



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/21
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -XIII

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

**COMPARAÇÃO DE MODELOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA BASEADO NA ANÁLISE DE
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA**

**Mario Orlando Oliveira(*)
UFRGS**

**Augusto Copetti Cravo
ALSTOM GRID**

**Ito Capinos
ALSTOM GRID**

**Arturo S. Bretas
UFRGS**

RESUMO

Este Informe Técnico apresenta um estudo computacional de comparação de modelos de transformadores de potência efetuado através da análise de resposta em frequência (FRA). O modelo simplificado para altas frequências com parâmetros concentrados foi implementado computacionalmente e comparado com o modelo híbrido disponível no *software* ATP/EMTP de forma que comparações dos resultados de simulação permitam a análise do comportamento de transformadores em determinadas faixas de frequência. A resposta em frequência destes modelos foi comparado com dados reais de análise FRA de um transformador trifásico de 525 MVA, 60Hz, grupo de conexão YN11, a partir do qual conclusões foram formadas.

PALAVRAS-CHAVE

Modelos de Transformadores, Resposta em Frequência, NBR 5416, NBR 5356, ATP/EMTP.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência (TDP's) são equipamentos fundamentais na configuração dos sistemas elétricos devido tanto a sua importância técnica quanto econômica. Responsáveis pela transformação de tensões e correntes em diferentes nós dos sistemas interligados, os TDP's tornam viável a transmissão de energia elétrica a longas distâncias. Estes equipamentos possuem um alto grau de complexidade e exigências de projeto dado que são fabricados especificamente para satisfazer as características do sistema elétrico onde serão instalados. A especificação da impedância do transformador, o seu rendimento e sua capacidade de sobrecarga são exemplos de alguns dados típicos que devem ser fornecidos pelos fabricantes. Por outro lado, o comportamento dos transformadores perante fenômenos transitórios como energização, sobre tensões temporárias, energização de linhas, surtos atmosféricos e chaveamentos ainda são estudados com muita frequência pela comunidade acadêmica, pelos fabricantes e pelas concessionárias. Uma grande parte desses estudos segue uma linha de modelagem que considera tanto o transformador quanto o sistema elétrico envolvido. Nessa representação, um modelo físico-matemático representado por elementos de circuitos elétricos é utilizado para simular e estudar as respostas do transformador perante eventos transitórios. O estudo de transformadores realizado através de simulação serve para a obtenção de valores mais precisos de tensão em seus terminais e correntes nos seus enrolamentos, visando um melhor dimensionamento eletromecânico, bem como para uma futura representação em análises de ocorrências que envolvam este equipamento. Muitas abordagens têm sido propostas para a modelagem dos TDP's nos últimos anos levando a que diversas considerações tenham que ser feitas quanto à escolha do modelo mais adequado a ser utilizado. Cada fenômeno transitório é composto de uma determinada faixa de frequências de forma que o modelo de transformador a ser utilizado deve ser adequado para tal faixa.

Um importante número de falhas vem sendo relatado pelas concessionárias do setor elétrico brasileiro nos últimos anos, e podem estar relacionadas com os transitórios dos transformadores junto ao sistema. Inúmeras evidências atribuíram às operações de manobra como sendo o motivo principal da maioria das falhas. No mercado de TDP's é

(*) Av. Osvaldo Aranha, n° 103 – CEP 90035-190 Porto Alegre, RS, – Brasil
Tel: (+55 51) 3308-4437 – Fax: (+55 51) 3308-3293 – Email: moliveira@ece.ufrgs.br

crescente o questionamento técnico por parte dos clientes sobre modelos que possam representar o comportamento do transformador em condições de transitórios, inclusive ainda em fase de oferta ou projeto. Dessa forma, tanto as universidades quanto as prestadoras de serviços de transmissão ou distribuição realizam estudos sobre a interação entre os transformadores e o sistema elétrico de potência perante surtos eletromagnéticos, chegando a conclusões sobre a adequação do projeto. Assim, inicia-se um processo de interação entre fabricantes e compradores durante a fase de projeto do transformador ou até mesmo antes da compra.

