

Oscar Kastrup F^o (*)
Francisco M. Salgado Carvalho
FURNAS-Centrais Elétricas S.A.

(*) Professor Adjunto da Pontifícia
Universidade Católica do Rio de
Janeiro

RESUMO

A utilização do centelhador como dispositivo de proteção contra sobretensões é uma prática antiga nas redes elétricas que voltou recentemente a ser adotada por algumas concessionárias brasileiras de energia elétrica em vãos de linha de transmissão em subestações até 138 kV. O centelhador tem um custo inferior aos pára-raios (atualmente a relação de preço com o pára-raios de óxido de zinco é de aproximadamente 1:100) tornando-se, portanto, uma alternativa atraente para as concessionárias de energia elétrica. Em alguns países europeus, já se pesquisa a utilização de centelhadores na proteção de subestações de 400 kV blindadas com SF₆.

O presente trabalho demonstra que a presença do centelhador nos vãos das linhas de transmissão não acarreta uma elevação do índice de desligamentos das mesmas. Este fato é irrefutavelmente demonstrado pelas estatísticas das empresas que vêm utilizando este dispositivo há mais de 10 anos.

As futuras subestações até 138 kV poderão ser dotadas de centelhadores em vãos de linha. FURNAS adotará também como política a substituição de pára-raios danificados, nas subestações existentes, por centelhadores.

Está sendo realizado um amplo programa de pesquisas com o CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e o LAC - Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica (Convênio COPEL/Universidade Federal do Paraná), englobando as áreas dielétrica, de potência e de ruído audível. Nos ensaios dielétricos será verificado o desempenho de novas concepções construtivas dos eletrodos, principalmente para os surtos atmosféricos com alta taxa de crescimento, bem como a possibilidade de sua utilização em redes de 230kV. Nos ensaios de arco de potência será verificada a influência da magnitude da corrente de curto-circuito e de sua duração, no dimensionamento das ferragens dos centelhadores.

INTRODUÇÃO

O objetivo inicial desse trabalho foi verificar a possibilidade de instalação de centelhadores nos vãos de linhas das subestações existentes de 138 kV do sistema FURNAS, substituindo os pára-raios como dispositivo de proteção contra as sobretensões, devido à utilização do estoque de todas as unidades reserva de pára-raios, empregadas na substituição de pára-raios danificados em serviço.

A proteção fornecida pelos centelhadores deve abranger todos os equipamentos da SE, à exceção dos enrolamentos de transformadores de força e de reatores derivação, cuja proteção continuará sendo executada por pára-raios instalados próximos aos terminais desses equipamentos.

A utilização dos centelhadores passará a ser adotada por FURNAS nas novas SE's de 138 kV [1], além de sua aplicação aos vãos de linha das SE's existentes, como política de substituição dos pára-raios danificados.

1. INSTALAÇÃO DE CENTELHADORES NA REDE DE 138 kV

A verificação da possibilidade de utilização dos centelhadores, para a proteção dos equipamentos das subestações de 138 kV contra as sobretensões atmosféricas, foi feita através de simulações digitais com o programa de transitórios eletromagnéticos EMTD. Desses estudos, foram definidos o ajuste da distância entre os eletrodos do centelhador e a sua melhor localização na entrada dos vãos de linha das subestações.

Na fase de especificação dos centelhadores devem ser definidas a sua concepção construtiva (forma geométrica), dimensionamento das ferragens de forma compatível com o nível de curto-circuito da subestação onde serão instalados; dispositivos para detetar a sua operação, etc. Quando a quantidade for pequena, como no caso de substituição de pára-raios danificados em operação, os centelhadores, pela sua simplicidade construtiva, podem ser confeccionados nas oficinas da própria empresa concessionária.

A instalação dos centelhadores substituindo pára-raios, no caso de SE's energizadas, é relativamente rápida (6 a 8 hs) exigindo o desligamento apenas da linha na qual o centelhador será instalado.

2. COMPARAÇÕES CENTELHADOR X PÁRA-RAIOS

O centelhador é o mais antigo dispositivo de proteção contra as sobretensões utilizado nas redes elétricas. Consiste de dois eletrodos, um ligado à fase e outro à terra, sendo a distância entre eletrodos ajustada de tal forma a provocar uma descarga para a terra, limitando a magnitude das sobretensões que penetram na subestação a um nível compatível com os níveis de isolamento dos equipamentos da subestação. O ajuste do centelhador depende de uma série de fatores: níveis de isolamento a impulso atmosférico (NBI) dos equipamentos, número de circuitos em operação (linhas e transformadores) na subestação, taxa de crescimento do surto atmosférico (kV/μs), distâncias elétricas entre o centelhador que opera e os diversos equipamentos da subestação, esquema de manobra e arranjo físico da subestação, etc...

Os centelhadores são normalmente instalados nos vãos de linhas, nas subestações, já que das linhas de transmissão originam-se a quase totalidade dos surtos atmosféricos que atingem as subestações.

