XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS ACOPLADORES CAPACITIVOS NA SENSIBILIDADE DA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Nome Hélio P. A. Junior(*) CEPEL
Alain F. S. Levy CEPEL
André T. Carvalho CEPEL

RESUMO

O estudo possui um apelo prático relativo à medição de descargas parciais em máquinas rotativas, pois o principal mecanismo existente para a medição passa pela definição e instalação do acoplador capacitivo. O valor adotado no acoplador tem importância fundamental na sensibilidade do circuito de medição. Para complementação dos resultados laboratoriais, um estudo aprofundado foi realizado em uma instalação do setor elétrico brasileiro. A possibilidade de inserção defeitos em diversos pontos do enrolamento estatórico da máquina e registro dos sinais através dos acopladores capacitivos, nos permitiu observar de que forma o sinal original é atenuado pelo enrolamento e a partir disto responder algumas perguntas a respeito do comportamento dos sinais de Descargas Parciais com a análise no domínio da freqüência. Além disto, pode-se avaliar, em um enrolamento completo, a influência do acoplador capacitivo na sensibilidade da medição. Sendo assim o IT pretende apresentar e discutir os resultados das medições de Descargas Parciais em máquinas elétricas rotativas sob influência do acoplador capacitivo adotado e avaliar a sensibilidade do circuito de medição e sua resposta no que tange à resposta em freqüência com diversos acopladores capacitivos existentes no mercado.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Parciais, Sensibilidade na Medição e Capacitor de Acoplamento

1.0 - INTRODUÇÃO

Embora o assunto já tenha sido apresentado e discutido em alguns eventos específicos sobre monitoramento de máquinas elétricas rotativas, com a evolução dos sistemas digitais, em especial dos analisadores de freqüência, um novo estudo, agora com informações mais consistentes pôde ser realizado e novas colocações podem ser expostas à comunidade científica brasileira.

A questão sobre a sensibilidade da medição de Descargas Parciais em equipamentos elétricos torna a surgir ano após ano nos fóruns especializados. Questões relativas à atenuação dos sinais e supressão de ruídos tem, em alguns casos, afastado algumas das grandes empresas nacionais deste tipo de monitoramento, muito em virtude da insegurança em responderem tais questões.

Dentre as muitas possibilidades de circuitos de medição utilizáveis, predominam no mercado soluções adotando acopladores capacitivos de 80, 145, 500, e de até 1000 pF, sendo ainda a real influência desses valores muitas vezes ignorada.

Nesse artigo pretende-se colocar novamente o tema em pauta e discutir, baseado em simulações computacionais, dados laboratoriais de cada acoplador supracitado, e experiências no campo em usinas hidrelétricas, quais as implicações em usar um acoplador capacitivo de um ou outro valor. Será considerado, particularmente, as influências da atenuação de sinais ao longo dos enrolamentos estatóricos e das diferentes bandas de freqüência utilizadas por diferentes sistemas digitais de medição.

(*) Av. Horácio Macedo, s\n, Cidade Universitária CEP 21941-598 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6219 – Fax: (+55 21) 2270-4189 – Email: amorim@cepel.br

Finalmente será demonstrada uma análise do compromisso entre acoplador capacitivo, banda de freqüências e ruídos de menor freqüência que incidem nos diferentes tipos de circuito de medição.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DOS CIRCUITOS DE MEDIÇÃO

A ocorrência de DP no isolamento de um equipamento elétrico manifesta-se na forma de um trem de pulsos de alta freqüência, da ordem de milivolts, superpostos à tensão aplicada no equipamento.

A Figura 1 mostra, à esquerda, um pulso elétrico de uma descarga parcial no isolamento de uma barra de gerador. À direita, a Figura 1 mostra o trem de pulsos de DP aquistados ao longo de um ciclo da rede.

