

## **VIII Pára-raios para aplicação em linhas de transmissão**

Nos Capítulos anteriores foram apresentadas informações referentes aos aspectos a serem considerados no estudo de desempenho das linhas de transmissão e redes de distribuição frente a descargas atmosféricas. Informações referentes ao efeito das incidências de descargas atmosféricas diretas e indiretas sobre linhas de transmissão e redes de distribuição, bem como os métodos empregados para melhoria do desempenho das linhas e redes.

Neste capítulo são apresentadas informações referentes ao princípio de funcionamento dos pára-raios de linhas; os critérios de dimensionamento e localização dos pára-raios, considerando novos projetos e linhas existentes; os aspectos importantes a serem considerados na especificação dos pára-raios de linha; a experiência de aplicação e análise do desempenho de linhas com pára-raios instalados e, por fim, será apresentado um exemplo de estudo enfocando análise técnica e econômica da aplicação de pára-raios de linha.

Apesar deste Capítulo estar direcionado a aplicação de pára-raios em linhas de transmissão, os conceitos aqui apresentados também são válidos para a análise de desempenho de redes elétricas de distribuição.

### **VIII.1 Histórico**

De forma a reduzir o número de desligamentos transitórios não programados nos sistemas elétricos, empresas de energia elétrica e consumidores industriais vêm promovendo melhorias ao longo de suas linhas de transmissão ou seções dessas. Na maioria dos casos, os pára-raios têm sido considerados como o método mais efetivo para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão devido as descargas atmosféricas e tem apresentado uma boa relação entre benefício e custo. A efetividade na aplicação dos pára-raios de linha torna-se maior para piores condições topográficas e de resistividade do solo da região atravessada pela linha de transmissão analisada.

A aplicação de pára-raios em redes de distribuição e linhas de transmissão tem como objetivo principal a redução do número de desligamentos não programados tendo como causa as descargas atmosféricas, seja descargas diretas quanto indiretas (sobretensões induzidas). O desempenho das linhas é traduzido pelo parâmetro denominado "Número de desligamentos / ( 100 km . ano)". O número de desligamentos de uma linha e sua importância no sistema elétrico são fatores determinantes para a decisão pela instalação ou não de pára-raios.

A técnica de instalação de pára-raios em linhas remonta da década de 30, onde são reportadas tentativas de eliminação de falhas nas linhas por meio de pára-raios. Dificuldades na eliminação das correntes subsequentes de frequência fundamental tornaram esta técnica inviável na época. Outro fator limitante, ao longo dos anos, foi o peso dos pára-raios com invólucro de porcelana /1/.

A primeira aplicação efetiva de pára-raios para melhoria do desempenho de linhas de transmissão se deu no Japão em 1980, em linhas de 66 kV e 77 kV. Nos Estados Unidos há registro da primeira aplicação em 1982 /2/. No entanto, a utilização de pára-raios em linhas tornou-se mais difundida a partir do fim da década de 80, sendo esse método atualmente utilizado com sucesso comprovado em vários países, tais como Estados Unidos, Canadá, Japão, França, Alemanha, México, Colômbia, Brasil, entre outros..

No Brasil, a CEMIG foi a empresa pioneira na aplicação de pára-raios de linha e os resultados comprovados de melhoria de desempenho obtidos pela empresa em suas linhas de transmissão tem levado àquela empresa a realizar novos estudos para a aplicação de pára-raios em suas linhas críticas e em novos projetos de linhas que atravessem regiões com elevados valores de resistividade do solo e atividades elétricas (elevada densidade de descargas à terra).

Existem atualmente no Brasil mais de 2.000 pára-raios de linha sem centelhadores instalados em linhas de 34,5 a 138 kV da CEMIG, LIGHT, FURNAS, CERJ, CFLCL, ESCELSA e RGE, sendo que pelo menos 80% desses pára-raios encontram-se instalados nas linhas de transmissão sob concessão da CEMIG. Várias empresas no Brasil e em outros países da América Latina vêm estudando e avaliando a implementação de pára-raios em suas linhas de transmissão consideradas críticas.

Pára-raios de linha podem ser aplicados em linhas novas ou na melhoria do desempenho de linhas antigas, com ou sem cabos pára-raios.

## **VIII.2 Princípio de funcionamento dos pára-raios de linha**

Tal como na proteção dos equipamentos nas subestações, os pára-raios de linha são conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores e seu princípio de operação consiste na redução das sobretensões transitórias resultantes que se estabelecem nos terminais das cadeias de isoladores, evitando que os níveis de isolamento das cadeias de isoladores sejam excedidos.

Ao ocorrer uma descarga atmosférica na estrutura, nos cabos pára-raios ou nos condutores de fase, uma parcela da corrente de surto fluirá através do pára-raios, originando uma tensão residual entre os seus terminais que limitará a tensão resultante na cadeia de isoladores. Daí a necessidade de se coordenar os níveis de proteção do pára-raios com os níveis de descarga das cadeias a serem protegidas.

O pára-raios conduzirá a corrente de surto cuja amplitude depende basicamente da amplitude e da forma da corrente de descarga, da impedância transitória do sistema aterramento e da impedância dos cabos pára-raios (caso esses estejam presentes), retornando às condições normais de operação após a passagem do surto, cuja duração máxima é da ordem de centenas de microsegundos.

Devido às características não-lineares dos elementos de Óxido de Zinco (ZnO) utilizados na montagem dos pára-raios de linha, a corrente que flui pelo pára-raios após a passagem da corrente de descarga apresenta baixas amplitudes, não superiores a algumas dezenas de mA não sendo, portanto, suficientes para provocar a atuação do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes. Portanto, o dispositivo de proteção de sobrecorrente não **“enxerga”** a operação do pára-raios

Desta forma, não havendo a disrupção da isolação e devido a baixa corrente que flui pelos pára-raios após a passagem da corrente de descarga, não há a atuação do dispositivo de proteção contra sobrecorrentes na fase protegida pelo pára-raios não ocorrendo, portanto, uma variação momentânea de tensão devido a descargas atmosféricas nesta fase.

Se uma determinada estrutura é composta por pára-raios instalados nas suas três fases não haverá, portanto, variação momentânea de tensão devido a incidência de uma descarga atmosférica sobre essa estrutura. No entanto, descargas disruptivas podem ocorrer nas estruturas adjacentes, dependendo das características de aterramento dessas estruturas.

Existem duas filosofias para aplicação de pára-raios de linha:

- Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores
- Pára-raios de ZnO com centelhador série externo.

A Tabela VIII.1 apresenta uma comparação entre os dois tipos construtivos.

