



**GRUPO XI
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS ZnO EM LINHAS DE 138kV

**Oscar Kastrup Filho
Armando Nigri
Paulo Maldonado
Francisco Manoel Salgado Carvalho**

**Luiz Cláudio Ribeiro Galvão *
Luiz Cera Zanetta Jr.
Fernando Augusto Moreira
Manuel Luiz Barreira Martinez
Weide Sato
Dalton Oliveira Camponês do Brasil**

FURNAS - CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

USP - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

RESUMO

Este artigo descreve os estudos desenvolvidos num âmbito de cooperação científica entre FURNAS e USP para determinar as condições de aplicação, tipo e valores nominais de pára-raios de linha, visando a sua aplicação em algumas linhas de transmissão em 138kV para melhorar o seu desempenho frente a surtos atmosféricos. Descrevem-se os cálculos efetuados para definir as características dos pára-raios, sua posição ao longo da linha e o desempenho operativo da linha antes e após a instalação de pára-raios. São apresentadas também algumas considerações com relação a custos e confiabilidade destes equipamentos.

PALAVRAS CHAVES

Linhas de transmissão - pára-raios - índices de desligamento - sobretensões

1.0 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os estudos relacionados com a aplicação de pára-raios em linhas de transmissão, circuitos simples e duplo 138kV do sistema FURNAS, visando um melhor desempenho frente a surtos atmosféricos.

Os seguintes aspectos foram analisados:

- Determinação da influência do posicionamento dos pára-raios nas fases, ou em torres específicas, sobre os índices de desligamentos da linha e sobre os níveis de absorção de energia dos pára-raios.
- Avaliação comparativa da utilização dos pára-raios de linha em relação aos métodos clássicos de controle dos desligamentos para as descargas atmosféricas.
- Levantamento das características geométricas e elétricas das linhas de transmissão e topográficas da região.
- Análise da utilização de pára-raios com ou sem centelhador.
- Avaliação do desempenho da linha frente a descargas atmosféricas sem pára-raios nas cadeias de isoladores, englobando as seguintes análises que identificam regiões críticas:
 - a) Através do estudo de queda direta nos cabos condutores obtém-se as correntes críticas e ângulos efetivos de blindagem.
 - b) Com o estudo de queda indireta ao longo dos cabos-guarda, provocando a ruptura do isolamento na torre ou no meio do vão obtém-se as amplitudes e tempos de subida da corrente de raio que provocam desligamentos, em função da resistência de aterramento e local de queda do raio. Também são obtidos indicadores de desligamentos simples (apenas uma fase) e múltiplos, bem como as fases mais solicitadas.

O procedimento de instalação sugerido seria:

a) Quanto à queda direta - aplicação nas fases com ângulo de blindagem eventualmente inadequados;

b) Quanto à queda indireta - aplicação nos casos de aterramento insuficiente ou inadequado, e nas fases com menor coeficiente de acoplamento. Para trechos com poucas torres críticas, estando conhecidas as resistências de aterramento destas torres e das vizinhas, é conveniente um estudo específico de localização dos pára-raios para cada torre em questão.

Para trechos mais extensos com torres críticas não muito bem definidas e em locais de difícil determinação precisa das resistências de aterramento, pode-se efetuar uma análise mais simplificada, levando-se em conta resistências de aterramento médias. Nesta abordagem é conveniente um uso de pára-raios mais distribuído ao longo da linha até que se disponha de um acompanhamento mais refinado das torres críticas e resistências de aterramento.

c) Determinação da influência do posicionamento dos pára-raios nas fases, ou em torres específicas, sobre os níveis de absorção de energia

2.0 DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO RIO VERDE - COUTO MAGALHÃES EM 138kV, SEM PÁRA-RAIOS

Para uma posterior comparação com os índices de desligamento obtidos com a aplicação de pára-raios, serão apresentados os cálculos obtidos na situação atual, ou seja, sem pára-raios. Os resultados foram obtidos tratando-se separadamente os aspectos de queda direta e indireta de raios.

A tabela abaixo apresenta os resultados dos desligamentos por queda direta.

TABELA 1 - ÍNDICES DE DESLIGAMENTO PARA QUEDA DIRETA

| topografia | fase A (ND) | fase B (ND) | fase C (ND) | total (ND) |
|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| irregular | 2.26 | 1.10 | 0.012 | 3.37 |
| plana | 2.05 | 0.68 | 0.007 | 2.74 |

ND: número de desligamentos / 100km / ano

Na queda direta a fase superior é a mais vulnerável, seguida das fases intermediária e inferior.

