

APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO : UMA ALTERNATIVA PARA MELHORAR O DESEMPENHO DE LINHAS EXISTENTES E PERSPECTIVAS DE OTIMIZAÇÃO FUTURA DOS PROJETOS DAS REDES DE TRANSMISSÃO

Afonso de Oliveira e Silva
Armando Nigri
Francisco M. Salgado Carvalho
Paulo Maldonado
Oscar Kastrup F^o (*)

Prof. Luiz Cera Zanetta
Pós Grad. F.A. Moreira
Pós Grad. N.Ivanov
Grad. H.N. Suziki
Grad. R. L. Gouvêa

Dalton O. Camponês do Brasil
José Marcos Bressane
Weide Sato

FURNAS - Centrais Elétricas S.A.

Universidade de São Paulo

(*) Professor Adjunto do Departamento de Eletricidade da PUC - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

RESUMO

As estatísticas das concessionárias de energia elétrica indicam claramente que as descargas atmosféricas são o principal fator de desligamentos de linhas de transmissão e de distribuição, acarretando distúrbios na qualidade do suprimento e da oferta de energia aos consumidores, causando, em muitos casos, perda de faturamento pelas concessionárias. Os desligamentos de linhas provocam, adicionalmente, uma sobrecarga nos serviços de manutenção durante os períodos chuvosos elevando os gastos com a troca de isoladores danificados e com o deslocamento das equipes de manutenção para a execução dos reparos.

Além disso, algumas linhas têm importância vital para a confiabilidade da rede de transmissão como um todo exigindo, via de regra, um tratamento diferenciado no seu projeto ou mesmo nos critérios de operação de linhas já em serviço comercial. Neste contexto enquadra-se FURNAS, cuja rede de transmissão fornece energia à região mais desenvolvida do Brasil, com a responsabilidade adicional de interligar as malhas de transmissão de outras empresas que atuam nessa área.

Tal importância é ainda mais destacada nos dias atuais, quando a falta de investimentos no parque de geração de energia e na rede de transmissão, acarretou condições de alto risco na operação do sistema elétrico brasileiro: a saída de algumas linhas importantes pode trazer distúrbios graves em toda a rede da região sudeste, ou mesmo o desligamento de outras linhas menos importantes colocam o sistema altamente vulnerável se houver, concomitantemente, interrupções em determinadas linhas da rede.

De forma a melhorar o desempenho das linhas diante do atual cenário serão instalados inicialmente pára-raios de óxidos metálicos, conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores, em algumas

linhas que têm apresentado elevado número de interrupções por descargas atmosféricas.

Essa técnica tem se mostrado mais econômica e eficiente que os métodos clássicos (instalação de cabos contra pesos e alteração de ângulos de blindagem), os quais, em muitos casos, têm se mostrado muitas vezes de difícil execução prática em certos tipos de terreno ou de torres.

A prática de instalação de pára-raios em linhas de transmissão e de distribuição já é empregada em cerca de 100 concessionárias de energia elétrica, nos níveis de tensão de 13,8 a 500 kV, inclusive na América Latina (México e Colômbia).

Na rede de FURNAS foram selecionadas, para a instalação pioneira prevista para 1996(1):

- a linha de transmissão Rio Verde-Couto Magalhães em 138 kV com 254 km, que tem apresentado altas taxas de desligamentos nos últimos anos: cerca de 25 desligamentos em 1993 atribuídos às descargas atmosféricas (10 saídas/100 km-ano),
- a linha Estreito - Mascarenhas de Moraes em 345 kV com 32 km de extensão, apresentando um índice médio de 4,2 saídas / 100 km-ano.

Ainda em 1995 deverão ser instalados alguns protótipos na linha Adrianópolis-Magé de 138 kV de circuito duplo, com cerca de 2,1 saídas / 100 km-ano, visando os seguintes objetivos:

- treinamento do pessoal de manutenção de linhas no manejo (instalação e substituição) dos pára-raios,
- otimização das ferragens de fixação das unidades nas torres,
- instalação dos dispositivos de monitoramento dos pára-raios e das grandezas das descargas atmosféricas que incidirão nas torres e nas unidades nclas instaladas.

Os estudos e demais atividades de instalação dos pára-raios nessa linha serão feitos em parceria com um fabricante de pára-raios para linhas de transmissão.

* Oscar Kastrup F^o - FURNAS Centrais Elétricas S.A.
Rua Real Grandeza, 219 - BLC - s/1607.3 - CEP 22283-900
Rio de Janeiro - Brasil
Fax: 55-21-2869530 Tel: 55-21-5284206

ABSTRACT

The use of surge arresters on transmission lines to prevent lightning flashovers of line insulators is not a new concept. The feasibility for a widespread installation after the early 80's was allowed by the introduction of polymer-housed metal-oxide arresters in the market. The arresters can be installed on existing lines without the need for reinforcing the tower structures.

Other benefits can be introduced by line arresters on transmission line design:

- preclude the need for installing shield wires on regions with low keraunic levels; or due mechanical, aesthetic or environmental reasons,
- reduction of switching overvoltages allowing optimization of phase-ground and phase-phase clearances.

1. INTRODUÇÃO

A instalação de pára-raios em linhas de transmissão visando reduzir o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas não é, na realidade, uma prática moderna. Há registros na literatura técnica de tentativas, desde a década de 30, de eliminar as faltas nas linhas, durante quedas de raios, pela instalação de pára-raios na própria linha(2),(3). Os pára-raios existentes na época (tipo expulsão) embora reduzissem efetivamente os desligamentos por descargas atmosféricas, suportando correntes até 100 kA, eram ineficientes na eliminação das correntes de falta subsequentes de frequência industrial elevadas. Esse fato inviabilizou a implantação dessa nova técnica naquela época, quando já era observada uma expansão das redes elétricas com o aumento das potências de curto-circuito e, conseqüentemente, das correntes de falta.

Somente no início dos anos 80 começou a verdadeira difusão desta aplicação em concessionárias que tinham graves problemas de interrupção de fornecimento de energia, observados principalmente em regiões de altos níveis cerâmicos. Dois fatores tecnológicos viabilizaram a rápida evolução desta aplicação nos últimos anos: o surgimento dos pára-raios de óxido de zinco e o encapsulamento polimérico, permitindo sua fácil instalação nas torres pelo seu baixo peso (entre 12 e 19 kg para linhas de 138 kV), sem acarretar esforços mecânicos excessivos em estruturas onde forem instalados.

Em 1992 já havia registro de existirem mais de 6.000 pára-raios(4) instalados em linhas de transmissão e de distribuição (Estados Unidos, Canadá, México, Colômbia, França, Alemanha, Japão e África do Sul) com comprovada eficiência na redução do número de desligamentos de linhas por quedas de raios. Hoje a estimativa de apenas um fabricante é que o número de

unidades fabricadas, nos primeiros 5 anos de produção (1989 - 1994), atingiu 40.000 pára-raios de linha(5).

