

IT 306 – Tópicos em Sistemas de Energia Elétrica III

Aula-05

Modelagem de Torres de Transmissão no Sistema Elétrico de Potência

Prof. Dr. José Pissolato Filho

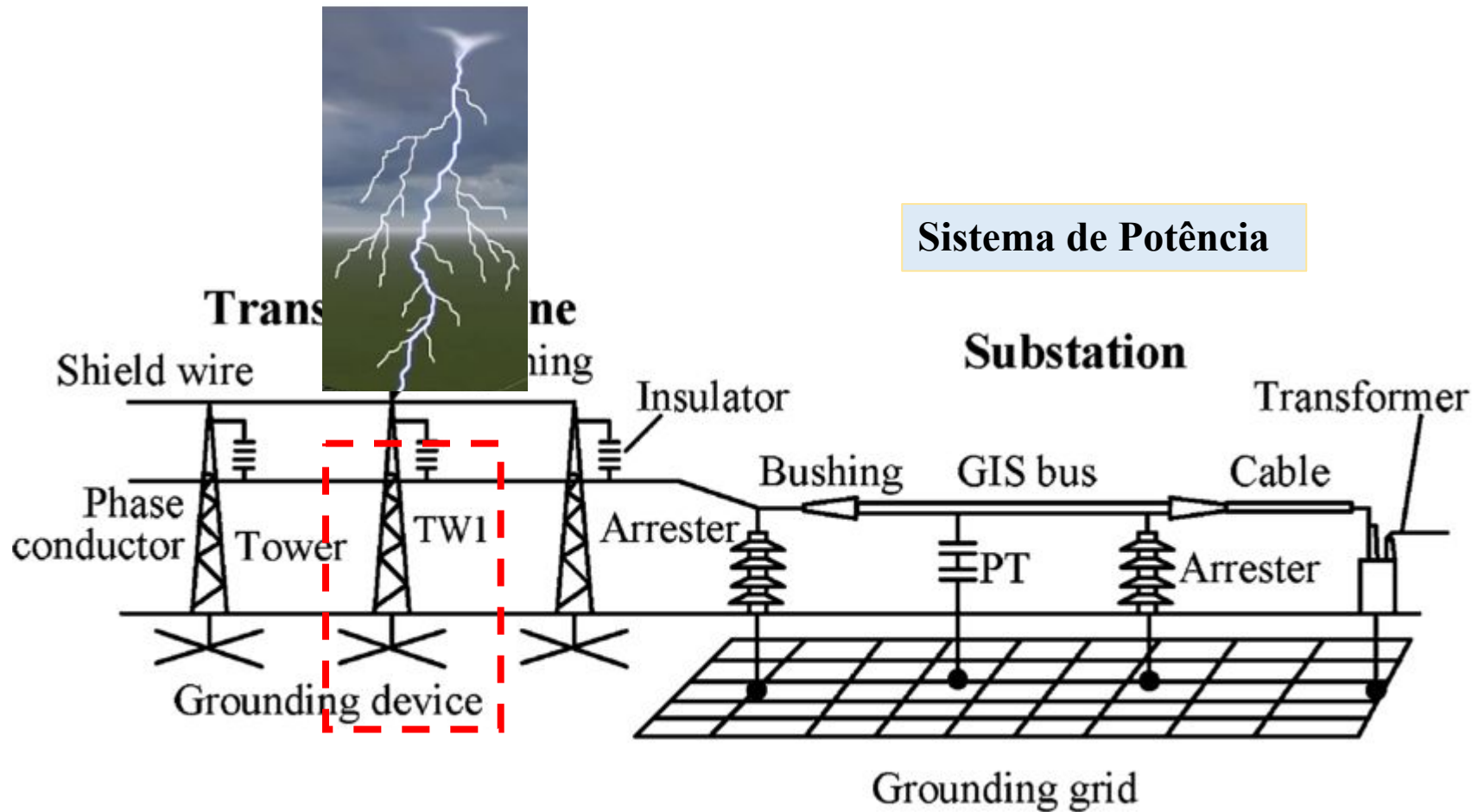
Dr. Anderson Ricardo Justo de Araújo

Dr. Jaimis Sajid Leon Colqui

Setembro 2023



Sistema de potência frente à descargas atmosféricas



Estrutura

- Introdução as torres de transmissão
- Backflashover e flashover
- Modelagem de torres convencionais e elevadas
- Aterramento de torres de transmissão
- Sobretensões provocadas por DAs



Torres de transmissão (TTs)

As TTs são estruturas metálicas presentes no sistema de potência com o objetivo de sustentar os cabos (condutores de fase e os cabos pára-raios) para o transporte de energia. Seu formato depende do nível de tensão, tipo (AC ou DC), relevo.

Deve-se respeitar as distâncias adequadas de segurança (campos eletromagnéticos), e gerar o menor impacto visual e ambiental.

Em geral, TTs são construídas na forma de treliças de aço galvanizado montadas sobre uma base de concreto e eletrodos de aterramento.

Ref. https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16178/16178_6.PDF



Torres Convencionais



Autoportante
circuito duplo
400 kV/45 m



Estaiada
440 kV/46 m



Autoportante
circuito simples
138 kV/25 m

Torres de transmissão elevadas



Torre no sistema
Tucuruí-Manaus-Macap
á
500 kV/300 m
Aprox. Torre Eiffel

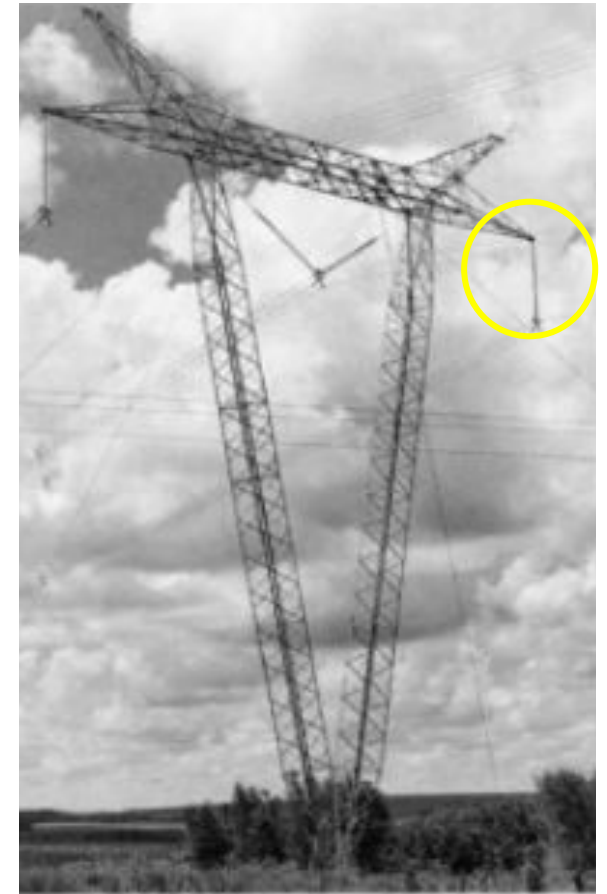


China-Yangtze
River
500 kV/345 m

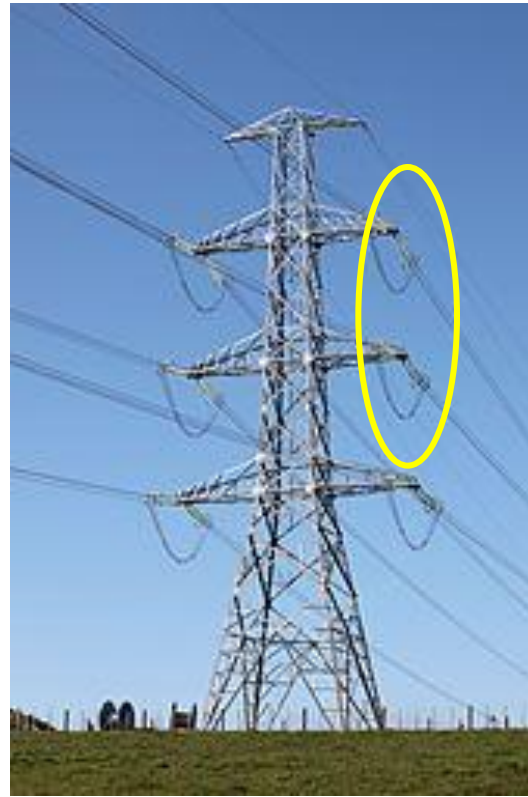


Germany-Rio Elba
Elbekreuzung-2
380 kV/227m

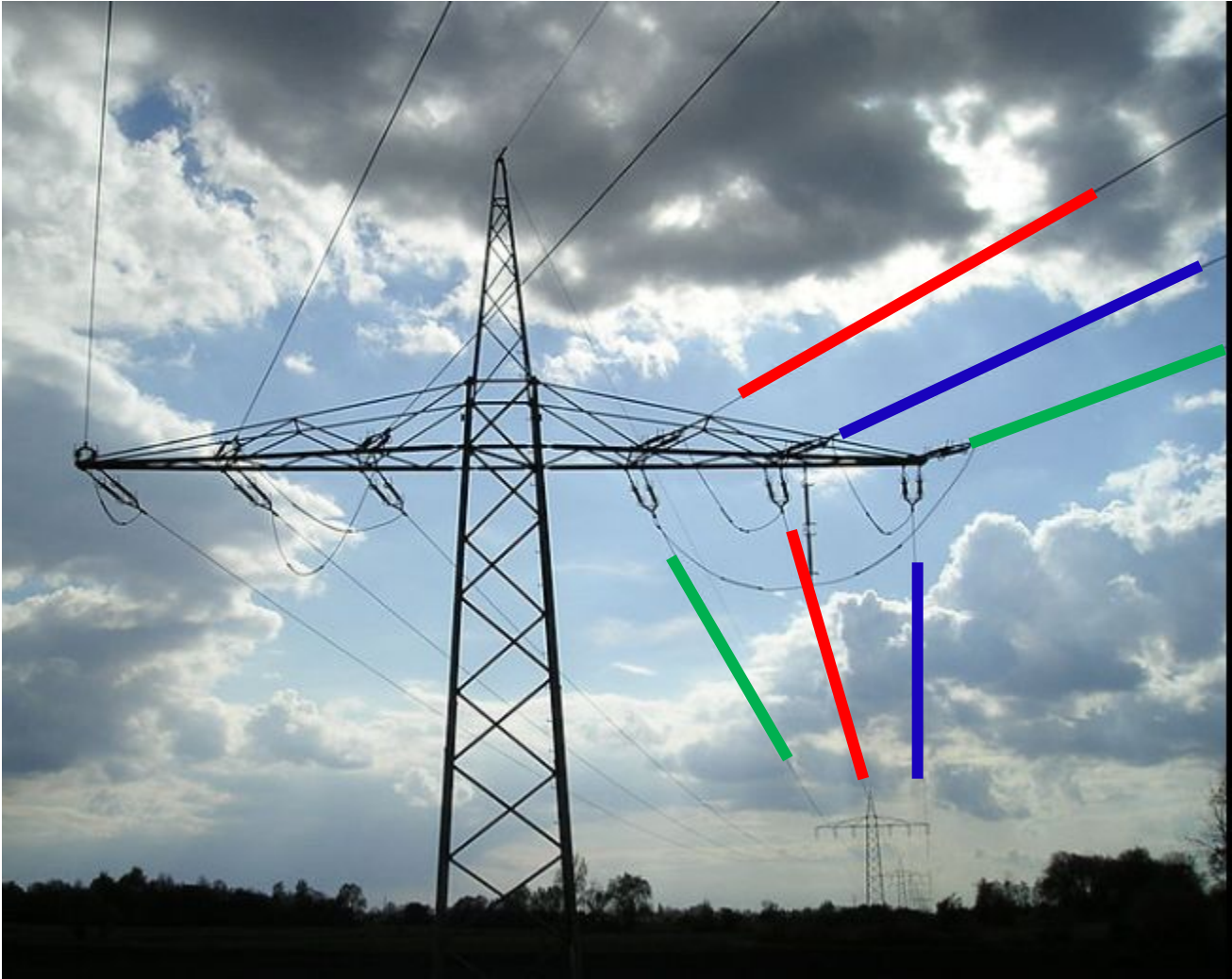
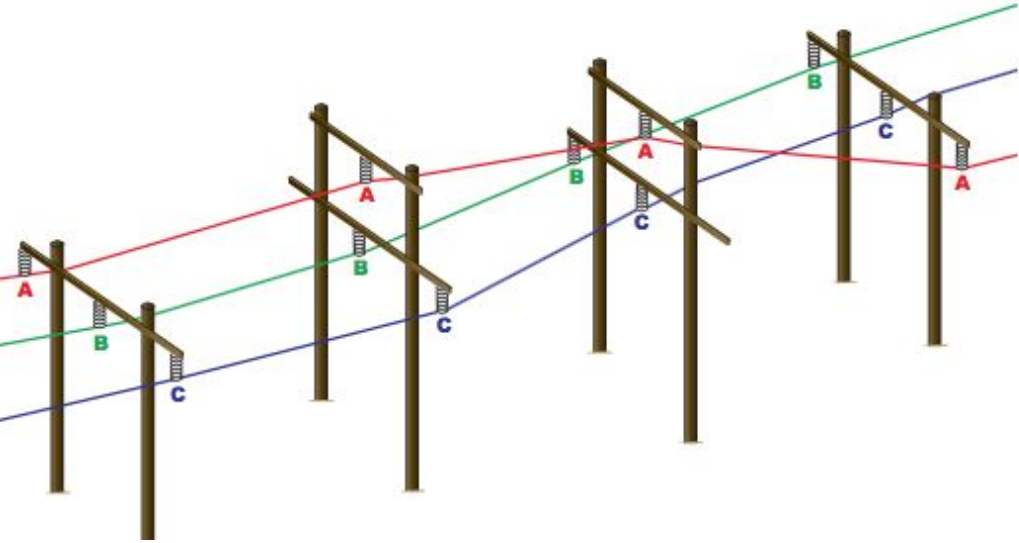
Torres de transmissão- tipo suspensão



Torres de transmissão- tipo retenção ou terminal

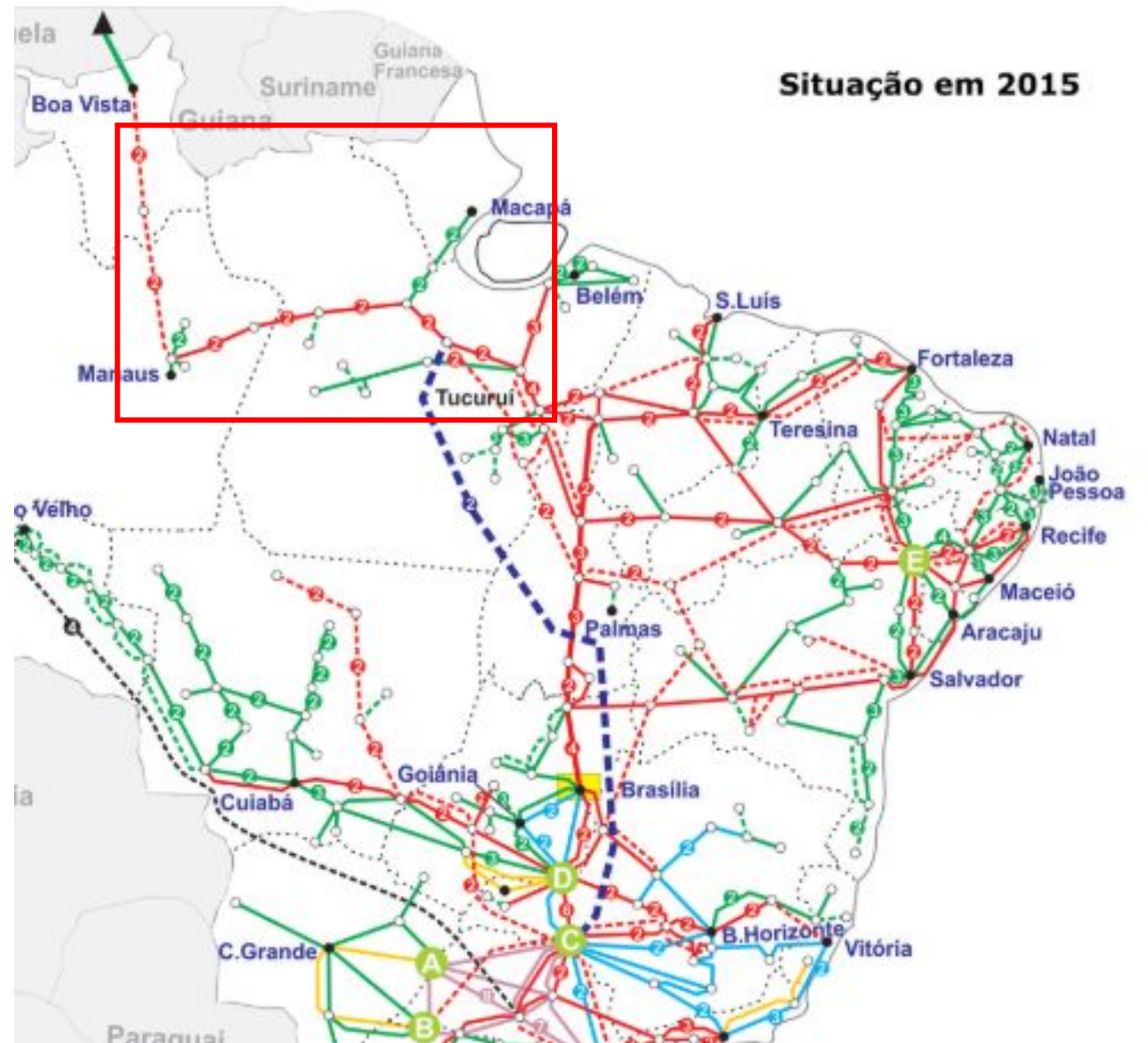


Torres de transmissão- tipo transposição



Torre gigante da Tucuruí-Manaus-Macapá

As torres elevadas (gigantes) são necessárias para que a linha de transmissão esteja acima das copas das árvores, evitando assim o desmatamento de grandes áreas de mata nativa para o corredor de passagem da TT e nas margens do rio Amazonas (travessia de embarcações) reduzindo o impacto ambiental ao longo de seu comprimento.



Torres gigantes do sistema Tucuruí-Manaus-Macapá



Descargas Atmosféricas em TTs

- ❖ As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de distúrbios causados em linhas de transmissão (LTs) no Brasil; As descargas atmosféricas diretas geram sobretensões nas torres e podem causar o backflashover (BF), ou faltas devido aos flashovers (falhas de blindagem). Existem as descargas indiretas que também provocam as sobretensões nas LTs.
- ❖ Os BFs exercem importante influência no desempenho de um sistema de transmissão, pois estima-se que entre 40% a 70% dos desligamentos de linhas de transmissão, com a incidência de descargas atmosféricas, acontecem devido esses fenômenos
- ❖ Os BFs causam sérios danos nas linhas de transmissão, cadeias de isoladores, problemas de estabilidade, desligamentos (blackouts) e perdas econômicas.
- ❖ A análise de descargas atmosféricas nas torres das linhas de transmissão desempenham um papel fundamental na sua proteção dos componentes do sistema de potência e diversos aspectos relacionados às descargas e o modelo da torre devem ser levadas em consideração.

