



**GRUPO III
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

**MELHORIA DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS**

Jorge Luiz De Franco *
Inepar-Hubbell Ltda.
Brasil

Marcos Vinícius Wendler
Inepar-Hubbell Ltda.
Brasil

Evilasio Augusto Lira
Inepar-Hubbell Ltda
Brasil

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação de pára-raios de linha para sistemas de 69 kV até 230 kV. Os efeitos das descargas atmosféricas no desempenho de linhas com e sem cabos guarda e os métodos utilizados para a melhoria de performance das linhas são apresentados. Informações referentes a instalação e localização de pára-raios são analisadas e discutidas para aplicações em novos projetos, em substituição ou complemento ao cabo guarda, e para linhas existentes com ou sem cabos de guarda. Por fim, são apresentados e analisados estudos de viabilidade técnica e econômica para aplicação de pára-raios em linhas de 69 kV e 138 kV.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, Pára-raios de linha, Descargas atmosféricas

1.0 INTRODUÇÃO

Reduzir os índices de desligamentos de linhas de transmissão devido as descargas atmosféricas tem sido uma preocupação constante das empresas de energia.

As descargas atmosféricas são responsáveis por 50% a 70% dos desligamentos ocorridos em linhas de transmissão com tensões nominais até 230 kV /1/, gerando perdas elevadas de faturamento para as empresas de energia elétrica. Em adição, os desligamentos de linhas consideradas vitais podem ocasionar distúrbios em toda a rede de uma região /2/.

Com o objetivo de melhorar o desempenho das linhas de transmissão, através da redução dos índices de

desligamentos temporários ou permanentes, devido as descargas atmosféricas, empresas de energia elétrica vêm instalando ao longo dos últimos anos pára-raios de óxidos metálicos, os quais são conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores. Este método tem sido reportado como o mais eficaz, sob os pontos de vista técnico e econômico.

2.0 COMPORTAMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O comportamento das ondas trafegantes quando da incidência de descargas atmosféricas sobre as linhas é altamente complexo, podendo ser efetivamente avaliado somente através de análise computacional. Entretanto, é possível obter-se, através da aplicação de conceitos básicos, uma análise simplificada do efeito das descargas sobre as linhas de transmissão, o qual depende da amplitude e da forma de onda da corrente de descarga, do projeto de construção da linha, da impedância de aterramento das estruturas, do ponto onde a descarga atinge a linha e do grau de confiabilidade da linha.

2.1 Linhas sem cabo de blindagem

Descargas atmosféricas incidindo sobre linhas de transmissão sem blindagem atingirão, invariavelmente, o condutor fase, provocando o desligamento das mesmas, por descarga externa nas cadeias de isoladores “flashover”, todas as vezes que a tensão incidente sobre a linha exceder, em um dado instante, a tensão crítica de descarga das cadeias de isoladores. A descarga externa é seguida pela

INEPAR HUBBELL LTDA.

Avenida Juscelino K. de Oliveira 11.400 - CEP 81.450-900 - Curitiba - PR

Tel: (041) 341-1404 – Fax: (041) 341-1271

e-mail: jorgefranco@hubbell.com.br

passagem da corrente de curto do sistema, que provoca um desligamento transitório ou permanente da linha. Praticamente todas as descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre linhas sem cabos guarda produzirão descargas externas.

2.2 Linhas com cabos de blindagem

As descargas atmosféricas ao incidirem diretamente sobre as estruturas ou sobre os cabos guarda elevam a tensão da estrutura acima do potencial de terra. Esta tensão é função da amplitude da corrente e das impedâncias de surto do cabo guarda; de aterramento da estrutura; e transitória da torre. No mesmo instante, tensões induzidas aparecem sobre os condutores fase, resultantes do acoplamento capacitivo entre esses condutores e o(s) cabo(s) guarda. A tensão que aparece através das cadeias de isoladores consiste na diferença de potencial que se estabelece entre a estrutura e as respectivas tensões induzidas nos condutores fase.