Os pára-raios de linha têm uma série de outras vantagens na redução das interrupções das linhas por quedas de raios:

- baixo custo;
- facilidade de identificação (nos pára-raios sem centelhador externo) e de substituição de unidades defeituosas no campo;
- a instalação de pára-raios apenas nas torres que historicamente apresentam freqüentes registros de queima de isoladores, pode reduzir as taxas de desligamentos das linhas por descargas atmosféricas a índices operacionalmente aceitáveis;
- facilidade de instalação de pára-raios adicionais numa linha caso a quantidade inicialmente instalada mostre-se insuficiente na redução dos desligamentos para os índices desejados, ou mesmo relocar pára-raios entre torres ou fases procurando otimizar seus posicionamentos em função dos resultados práticos observados;
- possibilidade de pára-raios instalados em algumas torres críticas (no topo de elevações rochosas, por exemplo) protegerem torres adjacentes para certas condições das resistências de aterramento e comprimentos dos vãos adjacentes (Figura 1).

Os estudos, que ainda estão em andamento, definirão as quantidades e as características elétricas dos pára-raios necessários para instalação nas duas linhas analisadas, com os seus respectivos posicionamentos nas fases daquelas torres consideradas críticas pelo elevado número de isoladores queimados e/ou resistências elevadas de aterramento.

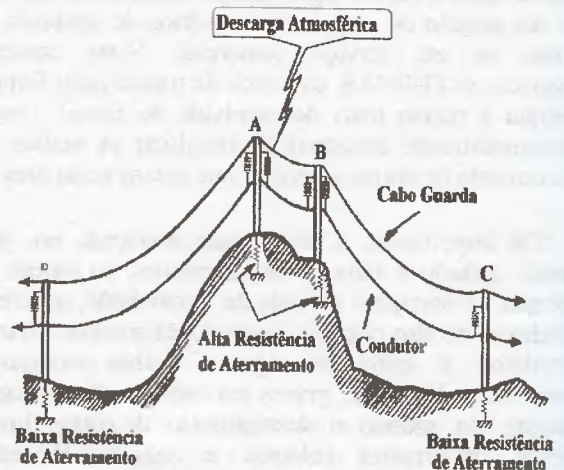


Figura 1: Configuração típica para instalação de pára-raios em torres críticas protegendo, em alguns casos, torres adjacentes

As simulações serão executadas através de programas digitais específicos para a análise de desligamentos de linhas por descargas atmosféricas (6), (7), (8) e do programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP(9).

Serão investigadas neste trabalho novas concepções no projeto de linhas, tirando proveito da ação dos pára-raios instalados nas linhas, como, por exemplo, linhas sem cabos guarda, compactação ou elevação do nível da tensão de transmissão de linhas existentes (*up-grading*) pela redução das sobretensões de manobra.

2. TIPOS DE DESLIGAMENTOS OBSERVADOS EM LINHAS ATINGIDAS POR RAIOS

2.1 Descargas Indiretas (*backflashover*)

As descargas indiretas são a principal causa dos desligamentos de linhas. Nesses casos os raios são atraídos pelas torres ou pelo sistema de blindagem da linha - cabos guarda ou mastros localizados no topo das estruturas - mas ao fluírem pelas estruturas para a terra podem elevar os seus potenciais devido à elevada resistividade do solo. Dependendo dos valores dessa resistividade e da magnitude dos raios, a diferença de potencial que se estabelece entre a estrutura e os condutores pode ultrapassar a suportabilidade das cadeias de isoladores, rompendo a isolamento e provocando um curto-circuito na linha, com seu conseqüente desligamento (Figura 2). Esse fenômeno pode ocorrer mesmo considerando a redução das solicitações através das cadeias ($V_T - V_C$). Isso se deve à tensão induzida no condutor pela tensão gerada pelo raio no cabo guarda.

Muitas vezes quando a resistência de aterramento de diversas torres próximas entre si é muito alta, podem ocorrer diversas descargas através das cadeias das torres adjacentes à uma estrutura atingida por um raio.

2.2 Descargas Diretas ou Falhas de Blindagem (*shielding failures*)

Esse fenômeno é observado quando os cabos guarda não oferecem blindagem adequada aos condutores. Normalmente as falhas de blindagem ocorrem no meio de vãos de grande extensão entre torres (travessias de vales, rios e estradas), quando o afastamento do plano do solo em relação aos condutores deixam esses últimos menos protegidos em relação às descargas atmosféricas.

No caso de vãos muito longos (em torno de 1200 m), os pára-raios de linha não proporcionam uma redução de desligamentos no meio do vão, embora sejam praticamente eliminados os desligamentos nas torres das extremidades do vão onde eles estão instalados(10).

As falhas de blindagem nas proximidades das torres somente ocorrem para correntes de raio de baixa intensidade. O projeto de blindagem desses trechos é feito de forma que essas correntes, ao atingirem os condutores, não acarretem tensões superiores às suportabilidades das cadeias evitando, dessa forma, o desligamento das linhas (Figura 3).

2.3 Descargas Induzidas

Tensões são induzidas em linhas quando há uma descarga em suas proximidades. Dependendo da magnitude da corrente e da proximidade da queda do raio em relação à linha, os valores das tensões induzidas atingem amplitudes razoáveis que podem exceder a suportabilidade do isolamento da linha, provocando descarga através de cadeias. Este fenômeno tem um peso expressivo nas estatísticas dos índices de desligamentos nas redes das empresas de distribuição.

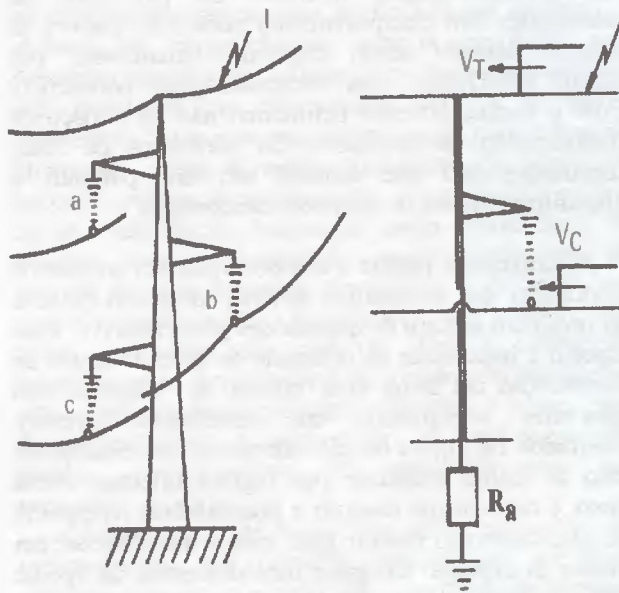


Figura 2: Ocorrência de descargas indiretas em linhas de transmissão

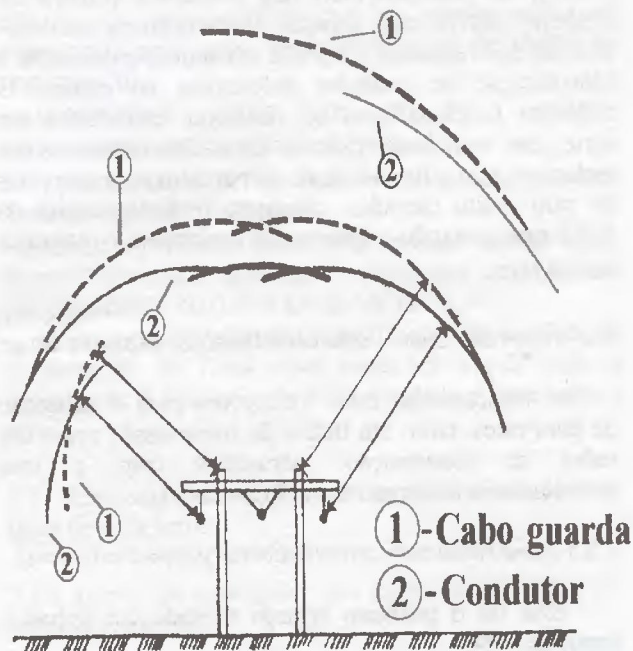


Figura 3: Modelo eletrogeométrico empregado no projeto da blindagem de torres para descargas atmosféricas

3. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DOS PÁRA-RAIOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

3.1 Características Construtivas

Os pára-raios ZnO para a instalação em linhas têm a mesma concepção construtiva dos pára-raios ZnO que desde os anos 70 são fabricados para a instalação nas subestações: eles são constituídos com resistores não lineares de ZnO, sem centelhadores internos (Figura 4). Os pára-raios da geração anterior aos de óxido de zinco eram de resistores não lineares de carbureto de silício e tinham centelhadores internos. Os pára-raios de subestações têm encapsulamento cerâmico, embora já estejam também sendo oferecidos atualmente, por alguns fabricantes, com encapsulamento polimérico. Com o encapsulamento polimérico não há o risco de fragmentação do invólucro. Os pára-raios de linha construídos com esse material não têm, portanto, o dispositivo clássico de alívio de sobrepressão.

Geralmente é pedida a comprovação, em ensaios de laboratório, que as pastilhas de ZnO não sejam ejetadas do invólucro no caso de queima dos pára-raios(11). Esse aspecto é importante na definição de procedimentos de manutenção em linha viva, quando se trabalha com pára-raios energizados, sem centelhador externo, mostrados na Figura 6b, extendendo-se esse cuidado no caso de linhas passando por regiões urbanas. Além disso, é conveniente analisar a possibilidade da queima de pára-raios não evoluir para curtos multifásicos, em função da expulsão dos gases incandescentes, do tipo de torre, da forma de conexão dos pára-raios na torre, do posicionamento dos desligadores e dos cabos de conexão dos pára-raios aos condutores.

Uma outra concepção, já investigada, consiste em embutir as pastilhas ZnO nos isoladores (Figura 5). Embora criativa, essa solução deve encarecer muito os ensaios dos resistores ZnO dos isoladores e dificultar a identificação de unidades defeituosas no campo. O conjunto funciona com os resistores conectados em série, sem centelhador externo. Os chifres instalados nos isoladores têm a finalidade de dispararem para correntes de raio muito elevadas, causando o desligamento da linha mas evitando a queima de isoladores / resistores de ZnO (12).

3.2 Pára-raios com e sem centelhadores externos em ar

Há, basicamente, duas concepções para a aplicação de pára-raios, tanto em linhas de transmissão como em redes de distribuição: pára-raios com e sem centelhadores externos em ar (Figura 6).

3.2.1 Pára-raios com centelhadores (gapped arresters)

Esse foi o primeiro arranjo adotado em linhas a partir de 1980.

Os pára-raios com centelhador externo só entram em funcionamento quando a sobretensão gerada nas torres,

por uma descarga atmosférica nas suas proximidades, atingir um valor que cause o rompimento dielétrico do centelhador em ar. Nesse instante, o pára-raios fica conectado entre a condutor e a torre, limitando a tensão através das cadeias a um valor inferior à sua suportabilidade dielétrica para as descargas atmosféricas. O ajuste da distância em ar do centelhador externo deve ser tal que:

- garanta que o disparo do centelhador, durante as quedas de raios na linha, aconteça antes do rompimento do arco pelas cadeias de isoladores;
- não permita a ocorrência de descargas durante as sobretensões de manobra causadas por chaveamentos da linha;
- permita a auto-extinção dos arcos formados após as quedas de raio, possibilitando a re-energização ou religamento rápido da linha.

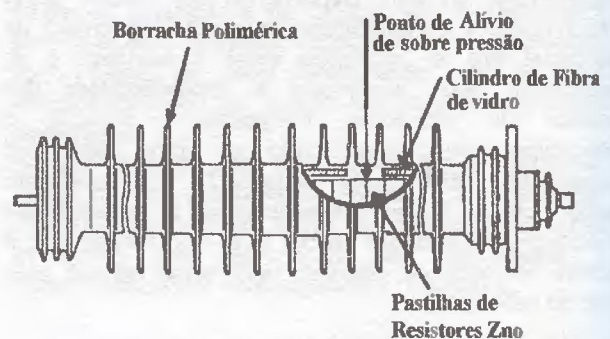


Figura 4 Pára-raios ZnO para linhas de transmissão

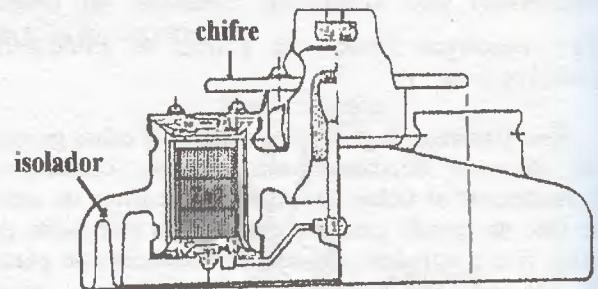


Figura 5: Resistores ZnO embutido em encapsulamento polimérico, isolador de vidro

3.3.2 Pára-raios sem centelhadores (gapless arresters)

Os pára-raios sem centelhador externo em ar estão permanentemente conectados entre os condutores/fases e as torres (terra): eles entram em atuação imediatamente quando a tensão através das cadeias começa a se elevar por quedas de raios na torre, nos cabos guarda ou nos condutores.

Com a fabricação de pára-raios ZnO pela maioria dos fabricantes sem centelhadores externos a partir do final dos anos 80, a decisão de uma concessionária entre qual dos dois arranjos que deverá ser empregado

em sua rede baseia-se, fundamentalmente, no aspecto econômico e, algumas vezes, em seus procedimentos de manutenção. Os pára-raios com centelhador externo em ar são mais baratos, pois não sendo submetidos permanentemente à tensão operativa da linha, podem ser construídos com um menor número de resistores. Para uma empresa que tenha uma rede extensa e com grande número de linhas com problemas de elevados índices de desligamentos por descargas atmosféricas, essa opção pode ser mais atracente: a diferença dos custos de pára-raios da classe 138 kV, de tensões nominais (*rated voltage*) iguais a 108 kV (com centelhador externo) e a 144kV (sem centelhador externo) está atualmente da ordem de 5 a 10%, segundo levantamento informal feito com alguns fabricantes.