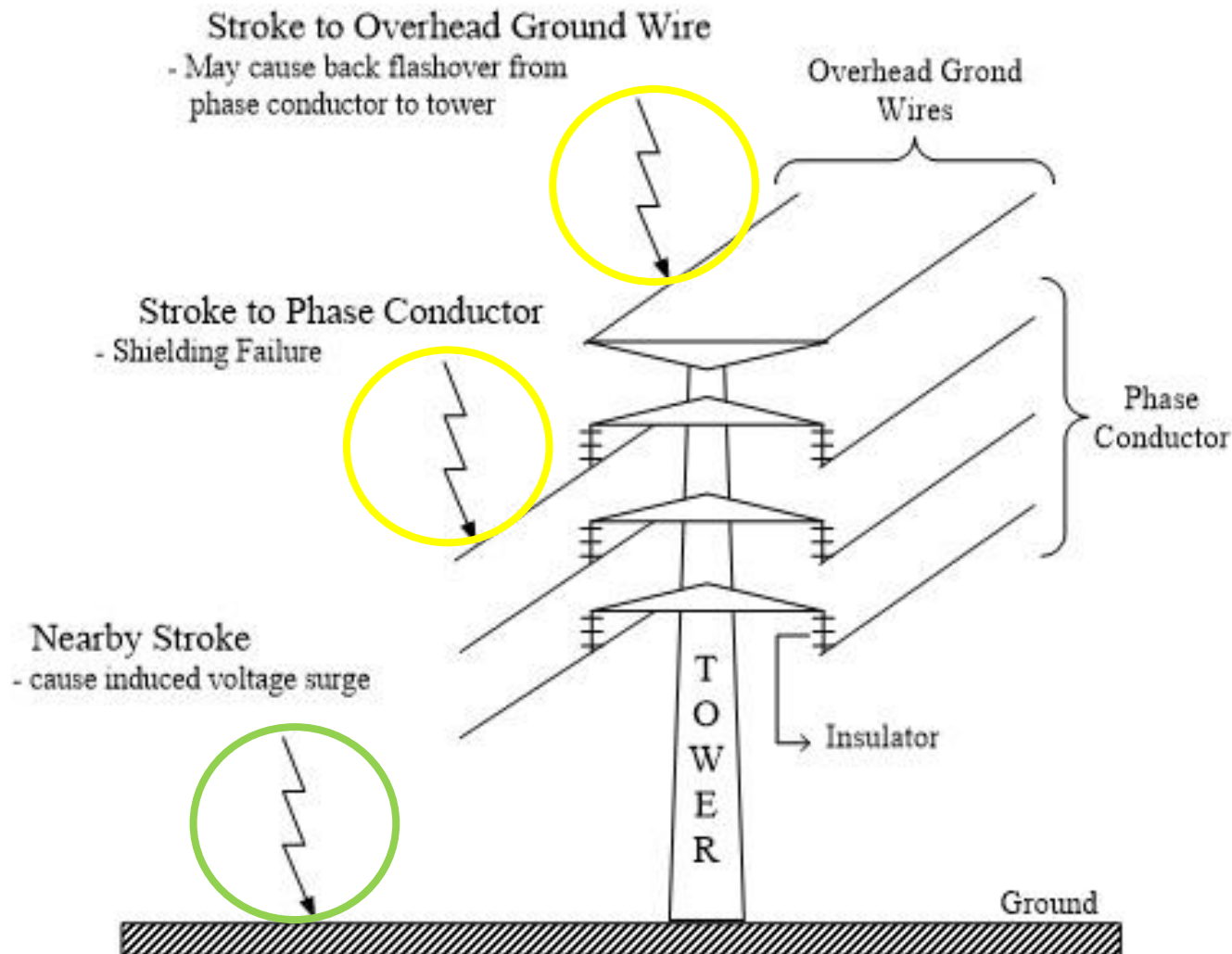
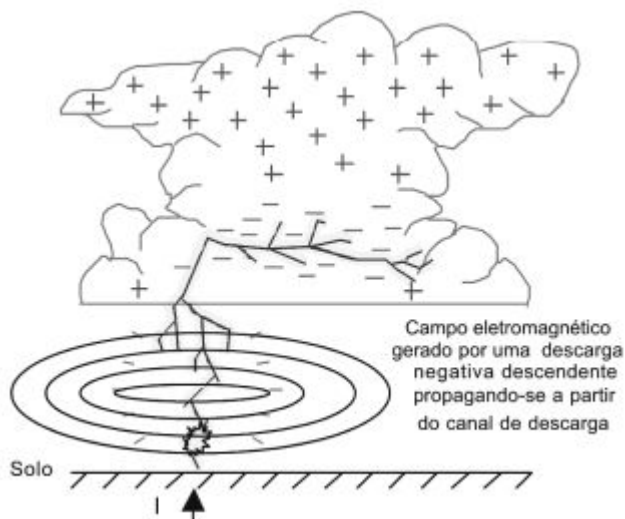
Tipos de DAs nas LTs

Descargas Diretas- Atingem os condutores das LTs

- ❖ Cabos de fase-Falha de blindagem;
- ❖ Topo da torre ou cabo pára-raio-BF.

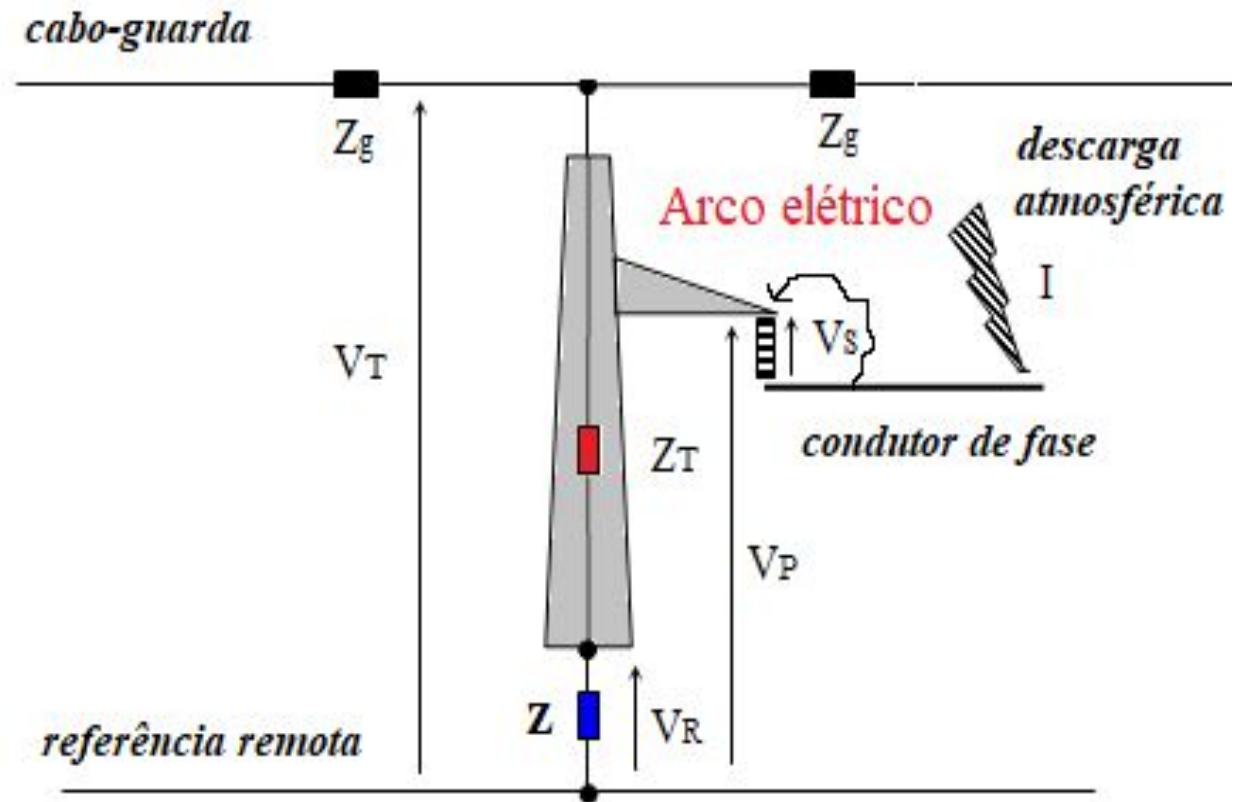
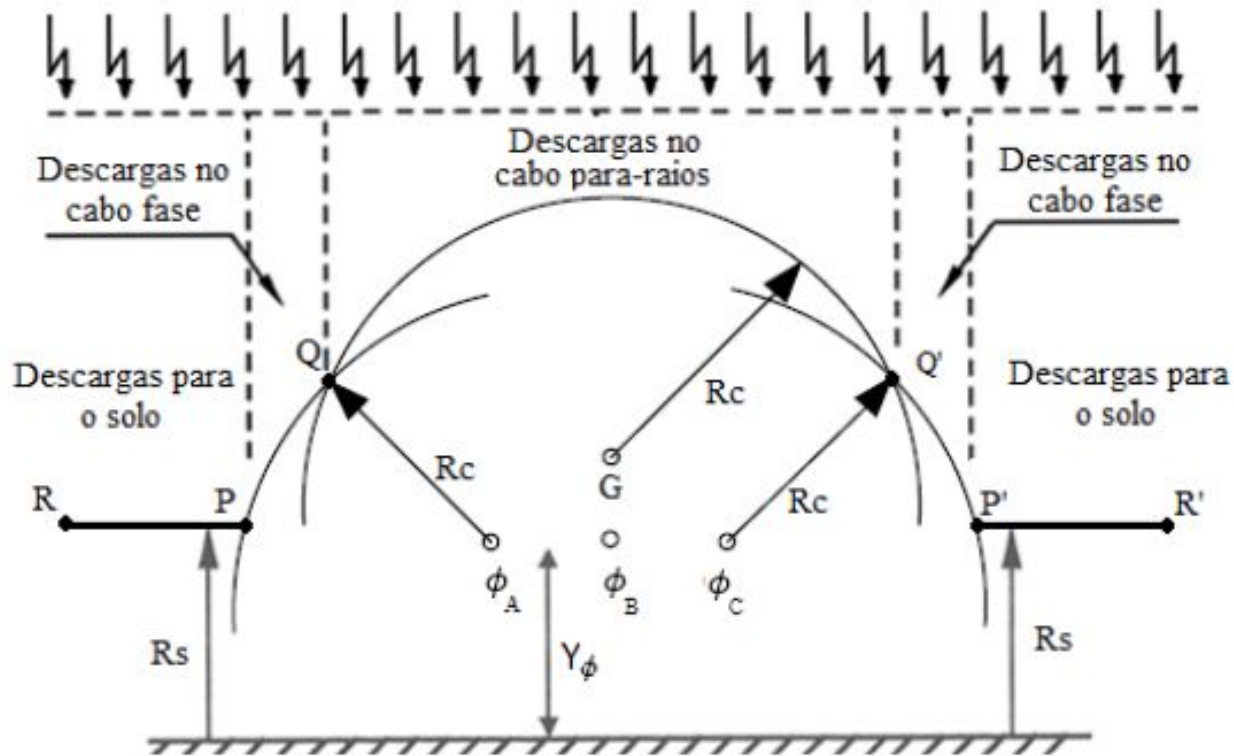
Descargas indiretas- Atingem o solo ou estruturas próximas às LTs

- ❖ Tensões induzidas nos condutores de fase.



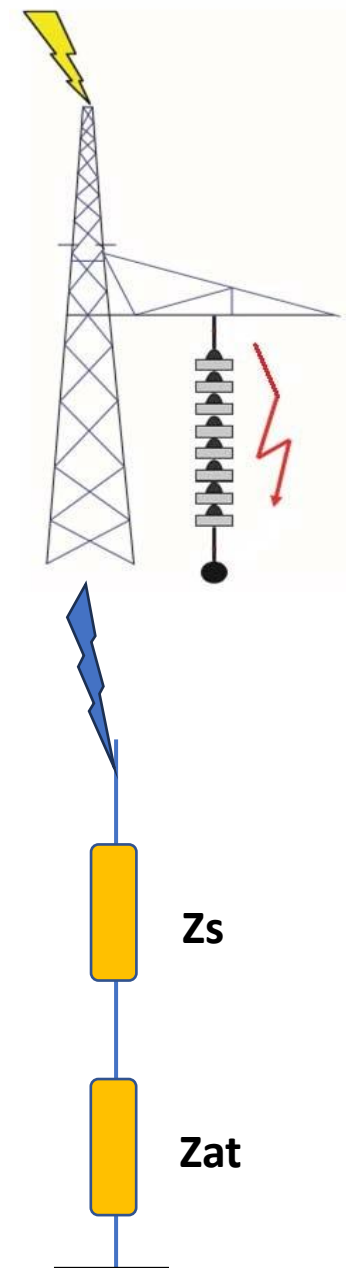
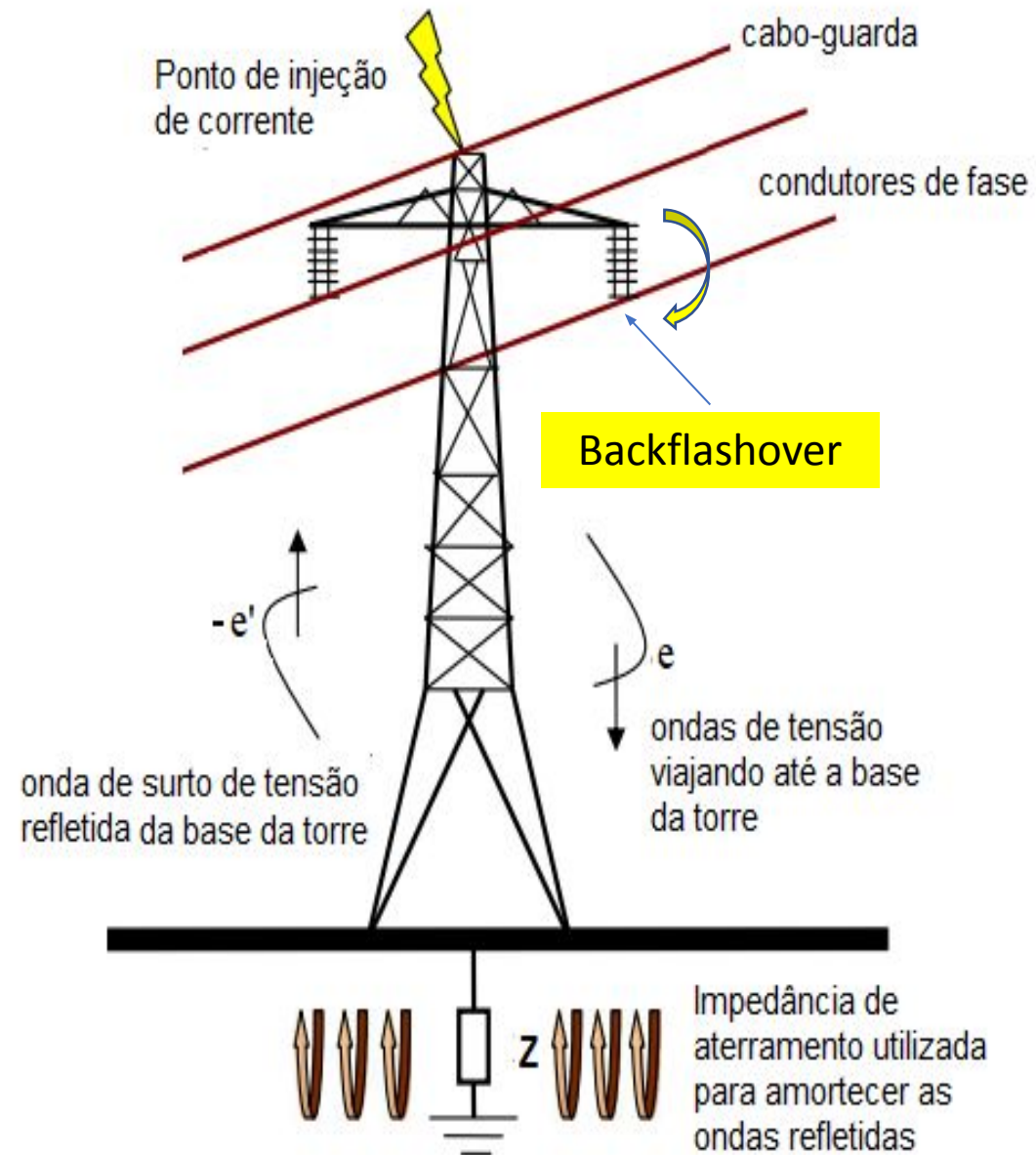
Flashover

Quando uma descarga atmosférica incide diretamente nos condutores de fase de uma linha de transmissão, devido à falha de blindagem nos cabos guarda, pode ocorrer o rompimento da rigidez dielétrica do ar e a formação de um arco elétrico de contorno sobre a cadeia de isoladores. Esse fenômeno é denominado flashover

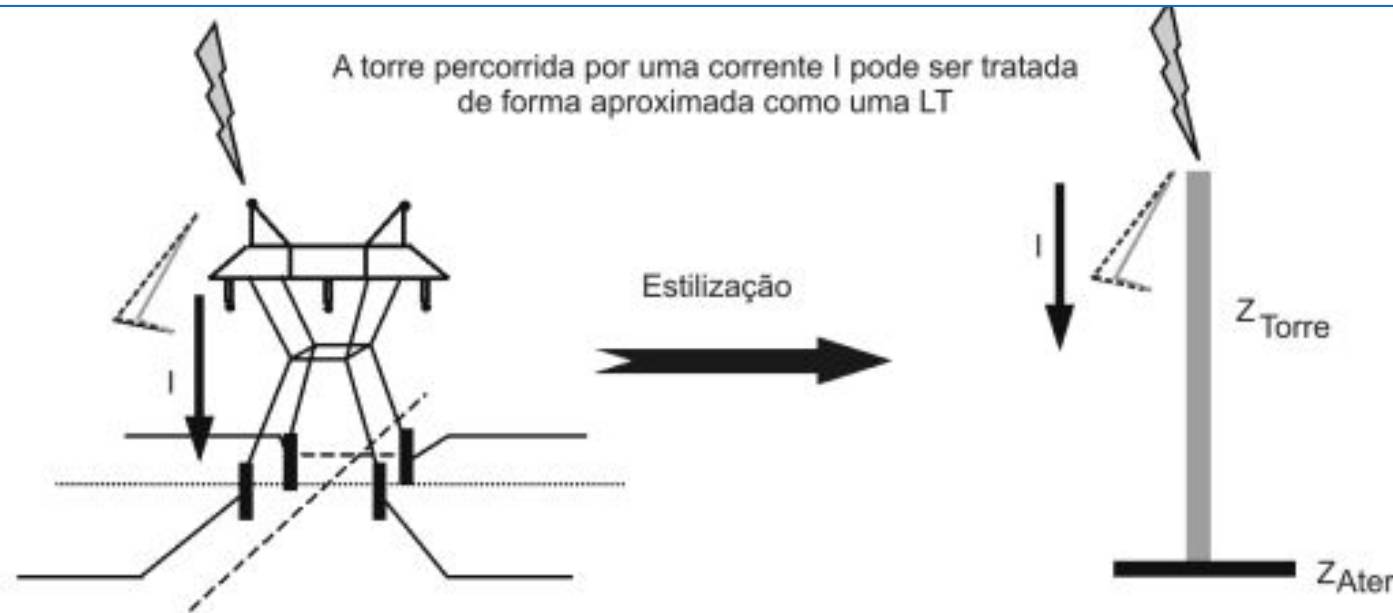


Backflashover

- ❖ **Backflashover**: Corresponde à formação de um arco elétrico na cadeia de isoladores, devido à incidência de descargas atmosféricas na torre ou nos cabos guarda.
- ❖ As ondas de tensão são refletidas entre a impedância de aterramento e impedância de surto da torre (entre o topo e a base da TT), elevando o potencial elétrico ao longo da estrutura metálica devido as múltiplas reflexões ao longo da torre.
- ❖ Se essas tensões elétricas exceder o *limiar crítico de flashover* (CFO), referente a suportabilidade do isolador, um arco elétrico (BF) ocorrerá sobre a cadeia de isoladores. O sistema de proteção interpreta como um circuito-circuito e a proteção atua-Desligamento da LT .