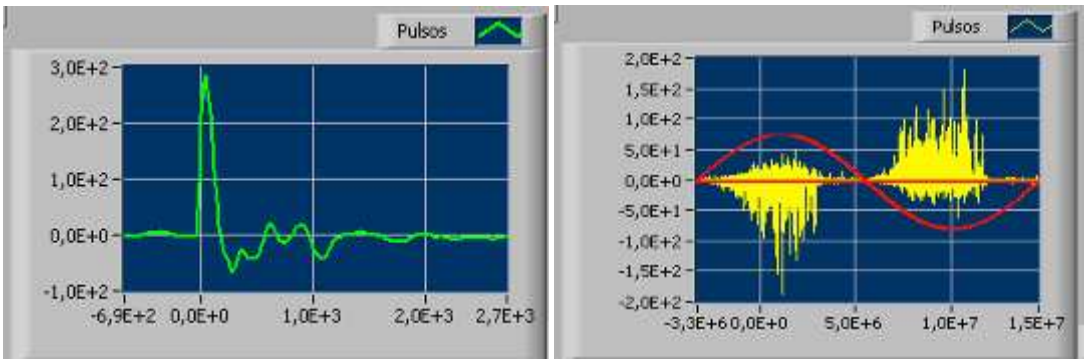

Figura 1 - À esquerda: pulso de descarga parcial. À direita: trem de pulsos ao longo de um ciclo da senóide. Em ambos os gráficos, a escala vertical é dada em mV, e a horizontal em nano-segundos.

Tratando-se de um sinal de alta freqüência, o sinal de DP pode ser aquistado através do circuito de medição mostrado na Figura 2. O fenômeno de DP é captado através do capacitor de acoplamento C1 e medido sobre a impedância de medição Z (tipicamente da ordem de algumas dezenas de Ohms). Note que C1 e Z constituem um filtro passa altas, que elimina as componentes de baixa freqüência do sinal, possibilitando a aquisição do sinal de DP pelo equipamento de medição.

No entanto, para a caracterização do defeito no isolamento, é conveniente registrar os pulsos de DP em função da fase da senóide em que estes ocorreram. Para tanto, Utiliza-se o divisor capacitivo formado por C2 e C3, de modo a obtermos um sinal de sincronismo pela fase de alimentação. Este sinal pode ser fornecido a partir dos TPs associados ao gerador.

Ambos os sinais, de DP e de sincronismo, seguem para o equipamento de medição, onde serão aquistados e processados.

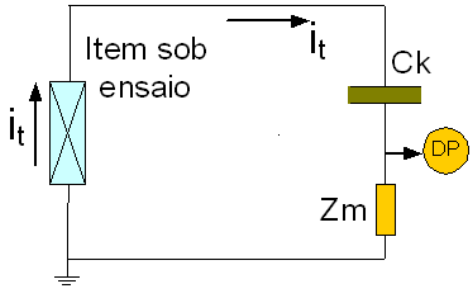

Figura 2 - Circuito de Medição de Descargas Parciais.

Os sinais de descargas parciais são, portanto, medidos a partir de capacitores de acoplamento conectados em pontos pré-definidos ao longo dos circuitos das fases do enrolamento estatórico. Conforme as características do gerador e a filosofia de medição podem ser instalados diversos acopladores por circuito. Não existe uma forma precisa de se definir um número mínimo necessário de acopladores posto que qualquer critério que viesse a ser adotado não seria possível de se quantificar com precisão o nível das descargas e nem estabelecer sua posição relativa dentro do estator.

Isso ocorre porque o enrolamento do estator se comporta em alta freqüência como circuitos distribuídos com indutâncias série e capacitância em paralelo, tal como uma linha de transmissão. Esse comportamento faz com que os sinais correspondentes às descargas tenham diferentes amplitudes em função de seu local de ocorrência e da posição relativa do acoplador onde está sendo realizada a medição. A conclusão a que se chega é que a medição de descargas parciais deve se propor a estabelecer um comportamento estatístico do enrolamento como um todo e identificar a evolução dos níveis de descarga ao longo do tempo. Conforme a técnica de análise utilizada é possível também estimar o tipo de defeito que estaria ocorrendo no estator.

Com essas premissas algumas flexibilizações podem ser consideradas no processo de medição das descargas parciais. A diversidade de montagens possíveis dos circuitos de ensaio permite a realização de medições em diversas faixas de freqüência. Assim, conforme a instalação a ser considerada, é possível ajustar as faixas de freqüência mais sensíveis para cada tipo de enrolamento e, se for o caso, para cada acoplador instalado.