Condutores fase mais afastados do cabo guarda apresentam menores valores de tensões induzidas. Logo, maiores tensões aparecem através das cadeias de isoladores. Em muitos casos, esta tensão pode ser elevada o suficiente para exceder a tensão de descarga das cadeias de isoladores, provocando a descarga de retorno ou “backflashover” pelas cadeias, que seguida pela corrente de curto-circuito da linha provoca um desligamento transitório ou permanente.

A resistividade do solo e a impedância de aterramento são parâmetros relevantes no índice de desligamento de linhas com cabo guarda. O aumento destes parâmetros eleva o índice de desligamento das linhas. Descargas de retorno em diversas torres adjacentes ao ponto de incidência de descarga tem sido verificadas em linhas localizadas em regiões de elevada resistividade de solo.

Algumas vezes falhas na blindagem poderão ocorrer. Um caso típico ocorre normalmente no meio de vãos entre torres de grande extensão, como no caso de travessias de vales, rios e estradas, quando o afastamento do plano do solo em relação aos condutores deixam esses menos protegidos em relação às descargas atmosféricas /2/. Neste caso, o condutor fase será atingido diretamente pela descarga atmosférica, sendo o efeito desta descarga idêntico ao verificado sobre uma linha não blindada.

3.0 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A MELHORIA DE DESEMPENHO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Alguns métodos têm sido utilizados, ao longo dos anos, para a melhoria do desempenho das linhas aéreas devido as descargas atmosféricas, os quais podem ser aplicados individualmente ou em conjunto: aumento do isolamento da linha; instalação de cabos de blindagem (cabos guarda) em linhas sem blindagem; alteração dos ângulos de blindagem fornecidos pelos cabos guarda aos condutores, em linhas com cabo guarda; melhoria da impedância de aterramento / instalação de cabos contra-pesos nas bases da torre e, por último, a instalação de pára-raios de linha.

Informações sobre os métodos existentes e respectivas efetividades são apresentadas nas referências /3/ e /4/

4.0 PÁRA-RAIOS DE LINHA

Os pára-raios de linha são conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores. O princípio de operação consiste na redução das sobretensões atmosféricas sobre as cadeias de isoladores, evitando que o nível isolamento das mesmas seja excedido.

O desempenho operacional dos pára-raios de linha está condicionado ao correto dimensionamento de suas características em relação ao sistema /2/, /3/. Baixos índices de falhas em pára-raios tem sido reportados /2/, /5/, sendo a maioria das falhas atribuídas a solicitações excessivas por descargas atmosféricas e sobretensões temporárias.

Desligadores de linha são instalados em série com o pára-raios, para desconectá-lo do sistema em caso de uma eventual falha do pára-raios.

4.1 Aplicação e localização dos pára-raios

A utilização de pára-raios de linha tornou-se mais difundida a partir do fim da década de 80, com o surgimento de pára-raios de ZnO poliméricos, sendo atualmente utilizada com sucesso em várias empresas de energia dos Estados Unidos, Canadá, Japão, França, Alemanha, México, Colômbia, etc /5/, /6/, /7/, /8/, /9/. No Brasil, pára-raios se encontram instalados em linhas da CEMIG, LIGHT, FURNAS, CERJ, entre outras.

A definição dos pontos de aplicação dos pára-raios de linha depende de fatores, tais como, o histórico de desligamento das linhas, características geométricas das linhas, conhecimento da topografia e do nível isocerâmico ou densidade de descargas a terra das regiões por onde passam as linhas, índice de queima

de isoladores instalados, grau de importância das linhas, etc. Na maioria dos casos, a instalação de pára-raios em trechos críticos de uma linha melhora bastante o seu desempenho frente às descargas atmosféricas. Aplicações de pára-raios em estruturas localizadas em regiões montanhosas e/ou que apresentem solos de elevada resistividade têm propiciado melhorias no desempenho das linhas.

O critério de dimensionamento, a quantidade e a localização dos pára-raios devem ser obtidos através de estudos e/ou análises computacionais especificamente desenvolvidos para essa aplicação. Uma análise técnica deve ser sempre acompanhada de uma avaliação econômica, permitindo ao usuário analisar qual a opção que melhor viabilize a sua instalação.