Ondas viajantes na TTs

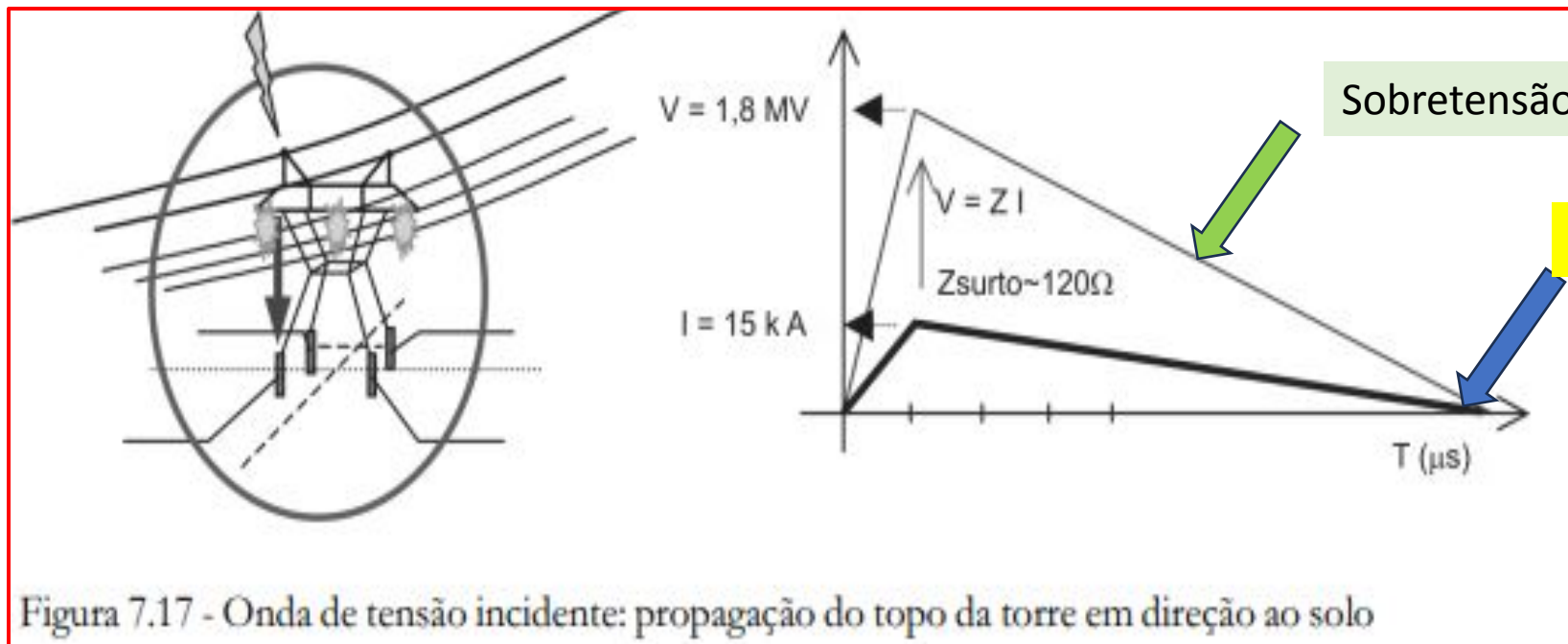
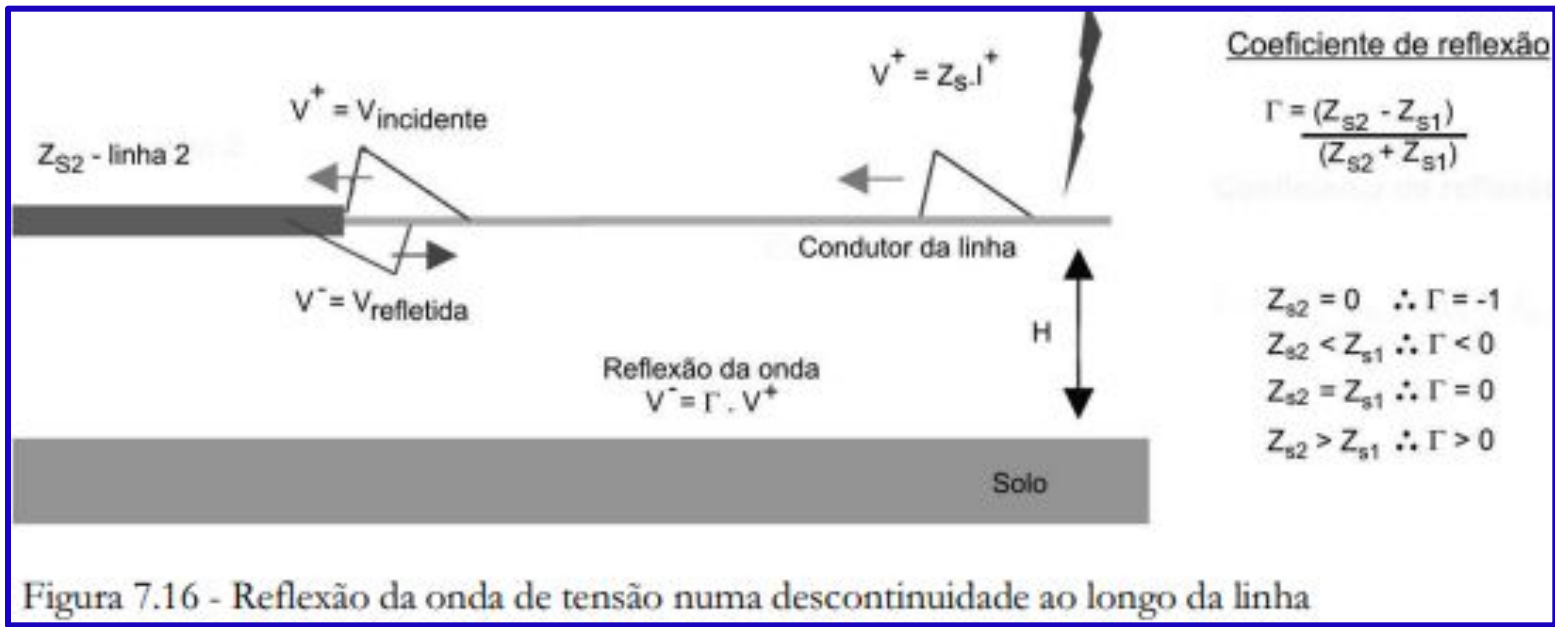


DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
uma abordagem de engenharia



Artiber

Figura 7.14 - Estilização da onda de corrente e da torre da linha de transmissão



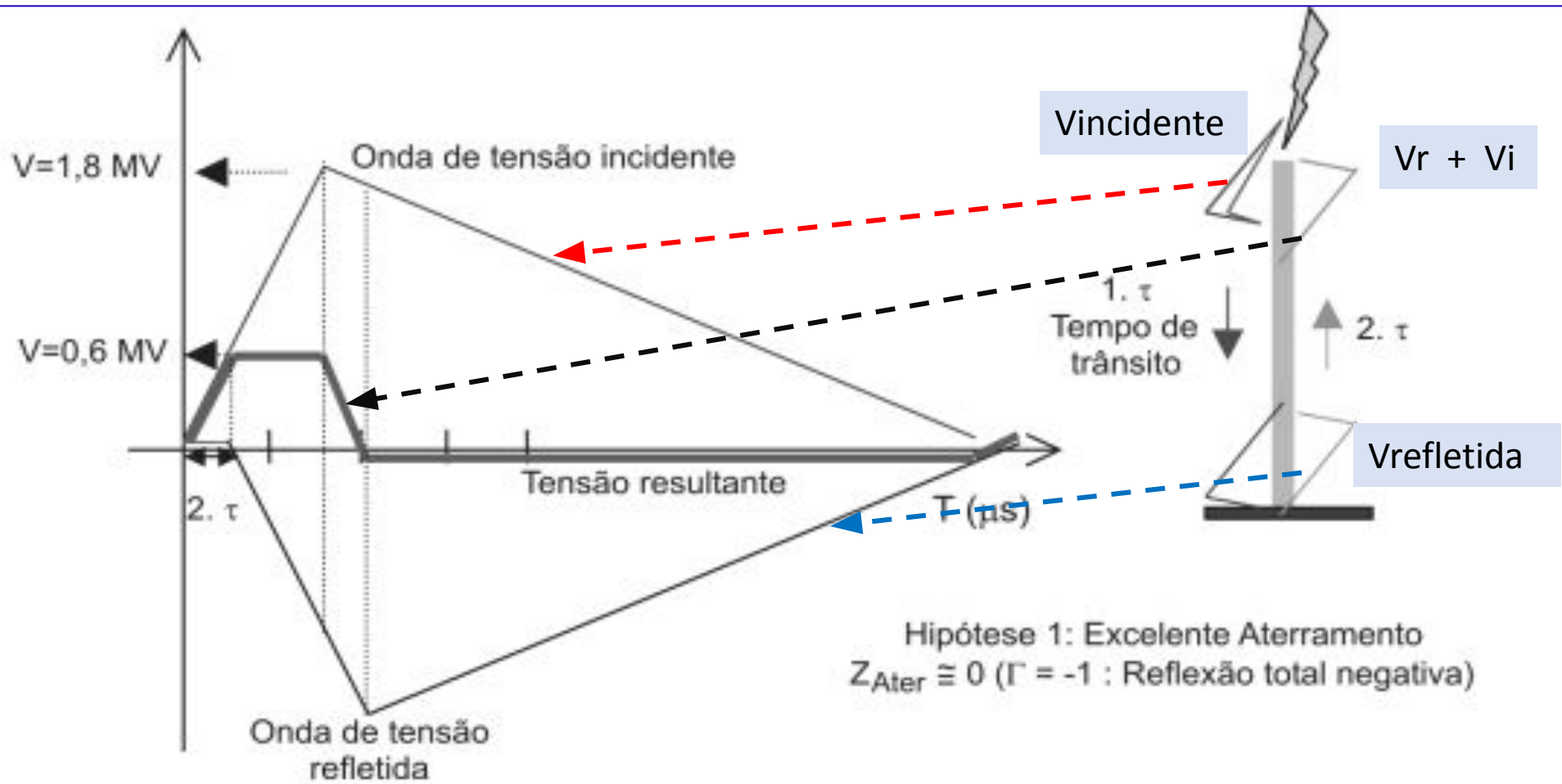


Figura 7.18 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $Z_{Ater} = 0 \Omega$)

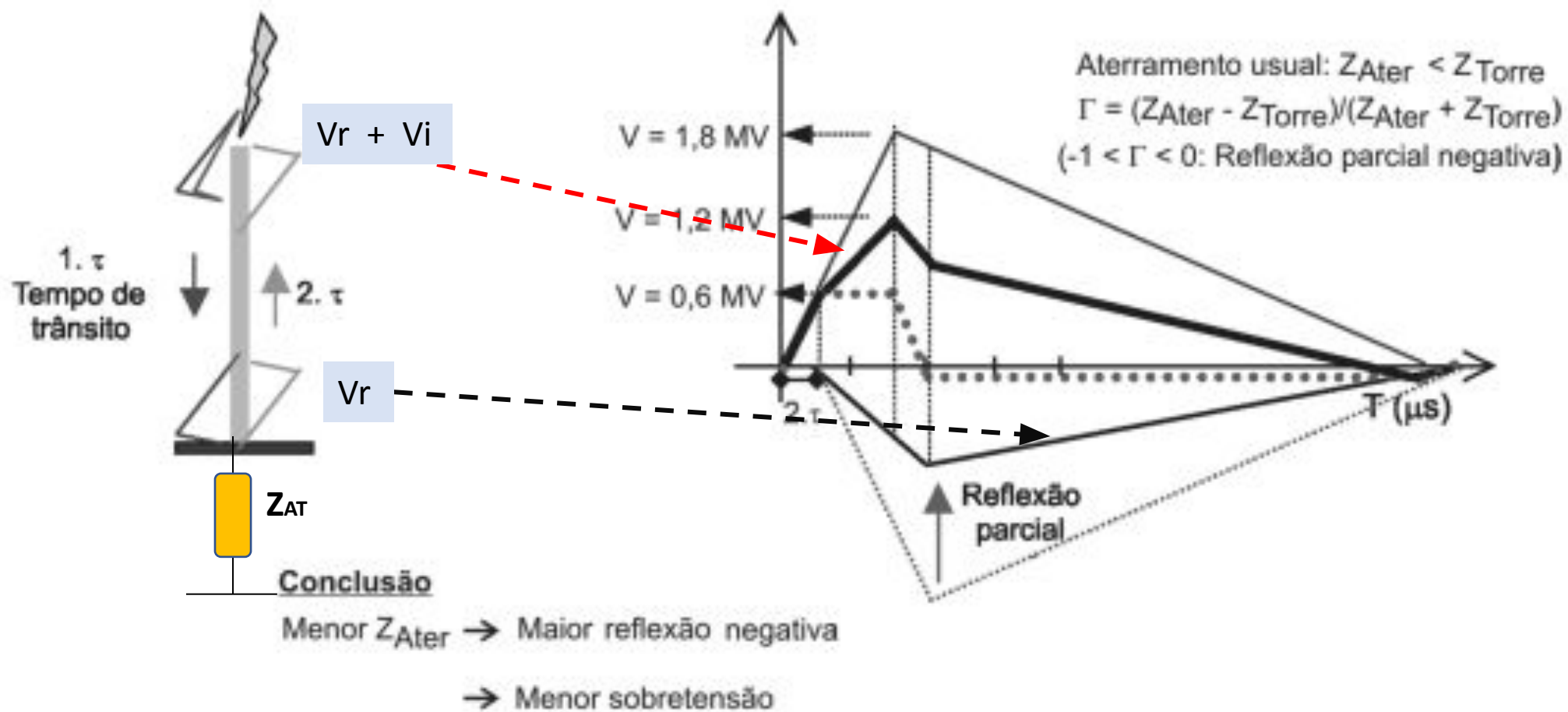
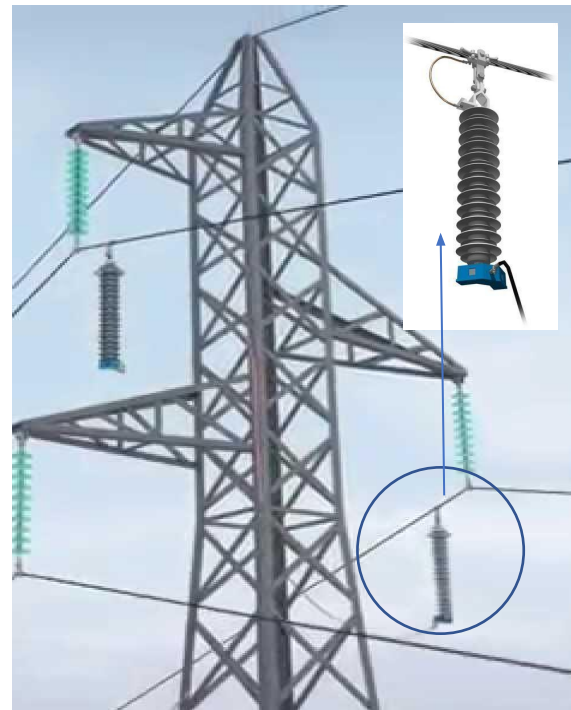


Figura 7.19 - Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $0 < Z_{Ater} < Z_{Torre}$)

BFs afetam na qualidade da energia elétrica e provocam interrupções no fornecimento de energia. Além de perdas no faturamento e penalizações para as concessionárias.

Para a redução do BFs é necessário:

- ❖ Dimensionar corretamente a estrutura da torre ($\downarrow Z_s$) e a cadeia de isoladores;
- ❖ Instalar de cabos-guarda nas torres;
- ❖ Instalar supressores de surto (surge arresters) (proteção dos isoladores);
- ❖ Diminuir a impedância de aterramento da torre de transmissão (\downarrow das ondas refletidas de tensão).
- ❖ Instalação de underbuilt wires



BFs e surge arresters (pára-raio de linhas)



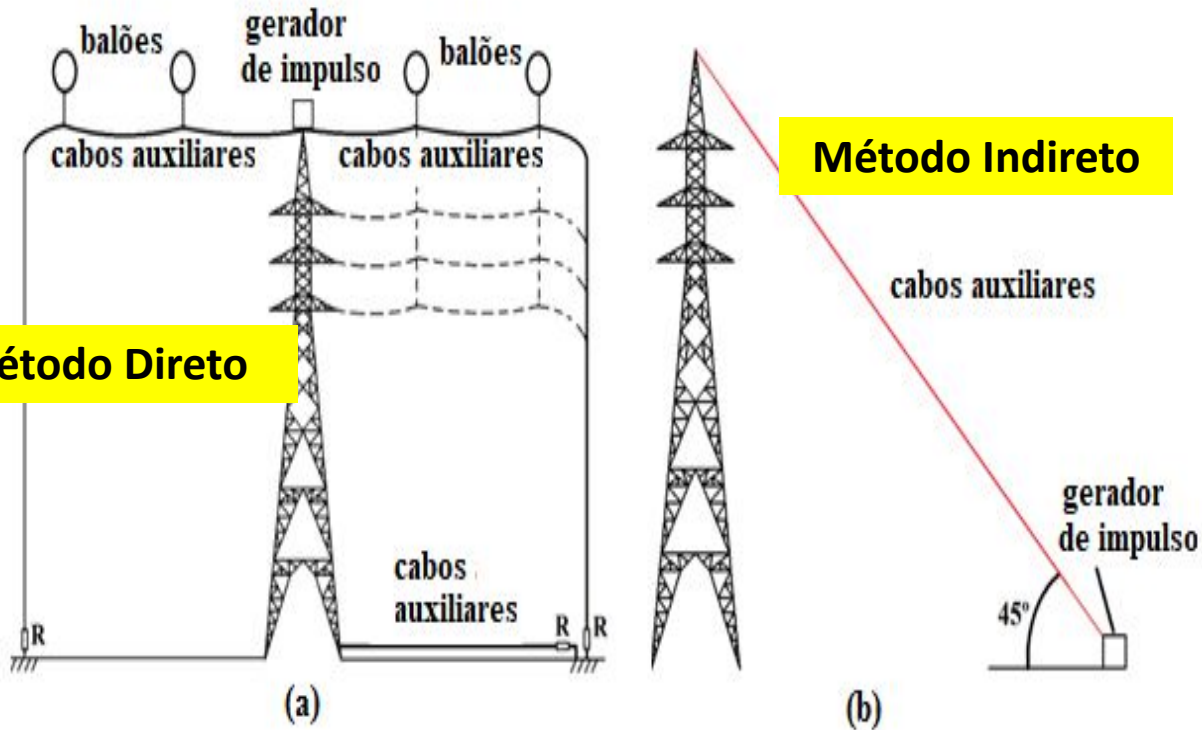
Modelos de TTs

- ❖ Diversos modelos de torres de transmissão foram desenvolvidos e aperfeiçoados pelos pesquisadores para o cálculo das sobretensões desenvolvidas pelos distúrbios. Nesses modelos, a impedância de surto e a impedância de aterramento são fundamentais para a análise transitória, principalmente quando as torres são submetidas às descargas atmosféricas;
- ❖ Em trabalhos mais antigos, a impedância de aterramento era representada por uma resistência pura conectada aos pés da torre, o que levar a resultados incorretos;
- ❖ Além disso, tais modelos não consideram:
 - (i) as treliças e os braços das torres de transmissão;
 - (ii) A dependência com a frequência da resistividade e permissividade do solo;
 - (iii) a impedância harmônica de aterramento;
 - (iv) Altura elevada, como as torres gigantes.

