

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

**Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas**

BT/PEA/9512

**Avaliação da Severidade da
Poluição para o Dimensionamento
da Isolação das Redes Elétricas**

**Arnaldo G. Kanashiro
Geraldo F. Burani**

São Paulo - 1995

Kanashiro, Arnaldo G

Avaliação da severidade da poluição para o dimensionamento da isolação das redes elétricas / A. G. Kanashiro, G. F. Burani. -- São Paulo : EPUSP, 1995.

12p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica, BT/PEA/9512)

1. Proteção (Engenharia elétrica) 2. Distribuição (Energia elétrica) 3. Isoladores elétricos I. Burani, Geraldo Francisco II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

CDD 621.317
621.319
621.31937

AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DA POLUIÇÃO PARA O DIMENSIONAMENTO DA ISOLAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS

POLLUTION SEVERITY ASSESMENT FOR INSULATION DIMENSIONING OF ELECTRICAL NETWORKS

Arnaldo G. Kanashiro

Geraldo F. Burani

ABSTRACT

Flashovers on transmission and distribution lines can occur in polluted areas without any relation with internal or external overvoltages, therefore demanding from the Utilities preventive and remedial actions.

The pollution severity assessment was performed through the leakage current method, where 13,8 kV distribution lines in a coastal area, and 88 kV transmission lines in industrial areas were considered.

Various consistencies were performed with the measurements of: the leakage current, the climatic conditions, and the amount of pollutants on the insulator. By the leakage current method, performance of insulators and establishment of the leakage current values for maintenance, were analysed. The equivalent degree of pollution for each site was then determined.

Results have shown that the methodology here applied is satisfactory, and enabled the analysis of the behaviour of the insulator and the evaluation of its performance in polluted areas.

Foram realizadas várias consistências com os valores de corrente de fuga, os dados das condições climáticas e as medições relativas à quantidade de poluente sobre o isolador. Através do método da corrente de fuga foram analisados o desempenho dos isoladores utilizados nessas regiões e o estabelecimento de valores de corrente indicativos da necessidade de manutenção. Foi determinado o grau equivalente de poluição em cada local.

Os resultados comprovaram que a metodologia utilizada na pesquisa é satisfatória e possibilitou a análise do comportamento do isolador e a avaliação do seu desempenho em ambientes poluídos.

PALAVRAS - CHAVE

Isolador Poluído - Corrente de Fuga - Monitoração

RESUMO

Em regiões poluídas podem ocorrer desligamentos em linhas de transmissão e em redes de distribuição de energia elétrica, sem qualquer relação com sobretensões de origem interna ou externa, obrigando as empresas de energia elétrica a adotar medidas preventivas e corretivas.

A avaliação da severidade da poluição foi realizada com o método da corrente de fuga. Foram consideradas redes de distribuição em 13,8 kV, situadas em região litorânea, e linhas de transmissão em 88 kV, situadas em região industrial.

1. INTRODUÇÃO

Em regiões poluídas podem ocorrer desligamentos em linhas de transmissão e em redes de distribuição de energia elétrica sem qualquer relação com sobretensões de origem interna ou externa, obrigando as empresas de energia elétrica a adotar medidas preventivas e corretivas. Nesses locais, os resíduos industriais ou sais provenientes do mar são depositados sobre a superfície do isolador e formam, na presença de umidade, uma solução eletrolítica que favorece o aparecimento de arcos que podem se estender ao longo de toda superfície isolante causando o desligamento.

No Brasil, poucas pesquisas têm sido realizadas nessa área e, especificamente, no Estado de São Paulo, esse problema é enfrentado pela CESP - Companhia Energética de São Paulo S.A. em redes de distribuição em 13,8 kV situadas no litoral [1, 2] e pela ELETROPAULO - Eletricidade de São Paulo S.A. em linhas de transmissão em 88 kV situadas em região industrial [3]. Em sistemas de corrente contínua esse problema também é sentido e na estação conversora em Ibiúna algumas medidas preventivas são adotadas pela concessionária [4].

Através de convênio entre o Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP e a CESP e a ELETROPAULO, foi estabelecido um programa de pesquisa, tendo como consultor em uma fase inicial, o prof. Aage Pedersen (Universidade Técnica da Dinamarca), especialista nessa área e participante de comissões técnicas em vários congressos internacionais. O método da corrente de fuga foi utilizado nessas pesquisas.

O método da corrente de fuga foi desenvolvido originalmente na Alemanha sendo, posteriormente, realizado um trabalho conjunto envolvendo os laboratórios da Alemanha e da Dinamarca [5, 6]. Com esse método, o grau de poluição é obtido no campo de forma direta, ou seja, no próprio isolador instalado no local. São consideradas as condições de umidificação e a quantidade e distribuição do poluente no isolador, estando ainda energizado na tensão nominal do sistema.

Nesse método são utilizados os valores $I_{highest}$ (I_h) e $I_{máx}$. O valor I_h é definido como sendo o maior valor de pico da corrente de fuga ocorrendo em serviço e em ensaios de laboratório, sem descarga disruptiva. O valor I_h está associado à ocorrência do arco incompleto e depende do valor da resistência em série com o arco na parte úmida do isolador. O valor $I_{máx}$ é definido como sendo o valor de pico da corrente no semiciclo anterior à descarga disruptiva.

A avaliação da severidade de poluição em região litorânea foi realizada em cinco locais: Ilha Comprida, Itanhaém (Cibratel e EMCA - Estação Medidora de Corrosão Atmosférica), Guarujá e Ubatuba. Em cada local foram objetos de estudo quatro isoladores tipo pino de perfis diferentes. Em Itanhaém foram obtidos os dados das condições climáticas, correspondendo à coleta da precipitação, temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do vento.

Em região industrial foram instaladas, inicialmente, cadeias de isoladores em 6 locais para serem monitoradas. Essas cadeias foram montadas em subestações e conectadas ao barramento de 88 kV. Em função dos resultados

obtidos, foram realizadas alterações passando-se a monitorar cadeias de isoladores, instaladas nas próprias torres das linhas de transmissão, em substituição à monitoração em algumas subestações. Os locais de monitoração, após as alterações, foram: Capuava (subestação e ramal Philips), São Caetano do Sul, Santana do Parnaíba, São Paulo e São Miguel Paulista.

