



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

Medição Indireta de Sobretensões Transitórias em Transformadores de Corrente Tipo Top Core Através da Corrente que Flui para a Terra

DICKSON SILVA DE SOUZA(1); RÔMULO DOS SANTOS DELGADO(2); HELVIO JAILSON AZEVEDO MARTINS(3); ROBERTO CAMPOS DE MENEZES(3); GABRIELA SAMPAIO REMA(4); CEPEL(1); CEPEL(2); Consultor(3); UNIFEI(4);

RESUMO

Transitórios de alta tensão e alta corrente são fenômenos que ocorrem comumente em sistemas de alta tensão, porém ainda não existe uma maneira simples de realizar a medição destes diretamente no sistema. Este trabalho busca apresentar uma alternativa para se realizar medições de transitórios em equipamentos de alta tensão, especificamente o transformador de corrente, de forma mais simples. Esta alternativa consiste em um método de medição inovador, onde se utiliza o valor da corrente que flui para a terra em conjunto com a caracterização do objeto no domínio da frequência para se obter o valor da sobretensão transitória.

PALAVRAS-CHAVE

Sobretensões, transitórios, modelagem, transformador de corrente, medição.

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante a operação normal e ao longo de toda a vida útil, equipamentos de potência instalados em Subestações (SEs) de alta tensão estão sujeitos a sobretensões transitórias. Estas sobretensões podem ter origens diversas, como por exemplo manobras do sistema de potência próximas ao equipamento e até descargas atmosféricas que ocorram em linhas de transmissão conectadas à SE.

Entre estes equipamentos, devido à topologia utilizada comumente em SEs de valores mais elevados de tensão, o modelo disjuntor e meio, os Transformadores de Corrente de Alta Tensão (TC) são instalados entre duas fontes de origem destes fenômenos de alta frequência (disjuntor e chave seccionadora), e assim estão sujeitos a sobretensões mais elevadas durante as operações.

Ainda, ao se tratar de fenômenos de alta tensão e alta frequência – transitórios eletromagnéticos – alguns desafios são impostos, podendo-se destacar dois principais: a medição destes eventos em SEs e o modo como estes transitórios agem no isolamento sólido de equipamentos de potência. O primeiro se dá pela dificuldade encontrada para utilizar grandes divisores de tensão (medição convencional de laboratório) em campo, onde se fazem necessárias grandes preparações de logística para transporte e montagem, possíveis desligamentos para permitir a conexão com o circuito de alta tensão e ainda o alto custo na aquisição de divisores capazes de medir os eventos de alta frequência, desta forma utiliza-se de resultados obtidos por simulação para auxiliar desenvolvimentos onde se faz necessário maior precisão nas amplitudes destas perturbações transitórias. Já o segundo desafio mencionado, embora estes eventos transitórios sejam citados como agressores do sistema de isolamento, ainda não se tem um modo de correlacioná-los a danos ao isolamento interno de equipamentos que utilizem de sistema de papel-óleo.

Neste trabalho é apresentada uma alternativa para a medição de sobretensões transitórias em TCs, buscando uma maneira mais simples que possa ser utilizada sem a necessidade de grandes preparações e desligamentos no sistema, quando comparado ao modo convencional. Este método é realizado através da medição da corrente transitória que flui para a terra e conhecendo o comportamento da impedância terminal do TC no domínio da frequência para então ser possível calcular a sobretensão nos terminais de alta tensão.

2.0 - CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Na utilização do corpo isolante do transformador de corrente como transdutor para medição de sobretensões transitórias, é necessária a caracterização e síntese de um modelo que se comporte de acordo com o objeto para toda faixa de frequências de interesse. No caso da aplicação do modelo para medição de sobretensões transitórias em transformadores de corrente tipo *top core*, um modelo válido para até 3 MHz poderá atender razoavelmente a esta necessidade dada as máximas frequências obtidas em recentes medições de sobretensões transitórias em subestações aéreas (1). No caso específico do transformador de corrente, o seu corpo condensivo é o meio de condução da corrente resultante da diferença de potencial entre o primário e a sua base, que normalmente está aterrada. Assim, a medição de impedância serve de dado para se obter o modelo de um sistema linear e invariante no tempo que tenha como sinal de entrada a corrente que flui para o ponto de terra. Por conseguinte, a obtenção deste modelo permite obter, por meio de técnicas no domínio da frequência ou no domínio do tempo, a medição indireta da sobretensão transitória aplicada no primário do transformador de corrente como será visto no tópico seguinte. Para tanto é preciso utilizar o método apropriado para obtenção da impedância que irá gerar a síntese do modelo.

