



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Análises Estatísticas dos Ensaios de Pára-Raios Convencionais a Carboneto de Silício Retirados das Redes de Distribuição em Média Tensão

H. R. P. M. de Oliveira	E. L. Batista
AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A	AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A
hermes.oliveira@aes.com	edson.batista@aes.com

M. A. M. Saran	D. L. Coriolano	M. L. B. Martinez
Laboratório de Alta Tensão – Universidade Federal de Itajubá	Laboratório de Alta Tensão – Universidade Federal de Itajubá	Laboratório de Alta Tensão – Universidade Federal de Itajubá
marco@msaran.com	diego@lat-efei.org.br	martinez@lat-efei.org.br

Palavras-chave

Análise estatística

Corrente de fuga

Pára-raios

Tensão de rádio interferência

Resumo

Este artigo tem como objetivo a definição de uma faixa de provável aprovação para os ensaios de corrente de fuga, e possíveis correlações entre a tensão de rádio interferência em pára-raios convencionais a carboneto de silício para as redes de distribuição de média tensão. Através de análises estatísticas e ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá.

1. Introdução

Com a finalidade de proteger os sistemas elétricos contra surtos de tensão – que podem ter origem nas descargas atmosféricas, no chaveamento de sistemas de transmissão e distribuição e nos defeitos monopolares – utilizam-se os pára-raios, que são equipamentos que reduzem o nível de sobretensão a valores compatíveis com a suportabilidade desses sistemas.

Em operação normal, o pára-raios é semelhante a um circuito aberto, possuindo uma corrente de fuga em condições nominais da ordem de alguns μA . Quando há a ocorrência de uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor. Drenando e desviando a energia do surto para a terra, assim protegendo os equipamentos do sistema.

Contraditoriamente, os pára-raios não possuem, até hoje, técnicas de diagnóstico, consensualmente definidas, que possam identificar unidades defeituosas e inadequadas para continuar em serviço. Essa

dificuldade deve-se, em grande parte, às características construtivas e operativas dos pára-raios, que são equipamentos selados e que não permitem a inspeção fácil de seus componentes internos. Dentro deste enfoque, este trabalho apresenta estudos estatísticos, que resultaram na determinação da correlação entre os valores de corrente de fuga e tensão de rádio interferência para os pára-raios convencionais.

No presente trabalho são analisados, especificamente, os pára-raios a carboneto de silício que foram coletados em instalações da rede de média tensão da concessionária de distribuição AES Sul, identificados através de técnicas de inspeção preditiva. Estes pára-raios foram divididos pelos seus respectivos fabricantes e classe de tensão, e, posteriormente, foram realizados os ensaios de corrente de fuga e tensão de rádio interferência, dentre outros, em laboratório.

2. Definições

Algumas considerações a respeito dos termos e definições utilizados e dos ensaios realizados em laboratório são feitas a seguir:

2.1. Pára-raios de resistor não linear a Carboneto de Silício (SiC):

São equipamentos que utilizam resistores não-lineares a carboneto de silício, em série com centelhadores formados por vários espaçamentos intencionais em ar [1], em um invólucro em porcelana, como mostrado na Figura 1.

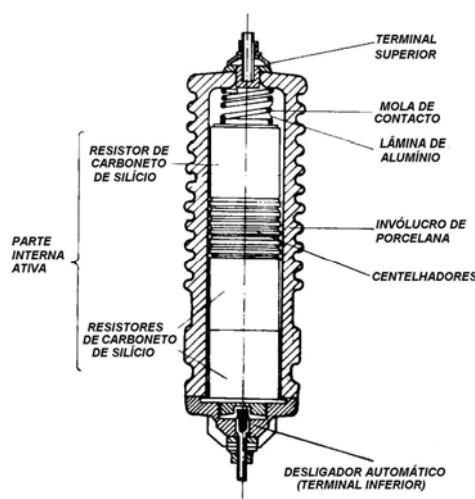


Figura 1 – Pára-raios para sistemas de distribuição – Vista em corte

A tensão de atuação de um pára-raios é definida pela característica tensão disruptiva *versus* tempo do centelhador. Portanto, antes da disrupção de seu centelhador, o pára-raios possui um comportamento passivo em relação ao sistema em que se encontra conectado. Após a disrupção, o seu comportamento passa a ser ativo, sendo mantida uma queda de tensão nos centelhadores reduzida em relação ao surto. A tensão imposta aos equipamentos protegidos é a tensão residual do pára-raios acrescida da queda de tensão nos seus cabos de conexão para as fases e para a terra.

