

FATOR DE BLINDAGEM s_f

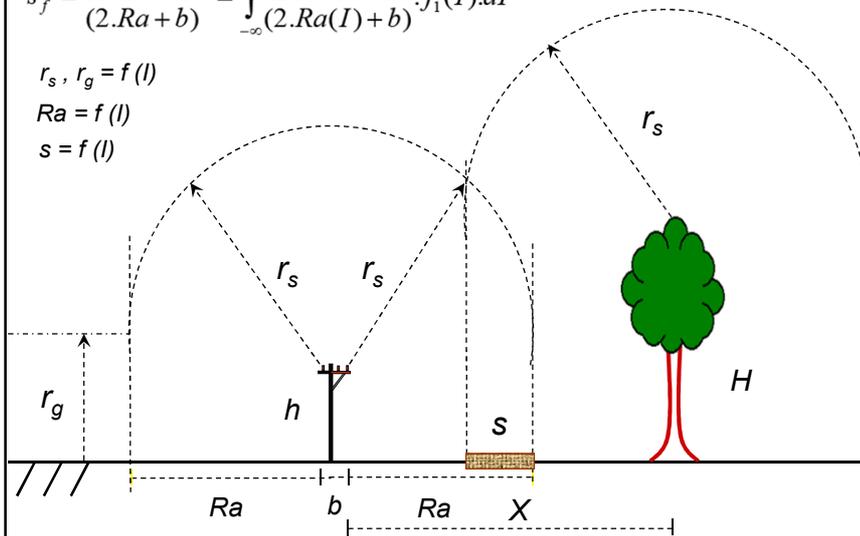
PEN 5019

$$s_f = \frac{s}{(2.Ra + b)} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(I)}{(2.Ra(I) + b)} \cdot f_1(I) \cdot dI$$

$$r_s, r_g = f(l)$$

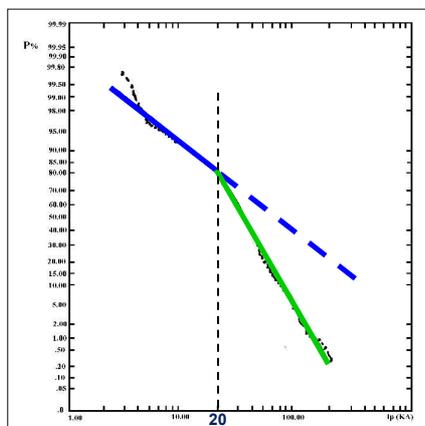
$$Ra = f(l)$$

$$s = f(l)$$



FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (CORRENTE DO FS)

PEN 5019



$$f_1(I) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\ln} \cdot I} \right) \cdot e^{-\frac{(\ln I / \bar{I})^2}{2 \cdot \sigma_{\ln}^2}}$$

$$\sigma_{\ln} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\ln \left(\frac{I_i}{\bar{I}} \right) \right)^2}$$

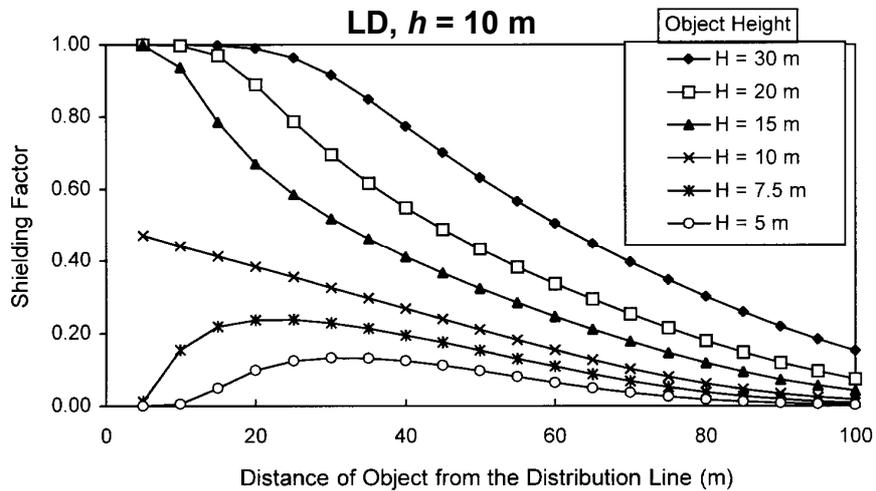
$$I < 20 \text{ kA}: \bar{I} = 61,1 \text{ kA} \quad \sigma_{\ln} = 1,33$$

$$I > 20 \text{ kA}: \bar{I} = 33,3 \text{ kA} \quad \sigma_{\ln} = 0,605$$

FATOR DE BLINDAGEM (s_f)
Modelo Eletrogeométrico

PEN 5019

(IEEE, a partir de 1997: $r_s = 10 \cdot l^{0,65}$; $r_g = 0,9 \cdot r_s$)



Número de Descargas Diretas à linha
(considerando o efeito de blindagem)

