
Aplicação de pára-raios na proteção de redes e linhas de transmissão

Aspectos a serem considerados no estudo da incidência de descargas atmosféricas sobre redes e linhas de transmissão;

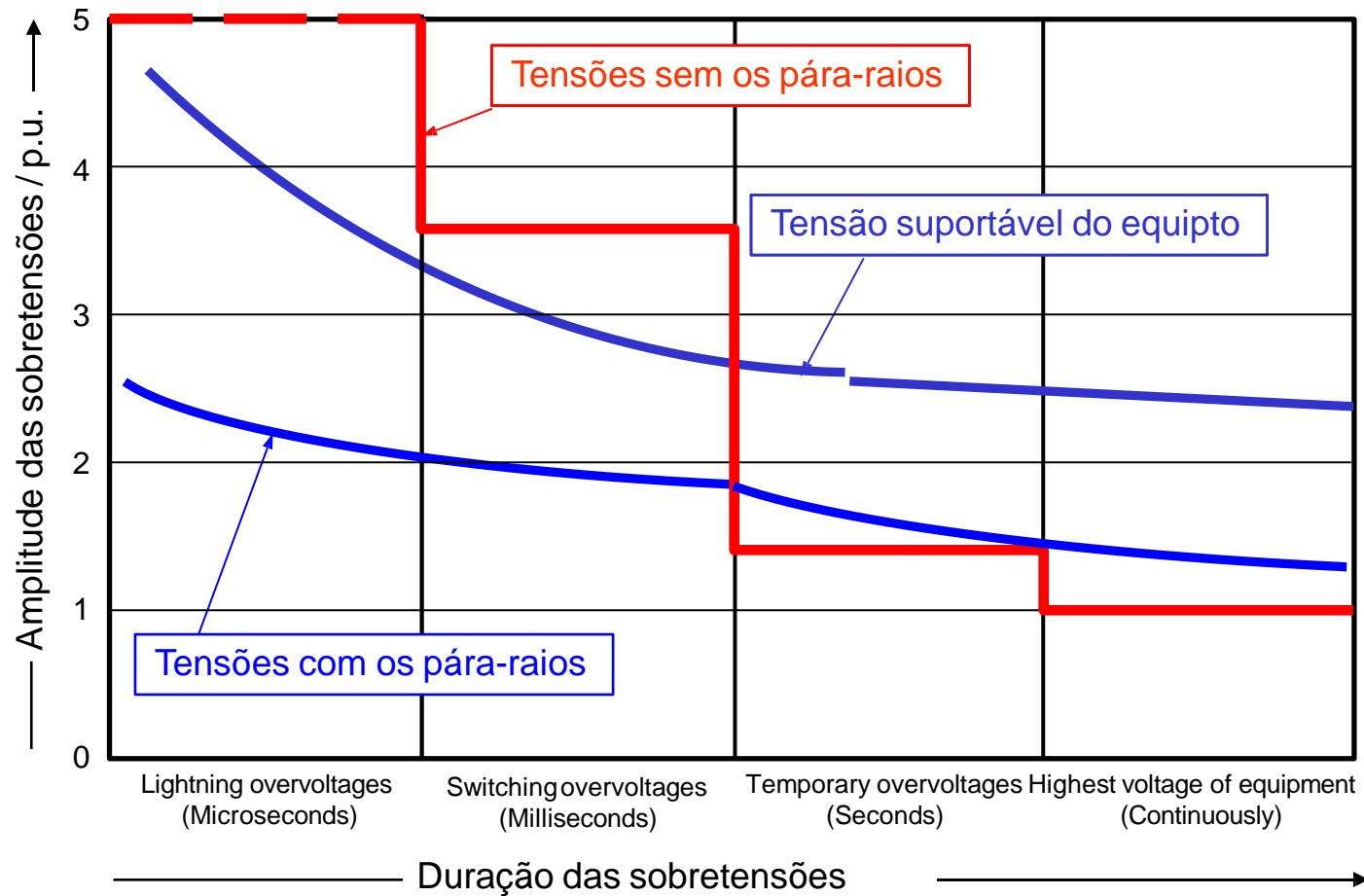
Estimativa do desempenho das redes e linhas de transmissão submetidas às descargas;

Métodos de melhoria do desempenho das redes e linhas de transmissão;

Aplicação de pára-raios de linha;

Metodologia para a estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas

Função dos pára-raios nos Sistemas elétricos



Descargas atmosféricas e seus efeitos sobre as linhas de transmissão



Fonte: Descargas em LT's – CFE - IEEE Acapulco 2004

Descargas atmosféricas entre nuvens



Descargas atmosféricas descendentes (nuvem-terra)



Descargas atmosféricas em redes de distribuição

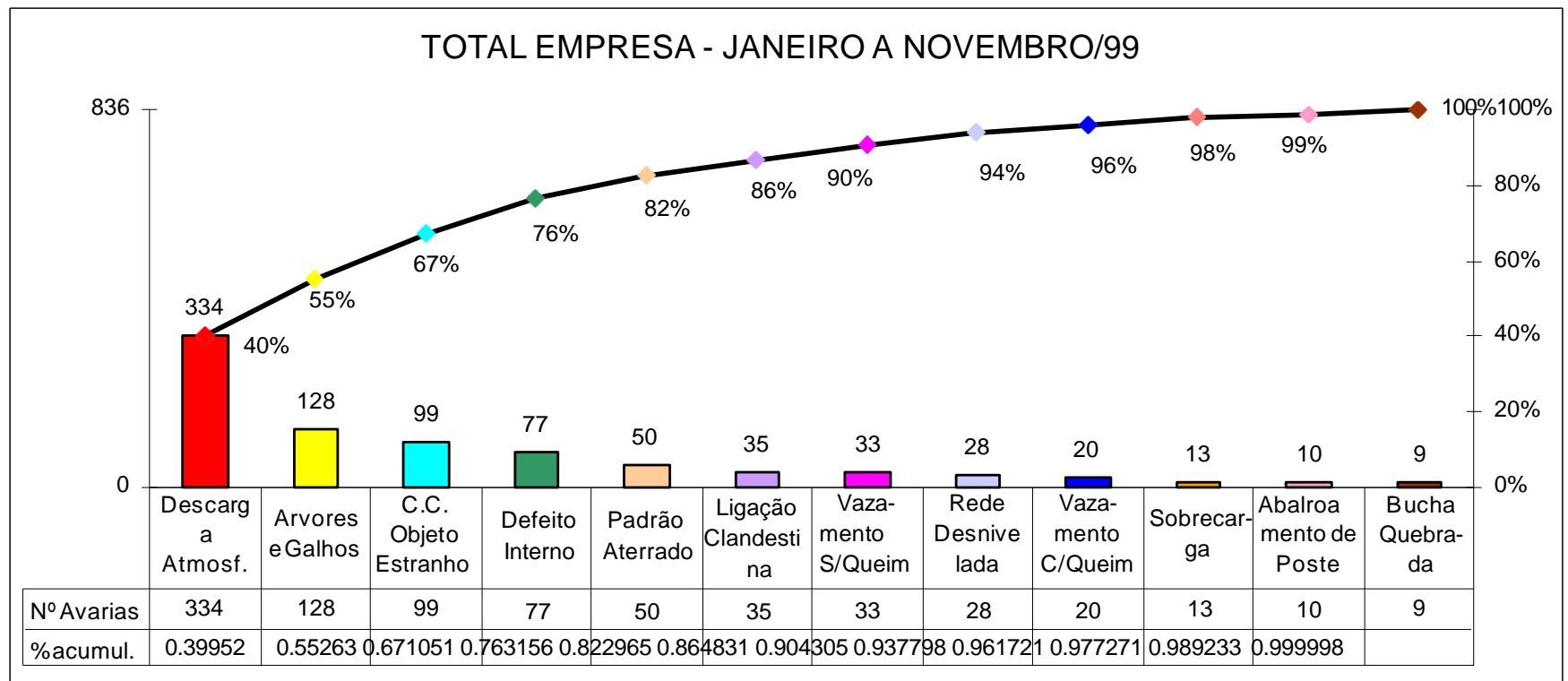
As “descargas atmosféricas” são bastante significativas nos **índices de desligamentos** não programados de redes de distribuição;

Elevado número de interrupções devido a descargas atmosféricas induzidas e diretas e grande quantidade de pára-raios danificados;

Índices de avarias de transformadores de distribuição (IAT) devido as sobretensões resultantes das descargas atmosféricas bastante elevados em algumas empresas;

Valores de **Tempo Médio de Atendimento** – TMA superiores a 4 (quatro) horas em algumas empresas.

Avaria de transformadores em redes de distribuição - Identificação das causas



Descargas atmosféricas em LT's



Fonte: Descargas em LT's – CFE - IEEE Acapulco 2004

Descargas atmosféricas em LT's

Responsáveis por cerca de 65% a 70% dos desligamentos não programados que ocorrem em LT's com $V_n \leq 230$ kV

Brasil	50 - 70 %
Estados Unidos	57%
Japão	70 - 80 %
Dinamarca	57 %
Colômbia	47 - 69 %
México	50 - 60 %

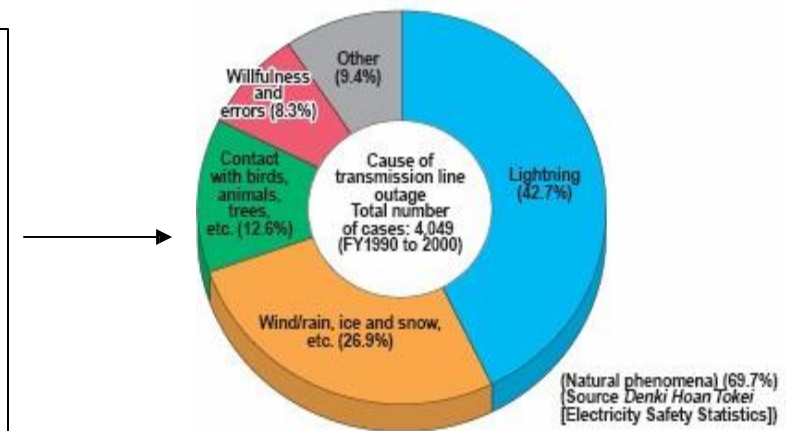


Fig.1 Causes of faults in power transmission

Descargas atmosféricas em LT's

⇒ Possibilidade de perda de grandes blocos de carga pelas empresas concessionárias de energia.

Possibilidade de interrupções nos processos de consumidores industriais.

Desligamentos de LT's vitais podem ocasionar distúrbios em toda a rede de uma região.

Pára-raios para linhas de transmissão

Reduzir o índice de desligamentos não programados transitórios e permanentes

Aspectos a serem considerados
no estudo da incidência de
descargas atmosféricas sobre
redes e linhas de transmissão

Descargas incidindo sobre linhas de transmissão

Índice de incidências atmosféricas para a área atravessada pela linha:

Densidade de descargas a terra: descargas / km² - ano
Nível ceráunico: número de dias de trovoada / ano

Largura da faixa de Exposição da linha;



Número estimado de descargas / (100 km .ano)

Descargas incidindo sobre linhas de transmissão

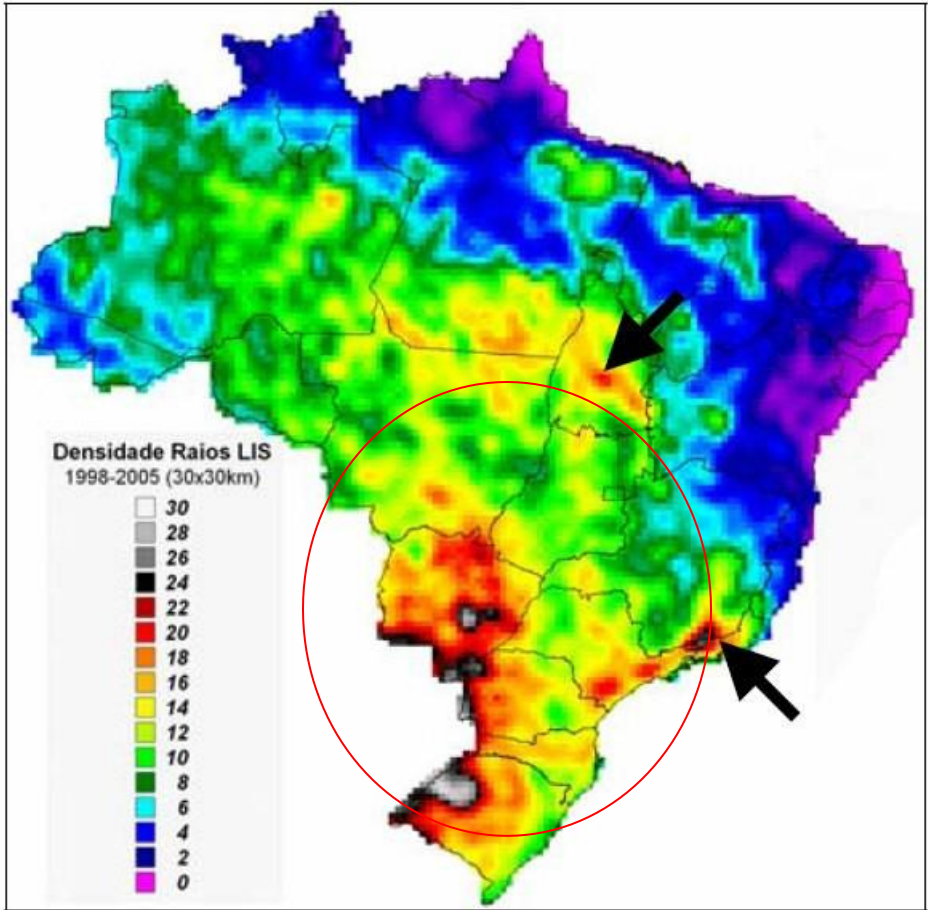
Para uma linha de transmissão localizada em uma região onde a densidade de descargas médias à terra por km² por ano é N_g e apresentando uma área de atração equivalente A (m²), o número médio de descargas diretas N_d coletadas por esta linha por 100 km por ano é:

$$N_d = N_g \cdot A \cdot 10^{-3} \cdot 100$$

- N_d Número esperado de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre uma linha de transmissão (descargas / (100 km . ano));
- N_g Densidade de descargas à terra (descargas / (km² . ano));
- A Área de atração equivalente (m²).