Neste sentido, o principal objetivo deste estudo é implementar e validar computacionalmente o modelo híbrido disponível no *software* ATP/EMTP (*Alternative Transient Program*) [1], junto ao modelo simplificado para altas frequências, de forma que simulações em fase de projeto possam ser realizadas. Por outro lado, foi feita uma comparação dos resultados obtidos nas simulações com ensaios reais de resposta em frequência de um transformador de potência da unidade de Canoas da Alstom Grid, aos fins de validar os modelos e complementar os estudos sobre o modelo híbrido.

2.0 - DESCRIÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS

2.1 Modelo híbrido

O modelo híbrido surgiu em 2007 no *software* ATP/EMTP, e a sua elaboração é fruto dos trabalhos de [2], [3] e [4]. O foco desta abordagem é produzir aprimoramentos nas faixas de baixas e médias frequências do ponto de vista de topologia e exatidão, e desenvolver detalhes mais específicos de modelagem. Para tanto, uma representação do fluxo disperso através de matrizes de indutâncias é utilizada em combinação com um modelo não linear de representação do núcleo. Dessa forma, é sugerido ao natural o uso da terminologia de “híbrido”, por representar constantemente os efeitos do núcleo e dos enrolamentos com aprimoramentos. O acoplamento capacitivo é considerado entre enrolamentos e entre as partes estruturais com a presença da terra, proporcionando ao modelo uma boa característica para explorar frequências mais altas. A dependência da resistência com a frequência também é prevista e é simulada através de um circuito série de Foster de segunda ordem. Uma característica marcante apresentada pelo modelo híbrido são as opções de entrada de dados. O modelo pode receber informação através de parâmetros de projeto, dados padrões típicos ou resultados de ensaios. Ainda, o fornecimento desses dados pode ser realizado de diferentes formas. Por exemplo, podem-se fornecer dados construtivos para o cálculo da dispersão, enquanto as capacitâncias e resistências podem ser carregadas através de resultados de ensaios.

O modelo híbrido apresenta uma abordagem que considera a combinação entre representações de curto-circuito (impedâncias associadas aos enrolamentos) e a representação do núcleo, estando a última inserida entre a transformação primária e secundária, como mostrado na Figura 1 [2]. O modelo híbrido é capaz de: usar a matriz de admitâncias para uma completa representação da reatância de dispersão e acrescentar o acoplamento entre enrolamentos e núcleo, utilizar um modelo não linear topologicamente correto para o núcleo, baseado na dualidade, utilizar resistências dependentes da frequência para os enrolamentos e incluir os efeitos capacitivos anexados externamente junto às buchas terminais.

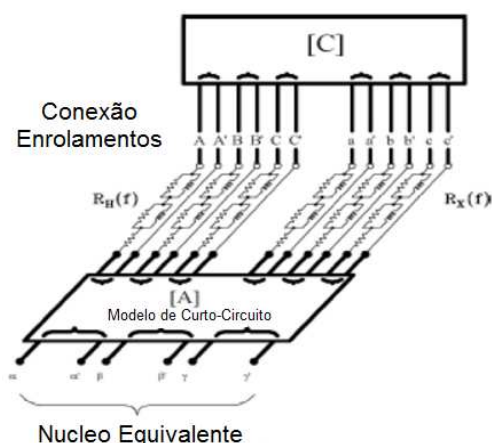


FIGURA 1 – Representação do núcleo posicionada entre o primário e o secundário do transformador.

2.2 Modelo simplificado para altas frequências

O modelo simplificado utiliza a topologia básica RLC de um modelo para 60Hz, porém considera as diferentes capacitâncias dos enrolamentos que constituirão caminhos alternativos para surtos de alta frequência. Essas capacitâncias são as capacitâncias dos enrolamentos contra a massa, as capacitâncias entre enrolamentos, as capacitâncias série e as capacitâncias terminais devidas às buchas dos enrolamentos. Este modelo desconsidera o efeito do núcleo para as altas frequências eliminando o ramo de excitação da modelagem. Este modelo pode ser considerado como uma versão simplificada do modelo proposto por [5], dado que a impedância de curto-circuito é simplificada por um ramo RL em paralelo com a impedância série do enrolamento como mostrado na Figura 2.