A utilização de centelhadores em buchas de transformadores de força não é recomendada, pois a sua atuação acarreta esforços apreciáveis nos seus enrolamentos além de não ser indicada quando se utiliza certos tipos de disjuntores de pequeno volume de óleo para manobrar os transformadores.

Com o crescimento das tensões de transmissão de energia elétrica, transportando-se maiores blocos de energia por um menor número de linhas, os centelhadores caíram em desuso com o advento dos pára-raios atuais. Os pára-raios foram concebidos de forma a executar a função precípua dos centelhadores - limitar as sobretensões que penetram na subestação - sem provocar o desligamento da linha que sempre ocorre

quando há atuação do centelhador.

Hoje em dia a utilização do centelhador pode ser enquadrada no seguinte panorama:

- continua sendo amplamente utilizado em sistemas relativamente malhados, onde a perda de uma linha (mesmo que não momentânea) não acarreta problemas de estabilidade e confiabilidade para a rede (sistema europeu e os grandes sistemas brasileiros de sub-transmissão);

- é perfeitamente aplicável em qualquer classe de tensão, desde que não provoque um aumento apreciável no índice de desligamentos das linhas;

- voltou a ser utilizado recentemente com sucesso por três concessionárias brasileiras em seus sistemas de 138 kV (CESP e FURNAS) e 138/69 kV (CEMIG).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os dois dispositivos.

Nesta tabela deve-se destacar que:

a) A diferença de custo entre os dois dispositivos torna-se irrelevante quando está em questão a importância e custo do(s) equipamento(s) protegido(s) ou quando está em jogo a confiabilidade do sistema.

b) O desempenho das linhas, número de desligamentos/100 km-ano, não será afetado pela atuação dos centelhadores se esta atuação for precedida por uma falha na linha. Esta é a situação das quedas indiretas nas linhas, as quais têm a maior probabilidade de ocorrência nas linhas blindadas com cabos guarda. Portanto, somente as ocorrências de quedas diretas (falhas de blindagem) nas proximidades da subestação, que não provoquem descargas nas cadeias das últimas torres da linha ou no portico da subestação e provoquem a atuação do centelhador, acarretarão um aumento no número de desligamentos das linhas pela presença do centelhador. Esta última situação tem reduzida probabilidade de ocorrência conforme atesta o pelas estatísticas de duas concessionárias brasileiras, com um total de 10 anos de experiência em cerca de 50 vãos de LT's com centelhadores, que não indicaram nenhum aumento no índice de desligamentos das linhas onde os centelhadores foram instalados.

c) As características de disparo do centelhador e do isolamento de enrolamentos de transformadores de força e de reatores derivação apresentam comportamentos diferentes na região de sobretensões com taxas de crescimento muito elevadas, ficando o isolamento A desprotegido para surtos com taxas de crescimento superiores a S kV/ μ s para centelhadores com a característica B correspondente a uma distância entre eletrodos maior que o centelhador C da Figura 1. Esta situação não ocorre para os demais equipamentos cujos isolamentos externos em ar A' apresentam um comportamento similar ao dos centelhadores.

d) Características de disparo D de pára-raios convencional de carbureto de silício.

3. EXPERIÊNCIA ATUAL DE CONCESSIONÁRIAS BRASILEIRAS QUE ESTÃO UTILIZANDO CENTELHADORES EM SUBESTAÇÕES DE 138 KV E 69 KV

Pelo menos três concessionárias brasileiras passaram recentemente a utilizar centelhadores nos vãos de linha das subestações de 138 kV e 69 kV em substituição aos pára-raios convencionais empregados na função de proteção da subestação contra as sobretensões.

A CESP utiliza os centelhadores desde 1979 [3], estando atualmente com 117 centelhadores já instalados (39 vãos de linha). A utilização do centelhador tem sido satisfatória a ponto de passar a ser prática da empresa em seus novos empreendimentos a menos de res-

trições peculiares que possam ser indicadas em estudos para estas subestações. Nestes 10 anos de experiência, há suspeita de apenas três operações dos centelhadores. Desde a instalação dos primeiros centelhadores, não houve aumento na estatística da empresa dos índices de desligamentos das linhas em que eles foram instalados.

A CEMIG vem utilizando os centelhadores há mais de 5 anos. Atualmente está com este dispositivo instalado em 5 a 10 vãos de linha de 138 kV e em todos os vãos de linha de uma subestação de 69 kV. Há registro de duas operações dos centelhadores neste período.

Tanto a CESP como a CEMIG utilizam o centelhador tipo haste-anel (Figura 2), confeccionado nas próprias oficinas das empresas em aço galvanizado (CEMIG) e aço pintado (CESP). A CESP instala os centelhadores acoplados aos TC's de linha. A CEMIG começou inicialmente instalando o centelhador em um isolador pedestal nas entradas dos vãos de linha mas passará a instalá-los também acoplados aos TC's de linha, a não ser que os TC's tenham cabeça de epoxi.

