



**Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM**

**Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais para Mitigação de Ruídos nas Medições de Resposta em Frequência em Subestações Energizadas.**

**DICKSON SILVA DE SOUZA(1); ITALO FORADINI DA NOVA(1); LUIZ EDUARDO DIAS SANTOS(1);  
CEPEL(1);**

**RESUMO**

A medição de resposta em frequência em equipamentos elétricos, quando efetuada em subestações, apresenta alguns desafios como a presença de ruídos na medição, o que pode dificultar a aplicabilidade desta técnica. Com o intuito de se estudar uma solução para resolver esse tipo de problema este informe apresenta o uso de técnicas de processamento de sinais para mitigar os ruídos oriundos de fontes típicas de subestações energizadas como a componente fundamental da rede, componentes harmônicas e efeito corona. Para tanto as técnicas aqui apresentadas foram implementadas e testadas em laboratório e então apresentado os resultados para condições de alto ruído.

**PALAVRAS-CHAVE**

Resposta em frequência, processamento de sinais, ruídos, mitigar, modelagem.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A medição de resposta em frequência pela técnica de varredura (SFRA – Sweep Frequency Response Analysis) é uma técnica de medição utilizada em equipamentos elétricos, em especial em transformadores de potência, com aplicabilidade para modelagem, por exemplo, tipo caixa preta e para identificação e análise de defeitos causados por deslocamentos geométricos no interior destes. Principalmente nesta segunda aplicação, a medição por vezes precisa ser efetuada em campo, em subestações energizadas onde alguns sinais típicos deste tipo de ambiente (como a irradiação oriunda da componente fundamental da rede, das componentes harmônicas e do efeito corona) podem ser inseridos na medição causando ruídos nos resultados e por conseguinte dificultando ou até mesmo inviabilizando a aplicabilidade da técnica. Quando a resposta em frequência é utilizada para modelagem tipo caixa preta, algumas técnicas de síntese que operam com algoritmos para sintetizar um modelo que se comporte de acordo com a curva da resposta em frequência não utilizam qualquer tipo de análise crítica ou meio para distinção do que é medição e do que é ruído. Assim, o ruído em si pode comprometer a síntese criando um modelo que não reflita fielmente o comportamento do objeto sob teste para toda faixa de frequência que se deseja. Já no caso da aplicação para análise de defeitos, a ocorrência de ruídos em algumas regiões de frequência pode dificultar a identificação de alguns modos de falha sobretudo se a região sensibilizada por este defeito estiver na mesma faixa de frequência dos ruídos. Dados os implicadores apresentados, a mitigação dos ruídos durante a medição de resposta em frequência ou na medição de impedância ou admitância faz-se cada vez mais necessária. Para tanto é objeto do estudo aqui discorrido a utilização de algumas técnicas de processamento digital e analógico de sinais para mitigação destes ruídos.

## 2.0 - MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PELO MÉTODO CONVENCIONAL

Na medição de resposta em frequência em varredura através de instrumentos de laboratório, normalmente é utilizado um gerador de funções e um osciloscópio para realizar o ensaio. Através da automatização dos instrumentos é possível efetuar rapidamente a medição de resposta em frequência para diversos pontos por toda a faixa de frequência que se deseje medir. Usualmente os osciloscópios utilizam técnicas baseadas no domínio do tempo para medir grandezas como amplitude, frequência e fase, entretanto estas técnicas podem ter sua precisão drasticamente prejudicada pela presença de ruídos de medição. Este problema é ainda mais evidente quando a relação sinal/ ruído é baixa como no caso de medições de impedância e admitância onde a corrente a se medir pode ser da ordem de unidades de miliampères ou menos quando na região de máxima ressonância. Alguns instrumentos comerciais desenvolvidos especificamente para medição de resposta em frequência também utilizam as mesmas técnicas para obter estas grandezas. Ainda estes, por vezes utilizam técnicas de medição indireta (método I-V, ponte auto balanceada, etc.) para medir a impedância e/ ou admitância do objeto sob teste o que, para fins de modelagem pode inviabilizar ou pelo menos dificultar o uso dos resultados da medição para se levantar o modelo do objeto se torna necessária a utilização de técnicas matemáticas de processamento dos sinais (1). De fato, no caso da medição de impedância ou admitância, a escolha destas técnicas também se dá pela dificuldade de se utilizar sensores de corrente para medir correntes baixas em campo dada a conseqüente baixa relação sinal/ruído.