O ângulo de blindagem adotado no projeto da torre não protege totalmente as fases da linha para todas as alturas de torre e perfis de terreno. Para os trechos críticos, em análise, os resultados do número de desligamentos por queda direta indicam níveis da ordem de 2.5 a 3.5 deslig./100 km/ano.

Embora isoladamente possa ser interpretada como uma taxa significativa, a análise desse índice deve ser feita em conjunto

com a taxa de desligamento para a queda indireta, que resultou relativamente muito mais severa.

Para cada modelagem a análise da queda indireta para a referida linha foi desenvolvida através das seguintes etapas:

- Determinação das tensões de topo da torre e das solicitações aos isolamentos, com o uso do programa ATP;
- Determinação do número de desligamentos por queda indireta, através de simulações com programas de avaliação de desempenho a surtos atmosféricos;
- Análise de sensibilidade dos resultados.

Obteve-se um índice de 63.2 deslig./100km/ano, para uma resistência de aterramento de 50Ω, média dos trechos críticos da linha de transmissão.

Na queda indireta as fases inferior e intermediária são as potencialmente mais vulneráveis. A fase superior também apresenta uma significativa vulnerabilidade, principalmente para resistências de aterramento elevadas, como é o caso dos trechos críticos, objeto atual dos estudos.

A análise do desempenho da linha de transmissão em 138kV Rio Verde - Couto Magalhães, sem pára-raios ZnO em paralelo com as cadeias de isoladores, para queda indireta confirma que o valor calculado do índice de desempenho de uma linha quanto a descargas atmosféricas, em termos de número de desligamentos é bastante variável, dependendo fortemente dos parâmetros, modelagem e hipóteses adotadas [1, 2]. Deu-se maior ênfase à variação relativa, ou seja, a variação do desempenho da linha face a aplicação de pára-raios em paralelo às cadeias de isoladores.

3.0 DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO CIRCUITO SIMPLES 138kV, RIO VERDE - COUTO MAGALHÃES, COM PÁRA-RAIOS ZnO

Os cálculos foram efetuados tratando-se particularmente dos aspectos de queda indireta de raios, a qual é a predominante na determinação do número de desligamentos da linha em pauta, conforme anteriormente verificado.

Dessa forma estes resultados complementam os anteriormente obtidos sem pára-raios quantificando, em termos relativos, a redução do número de desligamentos da linha possibilitada pela atuação de pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores.

Foram também determinados os requisitos de corrente e energia dos pára-raios ZnO, analisando-se as diversas condições de solicitação a que os mesmos poderão estar submetidos.

As seguintes alternativas quanto à localização e quantidade dos pára-raios foram analisadas [3]:

- 1) alternativa de referência, sem pára-raios;
- 2) com pára-raios em uma única fase da linha, na fase inferior (designada fase "C"), em todas as torres do trecho analisado;
- 3) com pára-raios em duas fases da linha, intermediária (fase "B") e inferior (fase "C"), em todas as torres do trecho analisado;
- 4) com pára-raios em duas fases da linha, intermediária (fase "B") e inferior (fase "C"), em torres alternadas do trecho analisado;
- 5) com pára-raios nas três fases da linha, em torres alternadas do trecho analisado;
- 6) com pára-raios nas três fases da linha, em torres intercaladas do trecho analisado, de duas em duas torres.

A alternativa com pára-raios nas três fases, em todas as torres, reduziria a zero o número de desligamentos da linha, não tendo sido, portanto, necessário o seu estudo.

Quanto ao tipo de pára-raios, considerou-se nos casos básicos o de tensão nominal de 144kV, sem centelhador externo. Na análise paramétrica avaliou-se a influência de um pára-raios com tensão nominal de 108kV, com ou sem centelhador externo.

A escolha das fases para localização dos pára-raios levou em consideração os resultados anteriores que demonstraram ser as fases inferior e intermediária, nesta ordem, as mais vulneráveis quanto a descargas indiretas, sendo a superior a relativamente mais protegida (maior coeficiente de acoplamento com os cabos guarda).

Os resultados básicos, para uma primeira comparação, foram obtidos considerando-se um trecho com 12 vãos de linha, de 390m cada, com base no valor médio obtido a partir dos dados dos trechos críticos inicialmente sugeridos por FURNAS para análise.

Foi considerada nos casos básicos uma resistência de aterramento de 50Ω para as torres. Para todas as alternativas, considerando-se tempos de subida iguais a 0.5, 1, 2, 3, 5, 7.5 e $10\mu s$, foram determinadas as correntes críticas de blindagem, abaixo das quais não ocorre desligamento por queda indireta. Considerou-se o valor de 890kV como suportabilidade a impulsos atmosféricos da cadeia de isoladores.

