



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

BR/GSE/11  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - VIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE**

**AValiação DE PÁRA-RAIOS NO CAMPO ATRAVÉS DA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS E  
VALIDAÇÃO NO LABORATÓRIO**

H. P. Amorim Júnior\*, A. T. Carvalho, T. B. Rodrigues, J. A. P. Rodrigues,  
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

H. B. Oliveira e J. B. Dias,  
FURNAS Centrais Elétricas

*Resumo* - Furnas Centrais Elétricas tem em suas instalações mais de 3500 pára-raios, de várias classes de tensão (13,8 a 800 kV). Alguns destes equipamentos estão em operação há mais de 30 anos. A possibilidade de avaliar o estado operacional dos pára-raios instalados nas subestações é de fundamental importância, uma vez que a antecipação da retirada dos equipamentos com processo de degradação acentuado pode reduzir os riscos materiais, financeiros e de segurança, evitando assim desligamentos inoportunos e gastos financeiros decorrentes de falhas imprevistas.

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar, através de testes em laboratório e em campo, a possibilidade da detecção de descargas parciais (DP) em pára-raios instalados no campo, utilizando uma técnica não convencional, por meio de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (High Frequency Current Transformers – HFCT). No laboratório, onde o ambiente é totalmente controlado, pôde-se avaliar a sensibilidade dos TCs de Alta Frequência de diversos fabricantes e compará-los com a metodologia convencional para medição de descargas parciais, que possibilita a quantificação do nível de carga aparente (em pico-coulombs), conforme as normas IEC 60270.

O trabalho teve basicamente cinco etapas que são:

1. Estudos iniciais feitos em laboratório para verificar a viabilidade da técnica;
2. Ensaio em pára-raios de 138, 230, 345 e 550 kV em operação e instalados nas subestações de Furnas;
3. Retirada de amostras com suspeição e ensaios nos laboratórios do Cepel;
4. Abertura de algumas unidades e inspeção interna;
5. Aperfeiçoamento da técnica e incorporação da mesma na Manutenção de Furnas.

*Palavras-chave:* Descargas parciais, pára-raios, TC de alta frequência (HFCT).

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Os equipamentos instalados em uma subestação estão sujeitos a severas condições de solicitações dielétricas causadas por sobretensões provenientes de manobras no Sistema Elétrico de Potência (SEP) e/ou descargas atmosféricas. Para realizar a coordenação de isolamento e com o objetivo de impedir que estes transientes de tensão danifiquem os equipamentos elétricos, torna-se necessária a instalação de dispositivos adequados para limitar os níveis máximos de sobretensões. O equipamento mais adequado para executar esta função é o pára-raios. Eles atuam como limitadores do nível de tensão nos terminais dos equipamentos de uma subestação, evitando que sobretensões possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção, em níveis superiores aos que eles suportam.

Sendo assim, os pára-raios exercem papel de suma importância no SEP, pois contribuem de forma decisiva para sua operacionalidade, segurança, economia e confiabilidade. Por outro lado, estes equipamentos não apresentam, normalmente, dispositivos indicativos de sua condição operativa. Quase nada pode se concluir a respeito do seu

estado operacional após sua energização. Além disso, a avaliação dos pára-raios em serviço é também dificultada pelo grande número de unidades instaladas nas subestações.

A falha intempestiva de um pára-raios pode causar oscilações no sistema, danos aos equipamentos periféricos e também colocar em risco a integridade física das pessoas que, porventura, estejam trabalhando nas proximidades do pára-raios no instante da falha. Desta forma, uma atenção especial deve ser dada ao estado operativo dos pára-raios. O desenvolvimento desta técnica de detecção de DP utilizando HFCT, em conjunto com os ensaios já consolidados de termovisão darão maiores subsídios para que a Engenharia de Manutenção de Furnas possa gerenciar melhor a substituição dos pára-raios que tenham alguma indicação de falha operacional, aumentando assim a confiabilidade do SEP nacional.

