



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

BR/GSE/28  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – VIII**

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

**Utilização da Técnica Diagrama de Relação de Frequências para a Avaliação de Descargas Parciais em Campo em Buchas Capacitivas de Transformadores e Reatores de Potência**

**Fernando de Souza Brasil \***  
**ELETRONORTE**

**Bárbara Medeiros Campos**  
**ELETRONORTE**

**Jorge Augusto Siqueira Tostes**  
**ELETRONORTE**

**RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo apresentar as soluções encontradas para a realização do ensaio de descargas parciais em campo, pelo método elétrico normalizado e utilizando a técnica diagrama de relação de frequências, e também apresentar os principais resultados encontrados. Todas as atividades se direcionaram para a avaliação de um conjunto de buchas reservas da ELETRONORTE para sistemas de 69, 138, 230 e 550 kV, que estavam armazenadas de maneira não conforme há vários anos, e em caso de emergência pudessem ser utilizadas sem nenhuma dúvida nas suas reais condições de desempenho.

**PALAVRAS-CHAVE**

Buchas capacitivas, ensaios, alta tensão, descargas parciais.

**INTRODUÇÃO**

As buchas capacitivas de alta tensão são formadas basicamente por um condutor metálico instalado no interior de um isolador de porcelana e envolvido por materiais especiais. Estes materiais tem como finalidade, prover sustentação mecânica, isolamento elétrico e uniformizar a distribuição de potencial desde o condutor até a porcelana. A isolação principal das buchas capacitivas de classe de tensão superior a 69 kV normalmente é feita de papel isolante impregnado em óleo, com blindagem para a distribuição de potencial. Se a bucha tiver sido armazenada de maneira não conforme, a eficiência da isolação pode ser prejudicada, o que poderá acarretar falhas catastróficas quando a mesma entrar em operação (1, 2).

A medição de descargas parciais em equipamentos de alta tensão é uma técnica consagrada para fins de avaliação de desempenho elétrico de seus sistemas isolantes. Quaisquer imperfeições construtivas quer sejam devidas ao projeto ou ao processo de montagem, bem como qualquer fragilidade de conjunto isolante para as condições de distribuição geométrica do campo elétrico, podem ser detectadas por meio do ensaio de descargas parciais (2).

Normalmente o ensaio de descargas parciais é realizado em laboratório blindado e sob condições ambientais bem controladas, pois é necessário, possuir uma sensibilidade elevada e um nível de ruído mínimo, já que trata de sinais que não poderiam exceder a ordem de alguns poucos pico Coulombs (pC). No caso específico de buchas capacitivas esse valor não poderia exceder o valor de 10 pC (2,3).

A motivação que originou a realização dessas medições foi a necessidade de garantir maior confiabilidade no que tange as características de desempenho elétrico estabelecidas pelo fabricante, verificando-se que estas não foram alteradas após vários anos de armazenagem não conforme, como o laboratório de alta tensão da ELETRONORTE

(\*)Centro de Tecnologia da Eletronorte, Rodovia Arthur Bernardes, s/n – sala 01 - Bloco A – CEP 66630-505  
Belém, PA, – Brasil, Tel: (91) 3257-1966 Ramal: 8284 – Email: fernando.brasil@eletronorte.gov.br

ELETRONORTE ainda se encontra em fase de construção essas medições tiveram que ser realizadas em campo, ou seja, em ambiente a céu aberto.

Na prática, a medição de baixos níveis de descargas parciais é dificultada pelas diversas fontes de ruído em que o ambiente está submetido. Os vários métodos de medição se diferem na maneira em que atenuam os sinais de ruído, a Figura 1 apresenta as principais fontes de interferência para um típico circuito de ensaio para medição de descargas parciais.