Nas simulações não foram representadas as influências da tensão operativa da linha e do efeito corona. A análise concentrou-se na redução do número de desligamentos em termos relativos, comparando-os com os resultados obtidos sem pára-raios. Para os casos básicos analisados, os resultados estão apresentados na tabela abaixo considerando-se uma resistência de aterramento de 50Ω .

TABELA 2 - ÍNDICES DE DESLIGAMENTO DEVIDO À QUEDA INDIRETA COM PÁRA-RAIOS DE LINHA DE 144kV INSTALADOS

| |
|-------------------------|
| índices de desligamento |
|-------------------------|

| alternativa | NM | valores relativos |
|-------------|-----|-------------------|
| 1 | 0 | 1.00 |
| 2 | 1 | 0.63 |
| 3 | 2 | 0.28 |
| 4 | 1 | 0.72 |
| 5 | 1.5 | 0.64 |
| 6 | 1 | 0.76 |

NM: número médio de pára-raios por torre

A partir dos resultados obtidos constata-se que as alternativas "3" (com pára-raios em todas as torres do trecho sob análise, nas duas fases mais próximas do solo), "2" (com pára-raios em todas as torres, na fase inferior) e "5" (com pára-raios em torres alternadas, nas duas fases mais baixas) são, nesta ordem, as que propiciam menores índices de desligamento.

Foram também avaliadas as solicitações de corrente e energia, aos pára-raios, frente à surtos atmosféricos, tendo sido analisados raios simples e múltiplos. As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para uma resistência de aterramento de 50Ω , queda indireta, respectivamente com pára-raios na fase C de todas as torres e nas fases B e C de torres alternadas.

TABELA 3: SOLICITAÇÕES DE CORRENTE E ENERGIA PARA PÁRA-RAIOS INSTALADOS NA FASE INFERIOR DE TODAS AS TORRES

| I (kA) | I _{pr} (kA) | E (kJ) |
|---------------|----------------------|--------|
| 200 | 36.2 | 813 |
| 150 | 26.8 | 452 |
| 200 / 80 / 80 | 36.2 | 1031 |

I_{pr}: corrente no pára-raios

TABELA 4: SOLICITAÇÕES DE CORRENTE E ENERGIA PARA PÁRA-RAIOS INSTALADOS NAS FASES INFERIOR E MÉDIA DE TORRES ALTERNADAS

| I (kA) | I _{pr} (kA) | E (kJ) |
|---------------|----------------------|--------|
| 200 | 27.9 | 482 |
| 150 | 20.6 | 270 |
| 200 / 80 / 80 | 27.9 | 614 |

Pode-se constatar, que determinadas condições de baixa probabilidade poderão danificar os pára-raios, ou seja, não se tem a garantia que o pára-raios deverá suportar todas as condições de solicitações [4].

No que se refere ao tipo dos pára-raios, a influência é relativamente pequena na corrente de descarga e níveis de energia. Os pára-raios de 108 kV com centelhador apresentam níveis de corrente ligeiramente maiores e níveis de energia ligeiramente menores.

A influência do número de pára-raios (fases e torres) nos níveis de corrente e energia é mais significativa. A alternativa de pára-raios na fase "C" de todas as torres apresenta requisitos de energia bem mais severos que a alternativa de pára-raios nas fases "B" e "C" de torres alternadas. Esta diferença resulta do fato de que neste último caso, a dissipação

de energia é compartilhada pelos dois pára-raios instalados na mesma torre.

A influência do número de pára-raios (fases e torres) nos níveis de corrente e energia é mais significativa. A alternativa de pára-raios na fase "C" de todas as torres apresenta requisitos de energia bem mais severos que a alternativa de pára-raios nas fases "B" e "C" de torres alternadas. Esta diferença resulta do fato de que neste último caso, a dissipação de energia é compartilhada pelos dois pára-raios instalados na mesma torre.

4.0 LINHAS DE 138kV EM CIRCUITO DUPLO

Efetuuou-se um estudo preliminar da linha 138kV Jacarepaguá - Santa Cruz, circuito duplo. Estas avaliações devem ser consideradas com um certo cuidado, procurando ser apenas um exemplo de estudos para linhas de circuito duplo

Inicialmente, foi verificado o desempenho operativo das linhas sem pára-raios tanto com relação às quedas diretas quanto às indiretas. Verificou-se que os desligamentos são causados quase que na sua totalidade por descargas indiretas. Sendo assim, para se calcular os índices de desempenho com a aplicação de pára-raios de óxido de zinco, restringiu-se apenas aos casos de queda indireta de raios.