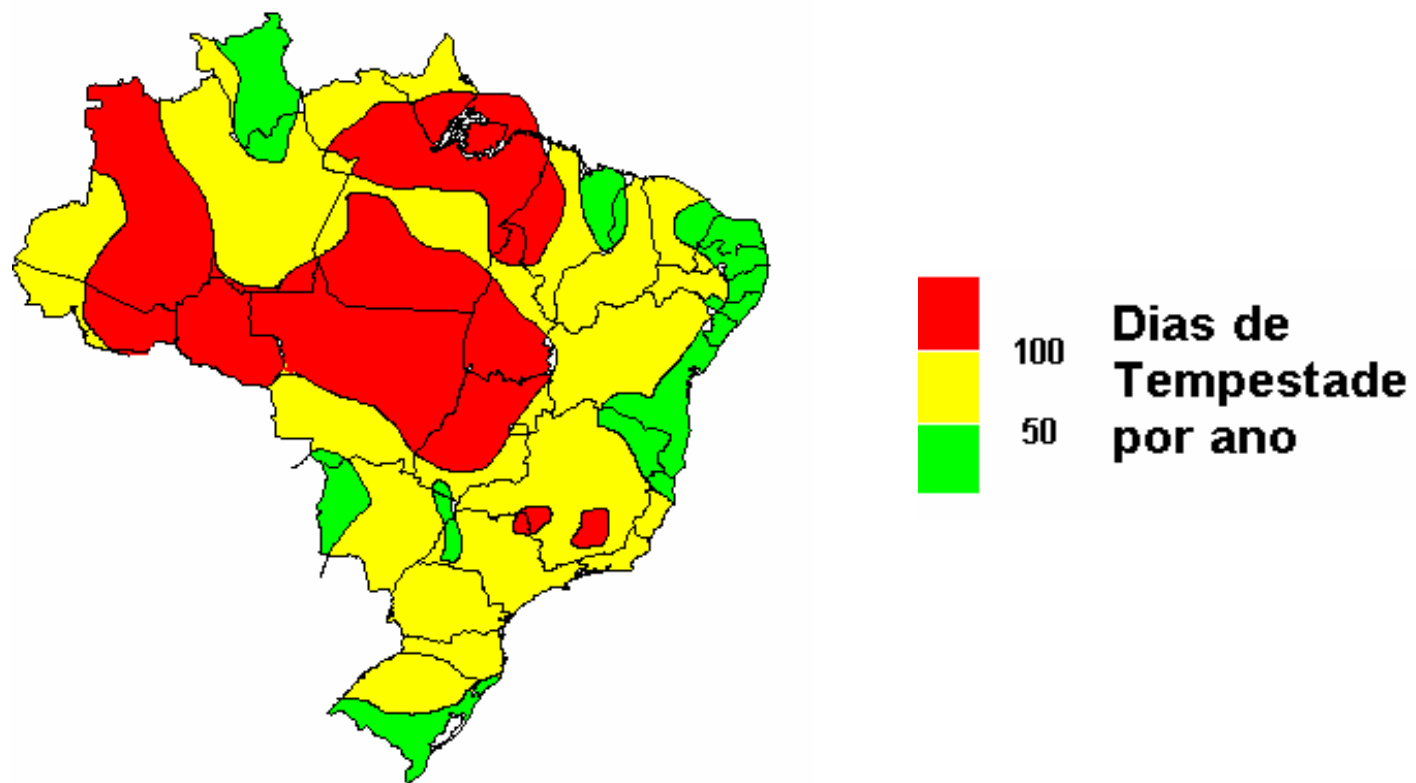
Descargas atmosféricas

Densidade de descargas a terra no Brasil

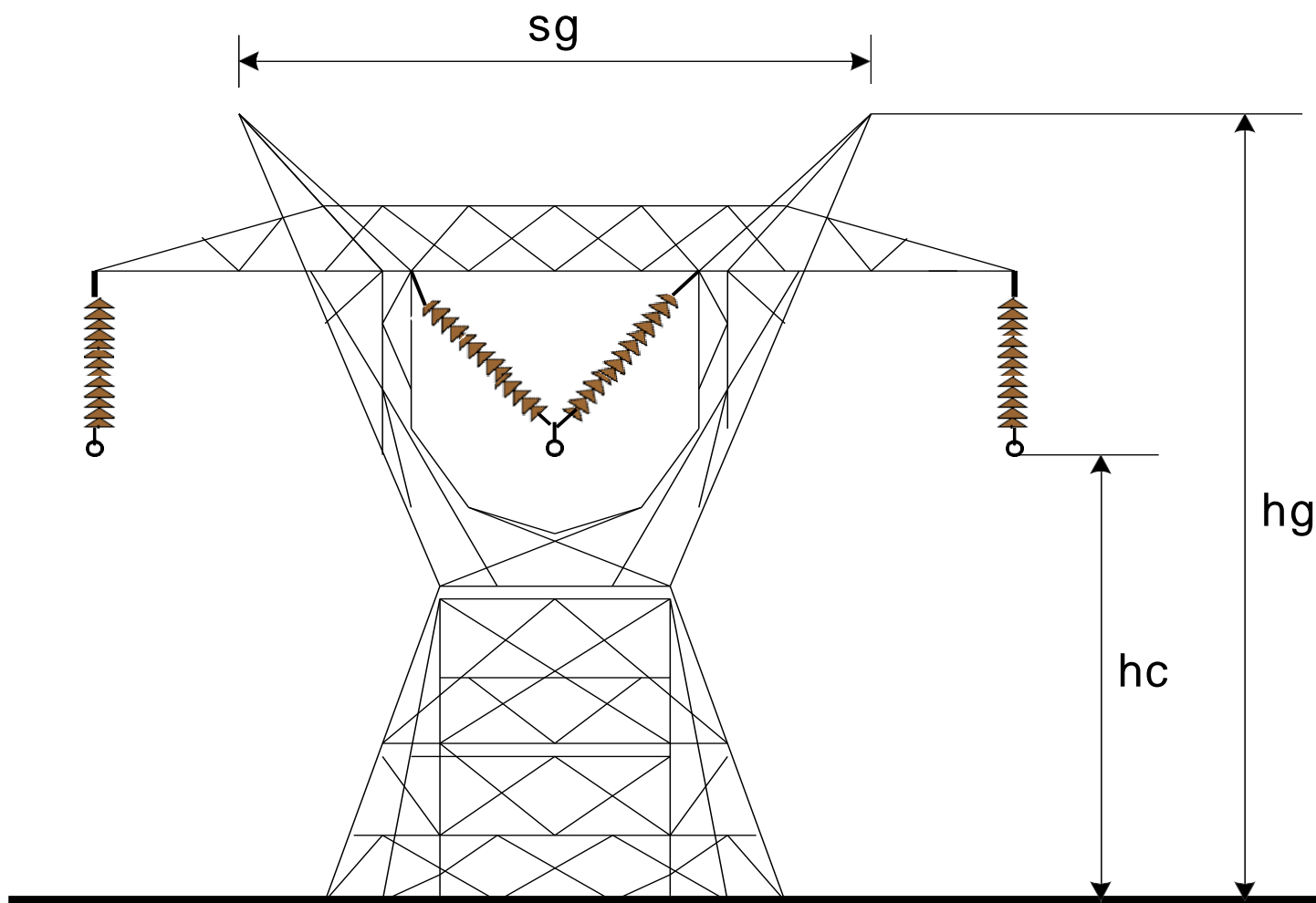


Descargas atmosféricas

Nível ceráunico – Mapa isoceráunico - Brasil



Largura da faixa de exposição



Raio de atração equivalente

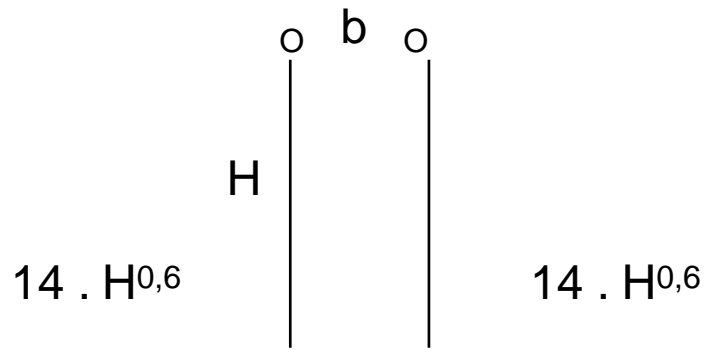
Vários trabalhos abordam diferentes procedimentos para a determinação do raio de atração equivalente médio. A expressão proposta por Eriksson tem sido bastante utilizada em estudos de desempenho de linhas de transmissão foi proposta por Eriksson.

$$R_a = 0,84 \cdot H^{0,6} \cdot I^{0,74}$$

- R_a Raio de atração equivalente (m);
- H Altura da estrutura (m);
- I Amplitude da corrente de descarga (kA).

$$\text{Para } I = 45 \text{ kA} \rightarrow R_a = 14 \cdot H^{0,6}$$

Largura da faixa de exposição



$$A = (2 \cdot R_a + b)$$

$$A = 28 \cdot H^{0,6} + b$$

- N_s Largura da faixa de exposição da linha (m)
- h Altura média do condutor mais alto ou do cabo pára-raios, em caso de sua existência (m).
- b Espaçamento horizontal entre cabos pára-raios ou cabos condutores, em metros. Se a linha tem somente um cabo pára-raios - $b = 0$
- R_a Raio de atração equivalente (m);

Largura da faixa de exposição

Altura média equivalente do condutor:

⇒ Perfil plano: $h = h_g - \frac{2}{3} \cdot (h_g - h_{gw})$

⇒ Perfil ondulado: $h = h_g$

⇒ Perfil montanhoso: $h = 2 \cdot h_g$

h_g Altura do cabo pára-raios ou do condutor mais elevado na torre / estrutura

h_{gw} Atura mínima do cabo pára-raios ou do condutor mais elevado no meio do vão

Número estimado de descargas diretas que incidem sobre uma Linha de Transmissão

$$N_d = N_g \cdot A \cdot 10^{-3} \cdot 100 \qquad N_d = N_g \cdot (2 \cdot R_a + b) \cdot 10^{-1}$$

$$N_d = N_g \cdot (28 \cdot H^{0,6} + b) \cdot 10^{-1}$$

- N_d Número esperado de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre uma linha de transmissão (descargas / (100 km . ano));
- N_g Densidade de descargas à terra (descargas / (km² . ano));
- A Área de atração equivalente (m²).

Descargas que incidem sobre uma rede de distribuição

A incidência de descargas atmosféricas diretas sobre redes de distribuição é mais comum em redes de distribuição rurais.

Em redes urbanas, ou redes nas proximidades de linhas de transmissão, a probabilidade da incidência de descargas diretas é pequena, devido às elevadas estruturas que servem como ponto de captação das descargas.

Descargas que incidem sobre uma rede de distribuição / linha de transmissão

$$N_{\text{drd}} = N_{\text{d}} (1 - S_{\text{f}})$$

N_{drd}	Número de descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre a linha de transmissão (descargas / 100 km . ano).
N_{d}	Número de descargas atmosféricas que incidiriam sobre a linha não havendo a presença de objetos próximos a linha
S_{f}	Fator de blindagem

$$S_{\text{f}} = 0 \rightarrow N_{\text{drd}} = N_{\text{d}}$$

Descargas que incidem sobre uma linha de transmissão - Modelo Eletrogeométrico

$$R_c = 10 \cdot I^{0,65} \dots\dots\dots$$

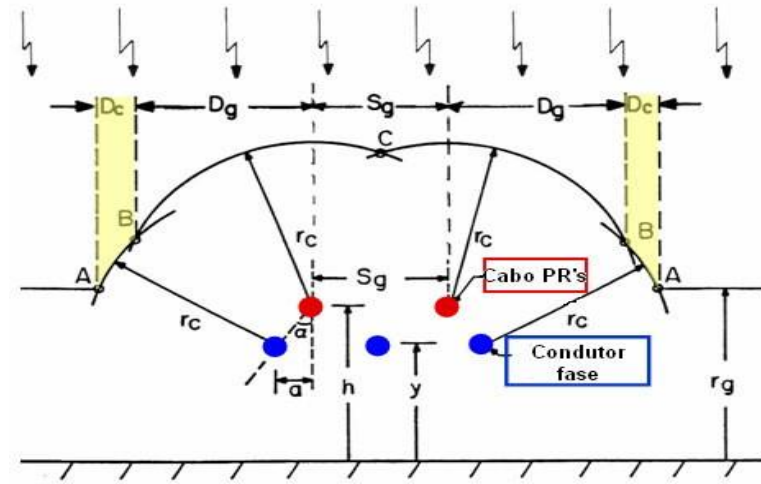
$$r_g = [3.6 + 1.7 \ln(43 - y_c)] I^{0.65}$$

$$r_g = 5.5 I^{0.65}$$

$$R_g = 0,9 \cdot R_c$$

$$y_c < 40 \text{ m}$$

$$y_c \geq 40 \text{ m}$$



R_c Distância de descarga para o condutor horizontal (metros).

R_g Distância de descarga para a terra (metros)

I Amplitude da corrente de descarga (kA)

Referência - IEEE Std 1410-1997

Estimativa do desempenho das
redes e linhas de transmissão
submetidas às descargas

Desempenho das Linhas de Transmissão frente às descargas atmosféricas diretas

- ⇒ Número de descargas diretas / (100 km . ano)
 - ⇒ Densidade de descargas a terra
 - ⇒ Largura da faixa de exposição da linha

- ⇒ Amplitude e taxa de crescimento da corrente de descarga
 - ⇒ Corrente crítica (I_c) para di/dt considerada;
 - ⇒ Determinação da probabilidade de desligamento da linha / rede para I_c e di/dt .

Número de interrupções na linha devido
às descargas atmosféricas

EFEITO DAS DESCARGAS SOBRE AS LT's E RD's



Fonte: Descargas em LT's – CFE - IEEE Acapulco 2004

Estudo do comportamento transitório de uma LT devido a incidência de uma descarga atmosférica

- ⇒ Aspectos relativos às características das correntes de descarga (valor de pico, duração de frente e taxa de crescimento da onda de corrente);
- ⇒ Aspectos relativos ao processo de conexão entre canal de descarga e os componentes da linha de transmissão;
- ⇒ Aspectos relacionados a resposta eletromagnética da linha de transmissão atingida pela descarga atmosférica.

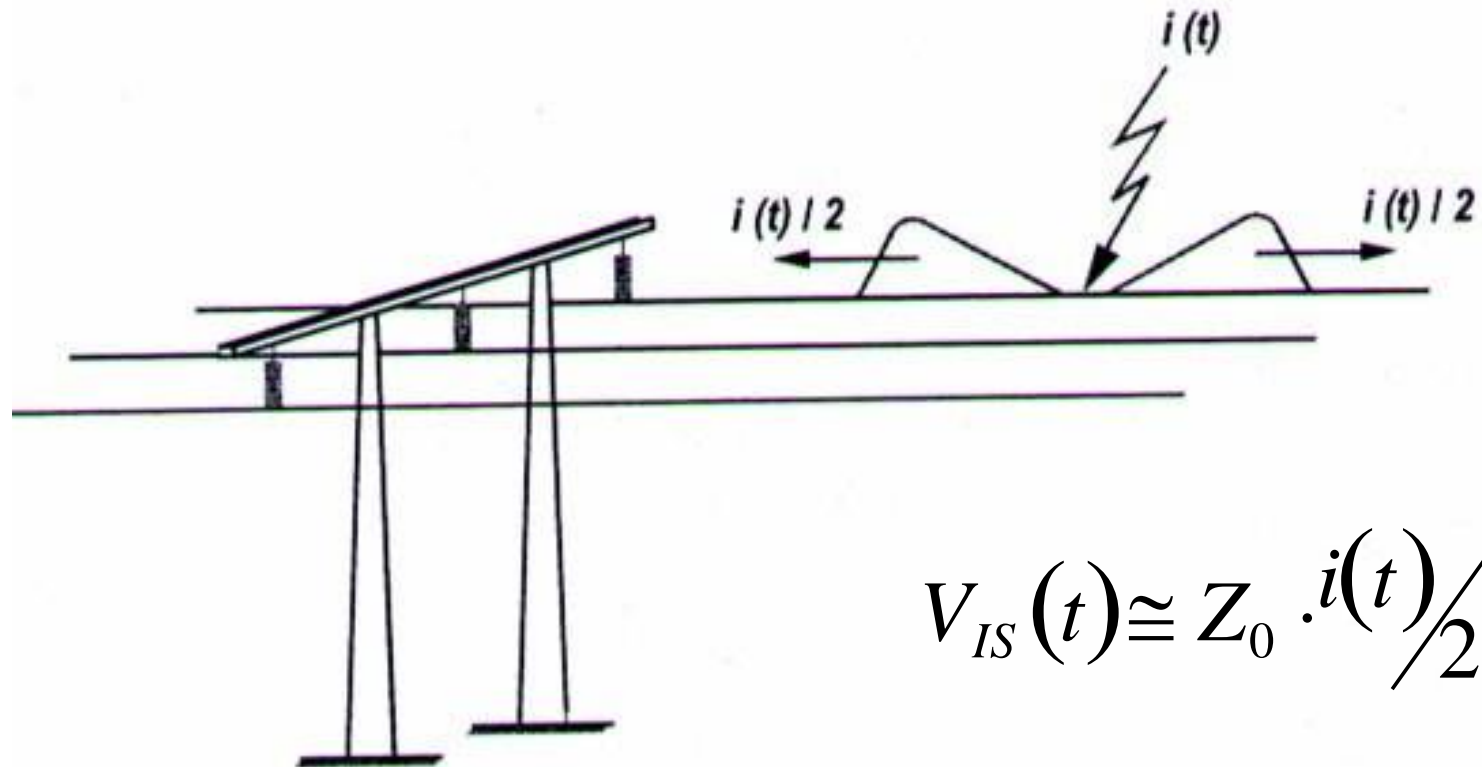
Principais aspectos envolvidos no estudo comportamento transitório de uma LT

- ⇒ Ponto de incidência da descarga: topo da torre ou cabos pára-raios (linhas blindadas); condutores de fase (linhas não blindadas, falha de blindagem);
- ⇒ Características das correntes de descarga;
- ⇒ Impedância equivalente dos cabos pára-raios;
- ⇒ O acoplamento eletromagnético entre os cabos pára-raios e os condutores fase;
- ⇒ A resposta transitória da torre;
- ⇒ O efeito das torres adjacentes;
- ⇒ A resposta transitória do sistema de aterramento;
- ⇒ Modelo de interrupção da isolação considerado;

Principais aspectos envolvidos no estudo comportamento transitório de uma LT

- ⇒ As linhas de transmissão podem apresentar diferentes configurações para as torres, condutores aéreos e sistema de aterramento.
- ⇒ Diferentes configurações para estes componentes estabelecem diferentes respostas transitórias quando da ocorrência de solicitações atmosféricas.

Linhas sem cabos pára-raios



$$V_{IS}(t) \cong Z_0 \cdot i(t) / 2$$

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \ln \frac{2h}{Rc}}$$

Linhas sem cabos pára-raios

As descargas atmosféricas ao incidirem diretamente os condutores fase produzem ondas incidentes de corrente que se propagam na linha em ambos os sentidos gerando tensões incidentes com amplitudes de:

$$V_i(t) = Z_0 \cdot i(t) / 2$$

Z_0 Impedância de surto dos condutores(Ω)
 $i(t)$ Amplitude da corrente de descarga (kA)

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \ln \frac{2h}{Rc}}$$

Linhas sem cabos pára-raios

Considerando a isolação da linha, a máxima corrente (corrente disruptiva) que poderá incidir sobre a isolação sem a ocorrência de uma descarga externa “*flashover*” é dada por:

$$I_{\text{disr}} = 2 \cdot U_{\text{disr}}(t) / Z_0$$

$U_{\text{disr}}(t)$ Tensão que provoca a disrupção da isolação no tempo t .

Linhas sem cabos pára-raios

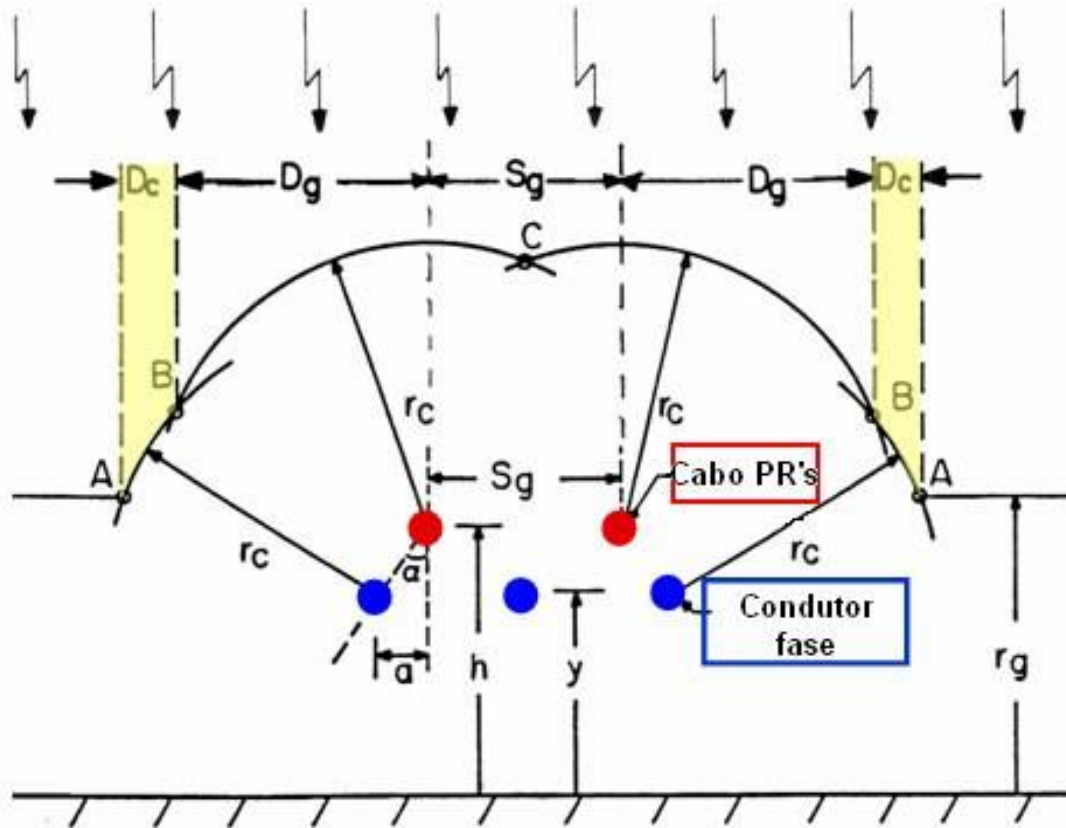
- ⇒ Praticamente todas as descargas incidindo diretamente sobre linhas não providas de cabos pára-raios produzem descargas disruptivas de impulso “*flashover*” na isolação.
- ⇒ A probabilidade de desligamento da linha, devido a passagem da corrente de curto-circuito, pode ser estimada por:

$$N_{desl} = N_d \cdot P_{disrup} \cdot P_{arco}$$

Linhas com cabos pára-raios

- ⇒ A maioria das descargas atmosféricas ao incidirem sobre linhas de transmissão / redes de distribuição protegidas por cabos pára-raios adequadamente posicionados, irão incidir sobre esses ou sobre a estrutura.
- ⇒ De uma maneira geral, o sistema é considerado adequadamente protegido pelos cabos pára-raios quando o ângulo de blindagem entre o(s) cabo(s) pára-raios e os condutores fase é inferior a 30° .