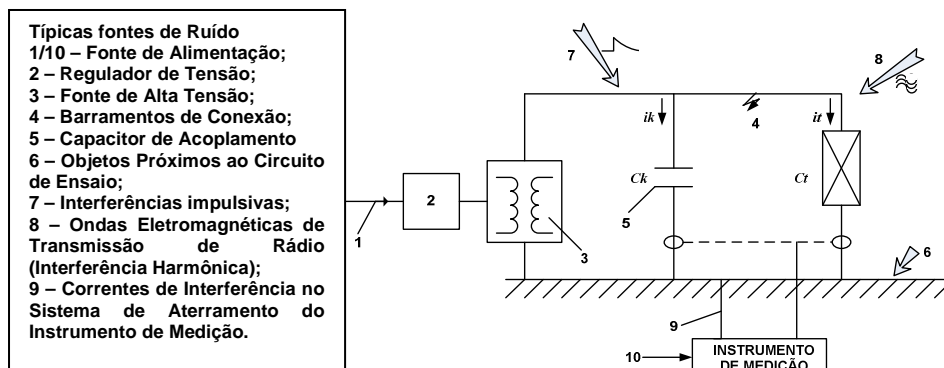


FIGURA 1 – Principais fontes de interferência no circuito de ensaio. Fonte (4).

Basicamente todos os sinais de ruídos eletromagnéticos podem ser subdivididos em impulsivos e periódicos. O ruído impulsivo é distribuído estatisticamente no domínio do tempo e ocupa uma banda larga de frequência, que vai de uns poucos kHz até alguns MHz, enquanto que o ruído periódico, ou harmônico, como por exemplo, estações transmissoras de rádio, é contínuo no tempo, e ocupa uma banda bem estreita no espectro de frequência. O ruído entra no circuito de medição de descargas parciais basicamente por três caminhos: através dos terminais de alta tensão do objeto sob ensaio, através da alimentação dos instrumentos de medição de descargas parciais e pela indução eletromagnética no circuito de ensaio (4).

Em campo, o maior problema em termos de interferência eletromagnética, se refere aquelas diretamente radiadas no circuito de ensaio e medição, visto que não há blindagem no ambiente. Para exemplo de comparação o ruído de fundo em um laboratório de alta tensão blindado geralmente é inferior a 1 pC, enquanto que para o mesmo ensaio, em um ambiente aberto, este valor atinge facilmente a ordem de algumas centenas de pico Coulombs, se não forem tomadas medidas especiais no circuito de medição, o que impossibilitaria a medição de descargas parciais em buchas capacitivas. Interferências conduzidas, tanto na alimentação do módulo regulador, quanto na dos instrumentos de medição foram minimizadas com a utilização de um transformador de isolamento na entrada do circuito de alimentação.

De maneira geral, o trabalho realizado pode ser dividido em três etapas que influenciaram substancialmente a qualidade dos ensaios realizados, estas etapas são citadas a seguir e serão descritas com mais detalhes ao longo do trabalho:

- Escolha da técnica diagrama de relação de frequências;
- Montagem e ajuste do circuito de ensaio;
- Resultados dos ensaios.

## 2.0 ESCOLHA DO MÉTODO PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES

### 2.1 Considerações Iniciais

De acordo com (5), descargas parciais são descargas elétricas localizadas as quais apenas parcialmente percorrem a isolamento entre condutores e que podem ou não ocorrer adjacente a um condutor. O termo descargas parciais é utilizado tanto para o caso de descargas na cavidade de um material isolante (sólido, gás, líquido), quanto nas superfícies condutoras. Assim, uma descarga parcial é uma descarga elétrica localizada, ou seja, que não chega a percorrer o caminho dentro de um material isolante colocado entre dois eletrodos.

Quando se tem uma determinada tensão aplicada aos terminais de um dielétrico (ar, óleo, gás, resinas, etc.) podem ocorrer descargas em partes deste dielétrico nos pontos onde houver maior intensidade do campo elétrico ou onde a constante dielétrica for menor, como no caso de pequenas cavidades no interior de um isolante sólido (6,7).

