

	<p><b>XX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b></p>	<p>Versão 1.0 22 a 25 Novembro de 2009 Recife - PE</p>
---	--	--

## GRUPO XIII

### GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REACTORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES - GTM

#### FRA - APLICAÇÃO EM DIAGNÓSTICO AVANÇADO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E REACTORES DE ALTA TENSÃO

**P.D. Mundim (\*)**  
ABB Asea Brown Boveri

**J.C. Mendes**  
ABB Asea Brown Boveri

**E.Asada**  
USP Universidade de São Paulo

## RESUMO

Alguns tipos de defeitos causados por faltas ou ocorrências de impactos mecânicos em transformadores de potência não são detectáveis através das técnicas convencionais utilizadas para verificar possíveis problemas nesses equipamentos. Por essa razão, o presente trabalho visa desenvolver um algoritmo de análise e diagnóstico de transformadores utilizando para isto a metodologia de Análise de Resposta em Frequência (FRA) de forma que esses defeitos ou falhas sejam detectados por esse método. Uma vez detectado um problema, medidas preditivas poderão ser tomadas para que esses problemas não se tornem falhas catastróficas, o que anteciparia o fim de vida do equipamento.

## PALAVRAS-CHAVE

FRA - Função de Transferência - Correlação Cruzada - Transformador - Diagnóstico.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

A Resposta em Frequência (FRA) de interesse de um determinado transformador de potência ou reator derivação constitui uma caracterização única, no domínio da frequência, do equipamento. De uma forma resumida a resposta em frequência do equipamento pode ser sintetizada através de combinação específica de parâmetros elétricos do sistema linear representativo do equipamento de interesse (núcleo, enrolamentos e suas isolações, conexões internas entre enrolamentos e terminais, etc).

De uma forma geral a ABB Brasil tem sido pioneira na aplicação de métodos Resposta em Frequência (FRA) de transformadores e reatores, quer seja:

- na caracterização e análise da resposta de solicitações por tensões transitórias de sistemas de enrolamentos de transformadores e/ou reatores, em particular, na análise de solicitações de tensões associadas à sobretensões ressonantes; e
- na análise e na interpretação de desvios observáveis nas Respostas em Frequência (FRA) de um equipamento, derivadas como resultado de medições em dois ou mais instantes sucessivos de caracterização no domínio da frequência no equipamento de interesse, são de interesse relevante para o diagnóstico comparado do estado atual do equipamento. Desta forma, desvios nas respostas em frequência sucessivas de um mesmo equipamento resultam invariavelmente de variações dos seus parâmetros elétricos, ou seja, da geometria da estrutura correspondente e/ou de propriedades específicas dos materiais que as formam.

O desenvolvimento e a aplicação de métodos de análise e interpretação consistente e robusta de desvios observáveis na Resposta em Frequência (FRA) de um equipamento é de extrema relevância em particular em

países continentais como o Brasil ou mesmo no deslocamento durante transporte de equipamentos novos em exportação do Brasil para outros países, até mesmo em outros continentes.

Transportes de longas distâncias entre a fábrica e o local da instalação, condições muitas vezes inadequadas das estradas e/ou ocorrências de acidentes, podem resultar no estabelecimento de impactos mecânicos que solicitam o equipamento de interesse. Em decorrências, perdas significativas econômicas e/ou de tempo podem ser impostas aos agentes envolvidos (fabricantes, clientes, transportadoras, seguradoras, usuários, etc).

Naturalmente, ocorrências associadas ao transporte de equipamentos constituem apenas um exemplo mais comum, porém outras ocorrências são também de interesse como a consequências mecânicas associadas à forças eletromagnéticas estabelecidas por correntes de curto-circuitos bem como condições de envelhecimento e/ou superação de equipamentos elétricos em operação.