## 3.0 - TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADAS NA MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.

Para utilização de técnicas de processamento de sinais na medição de resposta em frequência um dos cuidados a ser tomado se deve ao fato de que qualquer técnica de processamento aplicada não deve, em princípio, modificar a curva da resposta em relação à obtida sem o uso dela. Caso isso aconteça, o efeito deve ser conhecido e levado em conta em qualquer tipo de análise e, se possível, a curva deve ser corrigida de forma a mitigar esse efeito. Assim, os próximos subtópicos apresentam separadamente algumas técnicas de processamento de sinais empregadas para mitigar ruídos, bem como a comparação com uma medição de referência, tomada então pelas técnicas clássicas para medição das grandezas necessárias para obtenção das curvas, através do domínio do tempo. Para tanto foi utilizado como objeto sob teste um equipamento que fosse possível transportar para um ambiente com ruídos relativamente controlados, sendo este objeto um transformador de distribuição trifásico de 45 kVA, 220/ 480V, ligação estrela aterrada/ delta. Em laboratório, o objeto foi posicionado abaixo de um condutor conectado à uma fonte variável de 0 a 200 kV para simular condições similares às encontradas em subestações de alta tensão no que tange à presença de ruídos típicos deste tipo de ambiente. A resposta em frequência foi medida aplicando-se os sinais no terminal X1 e medindo-se a resposta no terminal H1.

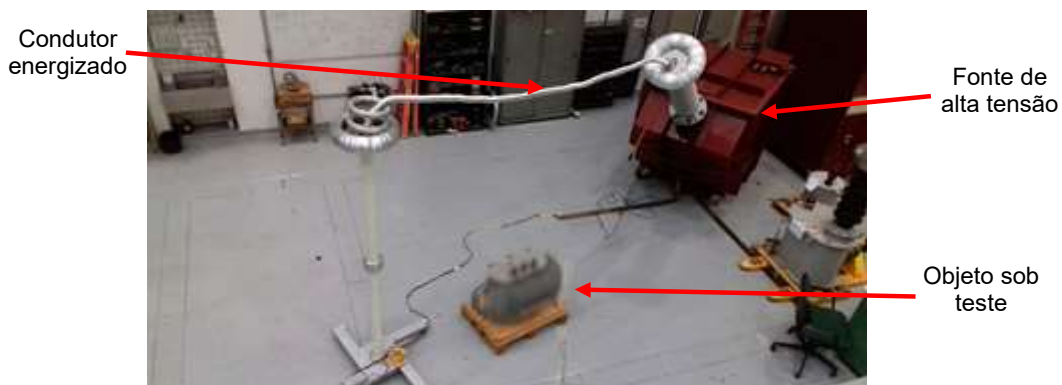


Figura 1 – Objeto posicionado abaixo do condutor conectado à fonte AC.

### 3.1 Resposta em frequência obtida com o uso de filtro notch.

Para efeitos de comparação dos resultados, todas as medições se valendo do uso de técnicas de processamento de sinais foram tomadas com a fonte energizada em 70 kV fase-terra. Dado o alto nível de ruído irradiado em tais condições, fez-se necessário o uso de um filtro notch sintonizado em 60 Hz para mitigar o alto nível de sinal irradiado nesta frequência e então, a partir deste ponto tal técnica seria usada em associação com as demais técnicas apresentadas já que o objetivo do estudo era apresentar um ambiente com o máximo possível de ruídos. O uso do filtro notch, como esperado satisfaz a tarefa de minimizar o efeito da componente fundamental da rede. Entretanto introduziu outros efeitos alterando a resposta obtida, principalmente em baixas frequências quando em comparação com a resposta de referência, conforme visto na Figura 2. Ainda na Figura 2 observa-se a relativa eficácia do uso de um amplificador de ganho unitário para descascar a impedância do filtro notch com o restante do circuito de medição e, por consequência, mitigar o seu efeito na alteração da curva. Ressalta-se que, à época da pesquisa, tanto o filtro notch quanto o amplificador de ganho unitário não foram desenvolvidos especificamente para esta aplicação, sendo que, projetando-se um amplificador de ganho unitário com alta impedância de entrada e amplificador operacional que responda a uma banda de frequência maior, a técnica deverá apresentar melhor desempenho, sobretudo para o limite superior da banda de frequência estudada.