As análises foram realizadas considerando-se os resultados obtidos no campo no período de 1987 a 1989, em região litorânea, e 1987 a 1993, em região industrial.

Foram realizadas várias consistências utilizando-se os valores I_h , os dados das condições climáticas e as medições relativas ao poluente sobre o isolador. São obtidos o grau equivalente de poluição de cada local e subsídios para o estabelecimento de valores I_h indicativos da necessidade de manutenção.

2. METODOLOGIA

A CESP precisou tomar várias medidas ao longo dos anos para atenuar os efeitos da poluição marítima, resultando, em redes próximas ao litoral, na substituição dos isoladores tipo pino e dos isoladores dos equipamentos de classe de tensão 15 kV para os de classe de tensão 24,2 kV, além da lavagem dos isoladores dos equipamentos nos locais mais críticos. Essas medidas foram tomadas de forma sistemática, atenuando os efeitos da poluição, mas não evitando a ocorrência de desligamentos em alguns locais. Havia ainda a necessidade de se estabelecer critérios de utilização desses isoladores, uma vez que as condições e a influência da poluição marítima não eram as mesmas em todo o litoral.

Em região industrial, os efeitos da poluição são sentidos desde longa data. A ELETROPAULO possui várias linhas de transmissão em 88 kV situadas em regiões industriais e as medidas adotadas para melhorar o seu desempenho referem-se à utilização de isoladores antipoluição, modificação da posição de instalação das cadeias de isoladores, lavagem das cadeias em linha viva, limpeza e substituição de isoladores, além da aplicação de graxa de silicone. Essas medidas foram sendo adotadas ao longo dos anos, tornando evidente a necessidade de pesquisas para otimizar o processo de manutenção e diminuir o número de desligamentos.

Em região litorânea foram objetos de estudo quatro isoladores tipo pino, sendo dois de classe de tensão 15 kV (identificados como 15 A e

15 B) e os outros de classe de tensão 24,2 kV (identificados como 25 A e 25 B). O isolador 15 B é normalmente utilizado pelas concessionárias em regiões litorâneas. Os isoladores 15 A e 25 B foram considerados por apresentarem perfis alternativos. A figura 1 mostra os isoladores com as respectivas distâncias de escoamento. Em região industrial são utilizados isoladores tipo "padrão" (identificados como VC1 e VC3) e antipoluição (identificados como FT1).

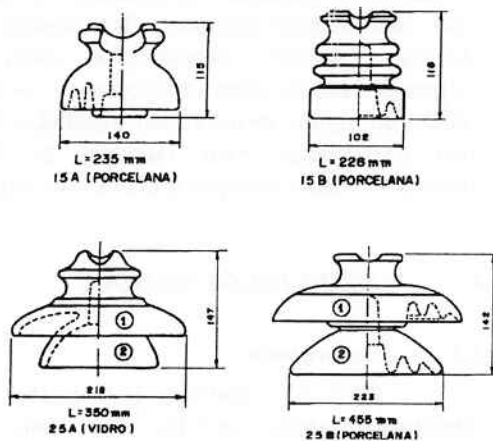


Figura 1 - Característica dos isoladores (região litorânea)

A figura 2 mostra esses isoladores e os respectivos dados quanto ao diâmetro do disco, passo e distância de escoamento.

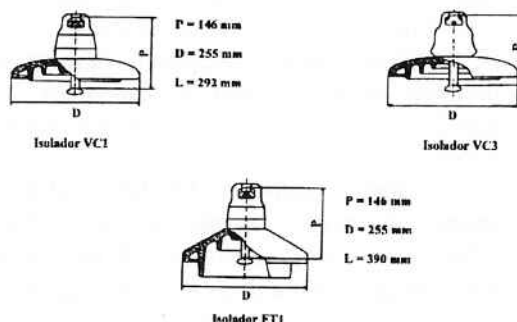


Figura 2 - Característica dos isoladores (região industrial)

As investigações no campo foram realizadas durante alguns anos, procurando-se obter dados correspondentes ao estado crítico dos isoladores, pois em geral não ocorre uma deposição constante e uniforme do poluente e nem sempre ocorre uma umidificação completa,

podendo ainda ocorrer uma diminuição da contaminação pela ação da chuva em determinados períodos.

No laboratório, os ensaios foram utilizados para se obter os valores de corrente de fuga em função do grau de poluição. Foi utilizado o método da camada sólida [7], sendo a umidificação, dentro da cabine de ensaios, providenciada através de bicos pulverizadores com água à temperatura ambiente. Os isoladores foram preparados através da imersão em uma solução contendo diatomita (kieselguhr).

O isolador foi submetido aos ensaios de poluição artificial aumentando-se o grau de poluição gradativamente. Em cada grau de poluição, em um ensaio sem descarga disruptiva, é obtido um valor I_h . Os valores I_h aumentam com o grau de poluição até um nível crítico quando então há a ocorrência de descarga disruptiva na maioria dos ensaios, obtendo-se os valores $I_{máx}$.

Os ensaios foram realizados utilizando-se uma cabine de madeira de dimensões iguais a 5,0m x 4,0m x 5,0m com volume aproximado de 80m³.

A fonte de alimentação foi composta de um regulador de tensão de 250kVA, 440V/0-440V e um transformador monofásico de 250kVA, 440V/15-30kV. Essa fonte foi utilizada para os isoladores tipo pino e a corrente de curto circuito na tensão de ensaio é de 37A eficazes e relação R/X igual a 0,2. Para os isoladores utilizados em linhas de transmissão, foi utilizada uma outra fonte de alimentação composta de um regulador de tensão de 125kVA, 3,8kV/0-7,6kV e um transformador monofásico de 150kVA, 7,6kV/15-30kV. A corrente de curto circuito na tensão de ensaio é igual a 34A eficazes com relação R/X igual a 0,1.

Essas duas fontes de alimentação atendem aos requisitos da IEC-507/75 e foram escolhidas de acordo com a disponibilidade no laboratório quando da realização dos ensaios.