**Tabela VIII.1 - Comparação de tipos construtivos de pára-raios para Linhas**

<b>Característica</b>	<b>Sem Centelhadores</b>	<b>Com centelhador externo em série</b>
Manufatura	Simplificada	Necessidade de Estudos Elaborados
MCOV	Valor mais alto	Valor mais baixo (1)
Corrente de Descarga Nominal	Idêntica	Idêntica
Distância de Escoamento (Comportamento sob Poluição)	Importante e deve ser adequada aos níveis de contaminação do sistema	Menos Importante, uma vez que o conjunto de resistores, encapsulado em invólucro polimérico, não está submetido ao valor pleno da tensão entre fase e terra
Acessórios	Simple	Necessitam estudos detalhados
Instalação e Manutenção	Mais fácil	Mais trabalhosa
Desempenho sob Surto de Manobra	Permite o controle das Sobretensões de manobra ao longo das linhas	Projetado, a princípio, para não operar frente a estas solicitações
Desconexão em Caso de Falha do Pára-raios	Desconector indispensável	Garantido pelo centelhador externo
Sinalização da Falha do Pára-raios	Garantida pelo desconector	Indicador de defeitos desejável
Possíveis Problemas	Risco de atuação indevida do desconector e degradação do pára-raios que está continuamente sob tensão	Atuação indevida do centelhador sob tensões em frequência industrial e de manobra o que pode comprometer a integridade do pára-raios

- (1) No caso de pára-raios com centelhador série a MCOV - Máxima Tensão de Operação Contínua é relativa à parte que contém os resistores não lineares a óxido metálico.

Sob o ponto de vista de concepção e instalação, o pára-raios com centelhador externo em série requer um melhor detalhamento no que diz respeito ao dimensionamento do centelhador e a fixação do pára-raios em paralelo com a cadeia de isoladores. Isto só é possível à partir do conhecimento dos projetos das cadeias e das características da linha, o que exige uma estreita interação entre o fabricante e o comprador.

Neste capítulo será abordado somente a aplicação de pára-raios sem centelhadores externos, por ser esta a filosofia aplicada no Brasil e na maioria dos países que utilizam este conceito de proteção de linhas. Informações sobre a aplicação de pára-raios com centelhador série externo e aspectos comparativos entre as duas filosofias podem ser obtidas nas referências /1/, /3/, /4/ e /5/.

A utilização do invólucro polimérico melhora o desempenho dos pára-raios em ambientes contaminados, além de praticamente eliminar riscos de falha dos pára-raios devido a penetração de umidade por perda de estanqueidade (projetos de pára-raios sem espaçamentos internos de ar) aumentando, desta forma, a sua confiabilidade. Os efeitos da fragmentação ou explosão do invólucro que podem causar riscos às pessoas próximas ou provocar danos acentuados aos equipamentos adjacentes também são praticamente eliminados. Este fato é importante na definição dos procedimentos de instalação e manutenção de pára-raios sem centelhadores externos em linha viva.

Desligadores automáticos de linha são instalados em série com o pára-raios, para desconectar o pára-raios do sistema, em caso de sua eventual falha.

Em adição, projetos de pára-raios poliméricos sem espaçamentos internos de ar apresentam menor peso em relação aos de porcelana (em geral menos de 50% do peso), acarretando em menores esforços mecânicos sobre as estruturas e proporcionando uma maior versatilidade na montagem dos arranjos. Pára-raios com invólucro polimérico podem, invariavelmente, ser instalados sobre as linhas existentes sem a necessidade de reforço das estruturas.

O desempenho adequado dos pára-raios nas linhas está condicionado ao correto dimensionamento de suas características em relação ao sistema:

- Tensão nominal e máxima tensão contínua de operação, definidas pela máxima tensão fase-terra de operação do sistema e pela máxima sobretensão temporária no ponto de aplicação dos pára-raios e sua respectiva duração;
- Tensões residuais para impulsos de corrente íngreme e atmosféricos, os quais devem estar coordenados com os níveis de suportabilidade das cadeias de isoladores;

- Capacidade de absorção de energia, definida pela amplitude, forma de onda e duração das descargas, pela impedância transitória do sistema de aterramento, e pelo efeito das descargas múltiplas;
- Capacidade de suportabilidade mecânica a fragmentação e ao desprendimento da parte ativa, em função das máximas correntes de falta na linha em estudo;

O efeito da poluição também deve ser levado em consideração durante a fase de estudo. No caso dos pára-raios sem centelhadores externos, esse deve ser dimensionado com uma distância de escoamento suficiente para que seu comportamento sob poluição seja equivalente ou superior ao da cadeia de isoladores instalada em paralelo.

Baixos índices de falhas em pára-raios tem sido reportados, sendo a maioria das falhas elétricas atribuídas a solicitações excessivas de energia por descargas atmosféricas e sobretensões temporárias.

A eficiência desse dispositivo na redução do número de interrupções não programadas de linhas de transmissão está relacionada a estudos para definição da seleção dos pára-raios, bem como da quantidade e do correto posicionamento dos pára-raios ao longo da linha, informações estas obtidas com base na estimativa de desempenho desejada para a linha sob análise.

Os pára-raios de linha apresentam geralmente vantagens adicionais, quando comparados aos outros métodos de melhoria de desempenho de linhas de transmissão, tais como maior flexibilidade; possibilidade de concepções de projetos de linhas otimizados; além de reduzir os níveis das sobretensões de manobra ao longo das linhas.

### **VIII.3 Aplicação e localização dos pára-raios**

A definição quanto aos pontos de aplicação e o número de pára-raios a serem instalados ao longo de uma linha de transmissão ou em seus trechos críticos, está diretamente relacionada ao índice de melhoria de desempenho desejado, e depende de vários fatores tais como: o histórico de desligamento das linhas, as suas características construtivas, o conhecimento da topografia e da densidade de descargas a terra (ou do nível cerâmico) das regiões por onde passam as linhas, índice de queima de isoladores instalados, grau de importância das linhas e das cargas alimentadas por essas linhas, entre outros.

O critério de dimensionamento, a quantidade e a localização dos pára-raios devem ser obtidos através de estudos. Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na análise do comportamento transitório de uma linha atingida por uma descarga, o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas tem sido estudado e avaliado através de simulações computacionais. Para a obtenção de resultados satisfatórios, dois estudos distintos necessitam ser realizados:

- (1) Estudo de desempenho da linha de transmissão, onde para as características e configuração atuais da linha e para cada situação particular de melhoria proposta (melhoria das características transitórias do sistema de aterramento, aumento da isolação, aplicação de pára-raios, etc.), são definidas as correntes críticas que provocam a disrupção da isolação da linha e, a partir dessas correntes, é possível estimar a probabilidade de desligamentos para a linha de transmissão analisada.
- (2) Estudo para determinação das máximas energias a serem absorvidas pelos pára-raios de linha, em função da amplitude da corrente de descarga, sua forma de impulso e duração, da impedância transitória do sistema de aterramento considerado e da possibilidade da ocorrência de descargas múltiplas.