2.1 Capacitor de Acoplamento

Os sinais de DP, de alta freqüência, que ocorrem no interior do sistema isolante de uma máquina rotativa, podem ser capturados capacitivamente através dos acoplamentos. Os capacitores formam um caminho natural para as correntes de freqüência um pouco mais elevada. A definição do acoplador e de seu valor deve levar em conta a capacitância do objeto a ser avaliado bem como a faixa de freqüência que se deseja realizar a medição. Na realidade, o capacitor de acoplamento funciona como um filtro passa-alta quando conectado ao enrolamento estatórico, e fazendo uma terminação com um resistor, que pode ser de 500, 1000 ou mesmo de 1500 ohms.

No mundo comercial alguns valores de capacitor foram estabelecidos como uma certa padronização. Assim, é possível encontrar capacitores de 80pf, 145pf e até 500pF. Como exemplo, uma configuração típica no sistema elétrico brasileiro é usando um acoplador de 80pF com uma resistência de 690ohm. Esta configuração apresenta uma freqüência de corte superior aproximada de 2,8 MHz, o que significa que sinais abaixo desta freqüência serão significativamente atenuados, o que pode representar perdas nos sinais de DP. A figura 3 demonstra a resposta em freqüência quando comparamos o arranjo usando o acoplador de 80, 500 e 880 pF. De maneira qualitativa a freqüência inferior de corte é 2,87 MHz, 450 kHz e 258 kHz, respectivamente.

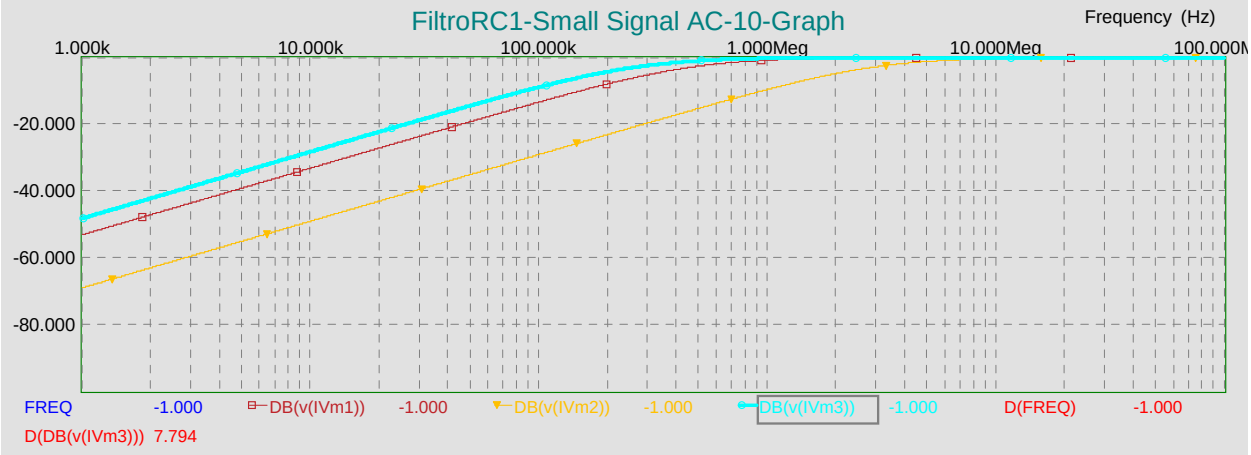

Figura 3 – Resposta em Freqüência de Cada um dos Acopladores Simulados – 80 pF, 500 pF e 880 pF

A instalação e o número de acopladores também é um fator que deve ser bem analisado e discutido, tanto no âmbito técnico como econômico. A definição do número de acopladores está relacionada com a dimensão física da máquina, pois sabe-se que os sinais de alta-frequência se atenuam enormemente nos enrolamentos estatóricos. Desta forma, caso se deseje aumentar a área analisada do enrolamento, um número maior de acopladores deve ser instalado. Entretanto, na maioria dos casos, em máquinas de pequeno e médio porte, um acoplador em cada fase é o suficiente para uma boa avaliação do estado do isolamento.

A figura 4 a seguir, mostra os dois tipos de acoplamento possíveis, um no interior do enrolamento (foto à esquerda) e outro na saída de fase (foto à direita).