A tensão de ensaio para os isoladores tipo pino foi especificada (8,0 kV) considerando-se o valor de tensão nominal das redes de distribuição (13,8 kV). Com relação às linhas de transmissão, os ensaios foram realizados em cadeias de isoladores. A tensão de ensaio foi estabelecida levando-se em consideração a condição encontrada pela cadeia sob monitoração no campo, composta de 6 unidades em um sistema de 88kV. Com base nesse valor e nas investigações realizadas por Verma e outros [8], foi considerada, por conveniência, uma cadeia composta de 3 unidades, ou seja, metade da distância de escoamento da cadeia instalada no

campo e a tensão de ensaio foi igual a $25,5 \text{ kV} \left(88 \div \sqrt{3} \div 2 \right)$.

Para o registro dos valores de corrente, tanto no campo como no laboratório, foram utilizados aparelhos registradores [9]. A saída de dados era obtida através de impressora instalada no próprio módulo do aparelho. No campo operava no modo periódico, registrando a cada intervalo de tempo, o maior valor de corrente nesse intervalo, com a respectiva data e horário do evento. Com o envelhecimento ao longo dos anos, o aparelho foi totalmente reformulado e atualmente os registros ficam armazenados em um banco de memória do aparelho, podendo ser transferidos para um microcomputador portátil no próprio local [10].

3. INSTALAÇÃO NO CAMPO

A área de concessão da CESP abrange cerca de 350km ao longo do litoral do Estado de São Paulo. Os locais de monitoração foram escolhidos seguindo-se as recomendações do pessoal técnico de campo (distritos e Regional de Itanhaém) quanto aos locais mais críticos, desde Ilha Comprida até Ubatuba. Todas as estações situavam-se à beira-mar com exceção de Cibratel que ficava distante 300m.

Todos os postos de monitoração ficaram completamente montados até o final de 1986. Em função dos primeiros resultados, decidiu-se promover algumas alterações no final de 1987 e início de 1988, incluindo-se a instalação dos isoladores 15A e 15B.

Para a obtenção de dados adicionais no campo, foram instalados doze isoladores não energizados em cada local para a medição da DDSE. O isolador 25A foi utilizado para essa finalidade. Mensalmente, na ocasião da manutenção da instalação, um isolador era retirado e levado ao laboratório para a medição. Os isoladores foram retirados em seqüência e substituídos por isoladores limpos.

Com o objetivo de obter a severidade de poluição em região industrial, foram instaladas em 1984 cadeias de isoladores em 6 locais para serem monitoradas. Essas cadeias foram montadas em subestações e conectadas ao barramento de 88 kV. Uma das subestações situava-se no litoral, tendo-se a intenção de coletar dados nessa região. Outras subestações estavam localizadas em região industrial.

Em função dos resultados obtidos no período de 1984 a 1987, foram realizadas alterações a partir de 1988, quanto aos locais de

monitoração, passando-se a monitorar cadeias de isoladores instaladas nas próprias torres das LT's, em substituição à monitoração em algumas subestações. A escolha dos locais de monitoração, em subestações e LT's, baseou-se na experiência adquirida pela ELETROPAULO quanto aos locais mais poluídos.

A instalação típica para o levantamento da severidade de poluição consistia de uma cadeia de suspensão com 6 isoladores, sendo colocada uma unidade adicional para sustentação da cadeia e para permitir a medição da corrente. O resistor de medição era colocado em paralelo com essa unidade adicional. Os isoladores eram do tipo "padrão", identificados como VC1. Algumas cadeias eram compostas de isoladores VC3. Em alguns locais foram instaladas cadeias não energizadas para medição da DDSE, obtendo-se dados complementares no campo.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Laboratório

Para os isoladores 15A e 15B foram realizados vários ensaios em uma faixa relativamente estreita dos graus de poluição pois o objetivo era obter os valores I_h somente nas proximidades do nível crítico. Por outro lado, foram realizados poucos ensaios com os isoladores 25A e 25B. Justifica-se tal procedimento porque esses isoladores apresentam valores elevados de distância de escoamento específica, tendo sido constatada queda de tensão em alguns ensaios nos graus de poluição mais elevados. A IEC-507 [7] não apresenta os requisitos para a fonte de alimentação, por falta de experiência disponível, para ensaios em que a distância de escoamento específica seja maior que 25 mm/kV, que é o caso dos isoladores 25A e 25B.

Para o isolador 15A foram observadas várias descargas disruptivas a partir de $0,080 \text{ mg/cm}^2$. Para o isolador 15B foi constatada uma descarga disruptiva em $0,090 \text{ mg/cm}^2$ e na faixa de $0,120 \text{ mg/cm}^2$ a $0,130 \text{ mg/cm}^2$ ocorreram várias descargas. As figuras 3 a 6 mostram os valores obtidos. Os valores médios de $I_{\text{máx}}$ obtidos para os isoladores 15A e 15B foram iguais a 1,62A e 1,93A, respectivamente, sendo os valores mínimos iguais a 0,80A.

Com relação às cadeias de isoladores, os ensaios foram realizados considerando-se uma faixa ampla de DDS. Os valores I_h aumentam com o grau de poluição até a ocorrência dos arcos completos a partir de $0,080 \text{ mg/cm}^2$,

conforme mostra a figura 7. O mínimo valor $I_{m\acute{a}x}$ registrado foi igual a 1,02A e o valor médio igual a 1,64A.

Foram realizados somente ensaios preliminares em cadeias com o isolador VC3 pois o isolador apresenta a mesma distância de escoamento específica e perfil similar ao isolador VC1.

A cadeia composta com o isolador FT1 foi submetida somente a alguns ensaios pois apresenta uma distância de escoamento específica igual a 26,6 mm/kV, valendo a mesma observação feita aos isoladores 25A e 25B.