As duas companhias não procederam a nenhuma modificação em seus esquemas de proteção e nos TC's já em operação pelo fato de instalarem os centelhadores nos vãos de linha. Não irão introduzir, também, nenhuma alteração nas especificações de características de fituros TC's utilizados em linhas com centelhadores.

A CESP não efetuou nenhuma modificação no sistema de aterramento dos TC's onde foram instalados os centelhadores.

FURNAS instalou os primeiros centelhadores, com a configuração haste-anel, na SE de Cachoeira Paulista 138 kV, no vão da LT para a UHE de FUNIL, em julho de 1988 (Figura 3).

O nível de curto-circuito atual nessa SE é de 18 kA rms. Esses centelhadores foram fabricados na própria empresa e instalados na base de concreto onde ficavam os pára-raios dessa linha. A localização do centelhador nessa posição, cuja adequabilidade já havia sido verificada nos estudos, deveu-se não só à disponibilidade física dessa base, bem como ao fato das SE's do sistema FURNAS possuírem proteção diferencial de barra, o que contra-indica a instalação dos centelhadores nos TC's de linha onde há a superposição desse tipo de proteção com a proteção de linha.

Os eletrodos dos centelhadores foram montados acoplados a 3 isoladores de pedestal e a sua base inferior ficou isolada da base de concreto pelos pequenos isoladores instalados nas bases de pára-raios que têm contadores de descarga (Figura 3). Com esse tipo de instalação será possível instalar dispositivos no cabo de aterramento do eletrodo inferior, com a finalidade de detectar as operações dos centelhadores para demonstrar, de forma inequívoca, que esses equipamentos não aumentam o índice de desligamentos das linhas (Tabela 1, item b). As ferragens utilizadas na fabricação dos eletrodos têm bitola de 1/2" (anel = tubo de ferro galvanizado; haste = vergalhão de ferro galvanizado).

4. SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS QUE PODEM Atingir OS EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO

No projeto dos isolamentos de uma SE de 138 kV somente as sobretensões atmosféricas têm interesse, principalmente devido ao efeito distância. Este efeito provoca uma ampliação das sobretensões nos diversos equipamentos da SE, em relação ao nível de proteção do centelhador (ou pára-raios), devido ao fato que as distâncias entre estes dispositivos e os equipamentos serão muito inferiores às distâncias de propagação correspondentes aos tempos de crista dos sur-

tos atmosféricos [4]. As sobretensões atmosféricas podem atingir uma subestação e seus equipamentos em duas situações:

- descargas atmosféricas atingindo diretamente a subestação;
- descargas atmosféricas atingindo as linhas de transmissão conectadas à subestação.

No primeiro caso há duas possibilidades:

a) A descarga atingir o sistema de blindagem (cabos e mastros) da subestação. Nesta hipótese os equipamentos não serão afetados, pois a malha de terra estando em boas condições fornece uma baixa resistência para a terra, impossibilitando a ocorrência de uma descarga indireta estrutura-equipamento ou estrutura-barramento.

b) A descarga atingir os equipamentos ou barramentos periféricos da subestação por falha do sistema de blindagem da subestação. Nesta hipótese os critérios de projeto adotados por FURNAS são tais que as falhas de blindagem só podem ocorrer para pequenas intensidades de correntes de raio que provocam sobretensões inferiores aos níveis de isolamento a impulso atmosférico dos equipamentos da subestação. Em decorrência dos aspectos acima descritos, as descargas atmosféricas que atingem diretamente as subestações de FURNAS não foram consideradas neste estudo como causadoras de sobretensões nos equipamentos instalados nas SE's.

No segundo caso, descargas atmosféricas atingindo as linhas de subestação, há duas possibilidades dos surtos atmosféricos penetrarem na subestação atingindo os equipamentos: tanto por queda indireta como por falha de blindagem das linhas. Em ambos os casos consideram-se apenas as descargas atmosféricas que caem nos primeiros 3 a 4 vãos de linha, pois as descargas mais distantes chegam a subestação bastante amortecidas e distorcidas (basicamente por efeito corona). Nestas duas possibilidades as magnitudes dos surtos que penetram na subestação serão sempre limitadas pela suportabilidade das cadeias de isoladores dos pórticos de entrada da subestação e/ou das cadeias de isoladores das linhas de transmissão.

5. CARACTERÍSTICAS DAS SUBESTAÇÕES

Verificou-se nos estudos o padrão de FURNAS para SE's de 138 kV com arranjo de barra dupla com 5 chaves. Este é o arranjo que vem sendo adotado ultimamente pela empresa até a classe de 345 kV, embora esteja sendo analisada atualmente a possibilidade de ser padronizado o arranjo barra dupla com 4 chaves para as SE's futuras. Algumas SE's mais antigas utilizam o arranjo barra principal/barra de transferência.

Nos estudos é simulada a topologia de cada arranjo com as distâncias entre os equipamentos, comprimentos e impedâncias de surto dos barramentos rígidos e flexíveis, capacitâncias de buchas e de equipamentos, localização dos centelhadores de linha e para-raios dos transformadores, etc...