Deve-se computar nessa comparação o custo das ferragens do centelhador externo que, para 138 kV é estimado ser da ordem de US\$ 50 a 100.

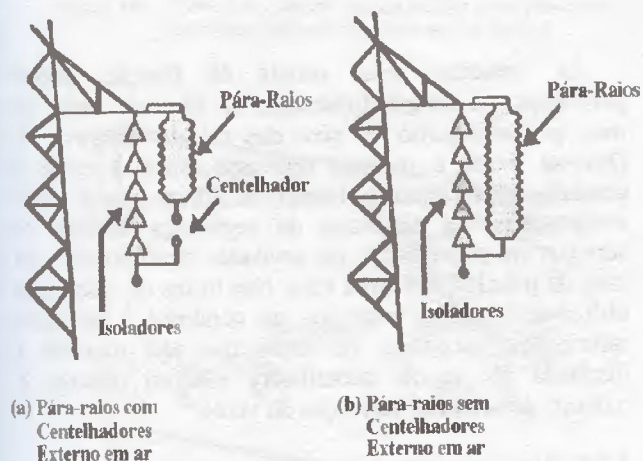


Figura 6: Arranjos básicos de utilização de pára-raios ZnO em linhas de transmissão

3.2.3 Comparações entre os pára-raios com e sem centelhador externo em ar

Os pára-raios *com* ou *sem* centelhador externo são igualmente eficientes na melhoria do desempenho das linhas de transmissão por quedas de raios. Eles só não são eficientes para a redução de desligamentos para quedas de raios no meio de vãos muito longos.

A seguir são apresentadas algumas características dos dois tipos de arranjo:

a) Pára-raios com centelhador externo em ar

- . apresentam menor custo: têm menor tensão nominal por não ficarem diretamente conectados à linha,
- . têm um custo adicional das ferragens do centelhador,
- . podem ter vida útil maior, pois só são solicitados durante as quedas de raio,
- . os resistores ZnO não sofrem nenhuma degradação por influência da poluição atmosférica,

- . maior segurança durante a realização dos serviços de manutenção em linha viva,
- . exigem dispositivos mais complexos para a identificação de unidades defeituosas e com identificação visual mais difícil,
- . os níveis de disparo dos centelhadores externos variam com as condições atmosféricas.

b) Pára-raios sem centelhadores externos

- . fácil identificação visual dos pára-raios danificados em serviço, utilizando os desligadores que isolam os pára-raios da linha, possibilitando sua re-energização ou religamento rápido para recolocá-la em serviço, garantia de repartição da energia envolvida nas descargas que atingem a linha pelos diversos pára-raios nela instalados (em uma mesma torre ou em torres adjacentes), tanto para quedas indiretas, para falhas de blindagem e para as tensões induzidas. Os pontos de baixa resistência de aterramento, situados entre pontos de alta resistência, funcionam como dissipadores de energia. Análises já efetuadas mostram que 80% da energia de uma descarga atmosférica é dissipada em pontos remotos de baixa resistência, até 1000 m, do ponto da queda do raio (13). Esta é a situação favorável para os pára-raios localizados em torres com alta resistência de aterramento, adjacentes à torres com baixas resistências de aterramento, as quais podem não precisar, eventualmente, de pára-raios para sua proteção.

- . níveis de proteção fornecidos pelos pára-raios são independentes das condições atmosféricas, as quais alteram os níveis de disparo dos centelhadores externos em ar.

- . possibilidade de controlar, além das descargas atmosféricas, os surtos de manobra ao longo de uma linha (aproveitar uma linha de projeto antigo, com grandes espaçamentos fase-terra e fase-fase, e reprojectá-la para possibilitar a sua compactação) ou repotencialização com elevação do nível de tensão de transmissão).

- . possibilidade menor vida útil por estarem permanentemente conectados à linha,

- . possibilidade de sobreaquecimento dos resistores ZnO em regiões poluídas,

- . acarretam perdas na linha, embora esses valores sejam desprezíveis pelas quantidades instaladas e das perdas por pára-raios (0,03 W / kV de MCOV),

- . maior segurança durante a realização dos serviços de manutenção de linha viva pode ser obtida com a desconexão à distância do cabo que liga o pára-raios à torre.

3.3 Esquemas de instalação dos pára-raios entre as fases de uma torre

3.3.1 Torre tipo triangular (ou torres com as fases em alturas diferentes)

A proteção das três fases de uma torre, para as descargas indiretas, pode ser conseguida com a

instalação de apenas um pára-raios na fase inferior. Essa proteção é menos eficiente do que quando se instala 2 ou 3 pára-raios por torre (Figura 7). Quando a blindagem não é adequada, a fase superior é a mais vulnerável. Nesse caso essa fase é a mais indicada para a instalação dos pára-raios. A colocação dos pára-raios nas três fases praticamente elimina a possibilidade de descargas nas cadeias de isoladores de uma torre.

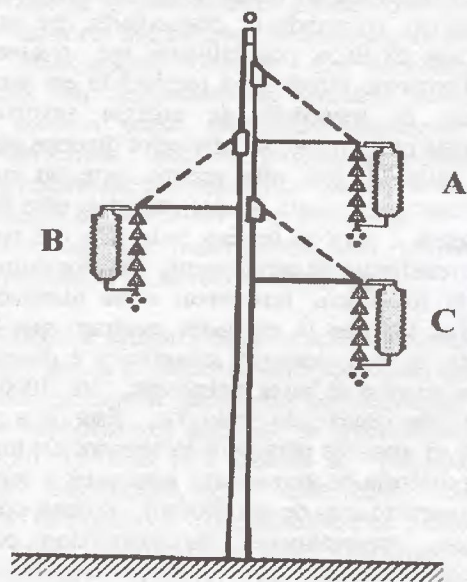


Figura 7 : Esquema de proteção com pára-raios em torres tipo triangular

3.3.2 Torres de circuito duplo

Em torres de circuito duplo um único pára-raios, instalado na fase inferior de um dos circuitos, pode reduzir o número de desligamentos dos dois circuitos para descargas indiretas (Figura 8 e Tabela 1). A instalação de pára-raios adicionais nas demais fases reduz ainda mais o número de desligamentos.