2.2. Tensão Nominal:

É a máxima tensão em valor eficaz a que pode ficar permanentemente submetido o pára-raios, na frequência nominal, e para a qual tem condições de operar satisfatoriamente [2].

2.3. Corrente de fuga:

É a corrente que flui através do pára-raios, estando o mesmo energizado sob tensão fase-terra nominal do sistema. Esta corrente possui componentes resistivas, que fluem pelos resistores, e capacitivas, que

fluem pela porcelana externa e estrutura interna do pára-raios, Figura 2. Um aumento na componente resistiva indica a ocorrência da deterioração do pára-raios.

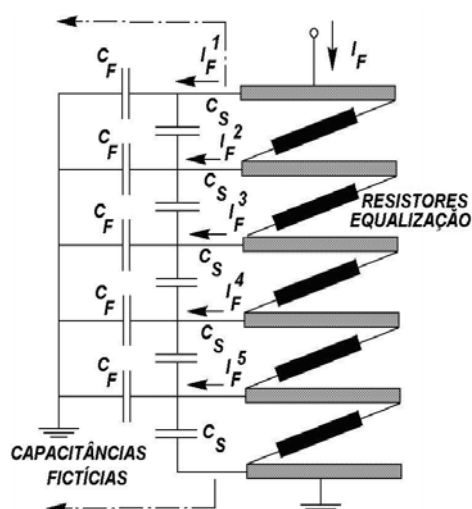


Figura 2 – Componentes: Resistiva e capacitiva da corrente de fuga.

2.4. Tensão de Rádio Interferência (RIV):

A ocorrência de oscilações de alta frequência, ocasionadas por ionização, corona ou descargas dentro do pára-raios, indica uma eventual diminuição da distância efetiva dos centelhadores. Estas são passíveis de serem detectadas e medidas através do ensaio de tensão de rádio interferência.

O objetivo do ensaio de RIV é verificar se os ruídos causados pelos pára-raios estão dentro de limites de norma, ou seja, não ocasionam interferência em ondas de rádio e T.V.

A Figura 3 apresenta a configuração do ensaio de RIV executado em um pára-raio e a figura 4 o esquema elétrico do circuito.



Figura 3 – Configuração do ensaio de RIV

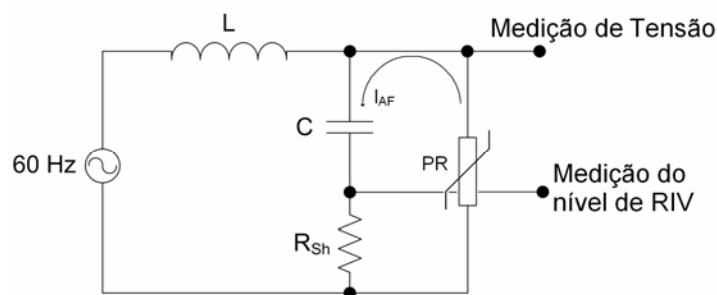


Figura 4 – Esquema elétrico do ensaio de RIV

3. Desenvolvimento

O objetivo deste trabalho é encontrar correlação entre os valores de corrente de fuga e tensão de rádio interferência nos pára-raios. Deste modo, uma série de pára-raios, fornecida pela AES Sul, e retiradas de campo após inspeção preditiva, foram submetidos, em laboratório, a ensaios de corrente de fuga fase-terra e fase-fase e tensão de rádio interferência. Além destes, outros ensaios foram realizados em laboratórios, tais como:

- Inspeção visual;
- Resistência de isolamento;
- Tensão disruptiva sob frequência industrial;
- Abertura e inspeção interna.
- Tensão disruptiva sob impulso normalizado
- Tensão residual

Após a abertura, os pára-raios são classificados como aprovados caso eles não tenham apresentado penetração de umidade ou deterioração dos resistores e atendido aos requisitos normativos nos ensaios que possuem estes limites. Caso não atendam a esses requisitos, são classificados como reprovados. Assim, dos 3640 pára-raios, 1214 foram classificados como aprovados, 1591 como reprovados e 835 não possuem informações completa de modo a definir suas condições reais na rede. Dentre os aprovados e reprovados, alguns pára-raios ainda foram descartados, pois ou não possuíam dados resultantes dos ensaios ou a tensão de operação da rede em que estavam. Conseqüentemente, foram analisados 1040 pára-raios aprovados e 1393 pára-raios reprovados.