6. CONDIÇÕES OPERATIVAS SIMULADAS NO PROGRAMA EMTP

Os casos de penetração de surtos atmosféricos nas subestações provenientes das linhas de transmissão foram simulados no programa de transitórios EMTP e, para efeito de análise, divididos em dois grupos:

6.1. Casos com Disjuntores de Linha Fechados

São analisadas as quedas de raios que atingem, por queda direta ou indireta, os condutores de uma linha em operação, com os dois disjuntores terminais fechados. Os surtos atmosféricos resultantes destas descargas atmosféricas penetram na subestação próxima

da queda.

Foram estudadas diversas configurações operativas da subestação variando-se o número de circuitos em operação. Estas configurações podem simular as diversas etapas de implantação de uma subestação bem como etapas de reconstrução da subestação após distúrbios que provoquem perda parcial ou total dos circuitos em operação. Como regra geral pode-se afirmar que quanto maior o número de circuitos em operação, menores os valores das sobretensões resultantes nos equipamentos da subestação [4].

6.2. Casos com Disjuntores de Linha Abertos

Cerca de 30 a 60% dos raios apresentam descargas múltiplas [5]. Após a abertura dos disjuntores pelo curto-circuito provocado pela primeira descarga, a segunda descarga que se forma pelo mesmo canal da primeira, poderá atingir os equipamentos de entrada de linha até o disjuntor ainda aberto, mesmo em linhas dotadas de religamento automático.

Como será visto na análise dos casos estudados esta situação provoca sobretensões elevadas nestes equipamentos pelo fato do disjuntor encontrar-se aberto, embora tenha uma pequena probabilidade de ocorrência [3], [4].

7. CRITÉRIOS UTILIZADOS

7.1. Suportabilidade das Cadeias das LT's dos Pórticos da SE

As linhas de 138 kV de FURNAS têm 10 isoladores 254 mm x 146mm cuja suportabilidade a surtos de polaridade de negativa é $V_{50} = 930$ kV [6]. A polaridade negativa foi considerada por ser mais frequente (90%) nas descargas atmosféricas.

O valor máximo de descargas das cadeias foi considerado a mais dois desvios padrão (σ) do valor V_{50} .

$$V_C = V_{50} (1 + 2\sigma)$$

Para $V_C = 930$ kV e $\sigma = 3\%$, $V_C = 985$ kV

7.2. Local de Queda dos Raios

Considerou-se no estudo quedas de raios nas linhas a 500 m (2º vão) e a 1000 m (4º vão) da subestação.

Foi considerada uma distorção da frente de onda de $1,0 \mu\text{s}/\text{km}$ [7], [8], [9].

7.3. Requisitos dos Centelhadores

Considerou-se no estudo dados de resultados de laboratório dos ensaios realizados pela CESP e CEMIG para o centelhador haste-anel. Este centelhador parece apresentar uma suportabilidade maior aos impulsos de manobra que o centelhador haste-haste. Este fato é vantajoso para a aplicação em estudo, pois minimiza a probabilidade de operação do centelhador para as sobretensões de manobra resultantes das operações de religamento automático e de energização das linhas.

7.3.1. Impulsos Atmosféricos

Foram utilizadas suportabilidades a impulso atmosférico, onda $1,2 \times 50 \mu\text{s}$, para ajustes do centelhador dentro da faixa de 50 cm até 75 cm adotados pela CEMIG e CESP, respectivamente.

- d = 50 cm (CEMIG): $V_{50} = 360$ kV (pol. negativa)
- d = 66 cm (CESP): $V_{50} = 457$ kV (pol. negativa)
- d = 75 cm (CESP): $V_{50} = 509$ kV (pol. negativa)

A maioria dos casos estudados foi para o centelhador instalado no TC de entrada da linha. Foi verificada também a sua localização junto ao disjuntor de linha

e no local do para-raios de linha, acoplado a um isolador de pedestal.

Valores intermediários de disparo foram utilizados nos estudos com a finalidade de se facilitar a escolha do ajuste do centelhador, no caso de FURNAS durante os ensaios de laboratório cuja realização será necessária para este objetivo. Considerou-se, conservativamente, a comparação do centelhador num valor superior a $+ 2 \sigma$ do valor V_{50} . O valor da onda incidente na subestação, limitada pelo centelhador, será:

$$V_i = V_{50} (1 + 2\sigma), \text{ para } \sigma = 3\% \text{ tem-se:}$$

- d = 50 cm (CEMIG): $V_i = 360 (1 + 2\sigma) = 385$ kV
- d = * cm (FURNAS): $V_i = 400$ kV
- d = * cm (FURNAS): $V_i = 450$ kV
- d = 66 cm (CESP): $V_i = 457 (1 + 2\sigma) = 485$ kV
- d = * cm (FURNAS): $V_i = 500$ kV
- d = 75 cm (CESP): $V_i = 509 (1 + 2\sigma) = 550$ kV

* = distâncias a serem levantadas nos ensaios dielétricos de laboratório.

O comportamento do centelhador para ondas com taxa de crescimento mais elevadas será ainda pesquisado em ensaios que serão realizados brevemente.

