desenvolvimento.

Nessa seção serão apresentadas algumas medições realizadas em um transformador trifásico com dois enrolamentos e potência nominal de 12,5 MVA, posicionado na subestação da CTEEP/Bauru, com tensão de primário de 138 kV e tensão de secundário de 13,8 kV. A Figura 9 apresenta o detalhe das buchas do transformador indicando suas respectivas nomenclaturas.

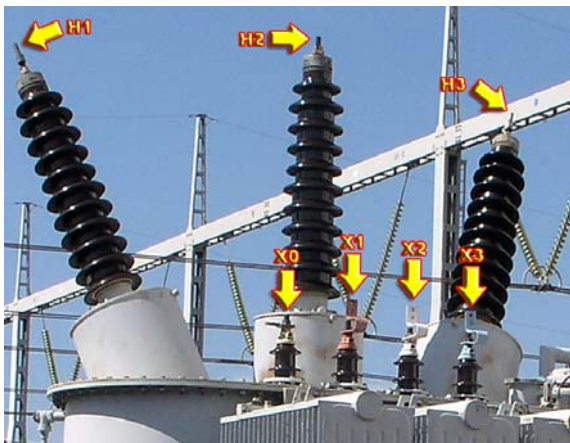


Figura 9. Detalhe das buchas do transformador ensaiado e sua respectiva nomenclatura.

A fim de ilustrar alguns dos resultados obtidos, apresenta-se por meio da Figura 10 os gráficos do módulo da admitância em função da frequência para os ensaios realizados entre o terminal H1 e os terminais terra, H2, H3 e X1.

Em complemento, apresenta-se por meio da Figura 11 o gráfico do ângulo da admitância mensurada entre o terminal H1 e o terminal terra.

Pode-se verificar por meio do gráfico da Figura 11 faixas de frequência onde o ângulo da admitância assume valores próximos a zero graus. Esse fato permite-se estimar que tais pontos são indicativos de frequências de ressonância ou anti-ressonância.

Figura 11. Ângulo da admitância entre o terminal H1 e o terra.

V. CONCLUSÕES

Esse artigo apresentou de forma resumida os principais aspectos relacionados à modelagem de transformadores de potência em função da frequência para fins de simulação de transitórios de sobretensões oriundas de descargas atmosféricas ou de manobras no sistema elétrico de potência. Dessa maneira, a fim de viabilizar tais procedimentos foi desenvolvido um sistema especialista para automatização e gerenciamento dos ensaios de admitância em função da frequência o qual foi validado por meio de ensaios em campo.

Como proposta para trabalhos futuros, pretende-se aprimorar o sistema especialista a fim de que o mesmo seja capaz de realizar estimativas e identificação de avarias em transformadores por meio de sua resposta em frequência.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Ragaller, *Surges in High Voltage Networks*, Edited by BBC Brown Boveri & Company Limited, Plenum Press, New York, 1980.
- [2] A. D'Ajuz *et. al.*, *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento*, Universidade Federal Fluminense, Editora Universitária, Rio de Janeiro, 1987.
- [3] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, 1999.
- [4] A. Semlyen and B. Gustavsen, "Vector fitting by pole relocation for the state equation approximation of nonrational transfer matrices", *Circuits and Systems: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 19, no. 6, pp. 549-566, 2000.

Figura 10. Módulo da admitância entre o terminal H1 e os terminais terra, H2, H3 e X1.