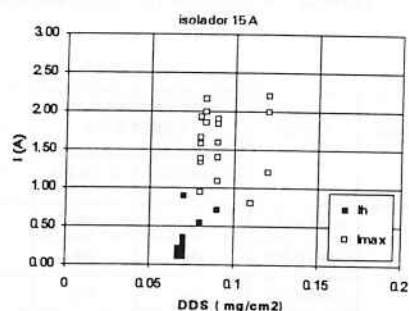


Figura 3 - Resultado dos ensaios (15A)

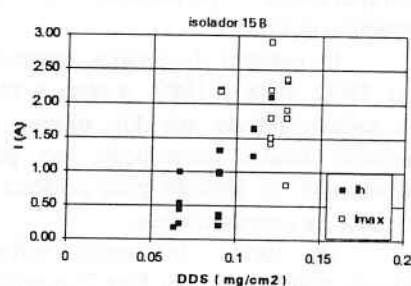


Figura 4 - Resultado dos ensaios (15B)

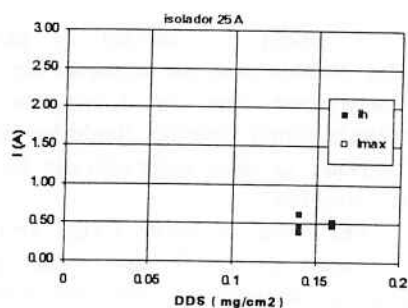


Figura 5 - Resultado dos ensaios (25A)

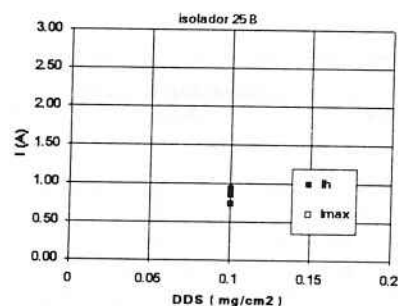


Figura 6 - Resultado dos ensaios (25B)

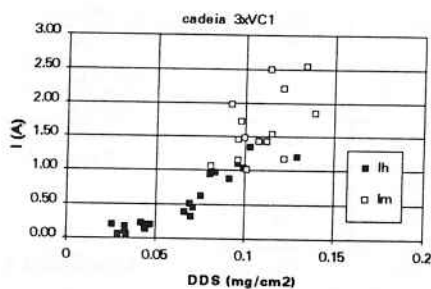


Figura 7 - Resultado dos ensaios (VC1)

4.2. Monitoração no Campo

4.2.1. Redes de distribuição

O aparelho registrador foi programado no campo para imprimir o maior valor de pico de corrente I_h que ocorresse a cada intervalo de 2 horas. Desta forma, um determinado isolador pode apresentar um total de 360 registros em um mês de 30 dias. Todos os valores I_h foram digitados e deram origem a arquivos computacionais, permitindo o tratamento estatístico dos dados.

O período de análise corresponde aos anos 1987, 1988 e 1989, porém, a maior parte dos dados refere-se aos dois últimos anos. Em Itanhaém houve interrupção, no período de setembro/88 a abril/89 para reforma do local, por parte da concessionária.

Os locais de maior influência da poluição marítima foram Ilha Comprida, Guarujá e Itanhaém-EMCA. Em Ilha Comprida e Guarujá ocorreram arcos completos no isolador 15 B.

As tabelas 1 a 4 referem-se aos resultados obtidos nos locais de monitoração no litoral. São indicados os valores de corrente (maior I_h no período) e a sua distribuição, para 0,10A, 0,20A e 0,30A, para cada isolador.

ISOLADOR	DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES I_h (%)			MAIOR I_h NO PERÍODO (A)
	$I_h \leq 0,10A$	$I_h \leq 0,20A$	$I_h \leq 0,30A$	
15A	82,5	91,5	97,7	0,69
15B	92,7	96,8	97,8	1,17
25A	100	100	100	0,10
25B	94,9	99,5	100	0,22

Tabela 1 - Valores I_h em Itanhaém-EMCA

ISOLADOR	DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES I_h (%)			MAIOR I_h NO PERÍODO (A)
	$I_h \leq 0,10A$	$I_h \leq 0,20A$	$I_h \leq 0,30A$	
15A	87,7	95,2	99,2	1,20
15B	97,3	99,0	99,3	*
25A	99,1	99,4	100	0,28
25B	97,1	100	100	0,18

(*) ocorrência de descarga disruptiva
Tabela 2 - Valores I_h em Ilha Comprida

ISOLADOR	DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES I_h (%)			MAIOR I_h NO PERÍODO (A)
	$I_h \leq 0,10A$	$I_h \leq 0,20A$	$I_h \leq 0,30A$	
15A	92,1	98,6	99,7	0,36
15B	95,3	98,5	99,1	*
25A	99,5	100	100	0,14
25B	100	100	100	0,10

(*) Ocorrência de descarga disruptiva
Tabela 3 - Valores I_h em Guarujá

ISOLADOR	LOCAL	DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES I_h (%)		MAIOR I_h NO PERÍODO
		$I_h \leq 0,10A$	$I_h \leq 0,20A$	
15A	CIBRATEL	99,5	100	0,13
	UBATUBA	100	100	0,07
15B	CIBRATEL	100	100	0,03
	UBATUBA	98,9	100	0,11
25A	CIBRATEL	100	100	0,04
	UBATUBA	100	100	0,03
25B	CIBRATEL	100	100	0,05
	UBATUBA	100	100	0,05

Tabela 4 - Valores I_h em Cibratel e Ubatuba

A tabela 5 mostra os principais resultados obtidos com as medições de DDSE, sendo observado que os locais de maior agressividade foram Guarujá, Itanhaém-EMCA e Ilha Comprida. O valor mais elevado foi obtido em Ilha Comprida.

Em todos os locais foram verificados que os valores de DDSE apresentam grandes variações no decorrer do ano em função da ocorrência de chuvas.

LOCAL	Nº DE MEDIÇÕES	VALORES DE DDSE (mg/cm ²) - NO PERÍODO 1987 A 1989 -		
		MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO
EMCA	23	0,004	0,093	0,027
ILHA COMPRIDA	25	0,004	0,108	0,023
GUARUJÁ	25	0,002	0,087	0,032
CIBRATEL	23	0,002	0,042	0,012
UBATUBA	24	0,002	0,029	0,011

Tabela 5 - Valores de DDSE no litoral

- Condições Climáticas (Itanhaém-EMCA)

Os dados das condições climáticas referem-se aos registros de temperatura, umidade relativa, vento (intensidade e direção) e precipitação. O período considerado na análise foi

de julho/87 a setembro/88. Os registros obtidos pelos instrumentos foram digitados, considerando-se os valores médios em cada intervalo de 1 hora.

A figura 8 mostra a frequência de ocorrência (%) dos valores de umidade relativa em função da temperatura obtidos no campo. Os valores de umidade foram divididos em faixas de 10% e os valores de temperatura em faixas de 5°C, podendo ser observado que a condição que mais ocorreu no campo (28%) correspondeu às faixas de 80% a 90% de umidade relativa e de 15°C a 20°C de temperatura.