Os estudos visando a melhoria de desempenho das linhas de transmissão estão, portanto, baseados na determinação das correntes críticas e das probabilidades de desligamentos das linhas de transmissão para essas correntes. Desta forma, os programas de melhoria têm como objetivo o aumento da corrente crítica que provoca a disrupção da isolação da linha. Já os estudos de energia permitem estimar o risco de falha esperado para os pára-raios.

Para a melhor definição dos pontos de instalação dos pára-raios em função da melhoria de desempenho a ser obtida, a análise técnica deve ser acompanhada por uma análise econômica, permitindo ao usuário analisar qual a opção que melhor viabilize a sua instalação.

Na maioria dos casos, a instalação de pára-raios em trechos críticos das linhas (como por exemplo em estruturas localizadas em regiões montanhosas apresentando solos de elevada resistividade) tem reduzido significativamente o índice de desligamento transitório das linhas.

No entanto, em alguns casos, torna-se necessária a aplicação dos pára-raios ao longo de toda a linha, especialmente quando essa se encontra em regiões apresentando solos de elevada resistividade e altas atividades elétricas.

Várias literaturas têm reportado a experiência positiva na aplicação de pára-raios ao longo de trechos críticos de linhas de transmissão com tensões nominais de 34,5 kV até 500 kV, em especial a sua operação e critérios utilizados para a sua especificação, dimensionamento e aplicação /2/, /4/, /6 - 13/. Em casos particulares, onde desligamentos na linha não são permitidos (índice desejado de zero interrupções por 100 km por ano), pára-raios têm sido instalados nas três fases ao longo de toda a linha de transmissão.

### **VIII.3.1      Aplicação de pára-raios em estruturas localizadas em regiões com solos de elevada resistividade**

A resistividade do solo e a impedância de aterramento influenciam no índice de desligamento de linhas providas de cabos pára-raios devido as descargas de retorno. Melhoria das condições de aterramento, podem ser inviável técnica e/ou economicamente, sendo necessária a instalação de pára-raios. Considerando uma região de mesma topografia e densidade de descargas a terra, deve ser considerada uma probabilidade igual de ocorrência de descargas atmosféricas ao longo de todas as estruturas localizadas nesta região.

### **VIII.3.2      Aplicação de pára-raios em estruturas localizadas em regiões montanhosas**

Estruturas localizadas no topo de regiões montanhosas apresentam uma maior probabilidade de incidência de descargas atmosféricas. Em adição, estas regiões geralmente apresentam solos de elevada resistividade, propiciando valores de impedância de aterramento elevados. Descargas de retorno pelas cadeias de isoladores em linhas providas de cabos pára-raios são comuns neste caso. Cuidados devem ser tomados com relação as torres adjacentes com baixas impedâncias de aterramento.

### **VIII.3.3      Aplicação de pára-raios em estruturas localizadas próximas às subestações**

A ocorrência de uma descarga disruptiva de retorno ("**backflashover**") nas cadeias de isoladores situadas nas últimas torres próximas a subestação, acarreta na incidência de ondas viajantes de tensão chegando a subestação com taxas de crescimento bastante íngremes, e que podem acarretar em tensões impulsivas elevadas nos terminais dos equipamentos da subestação, devido ao efeito da distância entre os pára-raios e esses equipamentos. Para se evitar essa situação, as estruturas próximas a subestação devem apresentar baixos valores de impedância de aterramento.

Em alguns casos de linhas não protegidas por cabos pára-raios têm sido prática das empresas instalar cabos pára-raios nas últimas estruturas antes da chegada das subestações.

A aplicação de pára-raios nas últimas estruturas antes da chegada a subestação elimina o risco da ocorrência de "**backflashover**" em linhas providas por cabos pára-raios e evita a necessidade da instalação de cabos pára-raios em linhas não providas por esses elementos.

### **VIII.3.4 Aplicação de pára-raios em linhas novas**

Estudos de aplicação de pára-raios em novos projetos de linha vêm sendo realizados por algumas empresas concessionárias de energia, especialmente quando as linhas ou trechos da linha atravessam regiões com valores elevados de resistividade do solo e alta densidade de descargas à terra /7/. Para essas situações, em muitas vezes, a estimativa de desempenho da linha, obtida durante a fase de projeto, apresenta níveis acima dos desejados. Estudos de aplicação de pára-raios são realizados visando reduzir o índice de desligamento das linhas.

Outra situação que envolve estudos de aplicação de pára-raios durante a fase de projeto ocorre quando os índices de desempenho para a linha exigidos em contrato, são superiores aos índices estimados obtidos para a configuração normal da linha.

Algumas empresas vêm também avaliando durante a fase de projeto de uma linha a aplicação de pára-raios em substituição aos cabos pára-raios, especialmente em linhas com tensões nominais até 138 kV. Essa possibilidade permite a utilização de estruturas menores e mais leves, reduzindo significativamente o custo da linha.

Estudos realizados para análise de desempenho de linhas têm mostrado que a não utilização de cabos pára-raios pode ser técnica e economicamente atrativa, principalmente em regiões de baixo nível cerâmico apresentando solos de baixa resistividade.

Neste tipo de aplicação, é imprescindível a instalação de pára-raios em todas as estruturas. A definição quanto a quantidade e localização dos pára-raios depende da importância da linha e do índice de desempenho desejado; da configuração da estrutura utilizada e da disposição dos condutores; da densidade de descargas a terra da região; e das características transitórias do sistema de aterramento das estruturas.

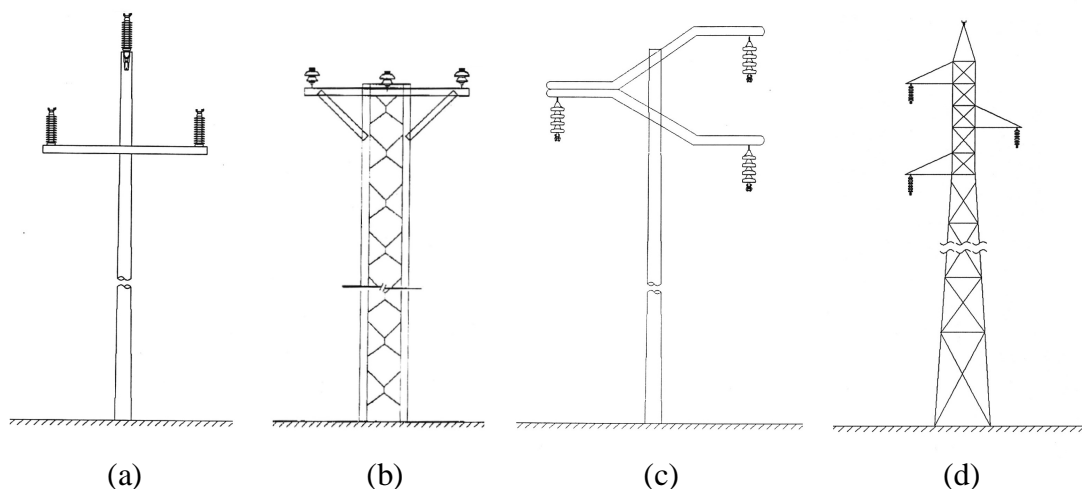
A Figura VIII.1 apresenta algumas possíveis configurações de estruturas. Comentários sobre a aplicação de pára-raios nestas configurações são apresentados abaixo:

- Em estruturas de configuração vertical - o condutor superior oferece uma blindagem efetiva em relação aos demais condutores. Neste caso, a instalação de um pára-raios por estrutura na fase apresentando o condutor mais afastado em relação ao solo apresenta, geralmente, um desempenho similar àquele obtido com a instalação de cabo pára-raios, sendo esse desempenho função direta do comportamento transitório do sistema de aterramento.

A eficiência da proteção aumenta com dois pára-raios por estrutura, instalados nas fases superior e intermediária. Uma proteção total é obtida com a instalação de pára-raios nas três fases em todas as estruturas.



- Para estruturas triangulares - se o condutor superior oferecer uma blindagem efetiva em relação aos demais condutores (Figura VIII.1.d), o procedimento a ser adotado deve ser o mesmo utilizado para configurações verticais. No caso do condutor mais alto não oferecer uma blindagem efetiva a pelo menos um dos condutores, devem ser instalados pelo menos dois pára-raios, quando as fases estão intercaladas em relação ao ponto central da torre (Figura VIII.1.c), e três pára-raios quando as fases mais baixas encontram-se dispostas simetricamente em relação a fase superior (Figura VIII.1.a).
- Em estruturas com os condutores dispostos horizontalmente (Figura VIII.1.b) - é recomendável a instalação de três pára-raios. No entanto, a instalação de pára-raios nas duas fases mais expostas poderá assegurar níveis de confiabilidade aceitáveis, em função do comportamento transitório do sistema de aterramento. e do índice de desempenho desejado para a linha.



**Figura VIII.1 – Arranjos de configurações de linhas e disposição de condutores**

### VIII.3.5

#### **Aplicação de pára-raios em linhas existentes**

A instalação de pára-raios tem possibilitado a melhoria do desempenho de linhas existentes, providas ou não de cabos pára-raios. Estudos criteriosos devem ser realizados de modo a definir a quantidade e a correta localização dos pára-raios a serem instalados ao longo das linhas analisadas.

Para linhas de transmissão sem cabos pára-raios, aplicam-se as mesmas considerações descritas na seção VIII.3.4. Para linhas providas de cabos pára-raios, a definição quanto ao número e localização dos pára-raios depende do comportamento transitório do sistema de aterramento das estruturas e da

atividade elétrica da atmosfera na região ao longo da linha, ou do(s) trecho(s) da linha. O tipo de configuração da estrutura e a disposição dos condutores também podem auxiliar na definição do número de pára-raios a serem instalados.

De modo geral, em estruturas com configuração vertical ou triangular com as fases intercaladas em relação ao ponto central da torre (Figuras VIII.1.c e VIII.1.d), a instalação de um pára-raios por estrutura, na fase inferior (condutor mais próximo em relação ao solo), pode acarretar em melhorias no desempenho da linha, sendo esta melhoria função direta dos valores das impedâncias transitórias de aterramento das estruturas. Para valores de impedância de aterramento elevados torna-se necessária, na maioria dos casos, a instalação de dois ou até três pára-raios por estrutura.

Para estruturas com configuração horizontal (Figura VIII.1.b), ou triangular onde as fases mais baixas estão dispostas simetricamente em relação a fase superior (Figura VIII.1.a), as três fases estão praticamente submetidas a mesma amplitude de tensão. Neste caso, recomenda-se a instalação de pelo menos dois pára-raios, nas fases mais expostas.

Outro aspecto importante diz respeito a instalação de pára-raios em trechos críticos de linhas de transmissão: neste caso, as estruturas localizadas nas extremidades do(s) trecho(s) protegido(s) devem apresentar baixos valores de impedância de aterramento, de modo a evitar descargas sobre os trechos não protegidos, independente da configuração da linha.

A possibilidade de instalação de pára-raios em estruturas intercaladas dependerá basicamente do comportamento transitório do sistema de aterramento das estruturas. No entanto, por não ser na maioria dos casos uma prática viável técnica e economicamente, este procedimento tem sido pouco adotado pelas empresas de energia e consumidores industriais.

#### **VIII.4. Experiência das empresas brasileiras na instalação e no desempenho de pára-raios de linha**

A CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, foi a empresa brasileira pioneira na realização de estudos e na implementação da tecnologia de instalação de pára-raios em suas linhas de transmissão. Os resultados comprovados de redução dos índices de desligamentos não programados obtidos, com o conseqüente aumento na confiabilidade das linhas consideradas, tem levado a empresa a realizar novos estudos para a aplicação de pára-raios em suas linhas de transmissão consideradas como mais críticas.

O desempenho das linhas de transmissão da CEMIG com pára-raios instalados tem sido reportado em diversas publicações técnicas. As informações disponíveis referentes a aplicação de pára-raios na CEMIG, bem como os desempenhos obtidos, são apresentadas abaixo /8/:

- CEMIG: 1.735 pára-raios instalados em sete de suas linhas de transmissão, com tensões nominais de 34,5 kV até 138 kV. A grande maioria desses pára-raios instalados (1.725) são pára-raios sem centelhadores série. Somente dez pára-raios possuem centelhadores externos em série e foram instalados com o objetivo de avaliação de desempenho do pára-raios.

O desempenho reportado pela CEMIG é apresentado na Tabela VIII.2.

**Tabela VIII.2 – Desempenho das LT's da CEMIG /8/**

Nome da linha / Tensão nominal (kV <sub>ef</sub> )	Quantidade pára-raios instalados	Índice de desl./100 km/ano	
		Antes	Após
Diamantina-Gouveia - 34,5 kV	417	62	24
Ouro Preto-Mariana - 138 kV	324	41	0
Ouro Preto-Ponte Nova - 138 kV	264	31	9
Itutinga – Minduri - 138 kV	132	19	6
Peti – Sabará - 69 kV	444	40	13
Itutinga – Três Corações (*) – 138 kV	144	---	---

(\*) Esta linha foi projetada considerando-se a instalação de pára-raios /7/.