4.1.1 Aplicação de pára-raios em linhas novas

Durante a fase de projeto, é possível avaliar a aplicação de pára-raios de linha em substituição aos cabos guarda. Neste caso, torna-se necessária a instalação de pára-raios em todas as estruturas. A definição quanto ao número e localização dos pára-raios depende do tipo de configuração da estrutura e disposição dos condutores, da densidade de descargas a terra e dos valores de impedância de aterramento /3/.

Estudos de performance de linhas através de simulações computacionais têm mostrado que a não utilização de cabos guarda pode ser técnica e economicamente atrativa, principalmente em regiões de baixo nível cerâmico. Outro ponto importante a ser ressaltado é que a eliminação do cabo guarda permite a utilização de estruturas menos resistentes, além de reduzir o número de descargas atmosféricas que incidem sobre a linha.

4.1.2 Aplicação de pára-raios em linhas existentes

Diversas configurações de instalação de pára-raios são possíveis para a melhoria do desempenho de linhas existentes, providas ou não de cabos guarda. Estudos devem ser realizados de modo a definir a quantidade e a localização dos pára-raios a serem instalados por estrutura. Estudos de análise de desempenho de linhas existentes com e sem cabos guarda são apresentados nas referências /5/, /6/, /7/, /8/ e /9/.

No caso de linhas sem cabos guarda, aplicam-se os mesmos conceitos previamente apresentados em 4.1.1.

Para linhas providas de cabos guarda, a definição quanto ao número e localização dos pára-raios a serem instalados depende da impedância de aterramento das estruturas, e da densidade de descargas a terra ao longo da linha ou do(s) trecho(s) da linha. Em caso de instalação de pára-raios em trechos de uma linha, as estruturas localizadas nas extremidades do(s) trecho(s) protegido(s) devem apresentar baixas impedâncias de aterramento, de modo a evitar descargas sobre os trechos não protegidos.

Informações básicas sobre a quantidade e localização dos pára-raios podem ser encontradas na referência /3/.

5.0 EXPERIÊNCIA DE DESEMPENHO NO CAMPO

O desempenho dos pára-raios instalados em linhas tem sido reportado em várias literaturas /2/, /6/, /7/, /8/. A referência /6/ reporta a instalação de pára-raios em trechos críticos de uma linha de 115 kV, com uma melhoria de desempenho da linha de aproximadamente 50%. A aplicação de pára-raios em trechos de uma LT de 110 kV na Colômbia reduziu o índice de saídas de linha de 85 para 42 saídas / 100 km - ano /8/.

Estudo de desempenho referente a linha Diamantina 1 – Gouveia 2 de 34,5 kV, realizado pela CEMIG, mostrou que a instalação de 417 pára-raios em 139 estruturas, correspondente a aproximadamente 50% da linha, apresentou uma redução relativa no número de desligamentos da linha / 100 km – ano de pelo menos 50%. Resultados de desempenho desta linha, mostrados na Figura 1.

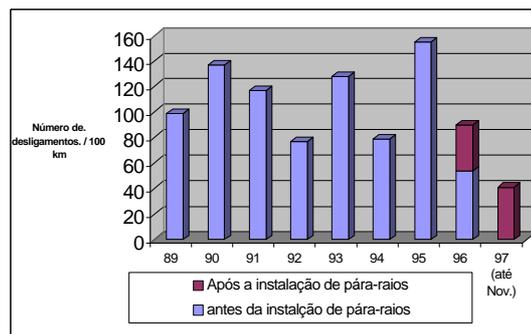


FIGURA 1 – Desempenho de uma LT CEMIG

6.0 ESTUDOS DE CASO

6.1 Análise de uma linha de 69 kV

A linha em estudo apresenta um comprimento total aproximado de 9,5 km, com espaçamento médio entre vãos de 196 metros, com um total de 48 estruturas. O nível cerâmico considerado foi de 40. O número estimado de descargas que atingem a linha é de 15 descargas - ano, índice esse obtido a partir de simulação computacional

Detalhes da estrutura estão apresentados na Figura 2.