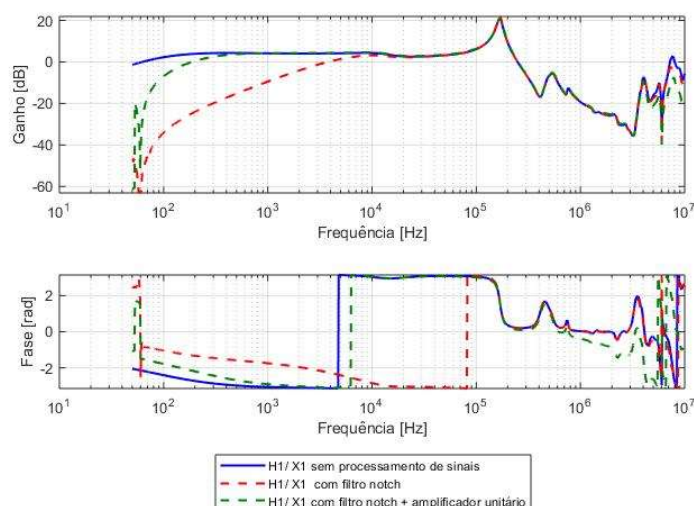


Figura 2 – efeito causado pelo filtro notch na medição de resposta em frequência.

### 3.2 Resposta em frequência obtida através da média de amostras.

Já com a fonte energizada em 70 kV fase-terra e utilizando o filtro notch para mitigar o ruído oriundo da componente fundamental da rede, foi utilizada então a média de múltiplas formas de onda por ponto como primeira técnica digital para mitigar os ruídos de medição. A Figura 3 apresenta o resultado desta técnica em comparação com a curva obtida nas mesmas condições, mas com somente uma amostra por ponto de medição. Como esperado, o uso da média é relativamente eficaz, por natureza, para mitigar ruídos randômicos já que a média destes tende naturalmente para zero. Logo, o gráfico mostra uma relativa, mas limitada melhora na tarefa de mitigar os ruídos gerados pelo arranjo do ensaio já que a maioria dos ruídos não era de natureza aleatória.

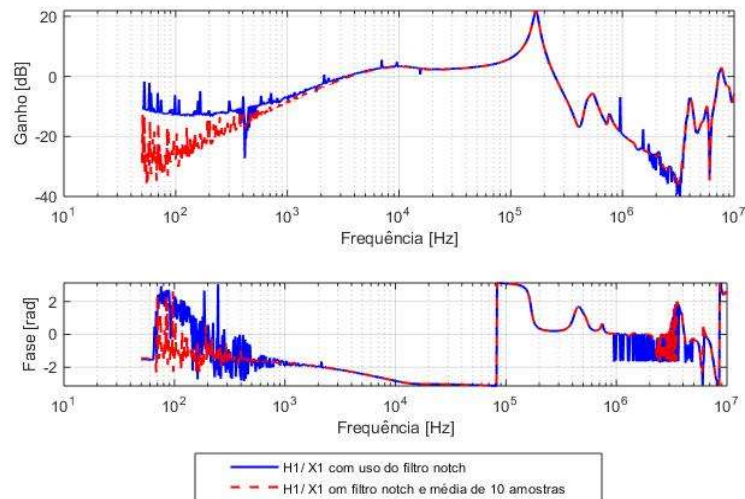


Figura 3 – uso da média de múltiplas amostras para mitigar os ruídos causados pela energização da fonte de alta tensão.

### 3.3 Resposta em frequência obtida com o uso de filtro digital.

Afim de utilizar uma técnica de processamento mais seletiva foi implementado no próprio software de resposta em frequência um filtro digital de banda passante que, a cada ponto medido pudesse ter sua frequência central ajustada programaticamente de modo que esta ficasse sempre sintonizada com a frequência do sinal aplicado. A Figura 4 apresenta o resultado da utilização do filtro digital. Como era esperado há uma melhora relativa, mas não significativa, na tarefa de mitigar os ruídos já que quando a banda passante do filtro coincide com a frequência de um determinado ruído, este torna-se ineficaz em filtrá-lo. Já a Figura 5, onde a técnica de uso do filtro digital foi associada com a técnica da média de formas de onda, apresenta uma melhora significativa em relação aos resultados apresentados na Figura 4 principalmente para os ruídos acima de 900kHz.