É importante destacar a aplicação de pára-raios na linha “Ouro Preto – Mariana” com tensão nominal de 138 kV: esta linha alimenta uma grande quantidade de consumidores industriais de grande porte e apresenta uma alta densidade de descargas à terra. O índice médio de saídas desta linha antes da instalação de pára-raios era de 41 desligamentos / (100 km . ano), todos de natureza transitória.

Apesar dos desligamentos serem de natureza transitória, a variação momentânea de tensão ao longo da linha, decorrente dos desligamentos devido às descargas atmosféricas, provocavam uma grande quantidade de interrupções nos processos produtivos das indústrias alimentadas pela linha. Além disso, esta linha atravessa uma região montanhosa apresentando uma elevada resistividade de solo, o que tornava difícil a melhoria de desempenho pelos métodos tradicionais.

Após um estudo criterioso, realizado pelas indústrias interessadas em parceria com a CEMIG, optou-se pela instalação de pára-raios em toda a linha, nas três fases. Desde então (informações disponíveis até março de 2003), não ocorreram mais desligamentos nesta linha proveniente das descargas atmosféricas.

Em função dos resultados até aqui obtidos, a CEMIG pretende continuar o programa para instalação de pára-raios em suas linhas críticas, de forma a melhorar o desempenho de seus sistemas de transmissão e oferecer aos seus consumidores uma energia de melhor qualidade e maior confiabilidade.

Detalhes da instalação de pára-raios em linhas de transmissão da CEMIG são apresentados na Figura VIII.2, a seguir /8/.



(a)



(b)

- (a) Linha de transmissão Diamantina - Gouveia – 34,5 kV
- (b) Linha de transmissão Ouro Preto - Ponte Nova – 138 kV

**Figura VIII.2 - Detalhes da instalação de pára-raios em LT's da CEMIG**

- LIGHT: A LIGHT possuía até dezembro de 2002, 75 pára-raios de linha instalados em seções de quatro de suas linhas de transmissão de 138 kV. O desempenho médio dessas linhas informado pela LIGHT encontra-se na Tabela VIII.3.

**Tabela VIII.3 – Desempenho das LT's da LIGHT**

Nome da linha / Tensão Nominal (kV <sub>ef</sub> )	Quantidade pára-raios Instalados	Índice de desl./100 km/ano	
		Antes	Após
Saudade – Funil	25	27,9	4,3
Ilha – São José	23	7,4	3,7
Ilha - Rio da Cidade	15	9,4	4,3
Itapeba – Jacarepaguá	12	41,5	20,7

- CERJ: A CERJ vem instalando desde 1999 pára-raios sem centelhadores em seções de suas linhas de 34,5 kV e neste ano tem a previsão da instalação de pára-raios em trechos de linhas críticas de 69 kV.

Apesar do pouco tempo de instalação, os pára-raios instalados nas linhas de 34,5 kV têm apresentado desempenho satisfatório.

- FURNAS: Em 1996 FURNAS instalou experimentalmente 6 pára-raios sem centelhadores em seções de duas de suas linhas de transmissão de 138 kV. Uma síntese do desempenho das linhas com pára-raios instalados encontra-se na Tabela VIII.4.

**Tabela VIII.4 – Desempenho das LT's de FURNAS**

Nome da linha / Tensão Nominal (kV <sub>ef</sub> )	Quantidade pára-raios Instalados	Índice de desl./100 km/ano	
		Antes	Após
Jacarepaguá-Cosmo -138 kV	3	5,83 (90/94)	1,67 (96/98)
Angra – Santa Cruz - 138 kV	3	1,04 (77/94)	0 (96/98)

FURNAS está programando a instalação de pára-raios em algumas de suas linhas consideradas críticas.

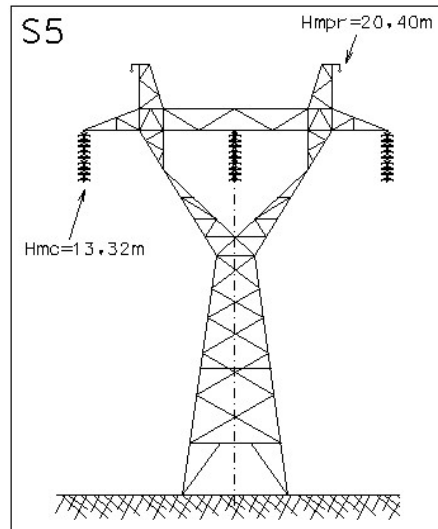
Em adição, existem pára-raios instalados nas linhas de transmissão das empresas ESCELSA, CFLCL e RGE. No entanto, informações sobre o desempenho das linhas ainda não encontram-se disponíveis.

#### **VIII.5 Estudo de caso: Análise de uma Linha de transmissão de 230 kV /9/**

Este estudo consiste de um estudo teórico, realizado em conjunto com a CEMIG, para avaliar o desempenho de uma linha de transmissão de 230 kV. Esta linha apresenta as seguintes características principais:

- Tensão nominal: 230 kV;
- Potência média transmitida: 120 MW
- Comprimento da LT: 51 km
- Espaçamento médio entre vãos: 550 metros (valor médio informado)
- Número de estruturas: 92
- Densidade média de descargas a terra da região atravessada pela linha:  
6 descargas / km<sup>2</sup> / ano.
- Tensão crítica de descarga da LT: 1275 kV (-)
- Número médio de desligamentos por 100 km . ano: 10 (dado referente a 2000)

Detalhes da estrutura da LT e da disposição dos condutores fase e dos cabos pára-raios estão apresentados na Figura VIII.3.

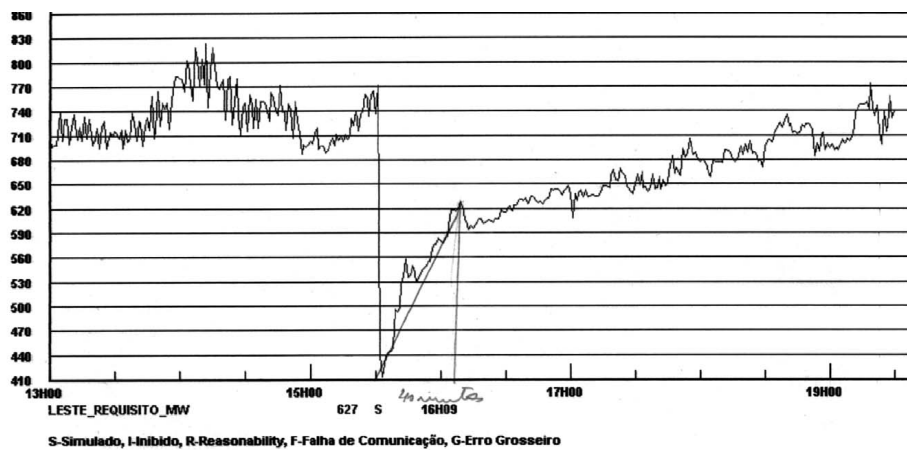


**Figura VIII.3 – Detalhes da estrutura de uma LT 230 kV**

A distância entre fases é de 7,2 metros e entre os cabos pára-raios de 9,0 metros.