Métodos para estimação da impedância de surto

Diversos métodos experimentais têm sido realizados para avaliar as tensões causadas pelas descargas atmosféricas e estimar a impedância de surto da torre.

Métodos baseados em medições em torres de transmissão em escala reduzida são pois são mais econômicos do que os modelos em torres do tamanho real, além de serem mais flexíveis e de fácil implementação.



Impedância de surto (Diversas fórmulas)



$$Z_{surto} = \frac{V_P}{I_P}$$

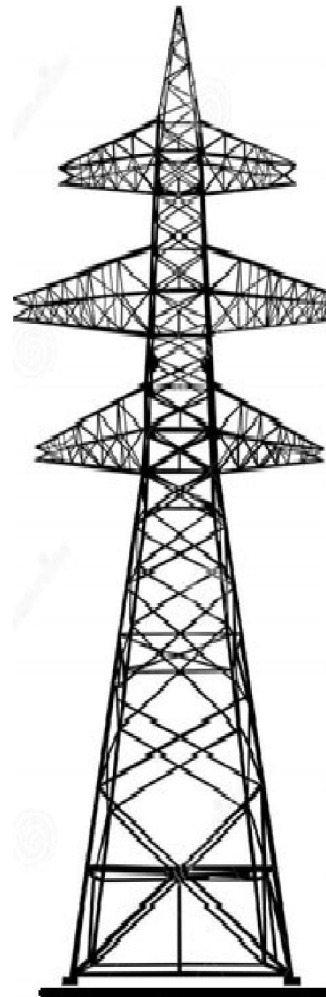
$$Z_{surto} = \frac{V_{max}}{I(t_{max})}$$

Modelagem de torres de transmissão

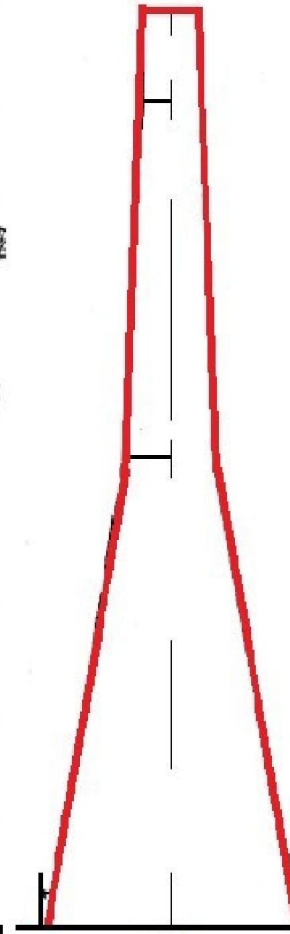
Diversos modelos foram desenvolvidos para representar uma TT convencional e calcular sua impedância de surto.

Esses são classificados em:

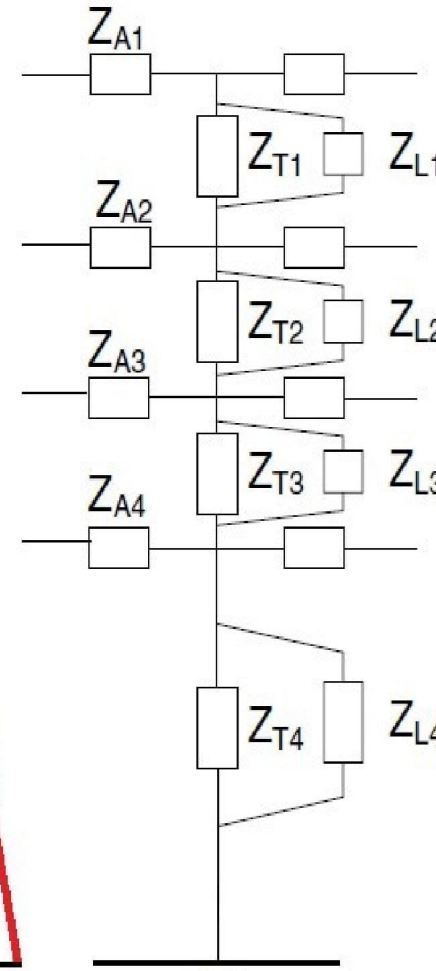
- (a) Modelos aproximados por geometria simples;
- (b) Modelos compostos por multicondutores;
- (c) Modelos de torre "multi-andares";
- (d) Modelos de torres dependentes da frequência-Quadripolos.



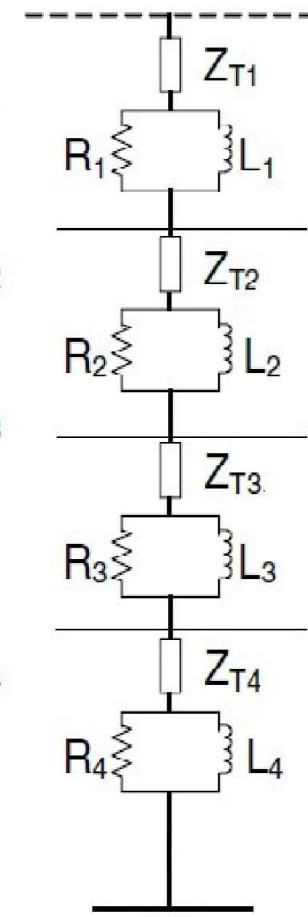
(a)



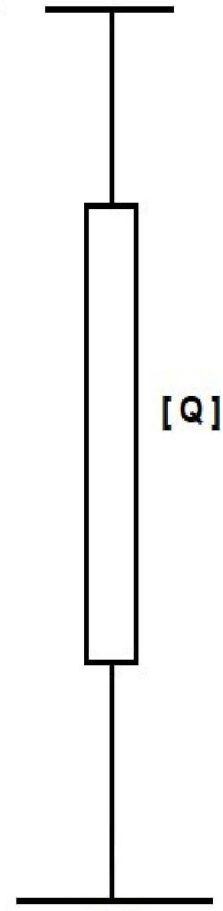
(b)



(c)



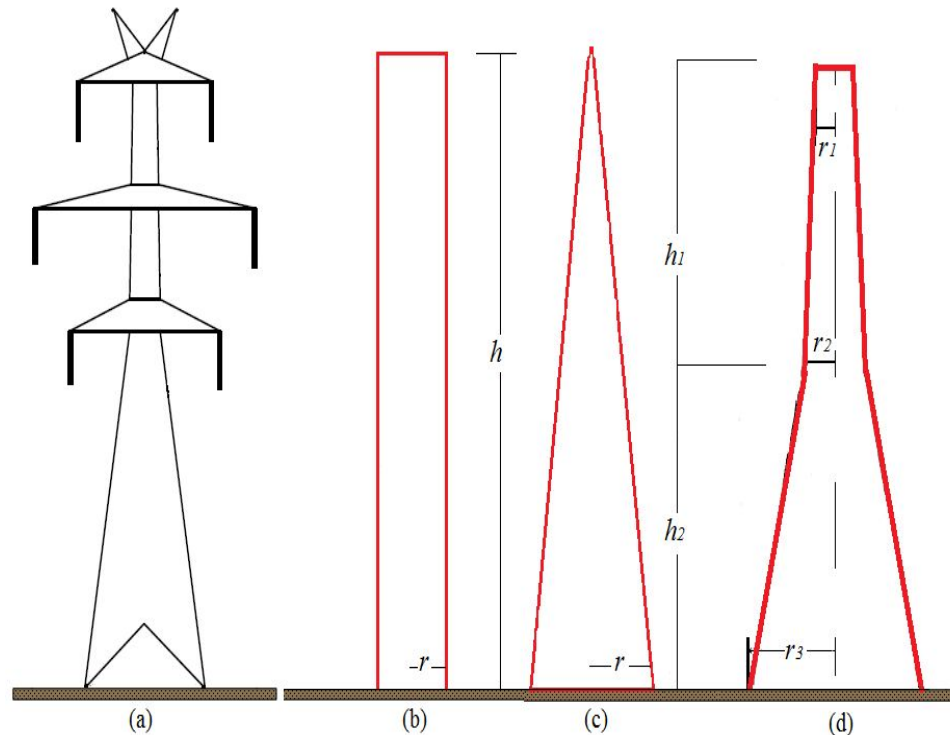
(d)



(e)

Modelos Aproximados por Geometrias simples

- ❖ A torre é representada por cilindros, cones ou sólidos truncados.
- ❖ A velocidade de propagação ao longo da torre é estabelecida entre $0.85c$ e $1c$ (c = velocidade da luz);
- ❖ Equações simples para o cálculo da impedância de surto são propostas.
- ❖ O modelo despreza os braços da torre, as treliças e a impedância de aterramento.-Erros significativos



Ref.	Aprox.	Impedância de surto da torre
Chisholm	Cônica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right)$
Chisholm	Cilíndrica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right) - 60$
Chisholm	Tronco de sólidos	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} T \right) \right)$
Wagner, Hileman	Cilíndrica	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r_2} \right) - 2 \right]$
Sargent, Darveniza	Cilíndrica	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_3} \right) - 1 \right]$
Sargent, Darveniza	Cônica	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right)$

$$T = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2}$$

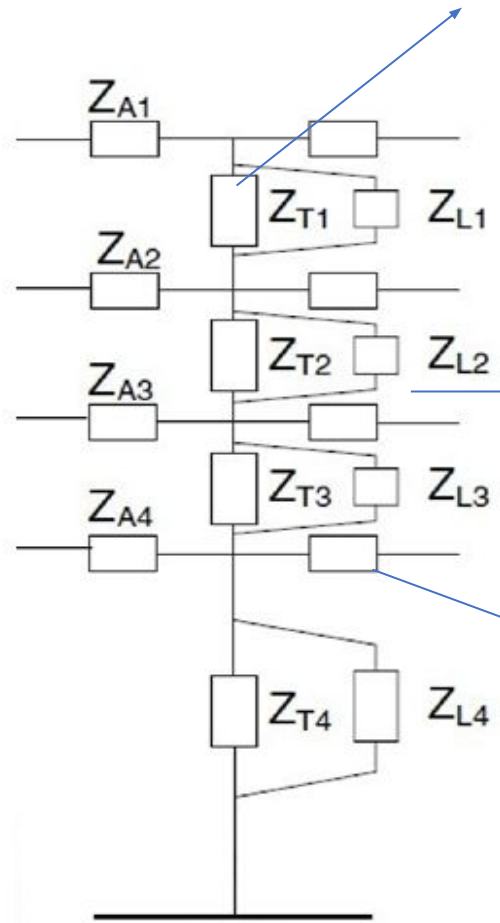
Modelos multicondutores

- ❖ A torre é composta por linhas curtas sem perdas (ZT) que representam as pernas, as treliças (ZL) e os braços (ZA);
- ❖ A torre é dividida em 4 trechos, e cada impedância é determinada por uma fórmula empírica.
- ❖ A impedância de cada parte da torre é dada em função das dimensões e geometrias, obtidos;
- ❖ Silhueta de uma torre de alta tensão; Modelo multicondutor vertical incluindo barras diagonais e braços de torre.



$$Z_{T,kk} = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right]$$

$$Z_{T,km} = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{R_{km}} \right) - 2 \right]$$



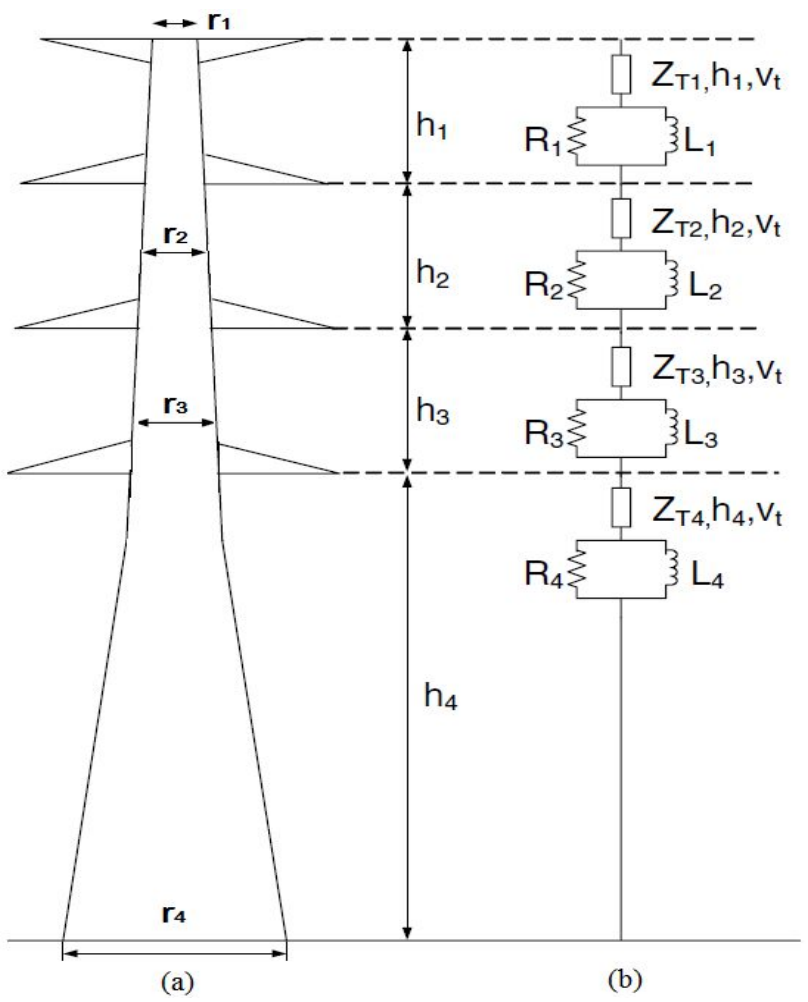
$$Z_T = \frac{1}{n} (Z_{T,11} + Z_{T,12} + \dots + Z_{T,1n})$$

$$Z_{Lk} = 9Z_{Tk}$$

$$Z_{Ak} = 60 \ln \left(\frac{2h_k}{r_{Ak}} \right)$$

Modelos “Multi-andares”

- ❖ Composto por 4 ou 5 seções, na qual cada seção consiste de uma linha de transmissão sem perdas em série com um elemento R-L paralelo, que são incluídos para levar em conta o efeito da atenuação das ondas viajantes ao longo dos condutores;
- ❖ Os parâmetros desse modelo foram deduzidos a partir de medições experimentais;
- ❖ É usado nas análises das sobretensões em linhas de transmissão com boa precisão e nos software EMTP e PSCAD;



$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right]$$

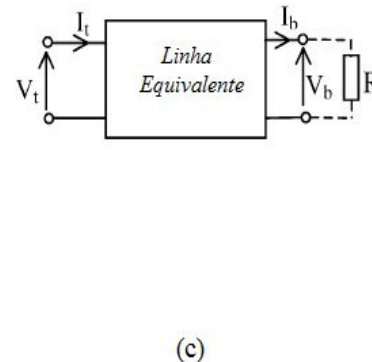
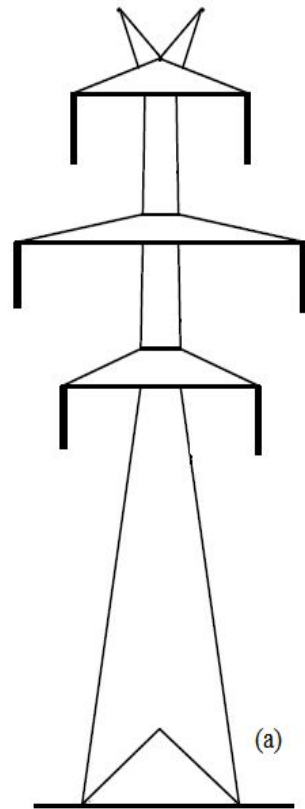
$$R_i = \frac{-2Z_{Ti} h_i}{h_1 + h_2 + h_3} \ln(\sqrt{\gamma}) \quad \dots \quad i=1-3$$

$$R_4 = -2Z_{T4} \ln(\sqrt{\gamma})$$

$$L_i = R_i \frac{h}{v_T} k_i$$

Modelos de torres dependentes da frequência

- ❖ Representam a torre de transmissão por linha de transmissão no domínio da frequência.
- ❖ A torre de transmissão é representada por uma linha uniforme, como uma impedância de surto dependente da frequência.
- ❖ A torre é representada por um *quadripolo* e as correntes e tensões são descritas pelas equações hiperbólicas da linha no domínio da frequência.



$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma h) & Z_C \sinh(\gamma h) \\ \frac{\sinh(\gamma h)}{Z_C} & \cosh(\gamma h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ I_b \end{bmatrix}$$

$$Z_C = \left[\frac{R L j}{G C j} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Modelagem de torres no ATP

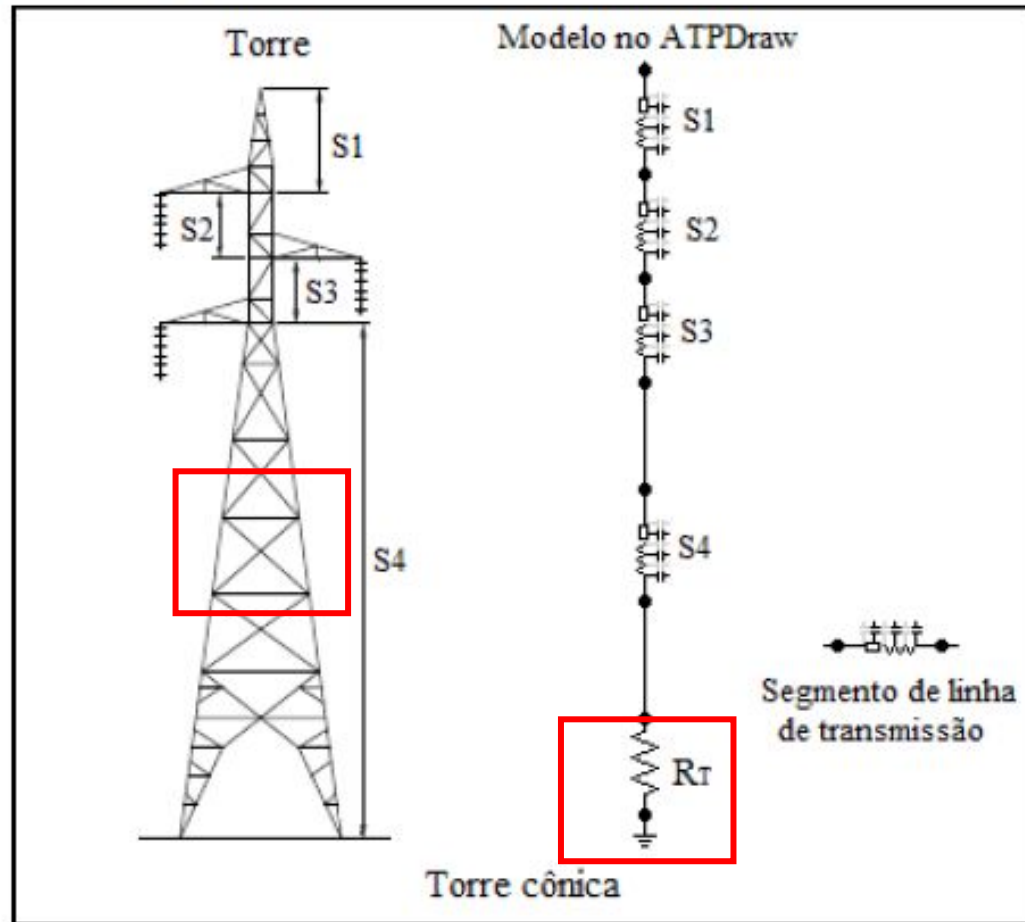
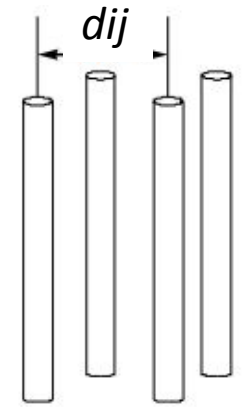