Linhas com cabos pára-raios



$$r_g = [3.6 + 1.7 \ln(43 - y_c)] I^{0.65} \quad y_c < 40 \text{ m}$$

$$r_g = 5.5 I^{0.65} \quad y_c \geq 40 \text{ m}$$

Modelo eletrogeométrico CIGRÉ

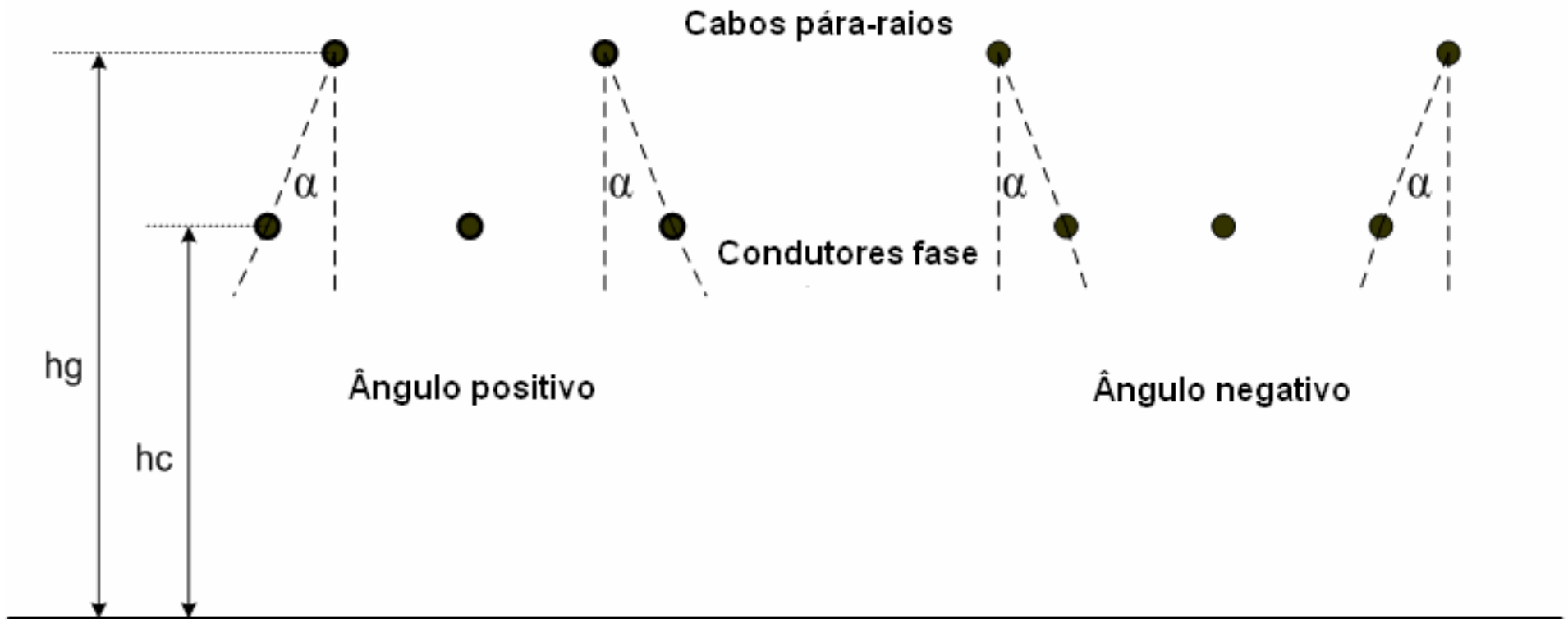
$$I_m \approx \left[\frac{\frac{h+y}{2}}{7.1 \cdot (1 - \sin \alpha)} \right]^{\frac{1}{0.75}}$$

I_m é a máxima corrente a partir do qual nenhuma descarga irá incidir diretamente sobre os condutores fase.

α = ângulo de blindagem

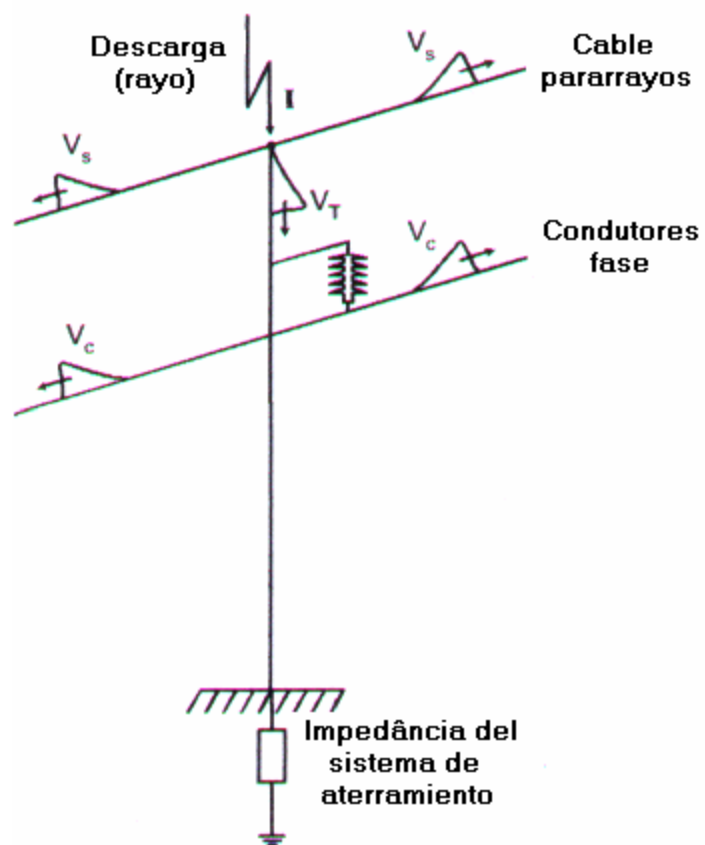
Descargas entre A e B € descarga atingem o condutor fase
 Descargas entre B e C € descarga atingem os cabos pára-raios
 Descargas além de A € descargas atingem a terra

Linhas com cabos pára-raios



Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre as estruturas



Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre as estruturas

- ⇒ As descargas atmosféricas ao incidirem sobre as estruturas ou sobre os cabos pára-raios elevam a tensão da estrutura acima do potencial de terra.
- ⇒ No mesmo instante, tensões induzidas aparecem sobre os condutores fase, resultantes do acoplamento capacitivo entre esses condutores e o(s) cabo(s) pára-raios.

Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre as estruturas

As tensões induzidas que se estabelecem nos condutores fase podem ser estimadas, de forma simplificada, pela expressão abaixo:

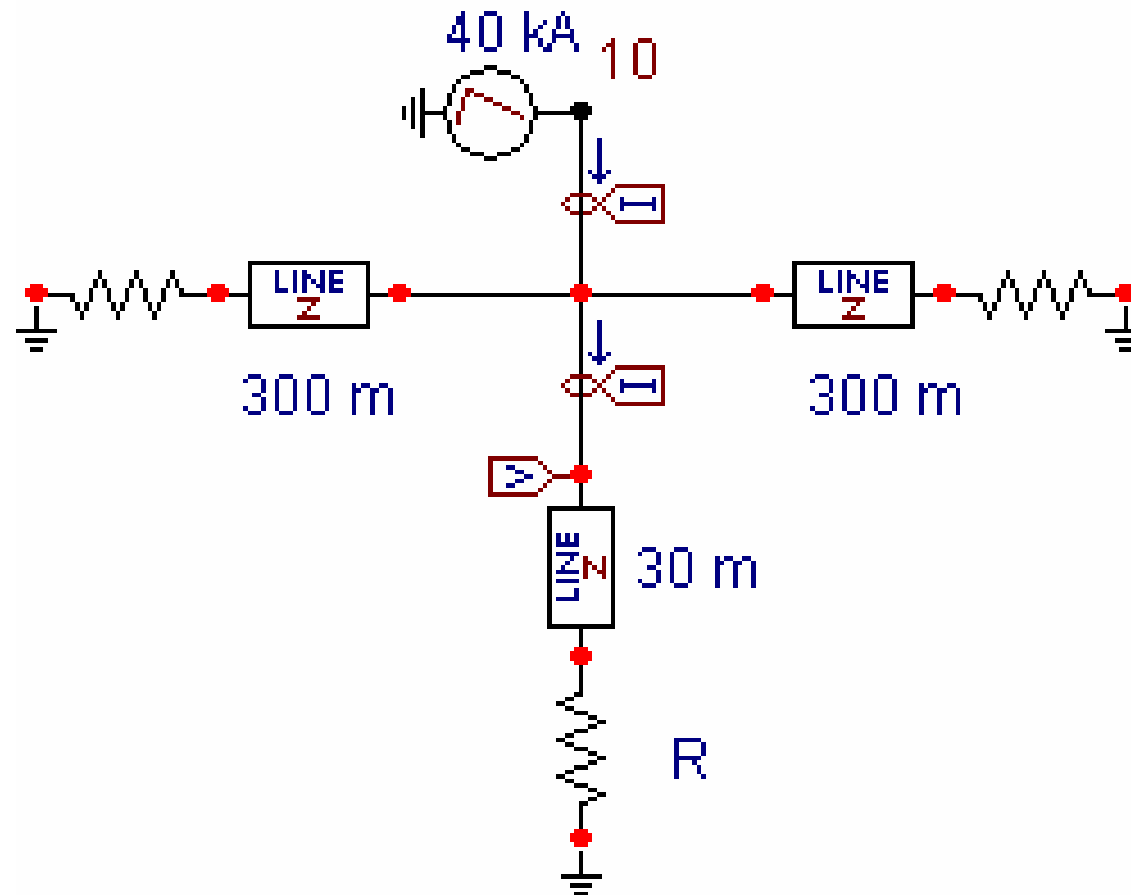
$$V_{\text{ind}}(t) = K \cdot V_T(t)$$

$V_{\text{ind}}(t)$ Tensão induzida sobre os condutores fase.

K Fator de acoplamento capacitivo

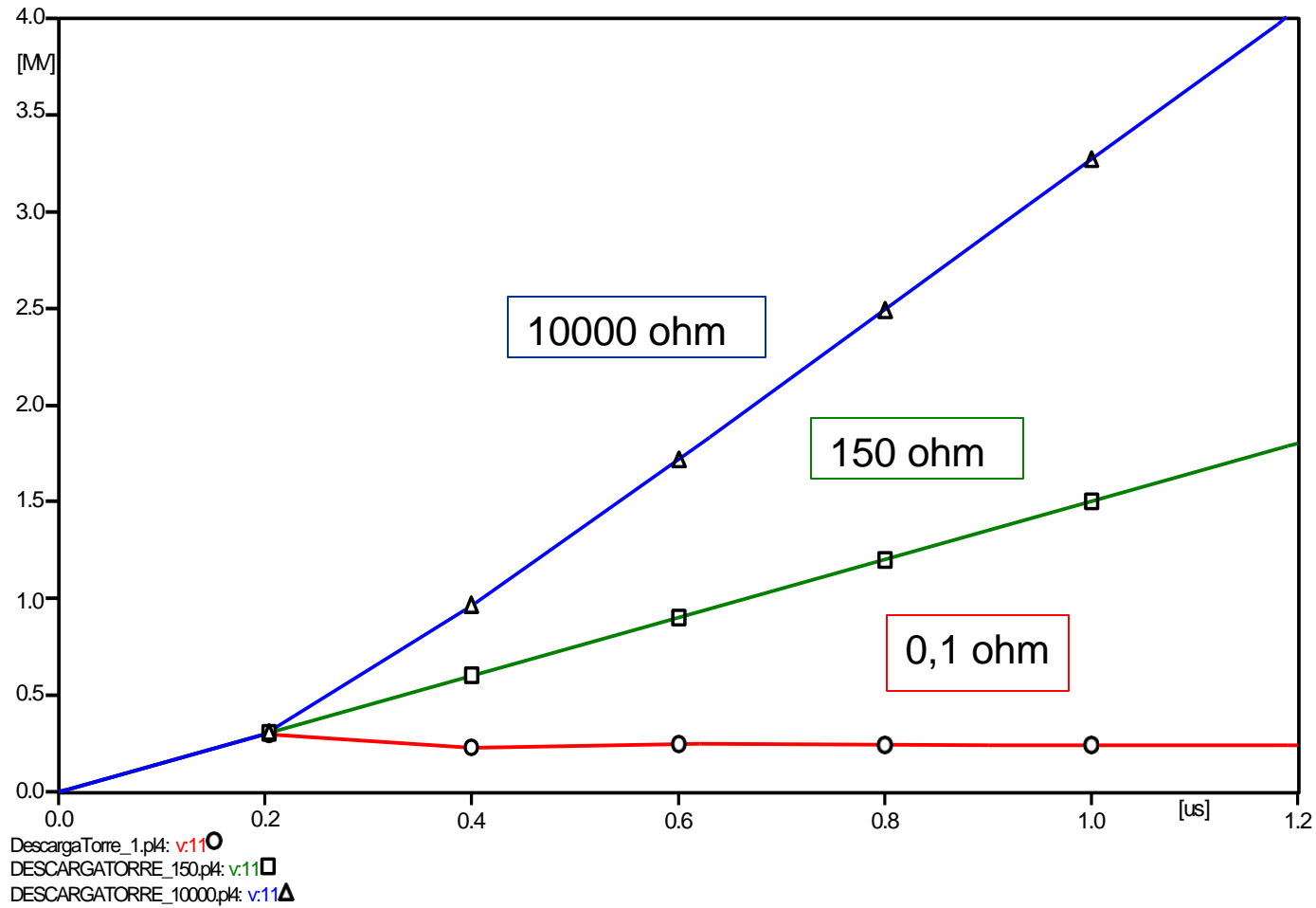
Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre as estruturas

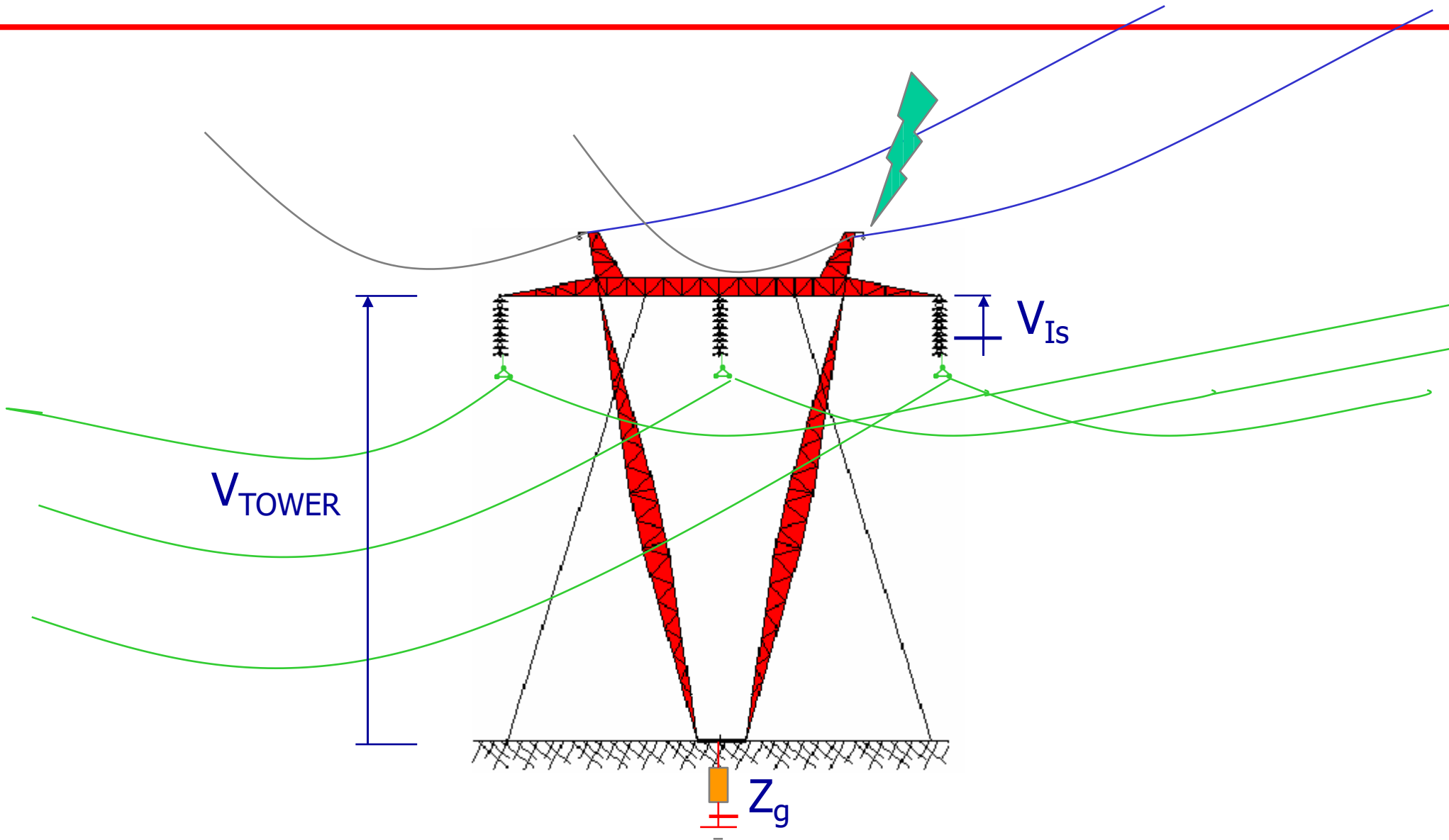


Linhas com cabos pára-raios

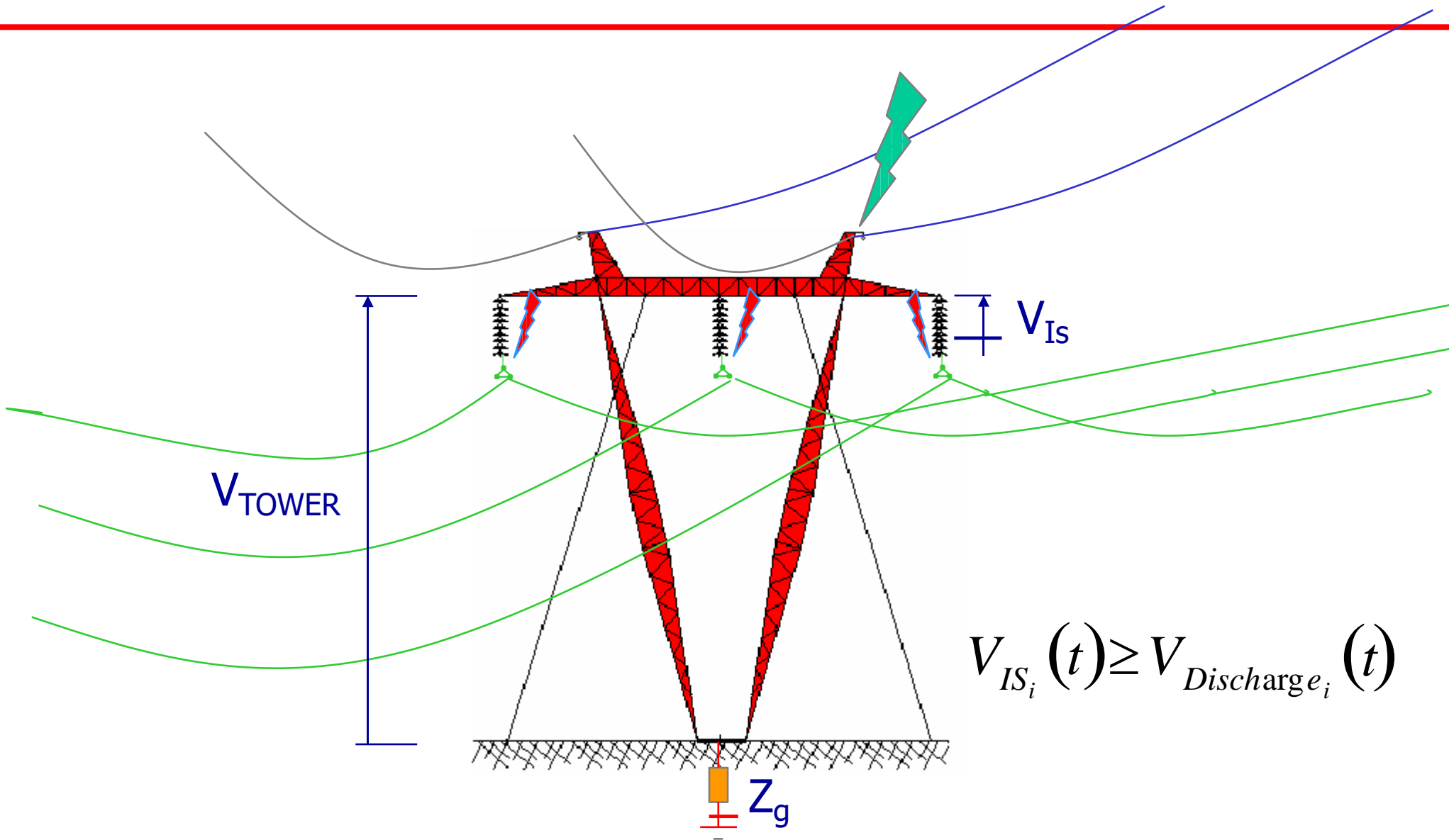
Incidência da descarga sobre as estruturas



