



**GSE/010**

**21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil**

## **GRUPO VIII**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS (GSE)**

#### **METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO NO CAMPO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CAPACITORES DE POTÊNCIA VIA MEDIÇÃO ACÚSTICA**

Alain F. S. Levy\* (CEPEL)

André T. de Carvalho (CEPEL)

Renata M. de Oliveira (CEPEL)

Eduardo Chinelli (LIGHT)

Sylvia G. de Carvalho (LIGHT)

Flávio L. A. De Souza (LIGHT)

## **RESUMO**

Nesse trabalho descreve-se o desenvolvimento de uma metodologia de medição de descargas parciais aplicada a identificação de capacitores de potência defeituosos em sistemas de até 138 kV, buscando dessa forma prover uma maior confiabilidade no fornecimento de energia e a conseqüente redução dos cortes de energia para os consumidores.

Foi utilizada a método acústica de medição de Descargas Parciais a qual demonstrou ser amplamente aplicável nesse caso, fornecendo resultados potencialmente utilizáveis para a avaliação do estado operativo de capacitores de potência. Para unidades com carcaças sob potencial, é utilizado um sistema especial isolado a fibra ótica.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Capacitores de potência, Descargas parciais, Medição no Campo, Ultra-som

## **0.0 INTRODUÇÃO**

A avaliação no campo de equipamentos de alta tensão quanto a geração de Descargas Parciais é uma ferramenta de manutenção preditiva que pode auxiliar na realização da manutenção dos equipamentos providenciando-se a intervenção no sistema ou sua substituição antes que estes possam sofrer danos mais graves ou até mesmo afetar o sistema como um todo.

As principais características do sistema de medição são a possibilidade de se avaliar unidades capacitivas sob alta tensão, utilizar instrumentação convencional de uso comercial, permitir a execução de medições em curto intervalo de tempo e ser pouco sensível a interferências normalmente existentes nas subestações.

Esse trabalho foi realizado numa parceria de Pesquisa e Desenvolvimento entre a LIGHT e o CEPEL. Os desenvolvimentos laboratoriais foram realizados no CEPEL enquanto que as medições de campo foram realizadas em Bancos de Capacitores de 13,8 kV, concluindo-se que tal técnica demonstra-se plenamente satisfatória como ferramenta de manutenção preditiva de capacitores de potência.

## **1.0 HISTÓRICO**

A LIGHT possui instalados mais de 12000 capacitores distribuídos em cerca de 85 subestações de 138 kV, perfazendo um total de mais de 450 bancos de capacitores.

Nestas subestações encontram-se instalados bancos trifásicos de tensão nominal 13,8 – 34,5 e 138 kV, constituídos por 18 ou mais unidades capacitivas por banco.

Cada unidade capacitiva é constituída internamente por uma rede capacitiva formada por um conjunto de bobinas em série e paralelo de tal modo a prover a potência e tensão necessárias ao sistema. Os capacitores podem possuir ou não fusíveis internos.

\*CEPEL

Caso uma ou mais bobinas se danifiquem, sendo curto circuitadas ou permanecendo eletricamente em aberto, a capacitância original de toda a unidade será afetada.

Ao longo dos anos os projetos dos capacitores têm sido sistematicamente aperfeiçoados e otimizados. O uso de novos materiais dielétricos e a introdução de novos métodos de avaliação de desempenho dos capacitores, sobretudo em termos de sua expectativa de vida útil, contribuíram substancialmente para esse aperfeiçoamento.

Na década de 1950, por exemplo, os capacitores de potência, constituídos por papel e óleo mineral, eram projetados para serem solicitados por um campo elétrico da ordem de 12 kV/mm e sua potência específica por massa era da ordem de 0,7 kvar/kg. Já na década de 1990, os capacitores constituídos por filme de polipropileno e impregnados por líquidos não clorados, operam com um campo elétrico da ordem de 60 kV/mm e potência específica por massa de até 6,5 kvar/kg.

Normalmente, quando da montagem dos bancos no campo, as unidades são distribuídas de modo que haja um equilíbrio no fluxo de correntes em cada uma das fases. Essa distribuição das unidades leva em conta a dispersão de suas capacitâncias em torno de seu valor nominal.

Ao longo da operação do sistema, se houver unidades capacitivas apresentando defeitos internos, de tal forma que sua capacitância seja alterada, ocorrerá um desequilíbrio que irá afetar a solicitação elétrica do restante das unidades do banco, podendo, após algum tempo, comprometer o desempenho desses equipamentos. Nestes casos, os dispositivos de proteção irão atuar de forma que as sobretensões nas unidades não ultrapassem os limites recomendados.