Neste contexto este artigo apresenta os resultados principais do desenvolvimento e da aplicação aplicação combinada de métodos modernos, não invasivos, dedicados ao diagnóstico e interpretação de desvios associados a respostas em frequência derivadas de medições, entre estados sucessivos, de equipamentos elétricos. Em particular são apresentados:

- aspectos resumidos de fundamentos dos métodos de diagnósticos utilizados (força-bruta, correlação cruzada e por parâmetros estatísticos);
- aspectos das características relevantes da ferramenta modular desenvolvida (Matlab&MicrosoftExcel) para o suporte computacional aos métodos de diagnósticos e integrada ao ToolBox de diagnósticos avançados da ABB Brasil para transformadores e reatores de potência;
- exemplos de aplicação (transformador elevador trifásico 405MVA, 13.8/550kV, transformador elevador trifásico 200MVA, 13,8-13,8/138kV); e
- aspectos de avaliações de benefícios econômicos originados pela aplicação destes métodos de diagnósticos relacionados aos equipamentos dos exemplos de interesse acima indicados.

## 2.0 - FUNDAMENTOS

A análise de resposta em frequência (FRA – Frequency Response Analysis) é um método não destrutivo de teste de diagnóstico usado para identificar potenciais problemas na parte ativa de um transformador (enrolamento e núcleo) através da comparação com dados de referência da mesma unidade ou resultados de unidades similares. Essa comparação para efeito de análise é feita pela medição da função de transferência da configuração do circuito de enrolamento. [1],[2]

FRA consiste na medição da função de transferência (corrente/tensão ou tensão saída/tensão entrada) dos elementos capacitivos e indutivos dos enrolamentos do transformador. A medição é feita sob larga faixa de frequência e os resultados são comparados com uma referência conhecida como “impressão digital” ou “assinatura” do enrolamento do transformador.[3]

A impressão digital do FRA é uma medida de referência geralmente realizada em fábrica quando o transformador está pronto para ser levado a campo, ou seja, depois de ser aprovado nos testes de ensaio do transformador. Esta primeira medição é feita após a fabricação de maneira a ter um conjunto de medições para estudos comparativos futuros, investigações ou análises de diagnóstico.

É uma técnica de diagnóstico muito sensível a alterações nas características elétricas dos enrolamentos oriundas de vários tipos de esforços elétricos e/ou mecânicos (transporte, terremotos, perda de força de compressão, curtos-circuitos, etc.). O teste pode ser usado sozinho para identificar danos em enrolamentos ou como complemento a outros métodos como: fator de potência do isolamento, análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante, teste de impedância de curto-circuito [4],[5].

## 3.0 - MÉTODOS DE ANÁLISES

Foram implementados quatro métodos diferentes para uso do FRA como análise de diagnóstico de transformadores de potência baseados em métodos estatísticos (I, II, III) como esperança, desvio padrão, correlação cruzada e método qualitativo baseado no IEEE Task Force [6].

O cálculo do erro entre uma Função de Transferência de referência e de teste é um método de mostrar as diferenças entre os desvios das FTs, porém esse cálculo é feito de maneira não uniforme através da faixa de frequência. Por esse fator torna-se necessária a normalização dessa função (1) de maneira que a mesma fique independente da resposta da função erro aplicada às FTs consideradas.

$$\Delta(f) = \frac{|FT_{Ref}(f)| - |FT_{Test}(f)|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |FT_{Ref,i}(f)|} \quad (1)$$

Através do cálculo da esperança (2) baseada no cálculo do erro normalizado, obtém-se o erro relativo médio da FT de teste. O valor da esperança é zero para FTs de referencia e teste quando estas são idênticas. A avaliação da distribuição estatística dos valores da função erro é calculada através do desvio padrão (3) que é dado pela raiz quadrada positiva da variância que mede essa variação de erro.

$$E[\Delta(f)] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i(f) \quad (2)$$

$$\sigma[\Delta(f)] = \sqrt{Var(\Delta(f))} = E[(\Delta(f)) - E[\Delta(f)]] \quad (3)$$