## 2.0 - UTILIZAÇÃO DE HFCT PARA DETECTAR DESCARGAS PARCIAIS

Quando um TC de Alta Frequência é usado para medição de Descargas Parciais pode-se dispensar o uso da impedância de medição, também conhecido como *quadripólo*. Além disso, a utilização dos HFCT proporciona a isolamento galvânica entre o medidor de DP e o circuito de alta tensão, aumentando os níveis de segurança das pessoas e dos instrumentos utilizados no ensaio. Os HFCT utilizados neste ensaio são do tipo bipartido (*Clamp*). Isto permite que sua instalação, na maioria das vezes, seja realizada em condições normais de operação, através da sua conexão ao redor do condutor que conecta o pára-raios à malha de aterramento.

### **Etapa 1 - Estudos iniciais feitos em laboratório para verificar a viabilidade da técnica**

O objetivo principal nesta etapa da pesquisa foi avaliar os diferentes tipos de HFCT. Foram avaliadas as sensibilidades na detecção de sinais de descargas parciais, utilizando o condutor de aterramento do equipamento a ser ensaiado. No total foram avaliados 5 HFCT, mostrados na figura 1.



FIGURA 1 - HFCT avaliados.

A metodologia convencional para medição de descargas parciais, utilizando um capacitor de acoplamento e uma impedância de medição, foi utilizada como referência na avaliação da sensibilidade dos HFCT. O Cepel adotou os seguintes procedimentos para esta avaliação, sempre medindo pelos dois métodos, o convencional (eletromagnético) e o não convencional (HFCT):

- 1 – Aplicação de um sinal de calibração conhecido, registrando o mesmo através do HFCT conectado no cabo de aterramento do objeto sob ensaio. Os valores de amplitude e a base de tempo dos sinais devem ser observados e registrados.
- 2 – Aplicar valores crescentes de tensão no objeto sob ensaio, até o valor nominal, registrando os sinais de descargas parciais detectados pelos HFCT, através de um osciloscópio. Neste caso o objeto sob ensaio, deverá estar com sua carcaça aterrada e o HFCT deverá estar conectado no cabo de aterramento, conforme a figura 2.



FIGURA 2 - Circuito de ensaio para avaliar a sensibilidade dos HFCT

O HFCT nº 3 apresentou o melhor desempenho nas comparações com os resultados obtidos pelo método convencional para medição de DP, considerando todos os equipamentos testados. Ressalta-se que o mecanismo de medição pelo método tradicional, utilizando acoplador e impedância de medição, apresentou resultados superiores quando comparados com o método via HFCT. No entanto, não houve uma grande superioridade na comparação entre os dois métodos. Os resultados obtidos em laboratório mostram que este tipo de procedimento pode ser realizado de maneira satisfatória na avaliação da condição operacional de pára-raios, sem perda significativa de informação ou sensibilidade na quantificação do fenômeno.

### ***Etapa 2 - Ensaios em pára-raios de 138, 345 e 550 kV em operação e instalados nas subestações de Furnas***

Em maio e dezembro de 2010 foram realizados, em subestações de Furnas, os primeiros ensaios de campo para validação da técnica de detecção de DP em pára-raios utilizando o HFCT como transdutores. Foram realizados ensaios em pára-raios de 138, 230, 345 e 500 kV. Para a detecção e registro dos pulsos de corrente de alta frequência, produzidos pelas DP, foram utilizados um osciloscópio de 2 canais, um analisador de espectro, uma placa de aquisição, além do HFCT e o sistema IMA-DP (Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais), desenvolvido pelo Cepel. Algumas fotos ilustrativas do trabalho em campo podem ser visualizadas na figura 3 a seguir.