7.3.2. Impulsos de Manobra

Assumiu-se um surto de manobra máximo de 3 p.u., relativo às manobras de religamento das linhas mais longas de 138 kV, que corresponde a 338 kV fase-terra. Para minimizar a possibilidade de operação dos centelhadores para as manobras de religamento assumiu-se que esta sobretensão acarrete, no máximo 2,3% de probabilidade de descarga do centelhador.

$$V_{2,3} = 338 \text{ kV, logo } V_{50} = 384 \text{ kV para } \sigma = 6\%.$$

Os ensaios a serem realizados por FURNAS deverão com provar que o valor $V_{50} = 384$ kV para impulso de manobra será atendido para a distância escolhida para o centelhador em relação aos impulsos atmosféricos.

7.3.3. Sobretensões à Frequência Industrial

Considerou-se uma sobretensão máxima à frequência industrial de 1,4 p.u. nas linhas de 138 kV de FURNAS, ou seja, 158 kV fase-terra de crista. Este deverá ser o valor mínimo de disparo do centelhador para estas sobretensões.

7.4. Influência das Condições Climáticas

A influência das condições climáticas na suportabilidade dos isolamentos dos equipamentos expostos ao ar e na suportabilidade (tensão de disparo) do centelhador não foi considerada no estudo.

Julga-se que as estatísticas dos fenômenos de descarga atmosféricas não têm amostragem suficientemente grande que permitam utilizá-las com um grau de confiança adequado com as demais condições climáticas (umidade e densidade relativa do ar) que afetam a suportabilidade dos isolamentos dos equipamentos.

Além disso, o efeito das condições climáticas é o mesmo tanto na suportabilidade dos equipamentos expostos ao ar quanto ao nível de disparo dos centelhadores: quando as condições climáticas são adversas, provocando uma redução na suportabilidade dos equipamentos, o nível de disparo do centelhador diminui, reduzindo as sobretensões que penetram na subestação. O mesmo raciocínio aplica-se para as condições climáticas que aumentam o nível de disparo do centelhador e ao mesmo tempo aumentam a suportabilidade dos equipamentos.

7.5. Margens de Tolerância

Como a metodologia adotada no estudo permite a determinação precisa das sobretensões nos diversos equipamentos da subestação, não há necessidade da adoção de margens empíricas, muito apreciadas em tempos passados, na escolha de níveis de isolamento de equipamentos.

Considerou-se, neste trabalho, uma margem mínima de tolerância de 10% entre as sobretensões e as suportabilidades a impulso atmosférico (NBI) dos equipamentos para levar em consideração possíveis variações na tensão de disparo de centelhador, nos níveis de proteção dos para-raios, nas suportabilidades dos equipamentos e, também, em possíveis imprecisões nos dados utilizados no estudo. Esta margem não leva em consideração as reflexões das ondas dentro da subestação, já determinadas nas simulações realizadas.

Para uma margem de 10%, as máximas sobretensões permitidas nos equipamentos deverão ser:

- enrolamentos de transformadores de força (NBI = 550 kV)

$$\frac{\text{NBI} - V_{\text{max}}}{V_{\text{max}}} = 10\% \rightarrow V_{\text{max}} = 500 \text{ kV}$$

- demais equipamentos (NBI = 650 kV)

$$\frac{\text{NBI} - V_{\text{max}}}{V_{\text{max}}} = 10\% \rightarrow V_{\text{max}} = 590 \text{ kV}$$

8. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DIGITAIS

8.1. Casos com Disjuntores de Linha Fechados

Em todos os casos estudados, incluindo centelhadores com ajustes máximo de 75 cm, as sobretensões ficaram limitadas aos valores estabelecidos nos critérios de estudo: $V_{\text{max}} = 590$ kV (equipamentos de manobra e medida) e $V_{\text{max}} = 500$ kV (transformadores). As únicas excessões são as sobretensões nos DCP's de barra quando localizados nas extremidades dos barramentos para o ajuste do centelhador de 75 cm. Não há sobretensões excessivas nos DCP's de barra se eles estiverem localizados no meio dos barramentos principais.

8.2. Casos com Disjuntores de Linha Abertos

Estes são os casos mais críticos em relação aos níveis que podem alcançar as sobretensões nos equipamentos de entrada da linha. Apenas os casos estudados com ajuste do centelhador que permitem ondas incidentes nas subestações inferiores a $V_i = 450$ kV, fornecem sobretensões menores aos valores estipulados nos critérios de estudo para os disjuntores, chamados de "by-pass" de entrada de linha e DCP's.

Todos os casos pesquisados com o centelhador provocaram sua atuação devido à reflexão da sobretensão incidente no disjuntor aberto. Este fato não é problemático, pois este disparo se dará com a linha aberta antes do religamento, não provocando falta no sistema. Não há, praticamente, probabilidade de coincidência do religamento ($t > 400$ a 600 ms) com o disparo do centelhador para o raio subsequente, já que em apenas 5% dos raios o intervalo entre a primeira e segunda descarga excede 150 ms [10].