Por fim, um dos métodos utilizados neste artigo e bastante confiável neste tipo de aplicação consistiu no uso da correlação cruzada (4) que é a medida da similaridade entre duas curvas. Seu cálculo é feito através do quociente entre a covariância (Cov) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dessas variáveis.

$$\rho(TF_{Ref}, TF_{Test}) = \frac{cov(TF_{Ref}, TF_{Test})}{\sigma[\Delta(f)]} \quad (4)$$

A aplicação da correlação cruzada foi utilizada de maneira isolada e em conjunto com faixas de classificação do grau de comprometimento do equipamento estudadas na referência [1].

#### 4.0 - FERRAMENTA DE ANÁLISES

O programa foi estruturado em seis células de programação feita no “software” MatLab. A primeira célula lê os dados fornecidos em arquivo de extensão .xls dos terminais que se quer a resposta em frequência e a partir dos dados desenha-se o gráfico da resposta em frequência em escala logarítmica (dBxHz).

Na célula seguinte as variáveis manipuladas são armazenadas em uma novo arquivo de extensão .xls para armazenamento dos dados. A partir da terceira célula até a sexta célula, cada uma é representada por uma função que representa a programação para cada um dos modelos utilizados para avaliação e diagnostico de transformadores e reatores.

Através dos dados fornecidos pela ABB (Asea Brown Boveri), foram desenhadas as curvas de resposta em frequência e registrados os dados obtidos por cada um dos quatro métodos simulados.

#### 5.0 - APLICAÇÕES E RESULTADOS

Alguns equipamentos os quais sofreram algum tipo de impacto durante transporte e tiveram medição de FRA em suas especificações foram simulados com o uso da ferramenta em questão permitindo-se assim avaliar a sensibilidade da mesma para defeitos relacionados a esse tipo de problema. Dois destes casos simulados são apresentados a seguir.

##### 5.1 Caso 1 - Transformador Elevador Trifásico: 200MVA, 13.8-13.8/131.1...138...144.9kV

- medição fábrica: Abril 2007
- medição campo: Setembro 2007
- ocorrência: impactos durante transporte

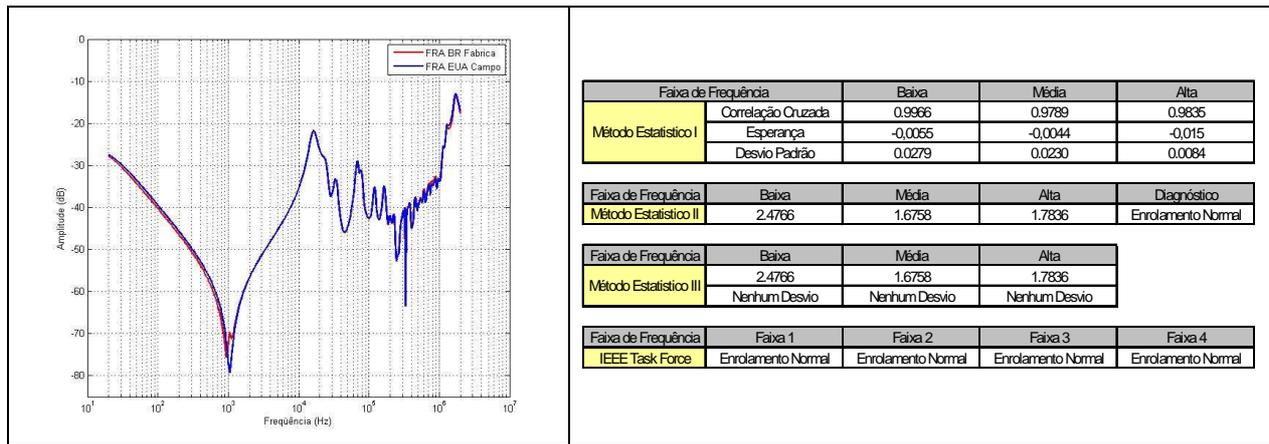


Figura 1- Resposta em Frequência com sinal de entrada na alta tensão e avaliação dos métodos