Nosso objetivo aqui é conseguir detectar problemas internos incipientes dos capacitores, antes que estes venham a comprometer o sistema como um todo.

## **2.0 GENERALIDADES SOBRE AS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS**

A ocorrência de descargas parciais nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na suportabilidade dielétrica e cuja evolução pode vir a acarretar graves conseqüências para esses equipamentos e para o sistema elétrico.

A medição de descargas parciais se destina a verificar se há atividades de micro descargas no interior dos dielétricos e se possível quantificá-las.

Fisicamente, as Descargas Parciais se caracterizam por um processo de ionização em ambiente gasoso no interior dos materiais dielétricos, causado por um campo elétrico intenso e localizado. A partir desse processo diversas grandezas físicas são geradas no

local, tais como, pulsos eletromagnéticos conduzidos e radiados, luminosidade, ruído acústico, acréscimo de temperatura e reações químicas localizadas. Tradicionalmente as Descargas Parciais têm sido substancialmente avaliadas pela medição dos pulsos elétricos de alta frequência conduzidos em um circuito de medição específico, conforme os procedimentos descritos na Norma IEC 270. Menos explorada é a medição dos sinais acústicos produzidos por essas descargas.

Entre as razões para não se ter, no caso da acústica, procedimentos de medição tão universais que no caso das medições elétricas, podemos citar:

- A dificuldade de se quantificar a severidade do problema interno visto que as amplitudes registradas são também função da localização das descargas. A medição acústica é mais qualitativa que quantitativa;
- A sensibilidade da medição, na maioria dos casos, é inferior do que no método elétrico;
- A unidade de medição, geralmente em dB, não está diretamente associada com nenhuma característica de deterioração elétrica.

No entanto, no caso em particular dos capacitores de potência, para os quais a própria medição elétrica é bem menos sensível, a medição dos sinais acústicos apresentam vantagens importantes visto ser um equipamento de pequenas dimensões físicas e formado por dielétricos sólidos e líquidos.

O objetivo principal dessa técnica de medição, em particular no campo, é possibilitar o diagnóstico de equipamentos, para auxílio na decisão sobre intervenções para manutenção.

## **3.0 ACÚSTICA APLICADA À MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS**

Ao serem geradas, as Descargas Parciais produzem ondas de choque - vibrações mecânicas ou emissões acústicas - no meio onde se formam.

As ondas de choque se propagam em todas as direções e se refletem e refratam nos diversos materiais que constituem os capacitores de potência, entre dielétricos e carcaça.

A acústica é a ciência, que de modo geral, trata do estudo dos sons no ambiente cobrindo sobretudo a faixa de frequência desde alguns Hz até centenas de kHz. Frequências até 20 kHz são identificadas como sônicas e se referem tipicamente às características auditivas de animais tais como o homem e similares. Frequências acima de 20 kHz até centenas de kHz são identificadas como ultra-sônicas e é nesse domínio de frequências que trabalhamos quando medimos Descargas Parciais via métodos acústicos [1].

Por se tratar de ondas que traduzem ruídos ou sons, os níveis de pressão ( $S$ ) são quantificados em decibéis pela equação:  $S = 20 \log (P/P_{ref})$ , onde  $P$  se refere ao nível de pressão efetivo e  $P_{ref}$  é um nível de pressão de referência. Ambas as pressões podem ser quantificadas, por exemplo em Pascal ou em microbar.

Na prática, não se trata de medir diretamente a pressão sonora visto que o princípio de medição pelo método acústico em equipamentos de alta tensão envolve a utilização de transdutores piezoelétricos muito sensíveis nas frequências ultra-sônicas. Esses transdutores têm a propriedade de transformar ondas de pressão de pequenas amplitudes, em definidas quantidades de cargas elétricas. As correntes elétricas geradas então pelo fluxo de cargas, ao passar por um circuito elétrico e pré-amplificadores, se apresenta como uma onda de tensão em um analisador de espectro ou osciloscópio.

Os sensores piezoelétricos são fabricados de tal forma a apresentarem uma resposta constante numa ampla faixa de frequência, ou resposta ressonante numa dada frequência dentro de sua faixa de operação, garantindo maior sensibilidade na medição. Normalmente, a frequência de ressonância do sensor fica na faixa de 60 a 300 kHz.