PEN 5019

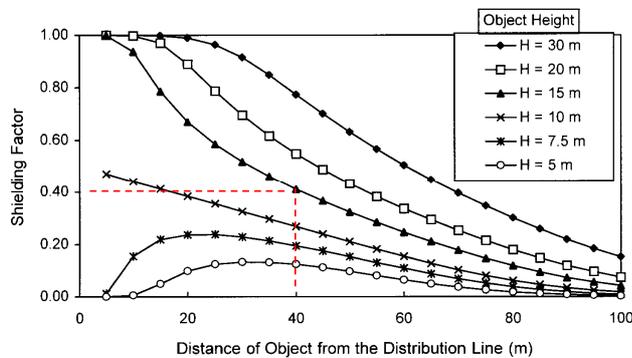
$$N_s = N \cdot (1 - s_f) \quad \left(\frac{\text{descargas}}{100 \text{ km.ano}} \right)$$

Ex.: Linha $h = 10$ m, $b = 2$ m, $l = 20$ km, $Td = 80$,
 $X = 40$ m, $H = 15$ m $N_s = ?$

$$N = 109,4 \quad \left(\frac{\text{descargas}}{100 \text{ km.ano}} \right) \text{ (do exemplo anterior)}$$

Nº Descargas Diretas

PEN 5019



$X = 40 \text{ m}, H = 15 \text{ m}$

$\rightarrow s_f \approx 0,4$

$$N_s = N \cdot (1 - s_f) = 65,6 \text{ (descargas / 100 km.ano)}$$

$$l = 20 \text{ km} \rightarrow N_s = 65,6 \cdot \frac{20}{100} = 13,1 \left(\frac{\text{descargas}}{\text{ano}} \right)$$

Nº Descargas Diretas

PEN 5019

$N, N_s \rightarrow$ valores anuais médios do número DD's considerando longos períodos

Distribuição de Poisson:

$$P(n) = \frac{100 \cdot (N_s \cdot t)^n \cdot e^{-N_s \cdot t}}{n!}$$

$P(n)$ = probab. ocorrência de n DD's na linha (%)

t = período de interesse (anos)

n = número DD's na linha

Nº Descargas Diretas

PEN 5019

Ex.: $N_s = 4$ (desc. / ano). Qual a prob. de que em $t = 1$ ano ocorram mais de 5 DD's na linha?

$$P(n) = \frac{100 \cdot (4 \cdot 1)^n \cdot e^{-4 \cdot 1}}{n!} = \frac{100 \cdot 4^n \cdot e^{-4}}{n!}$$

$$P(0) = \frac{100 \cdot 4^0 \cdot e^{-4}}{0!} = 1,8\% \quad P(1) = \frac{100 \cdot 4^1 \cdot e^{-4}}{1!} = 7,3\%$$

Nº Descargas Diretas

PEN 5019

$$P(2) = \frac{100 \cdot 4^2 \cdot e^{-4}}{2!} = 14,7\% \quad P(4) = 19,5\%$$

$$P(3) = \frac{100 \cdot 4^3 \cdot e^{-4}}{3!} = 19,5\% \quad P(5) = 15,6\%$$

P(mais de 5) = 100 % - P(5 ou menos)

$$= 100 - [P(0)+P(1)+P(2)+P(3)+P(4)+P(5)]$$

$$= 100 - (78,4)$$

$$P \left(\begin{array}{l} \text{mais de 5} \\ \text{em 1 ano} \end{array} \right) = 21,6\%$$

DESCARGAS DIRETAS

PEN 5019



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE LD's FRENTE A DA's

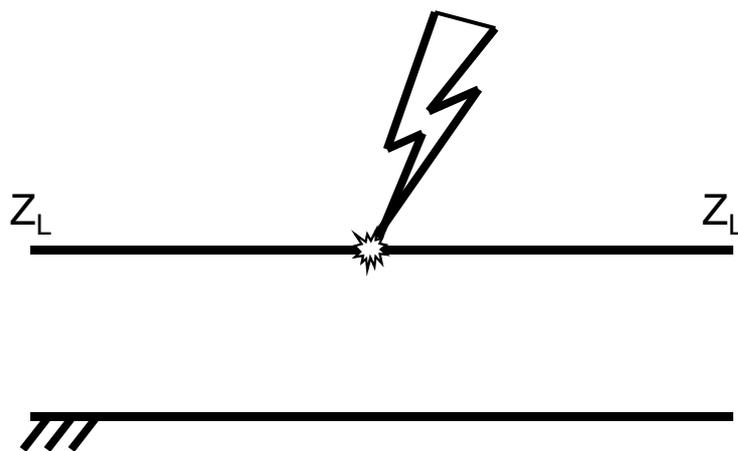
PEN 5019

- Ctes. envolvidas são raras/ conhecidas c/ precisão (e geral/ não são ctes.);
- difícil descrever matematica/ os dados de entrada;
- resultados: apenas através de probabs. ou de valores médios;
- DA's: fenômeno muito rápido \Rightarrow suportab. isols. = f (tempo, f.o.);
- I pode ser 10x maior ou menor que o valor médio (31 kA);

- Ng típico: 1 a 10 descargas / (km².ano) ⇒ área 100 km x 20 m:
2 a 20 descargas / ano ⇒ LD (6 x mais, devido à altura)
- imped. aterramento = f (caracts. solo, l, t)
- corona: afeta amplitude e f.o. das solicitações
- Ng varia bastante de ano a ano (também com a estação e o local)

