



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

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO VIII**

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

**DETECÇÃO DE PONTO QUENTE NA PARTE ATIVA DE EQUIPAMENTOS  
ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO A PARTIR DO RUÍDO ULTRA SÔNICO  
PRODUZIDO POR DESCARGAS PARCIAIS.**

**Gabriel Ângelo de B. Vieira**  
FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

**Francisco Martins Portelinha, D.Sc.**  
UNIFEI – Itajubá - MG

**Carlos Henrique Figueiredo Alves, D.Sc.**  
CEFET – RJ

**RESUMO**

Desligamentos de equipamentos de alta tensão causados por pontos quentes reduzem a confiabilidade operativa, dos sistemas de geração, transmissão e distribuição quando não identificados, em tempo de serem corrigidos. Técnicas baseadas em detecção à distância são as mais aplicáveis. A principal técnica em uso atualmente é a termografia.

Este trabalho apresenta uma nova técnica baseada na detecção do sinal ultra-sônico, produzido por descargas parciais (DP's) nos pontos quentes e na análise espectral dos padrões deste ruído ultra-sônico. São aqui apresentados os resultados dos testes realizados, inicialmente com tensões de 10 kV e posteriormente com tensões de até 200 kV.

**PALAVRAS-CHAVE**

Instrumentação, Ultra-som, Detecção de ponto quente, Descargas parciais, Equipamentos elétricos de alta tensão.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Medidas de temperatura utilizam duas técnicas básicas: técnica baseada em sensores de contato físico com o ponto a ser monitorado e a técnica baseada em sensores de detecção de irradiação das ondas eletromagnéticas na faixa do infravermelho. O monitoramento das conexões da parte ativa de equipamentos de alta tensão, baseado na técnica de contato físico utilizando termopares é impraticável, pois os pontos de monitoramento de interesse estão em elevados potenciais em relação a terra. Encontra-se em desenvolvimento sistemas de monitoramento que utilizam fibras ópticas para medição de temperatura por contato, em pontos situados na alta tensão, como por exemplo, a medição de temperatura dos reatores de filtro de harmônicos na subestação de Ibiúna no Brasil (1). A técnica de termovisão, com sensores colocados distantes do ponto de medição, é adequada para monitoramento das conexões nos sistemas de energia elétrica. Atualmente as empresas do setor elétrico utilizam esta técnica, para detectar as radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda na faixa do infravermelho (2), (3).

Esta técnica tem como vantagem a eficácia na detecção do ponto quente. Como desvantagens pode-se citar, o alto custo do equipamento de termovisão, tornando o custo do monitoramento por conexão elevado, considerando os milhares de pontos existentes dentro do sistema elétrico, e a necessidade de operadores especializados para a interpretação dos resultados.

Como opção, este trabalho propõe uma nova técnica de monitoramento de temperatura baseada em detecção das ondas ultrasônicas produzidas por descargas parciais (DP's) nos pontos quentes.

## 2.0. EFEITO CORONA E O MECANISMO DAS DESCARGAS PARCIAIS

Os contatos da quase totalidade dos equipamentos elétricos de alta tensão, não são abrigados em câmaras de extinção, como ocorre nos disjuntores de potência, mas expostos em contato direto com o ar atmosférico. Com o equipamento energizado, nos cantos e bordas destes contatos ocorrerá o efeito corona ou descarga parcial devido ao elevado campo elétrico nas regiões de fronteira entre estes componentes que se encontram em elevados potenciais e o ar atmosférico que os envolve.