2.1 Medição da impedância do corpo condensivo pelo método de varredura em frequência.

A princípio, o método de medição da impedância terminal (do primário para o ponto de terra do equipamento) pela técnica de varredura em frequência parece estabelecer apropriadamente esta característica do objeto para toda a faixa de frequência. Entretanto, em (2) e em (3) é notória a necessidade de compensar o efeito do cabo coaxial para se obter um modelo que minimize o efeito do observador e que assim reflita com maior fidelidade o comportamento do objeto para uma larga banda de frequência. Ainda, ambas referências apresentam o uso do modelo do cabo para altas frequências como base do método para que sua influência seja retirada da curva de impedância/ admitância. Apesar dos métodos de compensação do cabo coaxial apresentarem relativa eficácia na tarefa, em (4) Reykherdt e Davidov relatam a alta susceptibilidade do método SFRA em relação ao tipo de cordoalha de aterramento utilizada, onde a impedância desta pode influenciar significativamente no resultado da curva de SFRA sobretudo em altas frequências. De fato, para que o modelo de linhas longas funcione apropriadamente nas técnicas de compensação, ambas extremidades do cabo coaxial precisam ser solidamente aterradas conforme ainda relatado em (3) e (4). Assim, a impedância das cordoalhas de aterramento inserem um elemento não previsto e, a princípio não mensurável, no modelo do cabo conforme mostra a Figura 1 e a Figura 2. Na Figura 3 é possível notar o arranjo da medição de impedância pela varredura de frequências com o destaque da cordoalha de aterramento. Já na Figura 4 nota-se, pela comparação entre medições realizadas com duas cordoalhas diferentes, o quanto que a impedância inserida por estas pode influenciar no resultado da medição.

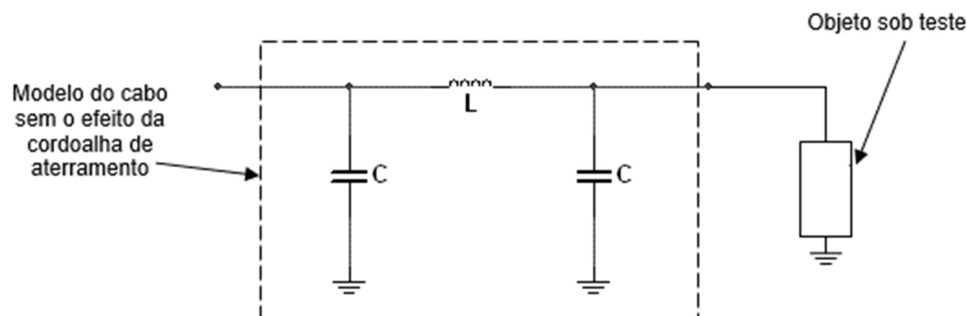


Figura 1 – modelo pi do cabo coaxial com ambas extremidades solidamente aterradas.

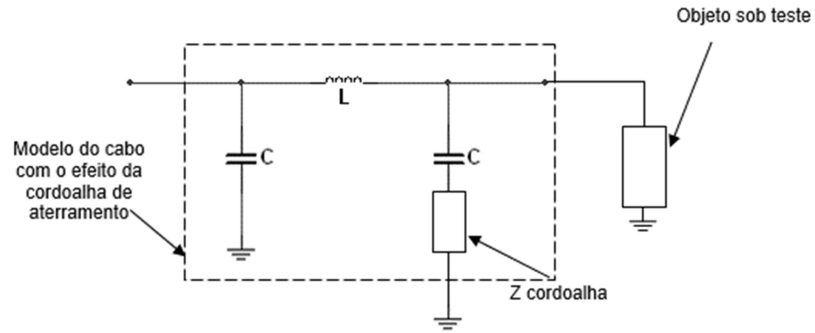


Figura 2 – modelo pi do cabo coaxial com a presença da impedância da cordoalha de aterramento.