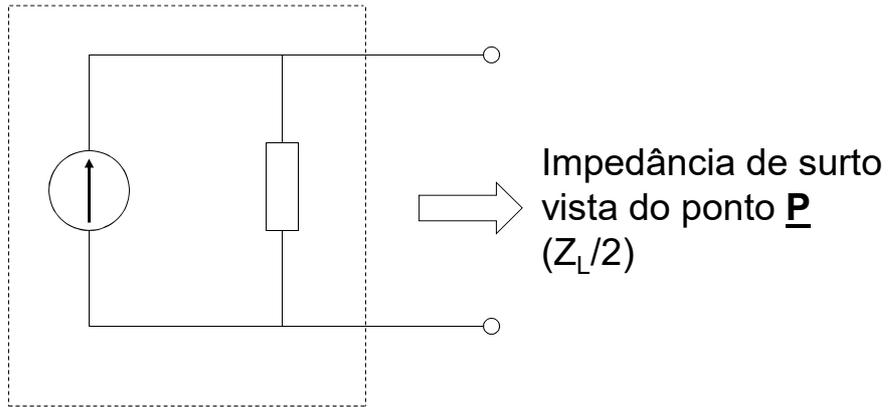
Método deve lidar com essas incertezas!

Exatidão método x dados de entrada
Incertezas → simplificações



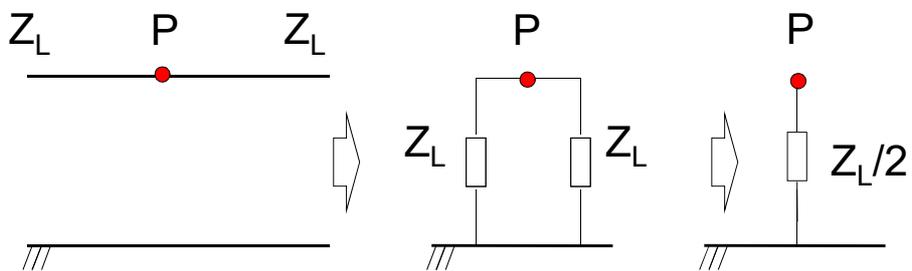
GERADOR DE CORRENTE

PEN 5019



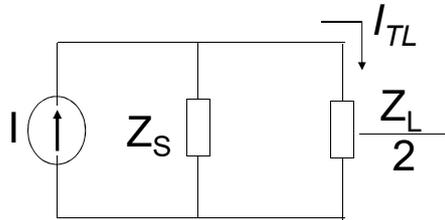
IMPEDÂNCIA VISTA DO PONTO P :