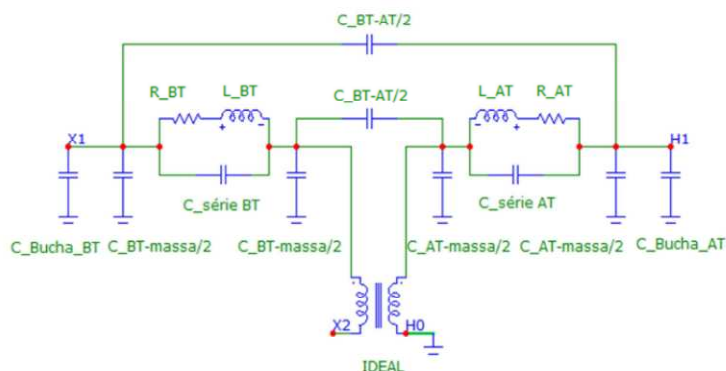


FIGURA 2 – Modelo simplificado para altas frequências implementado no ATP/EMTP.

4.3 Transformador real utilizado para comparação de análise FRA

Os fins de comparação de resposta em frequência dos modelos analisados neste trabalho foi utilizado um transformador real fabricado na unidade de Canoas da Alstom Grid cujas características técnicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Técnicas do Transformador Real

Potência Nominal	525 MVA
Número de Fases	3
Relação de Tensão Nominais	345 (+3-1x2,5%) -24 kV
Número de Enrolamentos	2
Grupo Vetorial	YNd1
Impedância Nominal	16,4%
Frequência Nominal	60 Hz
Configuração do Núcleo	5 pernas
Massa total	310 Toneladas

3.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

O transformador real que serve como ponto de comparação neste trabalho foi submetido a ensaios de resposta em frequência (FRA – *Frequency Response Analysis*) ao término de sua fabricação. As simulações efetuadas com os modelos analisados foram realizadas através do *software* ATP/EMTP versão 5.1p2, seguindo os mesmos procedimentos dos ensaios FRA feitos em fábrica. Apesar do ensaio de resposta em frequência não representar diretamente um fenômeno transitório, ele mostra informações sobre o comportamento do transformador através das faixas de frequências. Objetiva-se verificar quais os limites de resposta de cada modelo, determinando para quais faixas de frequências os modelos considerados fornecem boas respostas. A Figura 3 traz o resultado do ensaio de resposta em frequência aplicando-se a tensão de entrada no terminal de fase H1 no lado de Alta Tensão (AT) e medindo-se a saída no terminal de neutro H0, com o secundário (lado de baixa tensão –BT) em aberto. Pode-se notar que o gráfico mostra os resultados para uma faixa de frequência de 20Hz até 1MHz os quais serão comparados com o ensaio FRA dos modelos híbrido e simplificado para altas frequências.

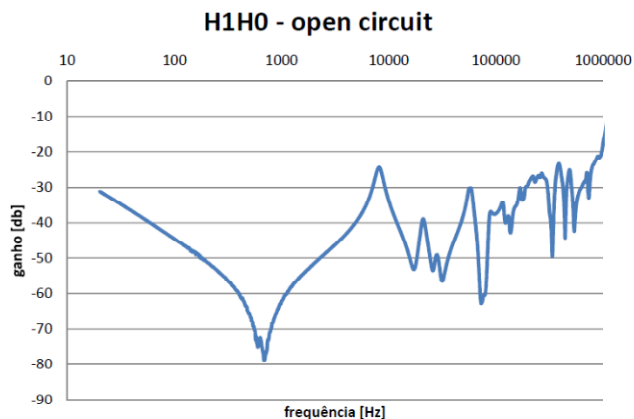


FIGURA 3 – Resultado do ensaio FRA do transformador de 525MVA aplicando-se a tensão de entrada no terminal

de fase H1 no lado de AT.