Figura 3-17: Modelagem da torre cônica no ATPDraw.

$$Z_{ii} = 60 \left(\ln \frac{4h}{r} - 1 \right)$$

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d_{ij}}{h} - 60 \sqrt{1 + \frac{d_{ij}^2}{4h^2}}$$

$$Z_{eq} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{1j}}{n}$$

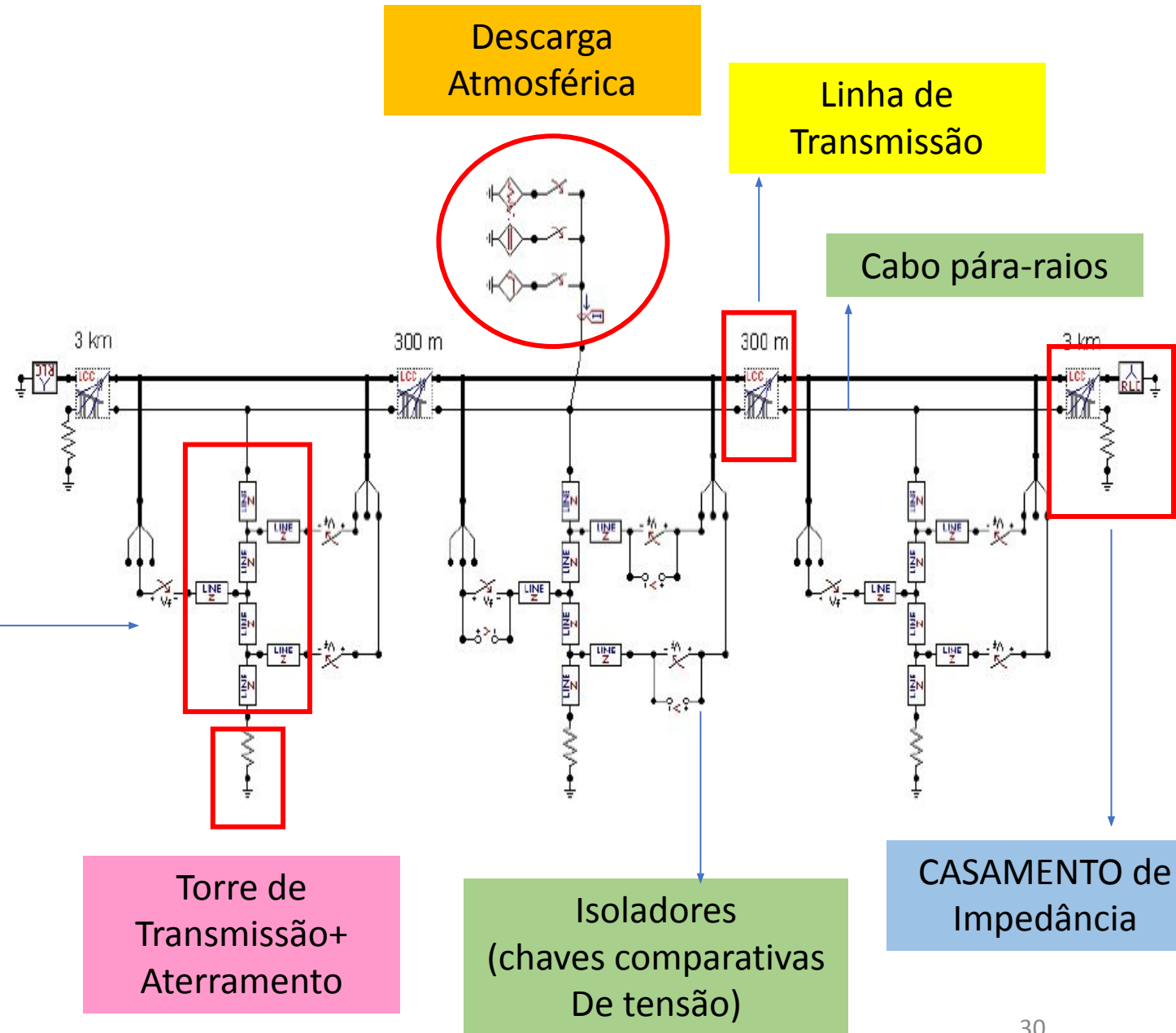
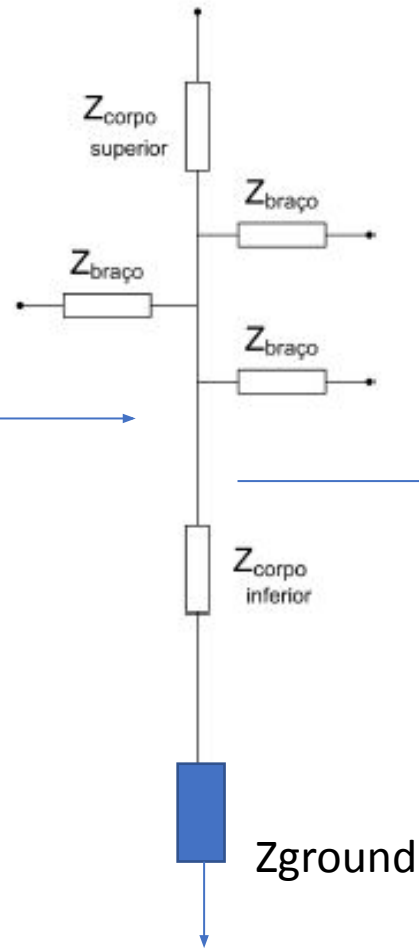
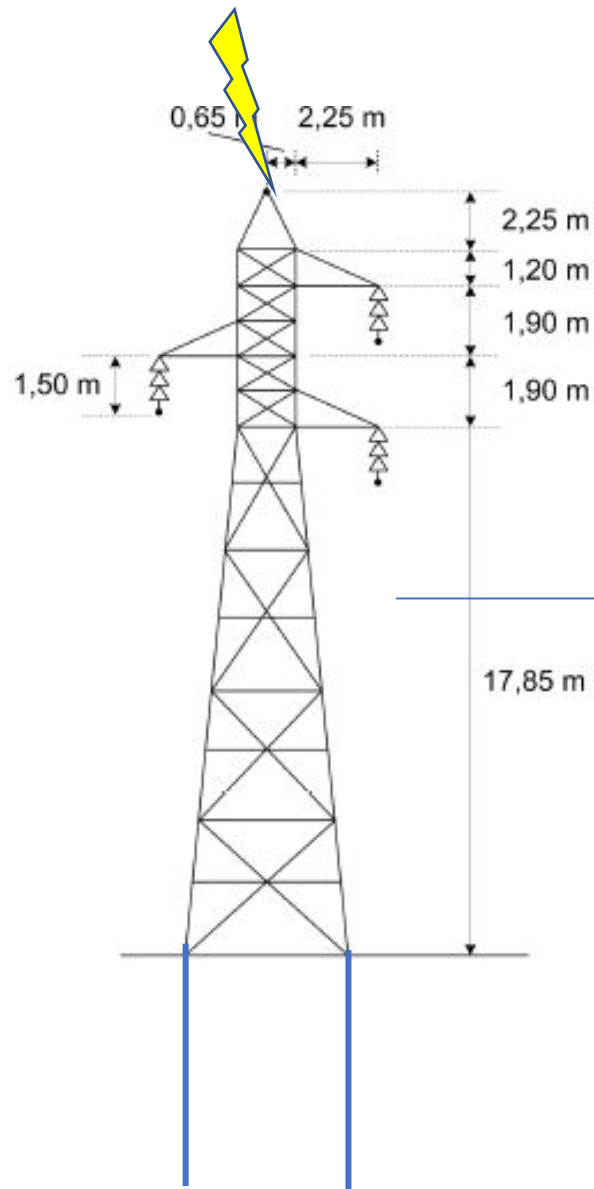


Nas Equações (3-26) a (3-28), n é o número de condutores paralelos, h é a distância do ponto mais alto de cada segmento ao solo, d_{ij} é a distância entre os condutores verticais i e j de cada segmento e r o raio dos condutores cilíndricos. Nos segmentos das torres em que os condutores não sejam paralelos, d_{ij} é dado pela média aritmética das distâncias entre as extremidades correspondentes dos condutores verticais, em cada segmento.

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOB UMA
PERSPECTIVA PROBABILÍSTICA**

Aluno: Arlison Júnior de Oliveira

Modelagem de torres no ATP



Modelagem de torres convencionais



Autoportante
circuito duplo
400 kV/45 m



Estaiada
440 kV/46 m

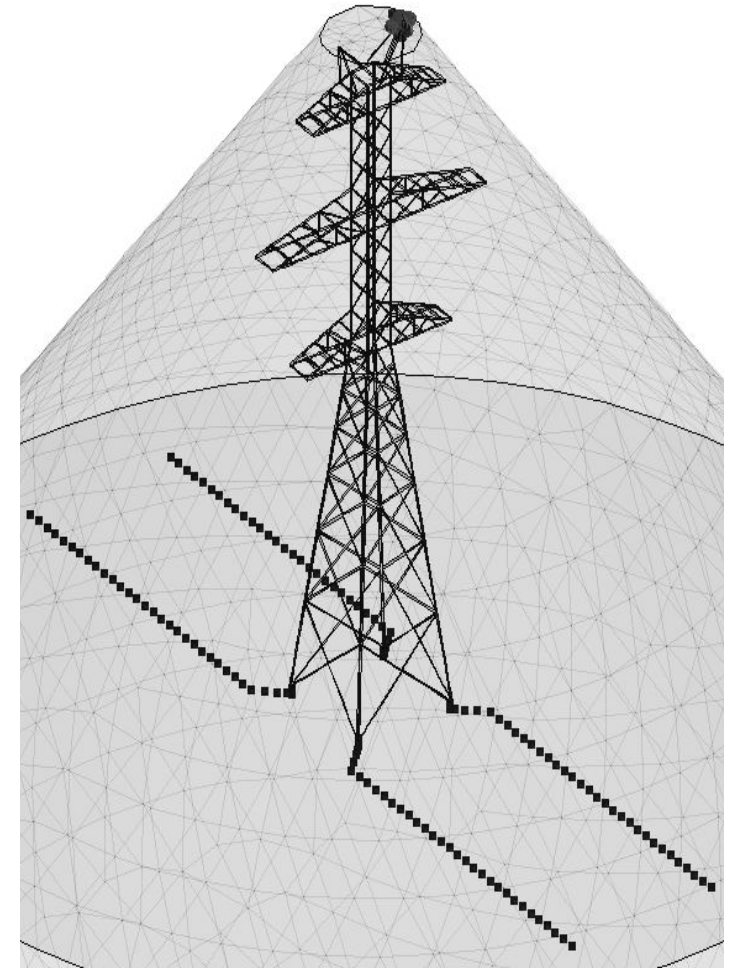


Autoportante
circuito simples
138 kV/25 m

Representação de torres de transmissão no domínio do tempo

Obter um modelo diretamente no domínio do tempo para torres de transmissão convencionais e elevadas levando em consideração a resistividade do solo e o sistema de aterramento conectados à estrutura da torre.

- (i) A admitância de cada torre de transmissão é calculada pelo Método dos Momentos (MoM), no domínio da frequência, e em seguida, aplica-se a técnica do Vector Fitting (VF) para cada curva obtida.
- (ii) Com VF, a admitância da torre de transmissão é representada por um circuito elétrico discreto (resistor, indutor e capacitor) diretamente no domínio do tempo.
- (iii) As tensões causadas por uma descarga atmosférica, incidente no topo dessas estruturas metálicas, são calculadas diretamente no domínio do tempo no PSCAD sem a necessidade de transformadas inversas de Laplace ou Fourier.

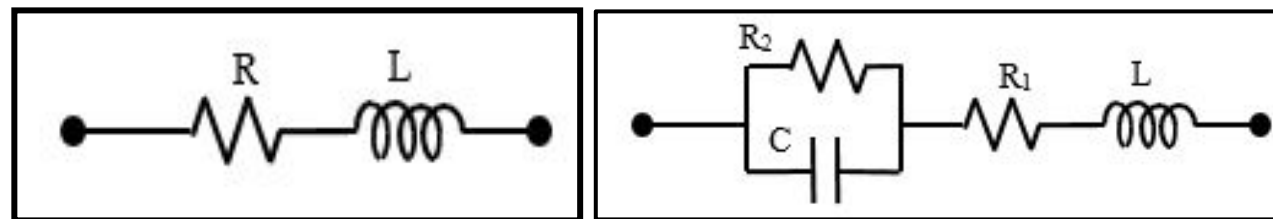


Vector Fitting

- O *Vector Fitting* (VF) é um método de ajuste de funções racionais $F(s)$ no domínio da frequência por um circuito elétrico aproximado, obtido numericamente.
- A função racional $F(s)$, no domínio da frequência, para qualquer estrutura de uma torre de transmissão é representada genericamente por
- Os termos c_i e a_i são os resíduos e os polos, respectivamente, de $F(s)$. O índice N é o número de polos da função racional aproximada. Os termos D e E são coeficientes reais e s é a frequência angular complexa.

$$F(s) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{s - a_i} \right) + D + s E$$

- Os polos podem ser reais ou pares complexos conjugados.
- Com apenas um resíduo e um polo reais, o circuito RL série equivalente é gerado para aproximar a função racional $F(s)$.
- Quando a $F(s)$ possui resíduos e polos complexos, o circuito RL(R||C) série é gerado pelo VF.

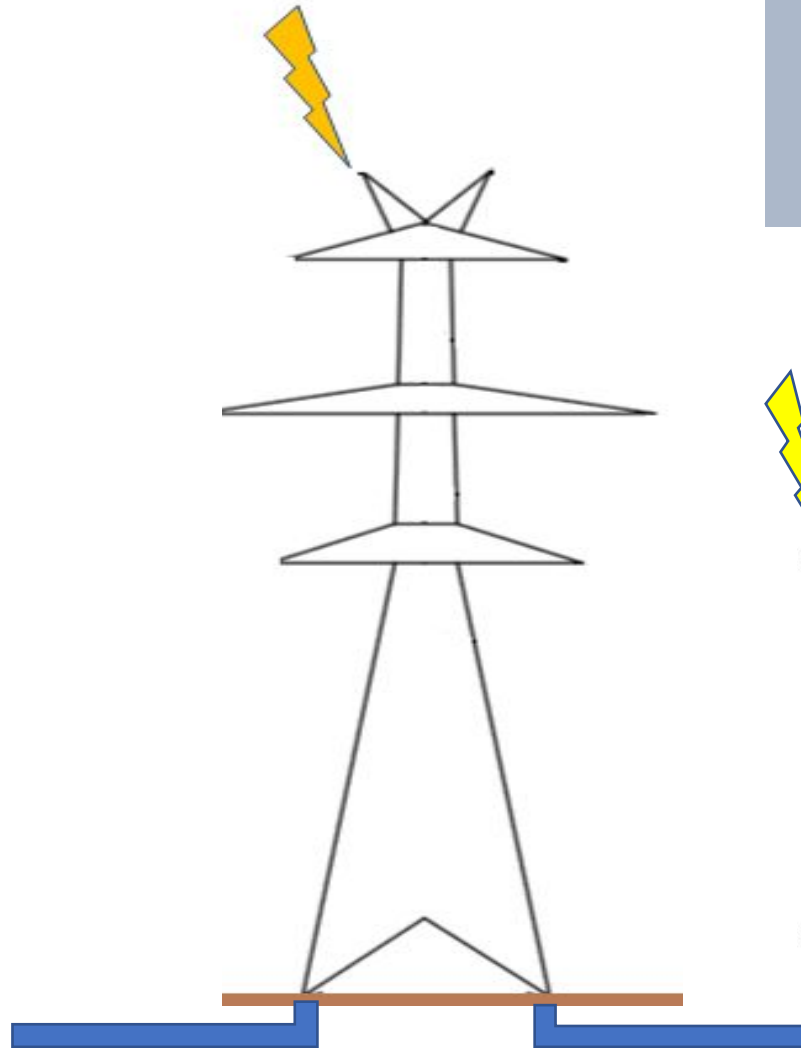


$$Y_{RL}(s) = \frac{1}{L} \frac{1}{\left(s + \frac{R}{L} \right)}$$

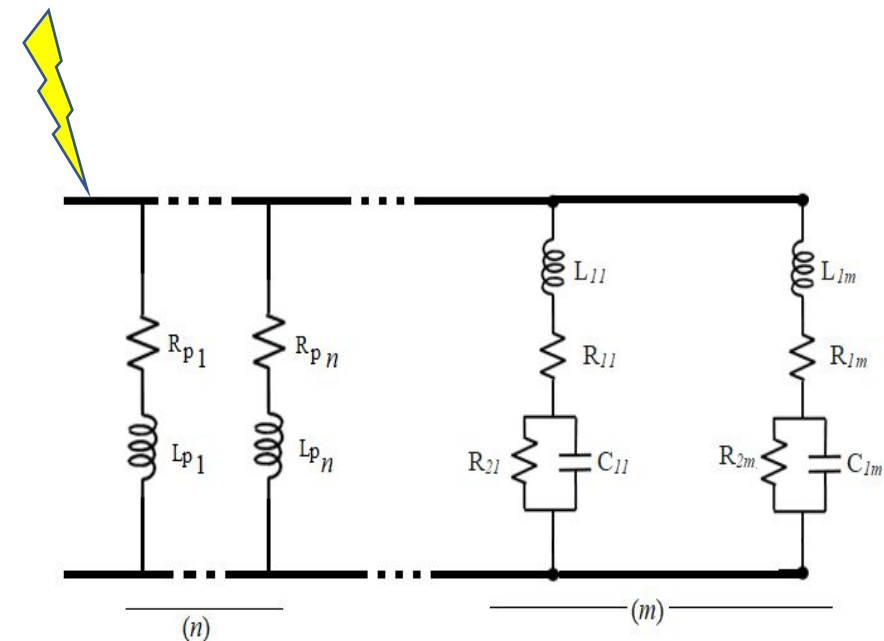
$$Y_{RL(R||C)}(s) = \frac{1}{L} \frac{\left(s + \frac{1}{R_2 C} \right)}{\left[s^2 + \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C} \right) s + \frac{1}{LC} \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \right]}$$

Circuito representativo no domínio do tempo

- O circuito representativo de uma torre de transmissão, convencional ou gigante, é composto por n circuitos RL série e m circuitos RL(R||C) para representar a admitância da torre para uma dada resistividade e geometria
- A partir dessas simulações, uma análise sobre a influência de diversos parâmetros, tais como a geometria da torre e a resistividade do solo, são realizadas para torres em tamanho convencional e torres elevadas (gigantes).