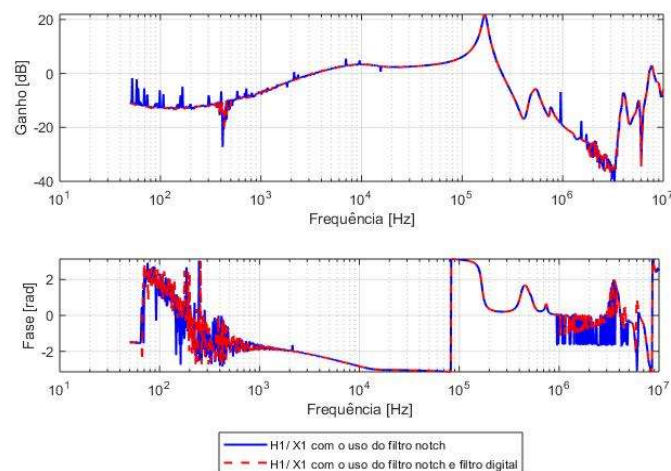


Figura 4 – resposta em frequência com aplicação de filtro digital na mitigação de ruídos.

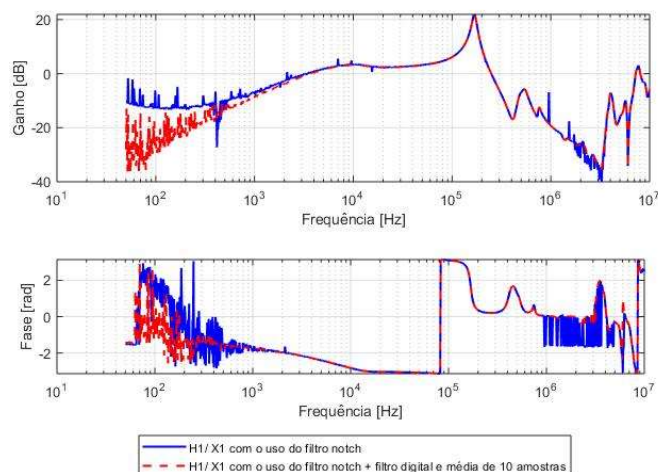


Figura 5 – associação das técnicas de média de múltiplas amostras por ponto e filtro digital.

### 3.4 Resposta em frequência obtida através de técnicas no domínio da frequência.

A técnica apresentada neste tópico consiste na premissa de que é mais simples distinguir a componente de um sinal senoidal e separá-la das componentes dos ruídos quando este sinal é transformado para o domínio da frequência. Assim, com a taxa de amostragem apropriada e transformação de domínio do sinal esta técnica serve, por aplicabilidade, como um filtro passa-faixa altamente seletivo. Na Figura 6 é apresentada a resposta em frequência utilizando esta técnica em comparação com a resposta obtida com as grandezas tomadas no domínio do tempo. Em baixas frequências nota-se que a técnica mitiga significativamente a influência das componentes harmônicas irradiadas no objeto sob teste enquanto que, nas altas frequências, os ruídos são mitigados quase que por completo. Na Figura 7 vemos a melhor resposta obtida durante o estudo com a associação de todas as técnicas aqui apresentadas.

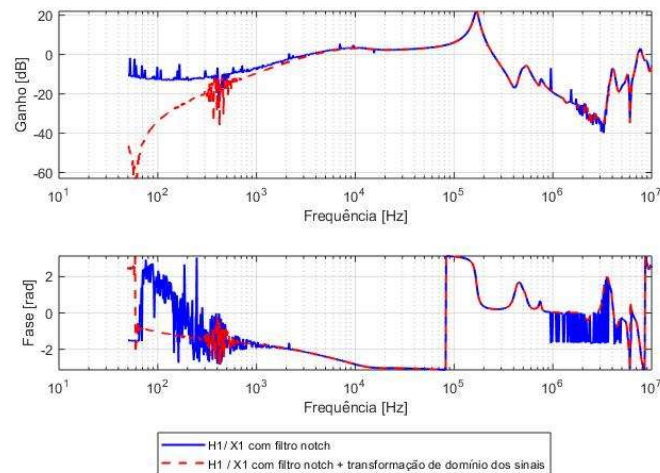


Figura 6 – resposta em frequência com grandezas calculadas a partir do domínio da frequência.