Descargas Parciais invariavelmente se formam pela ruptura elétrica em um meio gasoso. A partir de seu ponto de formação, as ondas acústicas criadas vão se propagar através dos diversos materiais (dielétricos e condutores) adjacentes até alcançar um sensor, normalmente na parte externa dos equipamentos. A sensibilidade de uma determinada medição será então função também da impedância característica dos materiais envolvidos nas trajetórias das ondas ultra-sônicas. Essa impedância será função da densidade do material e da velocidade do som em seu meio. Esses parâmetros definem os coeficientes de reflexão e refração os quais vão definir qual é a parcela de potência sonora total que será detectada em determinado sensor, devido às diversas mudanças de meio. Além disso existe também a atenuação dos sinais no meio de propagação devido à difusão, colisões moleculares, viscosidade, etc.

Assim, dentre os fatores que afetam a sensibilidade da medição via sensores piezoelétricos, além dos ruídos ambientes, destacam-se as características do sensor (faixa de frequência); a qualidade do contato do sensor ao equipamento; as características físicas dos materiais por onde as ondas ultra-sônicas devem passar e a distância entre as descargas e o sensor, para citar os fatores mais importantes.

#### 4.0 TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CAPACITORES DE POTÊNCIA

Em conformidade com os principais objetivos para avaliação de capacitores, optou-se por desenvolver e implantar de um circuito de medição que registrasse os sinais acústicos emitidos pelas Descargas Parciais, por meio de sensores piezoelétricos ativos de alta sensibilidade. Os sinais acústicos são registrados por um osciloscópio digital comercial ou detetor digital de Descargas Parciais. Aqui ressalta-se que os instrumentos de mercado dedicados a medição e análise de sinais acústicos para uso em alta tensão, são geralmente onerosos e pouco práticos

Um sistema transmissor/receptor isolado por fibra ótica serviu de isolamento para alta tensão no caso em que as carcaças dos capacitores de potência se encontrassem sob potencial.

Inicialmente foram previstos dois diferentes circuitos de medição conforme a existência ou não de capacitores que contenham carcaça flutuante. Nas figuras 1 e 2 estão apresentados os diagramas elétricos de cada um desses circuitos.

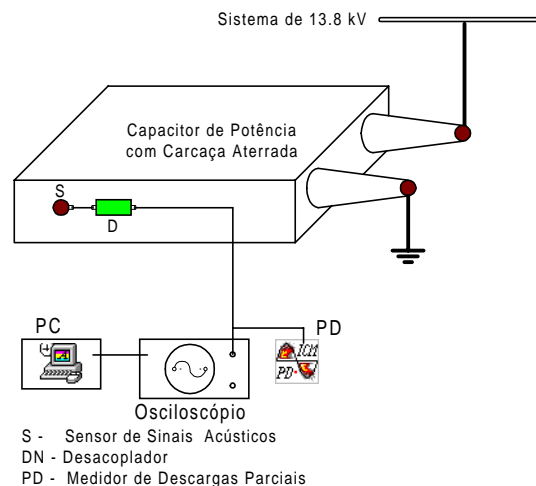


Figura 1 - Medição de Descargas Parciais pela metodologia acústica, em capacitores de potência do sistema de 13,8 kV

Nessas figuras, o sensor acústico  $S$  foi escolhido de tal maneira que sua sensibilidade fosse a máxima possível e que operasse em uma faixa de frequência na qual não houvesse ruídos ambientes significativos. Dessa forma, optou-se pelo uso de sensores piezoelétricos com ressonância acima de 100 kHz

Os sensores ativos necessitam de uma tensão contínua para operarem. A unidade adaptadora DN realiza então a dupla função de alimentar o sensor e desacoplá-lo do circuito de medição.

O terminal de saída dessa unidade é conectada, via cabo coaxial, diretamente aos instrumentos de

medição, no caso em que a carcaça do capacitor estiver diretamente aterrada (figura 1).

Quando a carcaça do capacitor de potência estiver sob potencial, será acrescentado um sistema transmissor/receptor isolado por fibra ótica (figura 2).