Descargas parciais é um termo cotidianamente utilizado desde o passado. Sua base consolidou-se no começo dos anos de 1920, onde, já era considerado como um campo de pesquisa desenvolvido. Sua preeminente importância ferramental tem crescido para assistir na qualidade e no desempenho característico dos equipamentos de alta tensão (4). O termo “efeito corona” é, atualmente, considerado como um particular fenômeno de descargas parciais, em gases ou líquidos, que ocorrem ao redor de condutores submetidos a elevados campos elétricos, e que estão distantes de qualquer dielétrico sólido (5). Este termo não deve ser aplicado a outras formas de descargas parciais. O efeito corona é definido como o rompimento ou descarga em torno de um elemento energizado, sob a influência de um campo elétrico. O efeito corona ocorre quando o gradiente de potencial em torno de um elemento energizado supera um determinado valor crítico e que, para o ar, está em torno de 30 kV/cm (6). As vibrações produzidas por estas descargas vão desde centenas de kHz até centenas de MHz. Ruído audível, ultra-sônico e radio interferência são conseqüências do efeito corona. A utilização da técnica de ultra-som utilizando microfones seletivos direcionais com alta sensibilidade acima da faixa audível, acoplados a sistemas de aquisição e processamento de sinais digitais pode ser utilizada para detecção e caracterização das descargas de corona (5) e (7).

Para compreender o fenômeno de descargas parciais é preciso entender como são ionizados os átomos de um material dielétrico (8), (9). Para casos práticos de simples ionização, deve-se estabelecer a relação entre a diferença de potencial entre dois pontos a e b ( $V_{ab}$ ) e o campo elétrico ( $\vec{E}$ ). Essa relação está implícita na equação (2.1), onde se considera um dielétrico com comportamento linear, isotrópico e sistema homogêneo (a permissividade  $\epsilon$  do meio é estática ou é considerada constante para baixas freqüências) (4).

$$\nabla V = \nabla \phi = -\vec{E} \quad (2.1)$$

Uma formulação mais completa da Equação acima incluindo o efeito do potencial vetor de campo pode ser encontrada em (10). A equação (2.2) representa sistemas não homogêneos, onde o potencial escalar  $\nabla \phi$  corresponde a cargas estáticas ou fenômenos lentos,  $\frac{\partial A}{\partial t}$  é o componente para cargas dinâmicas ou fenômenos rápidos e  $A^*$  é o potencial vetor de uma fonte totalmente externa à região considerada (assume tipicamente valor nulo). Assim os potenciais das cargas são representados por  $\phi$  (escalar) e  $A$  (vetorial) (10). Além disso,  $\epsilon$  tem dependência da pressão, temperatura e freqüência (11).

$$\vec{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{1}{\epsilon} \nabla \times A^* \quad (2.2)$$

Em relação ao caso simples e prático, quando um campo elétrico é aplicado a um condutor, os elétrons da camada externa de seus átomos são facilmente arrancados e migram prontamente de átomo para átomo. Porém, os elétrons de um material dielétrico estão bem presos perto de suas posições de equilíbrio e não podem ser arrancados facilmente. Quando um campo elétrico é aplicado a um material dielétrico, este é polarizado, ou seja, há um deslocamento de cargas positivas e negativas da sua posição de equilíbrio, embora não haja migração de cargas neste caso. Em geral, este fato faz com que os materiais dielétricos (resinas, vidro, mica etc.) sejam bons isolantes.

Como foi mostrado pela equação (2.1), se a diferença de tensão entre os eletrodos é aumentada, o aumento do campo elétrico alcançará um ponto onde as forças externas exercidas no elétron serão maiores que as forças internas e, o elétron será então “arrancado” da sua órbita. O átomo estará então ionizado, ou seja, se tornará um íon positivo. O processo de ionização principal, no entanto, é a ionização por colisão entre um elétron e um átomo ou molécula neutra. Os elétrons e íons positivos provenientes do processo de ionização e recaptura de elétrons, são suficientes para conduzir corrente entre os eletrodos e absorver uma quantidade considerável de potência da fonte, fazendo com que uma centelha surja entre os eletrodos. Quando ocorre o centelhamento, diz-se que há uma ruptura do material dielétrico. Como esta centelha normalmente não atravessa completamente o material dielétrico entre os eletrodos, origina assim uma descarga parcial.

### 3.0 - TÉCNICA DE DETECÇÃO BASEADA EM VARIAÇÃO DO RÚIDO ESPECTRAL ULTRA SÔNICO.

A ocorrência de um ponto quente em um contato elétrico, com elevada resistência de contato, provoca o aquecimento do ar nas regiões de fronteira entre este componente e o ar atmosférico. Nesta situação, estando este componente em um elevado potencial, o ar que o envolve, se comporta como o dielétrico, e a elevação da temperatura do mesmo na região próxima ao componente, afetará, entre outros fatores, a sua permissividade e conseqüentemente as condições de ocorrência do processo de ionização e subseqüentes descargas parciais.