9. ENSAIOS DIELÉTRICOS E DE ARCO DE POTÊNCIA

9.1. Ensaios Dielétricos

Os ensaios dielétricos ainda estão sendo realizados no Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica (LAC) da Universidade Federal do Paraná, localizado na cidade de Curitiba.

Está sendo verificado o comportamento dielétrico de três configurações (Figura 4): haste-anel, olhal-anel e esfera-anel, procurando-se identificar qual a configuração que apresenta uma característica V_{rt} mais plana, para os impulsos muito rápidos, além de apresentar maior suportabilidade aos impulsos de manobra e às sobretensões de 60 Hz, de forma a se eliminar a possibilidade de operação dos centelhadores durante as manobras de energização de religamento das linhas e ocorrência de faltas na rede.

9.2. Ensaio de Arco de Potência - Contador de Operações

Os ensaios de arco de potência foram realizados no CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, localizado na cidade do Rio de Janeiro.

Como o objetivo desse ensaio é o dimensionamento das ferragens do centelhador, foi ensaiada apenas a configuração haste-anel com bitolas de 1/2" e 1" (Figuras 5 e 6).

Foram feitas aplicações de correntes de 15, 31.5 e 50 kA rms com tempos correspondentes a:

- 10 ciclos: duração pouco superior aos tempos de operação dos relés de 1ª zona e proteções primárias;

- 30 ciclos: duração pouco superior aos tempos de operação dos relés de 2ª zona;

- 60 ciclos (1 segundo): ensaio destrutivo (Figura 7)

9.2.1. Resultados

A menos do ensaio destrutivo, realizado com uma corrente de 15 kA e o tempo de 1 segundo, em um centelhador de 1/2", todas as correntes aplicadas com tempos correspondentes a 10 e 30 ciclos não apresentaram desgastes apreciáveis (no máximo 1 cm de desgaste na haste). As conclusões finais desses ensaios ainda estão sendo preparadas mas pode-se, em princípio, dizer que o desgaste dos eletrodos ensaiados de perderam basicamente da duração da aplicação da corrente de curto-circuito e não de sua intensidade.

Durante os ensaios de arco de potência foram testados com sucesso os contadores de descargas desenvolvidos pelo Laboratório de Medidas Elétricas de FURNAS, (Figura 6). Esses contadores têm "reset" manual.

Tecidos que simulam pele humana, colocados abaixo do centelhador na altura de uma pessoa (Figura 5), não sofreram nenhum impacto pelas ondas de calor emana das dos arcos durante todos os ensaios. Apenas no ensaio destrutivo, o material incandescente proveniente do desgaste do centelhador provocou perfuração do tecido.

10. CONCLUSÕES

10.1. Pelos resultados dos estudos e pela experiência anterior das concessionárias brasileiras que já utilizam centelhadores em vãos de linha, recomendou-se a sua instalação nas futuras SE's de 138 kV de FURNAS. Este procedimento de substituição dos para-raios de linha por centelhadores representará uma economia razoável, sem acarretar riscos preocupantes para o pessoal, equipamentos e instalações da SE, ou mesmo, elevação do índice de desligamento das linhas onde eles forem instalados.

10.2. A sua aplicação já deverá ser efetuada nas novas SE's do sistema.

10.3. Situações excepcionais que exijam alta confiabilidade de suprimento, operação de SE's seccionado - ras com número de linhas inferiores a quatro, localização da SE em regiões de alto nível cerâmico e quando houver grandes bancos de capacitores instala-

dos na SE, deverão receber uma análise à parte.

10.4. A distância de ajuste final entre os eletrodos do centelhador será feita à época do término dos ensaios dielétricos de impulso atmosférico, impulso de manobra e frequência industrial. Atualmente está sendo adotada uma distância de 60 cm. A consideração da altitude da SE poderá alterar esse espaçamento. Esta distância deverá ser tal que corresponda a um valor V₅₀ a impulso atmosférico 1,2 x 50 μs na faixa de 425 kV a 475 kV, correspondente a sobretensões incidentes na SE de 450 kV a 500 kV respectivamente. Nos ensaios dielétricos, também serão comprovados os critérios adotados para as sobretensões de manobra e de frequência industrial e verificado o comportamento de diversas formas de eletrodos para os surtos atmosféricos escarpados.

10.5. Os ensaios de potência que servirão de base para o dimensionamento das ferragens dos centelhadores e cabos de aterramento para as correntes de curto-circuito máximas esperadas no sistema de 138 kV e levantamento do nível de ruído que ocorre durante a operação do mesmo, para se avaliar possíveis impactos ambientais em subestações urbanas. Resultados preliminares dos ensaios de arco de potência indicam que a bitola de 1/2" está adequada para correntes de curto-circuito de 18 kA rms e a de 1" está adequada para correntes até 50 kA rms.

10.6. As hastes dos centelhadores deverão ser providas de um sistema de fixação que permita o ajuste da distância entre eletrodos na faixa de 40 cm a 80 cm.