No caso de dielétricos sólidos estas descargas são produzidas pela ionização de pequenas cavidades de ar no interior do dielétrico; no caso dos líquidos; pela ionização de bolhas de gás no seu interior; no caso do ar pela ionização das moléculas de ar que se encontram nos pontos de maior gradiente de potencial. Em resumo, a ocorrência de descargas parciais nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na rigidez dielétrica e cuja evolução pode acarretar em graves consequências, para esses equipamentos

e para o sistema elétrico interligado a eles. Portanto, a detecção de descargas parciais ocorrendo no interior de um sistema isolante é de fundamental importância para se avaliar o estado operativo de praticamente todos os dielétricos utilizados em alta tensão (6,7).

A medição de descargas parciais se destina a verificar as atividades de micro-descargas no interior dos dielétricos e, se possível, quantificá-las. A importância dessa medição decorre do fato das descargas serem uma fonte contínua de deterioração do material isolante, modificando suas propriedades dielétricas. Dependendo da intensidade das descargas parciais, a vida útil do material será reduzida. No caso dos dielétricos sólidos, não há possibilidade de regeneração dielétrica após as solicitações de alta tensão, assim como no caso de dielétricos líquidos ou gasosos, o que torna imprescindível o controle do comportamento dessas descargas ao longo da vida operativa dos equipamentos (6,7).

## 2.2 Diagrama Trifásico de Relação de Amplitude

O diagrama de relação de amplitude do inglês *3-Phase-Amplitude-Relation- Diagram* – (3PAR) foi usada na prática com resultados confiáveis, conforme descrito em (8). O sistema utilizado neste trabalho possui um método de medição utilizando apenas um canal, com a medição em três frequências diferentes. A primeira etapa é calcular o logaritmo do valor absoluto de todos os três pulsos das descargas. Na segunda, cada pulso é transformado em um fasor relacionado à sua fase de origem (9,10,11,12). A Figura 2 mostra o mecanismo de geração do 3PAR. À direita os sinais de tensão de cada fase são observados. Quando os fasores relativos a cada fase medida são transportados para o diagrama, é obtida a localização da fonte de descargas parciais interna pela soma vetorial, conforme mostrado na Figura 2.

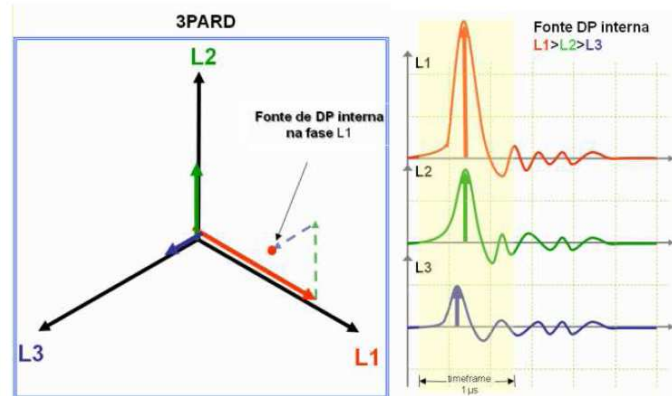


FIGURA 2 - Criação de 3PAR usando sinais de tensão de Descargas Parciais. Fonte (9).

Um único sinal de descarga parcial é representado por um ponto. Cada agregação de pontos calculados (clusters) representa a única fonte de descargas parciais. Posteriormente, cada grupo podem ser separados e mostrados sem efeitos de sobreposição, transformado em uma PRPD clássica ou de qualquer outro diagrama de pulso para avaliação em tempo real. O sistema de teste utilizado fornece a ferramenta de criação de cluster, ou seja, áreas determinadas no 3PAR de onde são separados os sinais que, a priori, aparecem sobrepostos (9,10). A Figura 3 mostra o 3PAR com a separação dos sinais.