FIGURA 3 – Detalhes dos Pára-Raios, da Instalação do Sensor e da Equipe de trabalho

Os resultados dos ensaios realizados nos PR de classe 500kV na Subestação A e 345kV na Subestação B, são apresentados nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Resultados da Subestação A - Classe 500kV

Linha	Fase A ( $mV_{max}$ )	Fase B ( $mV_{max}$ )	Fase C ( $mV_{Max}$ )
1	10	30	10
2	55	80	410
3	13	17	12
4	30	23	23

Tabela 2 – Resultados da Subestação B - Classe 345kV

Classe 345 kV	Fase A ( $mV_{max}$ )	Fase B ( $mV_{max}$ )	Fase C ( $mV_{Max}$ )
TR1A	280	80	50
TR1B	140	115	170
TR2A	46	35	31
TR2B	40	30	130

A amplitude dos sinais registrados pelo osciloscópio é comparada entre as fases de um mesmo circuito. No caso dos resultados apresentados na tabela 1, o PR instalado na fase C da linha 2 apresentou amplitude elevada em relação as fases adjacentes, sendo considerado suspeito por apresentar descargas parciais internas, na avaliação preliminar.

Este mesmo sinal foi analisado no osciloscópio e no analisador de espectro. A análise no domínio do tempo e também no domínio da frequência auxilia na caracterização das DP. Considerando que o HFCT responde em alta frequência, os sinais registrados devem possuir componentes em frequência mais elevadas (da ordem de alguns MHz). Os registros das 3 fases foram realizados e o sinal da Fase C da linha 2 é apresentado na figura 4.

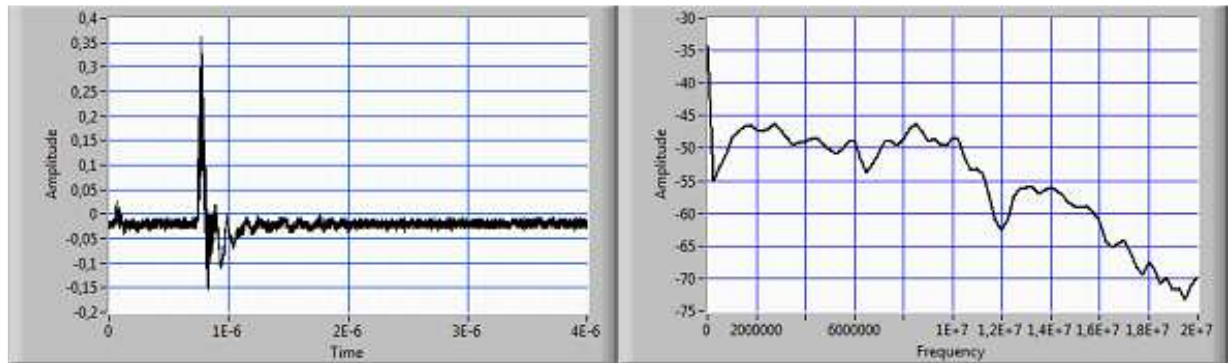


FIGURA 4 - Sinal no domínio do tempo e da frequência na fase C da linha 2.

#### *Utilização do Programa IMA-DP nos Ensaio de Campo*

Para a consolidação dos resultados, foi utilizado o programa IMA-DP (Instrumentação para Monitoramento e Análise de Descargas Parciais), desenvolvido pelo Cepel, utilizando o HFCT como transdutor. Nele é possível verificar a ocorrência de DP durante certo intervalo de tempo, formando o gráfico denominado de  $\Phi$ -q-n, representando ângulo da tensão aplicada, carga aparente do sinal (quando o circuito estiver calibrado) e número de repetições do sinal, respectivamente. A figura 5 mostra o mapa com a ocorrência de DP internas ao equipamento, principalmente pela incidência localizada em um ângulo da tensão e também pela inexistência destes sinais nas fases laterais, ou seja, fase A e B nesta mesma linha. Sendo assim, fica reforçada a suspeita de que os sinais são de fato internos ao equipamento.