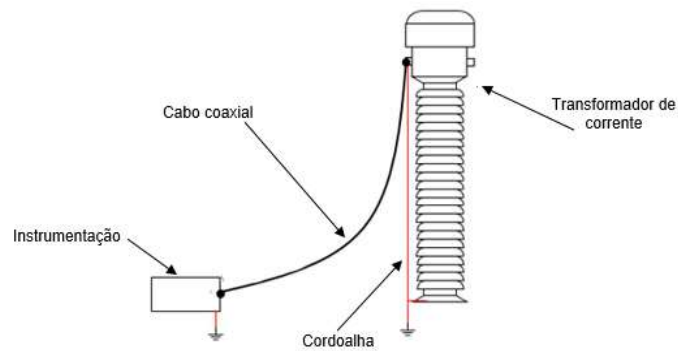


Figura 3 – arranjo da medição de impedância por varredura de frequência.

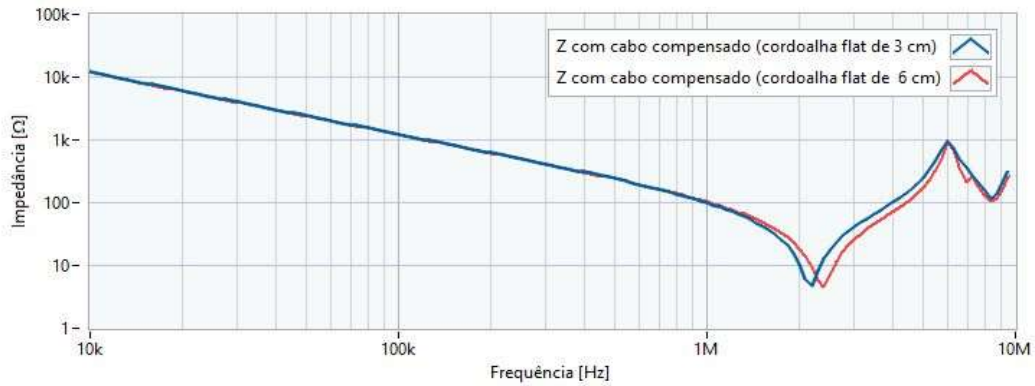


Figura 4 – Impedância medida pelo método de varredura de frequência com duas cordoalhas distintas e compensação do cabo coaxial.

2.2 Medição da impedância do corpo condensivo pelo método impulsivo.

Com vista de minimizar o efeito do observador e assim obter um modelo mais realista do corpo condensivo do transformador de corrente, definiu-se utilizar a medição de impedância pelo método impulsivo como alternativa ao método por varredura em frequência. Utilizando o arranjo representado na Figura 5 e aplicando um impulso cortado próximo à crista para se obter componentes de mais altas frequências (Figura 6). Da tensão e da corrente obtida no ensaio, dada as devidas transformações para o domínio da frequência e se valendo da equação 01, obteve-se a curva representada pela Figura 7 com a primeira frequência de ressonância em 2.5 MHz enquanto que a curva de

impedância por varredura e com cordoalha de 6 cm de largura apresentou a primeira ressonância em 2.3 MHz. Apesar de apresentarem curvas de impedância relativamente próximas, o método impulsivo apresentou menor susceptibilidade quanto ao arranjo de medição, pois diversas posições para o divisor e o gap foram testadas apresentando curvas quase que superpostas em todas as configurações utilizadas. Além disso, o método impulsivo apresenta uma configuração mais próxima das condições de operação do objeto no que tange a localização do ponto de terra. Da apresentada na Figura 7 sintetizou-se o modelo para o corpo condutivo do transformador de corrente conforme apresentado na Figura 8.

$$Z(f) = V(f)/I(f)$$

(1)

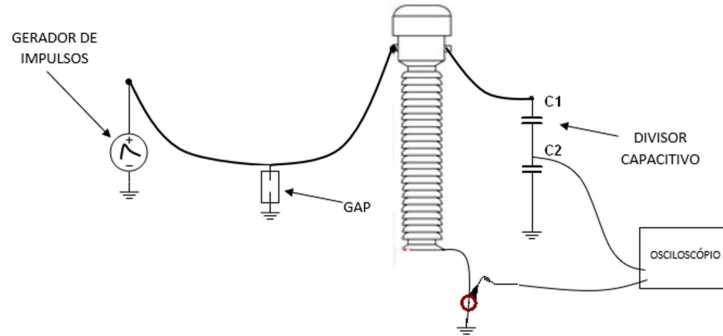


Figura 5 – arranjo da medição de impedância pelo método impulsivo.