PEN 5019



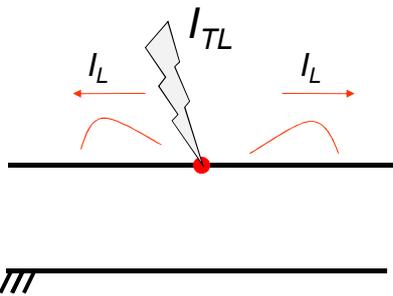
MODELO PARA DA's DIRETAS

PEN 5019



$$I_{TL} = \frac{2 \cdot Z_S \cdot I}{(Z_L + 2 \cdot Z_S)}$$

$$I_L = \frac{I_{TL}}{2} = \frac{Z_S \cdot I}{Z_L + 2 \cdot Z_S}$$



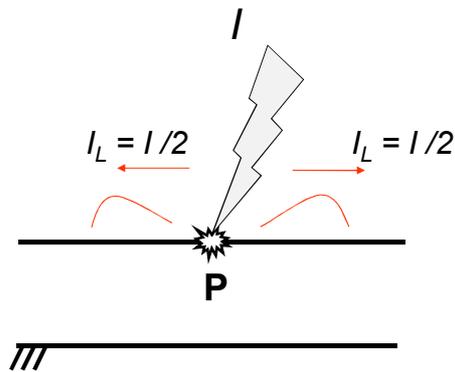
Z_S : 500 Ω a 3000 Ω

Se $2 \cdot Z_S \gg Z_L$: $I_L \cong \frac{I}{2}$

///

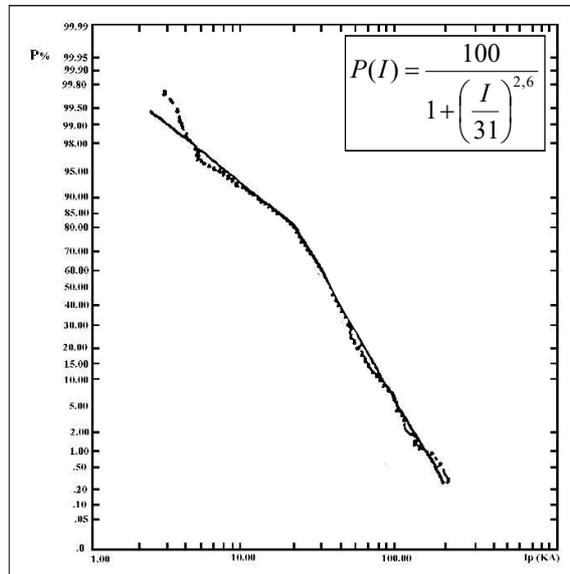
Modelo IEEE

PEN 5019



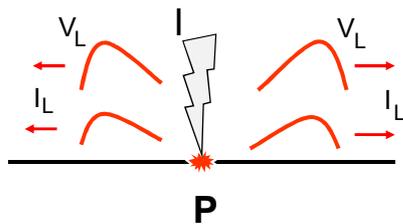
MODELO PARA DA's DIRETAS

PEN 5019



MODELO PARA DA's DIRETAS - IEEE

PEN 5019



$$I_L = \frac{I}{2}$$

$$V_L = Z_L \cdot I_L = Z_L \cdot \frac{I}{2}$$

$$I = \frac{2 \cdot V_L}{Z_L} \quad \text{CFO}$$

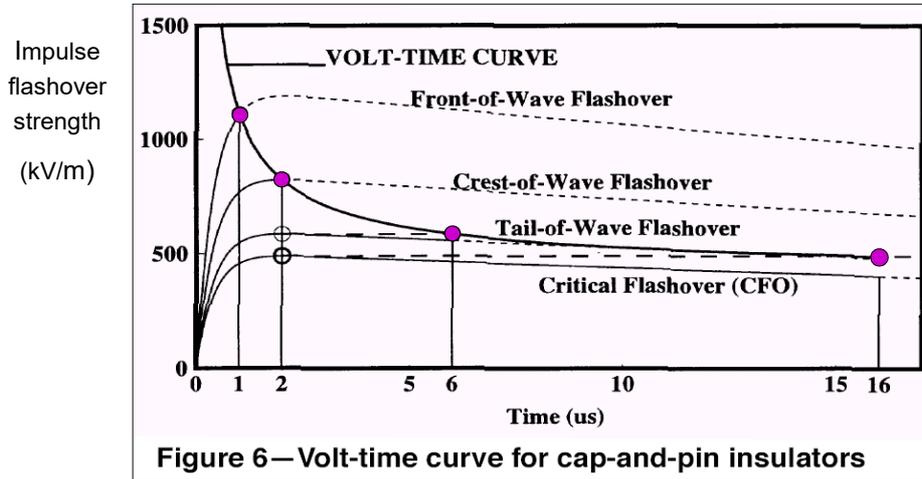
$$\begin{cases} I = \frac{2 \cdot CFO}{Z_L} \Rightarrow V_L = CFO \\ I > \frac{2 \cdot CFO}{Z_L} \Rightarrow V_L > CFO \end{cases}$$

$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_L}$$

$$I > I_c \Rightarrow V_L > CFO$$

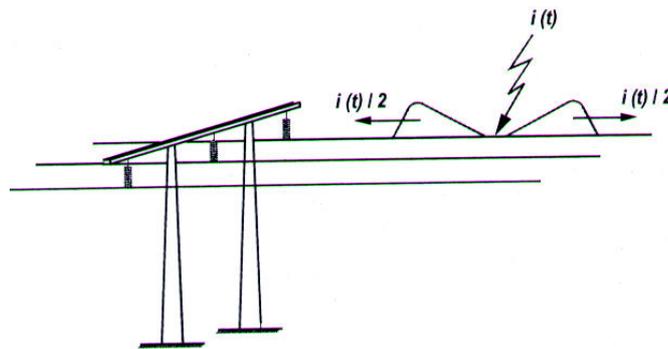
CURVA Vxt

PEN 5019



LINHAS SEM CABO GUARDA

PEN 5019



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

$$I_c = 2 \cdot CFO / Z_L$$

Desprezando corona:

$$V_N = 34,5 \text{ kV}; Z_L = 450 \Omega; CFO \approx 208 \text{ kV} \Rightarrow I_c = 0,92 \text{ kA} \rightarrow P(I_c) = 99,99\%$$

SOLO NÃO IDEAL

PEN 5019

Solo real ($\rho > 0$):

$$Z = Z(\sigma, f)$$

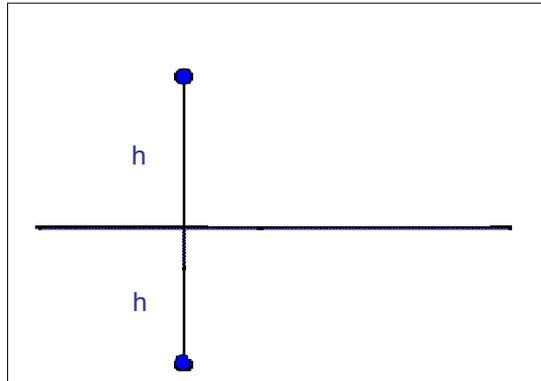
$$\downarrow \sigma, \downarrow f \rightarrow \uparrow Z$$

$$h = h(\sigma, f)$$

Simplificação:

$$h_{eff} = h + \frac{4,7}{\sqrt{\sigma}}$$

σ : [mS/m]



Características do solo (σ, ϵ) = f (f)

Tais efeitos tendem a limitar σ a um valor mínimo de modo que, na principal freq. interesse (124 kHz p/ 1ª descarga), $\sigma_{124 \text{ kHz}} \geq 1 \text{ mS/m}$ mesmo p/ terrenos rochosos, c/ condutiv. muito baixa.