Os pára-raios ensaiados e aprovados foram divididos entre seus respectivos fabricantes e tensão de operação, como ilustrado na Tabela 1 (os fabricantes estão denominados por algarismos romanos).

Tabela 1 - Quantidade de pára-raios por fabricante em relação à tensão de operação

Fabricante	Redes Classe 15 kV	Redes Classe 25 kV
I	9	50
II	10	44
III	55	184
IV	69	284
V	10	26
VI	13	59
VII	6	13
VIII	25	66
IX	19	29
X	1	14

3.1. Análise de Dados:

Neste trabalho, os resultados dos ensaios foram analisados estatisticamente. Entretanto, a análise estatística deve ser bem rigorosa, visto que alguns dados apresentaram grande variabilidade. Observações atípicas alteram enormemente as médias e limites dos grupos a que pertencem e podem, até mesmo, distorcer as conclusões obtidas através de uma análise estatística padrão. Portanto, é de fundamental importância detectá-las e dar um tratamento adequado às mesmas. Para a análise correta da amostra e para que os dados não significativos não atrapalhem os resultados, é necessário eliminar os *outliers* (observações atípicas) presentes na amostra. *Outliers* são definidos como dados localizados a uma distância anormal dos outros valores em uma amostra estatística de uma população [3].

A técnica utilizada para a identificação dos *outliers* presentes foi a análise gráfica em caixas (*boxplot*), introduzida pelo estatístico americano John Tukey, em 1977. A técnica gráfica do *boxplot* consiste em definir uma caixa retangular cuja metade representa aproximadamente 50% (inter quartis) dos dados da amostra, e linhas (“whiskers”), estendendo-se para cada lado da caixa, indicando a extensão geral dos dados.

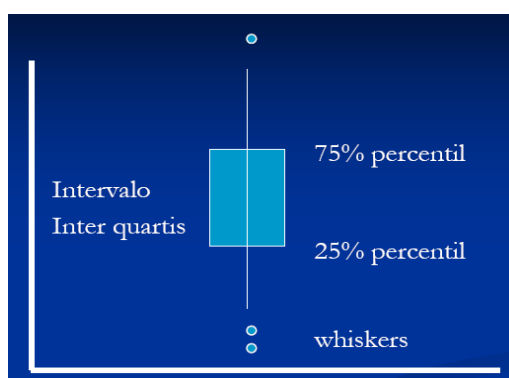


Figura 5 – Exemplo do Boxplot

Esta variabilidade pode ser devido a vários fatores tais como [4]:

- Erro na medição feita em laboratório;
- Leitura e anotação incorreta dos dados;
- Defeitos de fabricação;
- Envelhecimento dos pára-raios;

Após a exclusão dos *outliers* presentes, é verificada a distribuição que melhor se ajustou às amostras. Para a definição dos limites máximo e mínimo foram escolhidos os valores de 90% e 10% de probabilidade da distribuição que melhor representou os dados. E o valor de 50% foi definido como sendo a média.

4. Discussão e Resultados

A análise inicial mostrou a presença de muitos valores atípicos, segundo as técnicas padrão, foi necessário descartar um conjunto de resultados de ensaios.

4.1. Levantamento dos dados amostrais:

A figura 6 mostra um exemplo dos dados de corrente de fuga sob tensão fase-terra para os pára-raios para redes classe 15 kV, onde se nota um grande número de *outliers*, identificados pelo método gráfico do *boxplot*.