Tabela 1 : Registro dos desligamentos dos dois circuitos de uma linha de circuito duplo, antes e depois da instalação de apenas um pára-raios em uma fase de um dos circuitos (14)

ANO	CIRC. 1	CIRC. 2	CIRC. 1+2
1971 / 1983	26,00	64,00	18,00
1984	2,00	8,00	0,00
1985	0,00	1,00	0,00
1986	0,00	0,00	0,00

3.4 Fixação dos Pára-Raios nas Torres

3.4.1 Pára-raios com centelhador externo

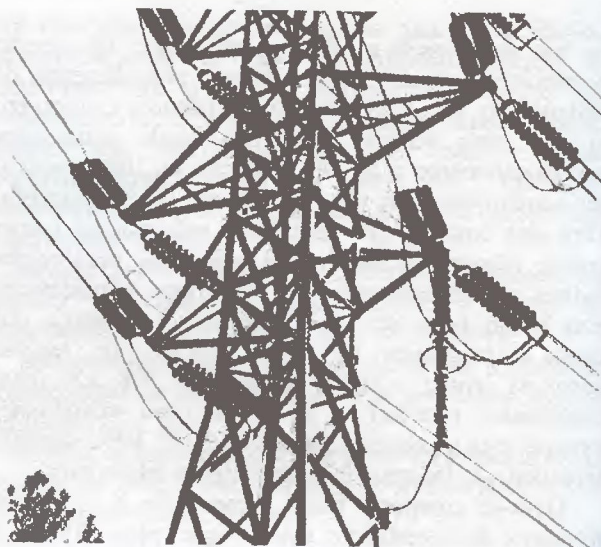


Figura 8 : Redução dos desligamentos dos dois circuitos de uma torre de circuito duplo com a instalação de apenas um pára-raios em uma fase inferior de um dos circuitos (14)

As maneiras mais usuais de fixação desses pára-raios são longitudinalmente ao eixo da linha ou num prolongamento do eixo das mísulas (Figura 9). Deve-se evitar a redução dos espaçamentos entre o condutor e a estrutura lateral da torre, o que pode comprometer as distâncias de segurança durante os serviços de substituição de unidades defeituosas, no caso de trabalho em linha viva. Nas torres de suspensão utiliza-se ferragens especiais no condutor e na parte inferior do pára-raios, de forma que seja mantida a distância em ar do centelhador externo durante o balanço do condutor pela ação do vento.

3.4.2 Pára-raios sem centelhador externo

Os pára-raios sem centelhador externo têm uma maior gama de opções de conexão nas estruturas (Figura 10). Uma opção idealizada para circuitos duplos (Figura 11), que está sob análise de custo e de facilidade de manutenção, prevê a utilização de dois pára-raios em série, de menor tensão nominal, com o desligador situado entre eles. Essa opção aplica-se às cadeias de suspensão que apresentam um curvamento durante o balanço dos condutores e objetiva reduzir o espaçamento entre o pára-raios inferior, desconectado e sob tensão, e a mísula inferior (quando existente).

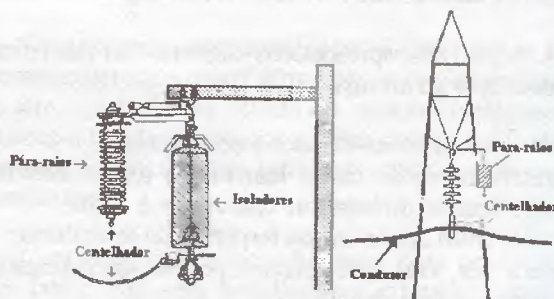


Figura 9 Formas mais usuais de conexão nas torres dos pára-raios com centelhador externo

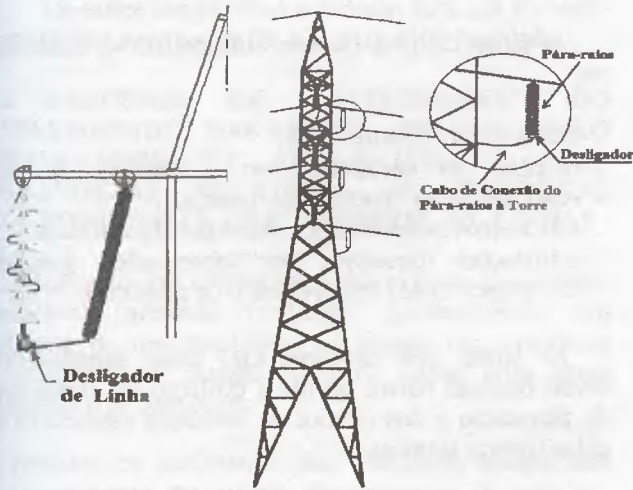


Figura 10: Formas de conexão nas torres dos para-raios sem centelhador externo (cadeias de suspensão)

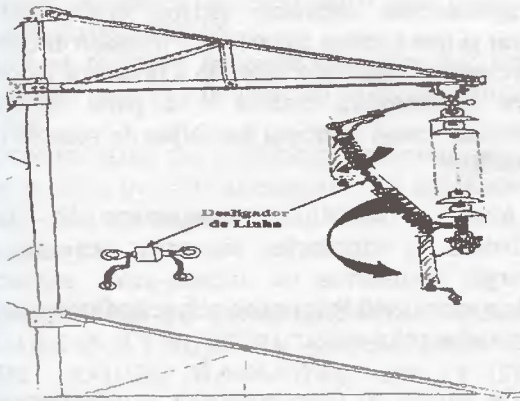


Figura 11: Utilização de dois para-raios em série com o desligador entre eles (torres de circuito duplo e cadeias de

3.5 Características Elétricas dos Para-raios e dos Desligadores

3.5.1 Para-raios

As principais características a serem determinadas nos estudos para a especificação dos para-raios de linha são:

- a) tensão nominal e tensão máxima contínua de operação (MCOV);
- b) capacidade de absorção de energia, geralmente governada por descargas múltiplas(15). Atualmente os fabricantes garantem cerca de 5 kJ/kV de MCOV;
- c) corrente máxima suportável de impulso atmosférico;
- d) tensões residuais para impulsos atmosféricos.

A característica do resistor de óxido de zinco é similar à do diodo Zener : para a tensão operativa da rede - U_n - os resistores apresentam baixa condutividade, deixando fluir pelos para-raios pequenas

correntes de alguns miliampéres. Para as elevadas sobretensões causadas por quedas de raios, os resistores apresentam alta condutividade permitindo a fácil drenagem das correntes das descargas para a torre e a terra (16). Essa característica é levantada em laboratório, sendo fornecida pelos fabricantes. Característica idêntica pode ser obtida para os impulsos de manobra.

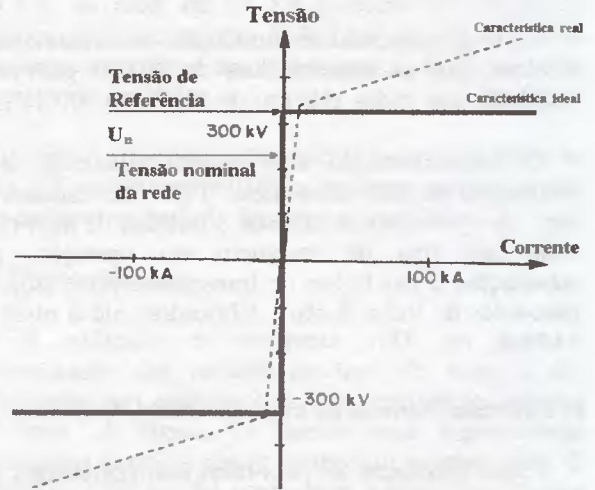


Figura 12: Característica não linear de para-raios ZnO para impulsos atmosféricos

3.5.2 Desligador de linha

Os desligadores de linha, que isolam o para-raios das linhas no caso de sua queima, devem ter uma velocidade de atuação que garanta o sucesso de religamento rápido da linha, quando ela tem instalado esse tipo de releamento. Devem ter resistência mecânica durante o balanço dos condutores. O fabricante deve fornecer as características corrente x tempo do dispositivo de forma a garantir sua atuação em tempos inferiores aos dos religamentos rápidos.