IEEE Std. 1244, 2010

DA's DIRETAS EM LD's – INTERRUPTÕES

PEN 5019

$$NI_{DA} = NI_{DD} + NI_{DI} + NI_{FE}$$

NI_{DA} : total

NI_{DD} : descargas diretas

NI_{DI} : descargas indiretas

NI_{FE} : falhas de eqs. proteção

LINHAS SEM PR's

$$NI_{DA} = NI_{DD} + NI_{DI}$$

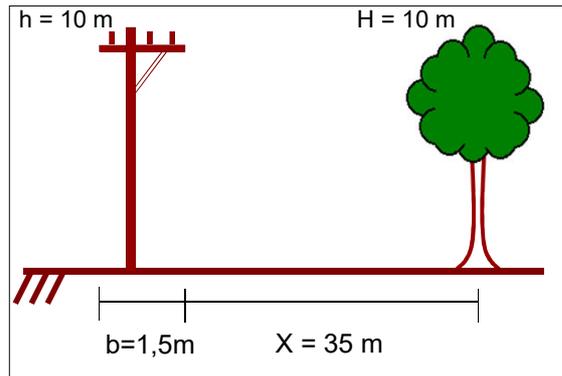
LD's sem PR's e sem cabo guarda:

$$NI_{DD} = \frac{Ns \cdot P(I_c)}{100} \left(\frac{\text{interrupções}}{100 \text{ km} \cdot \text{ano}} \right)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

PEN 5019

- CFO = 100 kV
- L = 30 km
- $L_{BLIND.} = 20$ km
- $Z_L = 470 \Omega$
- $T_d = 100$



DESC. DIRETAS

- N_g
- Ra_m, N
- s_f
- Ns
- I_c
- $P(I_c)$
- NI_{DD}

EXEMPLO (cont.)

PEN 5019

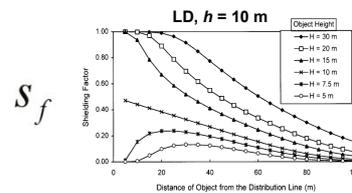
$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25}$$

$$N = N_g \cdot (b + 2 \cdot R_a) \cdot 10^{-1}$$

$$Ns = N \cdot (1 - s_f)$$

$$P(I_c) = \frac{100}{1 + \left(\frac{I_c}{31}\right)^{2,6}}$$

$$Ra_m = 14 \cdot h^{0,6}$$



$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_L}$$

$$NI_{DD} = \frac{Ns \cdot P(I_c)}{100}$$

**Nº Interrupções / ano
(s/ objetos próximos à LD)**

PEN 5019

$T_d = 100 \Rightarrow N_g = 12,6$ (desc./ km² ano)

	NI_{DD}	CFO (kV)
Para 100 km	140,9 / 42,3	100
Para 30 km	140,9 / 42,3	200

$T_d = 60 \Rightarrow N_g = 6,7$ (desc./ km² ano)

	NI_{DD}	CFO (kV)
Para 100 km	74,9 / 22,5	100
Para 30 km	74,9 / 22,5	200

$L = 30$ km; $T_d = 100 \Rightarrow N_g = 12,6$ desc./ (km² ano)

PEN 5019

Sem objetos próximos à LD

CFO (kV)	NI_{DD}
100	42,3
200	42,3

Com árvores próximas à LD

($s_f \approx 0,3$; $L_{blind.} = 20$ km)

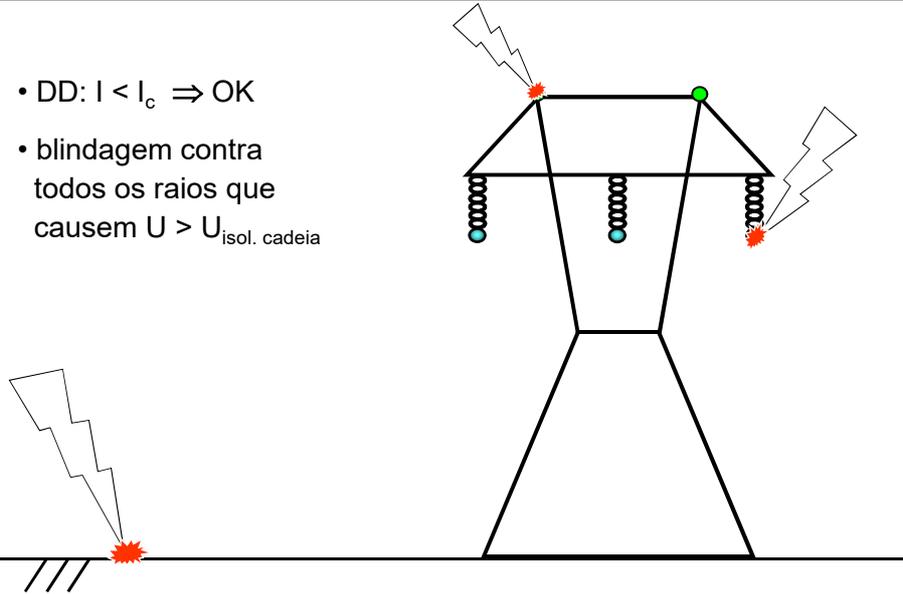


CFO (kV)	NI_{DD}
100	33,8
200	33,8

CABO GUARDA

PEN 5019

- DD: $I < I_c \Rightarrow \text{OK}$
- blindagem contra todos os raios que causem $U > U_{\text{isol. cadeia}}$