10.7. Os centelhadores deverão ser fabricados de aço galvanizado e deverão ser dimensionados para correntes de curto-circuito máximas existentes no sistema.

10.8. Os tempos de religamento deverão se situar na faixa de 400 a 600 ms.

10.9. Os centelhadores podem ser instalados acoplados aos transformadores de corrente de linha ou, logo na entrada da linha, na posição tradicionalmente ocupada pelo para-raios de linha. Essa última posição deverá ser obrigatoriamente utilizada quando o esquema de proteção da SE possuir releamento diferencial de barra.

11. REFERÊNCIAS

- [1] Kastrup F^o, O. - "Centelhador em Vãos de Linha: Sua Utilização como Dispositivo de Proteção contra as Sobretensões nas Subestações de 138 kV do Sistema de FURNAS", IX SNIPEE, B. Horizonte, 1987.
- [2] Diesendorf, W. - "Insulation Co-ordination in High-Voltage Electric Power Systems", Butterworth & Co, 1974.
- [3] Rodrigues, C.G. e Barros, F.D.O. - "A Substituição de Para-raios de Linha por Centelhadores", Eletricidade Moderna, Outubro 1985.
- [4] Jardini, J.A. e Kastrup F^o, O. - "Coordenação de Isolamento em Linhas de Transmissão e em subestações" - Ciclo de Palestras do COBEI, São Paulo, Junho 1977.
- [5] Hileman, A.R. et alii - "Open Breaker Protection of EHV Systems", IEEE PAS - Vol. 88 - nº 7, Julho 1969.
- [6] Catálogo Vifosa.
- [7] CIGRÉ Task Force 33.01.02 - "Lightning Protection of Stations" - Montreal, Junho 1975.
- [8] CIGRÉ General Report - "Shapes and Surges Stressing Substation Equipment" - ELECI 41, Dezembro/76.

[9] Kastrup FV, O. et alii - "Coordenação de Isolamento das Subestações do Sistema de Transmissão de Itaipu" - IV SNTTEE, Rio de Janeiro, 1977.

[10] Berger, K. et alii - "Parameters of Lightning Flashes", ELECTRA nº 41, Julho 1975.

TABELA 1: Comparações Centelhador x Pára-raios

	VANTAGENS	DESVANTAGENS
CENTELHADOR	<ul style="list-style-type: none"> baixo custo (a) possibilidade de ajuste do nível de proteção contra as sobretensões os níveis de proteção não são afetados pela poluição os ensaios de laboratório precisam ser realizados uma única vez no protótipo de centelhador a ser empregado na rede 	<ul style="list-style-type: none"> provoca um curto-circuito no sistema quando atua: haverá um desligamento da linha se não for utilizado religamento rápido (b) os níveis de proteção variam com as condições atmosféricas (umidade e densidade relativa do ar) se não ajustados de maneira adequada, podem não fornecer proteção para os enrolamentos de transformadores e reatores nos casos de surtos atmosféricos com frentes muito inclinadas (c) a operação do centelhador provoca ruído apreciável.
PÁRA-RAIOS	<ul style="list-style-type: none"> não provoca curto-circuito no sistema quando atua os níveis de proteção não variam com as condições atmosféricas (umidade e densidade relativa do ar) se escolhido adequadamente, fornece proteção adequada para surtos atmosféricos com frentes muito inclinadas (d) 	<ul style="list-style-type: none"> elevado custo (a) quando não escolhido adequadamente, o ajuste dos níveis de proteção só pode ser feito com a substituição por outro pára-raios o seu desempenho pode ser afetado pela poluição que pode, inclusive, acarretar sua explosão a operação inadequada do pára-raios pode provocar sua explosão com possibilidade de danificação de equipamentos vizinhos os ensaios de laboratório precisam ser realizados em cada pára-raios novo a ser comprado

* Notas (a), (b), (c) e (d): ver item 2.

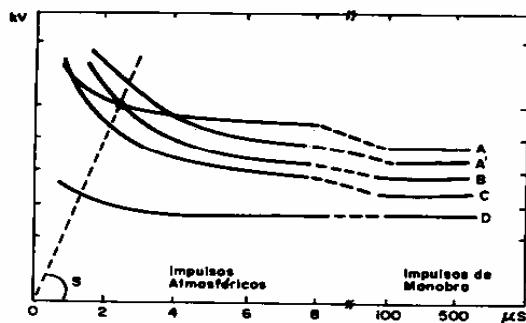


Figura 1: Isolamentos Não Regenerativos (Enrolamentos de Transformadores de Força e de Reatores) e Isolamentos Auto-Regenerativos (Demais Equipamentos) Protegidos por Centelhadores e Pára-Raios [2].

A - Isolamento não-regenerativo
 A' - Isolamento auto-regenerativo
 B e C - Centelhadores com ajustes diferentes entre eletrodos.
 D - Característica de proteção de pára-raios convencional com "gap".



Figura 2: Centelhadores Haste-Anel Acoplados em Transformadores de Corrente de Linha de Transmissão (CESP - 138 kV).