Figura 4 – Acopladores Capacitivos Instalados

3.0 - ANÁLISE DOS SINAIS DE DP NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Medir sinais de DP em freqüências mais altas, como é indicado quando o acoplador de 80 pF é utilizado, apresenta mais uma inconveniência técnica relacionado à atenuação do sinal em altas freqüências. Considerando o enrolamento estatórico uma grande linha de transmissão, que possui os parâmetros elétricos resistência, indutância e capacitância, a atenuação de um sinal rápido no tempo se intensifica na medida em que aumentamos a freqüência de avaliação. Assim, quando o acoplador de 80 pF é empregado, além de termos uma freqüência de corte elevada, obrigando-nos a realizar a medição em uma freqüência mais alta, ainda se sobressai o problema da atenuação agravada quando trabalhamos em freqüências mais elevadas.

A Figura 5 a seguir demonstra uma das simulações realizadas em um enrolamento de uma grande máquina do setor elétrico brasileiro. Foi inserido um sinal no início do enrolamento, através de um gerador de degraus. Este ponto onde foi inserido o sinal é considerado 100% do enrolamento e o sinal foi capturado em outros pontos ao longo do enrolamento. Além disto, foram usados diversas faixas de freqüência que avaliam a atenuação em função da banda de freqüência medida.

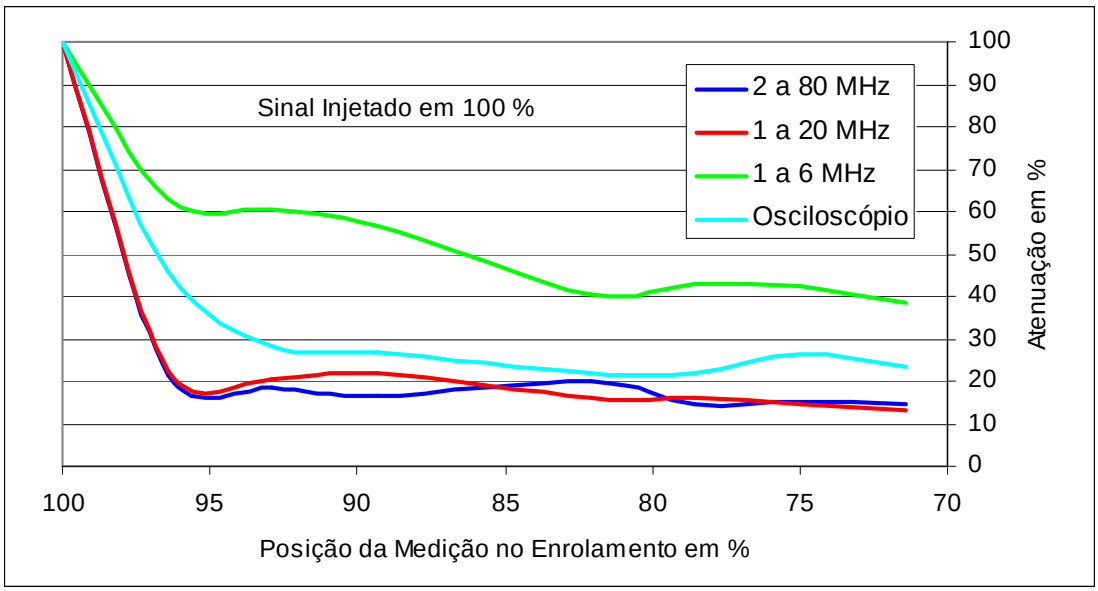

Figura 5 - Atenuação percentual obtida com o gerador de degraus. Os sinais foram integrados em várias faixas de freqüência. Apresenta-se também os resultados obtidos nos registros feitos no tempo, com osciloscópio; O sinal foi aplicado sempre em 100 % e a medição foi realizada em vários pontos ao longo do enrolamento.

4.0 - ESTUDOS DE CASOS

Os acopladores foram fisicamente conectados a uma barra estatórica de 13,8 kV. A tensão aplicada foi de 8,0 kV. Foram utilizados acopladores com valores distintos de 80 pF, 500 pF e 880 pF. O arranjo físico pode ser visto na Figura 6 a seguir. Para registrar os sinais foram utilizados o Osciloscópio Tektronix 3528 e o sistema de medição desenvolvido pelo Cepel denominado IMA-DP [1].