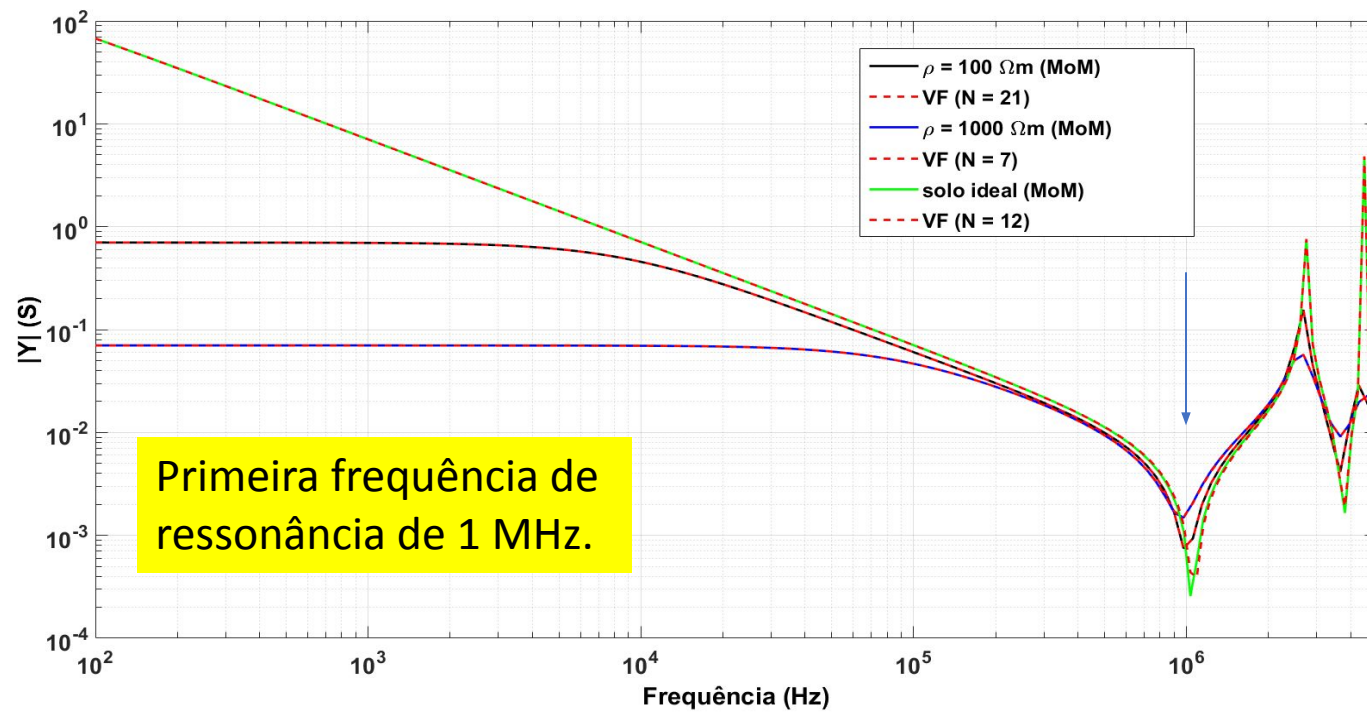


Considera a torre metálica mais o aterramento

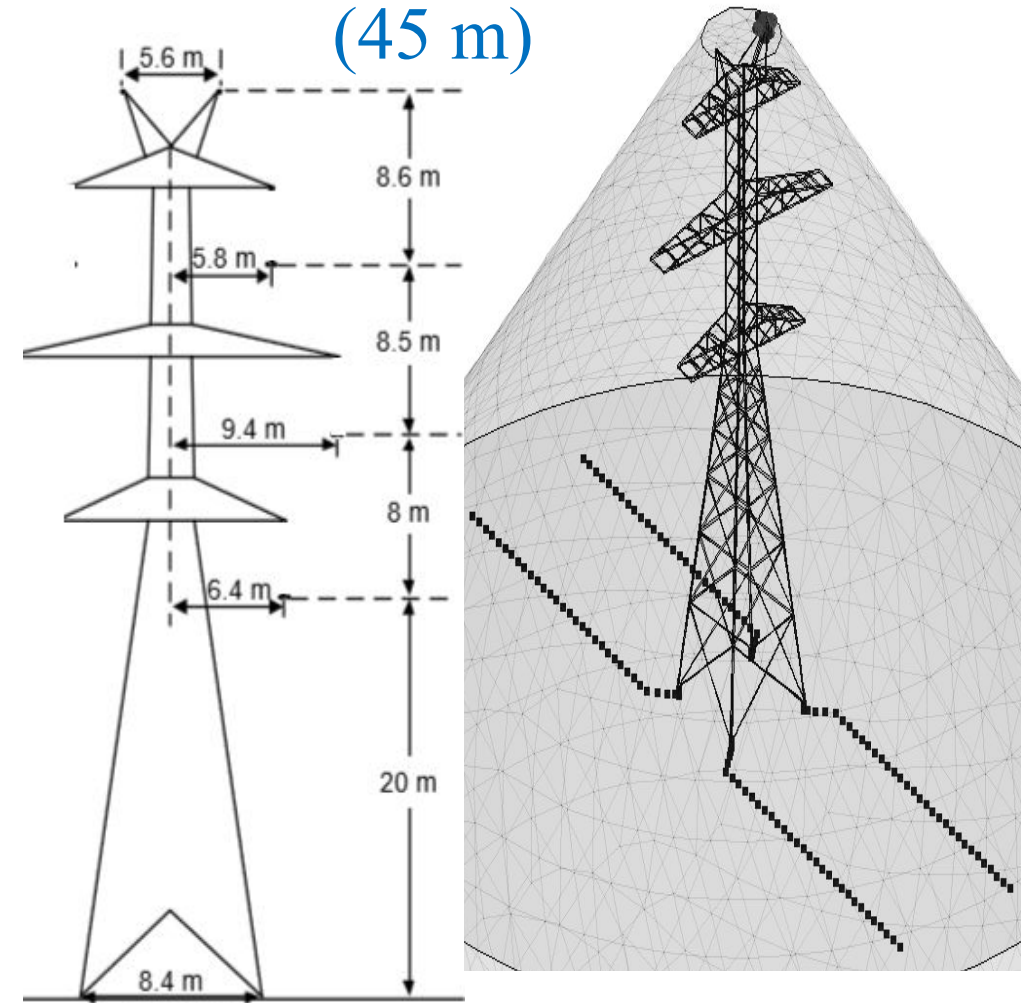
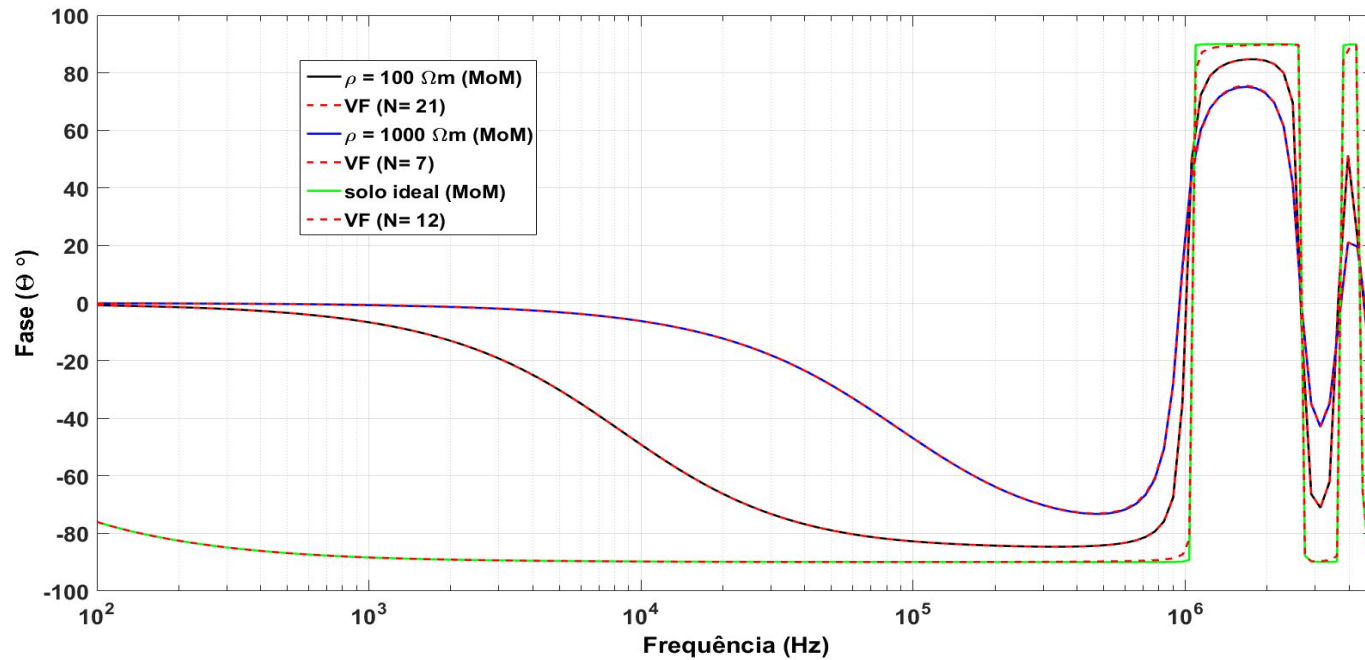


Modelagem da torre 400 kV

(45 m)



Primeira frequência de ressonância de 1 MHz.



As admitâncias da torre T_2 são calculadas para solos de resistividade $\rho = 100$ e $1000 \Omega\text{m}$ e o solo ideal no FEKO pelo MoM. As curvas obtidas são ajustadas pelo VF com N polos.

Resíduos e polos do VF para torre T₂ e solo ideal.

Resíduos (c _i)	Polos (a _i)
0.0199e4	-2.3845e4
0.0142e4	-0.1990e4
0.1150e4	-0.0993e4
4.3095e4	-0.0149e4
(1.7923 ± 0.0058i)e5	(-0.0166 ± 3.8200i)e7
(0.3678 ± 0.0021i)e5	(-0.0003 ± 2.8172i)e7
(0.8088 ± 0.0004i)e5	(-0.0004 ± 1.7169i)e7

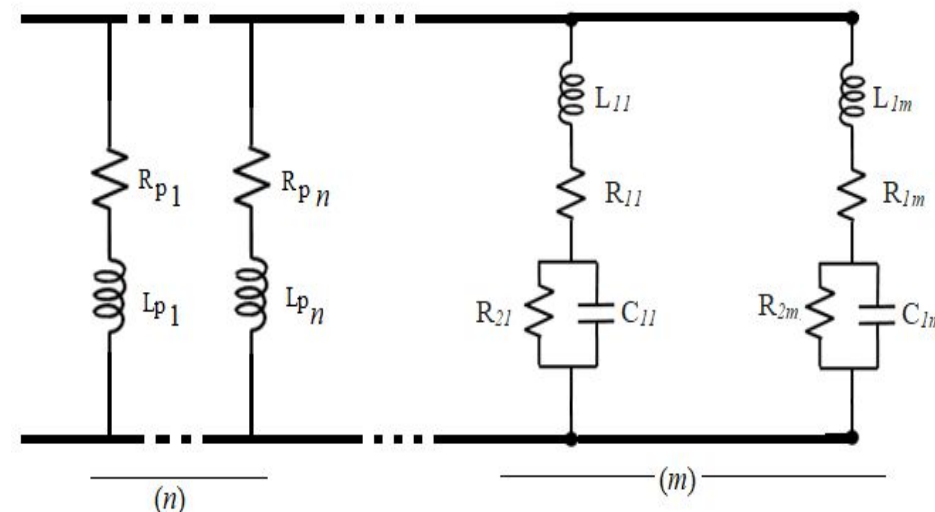
Parâmetros dos circuitos RL (polos reais) considerando solo ideal.

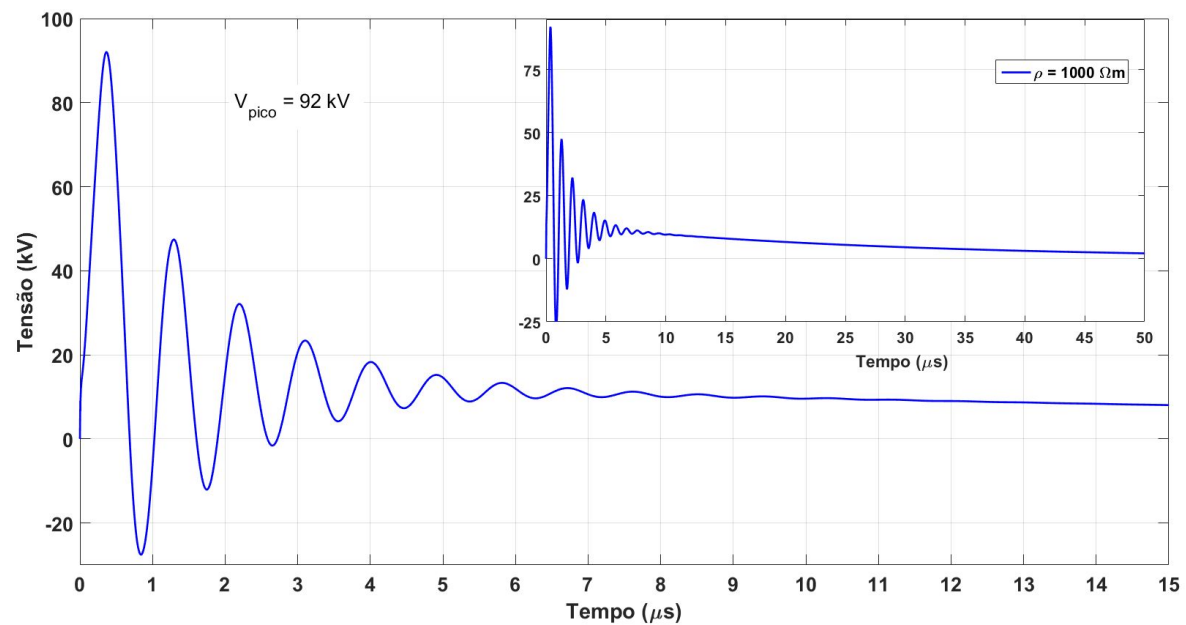
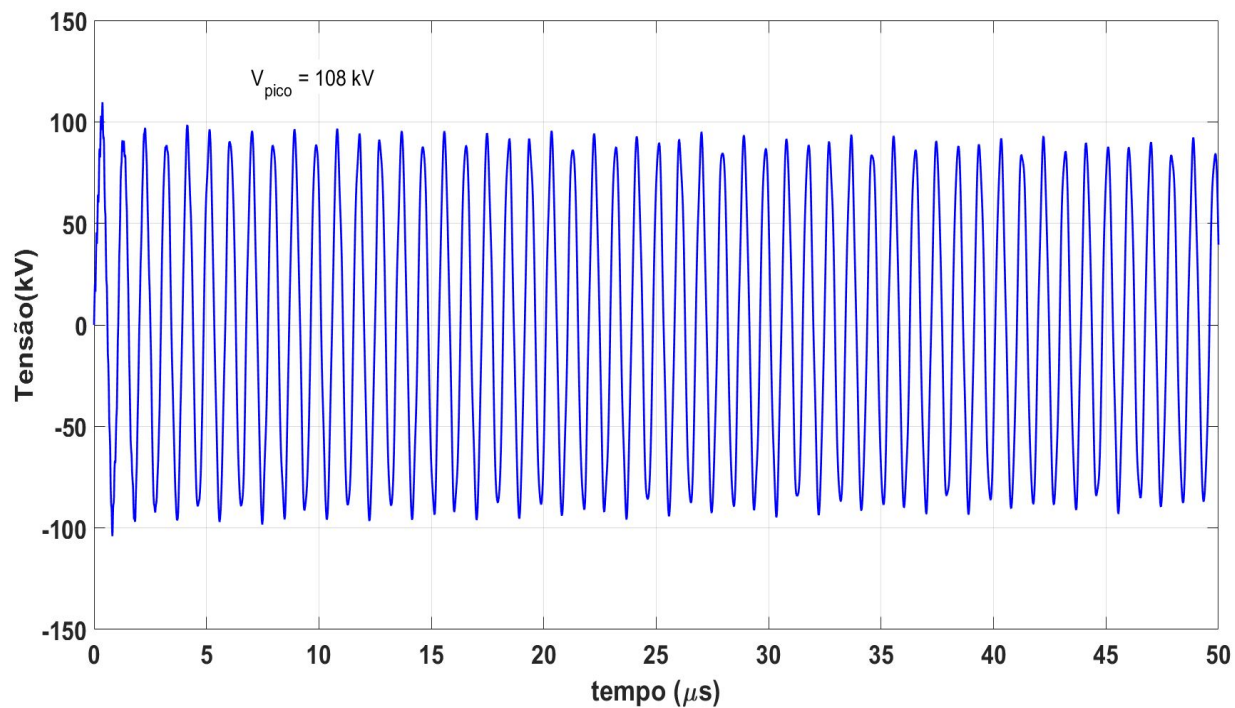
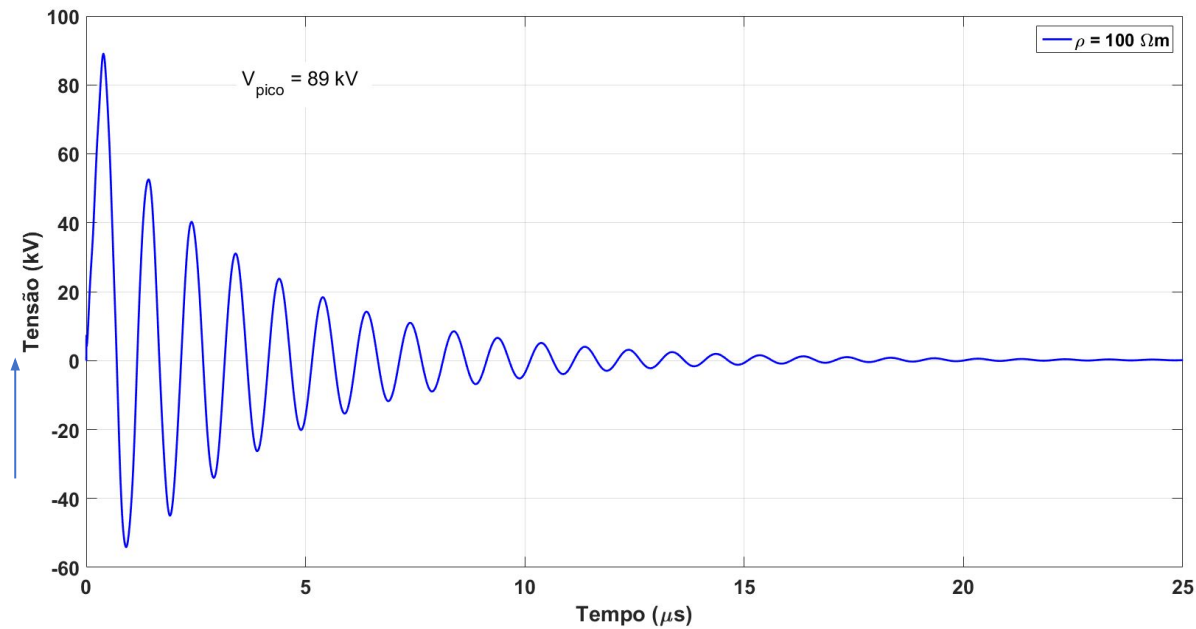
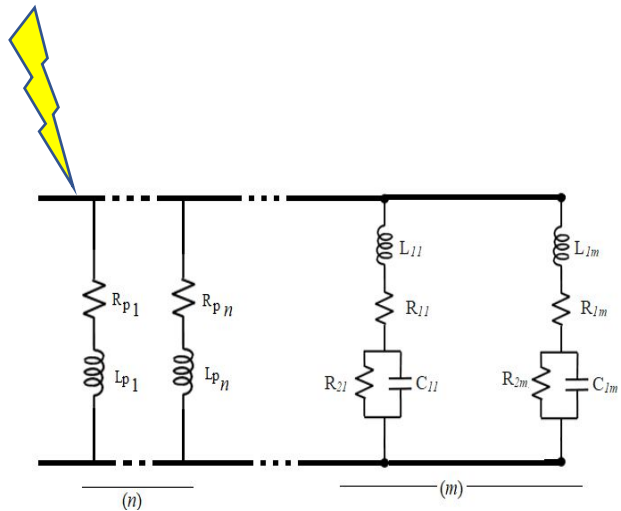
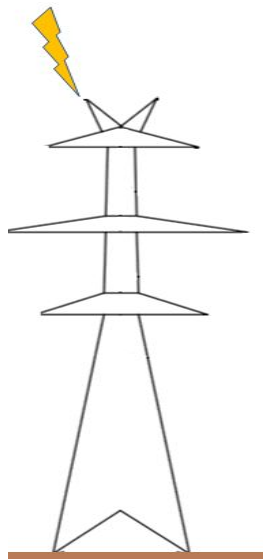
	R _p (Ω)	L _p (H)
n = 1	120.0239	0.00503345
n = 2	14.0650	0.00706683
n = 3	0.8632	0.00086959
n = 4	0.0035	0.00002320