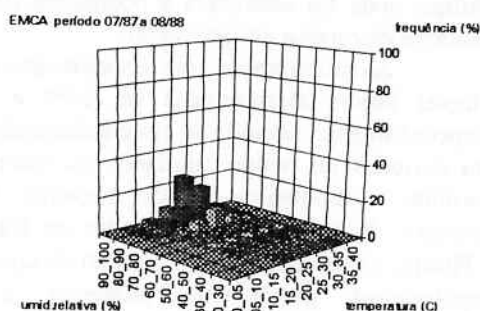


Figura 8 - Condições climáticas (período 07/87 a 08/88)

Os arcos sobre a superfície do isolador ocorrem em determinadas condições de umidificação e deposição do poluente. De forma a verificar a influência das condições climáticas, foram realizadas correlações obtendo-se a frequência de ocorrência (%) dos valores 1h em função das faixas de umidade e de temperatura, mencionadas acima, para os isoladores 15A, 15B, 25A e 25B.

Foi observado que os arcos ocorreram em sua maioria (45% a 51%) nas faixas de 80% a 90% de umidade relativa e de 15°C a 20°C de temperatura.

No mês de agosto/88 ocorreram vários registros e valores 1h elevados, mostrando uma atividade intensa de arcos incompletos nos isoladores. Nesse mês, em 69% do tempo de monitoração, as condições de umidade relativa estiveram entre 80% e 90% e a temperatura entre 15°C e 20°C. Essas condições são típicas nos meses de inverno.

Os isoladores 15A e 25B apresentaram em 1987, valores 1h elevados no mês de novembro. Nesse mês, os registros de corrente ocorreram, em sua maioria, nessa mesma faixa de umidade, porém, com temperaturas até 25°C.

A ocorrência de arcos no isolador não depende somente das condições de umidificação, sendo necessária uma ação combinada com a

camada de poluição sobre a superfície do isolador. As chuvas têm o efeito de "lavar" o isolador e nos meses em que há maior precipitação, deve-se esperar poucos registros de corrente de fuga.

A figura 9 mostra a precipitação mensal no período de julho/87 a setembro/88, e o total de horas de chuva em cada mês. No período considerado os menores índices de precipitação e horas de chuva são verificados, em 1987, no mês de novembro (33 mm em 32h) e, em 1988, no mês de agosto (4mm em 11h). Se dividirmos a precipitação mensal pelo número de horas de chuva no mês, podemos obter a precipitação média por hora de chuva, conforme mostra a figura 10. Nos meses de maior precipitação média é verificado um número menor de registros de corrente de fuga.

Esses fatos demonstram que determinadas condições foram mais favoráveis à ocorrência de arcos sobre o isolador, no caso, umidade relativa entre 80% e 90%, precipitação menor que 33 mm e número de horas de chuva menor que 32 horas.

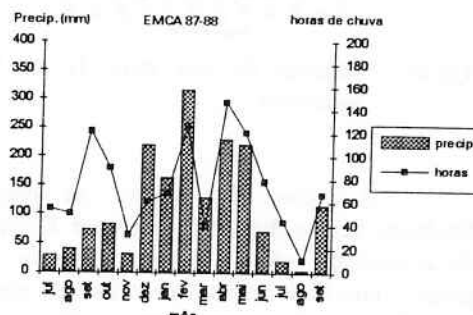


Figura 9 - Precipitação mensal (período 07/87 a 09/88)

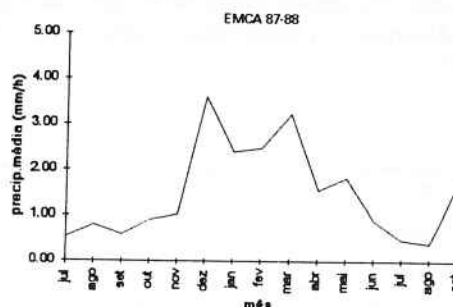


Figura 10 - Precipitação média por hora de chuva

- Análises no Mês de Agosto/88 (Itanhaém-EMCA)

Com o objetivo de pesquisar os horários que ocorrem os arcos de maior amplitude, foi pesquisado em cada intervalo de 2 horas, o maior

valor I_h durante todos os dias do mês de agosto/88. Os valores de corrente mais elevados ocorreram durante a madrugada e à noite, nos horários em que a umidade relativa do ar é maior. O mesmo fato ocorreu com o número de registros, indicando a existência de condições propícias para as atividades dos arcos nesses horários. Analisando-se todos os dias do mês de agosto/88, é possível identificar aqueles de maior criticidade. A evolução dos valores I_h nos dias 10 e 11 pode ser observada na figura 11. No intervalo 18-20h (dia 10) ocorreu o maior valor I_h de 1988 para o isolador 15A. Para o isolador 15B, esse valor ocorreu no intervalo 24-2h (dia 11).

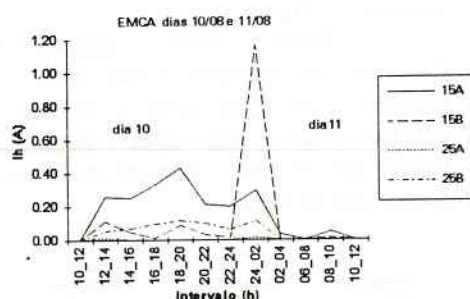


Figura 11 - Valores I_h nos dias 10 e 11 de agosto/88

A figura 12 mostra as condições climáticas nesses dias e no intervalo 18-20h (dia 10) a umidade relativa foi elevada e os ventos apresentaram uma intensidade acima da média do mês (9,0 km/h) na direção oeste (sentido praia-cidade). No intervalo 24-2h (dia 11) ocorreram chuvas com pouca precipitação, que deve ter auxiliado na umidificação da camada poluente. Os ventos foram na direção sul (sentido cidade-praia) e a temperatura variou entre 16°C e 17°C.