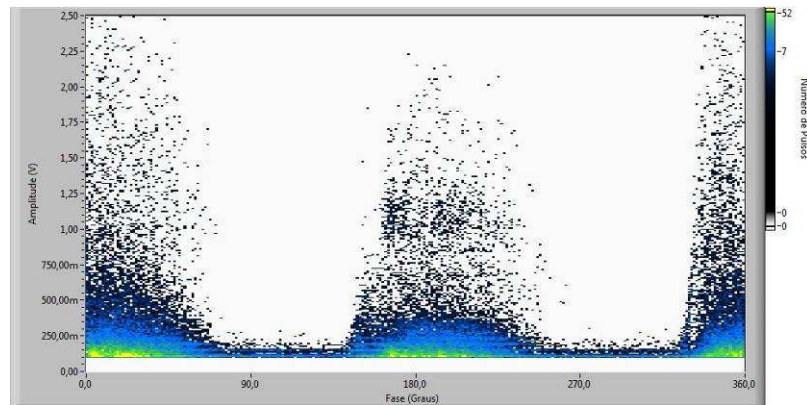


FIGURA 5 - Registro de ocorrência de DP no Pára-Raios detectado pelo IMA-DP

#### ***Etapa 3 - Retirada de amostras com suspeição e ensaios nos laboratórios do Cepel;***

Nesta etapa foram encontradas algumas dificuldades para a retirada dos pára-raios suspeitos. As principais razões foram: a necessidade de aprovação gerencial da empresa; a necessidade de desligamentos; e, principalmente, a disponibilidade de equipamentos reservas em condições adequadas para entrar em operação.

Soma-se a isto, o fato de que qualquer técnica relativamente nova apresenta suas incertezas inerentes à inexistência de exemplos reais. Houve um grande esforço por parte de Furnas, devido às dificuldades na questão da disponibilidade do SEP, em retirar os equipamentos com suspeita de sinais internos. Isto demonstrou a percepção de Furnas de que era importante apoiar os trabalhos de pesquisa experimental realizado pelo Cepel e Furnas. Desta forma, foram retirados de operação diversos equipamentos classificados como suspeitos. Estas unidades foram então enviadas aos Laboratórios do Cepel e foram ensaiadas segundo a norma IEC 60270.

Cabe ressaltar que este passo representa um fator importantíssimo para a validação da técnica em campo, abrindo espaço para a consolidação desta nova metodologia, considerada bastante simples de ser executada. A Figura 6 demonstra os equipamentos devidamente montados dentro do laboratório de alta tensão do Cepel.





FIGURA 6 - Arranjo laboratorial de medição do pára-raios.

O pára-raios à esquerda, de 345kV, possui apenas um módulo e o outro, à direita, de 500kV, possui quatro módulos. Os módulos do pára-raios de 500 kV também foram ensaiados separadamente. Isto representou mais um aprofundamento a respeito dos resultados pertinentes aos módulos. Ambos os equipamentos retirados do campo e ensaiados no laboratório apresentaram sinais característicos de DP, sendo que um deles na ordem de 30000pC, muito acima do tolerável (10pC). Os registros dos sinais internos, obtido pelo IMA-DP, são apresentados nas figuras 7 e 8. Estes sinais se assemelham a sinais internos de DP. No entanto, não é possível afirmar qual é o tipo da fonte de descargas, pois não há parâmetros na literatura que correlacionem tal anomalia.

Entretanto, considerando o valor do equipamento elétrico e o custo associado a uma falha, não é imperioso saber qual tipo de falha acomete os pára-raios. O simples fato em diagnosticar o defeito já se torna uma informação valiosa para a Engenharia de Manutenção. De todas as formas, será possível obter informações a respeito da falha no momento da abertura física do equipamento.

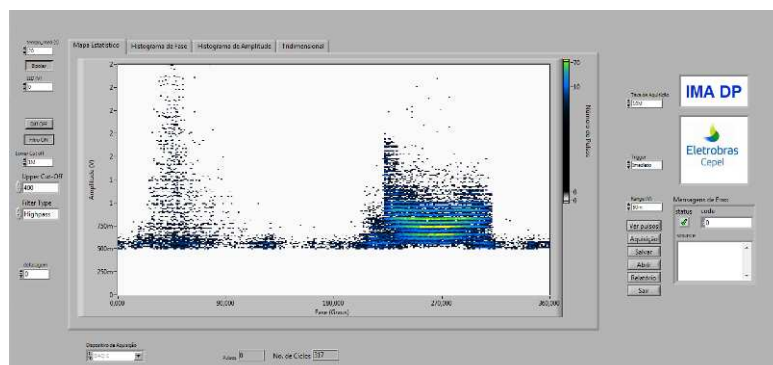


FIGURA 7 - Sinal de DP registrado no sistema IMA-DP nos ensaios em laboratório.