Para esta linha de transmissão considerou-se apenas uma alternativa de instalação de pára-raios quanto à sua localização. A configuração adotada foi: pára-raios de 144kV na fase inferior (fase "C") de um dos circuitos em todas as torres, com o objetivo principal de reduzir o número de desligamentos dos dois circuitos simultaneamente.

Quanto ao desempenho operativo foram obtidos os seguintes resultados com e sem a aplicação de pára-raios, considerando-se uma resistência de aterramento de 20Ω .

TABELA 5: ÍNDICES DE DESLIGAMENTO PARA A LINHA DE 138kV CIRCUITO DUPLO

| caso | | circ.1 | circ.2 | circ. 1 e 2 | circ.1 ou 2 |
|------|----|--------|--------|-------------|-------------|
| 1 | nd | 2.46 | 2.46 | 2.46 | 2.46 |
| | vr | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | nd | 0.42 | 0.88 | 0.42 | 0.88 |
| | vr | 0.17 | 0.36 | 0.17 | 0.36 |

caso 1: sem pára-raios

caso 2: com pára-raios

circ. 1: circuito com pára-raios

circ. 2: circuito sem pára-raios

nd: número de desligamentos

vr: valor relativo

Desta tabela pode-se constatar que a instalação de pára-raios de óxido de zinco de 144kV na fase inferior de um dos circuitos em todas as torres reduz significativamente o número de desligamentos de um dos circuitos (da ordem de 65%) e o número de desligamentos simultâneos dos circuitos (da ordem de 80%).

O número de desligamentos dos dois circuitos,

simultaneamente, é uma primeira aproximação, pois não foi simulada a influência da descarga de um circuito na obtenção da corrente crítica do outro. Deste modo, temos acima um primeiro panorama dos resultados, que poderá ser melhor detalhado futuramente.

5.0 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS E CONFIABILIDADE

Das consultas efetuadas pode-se estimar que o custo de um pára-raios de linha situaria-se na faixa de

US\$400,00 a US\$1.500,00; dependendo do fabricante, tensão nominal, e utilização do centelhador externo ou não. Estes valores permitem uma estimativa inicial dos custos de instalação, e devem ser complementados com nova consultas.

Quanto aos resultados de confiabilidade e taxa de falhas, não se tem observado problemas críticos nas instalações existentes. Porém, apesar de se ter um número razoável de pára-raios a nível mundial, uma avaliação consistente da taxa de falhas a ser observada pelas concessionárias de energia elétrica demanda um período relativamente longo de observação [5].

Foi ainda efetuada uma primeira tentativa de se quantificar algum benefício econômico na aplicação de pára-raios, levando-se em conta os custos dos pára-raios, os custos dos métodos tradicionais de redução da resistência de aterramento e algumas hipóteses de custos de energia cortada, embora as avaliações de energia cortada tenham sido bem simplificadas.

Destes resultados pode-se observar um peso significativo do custo de energia cortada, sobretudo quando o tempo de interrupção é superior ou da ordem de 15 minutos. Neste caso, mesmo soluções com envolvimento de um grande número de pára-raios ainda são vantajosas [6].

Para tempos de interrupção curtos, da ordem de um minuto, o peso da energia não suprida não é muito significativo, e neste caso, outros fatores relativos à qualidade de energia devem ser ponderados.

No confronto do uso do pára-raios de linha e redução da resistência de pé de torre, com a finalidade de se melhorar o desempenho da linha, há que se considerar o custo de manutenção, normalmente um item relevante, e de difícil avaliação, principalmente para os cabos enterrados.

6.0 ANÁLISE DE SOBRETENSÕES DE MANOBRA

A manobra básica enfocada é a de energização da linha Rio Verde - Couto Magalhães e as sobretensões foram obtidas através de estudos de distribuição estatística. O comprimento da linha é de aproximadamente 250km.

Foram examinadas as solicitações de energia dos pára-raios de ZnO, quando operando nesta linha de transmissão.

A alternativa básica estudada é a de pára-raios em apenas uma fase, por ser uma condição conservativa sob o ponto de vista

de energia em relação à outras alternativas que consideram pára-raios em outras fases.

Uma hipótese adotada para efeito de análise, é a de se concentrar os pára-raios distribuídos em uma região em apenas um ponto da linha.

Em todos os casos estudados de pára-raios de 108, 120 e 144kV as energias foram baixas, com valor máximo de 34,5kJ.