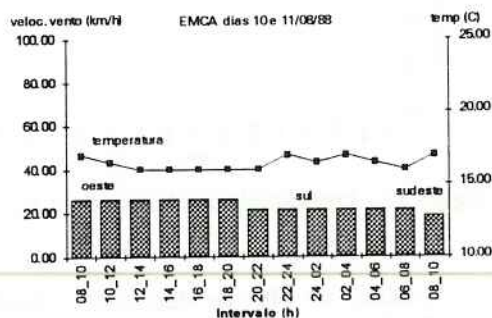


Figura 12 - Condições climáticas nos dias 10 e 11 de agosto/88

4.2.2. Linhas de transmissão

Serão apresentados os resultados, referentes ao período de 1987 a 1993, correspondendo à monitoração de cadeias instaladas em algumas subestações e Torres de Linhas de Transmissão.

Em cada local, os aparelhos registradores foram programados para armazenar o maior valor de pico de corrente que ocorresse a cada intervalo de duas horas. Os registros obtidos nesse período foram digitados e deram origem a arquivos de dados identificados conforme cada local de monitoração. O local de maior influência foi em Philips, onde foi verificada a ocorrência de uma descarga disruptiva em agosto/93.

As monitorações em Bandeirantes e São Miguel foram interrompidas em 1989 e 1992, respectivamente, levando-se em consideração que, em períodos de tempo similares, os valores de corrente e frequência dos registros foram menores do que aqueles registrados em Capuava e Philips. Considerando-se o número de aparelhos registradores disponíveis, passou-se a dar prioridade à instalação em outros locais.

Os valores de corrente mais elevados, em Bandeirantes e São Miguel Paulista, foram iguais a 0,06A e 0,04A, respectivamente. O maior valor I_h em Capuava (0,11A) ocorreu em agosto/88 e em Mamoré (0,32A), em outubro/91. Em Philips, o maior valor I_h (0,30A) ocorreu no mesmo dia em que houve descarga disruptiva na cadeia.

A tabela 6 mostra a frequência de ocorrência dos valores $I_h \leq 0,20A$ e o maior valor I_h , no período, dos locais de monitoração. Os resultados de São Caetano do Sul não são mostrados pois abrangem poucos meses de monitoração. Os valores mais elevados foram observados em Philips e Mamoré, porém em 98,8% e 96,1% dos registros, os valores I_h são menores que 0,06A, respectivamente.

LOCAL	DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES I_h (%)		MAIOR I_h NO PERÍODO (A)
	$I_h \leq 0,06A$	$I_h \leq 0,20A$	
BANDEIRANTES	100	100	0,06
SÃO MIGUEL	100	100	0,04
CAPUAVA	99,8	100	0,11
PHILIPS	98,8	99,9	*
MAMORÉ	96,1	99,5	0,32

(*) Ocorrência de descarga disruptiva

Tabela 6 - Valores I_h em região industrial

De modo geral, pode ser observado que, nos meses de inverno, ocorreram valores de corrente mais elevados. A figura 13 mostra o maior valor de corrente I_h que ocorreu, em cada intervalo de 2 horas, considerando todos os dias do mês de Julho/93. É mostrado o número total de registros por intervalo. Pode ser observado que os valores de corrente mais elevados ocorreram na madrugada e à noite. No entanto, são verificados poucos arcos incompletos.

As medições de DDSE foram realizadas em 1992 e 1993 em Capuava, Philips e Mamoré.

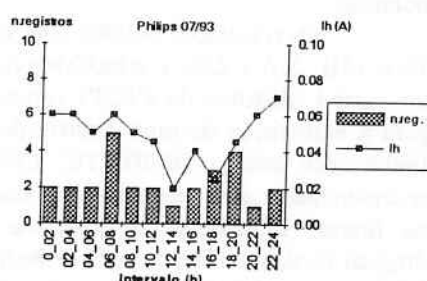


Figura 13 - Maior valor I_h e número de registros em julho/93

A faixa dos valores obtidos nesses locais são locais mostrados na tabela 7. O ano entre parêntesis refere-se ao de instalação das cadeias A e B. Em Mamoré, os resultados referem-se a cadeia que estava sob monitoração. Foram realizadas poucas medições e os valores mais elevados foram obtidos em Philips. Nesse local o poluente apresenta uma distribuição, na superfície inferior do isolador, acentuadamente não uniforme. Em Capuava e Mamoré os isoladores apresentam um aspecto visual que indica a presença de poluição.

ANO	FAIXAS DE VALORES DE DDSE (mg/cm ²)		
	CAPUAVA (1984)	PHILIPS (1990)	MAMORÉ
1992	--	0,124 - 0,336	--
1993	0,009 - 0,060	0,110 - 0,267	0,020 - 0,042

Tabela 7 - Faixa de valores de DDSE obtidos em região industrial

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O mínimo valor $I_{máx}$ determinado no laboratório para os isoladores 15A e 15B foi igual a 0,80A. Esses isoladores apresentam valores próximos de distância de escoamento (15A - 235 mm e 15B - 228 mm). Para a cadeia composta de isoladores VC1, o valor mínimo de $I_{máx}$ foi igual a 1,02A.

O valor $I_{máx}$ representa a corrente crítica I_c e a isolação no campo não deverá falhar se os valores I_h forem menores que o mínimo valor de $I_{máx}$.

Os locais de monitoração em EMCA, Ilha Comprida e Guarujá sofreram maior influência da poluição marítima. O isolador 15B não é recomendado para instalação nesses locais pois apresentou descarga disruptiva nos anos 1987 e 1988. Os valores elevados de corrente podem ocorrer no campo sem que, necessariamente, ocorra a descarga disruptiva. Em janeiro/89 foi registrado um valor I_h igual a 1,13A em Guarujá, não sendo observada a ocorrência de descarga disruptiva nesse mês.

Portanto, a recomendação é válida também para Itanhaém-EMCA onde não foi constatada nenhuma descarga disruptiva com o isolador 15B, e foi registrado um valor I_h igual a 1,17A.

Esse comportamento, foi também observado no laboratório, onde foram registrados vários valores I_h maiores que 0,80A (mínimo valor de $I_{máx}$) no grau de poluição igual a 0,090 mg/cm². Nesse grau, ocorreu somente uma descarga disruptiva.

O isolador 15A apresentou um valor elevado (1,20A) em Ilha Comprida e, a sua instalação nesse local, não é recomendada. Em Guarujá, o isolador 15A apresentou um valor I_h igual a 0,36A. Em Itanhaém-EMCA o maior valor I_h do isolador 15A (0,69A) encontra-se próximo do mínimo valor $I_{máx}$ (0,80A).