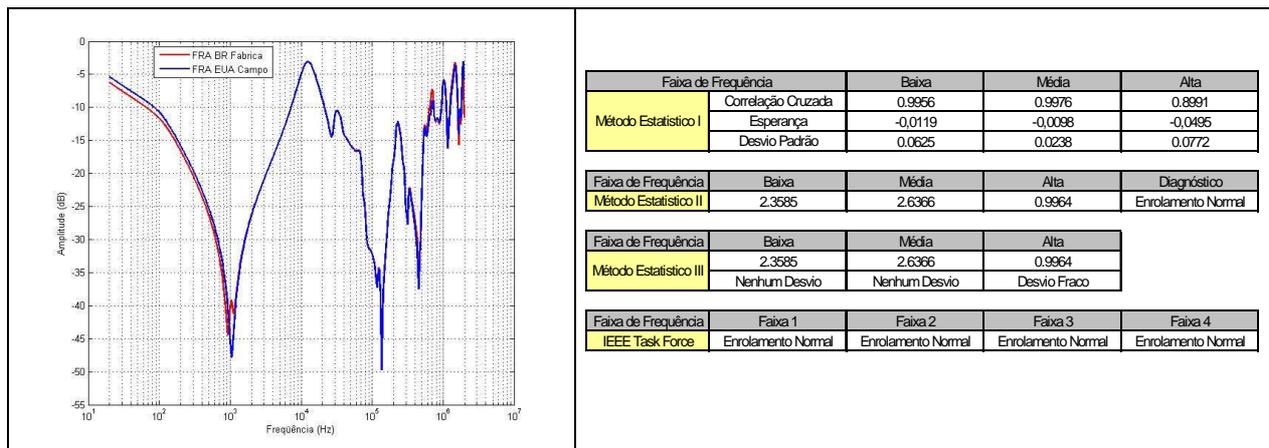


Figura 2- Resposta em Frequência com sinal de entrada na média tensão e avaliação dos métodos

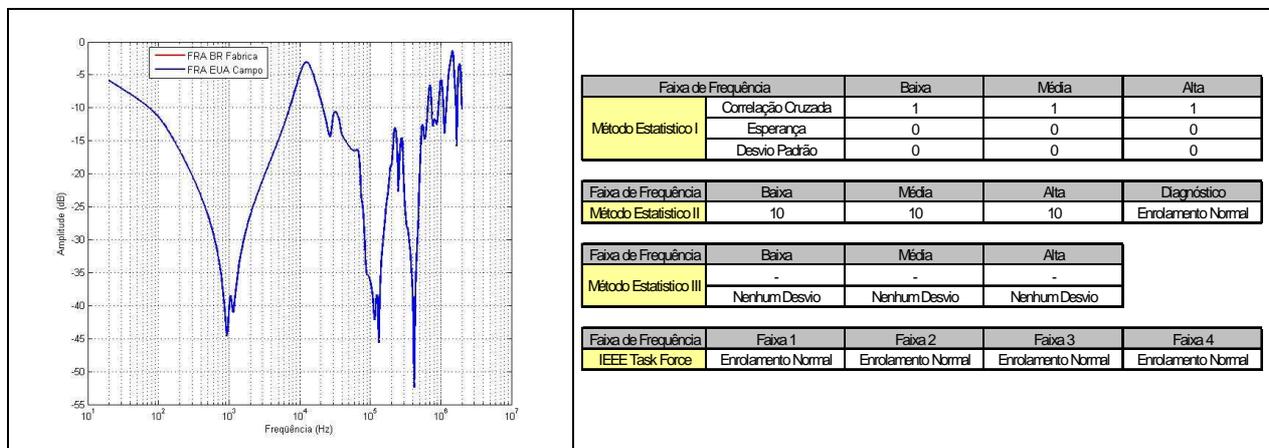


Figura 3- Resposta em Frequência com sinal de entrada na baixa tensão e avaliação dos métodos

As simulações realizadas para o caso do transformador elevador 200 MVA apresentaram coerência entre os métodos aplicados para avaliação do estado do transformador.