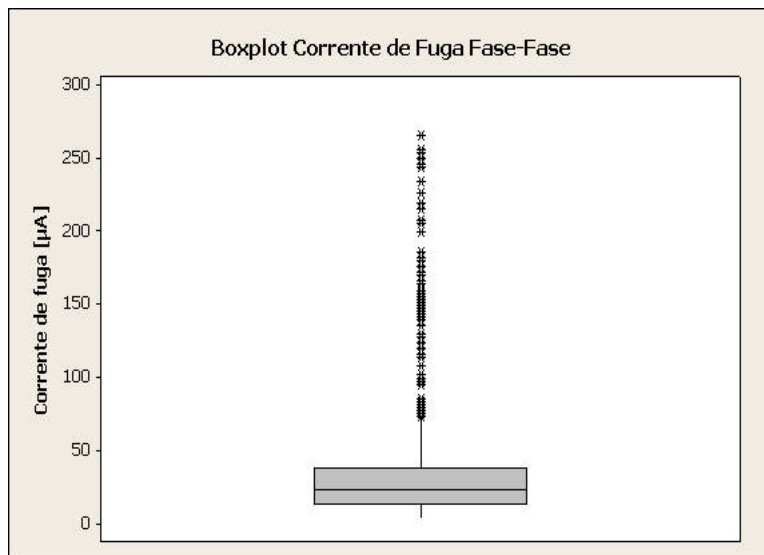


Figura 6 - Boxplot da amostra de corrente de fuga fase-fase para as redes classe 15 kV

Como se pode perceber na Figura 6, os valores de corrente de fuga que estão dentro do padrão aceitável são os que estão abaixo de 75 μA . Análises semelhantes foram feitas com os resultados dos outros ensaios.

A distribuição que mais se ajusta aos valores foi escolhida com a ajuda do *software* Minitab usando a ferramenta que identifica a distribuição individual de cada amostra. As distribuições utilizadas no presente trabalho foram a normal, log-normal e Weibull, sendo que também foram testadas outras distribuições, como a log-logistic.

4.2. Resultados encontrados

Os resultados das correntes de fuga e tensões de rádio interferência nos pára-raios aprovados e reprovados são mostrados a seguir:

4.2.1. Pára-raios aprovados

A figura 7 mostra a comparação entre as distribuições da corrente de fuga sob tensão fase-terra, dos pára-raios para redes classe 15 kV. Análises semelhantes foram feitas com os resultados dos outros ensaios.

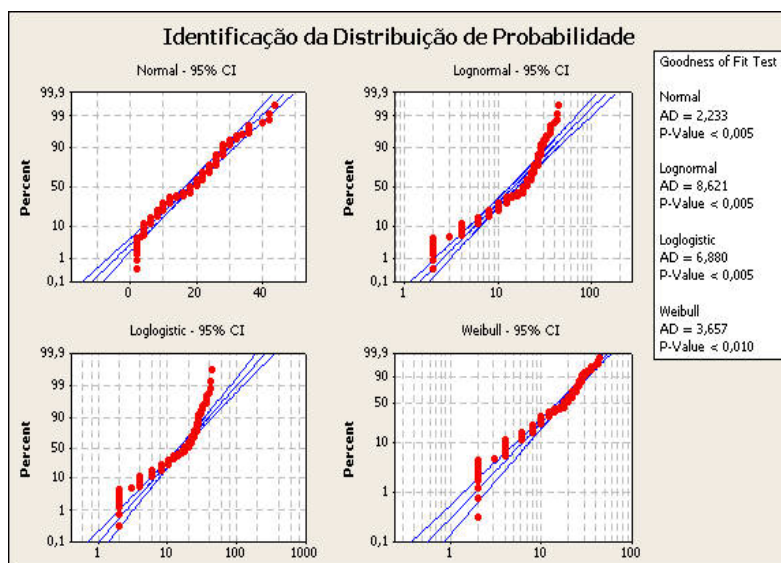


Figura 7 – Comparação entre as distribuições da Corrente de fuga fase-terra - Redes classe 15 kV

Para as redes classe 15 kV foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 2 – Dados encontrados para corrente de fuga fase-terra para redes classe 15 kV

Valores	$I_{fuga\ F-T}$ (μA)	$I_{fuga\ F-F}$ (μA)	RIV (μV)
μ	17	27	37
L_{min}	6	12	23
L_{max}	30	43	59
Quantidade	214	206	223
Distribuição	Normal	Normal	Log-normal

Onde:

μ é a média;

L_{min} é o limite mínimo;

L_{max} é o limite máximo;

Quantidade é a quantidade de pára-raios que estiveram dentro do padrão aceitável analisado anteriormente;

Distribuição é a distribuição que melhor representou os dados.