O tipo de correlação que é realizada para a detecção de pontos quentes em conexões ou contatos elétricos na parte ativa de equipamentos de alta tensão, é a comparação, a partir do uso de ultra-som, entre os padrões espectrais de ruído ultra-sônico das descargas parciais que ocorrem em componentes operando em temperaturas normais de serviço submetidos a uma dada tensão e os padrões obtidos nestes componentes operando em altas temperaturas (ocorrência de pontos quentes) submetidos à mesma tensão. Há uma diferença em módulo e freqüência entre o padrão espectral ultra sônico do componente (conexão elétrica) operando em temperatura normal e o padrão espectral quando submetido a temperatura elevada.

### 4.0 – METODOLOGIA DE MEDIDAS

No intuito de eliminar uma série de interferências que ocorrem no pátio de uma subestação de alta-tensão, os experimentos foram realizados em laboratório. Foi desenvolvida uma célula para a realização dos ensaios. Esta célula permite realizar o controle da temperatura de um elemento térmico de referência – ETR, o qual representa o contato elétrico sob diagnóstico. As etapas de montagem do setup de medidas foram as seguintes:

- Projeto de uma célula de ensaio para simulação de ponto quente em equipamento de alta tensão;
- Teste operativo da célula ensaio em condições de bancada, (calibração do elemento térmico de referência – “ETR”);
- Testes operativos da célula de ensaio com fonte de média tensão AC e freqüência industrial (60Hz), ensaio preliminar de média tensão - 10 kV, para verificar o correto funcionamento do circuito de controle remoto de temperatura do “ETR” em condições de interferência eletromagnética provocada por efeito corona;
- Testes de correlação com a célula de ensaio com fonte de 10 kV e freqüência industrial (60Hz), no laboratório da empresa DSP, em Santa Rita do Sapucaí;
- Testes de correlação com a célula de ensaio no laboratório de medidas elétricas do Centro Técnico de Ensaios na Usina de Furnas – Passos/MG, com fonte de alta tensão e freqüência industrial (60Hz) e com controle do nível de tensão AC (ensaio de alta-tensão a freqüência industrial);

Para simular as variações espectrais do ruído ultra-sônico, através da célula de ensaio, são necessárias as seguintes condições:

- (1) Monitorar-se um ponto metálico chamado “elemento térmico de referência” (ETR), o qual irá representar um contato elétrico isolado da terra;
- (2) O ETR deverá ser submetido a um elevado potencial que possa ser ajustado e mantido fixo durante cada medição, tal como nas condições reais de operação;
- (3) O ETR deverá oferecer a possibilidade de ter sua temperatura ajustada e medida remotamente, em uma distância segura em termos de isolamento, para as tensões a serem aplicadas ao ETR para as várias condições de medição.

Desta forma, estando o ETR submetido a um potencial elevado, poderá ser variada a temperatura do mesmo, simulando a possível ocorrência de um ponto quente em um contato elétrico.

O efeito corona é inerente ao ETR sempre que o mesmo estiver submetido a um potencial elevado, independentemente de sua temperatura estar ou não elevada. Para um dado potencial fixo aplicado ao mesmo, o que se busca detectar e caracterizar, são as diferenças entre os padrões espectrais de ruído ultra-sônico produzido pelas descargas parciais (efeito corona na superfície do ETR) quando há variação de temperatura do mesmo.

Após a obtenção e correlação destes padrões, para várias temperaturas a uma tensão aplicada constante, uma dada temperatura ajustada no ETR poderá ser conhecida a partir do padrão de ruído espectral obtido para esta condição, dentro de uma margem de erro a ser estabelecida. Devido à necessidade de isolamento elétrico entre a célula de ensaio e a terra, o controle de variação da temperatura do ETR foi realizado via radiofrequência.