Linhas com cabos pára-raios



Linhas com cabos pára-raios



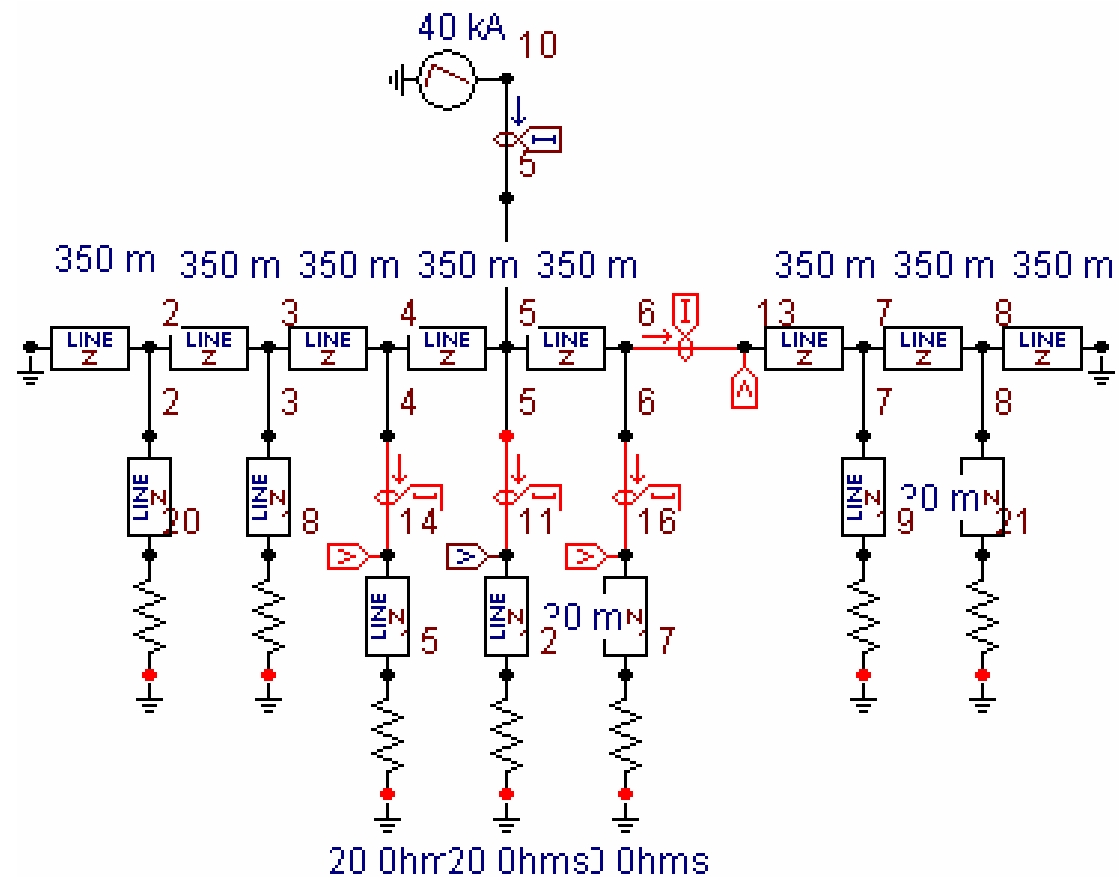
EFEITO DAS DESCARGAS SOBRE AS LT's E RD's



Fonte: Descargas em LT's – CFE - IEEE Acapulco 2004

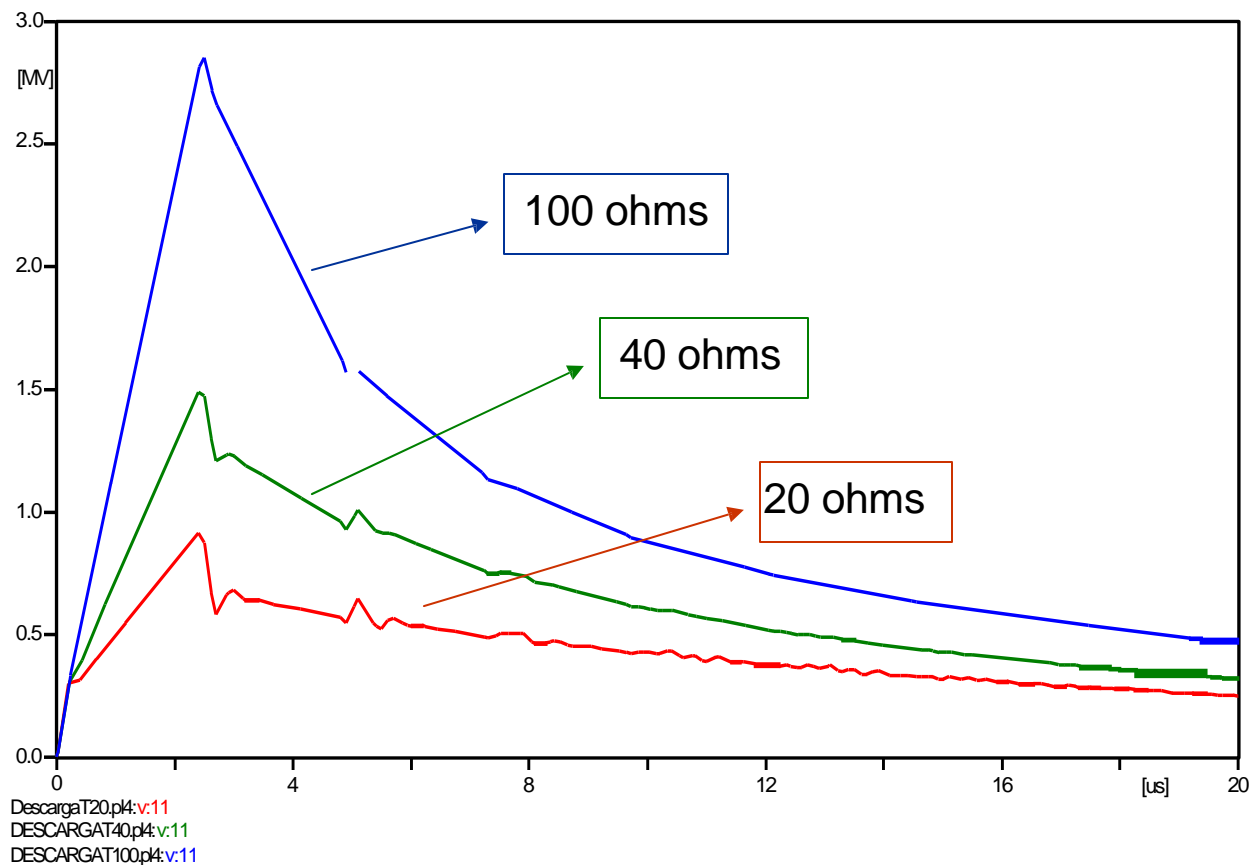
Linhas com cabos pára-raios

Efeito da impedância de aterramento



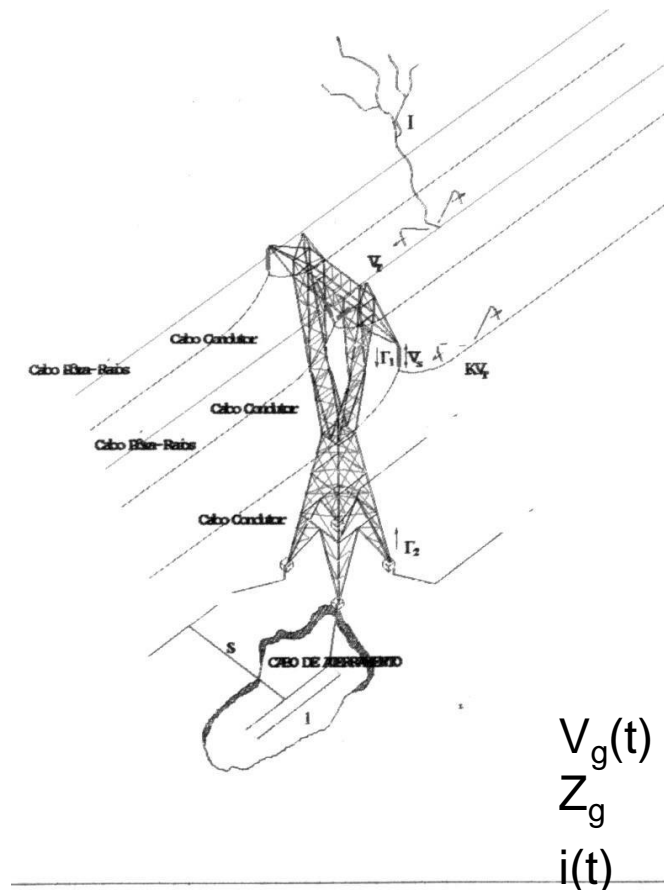
Linhas com cabos pára-raios

Efeito da impedância de aterramento



Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre o cabo pára-raios



Em caso de incidência das descargas atmosféricas sobre os cabos pára-raios, a corrente de descarga se divide e se propaga ao longo desses, gerando uma tensão incidente dada por:

$$V_g(t) = Z_g \cdot i(t) / 2$$

Tensão que se propaga pelos cabos pára-raios (kV).
Impedância de surto do cabo pára-raios, em ohms
Amplitude da corrente de descarga (kA)

Linhas com cabos pára-raios

Incidência da descarga sobre o cabo pára-raios

⇒ Assumindo que não ocorra falha da isolação no meio do vão, a tensão V_s se propaga pelos cabos pára-raios em direção às estruturas mais próximas, alcançando a estrutura em um tempo τ_1 . Desprezando os efeitos de atenuação e distorção, **a tensão no topo da estrutura atingida**, a partir do instante τ_1 até a ocorrência da próxima reflexão (tempo $\tau + \tau_1$), pode ser

$$V_T(\tau_1 \leq t \leq \tau_1 + \tau) = \left(\frac{2 \cdot Z_0 \cdot R}{2 \cdot Z_0 \cdot R + Z_0^2} \right) \cdot Z_0 \cdot \left(\frac{A(t - \tau_1)}{2} \right)$$

R – raio equivalente do condutor

Sobretensões induzidas



Fonte: Descargas em LT's – CFE - IEEE Acapulco 2004

Sobretensões induzidas

- ⇒ Descargas atmosféricas ao incidirem próximas as redes elétricas aéreas, produzem tensões induzidas, cujas amplitudes dependem principalmente da intensidade da corrente de descarga, da altura da linha e da distância do ponto de incidência da descarga em relação a linha.
- ⇒ Se os valores de tensão induzida excedem a tensão de descarga das cadeias de isoladores, ocorre a descarga externa pelas cadeias seguida da passagem da corrente de curto-circuito.

Sobretensões induzidas

O cálculo das tensões induzidas envolve:

- A modelagem da corrente de descarga;
- O cálculo do campo eletromagnético resultante junto aos condutores da linha, a partir do modelo da corrente de descarga;
- A modelagem do acoplamento entre o campo eletromagnético e os condutores da linha;
- A solução das equações que definem esse acoplamento.

Sobretensões induzidas

$$V_{\max} = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot h}{y} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v}{v_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0,5 \cdot \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right)$$

- V_{ind} Amplitude da tensão induzida sobre a rede / LT (kV_{cr});
 I_0 Amplitude da corrente de descarga (kA);
 Z_0 Impedância do canal de ar condutor do arco ($\approx 30 \Omega$);
 h Altura dos condutores da rede ou linha em relação ao solo (m)
 Y Distância perpendicular entre o ponto de incidência da descarga no solo com o eixo da rede ou linhas aéreas (m);
 β Relação entre a velocidade da corrente de retorno e a velocidade da luz no vácuo $\rightarrow v = \beta \cdot v_0$

Sobretensões induzidas

Fatores que influenciam na amplitude e forma de onda da tensão induzida:

- ⇒ Características da descarga:
 - Amplitude da corrente de descarga
 - Forma de onda da corrente de descarga
 - Taxa de crescimento
 - Polaridade
 - velocidade da descarga
- ⇒ Distância da descarga a linha
- ⇒ Configuração da linha:
 - Altura da linha
 - Disposição dos condutores
 - Presença de condutores aterrados

Número de descargas indiretas sobre uma rede de distribuição produzindo desligamentos

$$N_{di} = 0,19 \cdot [3,5 + 2,5 \cdot \log_{10}(30 \cdot (1-c) / U)]^{3,75} \cdot DDT \cdot h$$

- N_{di} Número esperado de descargas indiretas sobre a rede de distribuição produzindo sobretensões induzidas com amplitudes maiores do que um dado valor U (em kV) (descargas / 100 km - ano).
- DDT Densidade de descargas a terra da região (descargas/km²/ano)
- c Fator de acoplamento entre o cabo de terra e o condutor fase

Desempenho das LT's frente às descargas atmosféricas

- ⇒ Linhas sem cabos pára-raios
A maioria das descargas atmosféricas que incidem sobre LT's **sem cabos pára-raios** produzem descargas disruptivas externas "*flashover*" ao longo das cadeias de isoladores.
- ⇒ Linhas com cabos pára-raios
Possibilidade de ocorrência da descarga de retorno "*backflashover*" nas cadeias de isoladores. O desempenho das LT's é fortemente dependente da impedância de aterramento.
- ⇒ Falha de blindagem
Ocorrência de descargas disruptivas externas como no caso de descargas em linhas sem cabos pára-raios
- ⇒ Sobretensões induzidas
Críticas para sistemas com tensão nominal até 45 kV

Métodos de melhoria do desempenho das redes e linhas de transmissão

Melhoria de desempenho das LT's

- ⇒ Aumento de isolamento das linhas
Aumento da distância de arco a seco das cadeias de isoladores ou aumento da isolação.
- ⇒ Melhoria do sistema de aterramento
Redução nos índices de desligamento de LT's com cabos pára-raios.
- ⇒ Instalação de cabos pára-raios / melhoria do ângulo de blindagem
Reduz a incidência de descargas diretas
Eleva a altura do condutor em relação ao solo
- ⇒ Instalação de pára-raios de linha

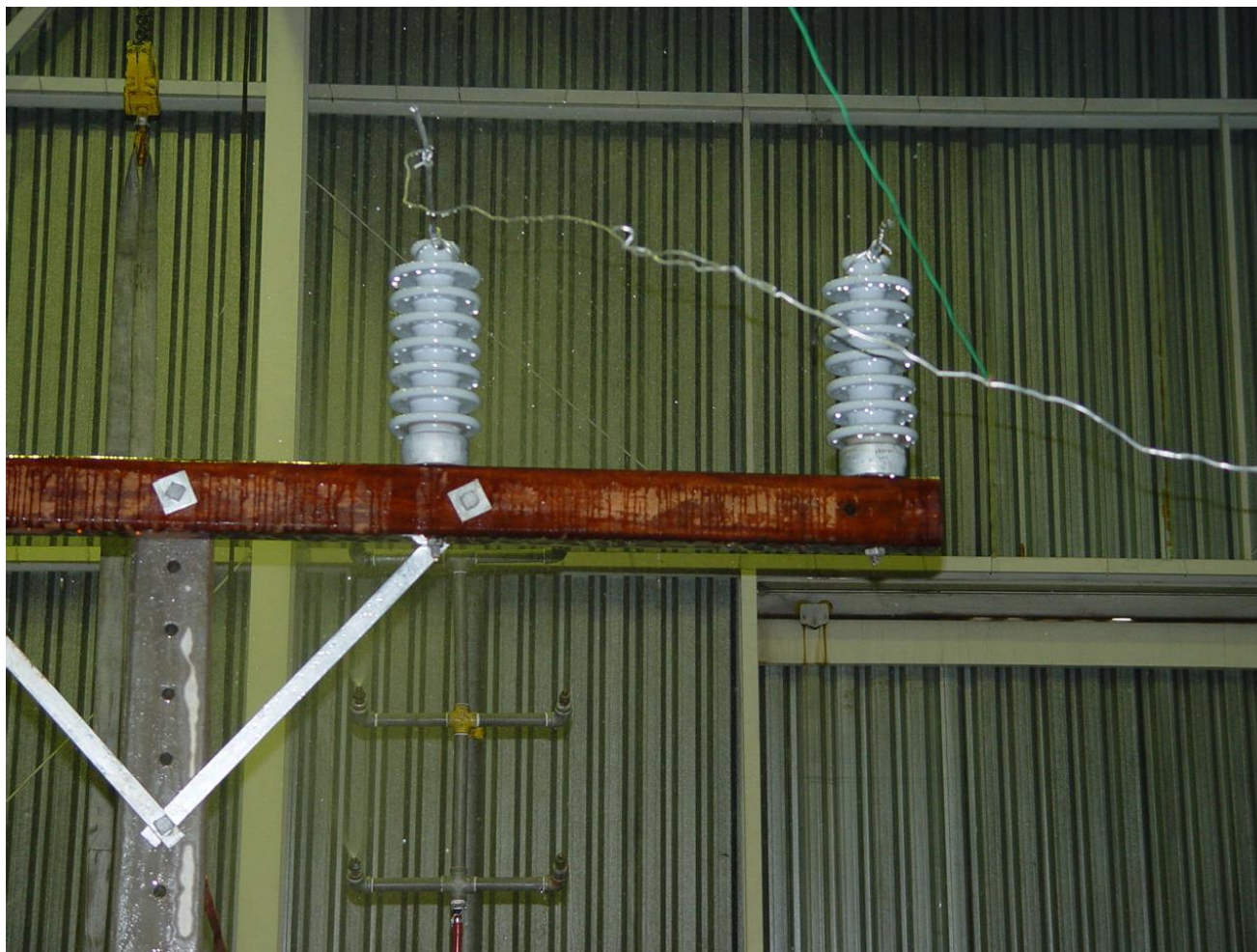
Aumento da isolação das linhas/ redes

- ⇒ Aumento da distância de arco a seco das cadeias de isoladores em linhas de transmissão;
- ⇒ Em redes de distribuição, além do aumento da distância de arco a seco dos isoladores é possível aumentar o isolamento fazendo uso da isolação de partes da estrutura;
- ⇒ Método adequado para redução das falhas em redes e linhas de distribuição por tensões Induzidas;