5.1 Adequação dos Modelos para Baixas, Médias e Altas Frequências

Através da análise das simulações efetuadas no *software* ATP/EMTP pode-se especificar qual é a adequação de cada modelo estudado para cada faixa de frequência. As simulações de análise FRA foram realizadas no ATP considerando um passo de simulação com incremento de 10Hz. Nesse sentido, comparam-se os dois modelos estudados com resultados reais (Figura 3) em ensaios com secundário aberto, dado que um secundário em curto-circuito omitiria informações em baixas frequências. A Figura 4 apresenta os resultados da análise FRA com aplicação da tensão de ensaio em uma das fases de AT (fase A) encontrando-se o enrolamento de BT em aberto.

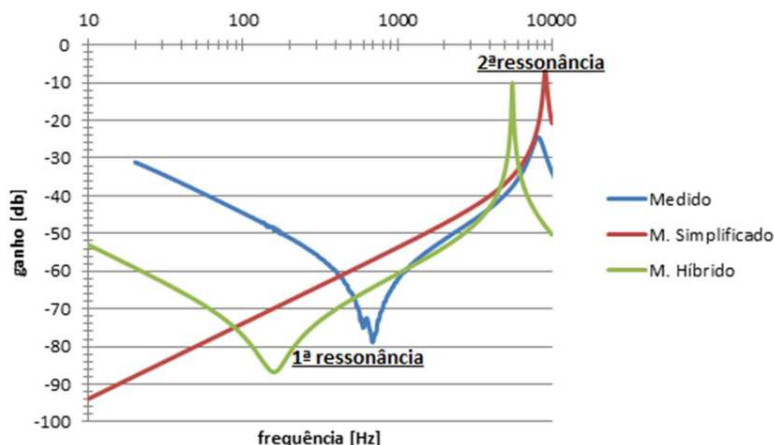


FIGURA 4 – Resultado da simulação da análise FRA para baixas e médias frequências (<10kHz).

Pode-se observar o comportamento não satisfatório do modelo simplificado nas baixas frequências (<50/60Hz) devido à falta de representação do núcleo magnético neste modelo. O decaimento do ganho no modelo híbrido e no transformador real corresponde a um incremento da impedância terminal do transformador vista do lado de AT o que sugere uma predominância indutiva nesta faixa de frequência (0Hz-120Hz). A partir de 120Hz acontece a primeira ressonância do modelo híbrido, enquanto que para o transformador real somente inicia-se por volta de 500Hz. Este deslocamento da frequência de ressonância pode depender de imprecisões de cálculo no modelo híbrido através dos dados de projeto devido ao superdimensionamento no cálculo das capacitâncias paralelas totais e/ou um subdimensionamento nos cálculos das indutâncias de dispersão do núcleo. Após a primeira ressonância, o modelo híbrido passa a responder muito bem na faixa de 800Hz até quase 4kHz, onde as curvas FRA do modelo híbrido e do TDP real praticamente coincidem.

A Figura 5 apresenta o resultado das simulações de análise FRA para a faixa das altas frequências (10kHz – 1MHz). A primeira observação a ser feita é o surpreendente bom resultado do modelo híbrido para a faixa de 10-18kHz. Apesar de uma aparente diferença constante de ganho em relação ao ensaio real, o modelo híbrido não apresentou ressonâncias nessa faixa e o comportamento de leve declínio do ganho representa uma prevalência indutiva.