LT's COM CABOS GUARDA

PEN 5019

Até 1951: $U_{\text{max}} = 230 \text{ kV}$, $\alpha_E = 30^\circ$

→ desempenho aceitável

LT's 345 kV, altas, circuitos duplos, desempenho pior

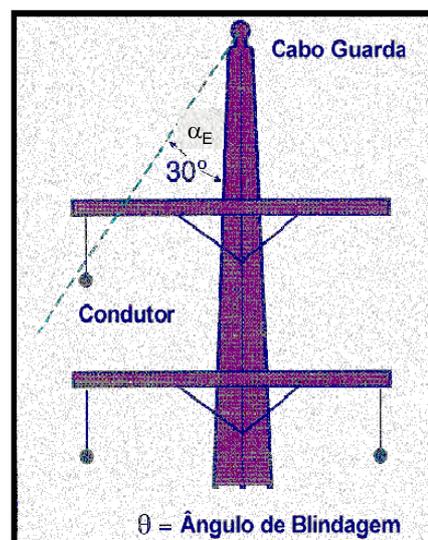
→ estudos teóricos, de campo e lab.

$\uparrow h_t \Rightarrow \downarrow \alpha_E$

LD's:

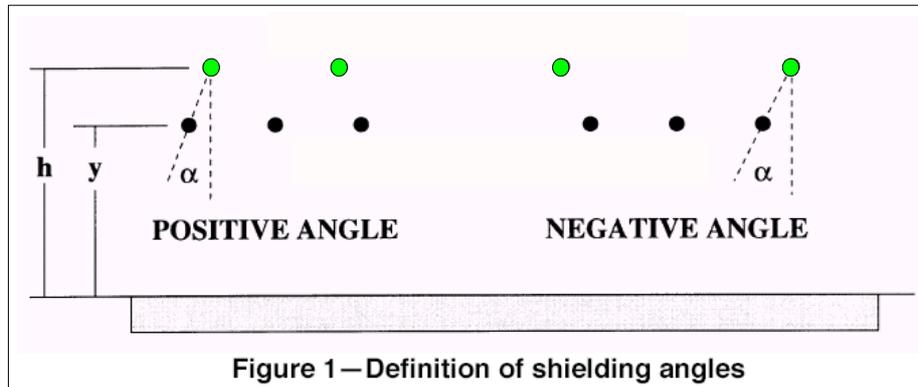
$\alpha_E \leq 45^\circ$ ($h < 15 \text{ m}$, $b < 2 \text{ m}$)

$\alpha_E = 30^\circ$ (novos projetos)



ÂNGULO DE BLINDAGEM

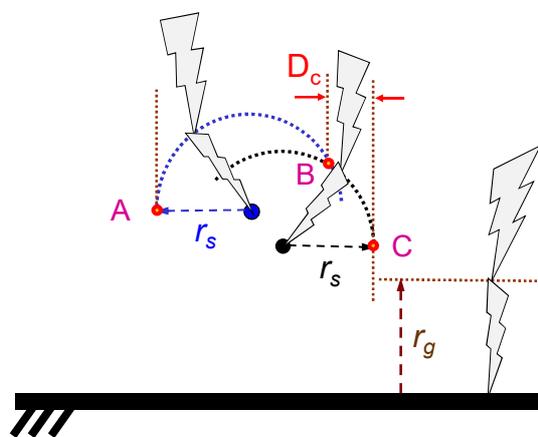
PEN 5019



Modelo Eletrogeométrico (EGM)

PEN 5019

Corrente I : $r_s = 10 \cdot I^{0,65}$



Entre A e B \Rightarrow CG

À direita de C \Rightarrow terra

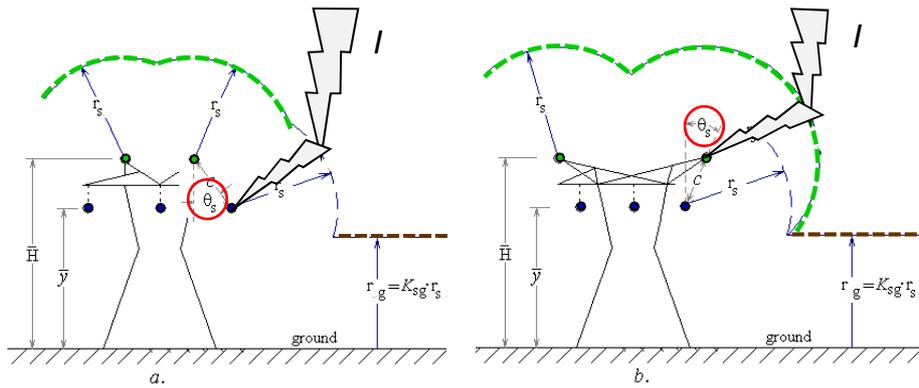
Entre B e C \Rightarrow fase

D_c : distância exposição

Modelo Eletrogeométrico (EGM)