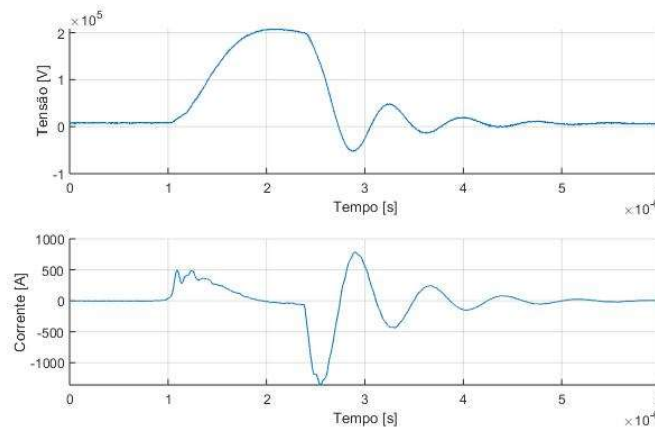


Figura 6 – impulso cortado aplicado no primário de um transformador de corrente de 550 kV e sua resultante corrente para a terra.

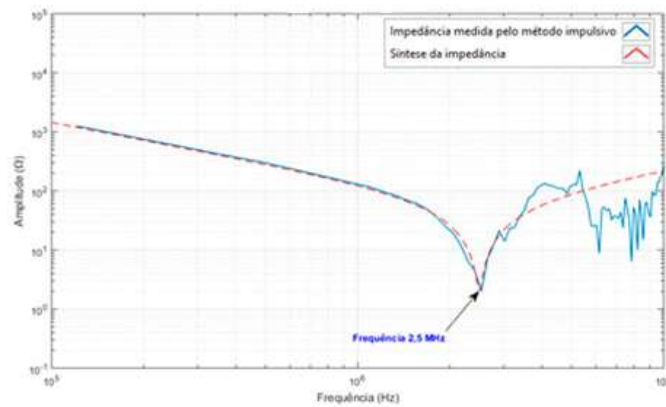


Figura 7 – impedância medida pelo método impulsivo.

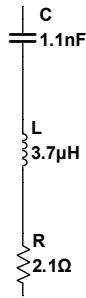


Figura 8 – modelo do corpo condensivo do transformador de corrente sob teste.

3.0 - MEDIÇÃO INDIRETA DE SOBRETENSÃO TRANSITÓRIA A PARTIR DA CORRENTE DE TERRA

O modelo apresentado na Figura 8 torna-se providencial para o desenvolvimento do método de medição indireta proposto neste informe. Através do modelo, pode-se relacionar a tensão no primário com a corrente que flui para o ponto de terra através de uma única equação integro diferencial (equação 2). O caráter providencial está no fato de que todos os termos do lado direito da equação estão em função de $i(t)$ que, neste caso, é a corrente medida para a terra. Na Figura 9 é apresentado o resultado do método para cálculo de um impulso cortado antes da crista enquanto que a Figura 10 apresenta o resultado para um impulso cortado após a crista. Como método alternativo, é apresentado na Figura 11 e na Figura 12 os resultados para as mesmas sobretensões transitórias apresentadas na Figura 9 e na Figura 10 sendo que através da transformada numérica de Laplace, onde nota-se que o método no domínio da frequência atende a contento a mesma tarefa executada pela equação 2.

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + L \frac{di}{dt} + Ri(t) \quad (2)$$

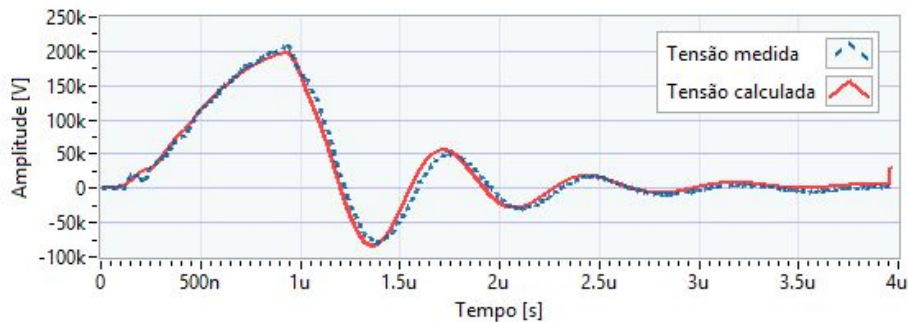


Figura 9 – Tensão medida vs. tensão calculada de impulso cortado antes da crista.