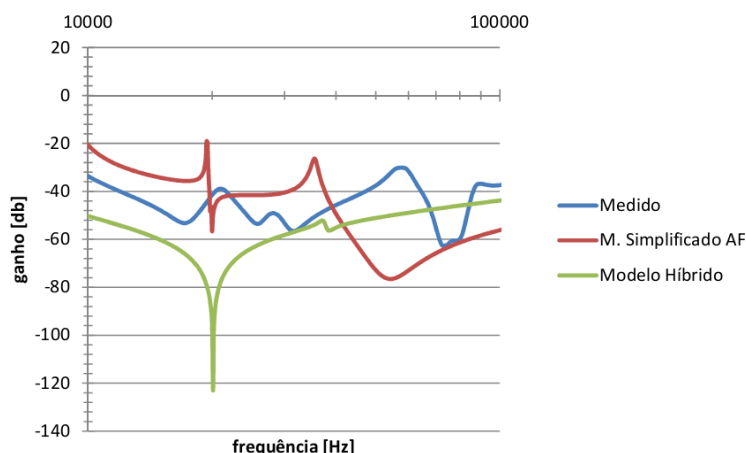


FIGURA 5 – Resultado da simulação da análise FRA para altas frequências (10kHz – 100kHz).

A Figura 6 apresenta o resultado das simulações de análise FRA para frequências entre 100kHz e 1MHz. Pode-se notar que o modelo híbrido não apresenta qualquer tipo de ressonância nesta faixa de frequências mostrando que

não possui elementos adequados para simular fenômenos de altas frequências. O modelo simplificado ainda apresenta uma sucessão de três ressonâncias por volta de 200kHz, no entanto, não apresenta semelhança com os resultados reais (medidos em fábrica).

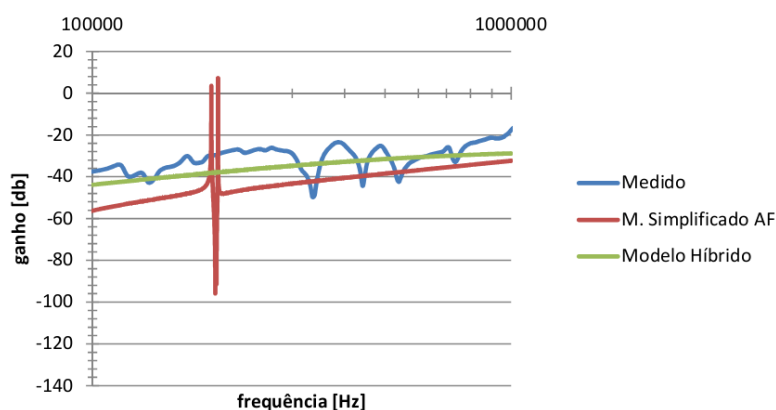


FIGURA 6 – Resultado da simulação da análise FRA para altas frequências (100kHz – 1MHz).

Realizando uma avaliação geral e específica para o modelo híbrido, pode-se observar que o mesmo é adequado para estudos transitórios que envolvam fenômenos eletromagnéticos nas faixas de 0Hz a 15kHz, embora observasse deslocamentos dos pontos de ressonâncias quando comparado com a resposta em frequência do transformador real. A Figura 6 apresenta uma das simulações de resposta em frequência realizada para esta faixa de frequências.

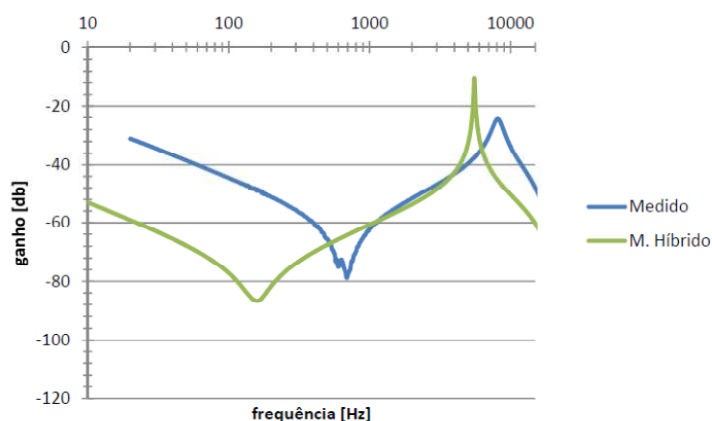


FIGURA 6 – Simulação da resposta em frequência do modelo híbrido na faixa de 0Hz até 15kHz.