7.0 AVALIAÇÕES MECÂNICAS

7.1 Dispositivo Desconectador de Linha:

No caso de pára-raios a óxido metálico sem centelhadores o ponto chave é o desempenho dos dispositivos ou mecanismos de interrupção das correntes de falta fase-terra, subseqüentes às falhas dos pára-raios que devem apresentar elevada durabilidade, evento, em parte, associado com a possibilidade de contaminação por impregnação - absorção de água do mecanismo de disparo, seja ele a base de pólvora ou químico, bem como, na medida do possível, serem imunes a intempéries.

Neste caso, dependendo das condições de contorno, em específico, tempo de atuação, é possível que sistemas puramente mecânicos venham a se constituir em uma solução adequada. Estes pontos podem ser verificados por meio de ensaios e nos casos em que os pára-raios utilizem estes dispositivos, todos os ensaios de suportabilidade de corrente de descarga e ciclo de serviço devem ser realizados com os mesmos em condições operativas

7.2 Conexão do Pára-Raios ZnO na Linha de Transmissão:

Foram particularmente analisadas hipóteses de conexão do pára-raios sem centelhador na linha de transmissão. Concluiu-se, preliminarmente, que, no caso do mesmo vir a ser conectado diretamente em paralelo com cadeias de isoladores convencionais, tipo concha-bola, poderá ser necessária uma concepção envolvendo dois pára-raios ligados em série através de elos que possibilitem grande liberdade de movimento ao conjunto, de modo que esse conjunto possa acompanhar a deformação da cadeia de isoladores quando da ocorrência de ventos, sem danificação do pára-raios.

Além dessa possível necessidade, ainda não respondida pelos fabricantes, verificou-se que o arranjo presta-se nos casos em que houver a atuação do desconectador, sob o ponto de vista do atendimento de distância de segurança, quando o pára-raios for instalado nas cadeias das mísulas superiores, de estruturas tipo tronco-piramidal.

8.0 CONCLUSÕES

Pára-raios instalados numa torre não propiciam uma ajuda significativa a torres adjacentes sem pára-raios. Em decorrência, a eficácia da aplicação de pára-raios para a redução do número global de desligamentos da linha diminui

consideravelmente na hipótese de sua instalação em torres intercaladas.

Tendo-se resistência de aterramento diferentes ao longo do trecho, os pára-raios devem ser prioritariamente instalados nas torres de maior resistência de aterramento.

Quanto aos valores nominais dos pára-raios, verificou-se, para a faixa de 108 - 144kV, influência não significativa nos índices de desligamento. A mesma conclusão foi obtida no que se refere à presença ou não de centelhador externo. Dessa forma, a definição do tipo e características do pára-raios não é influenciada por este aspecto. Cabe lembrar que preferencialmente foi estudado o caso de pára-raios sem centelhador, e deste modo o pára-raios com centelhador foi analisado de modo simplificado.

Existem solicitações atmosféricas de baixa probabilidade que podem danificar os pára-raios. Com relação à danificação de pára-raios sem centelhador, o dispositivo desconectador de linha tem um papel fundamental na interrupção das correntes de falta subseqüentes às falhas dos pára-raios.

A instalação de dois pára-raios por torre tem aspectos vantajosos quanto à divisão de energia.

Para todos os valores nominais de pára-raios estudados, as solicitações por sobretensões de manobra não mostraram ser preocupantes.

Quanto ao circuito duplo, apesar das simulações terem sido executadas para uma resistência de aterramento de valor baixo (20 Ω), verifica-se a grande contribuição que a instalação de apenas um pára-raios na fase inferior de um dos circuitos pode trazer para reduzir principalmente o número de desligamentos simultâneos dos circuitos.

9.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRÉ - W.G. 33.01 Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, Oct. 1991.
- (2) IEEE W.G. REPORT Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, July 1993, pp 1254 - 1267.
- (3) KASTRUP, O.; ZANETTA, L.C. et al.; Lightning Performance Assessment with Line Arresters; IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, Los Angeles, Sept. 1996, pp. 288-293.
- (4) HILEMAN, A.R.; Application of Arresters to Transmission Lines, CIGRÉ Progress Report: TF 3 / WG 33.11, Bruxelas - Aug. 1992.
- (5) COMBER, M.G.; Advances in Metal Oxide Arrester Design and Application, CIGRÉ 33-94 (WG11) - Paris - 1994.
- (6) KASTRUP, O.; ZANETTA, L.C. et al.; Arresters Applied for EHV Transmission Line Protection: An Engineering Analysis and a Trial Installation; CIGRÉ Brazil CE 33; International Workshop on Line Surge Arresters and Lightning, Rio de Janeiro, Brazil, Apr.

1996.