Uma análise técnica de desempenho da linha atual e do desempenho considerando cabo guarda e pára-raios de linha está apresentada na Tabela 1.

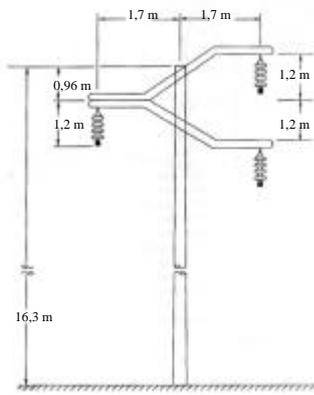


FIGURA 2 – Detalhe do arranjo da linha de 69 kV

TABELA 1- ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA

LINHA DE 69 kV

ARRANJO DA LINHA	$R_{at} = 10 \Omega$		$R_{at} = 20 \Omega$		$R_{at} = 40 \Omega$		
	$I_{critic a}$	T_{desl}	$I_{critic a}$	T_{desl}	$I_{critic a}$	T_{desl}	
(1)	2,3	99,9	2,3	99,9	2,3	99,9	
(2) (*)	96,1	29,0	57,8	39,0	31,3	64,0	
(3)	Todas	96,1	29,0	57,8	39,0	31,3	64,0
	Alter nada	2,3	98,0	3,1	98,0	3,1	98,0
(4)	Todas	125,0	2,4	76,7	10,0	42,2	34,0
	Alter nada	2,3	98,0	3,1	98,0	3,1	98,0
(5)	Todas	>200	0,0	>200	0,0	>200	0,0
	Alter nada	2,3	98,0	3,1	98,0	3,1	98,0

- (1) Arranjo atual – Linha sem cabo guarda
- (2) Instalação de cabo guarda
- (3) Instalação de um pára-raios

- (3) Instalação de dois pára-raios
- (5) Instalação de três pára-raios

(*) No estudo original, não foi considerada a opção da instalação de cabo guarda. Para fins de análise, foi considerado para o cabo guarda um desempenho similar àquele obtido a partir da aplicação de 1 pára-raios em todas as estruturas. Esta análise estimada é validada se considerarmos um ângulo de proteção oferecido pelo condutor mais elevado em relação aos demais condutores, inferior a 30° .

A partir da Tabela 1 pode ser verificada a influência da impedância de aterramento na performance da linha, quando da aplicação de um ou dois pára-raios por estrutura. Um aumento da impedância de aterramento acarreta no aumento no índice de desligamento da linha.

Por outro lado, a instalação de pára-raios em estruturas alternadas não se mostra como uma alternativa tecnicamente viável. Um desempenho bastante similar ao desempenho atual da linha pode ser verificado. Isto deve-se ao fato da descarga, ao atingir o condutor, gerar tensões incidentes em ambas as direções da linha, tensões essas que ao incidir na cadeia de isoladores sem pára-raios provocará uma descarga externa.

A Tabela 2, apresenta uma análise comparativa de custos considerando a instalação de cabo guarda e de pára-raios em todas as estruturas, para uma impedância de aterramento de 20 ohms.

TABELA 2 - CUSTOS PARA A LINHA DE 69 kV

ARRANJO DA LINHA	Custos de Instalação		Custos de Energia não fornecida (U\$)
	Material (U\$/km)	Instalação (U\$/km)	
Atual	0,00	0,00	96.091,00
Cabo guarda	720,50	19.974,72	37.513,13
1 pára-raios	3.134,94	12.388,08	37.513,13
2 pára-raios	6.269,88	18.582,11	9.618,75
3 pára-raios	9.396,40	24.776,15	0,00

Esta análise de custos foi desenvolvida com base nas seguintes premissas:

- O custo de instalação considera os custos de material; de homem-hora necessários na montagem; e de linha desenergizada durante a montagem.