PEN 5019

Distância de atração: $r_s = 10 \cdot I^{0,65}$



θ_s : ângulo de blindagem

Ângulo de blindagem (-)

LD com CABO GUARDA

PEN 5019

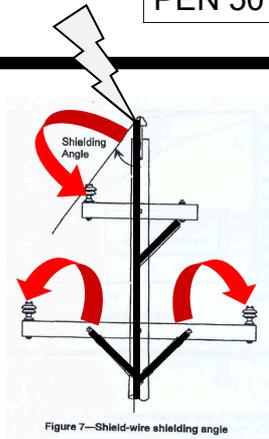


LD's com CABO GUARDA

PEN 5019

CG:

- intercepta DA's diretas nas fases
- ↑ potencial solo → "backflashover"
- alta/ dependente de R_g

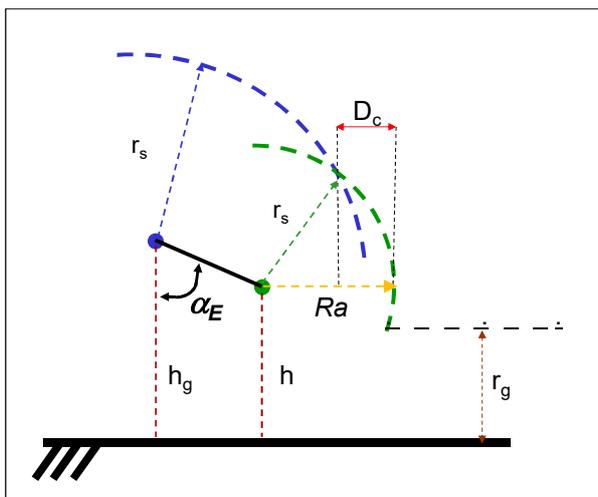


Alto custo: condutor, aterramentos, isolamento adicional, ↑ altura postes (p/ assegurar ∠ blindagem) → ↑ N (↓ efeito)

Na prática: algumas concessionárias utilizam, com sucesso

Raio de Atração

PEN 5019



IEEE:

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

$$r_g = 0,9 \cdot r_s$$

$$r_g > h:$$

$$Ra = \sqrt{rs^2 - (r_g - h)^2}$$

$$r_g \leq h:$$

$$Ra = r_s$$

Eriksson:

$$Ra = 0,84 \cdot h^{0,6} \cdot I^{0,74}$$

$$Ra_g = 0,67 \cdot h_g^{0,6} \cdot I^{0,74}$$

Para que CG seja efetivo contra DD's:

PEN 5019

- aterrado em todos os postes
- $\alpha_E \leq 45^\circ$ (p/ $h < 15$ m e $b < 2$ m; $\uparrow h_g \rightarrow \downarrow \alpha_E$)
- CFO > 250 kV (entre fases e condutor descida)
- R_g : < 10 Ω p/ CFO < 200 kV
40 Ω p/ CFO entre 300 kV e 350 kV

Para eliminar flashovers (virtual/):

PEN 5019

CG + PR's em todos os postes e fases

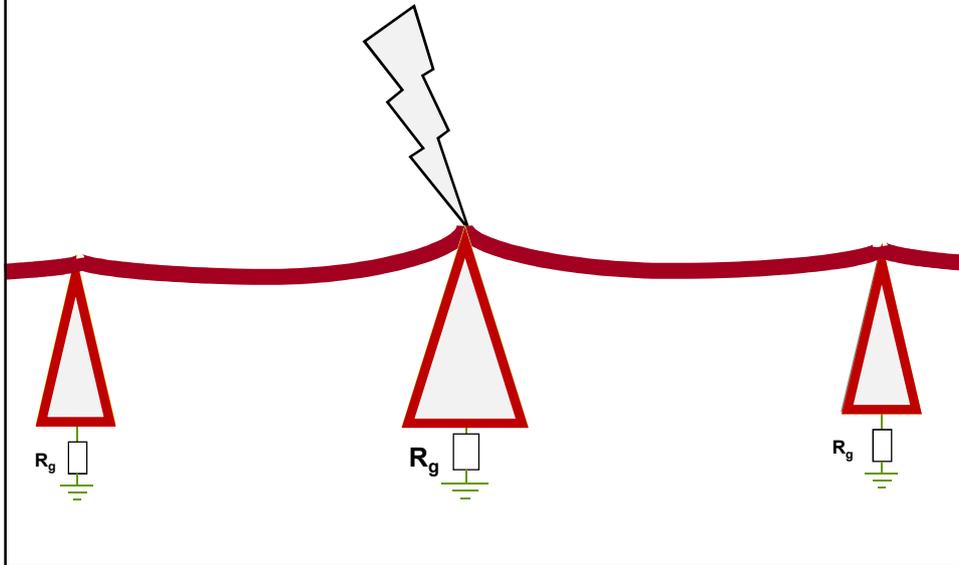
PR's: protegem contra o "backflashover"

CG: $\downarrow I$ nos PR's (\downarrow energia)