Os isoladores 25A e 25B apresentaram valores baixos de corrente (em comparação aos valores calculados da corrente crítica) e a influência da poluição marítima foi maior em Ilha Comprida, EMCA e Guarujá.

Em Cibratel e Ubatuba, a agressividade da poluição é bem menor, e os valores de corrente I_h dos isoladores 15A e 15B estão bem afastados do nível crítico (0,80A).

Os resultados no campo indicaram menor suportabilidade do isolador 15B em relação ao isolador 15A. Esses resultados entram em contradição com aqueles observados no laboratório, onde o isolador 15A apresentou

descargas disruptivas em menor grau de poluição. Esse fato mostra que a escolha de um determinado isolador não deve ser feita somente com base nos ensaios de laboratório.

Em região industrial os valores I_h foram menores do que aqueles registrados em região litorânea. Em Capuava a cadeia sob monitoração indicava, visualmente, a presença de poluição, porém, os valores de corrente estavam abaixo dos níveis que poderiam indicar a proximidade do arco completo.

Nos ensaios realizados na cadeia B, retirada do campo em agosto/93, não foi verificada a ocorrência de arcos incompletos que resultassem em valores de corrente I_h maiores que 30 mA, mostrando correspondência com o comportamento da cadeia instalada no campo.

Em Philips, os valores de corrente registrados no campo são, em geral, menores que 0,06A. Os valores de DDSE registrados nesse local apresentam-se elevados, porém, o poluente fica concentrado somente em determinadas partes do isolador, definindo uma distribuição acentuadamente não uniforme. Essa característica pode justificar o comportamento dos valores I_h , que são normalmente baixos, e que em determinadas condições de umidificação e quantidade de poluição pode resultar em descarga disruptiva.

Os registros efetuados em Mamoré são mais elevados, porém, estão afastados do nível crítico (1,02A). Nesse local, foi constatado, visualmente, que as cadeias estão poluídas.

O grau equivalente de poluição pode ser obtido, determinando-se o valor de DDS (mg/cm^2), correspondente no laboratório, que resulta em um valor I_h de mesma amplitude em relação ao registrado no campo.

No entanto, a determinação desses valores para os isoladores 15A e 15B encontra dificuldades pois os valores I_h foram obtidos no laboratório com poucos graus de poluição. Além disso, os valores I_h dos isoladores 15A e 15B apresentaram grande dispersão para o grau de poluição $0,070 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

As figuras 3 e 4 mostram os resultados dos isoladores 15A e 15B. O grau crítico de poluição é aquele em que iniciam-se as descargas disruptivas. Deste modo, temos para o isolador 15A, o grau crítico igual a $0,080 \text{ mmg}/\text{cm}^2$ e para o isolador 15B, o valor $0,090 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

Se considerarmos o isolador 15B, temos em Ilha Comprida e Guarujá um grau equivalente de poluição maior ou igual a $0,90 \text{ mg}/\text{cm}^2$, pois ocorreram descargas disruptivas desse isolador no campo. Em Cibratel e Ubatuba o grau equivalente

de poluição é menor do que $0,070 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Em Itanhaém, o grau equivalente de poluição pode ser considerado igual ao de Ilha Comprida e Guarujá.

O grau de poluição crítico da cadeia de isoladores VC1 é igual a $0,080 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Considerando-se a ocorrência de descarga disruptiva em Philips, o grau de poluição para esse local é maior ou igual a $0,080 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Para Capuava, Bandeirantes e São Miguel, esses valores são menores que $0,050 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Em Mamoré esse valor é menor que $0,070 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

Os valores máximos de DDSE obtidos no litoral (tabela 9) e em região industrial (tabela 12) encontram razoável correspondência com os valores referentes aos graus equivalentes de poluição.

Os resultados obtidos com os isoladores 15A, 15B, 25A e 25B, e o histórico de ocorrência no campo (distritos da CESP) serviram de base para a elaboração de uma diretriz de engenharia (publicação interna DE/037/TC, CESP - 1989), recomendando uma padronização dos isoladores no litoral, voltando-se ao nível de isolamento original (isolador 15B) da rede de distribuição, em Ubatuba e em locais mais afastados da praia. Nos locais a beira-mar, os isoladores de tensão máxima 24,2 kV (25A) seriam mantidos.

Os resultados em região industrial mostraram que os valores de corrente I_h são menores que os esperados apesar do aspecto visual das cadeias. Desta forma, o intervalo de tempo para a manutenção das linhas da transmissão pode ser aumentado, com base no estabelecimento de valores de corrente permissíveis (I_{hp}). A referência [8] cita que o valor I_{hp} pode ser fixado (margem de segurança) considerando-se um valor igual a 50% da corrente crítica (mínimo valor $I_{máx}$). É citado ainda que a experiência de campo deve ser considerada. Em Capuava e Mamoré essa recomendação poderia ser analisada e possivelmente adotada, dependendo das características das turmas de manutenção, quanto a sua atuação após a detecção de um valor I_h maior que I_{hp} , nesses locais. Em Philips deve ser estudada a possibilidade de implantação da manutenção com base em valor de corrente I_{hp} , devido às características do local (correntes baixas e ocorrência de descarga disruptiva).

6. CONCLUSÕES

A avaliação da severidade de poluição foi realizada em regiões litorânea e industrial, envolvendo redes de distribuição em 13,8 kV,

situadas no litoral, e linhas de transmissão em 88 kV, situadas em região industrial.

Foi utilizado o método da corrente de fuga, e foram realizados ensaios em laboratório e medições da DDSE nos locais de monitoração.

Através do método da corrente de fuga foi possível analisar os seguintes aspectos:

- Desempenho dos isoladores: O desempenho dos isoladores 15A, 15B e da cadeia de isoladores VC1 foi avaliado com base na proximidade dos valores I_h em relação ao mínimo valor de $I_{máx}$ registrado no laboratório. Desta forma, são feitas restrições à utilização dos isoladores 15A, em Ilha Comprida, e 15B, em Itanhaém-EMCA.