Figura 3: Centelhador Hasté-Anel Acoplado em Isolador Pedestal na Entrada de uma Linha de 138 kV (FURNAS).

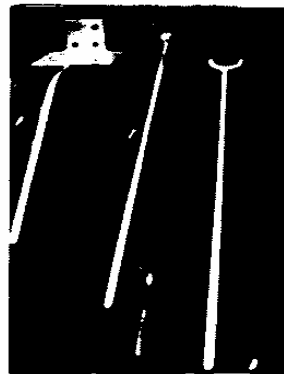


Figura 4: Configurações de Eletrodos cujos Comportamentos estão sendo Pesquisados em Ensaios de Impulsos Atmosféricos e de Manobra, e Sobretensões de 60 Hz (LAC-Universidade Federal do Paraná).

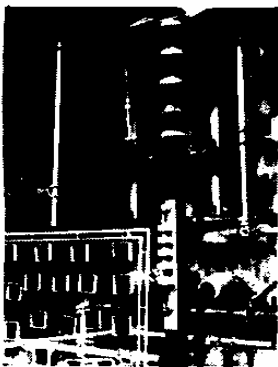
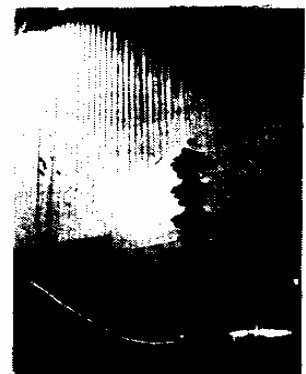


Figura 5: Centelhador com Ferragens de 1/2" Preparado para uma Aplicação de uma Corrente de Curto-Circuito de 15 kA rms (CEPEL).



Figura 6: Arco de Potência de uma Aplicação de 15 kA rms em Centelhador de 1/2". As Correntes de 31,5 kA e 50 kA rms foram Aplicadas em Centelhadores de 1".



Figura 7: Centelhador de 1/2" após a Aplicação de uma Corrente de 15 kA durante 1 segundo (Ensaio Destrutivo).

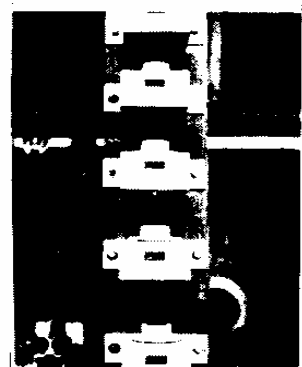


Figura 8: Indicadores de Operação dos Centelhadores sendo Testados durante os Ensaios de Arco de Potência.



Kastrup F.º, Oscar

Nasceu em 23 de janeiro de 1946, na cidade de Niterói, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1969 pela Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica - RJ. Tem curso de extensão universitária em transitórios eletromagnéticos na Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. Foi

professor de cursos de treinamento para engenheiros de concessionárias de energia elétrica na Universidade de São Paulo, nas Universidades dos Estados do Rio de Janeiro e da Bahia, na ELETROBRÁS, na THEMAG Engenharia, no Comitê Brasileiro de Eletricidade, na ISA (Colômbia), na UTE (Uruguai) e no INECEL (Equador). Desde 1979 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC/RJ, onde de sua área de interesse são os fenômenos transitórios em Sistemas de Potência, Coordenação de Isolamento, Projeto e Especificações de equipamentos elétricos e subestações.



Salgado Carvalho, Francisco M.

Nasceu em 31 de dezembro de 1947, na cidade de Cataguases, estado de Minas Gerais, Brasil. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1971 pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Ex-Escola Nacional de Engenharia da Universidade do Brasil). Tem curso de extensão universitária

em análise de sistemas de potência na Universidade de Wisconsin (EUA) e de mestrado em Engenharia de Sistemas de Potência na Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Foi professor de cursos de treinamento para engenharias de empresas concessionárias de energia elétrica na Universidade Federal da Bahia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, nas Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS) e na UTE (Uruguai). É engenheiro de FURNAS-Centrais Elétricas S.A. desde 1972 atuando na área de estudos e especificação de equipamentos.

ABSTRACT

The use of spark gap as an overvoltage protective device in substations was an old practice that is being utilized again by some Brazilian utilities in substations up to 138 kV. Its low cost (100 times less the cost of a ZnO arrester), associated with a good service experience, has become an attractive option at this voltage classes. This paper shows that spark gaps don't increase the line outages where they are installed, fact proved by these utilities statistics in the last 10 years.

In FURNAS, spark gaps will be used in the future 138 kV system expansion and substituting arresters damaged in service.

Dielectric and power arc tests are being carried out in CEPEL-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica and LAC-Laboratório Central de Eletrotécnica e Eletrônica (COPEL/Universidade Federal do Paraná). In dielectric tests various gap configurations are being investigated in order to determine whether any improvement can be made for fast surges, as well the possibility to use spark gaps in 230 kV systems. Power arc tests will determine the influence of short circuit currents, magnitude and duration, in spark gap hardware dimensions.