- O custo de pessoal para a instalação do cabo guarda é de US\$ 1.200,00 por hora, considerando 8 equipes. O tempo médio de instalação é de 0,5 km por hora.
- O custo de pessoal para a instalação dos pára-raios é de US\$ 300,00 por hora, considerando 2 equipes. O tempo médio de instalação considerado, por equipe, foi de 1 hora para três pára-raios, 45 minutos para dois pára-raios e 30 minutos para um pára-raios.
- O custo para o não fornecimento de energia, e de US\$ 0,95 / kwh. A potência ativa da linha é de 10 MW.
- O custo de energia não fornecida considera 90% dos desligamentos transitórios e 10% permanentes.
- Os tempos de não fornecimento considerados foram de 5 minutos para religamento automático, e 6 horas para faltas permanentes. Para faltas permanentes não foram considerados os custos de manutenção e de material para reparo do ponto danificado.

Uma análise de retorno de investimento foi realizada, com base no método do Payback descontado com valor presente. Os tempos de retorno do investimento, em anos, estão apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 – RETORNO DE INVESTIMENTO

ARRANJO DA LINHA	ÍNDICE DE FALHA (%)	TEMPO DE RETORNO
Sem cabo guarda	99,9	-----
Com cabo guarda	39,0	4,296
1 PR p/ estrutura	39,0	3,056
2 PR p/ estrutura	10,0	3,353
3 PR p/ estrutura	0,0	4,332

A análise da Tabela acima indica a viabilidade técnica e econômica da aplicação de pára-raios de linha. A aplicação de 2 pára-raios por estrutura reduz, para esta linha, o índice de desligamento para aproximadamente 10%, trazendo um retorno do investimento em 3,35 anos. A aplicação de 3 pára-raios por estrutura, apesar de apresentar o maior investimento inicial, evita o desligamento da linha independente da impedância de aterramento. Considerando o retorno de investimento de 4,33 anos, esta aplicação apresenta a melhor relação custo benefício a médio prazo.

No presente estudo, não foi considerada na análise a redução de custos provenientes da redução dos esforços mecânicos que atuam sobre as estruturas, quando da opção pela instalação de pára-raios em linhas novas.

6.2 Análise de uma linha de 132 kV

Os detalhes da estrutura estudada estão apresentados na Figura 5.

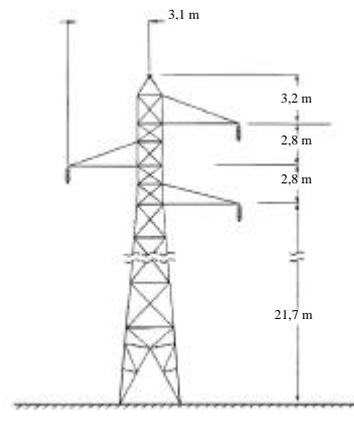


FIGURA 5 – detalhe do arranjo da linha de 132 kV

A linha é provida de um cabo guarda e apresenta um comprimento total aproximado de 121 km, com espaçamento médio entre vãos de 366 metros, perfazendo um total de 330 estruturas. O nível cerâmico considerado foi de 50. O número estimado de descargas que atingem a linha é de 88 descargas - ano.

A análise técnica de desempenho atual da linha e do desempenho considerando a aplicação de pára-raios em todas as estruturas está apresentada na Tabela 4.

TABELA 4 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA LINHA DE 132 kV

	10 Ω		30 Ω		50 Ω		100 Ω	
	I _{cri.}	T _d						
(1)	200	2,3	88,3	11,3	60,9	22,1	37,5	48,3
(2)	200	2,3	125	5,5	89,1	11,0	57,5	24,3
(3)	200	2,2	179	2,5	129	5,1	85,2	11,5
(4)	200	0,0	200	0,0	200	0,0	200	0,0

I_{cri.} representa a corrente crítica da linha

T_d representa o percentual de desligamento da linha

- (1) Configuração atual. Somente cabo guarda
- (2) Aplicação de 1 pára-raios por estrutura