É possível reparar que pelo método estatístico I, a correlação cruzada para cada faixa de frequência está próxima de 1, o que indica linearidade entre as curvas, enquanto a esperança apresenta valores próximos de zero o que leva possivelmente a crer que os desvios possam ser decorrentes de ruídos. Já pelo uso do desvio padrão mostrou que a variação de erro entre as funções de transferência é próxima de zero indicando assim, uma diferença quase que constante entre as funções de transferência.

Portanto, mesmo que o transformador tenha sofrido impacto de transporte, suas estruturas internas não foram modificadas a ponto de não poder colocar o equipamento em operação.

## 5.2 Caso 2 - Transformador Elevador Trifásico: 405MVA, 13.8/500...525...550kV

- medição fábrica: Junho 2004
- medição campo: Julho 2004
- ocorrência: acidente durante transporte rodoviário com registro de impacto elevado

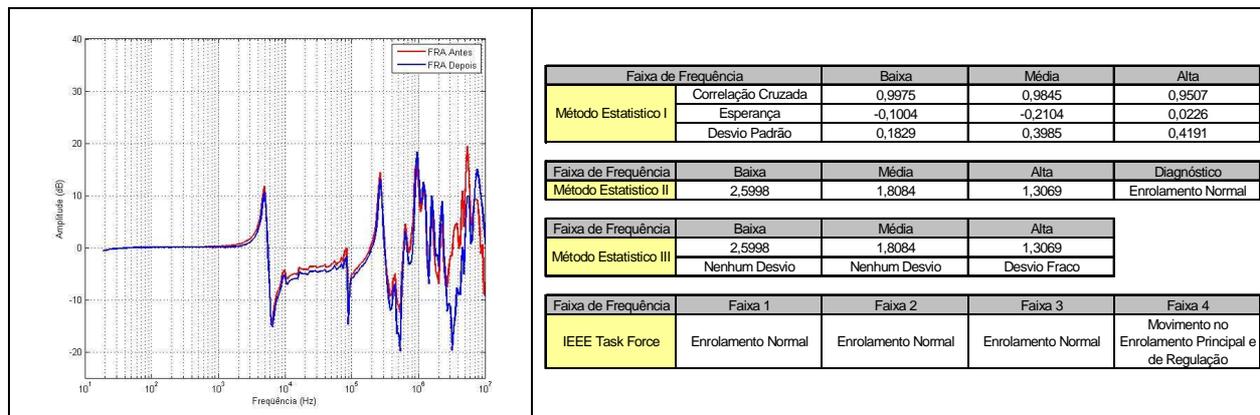


Figura 4 - Resposta em Frequência com sinal de entrada na alta tensão e avaliação dos métodos