Esta linha está localizada em uma região com elevada concentração de consumidores industriais em Alta Tensão. Desligamentos transitórios da linha por “backflashover” provocam variações momentâneas de tensão na região, ocasionando em muitos casos a saída de grandes blocos de carga com um tempo de recomposição total de aproximadamente 2 horas. A quantidade de energia não atendida é função do tipo e localização da falta na linha

O registro de um evento de perda de carga na linha, devido a um desligamento transitório é apresentado na Figura VIII.4.



**Figura VIII.4 – Registro de uma perda de carga na linha**

Para a análise do desempenho da linha foram realizados dois estudos: (1) - o estudo de desempenho da linha de transmissão, onde para a configuração atual da linha e alguns dos possíveis arranjos de aplicação e localização dos pára-raios e impedância de aterramento foram definidas as correntes críticas que provocam o desligamento da linha e suas probabilidades de ocorrência; (2) - estudos visando determinar as máximas energias a serem absorvidas pelos pára-raios, em função da amplitude das correntes de descarga e sua duração, das impedâncias de aterramento consideradas e da possibilidade de ocorrência de descargas múltiplas.

### **VIII.5.1 Estudo de desempenho da linha**

O estudo de desempenho da linha foi realizado através de simulação computacional, considerando-se uma corrente de descarga atmosférica tipo rampa com forma de impulso 2,6 / 62  $\mu$ s e amplitude de 42 kA, correspondente a 50% das amplitudes observadas pelos programas de pesquisa de descargas atmosféricas da CEMIG (dados no ano de 2000). Foi considerada a incidência dos impulsos de corrente sobre as estruturas, os quais representam a pior condição. Deforma a simplificar a análise da LT, as impedâncias de aterramento foram representadas por resistências concentradas. O número de descargas incidindo sobre a linha, obtido através de simulação, foi de 57,4 descargas / ( 100 km . ano), considerando-se uma região acidentada.

O estudo de desempenho da LT considerou a configuração atual, a melhoria do sistema de aterramento para as torres com valores de resistências medidas em baixa frequência acima de 30 ohms e a instalação de dois ou três pára-raios por estrutura, sem alterações no sistema de aterramento.

- **Verificação do desempenho atual**

Para uma avaliação mais correta do desempenho atual da linha devido às descargas atmosféricas, foi efetuada a medição dos valores de resistências de aterramento em baixa frequência de todas as estruturas da linha. Um resumo dos valores medidos encontram-se na Tabela VIII.5.

**Tabela VIII.5 – medição da resistência de aterramento**

Faixa de valores medidos (ohms)	Média das medições e desvio-padrão	Número de medições obtidas	Prob. de ocorrência (%)	Prob. acumulada (%)
0 a 30	17,9 / 3,8	30	32,61	32,61
30 a 60	44,3 / 8,9	17	18,48	51,09
60 a 90	71,4 / 8,3	13	14,13	65,22
90 a 150	116,5/ 13,8	9	9,78	75,00
150 a 210	184,5/ 13,3	8	8,70	83,70
210 a 300	254,2 /23,2	8 (*)	8,70	92,40
> 300	300,0 / --	7 (*)	7,61	100,00

(\*) ***Não foi possível realizar a medição em 4 das 92 estruturas da LT, sendo considerados valores superiores a 270 ohms.***

O estudo foi realizado considerando-se diferentes trechos de linha, onde para cada trecho foi utilizado um número mínimo de 8 de estruturas com valores de impedância de aterramento correspondentes aos valores médios obtidos para cada faixa apresentada na Tabela VIII.5. Os valores considerados para a impedância de aterramento em cada trecho estudado, bem como as correntes críticas obtidas para cada trecho analisado são apresentados na Tabela VIII.6.

**Tabela VIII.6 - Valores de resistência de aterramento e correntes críticas obtidas.**

Trecho	Número de estruturas	Resistência média ( $\Omega$ )	Corrente crítica (kA)
0 a 30 $\Omega$	30	18,0	150,0
30 a 60 $\Omega$	17	44,0	70,3
60 a 90 $\Omega$	13	71,0	50,8
90 a 150 $\Omega$	9	117,0	39,1
150 a 210 $\Omega$	8	185,0	32,0
210 a 300 $\Omega$	8	254,0	28,1
> 300 $\Omega$	7	300,0	26,6

A análise de desempenho da linha apresentou um índice de desligamento de 15,4 desligamentos / ( 100 km . ano). Esse índice corresponde a uma taxa de falha da linha de 27,1%. Conforme reportado anteriormente, a taxa média de desligamentos considerada é de 10 desligamentos / (100 km . ano).

Um fato importante a ser ressaltado quando do estudo de desempenho, é que do índice total desligamentos obtido, aproximadamente 73,3 % dos desligamentos ocorrem em trechos com valores de impedâncias de aterramento de 117  $\Omega$  e acima, trechos esses correspondentes a 35% do comprimento total da linha.

- **Desempenho da linha considerando a melhoria do aterramento**

Conforme anteriormente mencionado, a melhoria do sistema de aterramento acarreta na redução da tensão resultante no topo das estruturas, com a conseqüente redução da tensão ao longo das cadeias de isoladores.

Algumas empresas concessionárias de energia como a CEMIG vêm trabalhando no sentido de reduzir a impedância de aterramento das estruturas, através da utilização de novas configurações de aterramento e da disposição dos cabos contra peso nas estruturas de suas linhas de transmissão.



No presente estudo foi considerada a melhoria do sistema de aterramento de todas as estruturas da linha que apresentassem valores medidos em baixa frequência acima de 30  $\Omega$ . Desta forma, a análise de desempenho foi realizada para dois trechos de linha, com impedâncias médias de 18 ohms e 30 ohms. Os resultados são apresentados na Tabela VIII.7.

**Tabela VIII.7 – Valores de corrente crítica obtidos**

Trecho	Número de estruturas	Resistência média ( $\Omega$ )	Corrente crítica (kA)
0 a 30 $\Omega$	30	18,0	150,0
Melhorado	62	30,0	95,3

Para essa configuração, a análise de desempenho da linha apresentou um índice de 3,3 desligamentos / (100 km . ano), com uma taxa de falha da linha de 5,7 %.

Com base nos resultados pode ser verificado que a melhoria do sistema de aterramento proporcionou uma redução em aproximadamente 80% no índice de desligamento relativo da linha.