Parâmetros para os circuitos RL(R || C) (polos complexos) considerando solo ideal

	R _{x1} (Ω)	L _{x1} (H)	R _{x2} (Ω)	C _x (nF)
m = 1	0.1175	0.0279e-4	0.1400e5	0.2456
m = 2	2.2022	0.1360e-4	-0.6926e5	0.0927
m = 3	0.0743	0.0618 e-4	-4.8823e5	0.5488

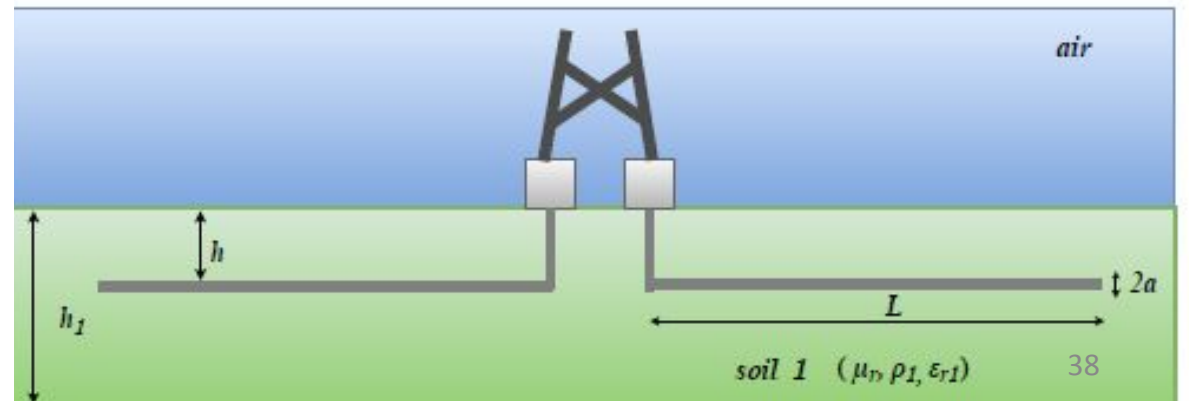
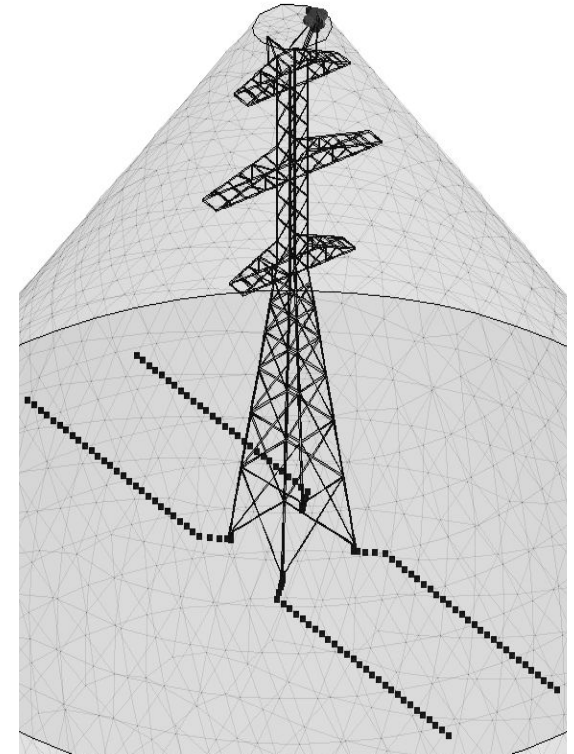
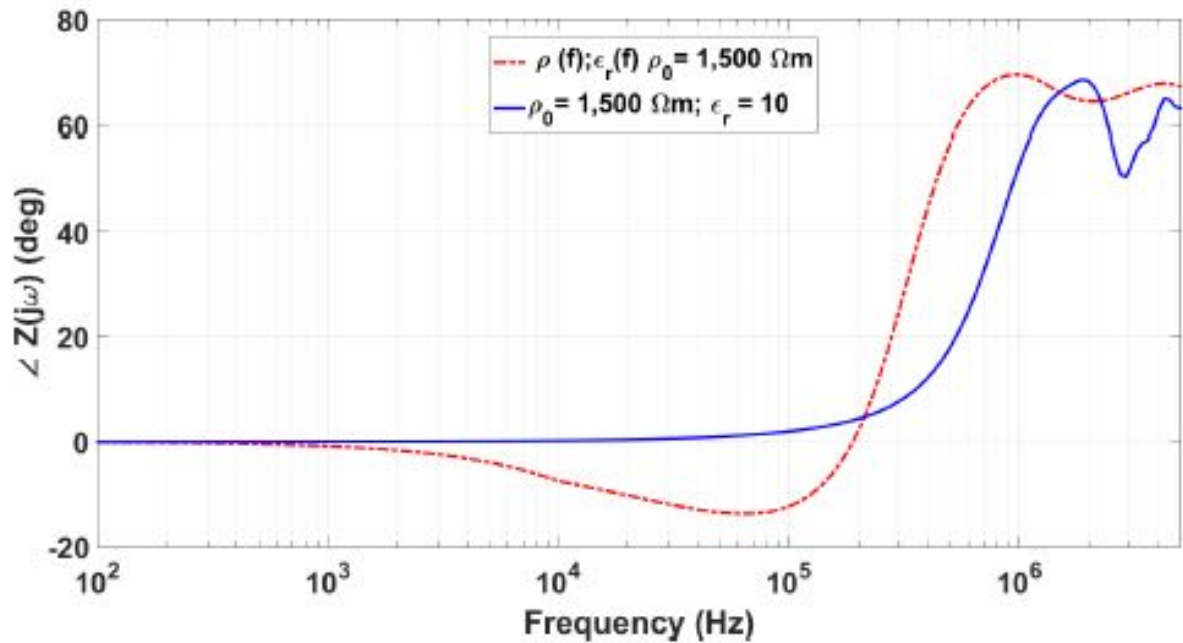
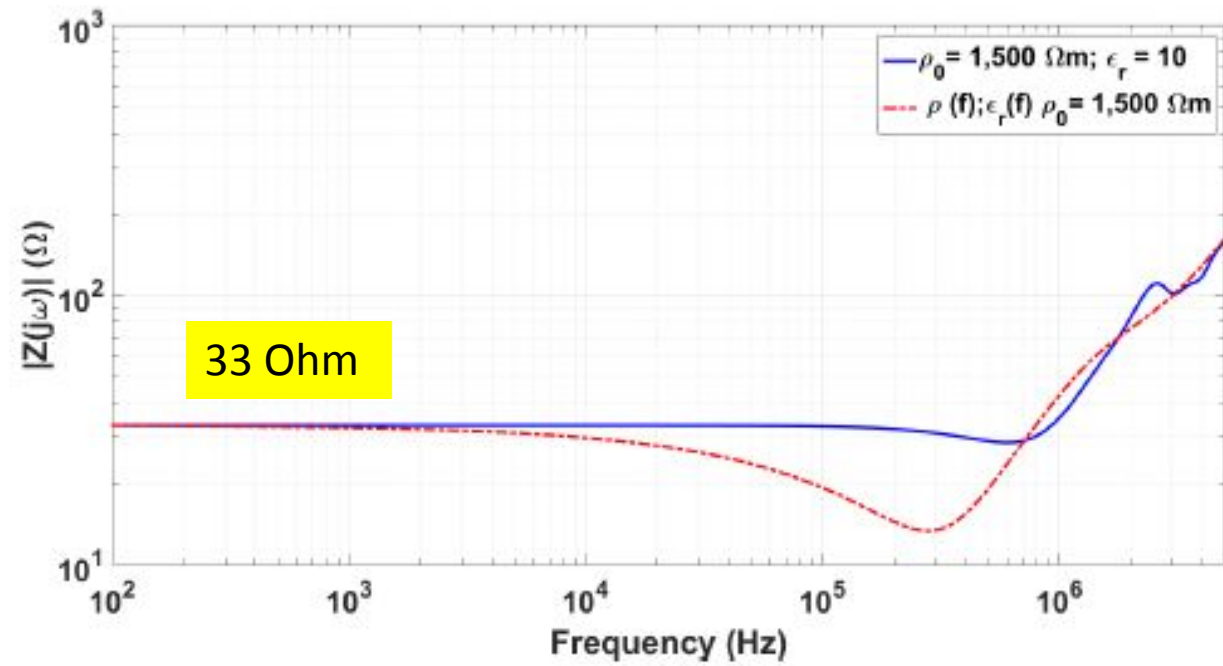
O circuito representativo é composto por n= 4 circuitos RL e m = 3 circuitos RL(R//C)



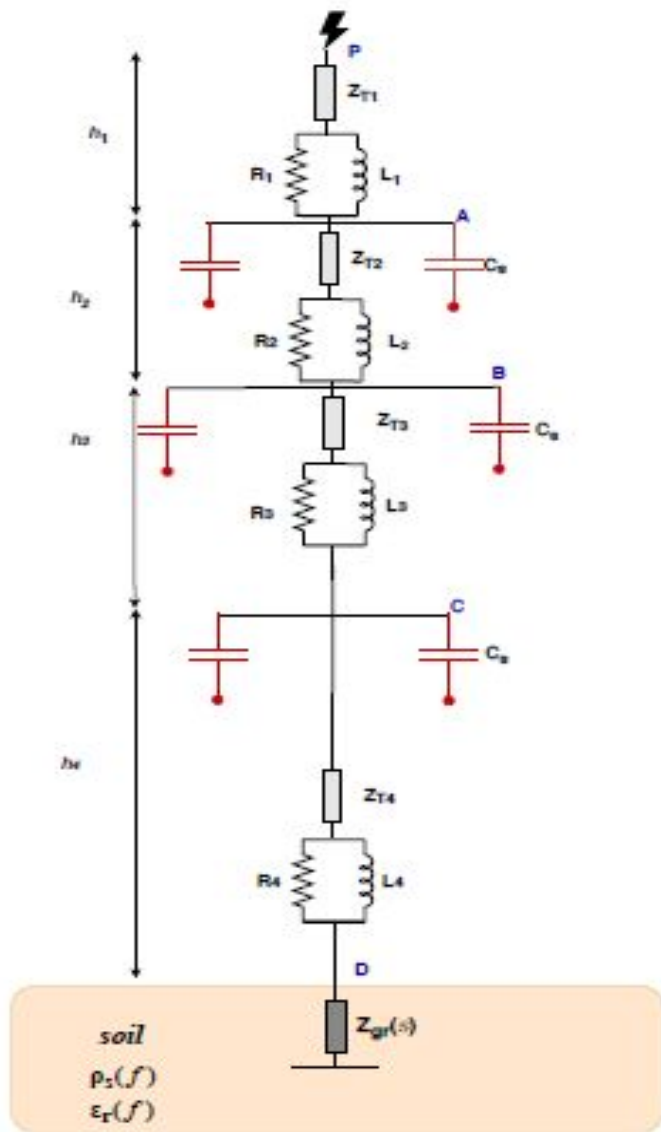
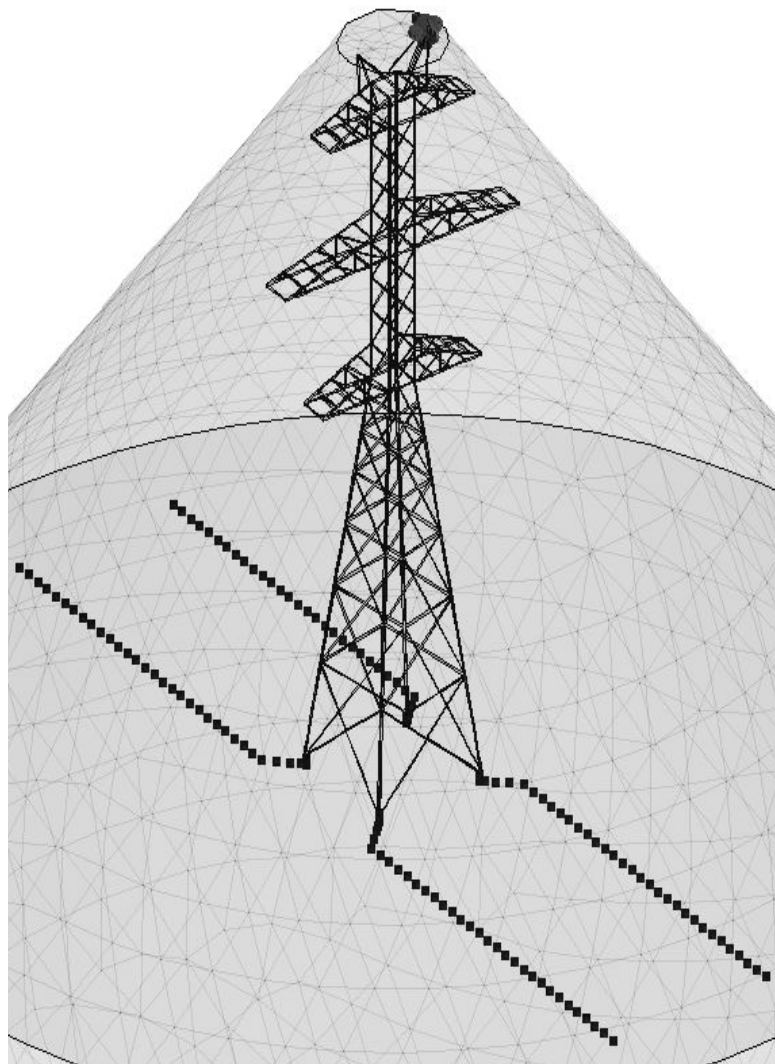


Aterramento das TTs

Efeito da frequência nos parâmetros do solo



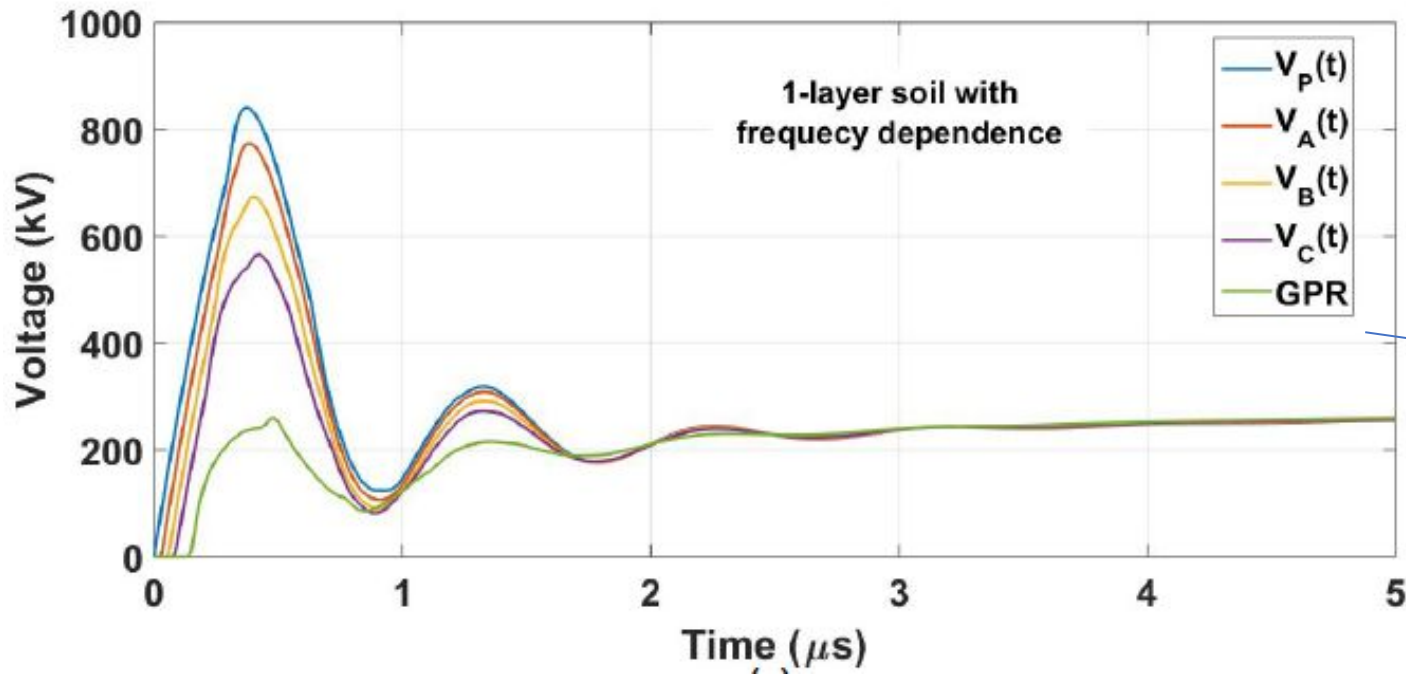
Efeito da frequência nas sobretensões



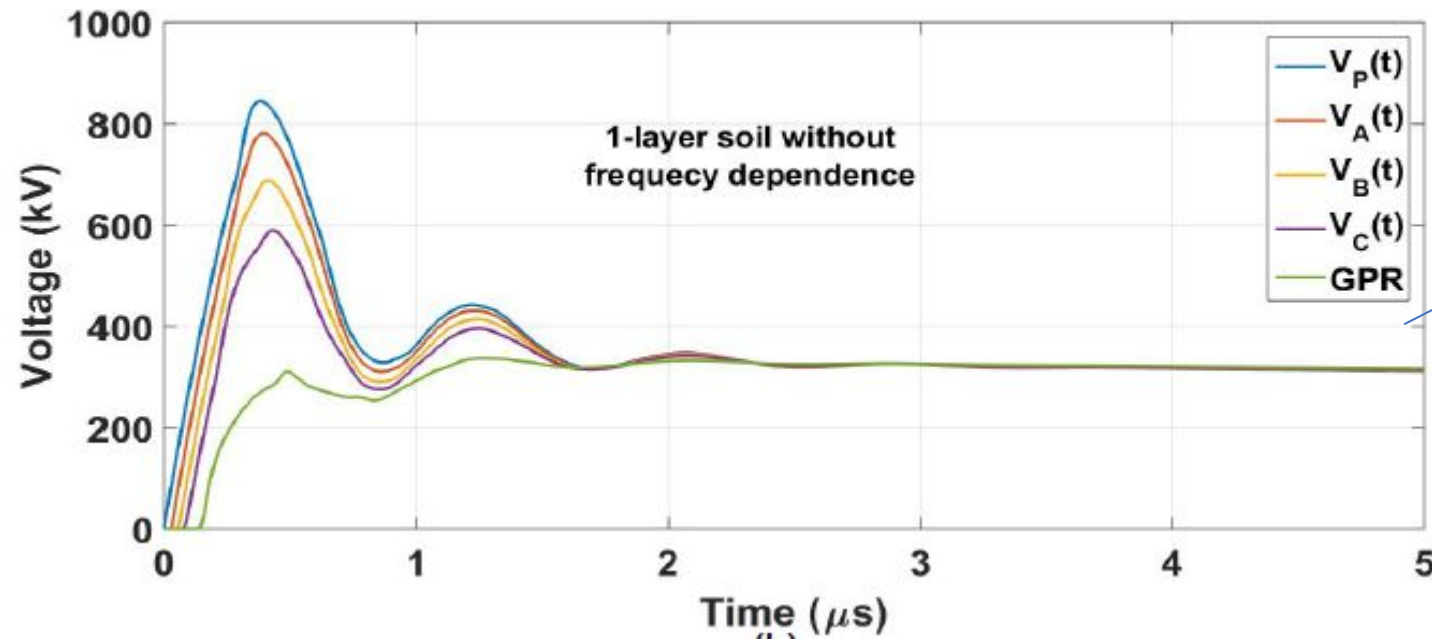
structure [25]. The heights of each section are: $h_1 = 8.6$ m, $h_2 = 8.50$ m, $h_3 = 8.0$ m and $h_4 = 20$ m. The surge impedances are: $Z_{T1} = \dots = Z_{T4} = 120 \Omega$ and the velocity of the traveling wave considered is $v = 300,000$ km/s. The resistances are:

$R_1 = 6.2 \Omega$, $R_2 = 10.6 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $R_4 = 26.8 \Omega$. The inductances are: $L_1 = 1.90 \mu\text{H}$, $L_2 = 3.20 \mu\text{H}$, $L_3 = 3.0 \mu\text{H}$ and $L_4 = 8.0 \mu\text{H}$.