PR's: projeto CG menos dependente de CFO e R_g

Reflexões nos postes adjacentes

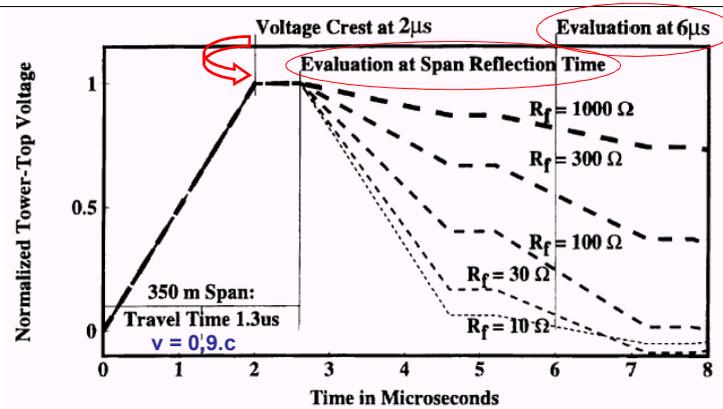
PEN 5019



LT's: efeito das reflexões nas torres adjacentes

PEN 5019

Tensão no topo da torre p/ vão de 350 m e diversos valores da resist. pé de torre ($R_f = R_g$)



NOTE—Combined OHGW impedance is 300 Ω .

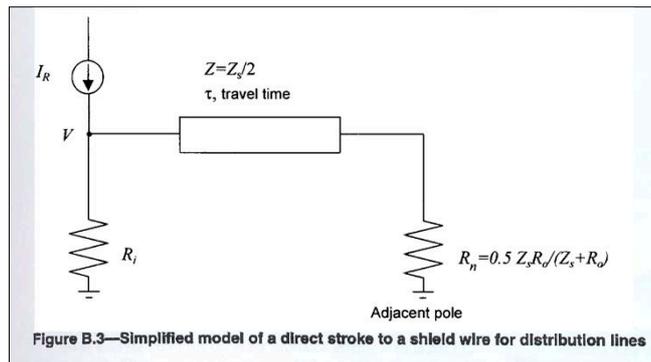
LD's: vãos curtos

PEN 5019

→ ondas refletidas ↓ crista e cauda

⇒ $t = 2 \mu s$ determina o "pto. flashover" (IEEE)

h_{poste} pequena → Z_{poste} e τ_{poste} não considerados



Ionização do solo (IEEE)

PEN 5019

R_0 : R_g (baixa I)

$R_i = f(i)$ (não-linear)

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (I_R/I_g)^2}}$$

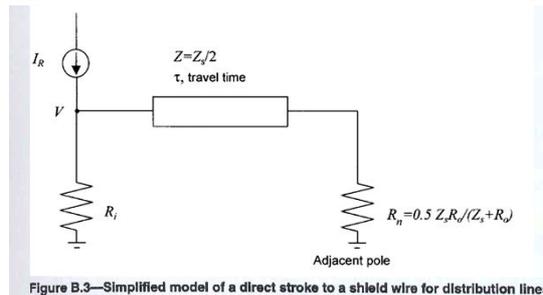
$$i_R = I_R \cdot Z / (R_0 + Z)$$

I_R : valor de crista

$$I_g = \frac{E_g \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_0^2}$$

ρ : resistiv. solo

E_g : gradiente de ioniz. solo (300 kV/m)



Tensão no ponto atingido (cabo guarda)

PEN 5019

$$V_T(t) = \frac{I_R}{2}(t) \cdot \left[Z_I - \frac{Z_w(1-\psi^N)}{1-\psi} \right] + I_R(\tau\tau) \cdot Z_w \cdot \left[\frac{(1-\psi^N)}{(1-\psi)^2} - \frac{N \cdot \psi^N}{(1-\psi)} \right]$$

$$Z_I = \frac{R_i \cdot Z}{Z + R_i} \quad \psi = \frac{(Z - R_i) \cdot (Z - R_n)}{(Z + R_i) \cdot (Z + R_n)} \quad Z_w = \frac{(2 \cdot R_i^2 \cdot Z) \cdot (Z - R_n)}{(Z + R_i)^2 \cdot (Z + R_n)}$$

N : nº reflexões nos postes adjacentes ($> \text{n}^\circ \text{ inteiro} \leq t / 2 \cdot \tau$)

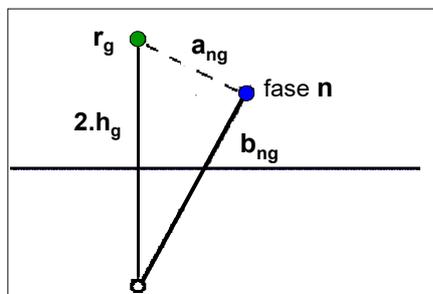
Na fase n : $V_{\text{ind}}(t) = k_n \cdot V_T(t)$

k_n = coeficiente de acoplamento

Coeficiente de acoplamento (k_n)

PEN 5019

$$k_n = \frac{Z_{n-g}}{Z_g} \quad Z_{n-g} = 60 \cdot \ln \left(\frac{b_{ng}}{a_{ng}} \right) \quad Z_g = 60 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_g}{r_g} \right)$$



$$k_n = \frac{\ln \left(\frac{b_{ng}}{a_{ng}} \right)}{\ln \left(\frac{2 \cdot h_g}{r_g} \right)}$$