Figura 6 – Arranjo Físico de Medição de DP em uma Barra Estatórico no Laboratório

Os resultados da medição podem ser vistos nas Figuras 6 e 7, sendo o sinal no domínio do tempo e sua respectiva resposta em frequência.

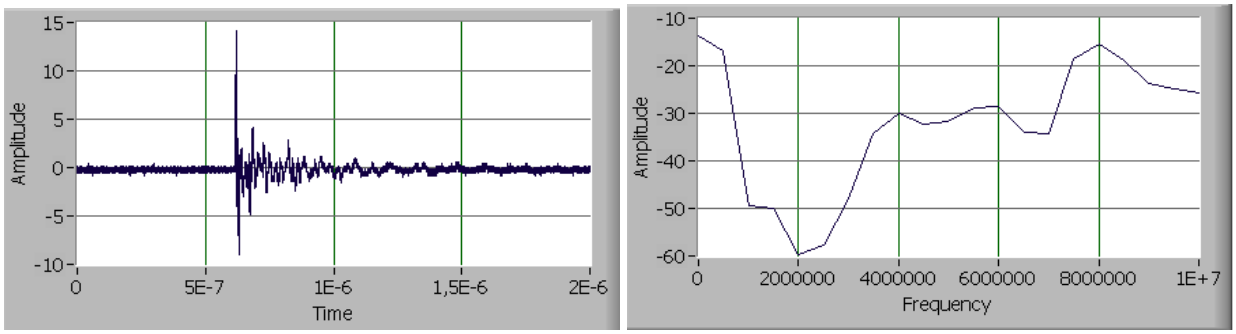

Figura 6 – Sinal no Domínio no Tempo e Sua Resposta em Freqüência até 10 MHz – Acoplador de 80 pF

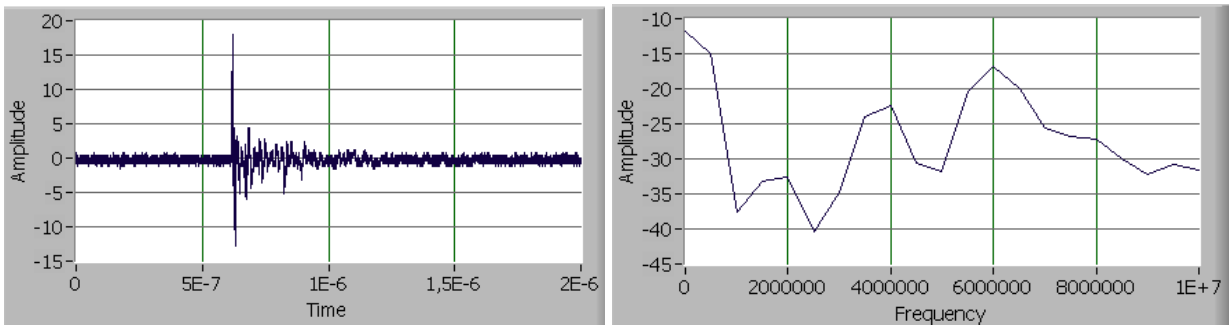

Figura 7 – Sinal no Domínio no Tempo e Sua Resposta em Freqüência até 10 MHz – Acoplador de 500 pF

A amplitude máxima dos pulsos de DP foram bem superiores quando comparamos o acoplador de 500 pF e 80 pF. Além disto o número de pulsos detectados quando o acoplador de 500 pF foi utilizado foi muito maior do que 80 pF, considerando as mesmas condições de teste, inclusive o mesmo equipamento avaliado, veja um mapa característico de DP na Figura 8. Desta forma, é possível afirmar que a sensibilidade do acoplador de 500 pF é

bem superior ao de 80 pF. Veja o resumo das medições, em valores médios, na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Comparação entre Números de Pontos medidos pelo IMA-DP

	No. Pontos	Amplitude Máxima (mV)	Carga Média (mV\s)
80 pF	5500	14,2	1000
500 pF	7016	25	1220
880 pF	8200	30	1330