Para as redes classe 25 kV foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 3 - Dados encontrados para corrente de fuga fase-fase para redes classe 25 kV

Valores	$I_{fuga\ F-T}$ (μA)	$I_{fuga\ F-F}$ (μA)	RIV (μV)
μ	13	22	40
L_{min}	4	7	23
L_{max}	27	44	59
Quantidade	701	670	773
Distribuição	Weibull	Weibull	Normal

4.2.2. Pára-raios reprovados

Repetindo o procedimento de comparação entre as distribuições dos pára-raios aprovados. Abaixo seguem os dados dos reprovados:

Para as redes classe 15 kV foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 4 - Dados encontrados para corrente de fuga fase-terra para redes classe 15 kV

Valores	$I_{fuga\ F-T}$ (μA)	$I_{fuga\ F-F}$ (μA)	RIV (μV)
μ	28	46	40
L_{min}	6	11	22
L_{max}	127	150	72
Quantidade	246	234	266
Distribuição	Log-normal	Log-normal	Log-normal

Para as redes classe 25 kV foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 5 - Dados encontrados para corrente de fuga fase-fase para redes classe 25 kV

Valores	$I_{fuga\ F-T}$ (μA)	$I_{fuga\ F-F}$ (μA)	RIV (μV)
μ	21	40	41
L_{min}	5	11	18
L_{min}	88	150	66
Quantidade	905	869	1002
Distribuição	Log-normal	Log-normal	Weibull

4.2.3. Comparação entre RIV e Corrente de Fuga

O Objetivo do ensaio de RIV é verificar o nível de ruído injetado na vizinhança pelos equipamentos e redes. Logo, maiores níveis de ruído implicam em maiores danos dos equipamentos. Como previsto, aumento na corrente de fuga resulta em aumento no RIV. A tabela 6 mostra a média e os limites da corrente de fuga quando comparados com o RIV para os pára-raios classe 15 e 25 kV aprovados e reprovados. Os valores do RIV foram divididos em três intervalos compreendidos entre 0 – 25 (dB), 25 – 60 (dB) e 60 – 100 (dB).

Tabela 6 - Comparação entre RIV e Corrente de Fuga

	RIV 0 – 25 (dB)	RIV 25 – 60 (dB)	RIV 60 – 100 (dB)
$I_{fuga\ F-T}$	$\mu = 9\ \mu A$ $L_{min} = 1\ \mu A$ $L_{max} = 27\ \mu A$	$\mu = 16\ \mu A$ $L_{min} = 3\ \mu A$ $L_{max} = 40\ \mu A$	$\mu = 29\ \mu A$ $L_{min} = 5\ \mu A$ $L_{max} = 161\ \mu A$
$I_{fuga\ F-F}$	$\mu = 20\ \mu A$ $L_{min} = 3\ \mu A$ $L_{max} = 52\ \mu A$	$\mu = 29\ \mu A$ $L_{min} = 6\ \mu A$ $L_{max} = 67\ \mu A$	$\mu = 52\ \mu A$ $L_{min} = 9\ \mu A$ $L_{max} = 288\ \mu A$

5. Conclusão

Da análise estatística dos dados anteriores percebe-se que os valores da média dos pára-raios aprovados são sempre menores que os reprovados. Contudo quando se considera quantidade de unidades definidas, devido a sobreposição de limites, não é possível estabelecer uma faixa que defina com 100% de certeza os limites operacionais globais – sem especificar fabricantes – para corrente de fuga.

Isto também é responsável pelo índice de acerto das técnicas de inspeção não intrusivas conforme [5,6] mostrado na tabela 7, onde foi definido o valor de 15 dB como limites para inspeções em campo. Deste modo, não é esperada nenhuma melhoria nos índices verificados em [5,6].

Tabela 7 – Índices de aprovação para tecnologia de inspeção não intrusiva de rádio interferência

Valores Limites	Ensaio em Laboratório	
	Sucesso	Falha
5 dB	45%	55%
15 dB	66%	34%
30 dB	74%	26%
50 dB	75%	25%

As figuras 8 e 9 mostram o histograma dos pára-raios aprovados e reprovados, respectivamente:

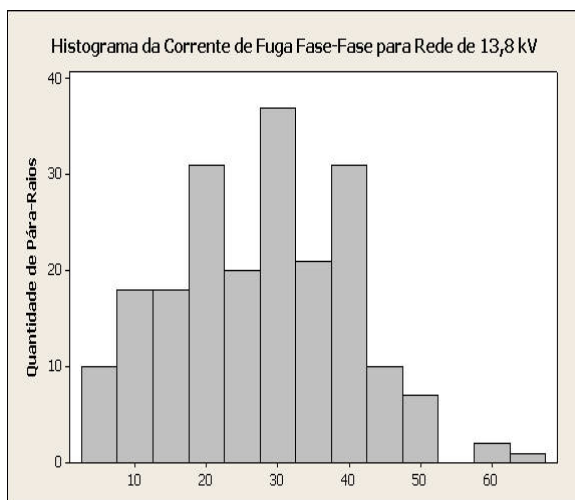


Figura 8 – Histograma da corrente de fuga fase-fase para redes classe 15 kV dos pára-raios aprovados

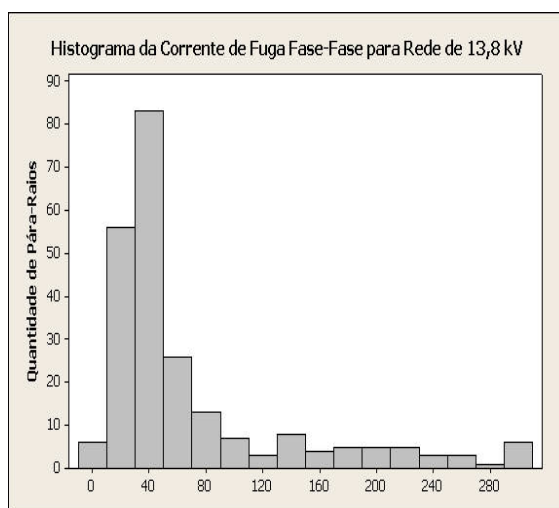


Figura 9 – Histograma da corrente de fuga fase-fase para redes classe 15 kV dos pára-raios reprovados

A média e os limites máximo e mínimo para os resultados de corrente de fuga para os pára-raios classe 15 kV aprovados e reprovados são mostrados nas tabelas 2 e 4, respectivamente. Deste modo, a partir dos dados das tabelas 2 a 5 observa-se que pára-raios com corrente de fuga sob tensão fase-terra inferiores a 25 μA têm uma maior probabilidade de serem aprovados. Já para tensão fase-fase esse valor é 30 μA . Ultrapassando esses limites tem-se uma maior probabilidade de encontrar pára-raios reprovados.

Este trabalho também demonstra que medições de RIV com equipamentos de laboratório são inconclusivas, pois resultam em mesmo valor médio e limites. No entanto, conforme tabela 6 maiores níveis de corrente de fuga, ou seja, pára-raios com maior probabilidade de se encontrarem sob condição de falha implicam em maiores valores de RIV. Isto confirma a hipótese de se adotar medidas de campo, com detectores de ultra-som e rádio frequência, como meio de avaliação da condição operacional dos pára-raios convencionais a carboneto de silício.

Um ponto de extrema importância é que: “Na maioria dos casos observados os valores de corrente de fuga não são suficientes para gerar níveis de aquecimento facilmente detectável por equipamentos de termovisão.” Deste modo, leituras firmes de temperaturas implicam em pára-raios em estágio avançado de degradação e falha.

Análises considerando fabricantes específicos, discretização do universo de amostras, podem resultar em limites diferentes dos observados.

6. Referências bibliográficas

- 1 – NBR 5287 Pára-Raios de Resistor Não Linear a Carboneto de Silício SiC para Sistemas de Potência – Especificação, ABNT, 1991
- 2 – J. M. Filho. Manual de Equipamentos Elétricos, Ed. LTC, 1994.
- 3 – NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. Acesso em 13/09/2007, disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>
- 4 – M. L. B. Martinez, M. Kubota, R. C. Maciel, S. Aita, A. R. Pizarro, O. S. Manalli. “Medição de Corrente de Fuga – Uma Alternativa para a Manutenção Preventiva de Pára-Raios”, X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Paraná, 1989.
- 5 – M. L. B. Martinez, R. G. de Oliveira Jr. “Inspeção de Campo de Pára-Raios para Circuitos de Média Tensão”, XVII SENDI, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.
- 6 – M. L. B. Martinez, R. G. de Oliveira Jr. “Field Inspection Of Surge Arresters For Medium Voltage Circuits”, GROUND’2006, Maceió, Alagoas, 2006.