- (3) Aplicação de 2 pára-raios por estrutura
- (4) Aplicação de 3 pára-raios por estrutura

A Tabela 5, apresenta uma análise de custos para a instalação de pára-raios em todas as estruturas, para uma impedância de aterramento de 50 ohms. Para esta análise, além das considerações descritas em 6.1, foram consideradas as seguintes premissas:

- Devido ao elevado custo de não fornecimento de energia, para a instalação dos pára-raios foram utilizadas cinco equipes de 5 eletricitas, a um custo por equipe de U\$ 150.00 por hora. Tal fato deve-se ao elevado custo de não fornecimento de energia.
- O custo de não fornecimento de energia considerado foi de U\$ 0,95 / kwh. A potência ativa da linha é de 30 MW.

Os tempos de retorno do investimento (anos), obtidos a partir da Tabela 5, utilizando-se o método do Payback descontado com valor presente, estão apresentados na Tabela 6.

TABELA 5 – CUSTOS PARA A LINHA DE 132 kV

ARRANJO DA LINHA	Custos de Instalação		Custos de Energia não fornecida (U\$)
	Material (U\$/km)	Instalação (U\$/km)	
(1)	0,00	0,00	374.130,90
(2)	2.509,09	7.977,27	186.219,00
(3)	5.018,18	11.965,90	86.337,90
(4)	7.527,27	15.954,55	0,00

TABELA 6 – RETORNO DE INVESTIMENTO

ARRANJO DA LINHA	ÍNDICE DE FALHA (%)	TEMPO DE RETORNO
Com cabo guarda	22,1	-----
1 PR p/ estrutura	11,0	11,808
2 PR p/ estrutura	5,1	13,142
3 PR p/ estrutura	0,0	14,951

A instalação de um pára-raios por estrutura melhora o desempenho da linha em 50%, a um tempo de retorno de investimento de 11,8 anos. Redução no tempo de retorno do investimento pode ser conseguida aumentando-se o número de equipes para a instalação do pára-raios. Por exemplo, ao considerarmos 8 equipes ao invés das 5 previamente consideradas, o tempo de retorno é reduzido para 7,015 anos; 7,931 anos; e 8,882 anos; para um, dois ou três pára-raios, respectivamente.

O aumento da impedância de aterramento aumenta o número de interrupções da linha, reduzindo o tempo de retorno do investimento. O tempo de retorno de investimento em função da impedância de aterramento, considerando a aplicação de um pára-raios por estrutura, pode ser visualizado na Tabela 7, considerando a utilização de 8 equipes de trabalho.

TABELA 7 - RETORNO DO INVESTIMENTO EM FUNÇÃO DO ATERRAMENTO

IMPEDÂNCIA (ohms)	ÍNDICE DE FALHA (%)		TAXA DE RETORNO
	CABO	PÁRA-RAIOS	
10	2,3	2,3	-----
30	11,3	5,5	28,832
50	22,1	11,0	7,015
100	48,3	24,3	2,439

Uma maior viabilidade técnico e econômica na utilização de pára-raios é obtida para maiores valores de impedância de aterramento. Para uma impedância de aterramento de 100 ohms, o tempo de retorno do investimento é inferior a 2,5 anos.

7.0 CONCLUSÃO

- A comprovação prática da melhoria de desempenho de linhas de transmissão através da aplicação de pára-raios de linha, demonstra a eficiência e a confiabilidade deste método de proteção.
- A utilização de pára-raios em linhas novas em substituição aos cabos guarda permite a redução do peso e da altura da estrutura.
- A definição quanto a quantidade e localização dos pára-raios requer uma análise técnica específica da linha, incluindo simulações computacionais. Uma avaliação econômica deve ser realizada, de modo a permitir ao usuário analisar qual a opção que melhor viabilize a sua instalação, bem como o retorno econômico do investimento.
- Em regiões apresentando solos de elevada resistividade, a solução mais viável pode ser a aplicação de pára-raios em conjunto com a melhoria da impedância de aterramento / instalação de contra-pesos.