Aumento da isolação das linhas/ redes



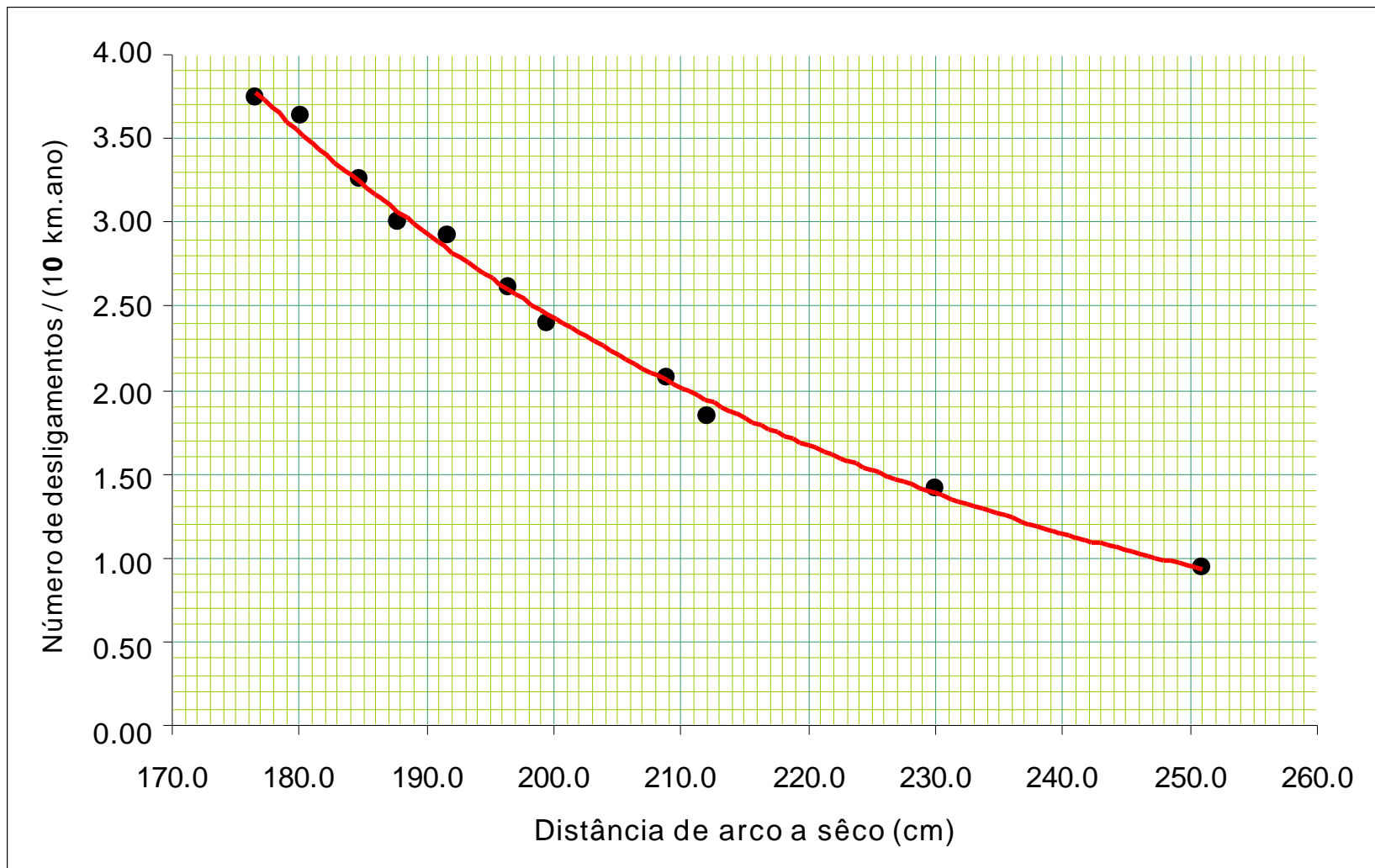
Aumento da isolação das linhas/ redes



Aumento da isolação das linhas/ redes



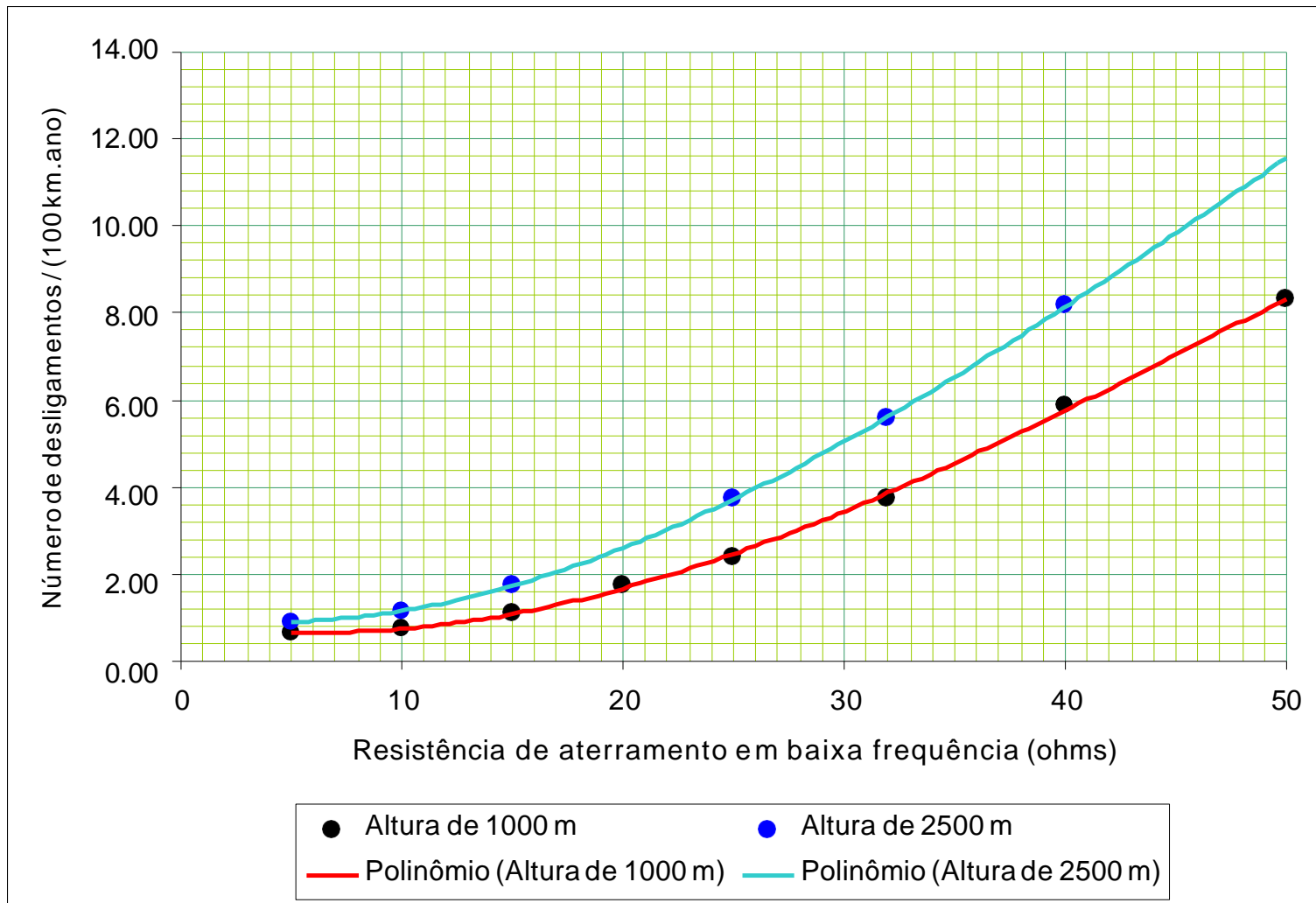
Aumento do isolamento das LT's



Melhoria do sistema de aterramento

- ⇒ A redução nos valores de impedância de aterramento acarreta em redução dos índices de desligamento de redes de distribuição e LT's providas de cabos pára-raios;
- ⇒ No caso das LT's, uma redução nos índices de desligamento pode ser obtida com o aumento do comprimento e de novas disposições de cabos contra -pesos nas bases das torres;
- ⇒ Em redes de distribuição, além de reduzir os índices de desligamentos, reduz o índice de queima de equipamentos instalados na rede.

Melhoria do sistema de aterramento



Instalação de cabos pára-raios e/ou melhoria do ângulo de blindagem oferecido pelos cabos pára-raios

- ⇒ A instalação de cabos pára-raios reduz a incidência de descargas diretas sobre os condutores;
- ⇒ Possibilidade da ocorrência de descargas disruptivas de retorno “*backflashover*” ou de descargas disruptivas na isolação “*flashover*”, em função das impedâncias de aterramento e falhas de blindagem, respectivamente;
- ⇒ Melhor êxito em projetos de linhas novas;
- ⇒ Difícil implementação em linhas antigas.

Instalação de cabos pára-raios e/ou melhoria do ângulo de blindagem oferecido pelos cabos pára-raios

A aplicação de cabos pára-raios para a proteção de descargas diretas é amplamente utilizado em projetos de linhas de transmissão;
Aplicação limitada em redes de distribuição.

Instalação de cabos pára-raios e/ou melhoria do ângulo de blindagem oferecido pelos cabos pára-raios

- ⇒ Normalmente as estruturas das redes têm de ser modificadas a fim de permitir a instalação do cabo pára-raios no topo do poste e manter um ângulo de blindagem mínimo adequado;
- ⇒ A efetividade do método está relacionada aos valores de impedância de aterramento das estruturas e resistividade do solo. Esta influência é mais crítica em redes de distribuição, devido a sua baixa isolação comparada às LT's.

Instalação de cabos pára-raios em redes de distribuição

- ⇒ A maior causa de desligamentos de redes de distribuição urbanas por descargas atmosféricas, é devido às tensões induzidas.
- ⇒ Embora o cabo pára-raios reduza um pouco a tensão induzida nas fases, devido a sua proximidade com as fases, a sua efetividade para esse tipo de proteção nem sempre justifica a sua aplicação.

Aplicação de pára-raios

- ⇒ A aplicação de pára-raios, em muitas das vezes associada a melhoria do sistema de aterramento, tem se mostrado como o método mais eficaz e efetivo, para a melhoria de desempenho de linhas de transmissão.
- ⇒ A efetividade dos pára-raios na melhoria do desempenho de redes / linhas até 45 kV depende da causa principal de desligamento da rede: se por descargas diretas ou indiretas

Estudos para avaliação do desempenho de redes e LT's devido às descargas atmosféricas

Uma melhor efetividade obtida nos estudos realizados depende do maior ou menor grau de complexidade considerado nos estudos para definir a quantidade e a localização dos pára-raios.

Complexidade do modelo x desempenho computacional

Modelos mais complexos

- ⇒ A maioria desses modelos consideram acoplamento eletromagnético mútuo entre os componentes da linha
- ⇒ Fornecem informações bastante confiáveis sobre as tensões e correntes obtidas no topo da torre, através das cadeias de isoladores e no sistema de aterramento.

Complexidade na entrada de dados / dados de saída
Longo tempo de processo computacional

Modelos mais simplificados

- ⇒ Não apresentam em suas modelagens básicas considerações importantes que podem acarretar em erros significativos na resposta transitória da LT atingida pela descarga.
- ⇒ Geralmente não fornecem informações mais consistentes sobre os resultados das tensões e correntes obtidas para o topo da torre, cadeias de isoladores e no sistema de aterramento.

Facilidade na entrada dos dados / resultados de saída
Menor tempo de processamento computacional.

Efeito dos parâmetros na resposta transitória das linhas de transmissão

Efeito do sistema de aterramento:

- ⇒ Consiste no aspecto mais importante e que apresenta uma maior influência na resposta transitória de linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas.
- ⇒ Melhores resultados para as tensões resultantes através das cadeias de isoladores e no topo das estruturas dependem fortemente da modelagem utilizada para avaliar o comportamento transitório do sistema de aterramento.

Efeito dos parâmetros na resposta transitória das linhas de transmissão

Efeito das torres adjacentes:

- ⇒ As tensões resultantes sobre as cadeias de isoladores e no topo da torre são influenciadas **por menores vãos médios** e dependem fortemente da forma de onda da corrente de descarga considerada.
- ⇒ O efeito das torres adjacentes na resposta transitória de uma LT deve ser considerada quando o tempo de frente da onda de corrente é menor do que o tempo de propagação das ondas de tensão e corrente durante a propagação da torre atingida para as adjacentes e o retorno a torre considerada.

Modelos de interrupção da isolação

- ⇒ Chave controlada por tensão
- ⇒ Método de integração das tensões
- ⇒ Método do canal progressivo (leader progressivo)

Característica da isolação - IEEE Std. 1243 / 97

$$U_{\text{descarga}}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot W$$

U_{descarga}	Tensão que provoca descarga na cadeia de isoladores (kV)
t	Tempo para a descarga (0,5 - 16 μs)
W	Comprimento da isolação (m)

Característica da isolação - efeito da altitude

$$DAS_C = DAS_N \cdot e^{-(H-1000)/8150}$$

DAS_C Distância de arco a sêco das cadeias de isoladores em função da altitude (m);

DAS_N Distância de arco a sêco ao nível do mar;

H Altitude da linha de transmissão em relação ao nível do mar (m).

Aplicação de pára-raios de linha

Aplicação de pára-raios em linhas de transmissão

⇒ Tecnologia utilizada em vários países para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão desde o início da década de 80.

Primeira aplicação reportada no Japão (1980).

⇒ Tecnologia tornou-se mais difundida a partir do desenvolvimento de pára-raios com invólucros poliméricos.

⇒ Implementação nos países latino americanos no final de década de 80 (México – 1989 / Brasil - 1996).

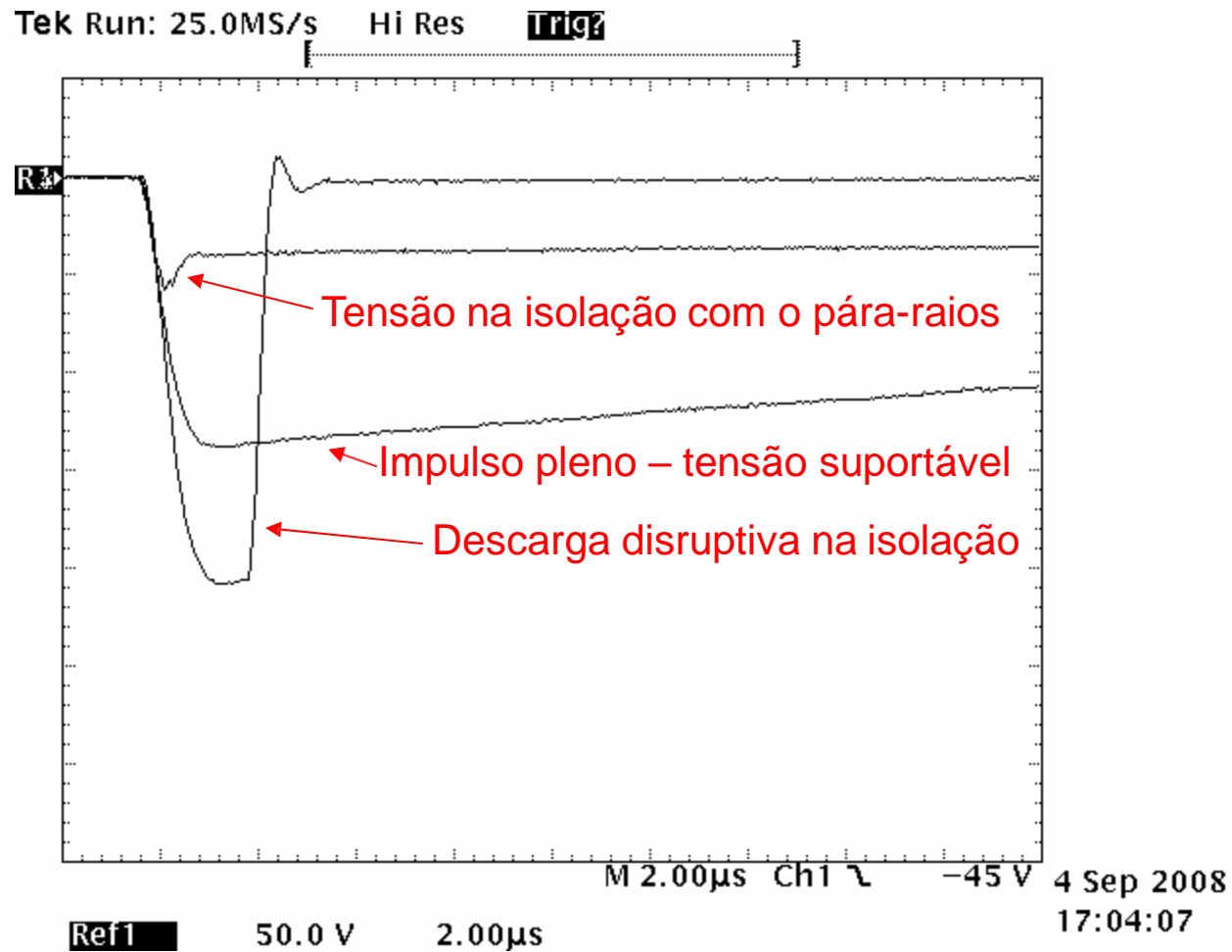
Pára-raios de linha

- ⇒ Método de melhoria geralmente mais eficaz sob os pontos de vista técnico e econômico.
- ⇒ Utilizado com sucesso em empresas de energia dos Estados Unidos, Canadá, Japão, França, Alemanha, México, Colômbia, Brasil, entre outros países.
- ⇒ Instalados e conectados eletricamente em paralelo com as cadeias de isoladores.
- ⇒ Existem duas filosofias de aplicação

Princípio de operação

- ⇒ Redução das sobretensões que aparecem nos terminais das cadeias de isoladores quando da ocorrência de uma descarga, evitando que o nível de isolamento das cadeias seja excedido.
- ⇒ Necessidade de coordenar os níveis de proteção do pára-raios com os níveis de descarga das cadeias a serem protegidas.
- ⇒ A sua operação não provoca a interrupção no fornecimento de energia.