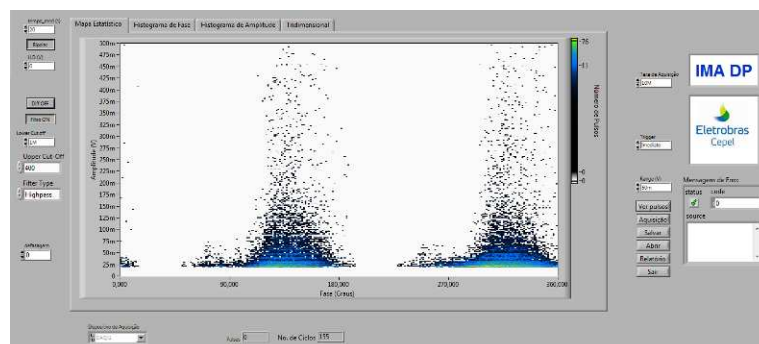


FIGURA 8 - Sinal de DP registrado no sistema IMA-DP nos ensaios em laboratório.

#### **Etapa 4 - Abertura de algumas unidades e inspeção interna**

O processo foi realizado pela oficina mecânica do Cepel, unidade Adrianópolis, em Janeiro de 2012. Foram realizados registros fotográficos (Figuras 9), contendo os passos do procedimento de abertura e das partes internas do equipamento. O fato relevante a ser relatado, com relação a primeira amostra analisada, o PR de 345kV, é que internamente havia sinais de umidade e ferrugem (oxidação), indicando penetração de água e, conseqüentemente, diminuição das propriedades dielétricas do equipamento, o que representa risco à integridade do sistema elétrico.

Os registros contidos na Figura 10 demonstram o estado do PR de 500kV em total deterioração. Na ocasião não foi possível nem mesmo retirar o corpo do PR. No detalhe dois módulos do PR de 500kV são posicionados lado a lado. Isto permite uma comparação visual bastante clara das reais condições dos PR. Outro fato relevante é que os dois módulos possuem a mesma idade de operação, o que indica que, neste caso, a idade avançada não foi motivo para condenar um dos módulos do PR.



FIGURA 9 – Detalhes envolvendo a Abertura dos PR de 345kV e o estado interno dos mesmos



FIGURA 10 – Detalhes envolvendo a Abertura de dois módulos do PR de 500kV e o estado interno dos mesmos

#### **Etapa 5 - Aperfeiçoamento da técnica e incorporação na Manutenção de Furnas.**

A implantação deste tipo de ensaio no campo, como parte da manutenção preventiva, permitirá que inspeções regulares possam ser feitas em períodos definidos, bem como a realização de medições após ocorrências de falha na rede causadas por sobretensões temporárias de alta amplitude e / ou longa duração. Furnas Centrais Elétricas adquiriu todo o material necessário para a realização dos ensaios em campo e realizou recentemente um planejamento mensal para a varredura das 27 subestações. O Cepel participou, como etapa de repasse de tecnologia, nas atividades das Subestações de Foz do Iguaçu e Itumbiara.

Além disto, foi firmado um acordo premente no projeto de pesquisas para que, todos os equipamentos que posteriormente forem retirados de operação, deverão ser encaminhados aos laboratórios do Cepel, para que sejam submetidos a ensaios normatizados e inspeções da parte ativa (abertura).

### 3.0 - CONCLUSÃO

Em se tratando de um estudo experimental, onde ainda há carências de relatos e constatações reais, um fato representativo ou mesmo um detalhe, pode ser crucial para indicar novas idéias que ajudem na identificação do problema. Sendo assim, é possível estabelecer, mesmo que de maneira preliminar, mecanismos que possibilitem o reconhecimento de sinais indicativos de DP, como nos casos dos PR exemplificados.