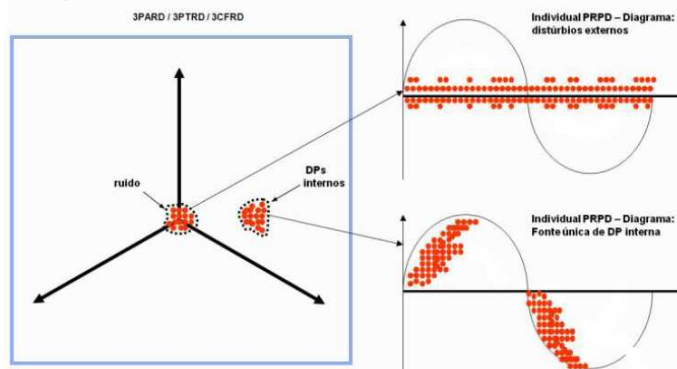


FIGURA 3 - Representação de 3PAR com a separação dos sinais individuais. Fonte (9).

### 2.3 Diagrama de Relação de Frequências

O diagrama da relação de frequências correlaciona a medida de descarga parcial realizada em três frequências simultaneamente. As amplitudes do sinal é medida em cada frequência. Assim, o sinal de saída de três filtros com frequências centrais e/ou diferentes larguras de banda permite análise do pulso em cada um dos três pontos de medida. Isto se deve ao fato de que, devido à descarga física, diferentes tipos de descargas parciais ou pulsos de ruído têm espectros de energia diferentes (9,10,11,12).

Em geral, o primeiro filtro de passagem de banda deve ser sintonizado para uma frequência central baixa, inferior a 2 MHz, para possibilitar o atendimento às normas técnicas IEC ou IEEE. A segunda e terceira passagens de banda são sintonizadas para frequências mais elevadas, determinadas pelo responsável pelo teste, em que os efeitos da propagação dos pulsos causam diferenças já distinguíveis nas respostas espectrais do sinal de descarga parcial medido (9,10,12).

Mediante a escolha correta das frequências para passagem de banda, torna-se possível efetuar medições de descargas parciais em conformidade com as normas técnicas. Ao mesmo tempo se remove praticamente toda a interferência sobreposta (9,10). A Figura 4 mostra um exemplo de representação FFT de pulsos de descarga parcial com a determinação de três filtros de passagem de banda.



FIGURA 4 - Exemplo de representação FFT para classificação dos pulsos de descargas parciais com a determinação de três filtros de passagem de banda.

### 3.0 MONTAGEM E AJUSTE DO CIRCUITO DE ENSAIO

Inicialmente foi feito um levantamento dos principais locais, onde as medições poderiam ser realizadas com um mínimo possível de interferências eletromagnéticas. Existia um limite nessa escolha, posto que, outras condições de contorno deveriam, necessariamente, ter que ser atendidas, tais como: o local deve ser suficientemente amplo para a montagem das buchas sob ensaio, a fonte de alta tensão e o divisor de tensão, e acomodar também uma casa de controle provisória; ter distâncias de isolamento suficientes para a aplicação de uma tensão suportável de cerca até 650 kV (fase-terra); ter um ponto de terra confiável e a possibilidade de alimentação do regulador da fonte de alta tensão, no caso, um circuito trifásico de 440 V.

Apesar de não existir uma forma sistemática para escolha do local de montagem do circuito, algumas premissas podem ser estabelecidas: Evitar localidades próximas a oficinas mecânicas e locais onde haja intensa utilização de equipamentos elétricos industriais, tais como máquinas de solda, motores, entre outros (13).

Para a realização da medição de descargas parciais pelo método elétrico direto em buchas capacitivas com isolamento de papel impregnado em óleo, utilizadas em reatores e transformadores de até 550 kV, são necessárias as seguintes condições mínimas:

1. Equipamentos para aplicação de tensão;
2. Capacitor de acoplamento, livres de descargas parciais nas tensões de ensaio;
3. Sistema de medição de alta tensão;
4. Sistema de detecção de descargas parciais pelo método elétrico;
5. Um tanque de ensaios com dimensões apropriadas aos níveis de tensão das buchas a serem ensaiadas e óleo isolante em quantidade e com características físico-químicas requeridas;
6. Eletrodo de blindagem para o topo das buchas com dimensões adequadas aos níveis de tensão de ensaio;

A instalação da bucha a ser ensaiada no tanque de ensaio deve ser cuidadosamente feita por pessoal especializado, e deve ser instalada em condições tão próximas quanto possíveis das condições de operação. Após a instalação no tanque e montagem do arranjo de ensaio, deve-se aguardar o tempo requerido para descanso e acomodação antes de iniciar o ensaio, este cuidado é necessário para que o meio isolante possa se estabilizar. Na Figura 5 apresenta o arranjo do circuito para o ensaio de uma bucha de 550 kV.