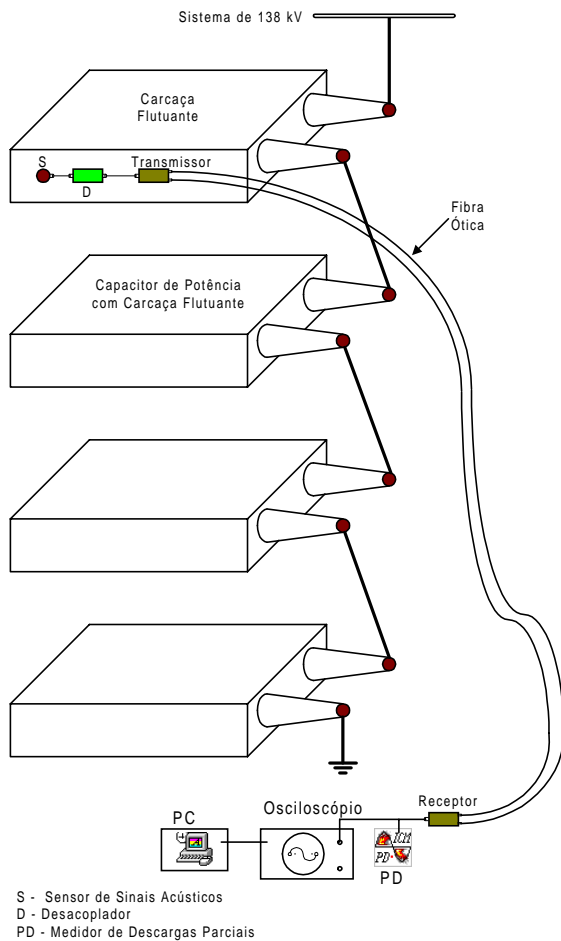


Figura 2 – Medição de Descargas Parciais pela metodologia acústica, em bancos de capacitores do sistema de 138 kV.

## 5.0 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO

Do ponto de vista das atividades experimentais fez-se inicialmente uma inspeção em alguns bancos de capacitores de sistemas de 13,8 kV da LIGHT. A finalidade dessa visita foi de verificar fisicamente as condições das instalações locais, infraestrutura, dificuldades de acesso aos capacitores, entre outros.

Um ponto importante na medição de sinais acústicos se refere às reais condições de aterramento das carcaças dos capacitores não só para fins de segurança pessoal como também para se evitar danos ao circuito de medição. Assim, teve-se por atividade inicial, a realização de algumas medições das tensões desses capacitores em relação à malha de aterramento no local.

Verificou-se que pode haver diferenças de potencial entre as várias carcaças e conexões elétricas dos capacitores. A tabela 1 abaixo apresenta alguns valores registrados em uma subestação litorânea.

Esta medição foi importante no sentido de se prover um reforço no aterramento de cada banco de capacitores, antes de se instalar o sistema de medição.

Tabela 1 – Níveis de tensão das carcaças de capacitores de potência de sistema de 13,8 kV

Banco Número	302	303	304	306	307	308
Tensão (Vrms)	230	230	130	250	240	180

Em termos de medição de Descargas Parciais, foi realizada uma montagem laboratorial em instalação não blindada, a qual possibilitou a medição simultânea de Descargas Parciais pela metodologia acústica e pela metodologia elétrica convencional, registrando-se os níveis de carga aparente em pC.

Foi utilizado um circuito balanceado para medição elétrica e foram utilizadas duas unidades capacitivas, cada qual com capacitância de 4,67  $\mu\text{F}$ . Uma dessas unidades apresentava descargas internas. Foram colocados alguns sensores acústicos em vários pontos dos capacitores, conforme pode ser visto na figura 3.

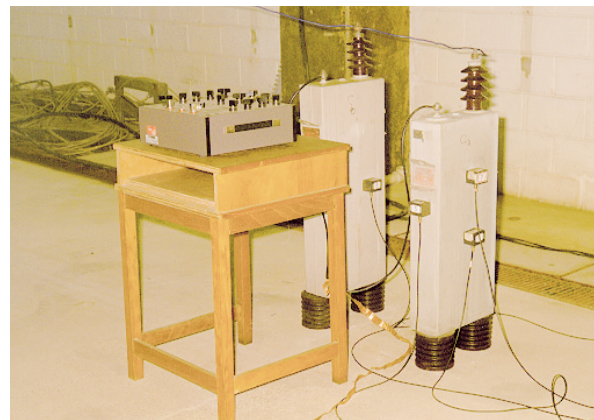


Figura 3 – Montagem laboratorial para medição de sinais acústicos em capacitores de potência e sua comparação com a medição elétrica normalizada.