Princípio de operação

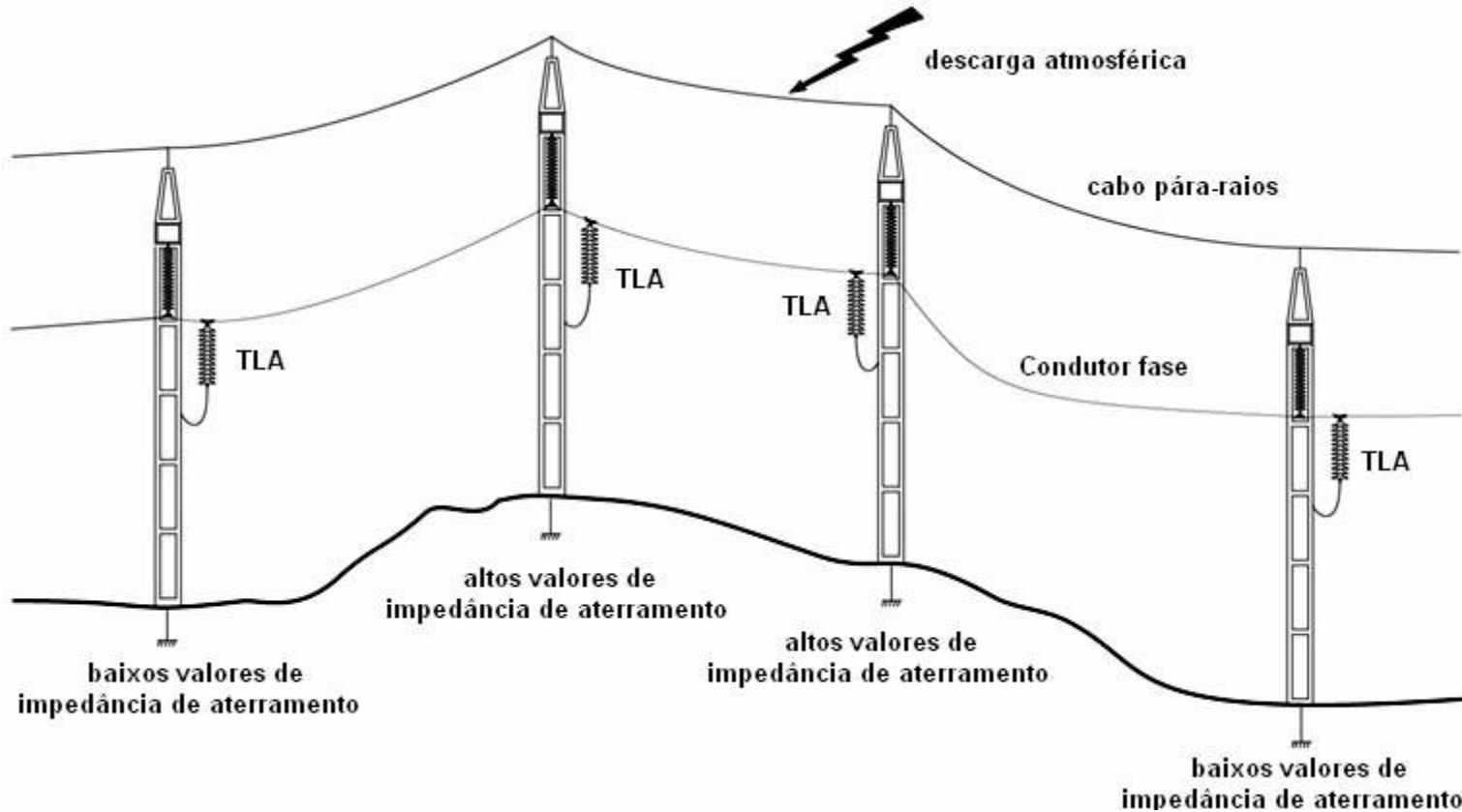


Desempenho operacional

- ⇒ Desempenho adequado dos pára-raios está condicionado ao seu correto dimensionamento:
- ⇒ Tensão nominal e MCOV
 - Máx. tensão fase-terra do sistema.
 - Máx. sobretensão sustentada e sua duração;
- ⇒ Capacidade de absorção de energia;
- ⇒ Suportabilidade a correntes de curto-circuito.
- ⇒ Condições ambientais.

- ⇒ Novos projetos de LT's com índices de desligamento teórico elevados e para novas configurações de projeto.
- ⇒ Melhoria do desempenho de linhas existentes com e sem cabos pára-raios
- ⇒ Aplicações especiais:
 - Aplicação em trechos críticos da LT
 - Aplicação nas últimas torres antes da chegada da LT á subestação
 - Reisolamento de linhas

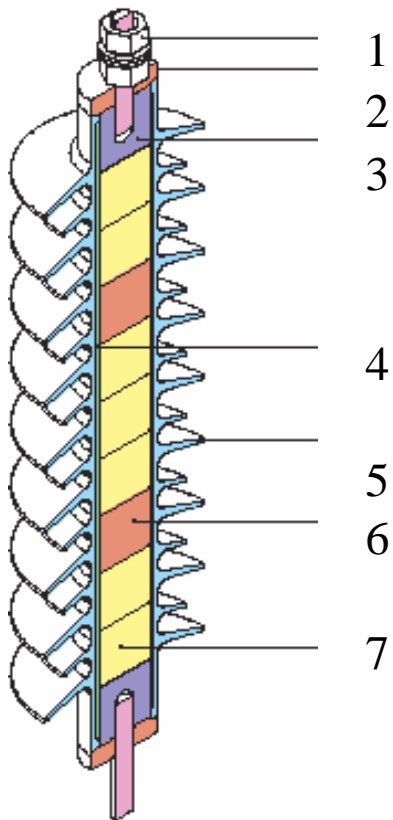
Aplicação em trechos críticos da LT



Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005

Características construtivas

Pára-raios sem centelhadores - polimérico

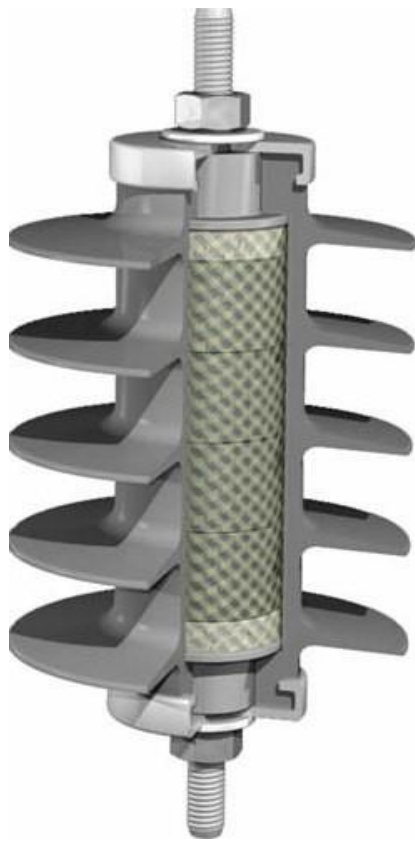


- 1 - Terminal de linha
- 2 - Flange metálica
- 3 - Bloco metálico de alumínio (terminação)
- 4 - Encapsulamento dos blocos em um tubo de fibra de vidro (wrapping)
- 5 - Invólucro polimérico de silicone
- 6 - Espaçadores metálicos
- 7 - Coluna de blocos de ZnO



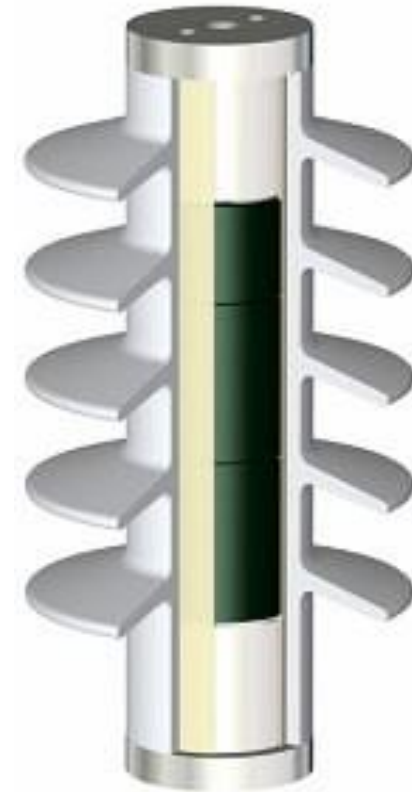
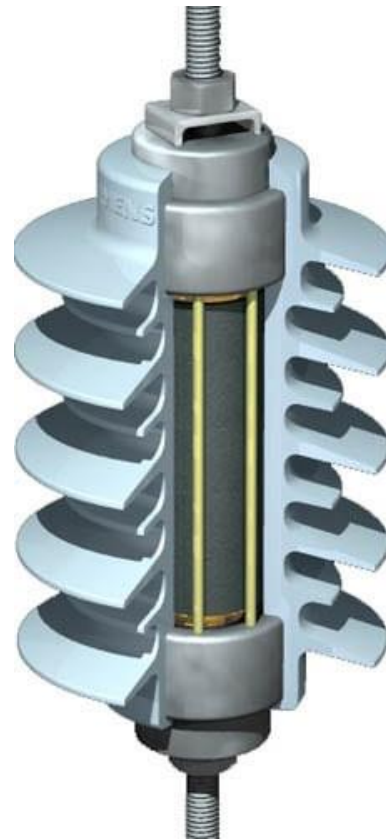
Características construtivas

Pára-raios sem centelhadores - polimérico



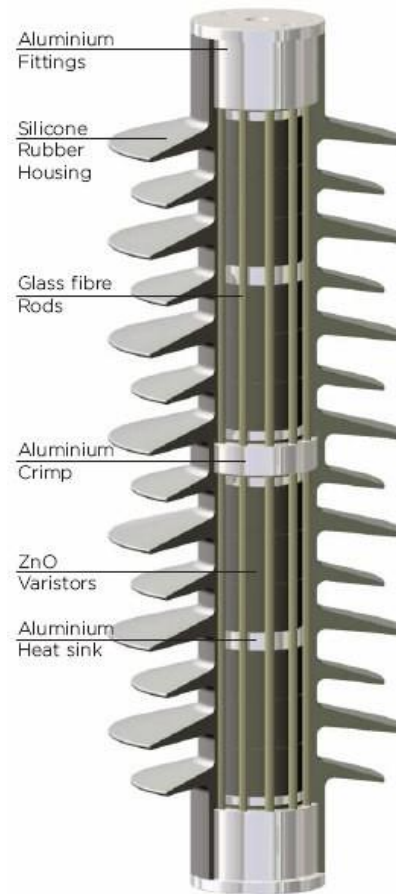
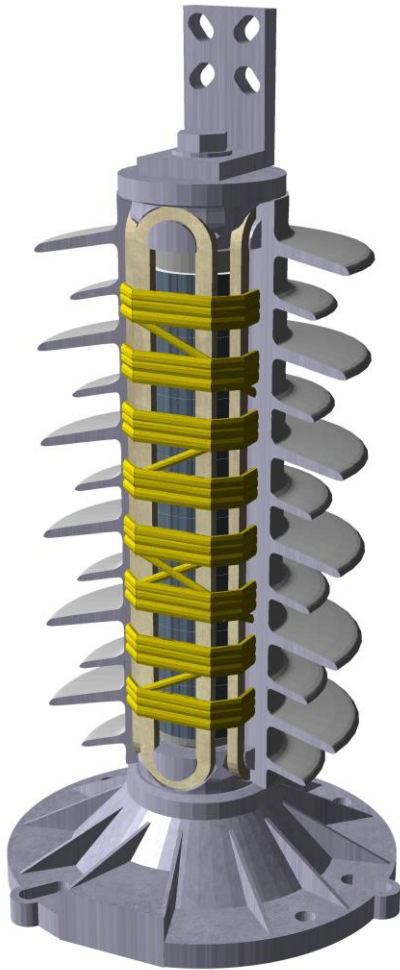
Características construtivas

Pára-raios sem centelhadores – polimérico Projeto tipo
“gaiola” – “cage design”

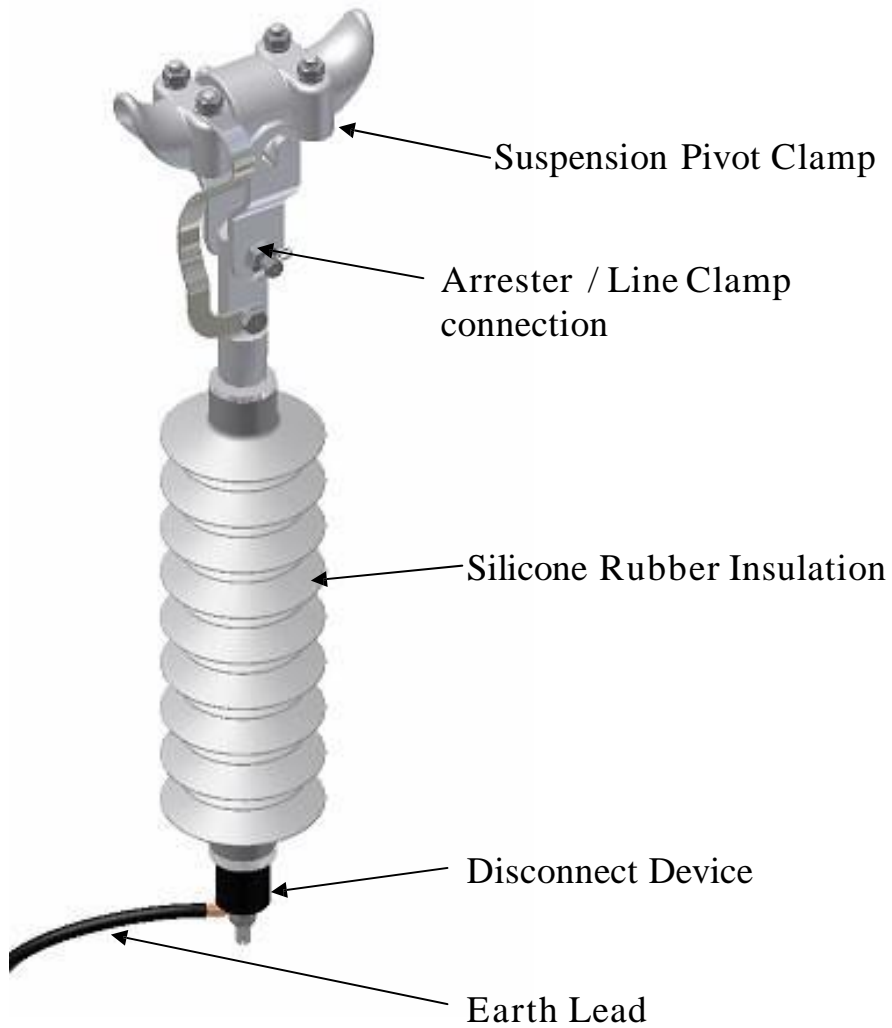


Características construtivas

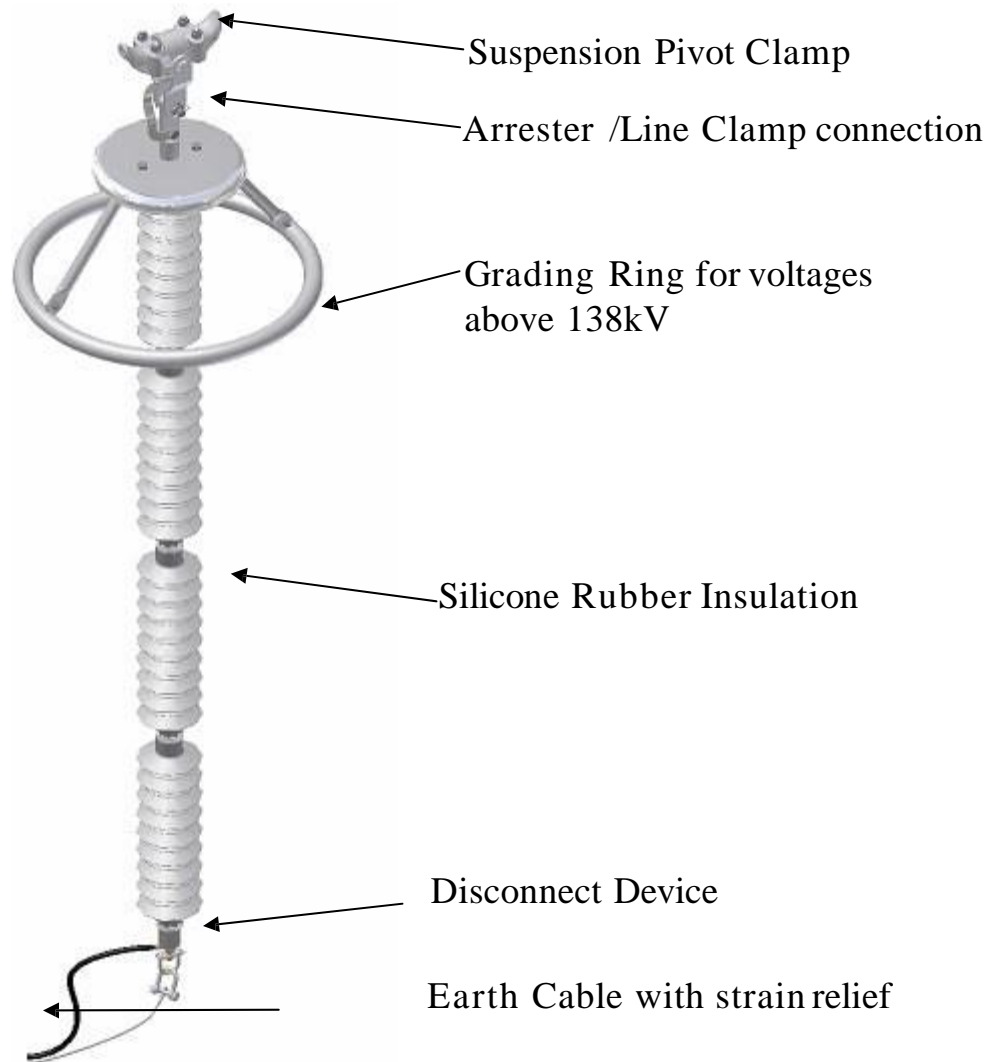
Pára-raios sem centelhadores - polimérico



Pára-raios de linha de 30 kV para sistemas de 34,5 kV



Pára-raios de linha de 192 kV para sistemas de 230 kV



Definição dos pontos de aplicação

⇒ Critério de dimensionamento, a quantidade e a localização dos pára-raios a serem instalados devem ser obtidos através de estudos utilizando-se de ferramentas computacionais.

- ⇒ Estudo de desempenho da linha (determinação das correntes críticas e probabilidades de ocorrência);
- ⇒ Estudos para determinar as energias a serem absorvidas pelos pára-raios.