FIGURA 5 – Circuito de ensaio de para buchas de 550 kV.

#### 4.0 RESULTADOS

As medições de descargas parciais foram realizadas de acordo com (2) e (3), no valor de 50% acima da tensão nominal,  $1,5U_n$ , em tensão crescente e decrescente, depois da tensão ter sido elevada até o nível da tensão suportável nominal a frequência industrial (tensão aplicada), procedimento este que é ilustrado na Figura 6.

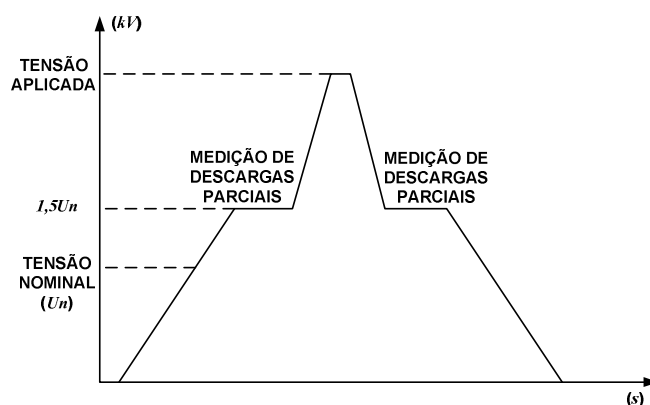


FIGURA 6 – Procedimento normalizado para realização dos ensaios.

A Tabela 1, a seguir, apresenta os níveis de tensão normalizados para realização do ensaio de descargas parciais e de tensão aplicada, ilustrados na Figura 7.

TABELA 1 - Níveis de tensão normalizados para o ensaio de descargas parciais e de tensão suportável.

Classe de Tensão (kV)	Tensão de Ensaio de Descargas Parciais ( $1,5U_n$ ) (valor normalizado em kV)	Tensão Aplicada a Frequência Industrial (valor normalizado em kV)
69	63	140
138	126	230
		275
		325
230	212	360
		395
		460
		630
550	476	680
		740
		790



A Tabela 2, a seguir, apresenta os resultados dos ensaios realizados, até o presente momento seis (6) buchas das classes de tensão 69, 138, 230 e 550 kV foram testadas e somente uma bucha foi reprovada na sequencia completa de ensaios.

TABELA 2 - Resumo dos resultados dos ensaios com alta tensão

Classe de Tensão (kV)	Quantidade Ensaada	Quantidade Aprovada
550	1	0
230	1	1
138	1	1
69	3	3
Total	6	5

A Figura 07 apresenta os resultados da medição de descargas parciais em uma bucha de 69 kV ensaiada, medidos antes e após o ensaio de tensão suportável à frequência industrial, apresenta também a representação de 3PARD com a separação dos sinais. Como se observa, não há pulsos de descargas parciais acima de 10 pC, valor este estabelecido como limite em (2).