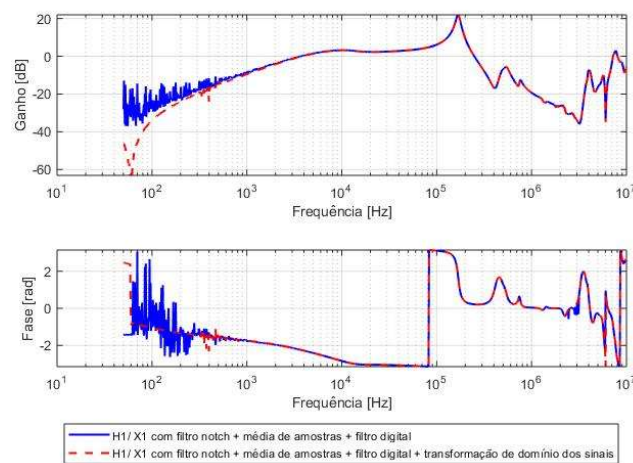


Figura 7 – associação de todas as técnicas de processamento utilizadas no estudo.

#### 4.0 - EFICIÊNCIA DAS TÉCNICAS APRESENTADAS EM COMPARAÇÃO COM INSTRUMENTO COMERCIAL DE SFRA.

Como último ensaio em laboratório para este estudo, após o resultado obtido com o ensaio apresentado na Figura 7, optou-se por fazer um teste de desempenho por comparação com um instrumento comercial desenvolvido especificamente para medição de SFRA. No primeiro teste, o instrumento referido aqui como “instrumento A” foi utilizado para medir a resposta em frequência do objeto com a fonte AC desligada para que fosse feita a comparação dos métodos de ambos os sistemas sem a presença de ruído significativo conforme a Figura 8, onde é possível notar o efeito causado pelo filtro notch em baixas frequências, sobretudo pelo fato de que o amplificador de ganho unitário não foi inserido no circuito de medição. Em um segundo momento então os sistemas foram testados nas mesmas condições apresentadas nos itens anteriores. Na ocasião o instrumento A

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

apresentou dificuldades para executar a medição sendo necessário que a tensão da fonte fosse diminuída para 40kV fase-terra para que então a medição pudesse ser efetuada. A Figura 9 apresenta o resultado da resposta em frequência do objeto sendo medida pelo instrumento A com a fonte de alta tensão energizada em 40 kV em comparação com o método aqui desenvolvido, mas com a medição efetuada com a fonte energizada em 70 kV. Fica evidente através deste gráfico que, ao passo que o instrumento A foi sensibilizado pelo ruído em toda a faixa de frequência da medição, o sistema implementado com técnicas de processamento de sinais se manteve praticamente imune a estes.

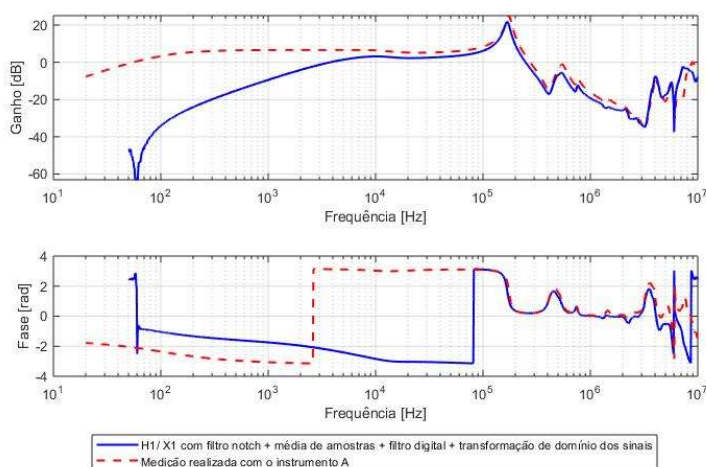


Figura 8 – comparação da resposta obtida pelo instrumento A e o sistema desenvolvido pelo CEPEL.