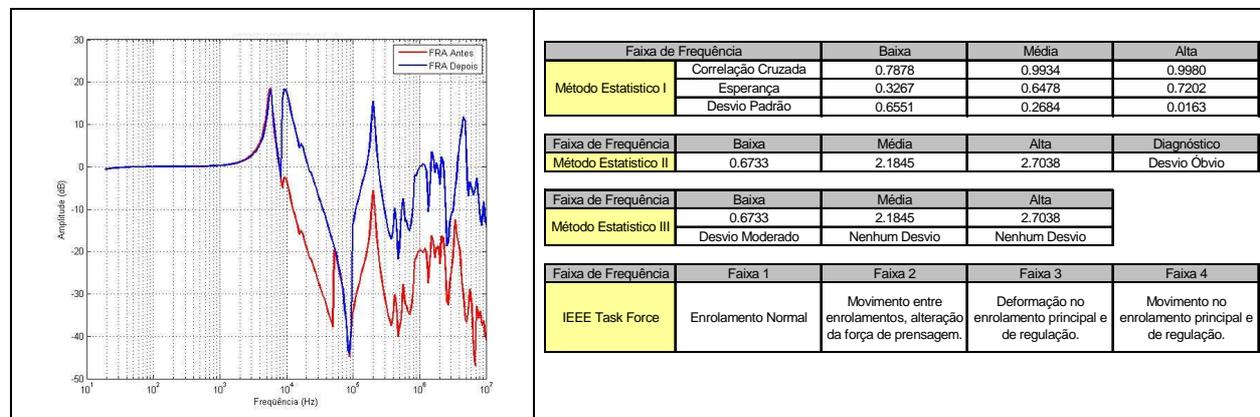


Figura 5- Resposta em Frequência com sinal de entrada na baixa tensão e avaliação dos métodos

Na avaliação do transformador elevador trifásico 405MVA, foi verificado nas funções de transferência AT/BT (Alta Tensão /Baixa Tensão) desvios nas curvas de referência e pós-transporte. Os Métodos Estatísticos apontaram possíveis defeitos relacionados à faixa de baixa frequência (1kHz a 100kHz). Isto pode implicar em variações de resistências de aterramento do núcleo e alterações geométricas do núcleo.

Outra possibilidade são prováveis defeitos relativos aos enrolamentos como circuito aberto ou curto circuito entre espiras, deformações ou deslocamentos entre enrolamentos.

Pela avaliação quantitativa por década (método IEEE Task Force), deformações e movimento dos enrolamentos são verificados, o que pode indicar que uma alteração na força de prensagem provocada pelo impacto no transporte propiciou movimentos entre enrolamentos.

Analisando-se visualmente os gráficos percebe-se também que a amplitude dos picos de ressonância e anti-ressonância variaram tomando como base a curva de referência (medição feita em fábrica antes do transporte do transformador). Essas variações indicam que houve uma provável alteração dos parâmetros de capacitância série e indutância do enrolamento decorrentes de possíveis deformações e deslocamentos entre discos.

As funções de transferência BT/AT (Baixa Tensão/Alta Tensão) pelos métodos estatísticos I e III e IEEE Task Force apresentaram uma indicação de leve deformação na faixa de alta frequência que pode ter sido influenciada por um provável movimento entre enrolamentos.

Tomando-se como referência o caso do transformador elevador trifásico 405MVA, pode-se constatar a eficiência e robustez do programa visto que na época da ocorrência, o transformador foi desmontado para inspeção e constataram-se as deformações citadas na simulação do mesmo utilizando métodos matemáticos e quantitativos.

## 6.0 - AVALIAÇÃO ECONÔMICA CASO 2

Histórico sobre ensaios de FRA realizados no equipamento:

### ABB Brasil 2004Jun - ensaio FRA

- Além dos ensaios elétricos de aprovação do transformador em fábrica, houve ensaio de FRA.
- Durante transporte, houve ocorrência de acidente durante transporte rodoviário devido a ruptura do suporte mecânico da carreta o transformador sofreu queda de 50-80 cm de altura.
- O transformador retornou à fábrica para ser inspecionado.

### ABB Brasil 2004Jul - ensaio FRA

- Novos ensaios elétricos e novo ensaio de FRA foi feito. A partir do ensaio de FRA, medidas importantes puderam ser tomadas pois de fato o impacto sofrido pelo transformador acarretou em problemas na parte ativa do mesmo.

No caso deste transformador foram considerados os seguintes cenários: caso houvesse uma ferramenta para diagnóstico com o uso de FRA (cenário 1); caso sem a ferramenta em que o transformador falha em campo por não ter sido detectado impactos pelas inspeções convencionais e deve ser retornado para a fábrica para reparo (cenário 2).