Já o modelo simplificado para altas frequências representa corretamente o transformador real para estudos de transitórios de 1kHz até 20kHz. Para frequências acima disso, nenhum dos modelos avaliados pode ser considerado como adequado. Registra-se apenas que para frequências acima de 200kHz ambos os modelos apresentam uma prevalência capacitiva. Esse comportamento é coerente com uma técnica de simplificação utilizada por profissionais da área, que consiste de representar o transformador apenas como um capacitor nessa faixa de frequências. Uma das simulações do modelo simplificado operando nessa faixa de frequência é apresentada na Figura 7.

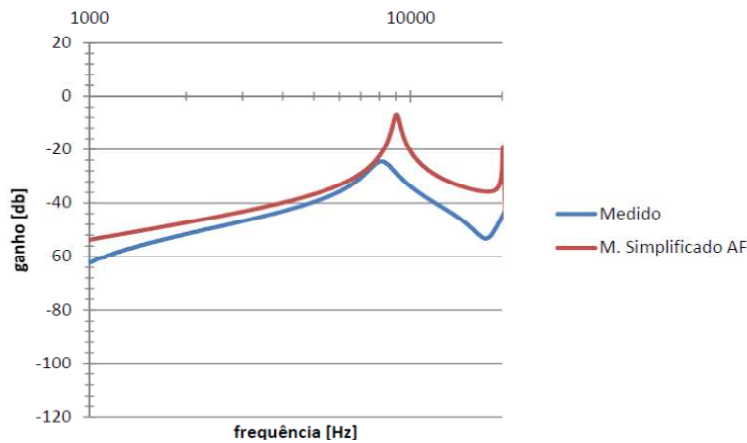


FIGURA 7 – Simulação da resposta em frequência do modelo simplificado para altas frequências na faixa de 0Hz até 20kHz.

4.0 - CONCLUSÕES

Este estudo abordou a análise em frequência de modelos de transformadores visando cobrir o espectro de baixas, médias e altas frequências. A análise dos resultados mostra que soluções para essas faixas são alcançadas com o emprego do modelo híbrido e do modelo simplificado para altas frequências. Esses modelos podem ser aplicados para estudos de transformadores que estejam ainda em fase de projeto, permitindo assim futuras modificações nos cálculos. Entretanto, foram observadas limitações em cada um dos modelos avaliados.

Como primeira limitação, reforça-se o fato de que o modelo híbrido apresenta deslocamentos em frequência em suas respostas. Esse fator demanda um estudo mais detalhado para obterem-se conclusões sobre as hipóteses detalhadas a seguir. A primeira questiona se o procedimento interno de cálculo dos parâmetros, realizado pelo modelo híbrido do ATP a partir de dados de projeto não possui divergências. A segunda hipótese questiona se a interface atual para entrada de dados de projeto está desenvolvida o suficiente para aplicação de projetos de forma geral. Essa última hipótese vem formulada pelo fato de, por exemplo, não ser encontrada no bloco híbrido do ATP diferenciação entre tipos de enrolamentos, ou número de camadas. Apesar dessa limitação do modelo híbrido e/ou de sua aplicação a projetos gerais, sabe-se que o modelo é adequado para estudos de respostas transitórias em eventos tais como excitação, energização (*inrush*), chaveamentos e ferro-ressonância.

Como segunda limitação, registra-se o fato do modelo simplificado para altas frequências não apresentar bons resultados para frequências maiores que 20kHz. Assim sendo, é provável que esse modelo não seja adequado para representar o comportamento de transformadores perante faltas em linhas curtas, surtos atmosféricos e chaveamentos em subestações isoladas a gás, por exemplo. Nesse sentido, um estudo mais detalhado que considere a energia do fenômeno através de seu espectro em frequência poderia trazer resultados mais conclusivos. Apesar dessa limitação do modelo simplificado para altas frequências, conclui-se que ele é adequado para representar a resposta do transformador aos demais tipos de faltas e surtos de tensão de frente lenta, como um surto de manobra.