Os sinais que apresentam uma frente de onda lenta e um decaimento bastante amortecido com várias oscilações podem ser interpretados como sinais de corona externo, o que não representa risco ao equipamento. Os sinais que apresentam frente de onda rápida e decaimento quase instantâneo são decorrentes de sinais de DP internas, conforme foi observado nas medições e avaliações no campo e também no laboratório.

Cabe ressaltar que outras unidades, sem ocorrências de sinais característicos de DP internas, também foram retiradas e ensaiadas no Laboratório. Em todos os casos o diagnóstico em campo foi comprovado, demonstrando que a técnica apresenta resultados satisfatórios.

Como principais vantagens desta técnica podemos citar:

- 1) A rapidez na execução dos ensaios e na avaliação dos pára-raios em operação, permitindo assim a sua retirada de serviço antes de uma falha intempestiva;
- 2) A realização do ensaio com o equipamento energizado e em funcionamento normal, sem a necessidade de intervenções nos equipamentos e nem no sistema elétrico de potência.
- 3) Capacidade de prevenir custos provocados por falhas dos pára-raios, evitando assim gastos desnecessários com o pagamento de Parcela Variável.
- 4) Em termos tecnológicos, o desenvolvimento desta metodologia para avaliação do estado operativo de pára-raios promove a interação e o repasse de conhecimento entre as empresas do grupo Eletrobras, no caso Cepel e Furnas Centrais Elétricas.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. R. Bacega, H. Tatizawa, e A. G. Kanashiro, "Técnica de Identificação do Processo de Degradação de Pára-Raios de ZNO em Campo", XX SNPTEE, Recife, 2009.
- [2] International Electrotechnical Commission, IEC 60270 Standard, Highvoltage test techniques – Partial discharge measurements, 2000.
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC 60099-4 Standard. Surge arresters part 4 – Metal oxide surge arresters without gap for AC systems, 2001.
- [4] Oliveira B.H., Amorim H., Dias B.J., Carvalho T.A. - Detecção de Descargas Parciais em Para-raios Utilizando TCs de Alta Frequência. 1º SEMINÁRIO RELASE, Rio de Janeiro, 2011.

### 5.0 - DADOS BIBLIOGRÁFICAS



**Hélio de Paiva Amorim Junior** – Possui doutorado e mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2001 e 1997), respectivamente e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Taubaté (1993). Atualmente é profissional pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel).

**André Tomaz de Carvalho** - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2001) e mestrado em Engenharia Eletrônica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2005). Atualmente é Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL e doutorando pela COPPEUFRJ. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação Eletrônica e processamento digital de sinais.

**Thiago Baptista Rodrigues** - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2004) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2006). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (Eletrobrás Cepel), atuando nas seguintes áreas: desenvolvimento e análise de novas tecnologias em sistemas elétricos de potência, medição e análise de descargas parciais em equipamentos elétricos, ensaios elétricos em campo ou laboratório.

**José Antônio Pinto Rodrigues** – É técnico eletrônico formado em 1972 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro "Celso Suckow da Fonseca". Possui vasta experiência em ensaios elétricos de alta tensão no campo e em laboratório. Trabalha há 32 anos no Cepel onde hoje exerce o cargo de Responsável pelo Laboratório de Ensaio Corona (AT2).

**Hamilton Batista de Oliveira** – Possui especialização em Manutenção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (2012), graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2002) e curso-técnico profissionalizante pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (1994). Atualmente é Engenheiro Eletricista da empresa Furnas Centrais Elétricas S/A, atuando como supervisor da área de ensaios elétricos em equipamentos de alta tensão do Centro Técnico de Ensaio e Medições (CTE.O).

**João Bosco Dias** – É técnico em eletrotécnica com vasta experiência em laboratório de alta tensão e em atividades no campo, atuando em ensaios elétricos em equipamentos de alta tensão do Centro Técnico de Ensaio e Medições (CTE.O), pertencente à empresa Furnas Centrais Elétricas S/A.