Nesse levantamento de custo, foi observado um potencial de economia de aproximadamente 58% no cenário 1 quando comparado ao cenário 2, pois as ações pós acidente em fábrica não detectaram deformações (que de fato ocorreram) devido à ausência de um método seguro.

## 7.0 - CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu desenvolver e implementar, em ferramenta de simulação digital, um algoritmo robusto de análise e diagnóstico de transformadores utilizando para isto a metodologia de Análise de Resposta em Freqüência (FRA). Os defeitos causados por faltas ou ocorrências de impactos mecânicos em transformadores e/ou reatores de potência podem ser detectados por esse algoritmo, uma vez que os resultados das simulações comprovaram a eficiência dos métodos de análises incluídos no algoritmo.

A aplicação matemática e quantitativa utilizada para análise e diagnóstico de transformadores de potência e reatores mostrou-se uma ferramenta eficiente para análise comparada, de resultados de ensaios de medições de resposta em freqüência (FRA) destes equipamentos, através da aplicação focada em alterações causadas por deformações ou deslocamentos mecânicos nos equipamentos.

Para o fabricante, a falha de um transformador em decorrência de inspeção inadequada ou incompleta ou avaliada com ferramentas que não constatem com maior sensibilidade algum tipo de avaria (deformação ou deslocamento) pode refletir diretamente nas margens de lucro que envolve o processo completo de venda, projeto e fabricação do mesmo.

Ao mesmo tempo, as concessionárias ou indústrias que dependem da disponibilidade destes equipamentos também incorrem em perdas econômicas severas, uma vez que o equipamento fora de operação reflete na produção das indústrias assim como reflete na multa que a concessionária paga por não ter o equipamento disponível para fornecimento de energia, visto que a mesma é avaliada como um serviço não disponível ao consumidor.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MUNDIM, P. D. (2008), *FRA - Aplicação em Diagnóstico Avançado de Transformadores de Potência e Reatores de Alta Tensão Trabalho de Conclusão de Curso* – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- (2) MENDES, J. C., 1995, *Redução de Falhas em Grandes Transformadores de Alta Tensão*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- (3) MARTINS, H. J. A., *Diagnóstico de Transformadores de Potência Através de Metodologias no Domínio da Freqüência*. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- (4) KULKARNI, S. V., Khaparde, S.A., *Transformer Engineering: Design and Practice* - CRC Press.
- (5) MALIK, N. H., AL-ARAINY, A.A., QURESH, M.I., *Electrical Insulation in Power Systems* - Marcel Dekker, Inc.

(6) IEEE PC57.149/D4, 2007, Draft Trial-Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers, October.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Poliana Duarte Mundim

Nascida em Belo Horizonte, MG.

Graduada (2008) em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação na Escola de Engenharia São Carlos da Universidade de São Paulo.

Empresa: ABB – Asea Brown Boveri.

Atua na divisão de Transformadores - Engenharia de Desenvolvimento.

José Carlos Mendes

Nascido em Ibirarema-SP.

Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1995), com Tese em área de resposta transitória de enrolamentos de transformadores, incluindo ressonâncias e transitórios rápidos.

Membro IEEE e CIGRÉ. Têm artigos técnicos publicados no Brasil e exterior. Têm mais 25 anos de experiência em projeto elétrico, projeto mecânico, desenvolvimento, monitoração em tempo-real, diagnósticos, análise de estado, análise transformador/reator-sistema e análises de falhas de transformadores de potência e reatores em alta tensão.

Empresa: ABB – Asea Brown Boveri.

Atua na divisão de Transformadores – Gerente de Engenharia e Desenvolvimento.

Eduardo Nobuhiro Asada

Nascido em Registro – SP.

Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2004).

Vice-coordenador da Área de Sistemas de Potência da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e Editor

Associado da Revista Controle e Automação da SBA.

Instituição: Escola de Engenharia São Carlos da Universidade de São Paulo

Professor doutor (MS3) no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia São Carlos – USP.