#### 5.0 - SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de aquisição de dados é constituído dos seguintes equipamentos: Pistola de ultra-som Ultraprobe 2000 da Instronic, Osciloscópio Tektronix TDS 2014B, Câmera de ultravioleta DayCor<sup>®</sup> Superb, Câmera de termovisão FLIR P60 e características construtivas de um equipamento de alta tensão de referência (secionador de 345kV) utilizado amplamente em sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão e fonte de alta tensão HIPOTRONICS.

- **Pistola de ultra-som Ultraprobe 2000 da Instronic** - O Ultraprobe 2000 é um equipamento de detecção de ruído ultra-sônico que opera pelo princípio de batimento entre as frequências do sinal captado, com a frequência de um oscilador interno que pode ser variada, de forma a obter-se em sua saída um sinal na faixa audível de 2,5 kHz.
- **Câmera de ultravioleta DayCor<sup>®</sup> Superb**, é um dispositivo projetado para gerar imagens visíveis de ultravioleta (UV) à luz do dia, com o objetivo de detectar fontes emissoras de UV, tais como arco elétrico e corona. O objetivo de sua utilização nos ensaios foi obter-se padrões comparativos de imagem de descargas parciais no ETR a uma dada tensão aplicada em duas temperaturas diferentes.
- **Câmera de termo visão FLIR P60**. Utilizada para a medição e registro (termogramas) de temperaturas à distância, na técnica de termografia baseada na detecção das radiações eletromagnéticas com comprimentos de onda na faixa do infravermelho.
- **Osciloscópio Tektronix TDS 2014B**

Utilizado para aquisição e processamento dos sinais na faixa audível, obtidos após o batimento de frequências do sinal de ruído ultra sônico captado, com o sinal do oscilador interno da pistola de ultra-som Ultraprobe 2000.

- **Fonte de alta tensão ajustável até 345 kV**, com capacidade de fornecer tensões ajustáveis de 0 a 345 kV RMS na frequência de 60 Hz.

#### 6.0 – CONDIÇÕES DE EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Para a execução dos ensaios visando à simulação de uma condição real normal e anormal de operação de um dado contato elétrico, os seguintes passos foram realizados:

- ❖ A partir das características do secionador de referência, foram levantadas as distâncias de isolamento entre fases e fase e terra em que seus componentes da parte ativa são instalados. Estas distâncias foram utilizadas para os espaçamentos entre o ETR e o piso do laboratório, de forma a apresentar condições de campo elétrico semelhante em relação à situação real de operação do equipamento.
- ❖ A célula de ensaio foi instalada no barramento de saída da fonte de alta tensão de 345kV HIPOTRONICS do laboratório do Centro Técnico de Ensaios em uma altura em relação ao piso representativa das condições reais de operação do secionador utilizado como referência. A Figura 1 apresenta o leiaute dos sistemas de aquisição e registro utilizados nos ensaios e a Figura 2 o leiaute com o posicionamento do ETR em relação ao piso.

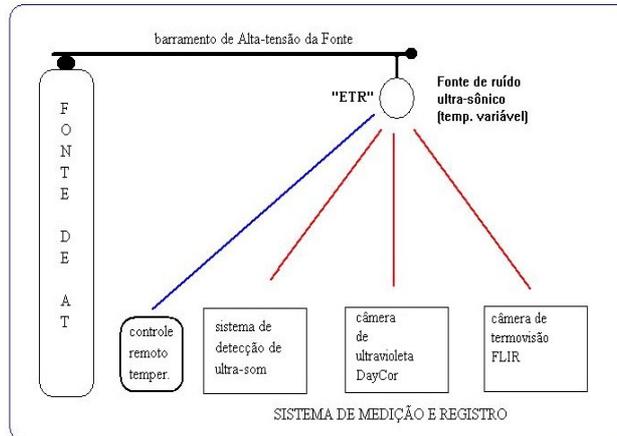


FIGURA 1 – Disposição dos equipamentos para execução dos ensaios.