Instalação de pára-raios em uma ou mais fases em todas as estruturas ou em estruturas alternadas

Experiência das empresas brasileiras

- ⇒ Mais de 3.000 unidades de pára-raios instalados em redes de distribuição e linhas de sub-transmissão e transmissão aéreas de 34,5 kV a 230 kV;
- ⇒ Aproximadamente 75% desse total está aplicado na melhoria do desempenho de linhas sub-transmissão e transmissão de 69 kV e 138 kV;
- ⇒ Aproximadamente 70% na área sob concessão da CEMIG;

Experiência das empresas brasileiras

⇒ A análise e avaliação do desempenho de LT's frente às descargas atmosféricas expressa em termos do número médio de desligamentos por 100 km por ano antes e após a instalação de pára-raios de linha têm apresentado resultados bastante satisfatórios:

Melhoria relativa média de aproximadamente 70% para LT's de 34.5 kV;

Melhoria relativa média de aproximadamente 79% para LT's de 69 kV;

Melhoria relativa média de aproximadamente 76% para LT's de 138 kV;

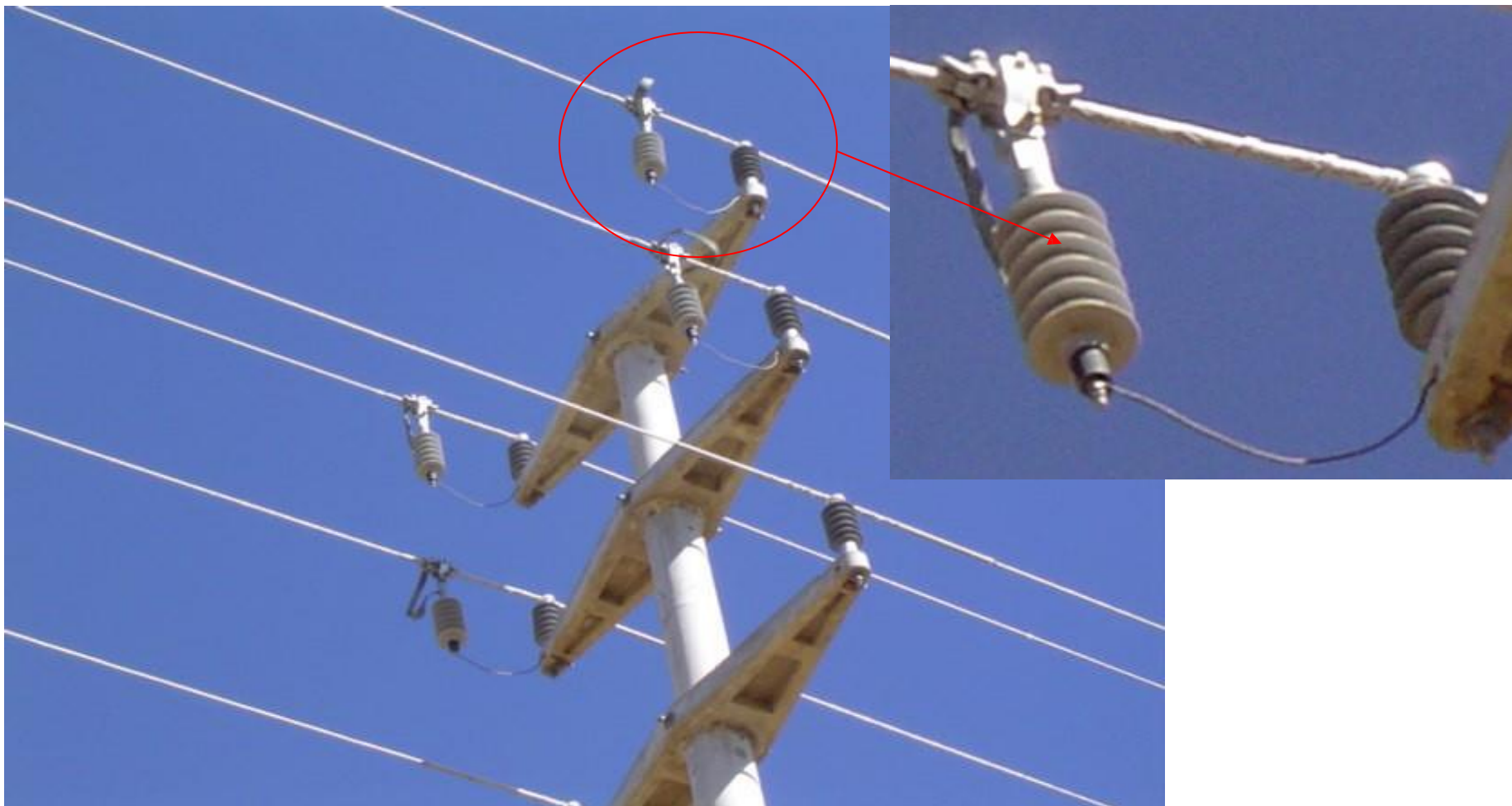
Rede de distribuição 13,8 kV



Antamina – Peru – Linha de distribuição 23 kV



Electrocentro - Peru – Linha de distribuição 23 kV



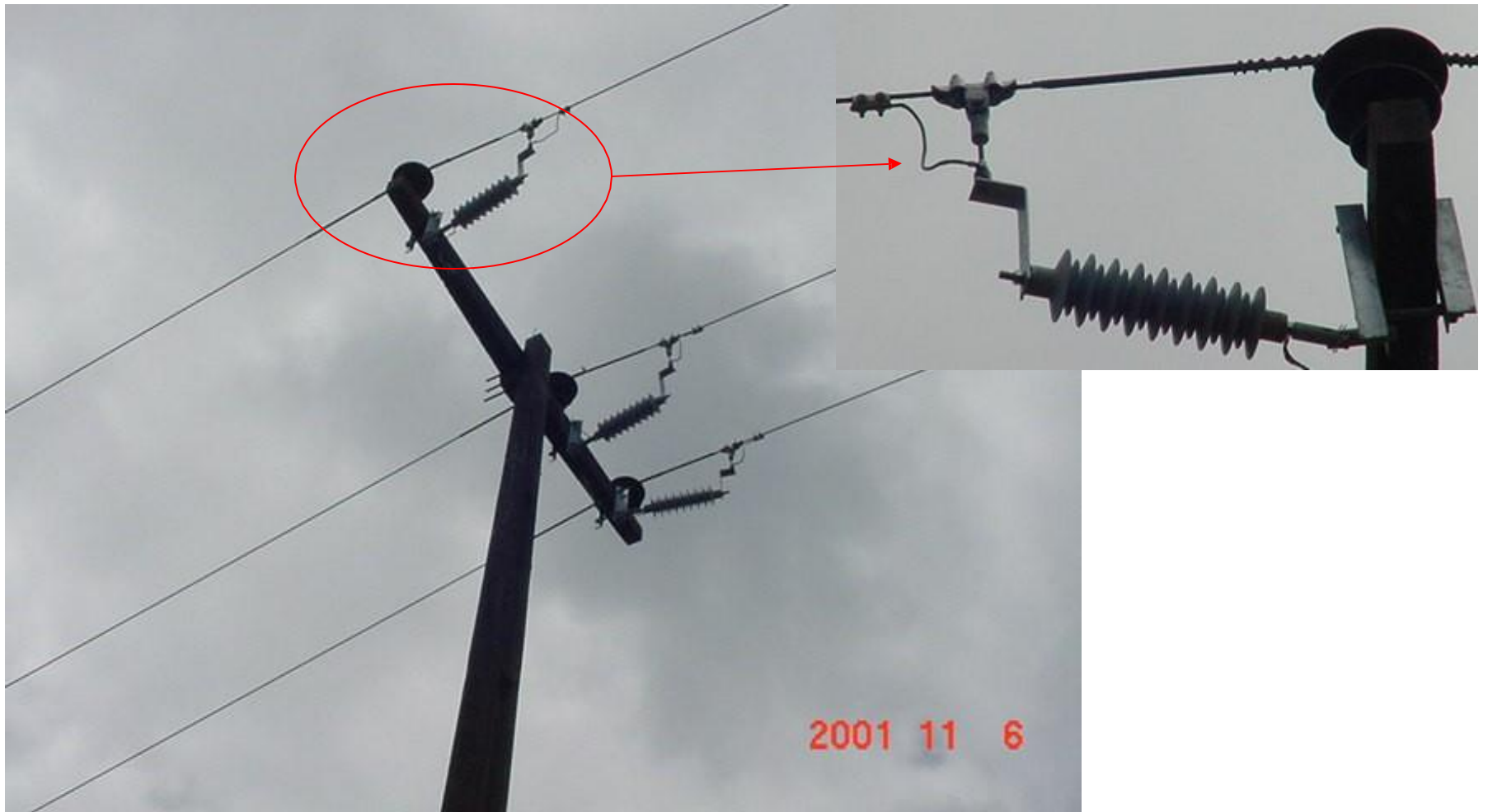
CEMIG -Linha de distribuição 34,5 kV



CEMIG -Linha de distribuição 34,5 kV



ESCELSA -Linha de distribuição 34,5 kV



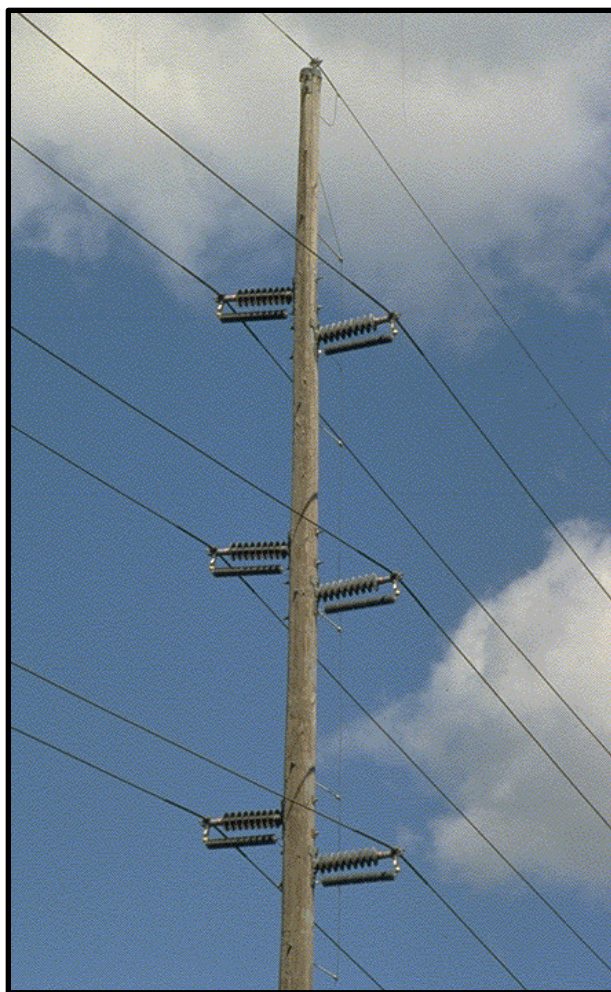
CEMIG -Linha de sub-transmissão 69 kV



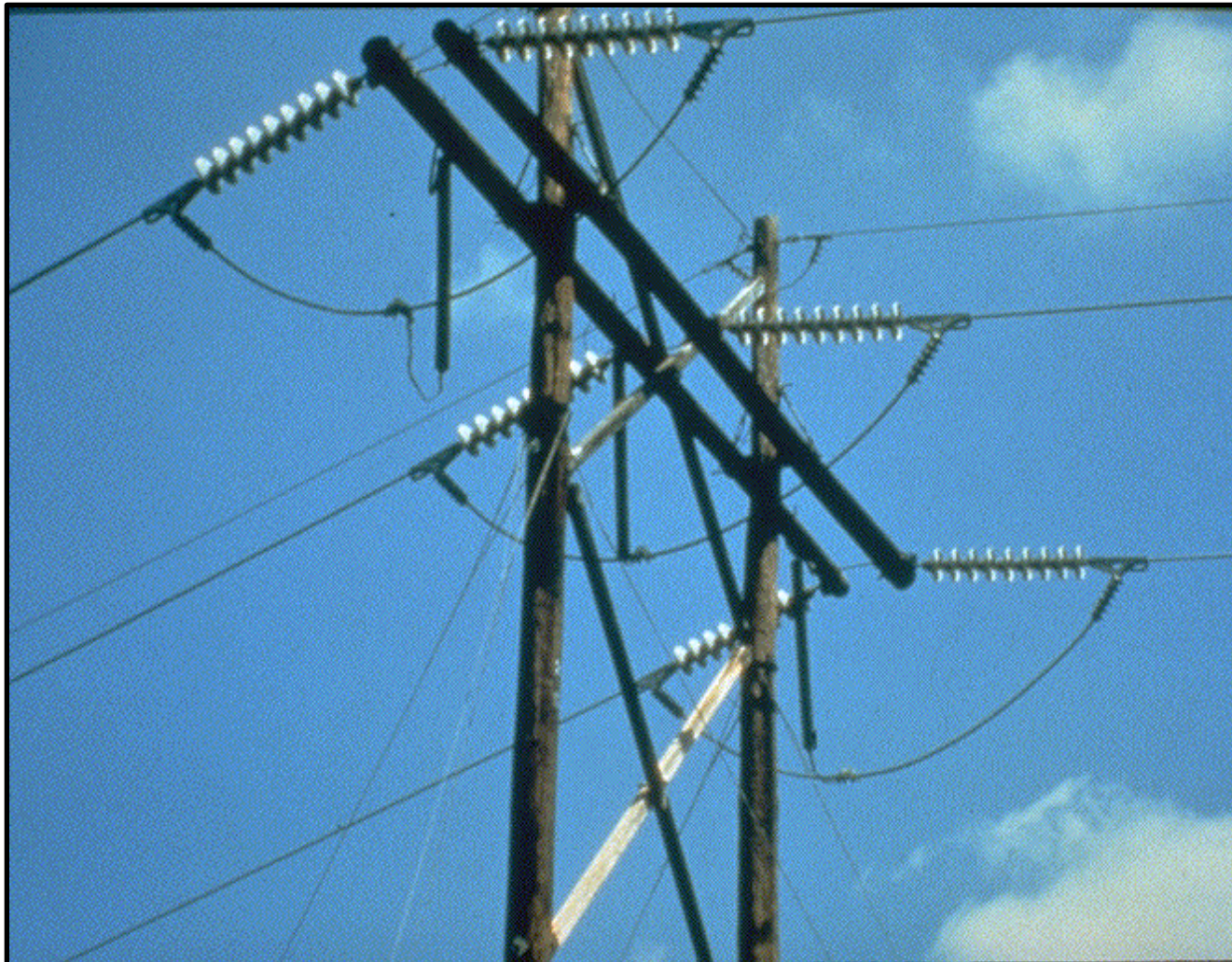
Ampla - Linha de sub-transmissão 69 kV



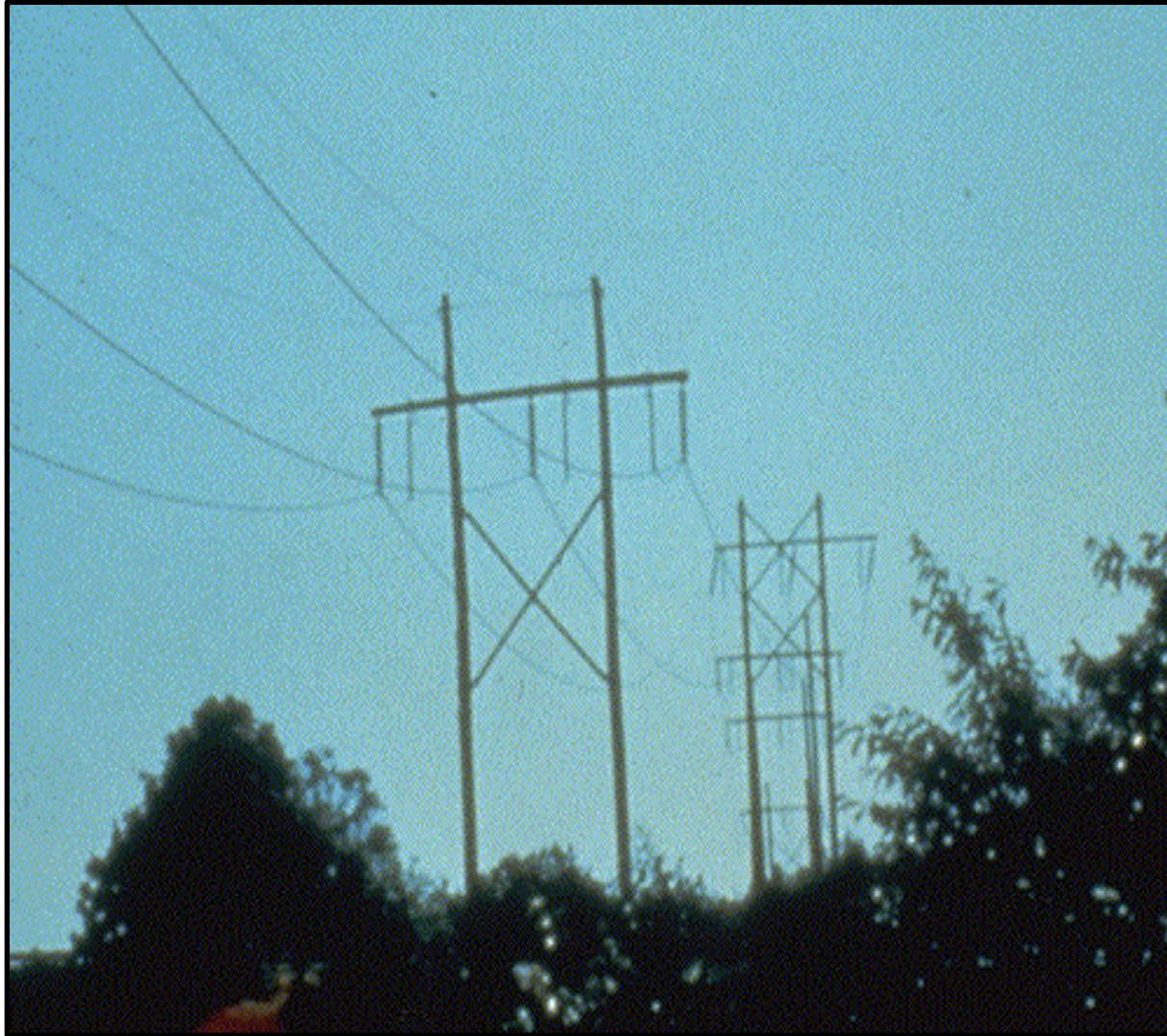
USA - Linha de Transmissão 69 kV



USA - Linha de Transmissão 115 kV



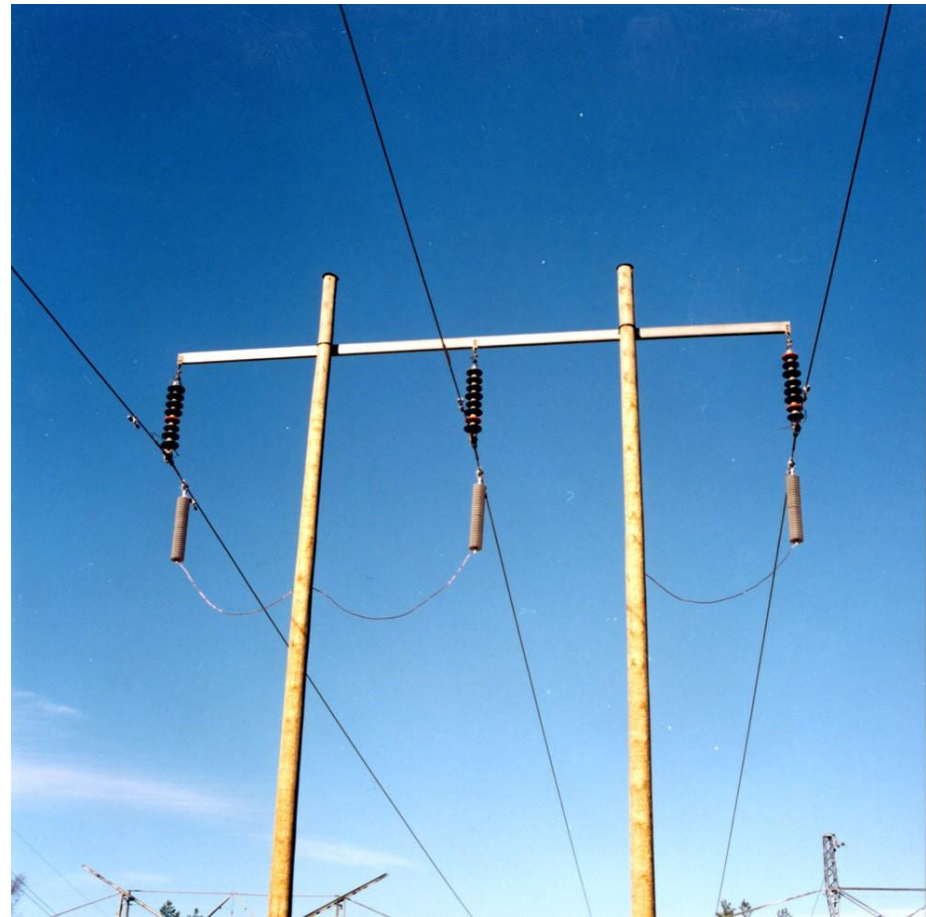
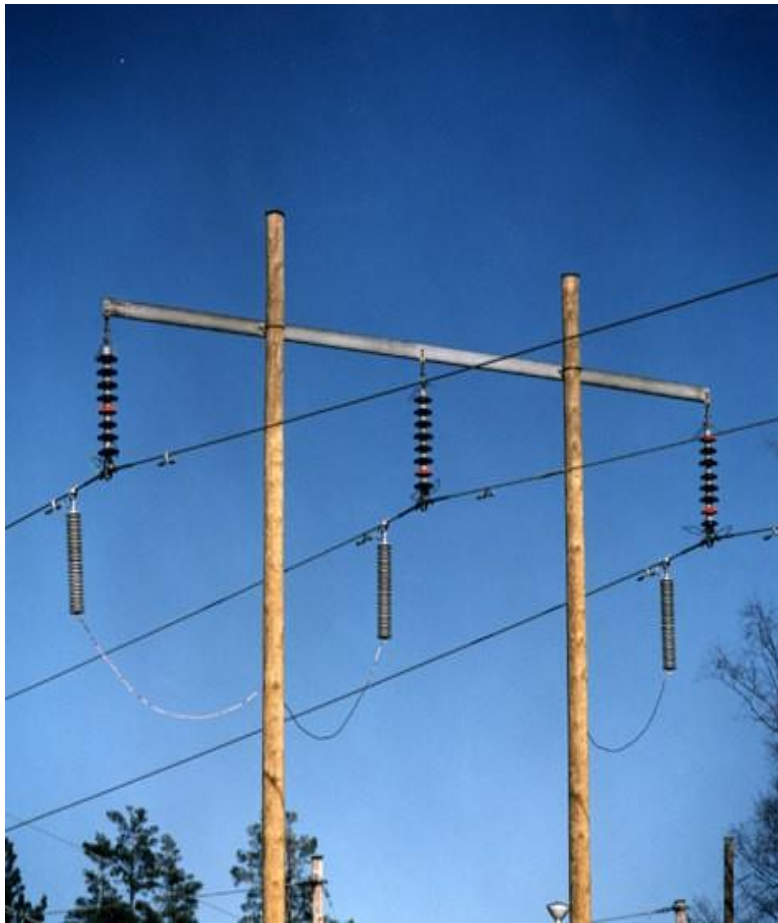
USA – Georgia Power - Linha de Transmissão 115 kV



BKK – Noruega - Linha de Transmissão 120 kV

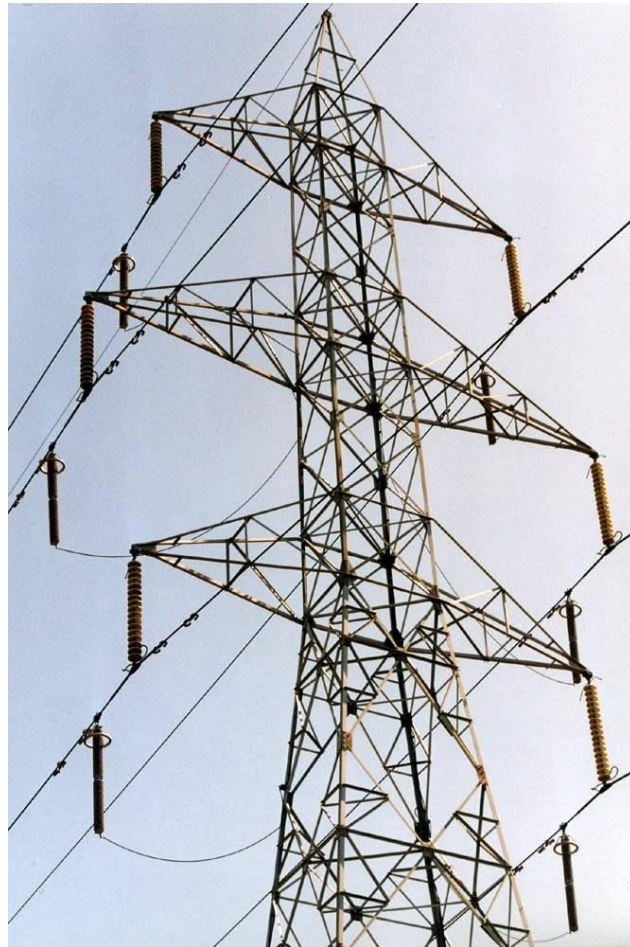


Linha de Transmissão 123 kV



Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005

Linha de Transmissão 123 kV