3.6 Metas Básicas para a Proteção das Linhas com Para-raios contra as Descargas Atmosféricas

Existem três metas básicas que deve-se procurar alcançar nos estudos de aplicação dos para-raios para melhorar o comportamento das linhas para as descargas atmosféricas mas que são bastante dependentes dos parâmetros envolvidos (resistências de aterramento, comprimentos de vão etc):

- se uma descarga atingir um trecho da linha protegido por para-raios, não deverá ocorrer falhas dentro do trecho protegido e nos trechos não protegidos adjacentes;
- se uma descarga atingir um trecho adjacente a um trecho protegido por para-raios, não deverá ocorrer descargas dentro do trecho protegido;

- durante as atuações dos pára-raios as tensões através de seus terminais (tensões residuais) devem permanecer abaixo dos valores de suportabilidade das cadeias para impulsos atmosféricos.

3.7 EXPERIÊNCIA ATUAL DAS EMPRESAS COM OS PÁRA-RAIOS INSTALADOS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

3.7.1 Quantidades de Pára-raios de Linha já em Operação Comercial

Como já registrado na introdução, os levantamentos mostram que já existem mais de 40.000 pára-raios instalados nas redes elétricas de 13,8 kV a 500 kV (4).

O encapsulamento com resina polimérica já é empregado em pára-raios desde 1986. As estimativas são de já existirem mais de 3 milhões de pára-raios com esse tipo de invólucro em operação, nas subestações e nas linhas de transmissão (17). Hoje os pára-raios de linha já são fabricados até o nível de 345 kV.

a) Empresas Publicas de Medellin- EPM, Colômbia (18)

Foram instalados 80 pára-raios sem centelhador em 1992 em uma linha de 115 kV. Excelentes resultados foram alcançados, com a redução de 100 desligamentos / 100 km - ano para cerca de 20 desligamentos / 100 km - ano, com os primeiros pára-raios instalados em apenas 27 torres críticas. Essa linha alimenta uma fábrica de cimento que exige processo contínuo de produção.

Já estão encomendadas mais 300 unidades para instalação em linhas do seu sistema de transmissão.

b) Duke Power Company e Louisiana Power & Light, EUA

Utilizam pára-raios sem centelhador em redes de 44, 100 e 230 kV. A Duke está com cerca de 1700 pára-raios instalados atualmente.

c) Alabama Power, City of Lakeland, Northern States Power (EUA), Ontario Hydro (Canadá) e CFE - Comisión Federal de Electrificación (México)

Essas empresas têm pára-raios instalados nos níveis de 13,8 / 44 / 69 e 115 kV, inclusive em linhas sem cabos guarda.

A Virginia instalou 492 unidades nas linhas de 115 kV em 1992.

A Northern instalou 3000 unidades em várias linhas de 69 kV.

3.7.2 Instalações com e sem centelhadores externos

Não existem estatísticas precisas sobre as quantidades de pára-raios instalados com os dois arranjos básicos para linhas de transmissão.

3.7.3 Índices de falhas registrados em pára-raios de linha

As falhas em pára-raios de linha podem ser causadas por:

- defeitos nos resistores ZnO,
- defeitos no encapsulamento polimérico e na vedação contra entrada de umidade,
- solicitações excessivas por descargas atmosféricas,
- solicitações excessivas por sobretensões geradas na própria rede (temporárias e de manobra).

As falhas nos resistores ZnO estão situadas em níveis bastante baixos devido à evolução da tecnologia de fabricação e dos ensaios de aceitação estabelecidos pelas normas técnicas.

O encapsulamento polimérico para pára-raios também já é bastante confiável. O índice de defeitos dos pára-raios de linha, fabricados com a tecnologia de pára-raios de média tensão existente desde de 1986, é da ordem de 0,01 % (19). O problema de entrada de umidade, principal causa de defeitos nos pára-raios com encapsulamento cerâmico, deixou praticamente de existir já que a resina polimérica é moldado diretamente sobre os resistores, não havendo a diferença de pressão entre a atmosfera externa e a parte interna do pára-raios, causa principal das falhas de vedação contra a umidade.

A maioria das falhas observadas nos pára-raios são atribuídas às solicitações excessivas impostas pelas descargas atmosféricas ou mesmo pelas sobretensões sustentadas de 60 Hz geradas pela rede durante as faltas provocadas pelos raios.

Os índices de falha estimados atualmente para os pára-raios de linha de média tensão são da ordem de 0,1 % (20), (21).

O número de falhas registradas pelas concessionárias em pára-raios de linha são:

• Empresas Publicas de Medellin - EPM: uma única falha foi registrada até hoje e foi atribuída à uma descarga múltipla.

• Duke Power Company: uma única falha foi registrada nos 1700 pára-raios instalados nos últimos 6 anos.

• Carolina Power and Light Company: nenhuma falha registrada nos 166 pára-raios, nos últimos 3 anos.

3.7.4 Fabricantes de pára-raios de linha

Existem atualmente quatro fabricantes estrangeiros (Ohio Brass, Joslyn, Hitachi e NGK) e um nacional (Line Material do Brasil). A ABB- Asea Brown Boveri e Siemens / Matsushita devem entrar brevemente no mercado de pára-raios de linhas de transmissão.

3.7.5 Custos

Os custos dos pára-raios de linha para 138 kV estão atualmente na faixa de U\$ 400 a U\$ 1000 / unidade.

4. ESQUEMAS DE MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DAS LINHAS EM QUE SERÃO INSTALADOS OS PÁRA-RAIOS E DAS GRANDEZAS RELATIVAS ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS QUE ATINGEM AS LINHAS

Nas primeiras instalações, a serem feitas na sua rede, FURNAS pretende implantar, paralelamente, um sistema de monitoramento no campo das grandezas envolvidas nos desligamentos de linhas onde serão instalados os pára-raios:

- registrar os parâmetros das descargas atmosféricas (basicamente magnitudes das correntes de raio que atingem a linha e das parcelas que fluem pelos pára-raios instalados nas torres) com um detector de fita magnética, tipo cassette (*lightning peak detector*),
- registrar o número de atuações dos pára-raios instalados nas torres, durante um certo período, nas primeiras aplicações a serem feitas nas linhas de transmissão de FURNAS,
- identificar os locais de queda dos raios nas linhas através dos esquemas de proteção da linha (estruturas ou vãos),
- executar medições das resistências de aterramento em todas as torres que têm apresentado alta incidência de queima de isoladores e onde serão instalados os pára-raios.

5. SIMULAÇÕES DO COMPORTAMENTO PARA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DA LINHA RIO VERDE - COUTO MAGALHÃES 138 kV (SEM PÁRA-RAIOS)

Os resultados apresentados a seguir devem ser considerados como preliminares pois, à época de preparação desse trabalho, não estavam ainda concluídas todas as simulações para a tomada final das decisões sobre a instalação dos pára-raios na linha em estudo.