Nas medições laboratoriais de Descargas Parciais pela metodologia acústica, aplicada a capacitores de potência, observou-se boa sensibilidade dos sinais registrados. Embora não se possa quantificar os níveis de Descargas Parciais com grande precisão, como é o caso da medição da carga aparente, foi verificado que valores a partir de 100 pC podem ser detectados pela metodologia acústica. Tal sensibilidade pôde ser alcançada porque esses equipamentos são bem compactos, fazendo com que os sensores estejam sempre bem próximos das fontes de descarga, não permitindo grandes atenuações de sinais úteis em

função de sua distância percorrida. Uma ordem de grandeza entre a sensibilidade esperada em função de amplitudes de Descargas Parciais medidas pelo processo elétrico, está apresentado na figura 4.

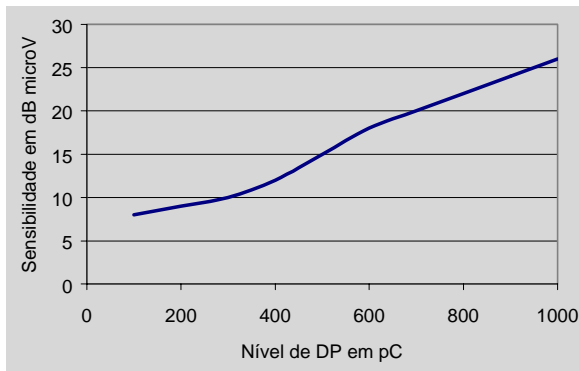


Figura 4 – Sensibilidade esperada em  $\text{dB}\mu\text{V}$  em função das amplitudes de carga aparente internas

Quando registrados via osciloscópio digital, os sinais acústicos possuem um comportamento no tempo conforme apresentado na figura 5. Normalmente consideramos a envoltória desses sinais para estimar uma correspondência com as amplitudes das descargas.

Estima-se que no caso de se poder detectar níveis de descarga entre uma centena de pC e alguns milhares de pC, será possível intervir no sistema antes que ocorra a perda da unidade por falha completa.

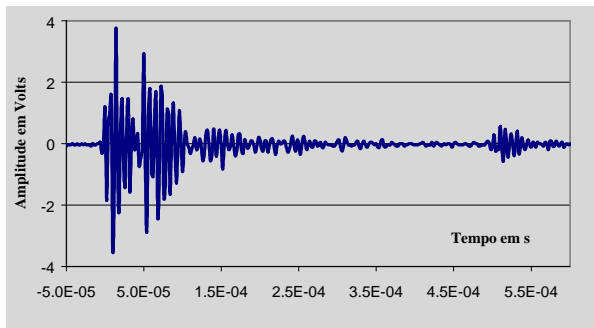


Figura 5 – Sinal característico de um sensor ultrassônico registrado no domínio do tempo

Quanto às medições em maior escala em subestações, estas foram apenas iniciadas até o momento presente. Em todo caso, verifica-se que estas não são difíceis de serem realizadas e que as medições não sofrem muitas interferências do ambiente. Como a taxa de capacitores defeituosos é pequena, não foram encontrados, numa primeira fase de avaliações, capacitores que tivessem níveis de Descargas Parciais elevados.

## 6.0 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A técnica acústica para detectar problemas internos de isolamento em equipamentos de alta tensão, talvez tenha sua melhor eficácia quando aplicada em

capacitores de potência, visto os tipos de dielétricos envolvidos e as dimensões físicas dos capacitores.

Além disto, essa medição é de certa forma fácil e rápida de ser realizada, não requer um procedimento ou equipamentos complexos e sofisticados e fornece resultados imediatos de avaliação. Outra conclusão laboratorial vem demonstrando que não é muito importante a posição dos sensores em relação às diversas faces do capacitor, visto sua geometria, seu volume compacto e as pequenas distâncias de propagação dos sinais.

Do ponto de vista da sensibilidade, observa-se que capacitores que estejam gerando a partir de 100 pC podem vir a ser detectados por essa técnica.

Assim, conclui-se que tal técnica demonstra-se plenamente satisfatória como ferramenta de manutenção preditiva de capacitores de potência.

## 7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Lundgaard, L. E., "Partial Discharge – Part XIII: Acoustic PD Detection – Fundamental Considerations, IEEE on Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No 4, July/Aug 92, pp. 25-31.
- [2] Austen, A.E.W.; Hacket, W.; "Journal Institution of Electrical Engineers"; vol. 91, part I, pp. 298-322; 1944.