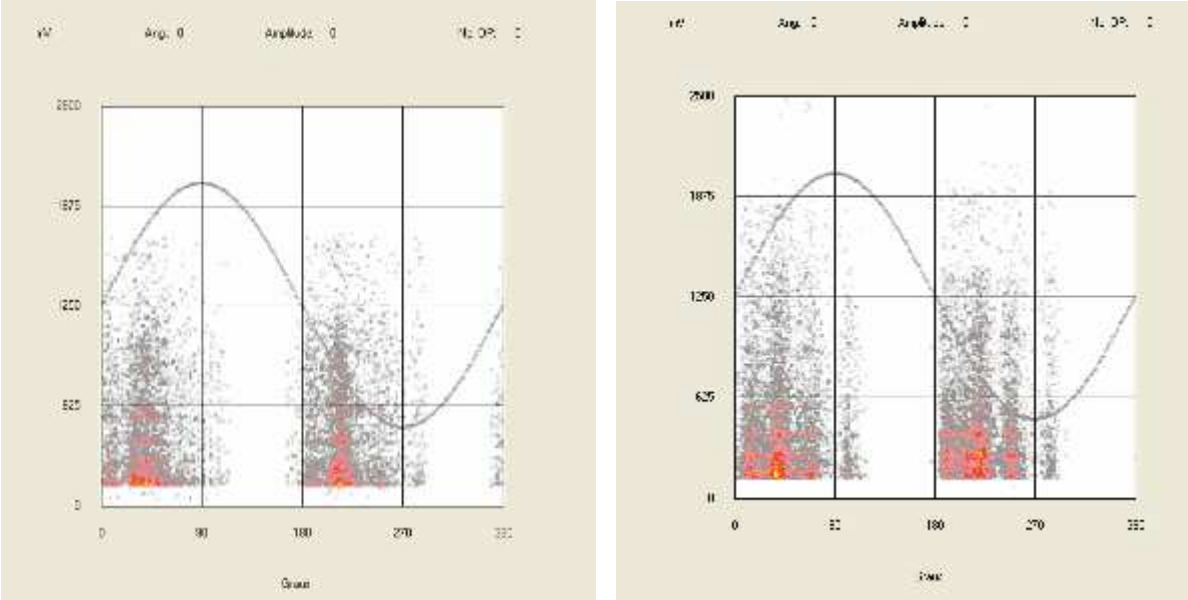

Figura 8 – Mapa Representativo das Descargas Parciais – 80 e 500 pF

5.0 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Não restam dúvidas técnicas, apresentadas a partir de simulações computacionais e por experiências laboratoriais usando sistemas de medição de DP, que a utilização dos acopladores de 80 pF representam uma limitação na sensibilidade da medição de DP. Alem de apresentar um freqüência inferior de corte muito superior aos outros acopladores comerciais existentes, o que dificulta a medição de sinais em freqüências mais baixas e obriga a medição em altas freqüências, tem-se o fenômeno acentuado de atenuação em virtude da necessidade de medir em altas freqüências.

Considerando o ceticismo de diversos técnicos de diversas empresas do setor elétrico brasileiro no que tange a eficácia deste método de avaliação das condições do isolamento estatórico, torna-se difícil o convencimento contrario quando fatos como este não são convenientemente esclarecidos. Questões sobre sensibilidade de medição são sempre levantadas nos fóruns nacionais, e invariavelmente por técnicos de empresas que possuem este tipo de medição, o que nos leva a conclusão de que esclarecimento técnico foi escasso pelos difusores que encamparam o acoplador de 80 pF. Acreditamos que, muito deste ceticismo provem da omissão de informações por parte destes difusores, o que pretendemos minimizar com a publicação deste IT.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Carvalho, A. T., Levy, A. F. S., Amorim, H. P. Jr, Rocha, R. O., Sans, J. e Nascimento, L., “Sistema para Medição e Análise e Diagnóstico de Descargas Parciais - Uma Proposta de Arquitetura Econômica Versátil e Integrada” – II ENAM – 2004 – Belém - PA – Brasil

[2] Zhu, H., Green, V., Sasic, M. and Halliburton, S., “Increased Sensitivity of Capacitive Couplers for In-service PD Measurement in Rotating Machines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No 4, December 1999

[3] Zaengl, “IEC TC 42 WG – CD September 95 – Partial Discharge Measurements”.

[4] Amorim, H. P. Jr, Carvalho, A. T., Levy, A. F. S., Rodrigues, J. A. e Sans, J., “Medições de Descargas Parciais no Campo - Aspectos Práticos em Geradores e Motores”, X ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano, 2009, Puerto Iguazu.