Através dos resultados da análise FRA conclui-se que o modelo híbrido comporta-se como o transformador real (utilizado para comparação) em fenômenos transitórios que envolvam fenômenos eletromagnéticos nas faixas de baixas e médias frequências. Já o modelo simplificado de altas frequências mostrou-se eficiente nas faixas de frequências altas registrando-se apenas que para frequências acima de 200kHz ambos os modelos apresentam uma prevalência capacitiva. Esse comportamento é coerente com uma técnica de grande simplificação utilizada por profissionais da área, onde o transformador apenas é representado como um capacitor nessa faixa de frequências. Para a representação dos transformadores nas altas frequências, sugere-se o aprimoramento do modelo simplificado com a inclusão de novos elementos dependentes da frequência.

Salientando a importância técnica e econômica dos transformadores de potência nos sistemas elétricos, destaca-se aqui o fato de desenvolver e/ou utilizar modelos mais detalhados que possam ampliar a capacidade de resposta transitória dos transformadores a faixas de frequências maiores que 20kHz. Nesse sentido e considerando a forma de abordagem utilizada no desenvolvimento do modelo híbrido, as seguintes propostas de trabalhos são sugeridas:

- Extensão da abordagem do modelo híbrido para representação de transformadores de potência submetidos a eventos transitórios com frequências superiores a 15kHz.
- Avaliação das possíveis causas dos deslocamentos em frequência apresentados pelos pontos de ressonâncias do modelo híbrido em relação ao transformador de potência real.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BONNEVILLE POWER ADMINISTRATION. Alternative Transient Program: ATP/EMTP. Portland, OR, 2007.
- (2) MORK B. A.; GONZALEZ F.; ISHCENKO D.; STUEHM D. L.; MITRA J. Hybrid Transformer Model for Transient Simulation—Part I: Development and Parameters, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, Jan. 2007.
- (3) MORK B. A.; GONZALEZ F.; ISHCENKO D.; STUEHM D. L.; MITRA J. Hybrid Transformer Model for Transient Simulation—Part II: Laboratory Measurements and benchmarking, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, Jan. 2007.
- (4) HOIDALEN H. K.; MORK B. A.; GONZALES F.; ISHCENKO D.; NICOLA C.; Implementation of the Hybrid Transformer Model in ATPDraw. NTNU, Trondheim, Noruega.
- (5) CHIMKLAI, S.; MARTI, J. R. Simplified Three-phase Transformer Model for Electro-magnetic Transients Studies. IEEE Transactions on Power Delivery, Piscataway, NJ, v. 10, n. 3, p. 1316-1325, July 1995.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Mario Orlando Oliveira, nasceu em Misiones, Argentina, em 1979. Recebeu o grau de Engenheiro Eletromecânico da Universidad Nacional de Misiones –UNaM, Argentina, e o grau de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul –UFRGS, Brasil, em 2006 e 2009, respectivamente. Atualmente participa em projetos de engenharia e pesquisas junto ao Centro de Estudos de Energia para o Desenvolvimento –CEED, Argentina, atuando na área de Sistemas Elétricos de Potência.



Augusto Copetti Cravo é natural de Porto Alegre do ano de 1986. Graduiu-se em Engenharia Elétrica no ano de 2011 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Trabalha como engenheiro de projetos na empresa Alstom Grid em Canoas desde 2011, atuando na área de cálculo elétrico, engenharia de propostas e estudos de transitórios eletromagnéticos. Atualmente é aluno de mestrado na UFRGS na área de Sistemas de Potência / Máquinas Elétricas.



Arturo Suman Bretas nasceu em Bauru, São Paulo, Brasil, em 1972. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista e de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo – USP, em 1995 e 1998 respectivamente, e o grau de Ph.D. em engenharia elétrica da Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, USA, em 2001. Atualmente é professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil atuando na área dos Sistemas Elétricos de Potência.