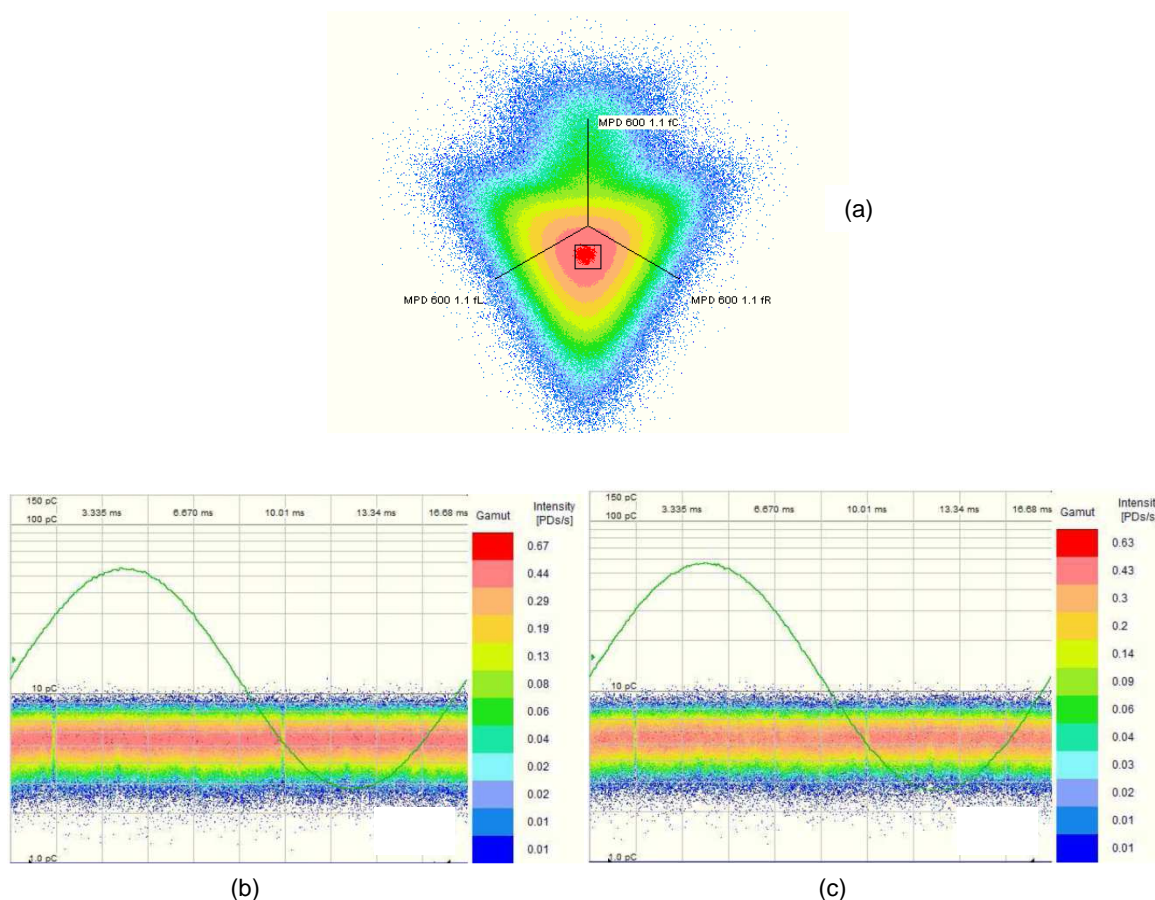


FIGURA 7 – (a) Representação de 3PARD com a separação dos sinais; (b) Ensaio de descargas parciais antes do ensaio de tensão suportável; (c) Ensaio de descargas parciais após o ensaio de tensão suportável.

## CONCLUSÃO

Este Informe Técnico apresentou as soluções encontradas para a realização do ensaio de descargas parciais em campo, assim como os principais resultados encontrados. Uma das principais conclusões a que se chega nesse trabalho é que embora uma bucha de alta tensão possa ser devidamente ensaiada nas instalações do fabricante ou em um laboratório, não se pode garantir que estas venham a estar em perfeitas condições de uso após vários anos armazenadas em posição horizontal.

Outra conclusão muito importante que se chega se refere a possibilidade de se realizar, em condições muito adequadas, a medição de descargas parciais em ambiente não blindado. Defeitos interno em equipamentos podem ser facilmente detectados com a medição de descargas parciais.