5.1 Dados Utilizados

5.5.1 Perfis topográficos, resistências de aterramento de torres e níveis cerâmicos

- a) Foram selecionados inicialmente 3 trechos da linha em que cerca de 55 torres, historicamente, apresentavam maior índice de queima de isoladores (na maioria dos casos nas 3 cadeias),
- b) O perfil topográfico da região é ligeiramente ondulado. A rota da linha situa-se numa altitude média de 800m,
- c) Nível cerâmico nos 3 trechos escolhidos: 110,
- d) Resistências de aterramento: 50 a 70Ω (ainda não estão completas as medições em todas as torres selecionadas),

- e) Altura das torres: torre básica de 30,5m, a mais freqüente nos trechos escolhidos,
- f) Suportabilidades das cadeias de 10 isoladores para impulsos atmosféricos: CFO padrão = 950 kV, CFO corrigido = 890 kV, RIS = 0,94.

5.2 Quedas Diretas

Foi utilizado o programa QDIR (6) para a determinação do número de desligamentos, gerando-se 20000 raios aleatoriamente, para cada intervalo de 0,5 kA, na faixa de 3,7 kA (corrente crítica que já provoca desligamento da linha) até 16 kA (corrente máxima de falha de blindagem). A faixa alvo estabelecida foi 800m.

A taxa de desligamentos calculada ficou na faixa de 1,4 a 2,7 desligamentos/100km-ano para terrenos planos que ocorrem na maioria dos trechos escolhidos.

5.3 Quedas Indiretas

Foi utilizado o programa ATP (8) para a determinação das tensões de topo de torre e das solicitações nas cadeias, com a representação trifásica da linha. A Figura 13 mostra uma representação monofásica simplificada da linha com os pára raios. O programa QIND(5) foi usado para a determinação dos índices de desligamentos nos trechos estudados.

As quedas foram simuladas nas torres (60%) e no meio dos vãos (40%), com a geração de 500.000 raios para uma faixa alvo de 800m. Os índices de interrupção encontrados estão na Tabela 2.

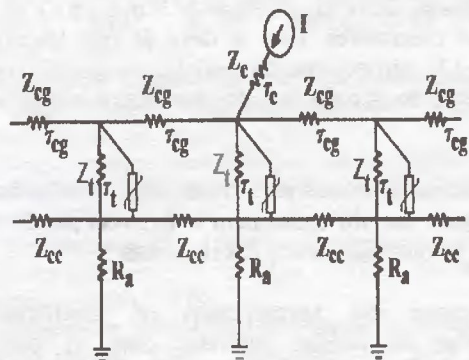


Figura 13: Simulação de quedas indiretas com pára-raios nas torres (representação monofásica)

Tabela 2: Taxa de desligamentos por Quedas Indiretas

Ra (Ω)	Número de Desligamentos / 100 km - ano
5	23,00
25	29,30
50	52,10
75	70,40

5.4 Análise dos Resultados

- a) O ângulo de blindagem fornecido pelo projeto da torre não protege totalmente as fases para todas as alturas de torre e perfis de terreno. A fase superior é a mais vulnerável,
- b) O número de desligamentos por quedas indiretas é substancialmente superior ao de quedas diretas. Portanto, somente as quedas indiretas serão consideradas na etapa seguinte, onde é investigada a influência dos pára-raios na redução das taxas de interrupções da linha,
- c) O número de desligamentos por queda indireta é muito dependente das resistências de aterramento,
- d) Comparações dos resultados obtidos com o programa QIND, acima apresentados, foram feitas com o programa VFLASH do IEEE(8). Os índices de desligamentos obtidos com o programa VFLASH foram da mesma ordem de grandeza dos calculados para algumas das hipóteses adotadas. Para $R_a = 50\Omega$, o número de desligamentos determinado para a linha foi de 55,9 / 100 km - ano para tempos de subida 0,5 μ s,
- e) Quanto menores os tempos de subida (taxa de crescimento da corrente de raio), mais severas são as tensões de topo de torre nos cálculos de queda indireta (menor influência das ondas de polaridades contrárias provenientes da base da torre e das torres adjacentes).

6. SIMULAÇÕES DO COMPORTAMENTO DA LINHA R. VERDE - C. MAGALHÃES 138 kV PARA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (COM PÁRA-RAIOS)

As simulações digitais com os pára-raios instalados nas linhas exigem uma representação completa da linha, incluindo-se, além dos sistemas de blindagem e de terra, os cabos condutores. Isso se deve às não linearidades (Figura 12) introduzidas na modelagem quando parcelas da corrente de raio fluem pelos pára-raios instalados nas cadeias.

Nas simulações sem pára-raios pode-se trabalhar com modelagens simplificadas para a determinação da tensão de topo de torre nas descargas indiretas.

A seguir são apresentadas os resultados das simulações de quedas indiretas com os pára-raios instalados em torres triangulares em diversas posições (Figura 7). As quedas indiretas são predominantes na determinação do número de saídas da linha em análise, e dos requisitos de absorção de energia e de condução das correntes de raio pelos pára-raios.

As alternativas de localização, quantidades e tipos de arranjos dos pára-raios nas torres da linha foram:

- a) sem pára-raios (alternativa de referência)
- b) pára-raios somente na fase inferior (C), instalados em todas as torres dos trechos analisados
- c) pára-raios nas fases inferior (C) e intermediária (B), instalados em todas as torres dos trechos analisados

- d) idem c, mas em torres intercaladas
- e) pára-raios nas 3 fases (C,B,A), em torres alternadas nos trechos
- f) idem e, em torres intercaladas (uma sim, duas não) dos trechos

A alternativa de instalação de pára-raios nas 3 fases de todas as torres dos trechos reduziria a zero o número de desligamentos. Como a linha em estudo não exige esse grau de desempenho, essa alternativa não foi incluída nas comparações que se seguem das alternativas.

6.1 Pára-raios considerados

- a) sem centelhador externo de tensão nominal 144 kV
- b) sem e com centelhador externo de tensão nominal 108 kV

6.2 Resultados das simulações

A Tabela 3 apresenta os resultados preliminares da modificação no desempenho da linha em função dos pára-raios instalados, para $R_a=50\Omega$.

Tabela 3: Desempenho da linha estudada (sem pára-raios e com pára-raios de 144 kV sem centelhador)

ALTERNATIVA	NPR	DESEMPENHO	
		ND	VALOR RELATIVO
A: sem pára-raios	0	63	1,00
B: PR Φ C (todas as torres)	1	40	0,63
C: PR Φ C/B (todas as torres)	2	18	0,28
D: PR Φ C/B (torres alternadas)	1	46	0,72
E: PR Φ C/B/A(torres alternadas)	1,5	41	0,64
F: PR Φ C/B/A (torres intercaladas)	1	48	0,76

PR: pára-raios

NPR: número médio de pára-raios/torre

CBA : fases

ND: número de desligamentos / 100 km-ano

6.3 Requisitos dos pára-raios (Alternativa B)

Os requisitos máximos preliminarmente encontrados para absorção de energia e condução de correntes de impulso atmosférico foram 1080 kJ (7,5 kJ/kV de tensão nominal), para descargas múltiplas e $I_{ia} = 55$ kA. A tensão nominal e o arranjo dos pára-raios (com ou sem centelhador) têm influência pequena nas correntes de descarga e nos níveis de absorção de energia. Por esse motivo deve-se adotar o pára-raios de tensão nominal 144 kV, a mesma dos pára-raios das subestações terminais da linha em estudo.