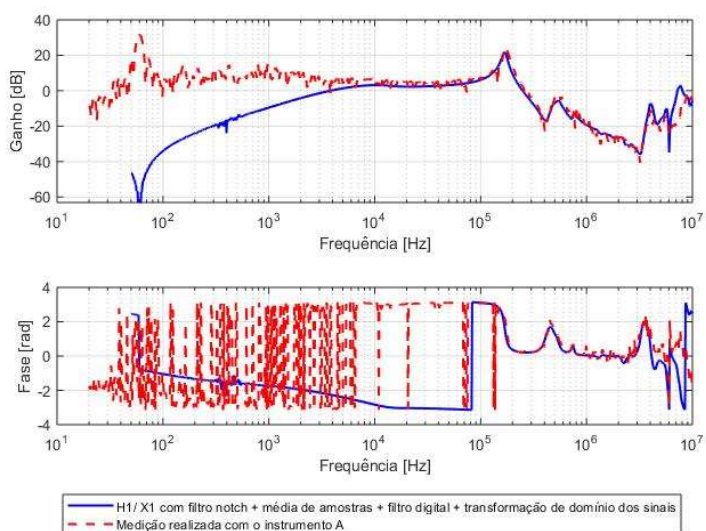


Figura 9 - comparação da resposta obtida pelo instrumento A e o sistema desenvolvido pelo CEPEL sob forte presença de ruídos.

## 5.0 - CONCLUSÃO.

Neste informe foi apresentada a utilização de técnicas de processamento de sinais como ferramenta para melhorar a qualidade dos resultados de resposta em frequência em equipamentos elétricos quando na presença de ruídos significativos, onde foi possível notar a eficiência da utilização destas técnicas para condições mais adversas do que a normalmente encontrada em subestações energizadas. Os ganhos obtidos com este estudo podem abranger diversos campos de aplicação da resposta em frequência. No campo da modelagem caixa preta, a presença de ruídos nas curvas de resposta em frequência pode introduzir comportamentos indesejados nos modelos. No campo da análise de deslocamentos geométricos no interior de transformadores de potência, a mitigação do ruído pode evitar que haja dificuldade na análise das curvas de resposta em frequência. Outro campo promissor para o uso das técnicas aqui apresentadas é o monitoramento online de resposta em frequência. Em (2) é apresentada a necessidade de se mitigar os ruídos de baixa frequência para efetuar a medição de resposta em frequência com o equipamento energizado, entretanto os autores mostram que o uso de filtros passa-altas limita a banda de frequência aplicável do método o que pode diminuir significativamente a efetividade da medição online para detecção de alguns modos de falha. Neste caso o uso do filtro "notch" se mostra promissor dada a possibilidade de alcançar com mais facilidade uma maior seletividade quando em comparação com os filtros passa-alta passivos e merece atenção para estudos futuros.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Holdyk, A., Gustavsen, B., Wideband Modeling of Power Transformers Using Commercial sFRA Equipment, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, nº3, June 2014;
- (2) Behjat, V., Vahedi, A., Setayeshmehr, A., Borsi, H., Gockenbach, E., Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based Upon Oline FRA Using Capacitive and Inductive Couplings, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, nº 4, October 2011;
- (3) Souza, D., Santos, L. E. D., Mitigação de Ruídos nas Medições de Resposta em Frequência de Equipamentos Elétricos, Relatório CEPEL DLE-9334/18, Rio de Janeiro, 2018

#### 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 tecnologias para medição de resposta em frequência online e medição de transitórios eletromagnéticos.



Italo Foradini da Nova, formado em engenharia eletrônica em 1990 pela Sociedade Educacional Professor Nuno Lisboa, de 1985 até 2001, exerceu atividades de manutenção e calibração de instrumentação eletrônica de medição, calibração de equipamentos e sistemas de medição de laboratórios e ensaios especiais para aplicações específicas de laboratório e de campo. De 2002 até presente data, trabalha em laboratório que desenvolve técnicas de diagnóstico de equipamentos elétricos de alta tensão, principalmente desenvolvendo equipamentos e sistemas de condicionamento de sinais para esta finalidade. Em 2008 foi autor de uma patente. Em 2010 passou a exercer a função de engenheiro com o cargo de Profissional Pesquisador. Autor de trabalhos na área de diagnóstico e de inovação publicados no Brasil e no exterior.



Luiz Eduardo Dias Santos, formação técnica em 1980 em eletrotécnica. De outubro de 1982 até a presente data, exerce suas atividades no CEPEL, onde inicialmente participou na área de





**XXV SNPTEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

3572  
GTM/14

sistemas de potência ensaiando equipamentos elétricos de alta tensão para o setor elétrico nacional e internacional no período de 1982 até 1999. Atualmente, participa realizando pesquisas voltadas à avaliação e diagnóstico de estados operativos dos equipamentos elétricos de alta tensão, além de ser autor de trabalhos voltados para diagnóstico em equipamentos elétricos, contribuindo para o desenvolvimento de métodos e técnicas.