Fonte: Metal Oxide Surge Arresters – Volker Hinrichsen
CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro - 2005

CEMIG -Linha de transmissão 138 kV



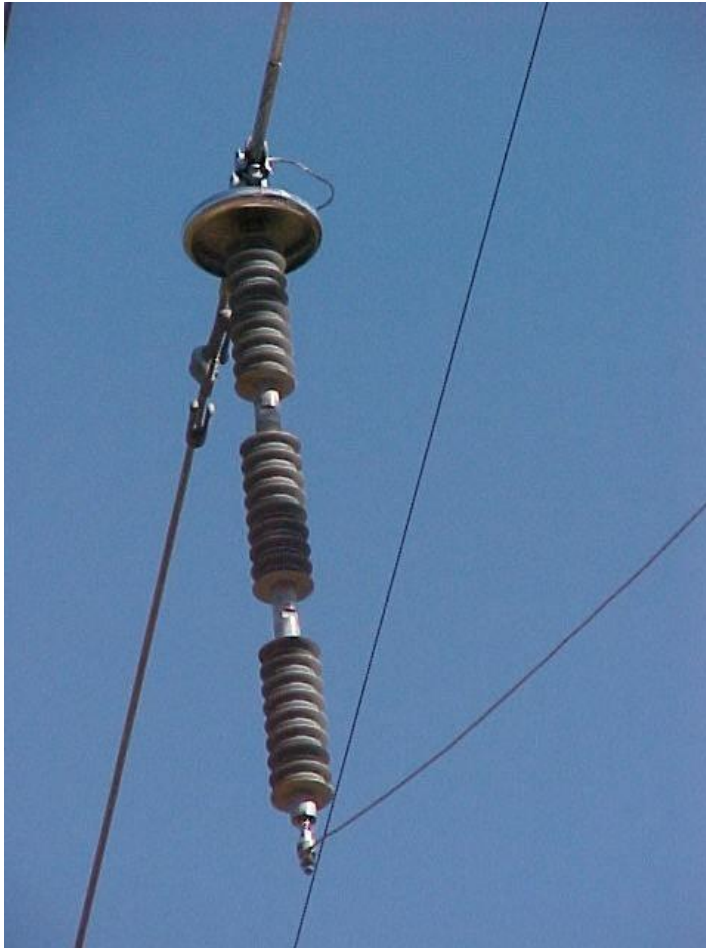
CEMIG -Linha de transmissão 138 kV



CEMIG -Linha de transmissão 138 kV



CVRD -Linha de transmissão 138 kV



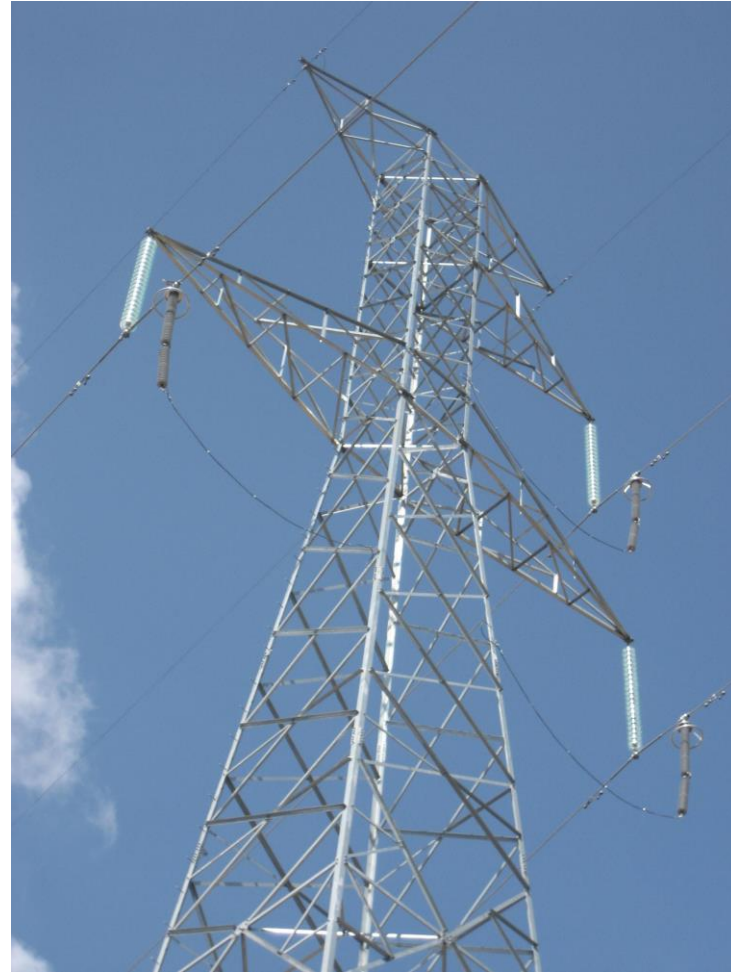
CVRD -Linha de transmissão 138 kV



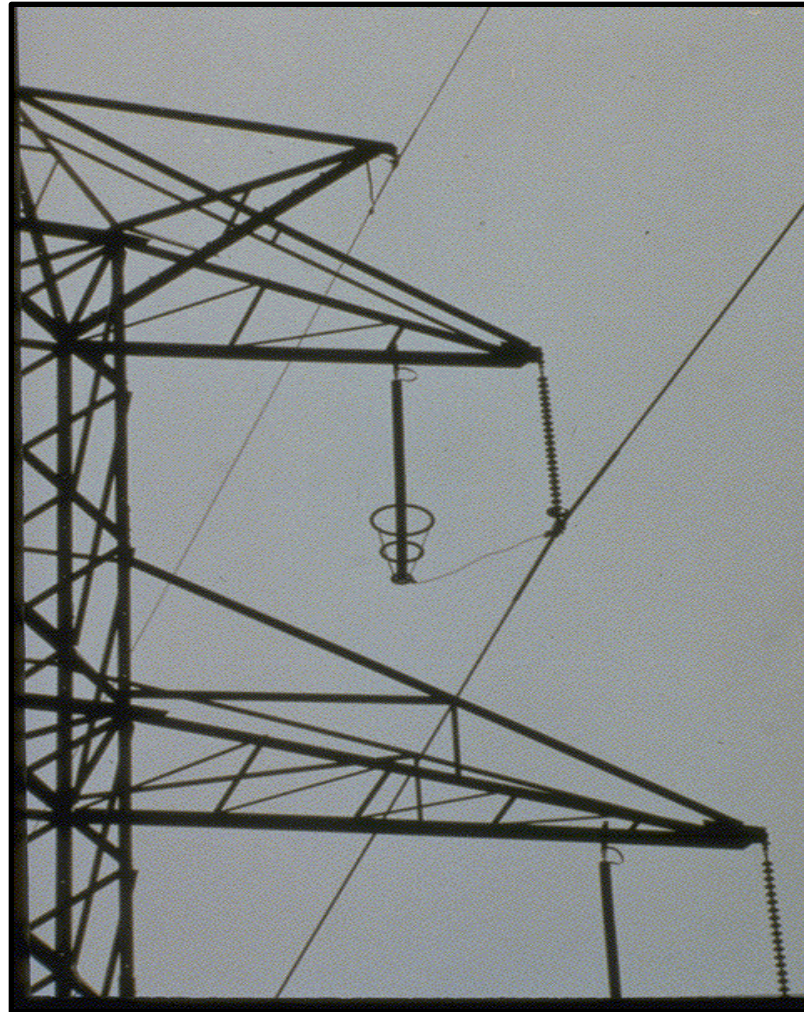
Terna SPA - Italia – Linha de transmissão 138 kV



Antamina – Peru - Linha de transmissão 220 kV



Duke Power / USA – Linha de transmissão 230 kV



USA – Linha de transmissão 230 kV



REN S.A. – Portugal - Linha de Transmissão 245 kV



Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005

Statnett – Noruega – Linha de Transmissão 300 kV



Linha de Transmissão compacta 420 kV



Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005

Linha de Transmissão 800 kV



Fonte: Metal Oxide Surge Arresters – Volker Hinrichsen
CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro - 2005

Centelhadores série externos

- Não devem atuar para sobretensões de frequência industrial (TOV)
- Não devem operar em condições de poluição
- A tensão disruptiva do centelhador deve ser coordenada com a tensão suportável da cadeia de isoladores

Invólucro

- O menor possível. Elementos de ZnO com elevados gradientes de tensão permitem projetos bastante compactos

Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005



Pára-raios com centelhador externo série



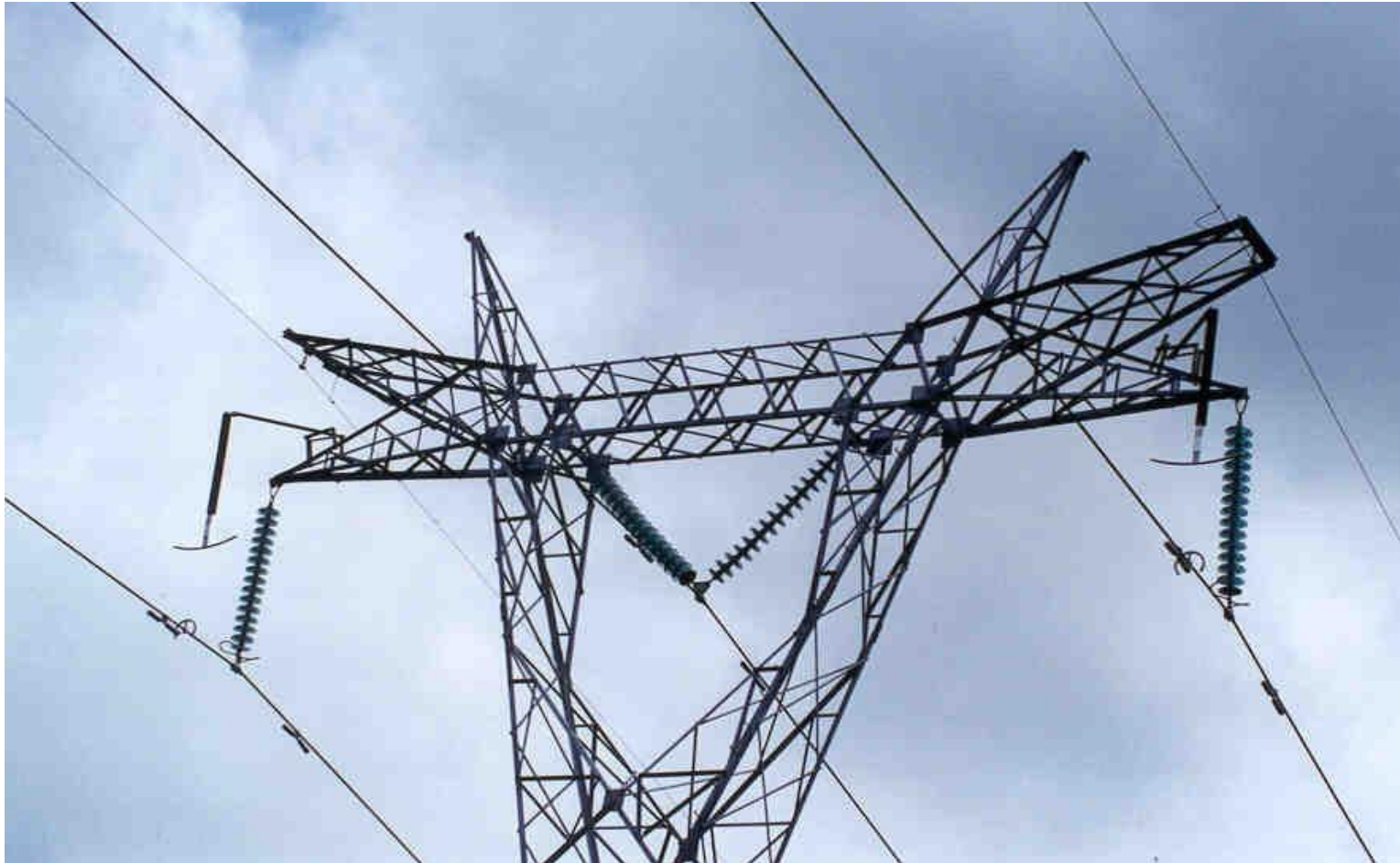
Fonte: Different Transmission Line Arrester Applications, Installations, and Designs – MSA / ABB – CIGRÉ tutorial – Rio de Janeiro – 2005

Pára-raios com centelhador externo série



Fonte: Supressor de sobretensões por descargas atmosféricas (SSDA)
para líneas de transmisión – CFE - 2004

Pára-raios com centelhador externo série



Fonte: Supressor de sobretensões por descargas atmosféricas (SSDA)
para líneas de transmisión – CFE - 2004