#### • Aplicação de pára-raios de linha

De modo a se verificar possíveis melhorias na linha sob estudo foi analisada a aplicação de pára-raios para as seguintes condições:

- Aplicação de dois pára-raios por estrutura, em todas as estruturas da linha com valores de impedância de aterramento superiores a 30 ohms;
- Dois pára-raios em todas as estruturas;
- Aplicação de três pára-raios por estrutura, em todas as estruturas da linha com valores de impedância de aterramento superiores a 30 ohms;
- Três pára-raios em todas as estruturas;
- Dois pára-raios por estrutura, em estruturas com impedância de aterramento de até 71 ohms e três pára-raios por estrutura, nas demais estruturas.

Uma síntese dos resultados encontra-se na Tabela VIII.8.

Com base nos índices de desempenho apresentados na Tabela VIII.8 pode-se verificar que as análises considerando dois pára-raios por estrutura (arranjos (1) e (2)) apresentam índices de desligamento teóricos maiores do que o índice teórico obtido considerando a melhoria do sistema de aterramento. Já o arranjo (3) apresenta uma melhoria relativa no índice de desempenho de aproximadamente 90%, quando comparado ao método de melhoria do sistema de aterramento. No caso da aplicação de três pára-raios por estrutura em todas as estruturas, a taxa de desligamento é muito baixa e está associada à taxa de falha dos pára-raios.

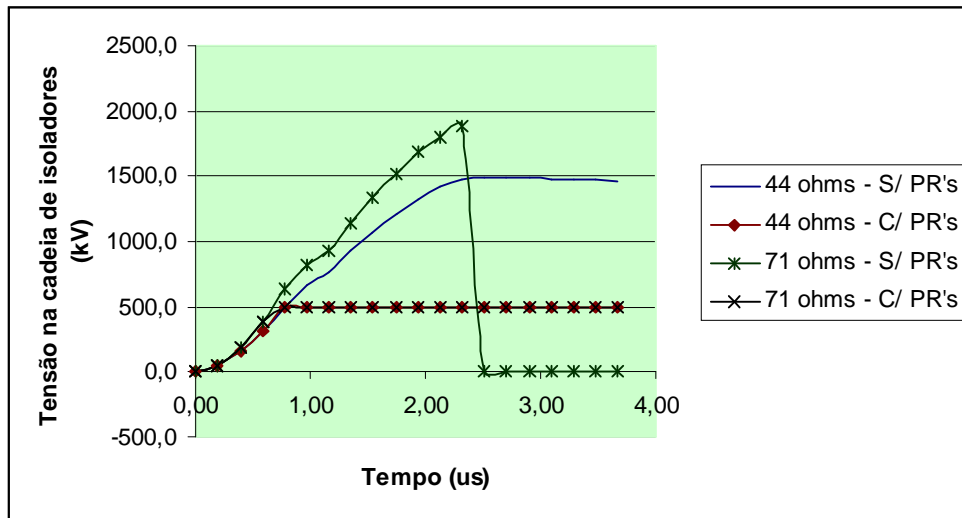
**Tabela VIII.8 – Aplicação de pára-raios de linha**

Arranjo	Icrítica (kA)	Desl./ano	Deslig. por 100 km por ano	Taxa de falha (%)
(1)	57,0 (*)	3,2	6,3	11,1
(2)	57,0 (*)	3,0	5,9	10,5
(3)	$\geq 200,0$	0,2	0,4	0,6
(4)	$\geq 200,0$	0,0	0,0	0,0
(5)	96,9 (**)	0,7	1,4	2,2

(\*) **Corrente crítica que provoca backflashover na cadeia de isoladores central para uma impedância de aterramento igual ou superior a 300 ohms.**

(\*\*) **Corrente crítica que provoca backflashover na cadeia de isoladores central para uma impedância de aterramento igual ou superior a 71 ohms.**

O efeito dos pára-raios no desempenho de uma LT pode ser melhor visualizado a partir da Figura VIII.5, que apresenta a tensão ao longo da cadeia de isoladores central com e sem pára-raios, considerando valores de impedância de aterramento de 44  $\Omega$  e 71  $\Omega$ , quando da incidência de uma onda de corrente com amplitude de 100 kA sobre a estrutura.



**Figura VIII.5 – Perfil de tensão na cadeia central**

A instalação de pára-raios na estrutura reduz a tensão resultante ao longo da cadeia (no caso de uma impedância de 44  $\Omega$ ) e evita a ocorrência da descarga disruptiva de retorno em estruturas com impedâncias superiores a 71  $\Omega$ .

### VIII.5.2 Estudo de capacidade de absorção de energia pelos pára-raios

O estudo de capacidade de absorção de energia tem por objetivo determinar as energias máximas a serem absorvidas pelos pára-raios, quando da sua atuação.

No presente estudo foram consideradas duas situações:

- a incidência de uma descarga com amplitude de 200 kA sobre a estrutura, para valores de impedâncias de aterramento médias de 18, 71 e 300  $\Omega$ .
- uma falha de blindagem com a incidência de uma corrente de descarga de 6,5 kA, para valores de impedâncias de aterramento de 18 e 300  $\Omega$ .

A análise das energias a serem absorvidas pelos pára-raios foi realizada utilizando-se o programa ATP (Alternative Transient Program). Foram simuladas 7 torres ao longo da linha.

Os parâmetros da linha de transmissão foram calculados utilizando-se a rotina JMARTI. As torres foram modeladas por suas impedâncias de surto, consideradas igual a 150  $\Omega$  e o tempo de propagação das ondas calculados em função da altura das torres. A impedância de aterramento foi modelada como uma resistência concentrada. O surto de corrente incidente foi simulado por uma fonte de corrente, tipo rampa com tempo de frente de 2,6  $\mu$ s e um tempo de meia onda de 65  $\mu$ s e injetado na torre número 4. O pára-raios utilizado foi o tipo 99, considerando a tensão nominal do pára-raios é de 192 kV e sua MCOV de 156 kV.

Uma síntese das energias absorvidas pelos pára-raios está na Tabela VIII.9.

**Tabela VIII.9 – Energia nos pára-raios**

Impedância Aterramento (ohms)	Energia absorvida pelos pára-raios (kJ)		
	Descarga na estrutura		Falha de blindagem
	2 PR's	3 PR's	
18,0	82,0	72,0	13,0
71,0	291,0	237,0	-----
300,0	494,0	398,0	10,0

Dos resultados obtidos, verifica-se para a condição de descarga sobre a estrutura uma energia máxima de 398 kJ quando da utilização de 3 pára-raios por estrutura e de 494 kJ para dois pára-raios por estrutura (300  $\Omega$ ). Em caso de falha de blindagem a energia máxima obtida foi de 13 kJ (18  $\Omega$ ). Considerando um pára-raios com tensão nominal de 192 kV, as máximas energias a serem absorvidas pelo pára-raios serão de 2,6 kJ / kV e 2,07 kJ / kV, para 2 e 3 pára-raios, respectivamente.

### VIII.5.3 Estudo simplificado de análise de investimento

Uma análise econômica foi realizada para se avaliar o método de melhoria mais adequado, considerando-se um prazo de análise de 10 anos. . Foi considerada a instalação dos pára-raios em linha viva e um custo de energia não fornecida de R\$ 582,00 / MWh, que corresponde a 10 vezes o valor médio da tarifa considerada.

Para simplicidade de cálculo, assumiu-se um número de desligamentos constante ao longo dos 10 anos, e que cada desligamento acarreta em uma energia média não fornecida de 336 MWh, obtida de forma aproximada da Figura VIII.5.

Cabe ressaltar, que a quantidade de energia não atendida é função do tipo e localização da falta na linha. Neste caso específico, foi decorrente de um curto-circuito trifásico próximo à barra da subestação.

Para a configuração atual considerou-se o número médio de 10 desligamentos / (100 km . ano), informado pela CEMIG.

De forma bastante conservativa, foi considerada uma taxa média constante de falha para os pára-raios de 3% ao ano (os índices de falha encontram-se abaixo de 0,5 % ao ano).

O critério adotado para a escolha do melhor método foi o do Valor Presente Líquido (VLP). Para a determinação do tempo de retorno do investimento foi utilizado o método do “Payback” descontado, com um custo de capital de 14% ao ano.

Os procedimentos de análise são apresentados na referência /14/. As Tabelas VIII.10 e VIII.11, apresentam uma síntese da análise realizada.

**TABELA VIII.10 – Custos para melhoria do desempenho da Linha de transmissão**

Arranjo da linha	Custos de instalação (R\$)		Perda por ano (k R\$)
	Material	Instalação	
Atual	-----	-----	997,315
Aterramento	155,000	-----	332,438
(1)	669,600	18,870	647,975
(2)	993,600	28,000	619,969
(3)	1.004,400	28,300	72,423
(4)	1.490,400	42,000	44,417
(5)	1.166,400	32,870	175,751

**Tabela VIII.11 - Avaliação dos métodos propostos**

Arranjo	n <sup>o</sup> desligamentos / 100 km /ano	Tempo de retorno do investimento	VPL (R\$ x 1000)
Aterramento	3,3	0,3	3.313,075
(1)	6,3	1,8	1.623,178
(2)	5,9	3,7	946,680
(3)	0,4	1,3	3.791,643
(4)	0,0	2,0	3.438,026
(5)	1,4	1,8	3.086,103

Apesar da melhoria do sistema de aterramento apresentar o menor prazo de retorno de investimento e o menor investimento inicial, a melhor opção, sob os pontos de vista técnico e econômico ao longo dos 10 anos, consiste na melhoria proposta no arranjo (3) - (maior VPL após os 10 anos de análise).

No entanto, outras alternativas de aplicação de pára-raios em conjunto com a melhoria do sistema de aterramento poderiam vir a ser analisadas e poderiam trazer um melhor retorno sob os pontos de vista técnico e econômico.

#### **VIII.6 Referência bibliográficas**

- /1/ Kastrup Filho, O. "Aplicação de pára-raios de ZnO em linhas de transmissão", CPAR, CEPEL / ELETROBRÁS, Outubro, 1996
- /2/ CIGRÉ WG 33.11, "Application of Metal Oxide Surge Arresters to Overhead Lines", ELECTRA n<sup>o</sup> 186, pp. 83-112, Outubro 1999.
- /3/ de la Rosa, F. et alli, "Evaluation of Surge Arresters Protection of Electric Power Lines in Mexico", CIGRE International Workshop on Line surge Arresters and Lightning, Abril 1996.
- /4/ Brocard, E. & Tartier, S., "Simulation and Optimisation of the Lightning Protection of Overhead Lines", CIGRE International Workshop on Line surge Arresters and Lightning, Rio de Janeiro, Abril 1996.
- /5/ Patiño, R. I. & Henao, E. L., "Protección de la Línea Guatapé-Rio Claro a 110 kV com Pararrayos de ZnO", XII SNPTEE, Recife – Brasil, 1993.
- /6/ Carvalho, A.M. et alli, "Tecnologias para análise e melhoria do desempenho de instalações de transmissão frente a descargas atmosféricas", XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, 1999.
- /7/ Bezerra, A. C. G, "Diagnóstico de Desempenho de Descargas Atmosféricas de LT em Projeto com Aplicação de Pára-raios de ZnO", XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, Outubro, 1999.
- /8/ Cherchiglia, L. C. L. et alli, "Application of Transmission Line Lightning Arresters in CEMIG", CE-33 - Sobretensões e Coordenação de Isolamento - Relatório de Viagem - Biental 2000 e Reuniões dos Grupos de Trabalho.

- //9/ De Franco, J. L. et alli, "Aplicação de Pára-raios na Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão de 230 kV", XVI SNPTEE, Campinas, Outubro - 2001.
- /10/ De Franco, F. L. & Lira, E. A., "Pára-raios de linha: A Solução para a Melhoria da Performance de Linhas de Transmissão de 69 kV a 230 kV frente a Descargas Atmosféricas", VIII ERLAC, Paraguai, 1998.
- /11/ De Franco, J. L. et alli, "Aplicação de Pára-raios – Uma Solução para a Melhoria Do Desempenho de Linhas de Transmissão", IV Congresso Latino Americano de Generación y Transporte de Energia Elétrica, Viña del Mar, Chile, 2000
- /12/ De Franco, J. L. et alli, "Lightning Arrester Application for the Improvement of Transmission Line Performance, VI SIPDA - Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, Novembro – 2001.
- /13/ Cherchiglia, L. C. L. et alli, "Estudos para Aplicação de Pára-raios de ZnO em Linhas de Transmissão da CEMIG", XV SNPTEE, Foz do Iguaçu, Outubro, 1999.
- /14/ Lapponi, J. C., "Avaliação de Projetos de Investimento – Modelos em Excel", Lapponi treinamento e Editora Ltda, São Paulo, 1996.
- /15/ Câmara, A. S. B. et alli, "Protection Against Lightning Surges Provided by Line Arresters – FURNAS' Experience on 138 kV System", V SIPDA, São Paulo, 1999.
- /16/ Comber, M. G. & Zinser, R. L., "Lightning Protection of Transmission Lines with Polymer-Housed Surge Arresters", CIGRE International Workshop on Line surge Arresters and Lightning - RJ, Abril 1996.
- /17/ Brewer, H. S., "Reduction of Lightning Caused Interruptions on Electric Power Systems", Ohio Brass technical Bulletin EU1292-H.