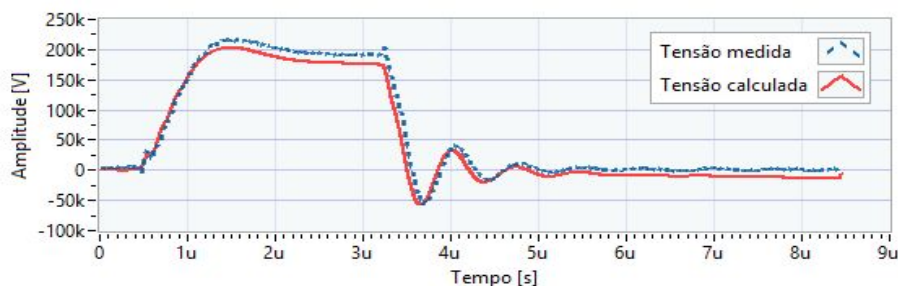


Figura 10 – Tensão calculada vs. tensão medida após a crista.

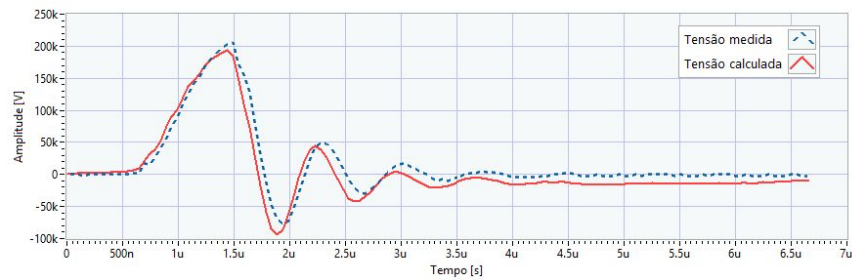


Figura 11 – Tensão calculada vs. tensão medida antes da crista pela transformada numérica de Laplace.

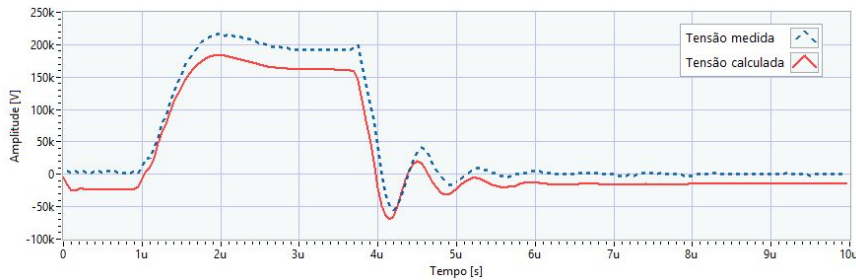


Figura 12 – Tensão calculada vs. tensão medida após a crista pela transformada numérica de Laplace.

4.0 - CONCLUSÃO

O campo de medições de transitórios em sistemas de alta tensão ainda necessita de investigações mais incisivas a fim de compreender ainda mais estes fenômenos e o modo de interação entre os equipamentos de potência. Neste trabalho foi apresentado um método inovador de medição que visa auxiliar futuras investigações nesta área, proporcionando maior simplicidade durante a preparação e assim reduzindo o tempo necessário para se realizar as medições.

Ainda se mostra a necessidade de realizar a modelagem do equipamento de forma bastante criteriosa, sendo buscada uma representação similar ao modo como este equipamento é instalado no campo. Para isso foi mostrado que a compensação de qualquer influência inserida pelo arranjo de medição é impactante e deve ser analisada durante o pós processamento dos dados.

Também foi mostrado um método alternativo usado para a modelagem do equipamento, utilizando um gerador de impulso e caracterizando a resposta do objeto frente a impulsos de alta tensão onde, também é buscada uma representação mais próxima as condições reais de campo.

Os resultados obtidos durante as medições no TC em laboratório foram excelentes, sendo possível a reconstituição da forma de onda de tensão aplicada através da medição da corrente com bastante precisão, respeitando seus principais parâmetros, tais como tempo de subida e amplitude, por exemplo. Entretanto ressalta-se que ainda são necessários estudos para adequação do método para medições em campo como utilização de técnicas de processamento de sinais apropriadas, sensoriamento, cuidados quanto ao aterramento do transformador de corrente e ainda a utilização de um método de medição alternativo para validação por comparação.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Souza, D. S., Martins, H. A., Delgado, R. S., Menezes, R., C., Medição de transitórios de tensão em transformadores de corrente gerado por manobras de seccionadores, Relatório técnico CEPEL DLE-23.998/17, Rio de Janeiro, 2017
- (2) Gustavsen, B., Eliminating Measurement Cable Effects from Transformer Admittance Measurements, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, nº 4, agosto 2016.
- (3) Souza, D. S., Santos, L. E. D., Compensação do efeito dos cabos coaxiais nas medições de admitância em equipamentos elétricos, Relatório técnico CEPEL DLE-9550/ 18, Rio de Janeiro, 2018.