O isolador 15B não é recomendado para utilização em Ilha Comprida e Guarujá. Os valores $I_{máx}$ não foram obtidos para os isoladores 25A e 25B, porém, se considerarmos os respectivos valores calculados de corrente crítica, pode-se afirmar que os valores I_h , obtidos no campo, estão afastados dos níveis críticos. Em região industrial, a restrição é feita ao local de monitoração em Philips, onde ocorreu uma descarga disruptiva.

- Grau de poluição equivalente: Em região litorânea foi considerado o isolador 15B para a determinação do grau equivalente de poluição, pois é muito utilizado pelas concessionárias. No entanto, o grau equivalente de poluição não é o mesmo para diferentes tipos de isoladores e o valor determinado pode ser utilizado nos ensaios de laboratório em isoladores alternativos, porém, com perfil similar ao isolador 15B. Em região industrial, o grau equivalente de poluição foi obtido considerando-se o isolador VC1.

- Valor de corrente permissível (I_{hp}): O estabelecimento do valor I_{hp} , com base em uma margem de segurança, tem por objetivo determinar a utilização de um isolador, em um dado local, ou a indicação da necessidade de manutenção quando o valor I_h ultrapassar o valor I_{hp} . Verma e outros [8] definiram um valor I_{hp} igual a 50% da corrente crítica I_c (mínimo valor de $I_{máx}$) que deve ser confirmada através da experiência de campo. Nessa referência, não são citados os critérios utilizados para o estabelecimento desses valores e portanto, devem ser investigados. Se considerarmos esse critério, o valor I_{hp} , para os isoladores 15A e 15B, seria igual a 0,40A, o que determinaria a não recomendação do isolador 15A, em Itanhaém-EMCA e Ilha Comprida, e 15B em Itanhaém-EMCA, pois a realização da manutenção, cada vez que os valores I_h

ultrapassarem o valor I_{hp} , não é viável, pois os níveis críticos podem ser atingidos rapidamente no litoral.

Em região industrial o valor I_{hp} pode ser estabelecido como critério de manutenção para Capuava e Mamoré. Em Philips é necessário uma análise mais cuidadosa, pois, os valores I_h são baixos e podem não representar uma situação crítica do isolador. A utilização do valor I_{hp} em região industrial deve considerar as diferentes configurações das LT's.

- Efeito das condições climáticas e medições da DDSE: A medição dos valores I_h , os dados das condições climáticas e os valores obtidos de DDSE, permitiram a realização de várias análises e consistências, possibilitando um melhor entendimento do fenômeno e dos efeitos dos diversos parâmetros que favorecem o aparecimento de arcos sobre o isolador. Foi verificado que, nos locais onde os valores máximos de DDSE foram elevados, ocorrem valores de corrente I_h elevados ou descarga disruptiva. Além disso, os valores máximos de DDSE encontram razoável correspondência com os graus equivalentes de poluição, determinados com os isoladores 15B e VC1.

Os valores máximos de DDSE indicaram os locais mais agressivos, porém, somente essas medições não são suficientes para avaliar a proximidade dos isoladores em relação aos níveis críticos.

Os meses de menor precipitação apresentaram valores I_h mais elevados e maior frequência de ocorrência dos arcos. A condição mais favorável para ocorrência dos arcos (45% a 51%) correspondeu às faixas de 80% a 90% de umidade relativa e de 15°C a 20°C de temperatura.

Os resultados comprovam que a metodologia utilizada na pesquisa é satisfatória e possibilitou a análise do comportamento do isolador e avaliação do seu desempenho em ambientes poluídos. As medições de DDSE auxiliaram nas análises e são recomendadas.

São recomendados os seguintes trabalhos no futuro:

- investigação em laboratório utilizando modelo simplificado para analisar a dispersão dos valores $I_{máx}$;
- abordagem teórica do equacionamento do arco em um isolador poluído para analisar a

- variação do comprimento crítico x_c e os valores de corrente crítica I_c ;
- investigações para o estabelecimento da margem de segurança (estabelecimento do valor I_{hp}).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OKUBO, N.; PINHEIRO, W.; LEITE, D.M.; KANASHIRO, A. G. Isoladores sujeitos à poluição. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 10., Rio de Janeiro, 1988. Rio de Janeiro, Light, 1988. SENDI, 1988. 20p.
- [2] KANASHIRO, A. G.; PINHEIRO, W. Isoladores sujeitos à poluição (II). In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 11., Blumenau, 1992. Blumenau, CELESC, 1992. 30p.
- [3] KANASHIRO, A. G. Estudo dos efeitos da poluição industrial no desempenho das Lt's. São Paulo, IEE-USP, 1994. (PED. RT.04)
- [4] NIGRI, A. I. Descargas elétricas parciais nos isolantes dos pátios das estações de +/- 600kV de Foz do Iguaçu e Ibiúna. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., Recife, 1993. Informes Técnicos. Recife, CHESF, 1993. p. RE/GSU/08/1-4.
- [5] VERMA, M. P.; NIKLASCH, H.; KOLOSSA, I.; PEDERSEN, A. A.; KRISTIANSEN, K. E.; RASMUSSEN, J. K. A new criterion common for different pollution test procedures providing the link between service and test conditions. 1974. (Report CIGRÉ SC 33-74 WG 04 IWD)
- [6] VERMA, M. P.; PETRUSCH, W.; PEDERSEN, A. A.; RASMUSSEN, J. K. Procedure for insulation dimensioning under pollution. London, 1977. (Report SC 33-77 IWD)
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c systems. Switzerland, IEC, 1991. (IEC 507)
- [8] VERMA, M.P.; NIKLASCH, H.; HEISE, W.; LIPKEN, H.; LUXA, G.F.; SCHREIBER, H. The criterion for pollution flashover and its application to insulation dimensioning and control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS, Paris, 1978. CIGRÉ, Paris, 1978. p. 33 - 09/1
- [9] LEITE, D. M.; TEIXEIRA, P. L.; KANASHIRO, A. G.; PEDERSEN, A. A. Registration instruments for measurements of leakage currents on polluted insulators. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 6., New Orleans, 1989. ISH. Proceedings. Mississippi, Mississippi State University, 1989. p. 42.10/1-4
- [10] OLIVEIRA, J. G.; MEDEIROS, W. P.; ROMA NETO, E. Registrador de corrente de fuga em isoladores poluídos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., Recife, 1993. Informes Técnicos. Recife, CHESF, 1993. p. RE/GSU-17/1-3.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abrigadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO