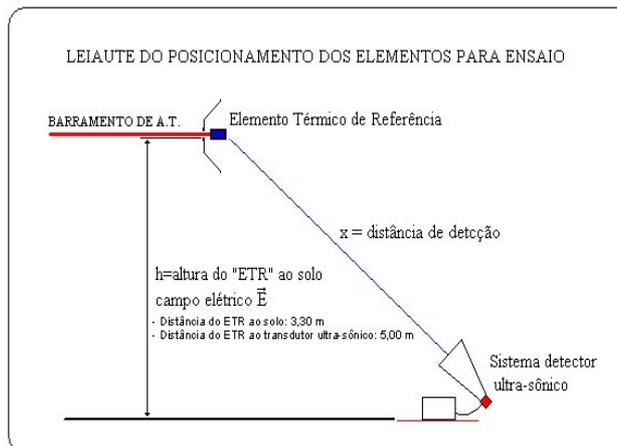


FIGURA 2 – Leiaute de posicionamento do ETR em relação ao piso e detector de ultra-som

- ❖ A iluminação ambiente, por utilizar reatores magnéticos geradores de ruído ultra-sônico foi desligada, e o laboratório foi fechado de forma a evitar-se ao máximo a circulação de correntes de ar que dificultariam o controle de temperatura do ETR.
- ❖ Foi levantada a condição inicial do ambiente, tais como medida da temperatura, umidade do ar e pré-testados o funcionamento do controle remoto de temperatura da célula e dos sistemas de medição e registro.

### 6.1 - Seqüência de execução dos ensaios

- Ajuste do termovisor

Inicialmente, com a fonte de alta tensão desligada, procedeu-se o ajuste de emissividade do termovisor FLIR, aplicando-se um termopar diretamente ao ETR da célula, e variando-se a sua temperatura, realizando a leitura destas, no termovisor.

- Execução das medições

As medições foram realizadas para diversas condições de temperatura do elemento térmico de referência e diversas tensões AC aplicadas à célula de ensaio, de forma a obter-se os padrões de ruídos espectrais das descargas parciais para várias temperaturas em várias classes de tensão de operação usuais para os equipamentos dos sistemas elétricos de potência.

### 6.2. Classe de Tensão x Tensão Aplicada ao ETR

$V_1 = 17 \text{ kV}/\sqrt{3}$	→	10 kV
$V_2 = 69 \text{ kV}/\sqrt{3}$	→	39,2 kV
$V_3 = 138 \text{ kV}/\sqrt{3}$	→	76,9 kV
$V_4 = 230 \text{ kV}/\sqrt{3}$	→	132,8 kV
$V_5 = 345 \text{ kV}/\sqrt{3}$	→	199 kV

### 6.3. Temperaturas Ajustadas no ETR

$T_1= 30^\circ\text{C}$ ,  $T_2=70^\circ\text{C}$ ,  $T_3=100^\circ\text{C}$ ,  $T_4=283^\circ\text{C}$ ,  $T_5=442^\circ\text{C}$ .

### 6.4. Registros realizados

- Para cada temperatura do ETR, a uma dada tensão fixa aplicada, foram realizados os seguintes registros:
  - a) 01 registro do termograma do ETR;
  - b) 01 registro da tensão AC aplicada
  - c) 01 registro da imagem de ultravioleta do ETR;
  - d) 01 registro da temperatura e umidade ambiente;
  - e) 03 registros dos espectros de freqüências do ruído ultra-sônico obtido para cada condição de ensaio.

### 7.0. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

São apresentados a seguir (Figuras 3, 4 e 5) alguns dos padrões espectrais do ruído ultra-sônico obtidos, para a condição de tensão AC aplicada de 10 kV, 60 Hz, estando o ETR nas temperaturas de  $30^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$  e  $442^\circ\text{C}$ . Foi aplicada a função de média móvel do programa Microsoft Excel com período 2, nos valores das amplitudes em dB para estes espectros de freqüências. Todos os outros parâmetros de influência no fenômeno foram, dentro das possibilidades do laboratório, mantidos constantes. A Figura 6 apresenta a sobreposição das curvas anteriores.