No caso particular de se realizar as medições de descargas parciais no campo, alguns fatores tem grande influência no nível de ruído que estará presente durante a realização dos ensaios, esses fatores são descritos a seguir:

1. A capacitância das buchas sob ensaio: quanto maior for a capacitância das buchas maior será o nível de ruído na medição;
2. A utilização dos diagramas de relação de frequências e relação de amplitude: estes métodos possibilitaram a realização do ensaio de descargas parciais em campo, com níveis de ruídos bastante baixo.
3. A escolha da frequência central e da largura de banda, possibilitou buscar a melhor faixa de frequência para ser realizar as medições;

Por fim, conclui-se que este tipo de ensaio é altamente recomendável como controle de qualidade para avaliação de equipamentos reserva, que encontram-se armazenados a vários anos, e com essa prática, evitar que equipamentos de alta tensão, com problemas internos sejam instalado em subestações, aumentando o risco de falha a curto ou médio prazo e como consequência a falha do transformador.

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem a empresa Eletrobrás Eletronorte pelos recursos destinados à aquisição de equipamentos, à capacitação técnica da equipe e aos apetrechos de ensaio para a execução dos serviços em buchas capacitivas e também aos Regionais de Tocantins, Maranhão, Pará, Amapá, Acre e Rondônia por acreditarem e enviarem seus equipamentos para teste no Centro de Tecnologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) HARLOW, J.H., **Electric Power Transformers Engineering**, 2. ed., CRC PRESS, 2007.
- (2) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 60137, **Insulated Bushings for Alternating Voltages Above 1000 V**, 2008.
- (3) INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, Std. C57.19.00, **Standard General Requirements and Test Procedure for Power Apparatus Bushings**, IEEE Power Engineering Society, 2004.
- (4) WEBER, H.J., SEEBERGER, R.E., STOLPE, G., **Field Measurements of Partial Discharges in Potential Transformers**, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 2, No. 5, sep., 1986.
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC 60270, **High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements**, 2000.
- (6) BARTNIKAS, R., McMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics – Volume I Corona Measurement and Interpretation**. Baltimore: American Society for Testing and Materials, 1979.
- (7) NAIDU, M.S., KAMARAJU, V., **High Voltage Engineering**, 2. ed., McGraw-Hill, 1996.
- (8) CIGRE 366, **Guide for Partial Discharge Measurement in Compliance to IEC 270**, 2008.
- (9) PAULINO, M.E., **Estado da Arte da Medição com Múltiplos Canais Sincronizados para Avaliação de Descargas Parciais**, 2010.
- (10) PAULINO, M.E., **Sistema de Medição de Múltiplos Canais Sincronizados para Avaliação de Descargas Parciais**, XIV ERIAC, Paraguai, 2011.
- (11) RETHMEIER, K., **Experiences in On-site Partial Discharge Measurements and Prospects for PD Monitoring**, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, China, 2008.
- (12) KOLTUNOWICZ, W., PLATH, R., **Synchronous Multi-channel PD Measurements**, 2006.
- (13) LEVY, A.F.S., *et al.*, **Um Experiência Bem Sucedida de Medição no Campo de Descargas Parciais em TC's para Sistemas de 550 kV**, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XIX SNPTEE, RJ, 2007.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando de Souza Brasil, Belém-PA, 1983.

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2005, e Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará em 2004. Concluiu o curso de Especialização em Engenharia de Produção na Universidade do Estado do Pará em 2012. Atualmente cursa Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará e trabalha como Engenheiro de Manutenção Elétrica no Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte, atuando nas áreas de Engenharia de Alta Tensão, Ensaio Não Destrutivos e Monitoração de Descargas Parciais.

Bárbara Medeiros Campos, Belém-PA, 1981.

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2003. Concluiu Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2005. Atualmente trabalha como Engenheira de Manutenção Elétrica no Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte, atuando na área de Engenharia de Alta Tensão e Tecnologias de Transmissão em Corrente Contínua.

Jorge Augusto Siqueira Tostes, Belém-PA, 1957.

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 1981. Atualmente trabalha como Engenheiro de Manutenção Elétrica no Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte, atuando na área de Engenharia de Alta Tensão.