(4) Reykherdt, A. A., Davydov, V. G., Effects of Test Cable Ground Extensions on Repetability of Frequency Response Analysis Measurements on Power Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine Featured Article, IEEE, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS



Dickson Silva de Souza, formado em engenharia elétrica em 2009 pela Universidade Gama Filho, trabalhou por seis anos como engenheiro no setor de geração distribuída e usinas termoeletricas. Trabalha desde 2015 como pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica onde atua na área de diagnósticos de equipamentos elétricos desenvolvendo principalmente técnicas para medição de resposta em frequência online e medição de transitórios eletromagnéticos.



Rômulo dos Santos Delgado – Nascido em 13 de junho de 1988, em Volta Redonda – RJ. Graduado em Engenharia Elétrica em 2011 pelo Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. Obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica em 2018 pela UFRJ. Atuou no setor de manutenção industrial. Trabalha como Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2013, na área de diagnóstico de equipamentos elétricos, principalmente na aplicação das técnicas desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa em medições em Subestações.



Helvio Jailson Azevedo Martins - Nascido em Nova Friburgo - RJ, em 1955. Graduado em Engenharia Elétrica (sistemas de potência) pela UFRJ, 1979, onde também obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica (Alta Tensão), 1987; e Doutorado em Engenharia Elétrica em 2007, desenvolvendo tese sobre monitoramento de deslocamentos geométricos de enrolamentos de transformadores de potência utilizando a resposta em frequência associada a algoritmos de inteligência artificial. Sua experiência profissional inclui a ex-PTEL-Projetos e Estudos de Engenharia, onde participou de estudos de planejamento da interligação do sistema elétrico brasileiro e projetos de subestações. No CEPEL desde 1985, atuava no desenvolvimento de técnicas de ensaios aplicados na avaliação de equipamentos elétricos de alta tensão, desenvolveu pesquisas relacionadas a métodos e técnicas para monitoramento, avaliação e diagnóstico de equipamentos elétricos. É autor de mais de 100 trabalhos, nacionais e internacionais, participando ativamente de alguns grupos de trabalho do Cigré. Desde 2018, atua como consultor independente, principalmente, na avaliação dos efeitos nos dielétricos de transformadores de potência e TIs, devido a manobras de seccionadores em AIS e GIS. É coordenador do Comitê de Estudos do Cigre CE A3 – Equipamentos de Alta Tensão e do WG A3.42 – Failure analysis of recent AIS instrument transformer incidents.



Gabriela Sampaio Rêma – Nascida em Volta Redonda - RJ (1992). Graduada em Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica (2015) pela Faculdade de Engenharia de Resende – FER/AEDB, bolsista pelo ProUni. Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2018), bolsista pelo CNPq e pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Doutoranda do Programa de Engenharia Elétrica da UNIFEI, bolsista de pesquisa no CEPEL e professora substituta na área de Eletrônica no Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação – IESTI – na UNIFEI. Estuda as áreas de simulação e modelagem de equipamentos elétricos, resposta em frequência, transitórios eletromagnéticos e processamento de sinais voltados ao diagnóstico de falhas em equipamentos de alta tensão.

Roberto Campos de Menezes – Nascido no Rio de Janeiro – RJ, em 07 de junho de 1962. Técnico em Eletrotécnica em 1982 e em Telecomunicações 1986 pelo Cefet-RJ “CSF”, no Rio de Janeiro. Sua experiência profissional no Cepel inclui os laboratórios de Média Potência, Medições de Campo Elétrico e Magnético de Linhas e Subestações, e desde 1998, no Departamento de Linhas e Estações – DLE como técnico dando apoio ao desenvolvimento de pesquisas em laboratório e no campo. Suas áreas de interesse especial incluem a Técnica de Emissão Acústica, Descargas Parciais pelo Método Eletromagnético e Transitórios em Equipamentos de Alta

Tensão.