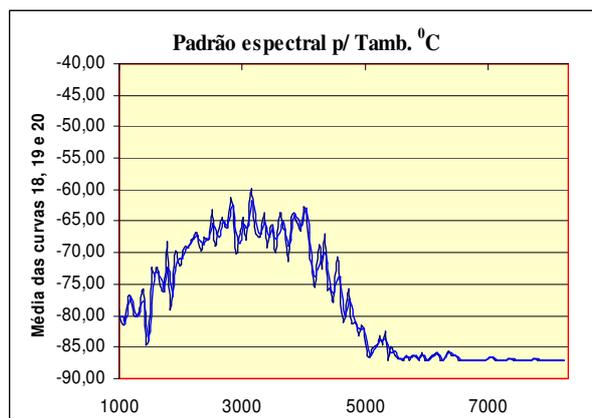


FIGURA 3 - Padrão espectral para tensão de 10 kV e temperatura do ETR de  $30^\circ\text{C}$ .

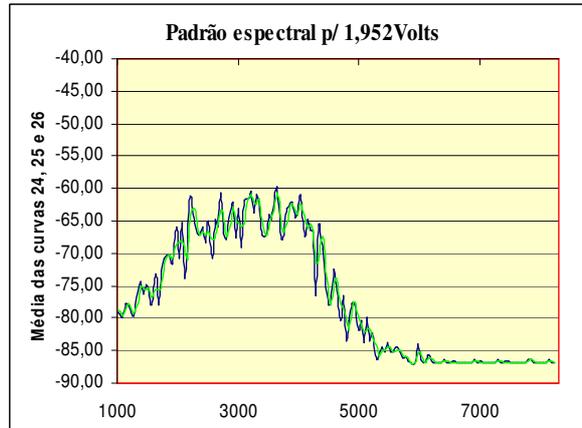


FIGURA 4- Padrão espectral para tensão de 10 kV e temperatura do ETR de 100 °C

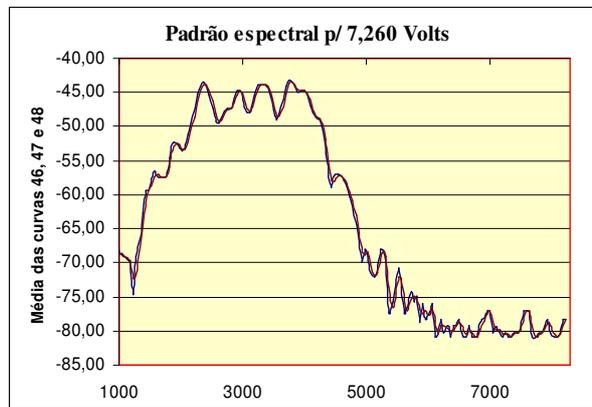


FIGURA 5 - Padrão espectral para tensão de 10 kV e temperatura do ETR de 442 °C.

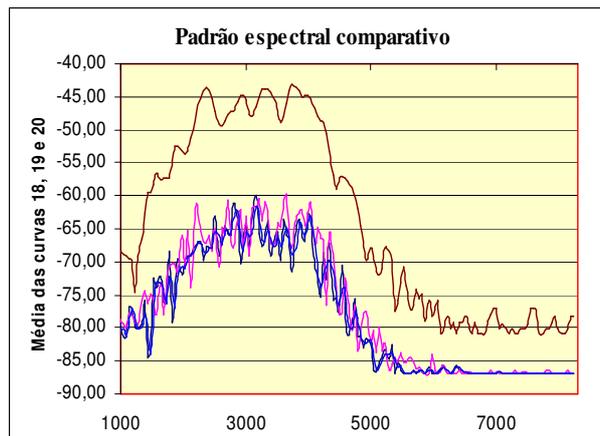


FIGURA 6 – Sobreposição dos padrões espectrais para tensão de 10 kV e temperaturas de 30 °C, 100 °C e 442 °C.

## 8.0. CONCLUSÃO

- Como pode ser observado na figura 6, onde foram sobrepostos (na mesma escala) os padrões espectrais obtidos para as temperaturas de 30 °C, 100 °C e 442 °C, ocorre uma identificável alteração das amplitudes (dB) entre os padrões espectrais obtidos para as três temperaturas do ETR para a mesma tensão aplicada;
- Para outras condições de medição realizadas nos primeiros ensaios na Empresa DSP TELECOMUNICAÇÕES, tais como; variação da distância do ETR ao detector da pistola de ultra-som até a distância de 9 metros e tensão AC aplicada ao ETR de 10 kV, também foi possível a identificação dos padrões respectivos a cada uma das temperaturas ajustadas ao ETR;
- Nas medições dos padrões espectrais obtidos em tensões AC mais elevadas aplicadas ao ETR, o ruído ultra-sônico produzido pela elevação do nível de corona nos outros componentes obrigatoriamente também submetidos à alta tensão, tais como; barramento da fonte de AT, case da célula de ensaio, etc., provoca o mascaramento acentuadamente progressivo (com a elevação da tensão), dos padrões espectrais obtidos para duas diferentes temperaturas. Este efeito, embora inicialmente indique uma redução da capacidade de utilização desta técnica para detecção de pontos quentes, nas condições reais de operação dos contatos (pátio das subestações), o mesmo, poderá ser suficientemente atenuado a partir da aplicação de adequadas técnicas de processamento digital de sinais, viáveis para caracterizar fontes de sinais de descargas parciais tais como, ICA (análise de componentes independentes), BSS (separação cega de sinais), PCA (análise de componentes principais), HOSA (estatísticas de alta ordem), entre outros (4);
- A realização de medições de padrões de ruído ultra-sônico produzidos por DP's para identificação de falhas em equipamentos de alta tensão em condições reais de operação dos equipamentos, é dificultada pela influência dos inúmeros fatores não facilmente controláveis, tais como flutuações no valor da tensão aplicada, influência da temperatura ambiente, bem como por diversas fontes de ruído poluentes, que se acoplam ao sinal e ao sistema de medição;
- Este trabalho apenas apresenta o estado da arte quanto à possibilidade de utilização de uma nova correlação para medição de temperaturas a distância. Após a realização de novos ensaios e aplicação de adequadas técnicas de processamento dos sinais obtidos, a mesma tem potencial para ser utilizada de forma prática, dentro das limitações a serem estabelecidas.

## 9.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Desenvolvimento de Tecnologia Óptica para Medição Multiponto de Temperatura de Filtros de Harmônicos, REVISTA FURNAS -ANO XXXI Nº 324 SETEMBRO 2005
- (2) Electric Power Applications of Infrared and Thermal Testing, Cap. 16, I. Maldague, Xavier X.P. II. Moore. Patrick O. III. Series: Nondestructive testing handbook (3rd ed.) ISBN 1-57117-044-8.
- (3) Diagnóstico de Campo da Condição Operativa de Subestações de 138 kV através de Termovisão – J.T. Barreto Junior, S. G. de Carvalho, M. J. de Oliveira, H. J. A. Martins e A. N. da Silva.
- (4) Huamán Cuenca, Walter Martin – Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais [Rio de Janeiro] 2005 XIV, 140p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Elétrica 2005)
- (5) DETECÇÃO E MEDIÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS – Marcio Antônio Sens – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Rio de Janeiro, junho de 1989.
- (6) REVISTA SIEMENS III (1983) Nº 1 – Engo José R. de Barros, Nelson R. Brant – Siemens - São Paulo/SP
- (7) NBR 6940 – TÉCNICAS DE ENSAIOS ELÉTRICOS DE ALTA TENSÃO – MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS, NOV/1981
- (8) Bartnicas R, Corona Discharge Processes in Voids. In: R Bartnicas, E. McMahon, Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation Vol. I, Chapter 2, Philadelphia, ASTM, 1979.
- (9) Engineering Dielectrics. Electrical Insulation Liquids, Vol.III, ASTM, USA,1994.
- (10) Stratton J.A., Eletromagnetic Theory, McGraw Hill book Company, NY, 1941.

(11) Malik N. H. and Al-rainy A. A., Statically Variation of dc corona pulse amplitudes in point-to-plane air gaps, IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. 22, No. 6, 825-829, 1987.