7. COMPARAÇÕES ENTRE MÉTODOS DE CONTROLE DE DESLIGAMENTOS DAS LINHAS

Serão feitas comparações técnico-econômicas entre a nova metodologia de uso de pára-raios em linhas e os métodos clássicos para redução do número de desligamentos (instalação de cabos contra pesos e

modificação dos ângulos de blindagem). Essas comparações ainda não estavam finalizadas na época de preparação desse trabalho.

8. LINHAS DE TRANSMISSÃO SEM CABOS GUARDA

Serão efetuados estudos técnicos-econômicos visando identificar as vantagens econômicas e as limitações técnicas para essa concepção de linhas, tanto em novos projetos, quanto em situações emergenciais de linhas já em operação onde a retirada de cabos guarda pode resolver problemas de carregamento mecânico excessivo em alguns trechos de linha (devido à ação do vento, por exemplo).

Nas comparações econômicas serão considerados os ganhos dos materiais referentes à não instalação dos cabos guarda, a redução dos custos das fundações e estruturas e das estruturas. Serão consideradas, também, a redução das perdas de transmissão nas linhas sem cabos guarda.

9. LIMITAÇÃO DAS SOBRETENSÕES DE MANOBRA AO LONGO DAS LINHAS UTILIZANDO OS PÁRA-RAIOS ZnO

Essa pode ser mais uma vantagem dos pára-raios de linha além de reduzir os desligamentos das linhas por descargas atmosféricas. Serão principalmente averiguados nos estudos os problemas referentes à dissipação de energia e à redução das magnitudes das sobretensões de manobra.

10. CONCLUSÕES

Ainda não se tem resultados concretos no estágio em que se encontram os estudos. Pode-se concluir preliminarmente:

- pára-raios instalados numa torre não propiciam uma ajuda significativa às torres adjacentes sem pára-raios,
- as descargas indiretas são predominantes na determinação do número de desligamentos da linha,
- os pára-raios devem ser prioritariamente instalados nas torres do trecho de maior resistência de aterramento,
- para as descargas indiretas, por exemplo, os resultados estão indicando que a localização de dois pára-raios por torre (fases-inferiores) - torre sim/torre não - com resistências de aterramento similares, dão resultados para o desempenho da linha praticamente iguais à instalação de um pára-raios (fase inferior) em todas as torres. Esse aspecto facilitaria, em princípio, os trabalhos de instalação e de monitoramento das duas unidades instaladas em apenas uma torre,
- a tensão nominal dos pára-raios, na faixa pesquisada de 108 a 144 kV, têm pouca influência na taxa de interrupções da linha para as descargas atmosféricas,
- as resistências de aterramento das torres têm um efeito contraditório no desempenho das linhas. se por um lado as baixas resistências ajudam a reduzir os

desligamentos por descargas indiretas, elas aumentam absorção de energia pelos pára-raios localizados em torres adjacentes de baixa resistência à uma torre de alta resistência atingida por uma descarga (Figura 1).

11. REFERÊNCIAS

- (1) *Utilização de pára-raios em linhas* - O.Kastrup et alii, Encontro Técnico de Linhas de Transmissão / FURNAS, Subestação de Guarulhos, 25 a 29 de Setembro de 1995
- (2) *Traveling Waves on Transmission Systems* - L.V.Bewley, John Wiley and Sons - 1933
- (3) *Protection Tubes for Power Systems* - H.A. Peterson, AIEE Transactions Vol.59 - Maio / 1940.
- (4) *Application of Arresters to Transmission Lines* - A. R. Hileman, CIGRÉ Progress Report : TF 3 / WG 33.11, Bruxelas - Agosto / 1992
- (5) CIGRÉ 33-94 (WG11) - #15 IWD - M.G. Comber, Paris - 1994
- (6) QIND - *Programa Digital para Determinação do Desempenho de Linhas para Descargas Indiretas* (Furnas/Themag)
- (7) QDIR - *Programa Digital para Determinação do Desempenho de Linhas para Descargas Diretas* (Furnas/Themag)
- (8) *User's Guide for FORTRAN Computer Program FLASH: IEEE Simplified Method for Calculating the Lightning Performance of Transmission Lines*, Julho / 1984
- (9) ATP - *Alternative Transients Program*
- (10) *Improving the Lightning Performance of Transmission and Distribution Lines by Use of Metal-Oxide Surge Arrester* A.Shei, CIGRÉ SC 33 Meeting, Nova Deli - Setembro / 1992
- (11) *Fault Testing of Gapless Zinc Oxide Transmission Line Arresters Under Simulated Field Conditions* - R. Dan Melchior et alii, IEEE - Abril / 1995
- (12) *Design of Zinc Oxide Transmission Line Arresters for Application on 138 kV Towers* - J.G. Anderson et alii, IEEE PAS - Outubro / 1985
- (13) *Footing Impedance and Surge Arrester Reliability* - H.J. Geldenhuys, CIGRÉ SC33.95 (COLL) IWD - Harare, Zimbabwe - Maio / 1995
- (14) *Protection of Transmission Lines with Intermediate Class Metal Oxide Varistor Type (MOV) Arrester* - B. Bonny, Hi-Tension News, vol. 56, Nº 1 - 1987
- (15) *Surge Arresters and Multiple Stroke Lightning* - M. Darveniza, CIGRÉ SC 33. 93 (COLL) IWD - Nova Deli, Setembro / 1993
- (16) *Transmission Line Lightning Performance with Surge Suppressors at Towers* - E.J. Los, IEEE (A 78 532-4), Los Angeles - Julho / 1978
- (17) *Applications, Benefits and some Recent Experiences with Polymer - Housed Line Arresters* - M.G Comber, H.S.Brewer, CIGRÉ SC 33.93 (COLL) IWD, Nova Deli, Setembro 1993
- (18) *Protección de la Linea Guatape - Rio Claro a 110 kV con Pararrayos de ZnO* - R.I. Patiffo e E.L. Henao, XII SNPTEE, Recife / Brasil - 1993
- (19) *Performances des Parafoudres à Enveloppe en Porcelaine ou Synthétique* - C Gazzola, Revue Général de L'Electricité, Nº 9 / 94 - Outubro/1994
- (20) *Energetic Design and EDF Distribution Network Experiene of MV Metal Oxide Surge Arrester* - F. Maciela, CIGRÉ SC 33.95 (COLL) IWD - Harare, Zimbabwe Maio / 1995
- (21) *La Protection des Tiers en Zones Sensibles par des Parafoudres en Lignes*, O. Rieffel et alii, Revue Général de L'Electricité, Nº 9 / 94 - Outubro/1994