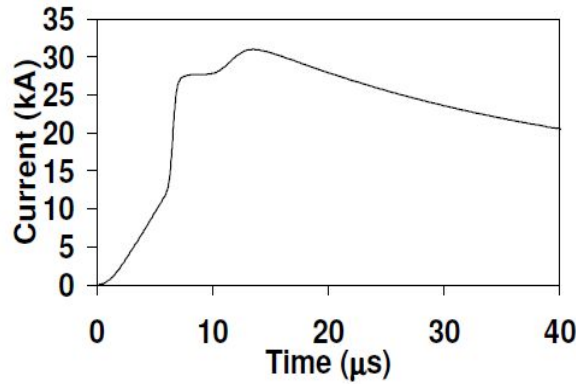
Tensões nos braços da torre



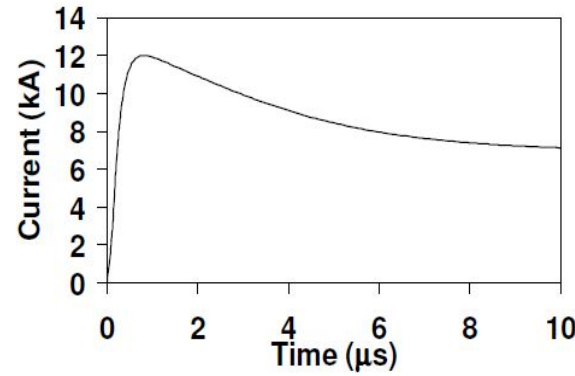
1-layer soil		
Voltage (kV)	WFD	NFD
$V_P(t)$	840	845
$V_A(t)$	773	780
$V_B(t)$	673	687
$V_C(t)$	564	590
GPR	260	310



Recent Developments on the Lightning Performance of Transmission Lines



(a)



(b)

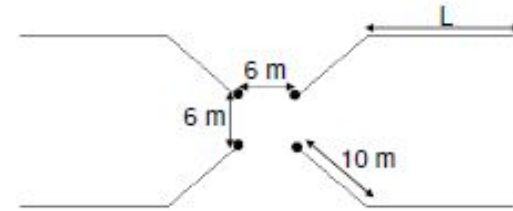
Onda mais rápida ↑
espectro da frequência

Fig.1. Representative current waveforms with median peak currents and from times of first (a) and subsequent (b) strokes. FST: $I_p = 31.1$ kA, $T_{d30} = 3.8$ μ s, SUB: $I_p = 11.8$ kA, $T_{d30} = 0.67$ μ s.

$$\rho = \rho_0 \{ 1 + [1.2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0.73}] \cdot [(f - 100)^{0.65}] \}^{-1}$$

$$\epsilon_r = 7.6 \cdot 10^3 f^{-0.4} + 1.3$$

Dependência dos
parâmetros elétricos do
solo com a frequência

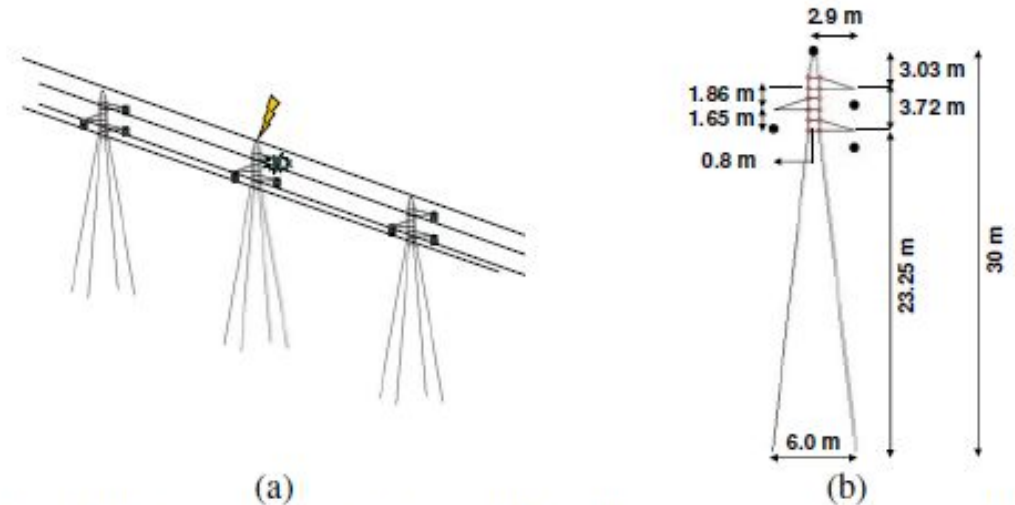


(a)

ρ_0 (Ω m)	L (m)
300	10
600	30
1000	50
2000	70
4000	110

(b)

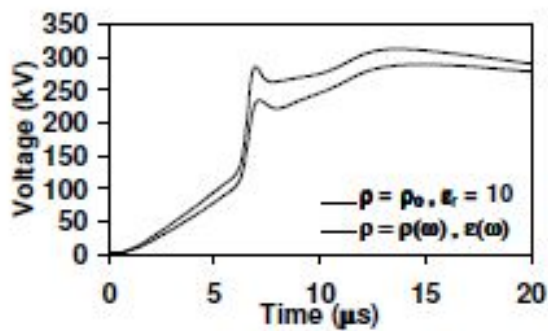
Fig. 2. Simulated grounding electrode arrangement (a) and electrode length as a function of soil resistivity (b).



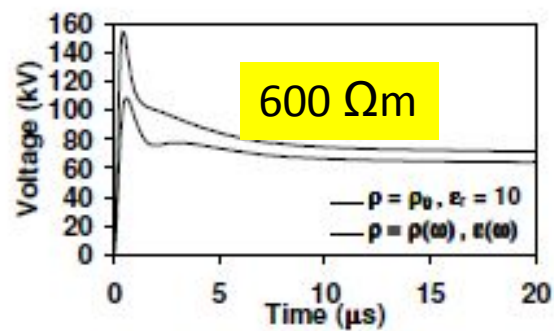
(a)

(b)

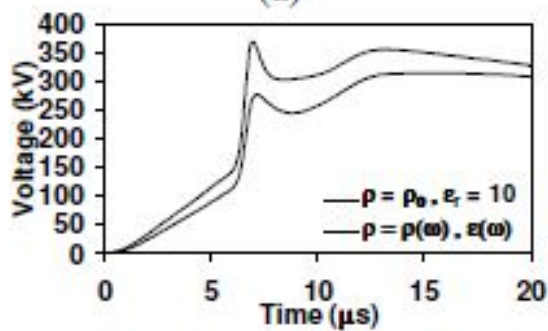
Fig. 3. Representation of direct strike to the tower (a) and the simulated 138-kV transmission line tower configuration (b).



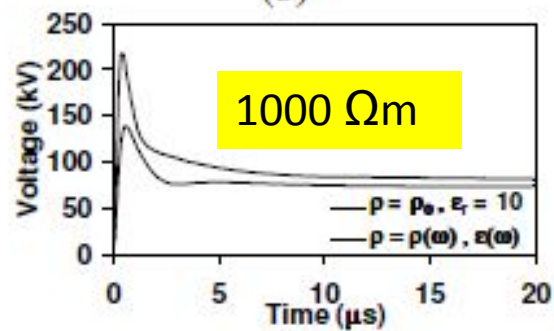
(a)



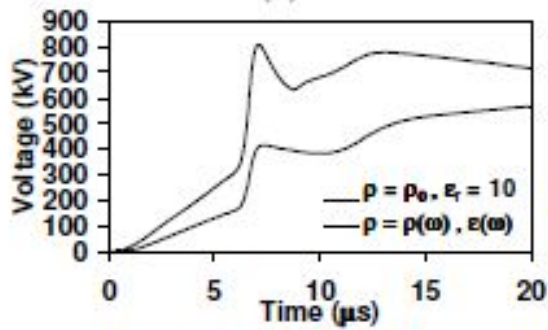
(b)



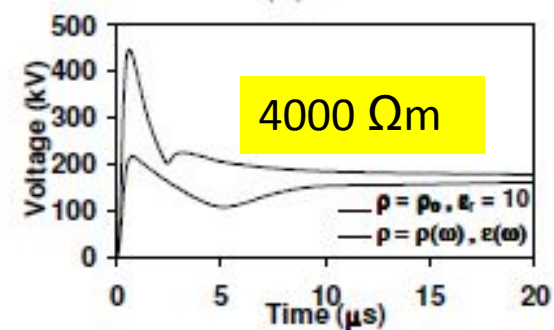
(c)



(d)

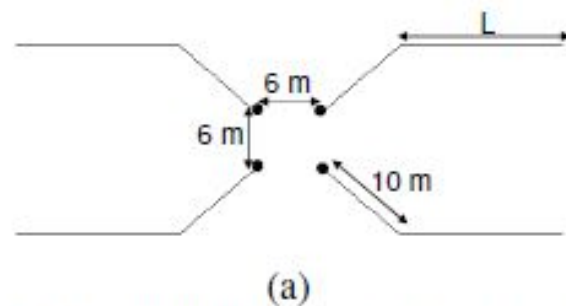


(e)



(f)

Fig. 4. Simulated GPR of the 138-kV-line tower footing under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters for different values of soil resistivity ρ_0 . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600 $\Omega \cdot m$, (c),(d) 1000 $\Omega \cdot m$, (e),(f) 4000 $\Omega \cdot m$.



(a)

ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	L (m)
300	10
600	30
1000	50
2000	70
4000	110

(b)

Fig. 2. Simulated grounding electrode arrangement (a) and electrode length as a function of soil resistivity (b).

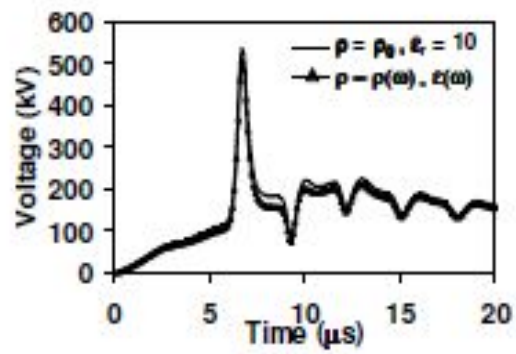
Zg impedância à baixa frequência

$$Z_P = \frac{V_P}{I_P}$$

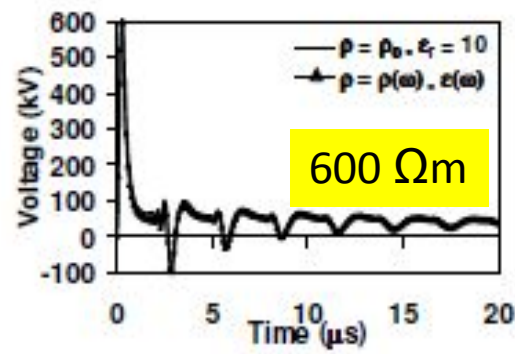
TABLE I
IMPULSE IMPEDANCE OF FIRST- AND SUBSEQUENT-STROKE CURRENTS UNDER THE ASSUMPTION OF CONSTANT AND FREQUENCY-DEPENDENT ELECTRICAL PARAMETERS OF SOIL

ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	L (m)	Rg (Ω)	Impulse impedance Zp					
			FST			SUB		
			$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$ (Ω)	$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$ (Ω)	$\Delta\%$	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$ (Ω)	$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$ (Ω)	$\Delta\%$
300	10	11.1	10.4	9.9	-4.4	9.3	7.8	-15.9
600	30	11.0	10.0	9.3	-7.5	12.9	9.1	-29.6
1000	50	12.5	11.8	10.1	-14.5	18.1	11.6	-36
2000	70	19.5	18.2	14.7	-19.2	27.2	15.0	-44.7
4000	110	27.3	26.0	18.1	-30.1	37.2	18.0	-51.6

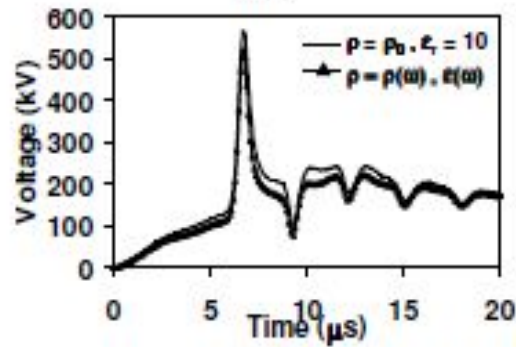
Variação mais significativa com $\uparrow \rho$ e para SUB



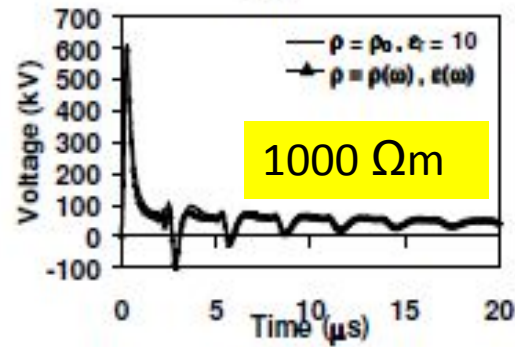
(a)



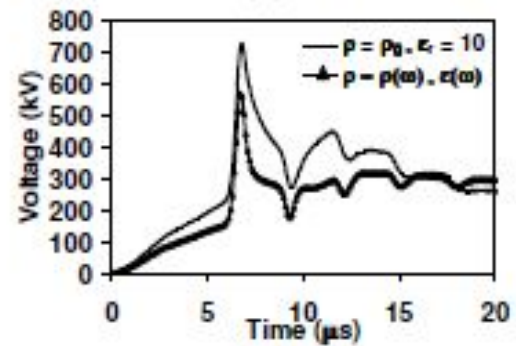
(b)



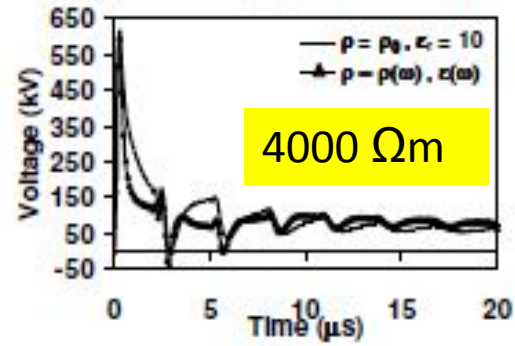
(c)



(d)



(e)



(f)

TABLE II

OVERVOLTAGE PEAK DEVELOPED ACROSS UPPER INSULATOR STRING

ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	L (m)	Overvoltage (kV)					
		FST			SUB		
		$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\Delta\%$	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho = \rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\Delta\%$
300	10	523.5	509.7	-2.6	598.7	594.0	-0.8
600	30	533.0	504.9	-5.3	604.6	595.8	-1.5
1000	50	564.5	519.3	-8.0	608.9	597.3	-1.9
2000	70	645.3	549.3	-14.9	612.8	597.4	-2.5
4000	110	727.3	567.2	-22.0	615.0	595.4	-3.2

Quando se considera o efeito da frequência, os picos de tensão são menores, sendo mais significativos para First stroke (maior amplitude)

Fig. 5. Simulated overvoltage across upper insulator string of the 138-kV line for constant and frequency-dependent soil parameters for different values of soil resistivity ρ_0 . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600 $\Omega \cdot m$. (c),(d) 1000 $\Omega \cdot m$. (e),(f) 4000 $\Omega \cdot m$.

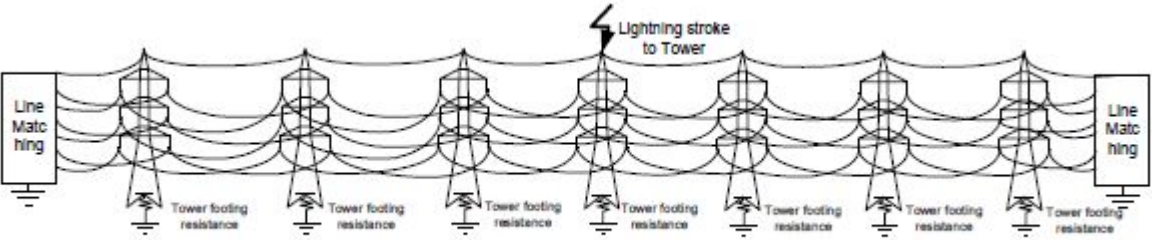
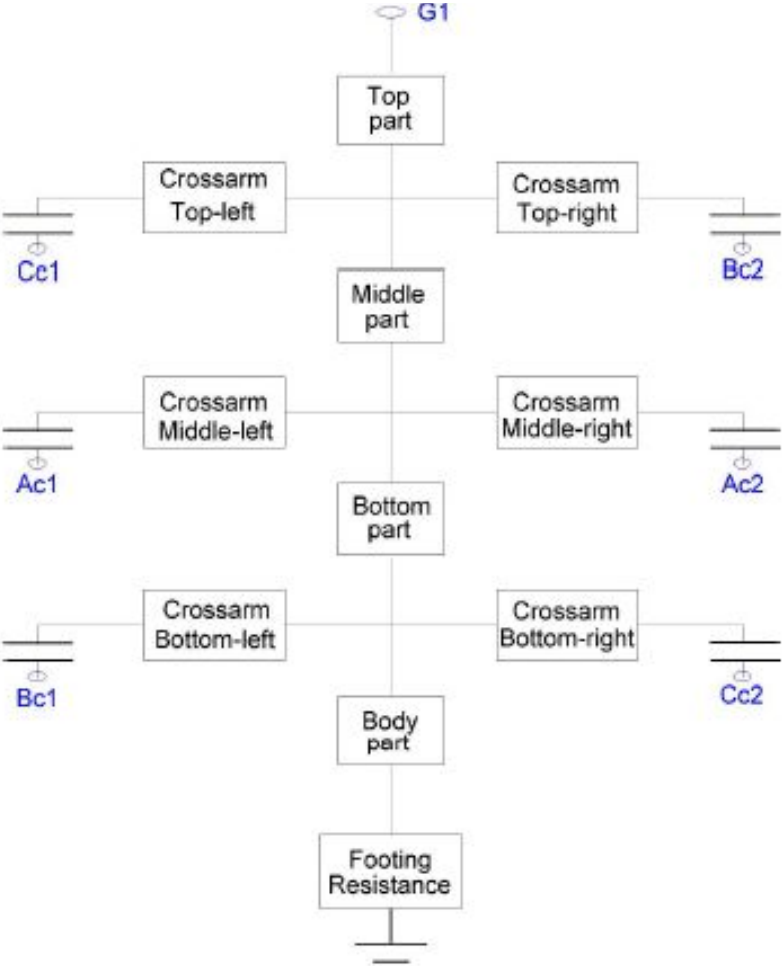
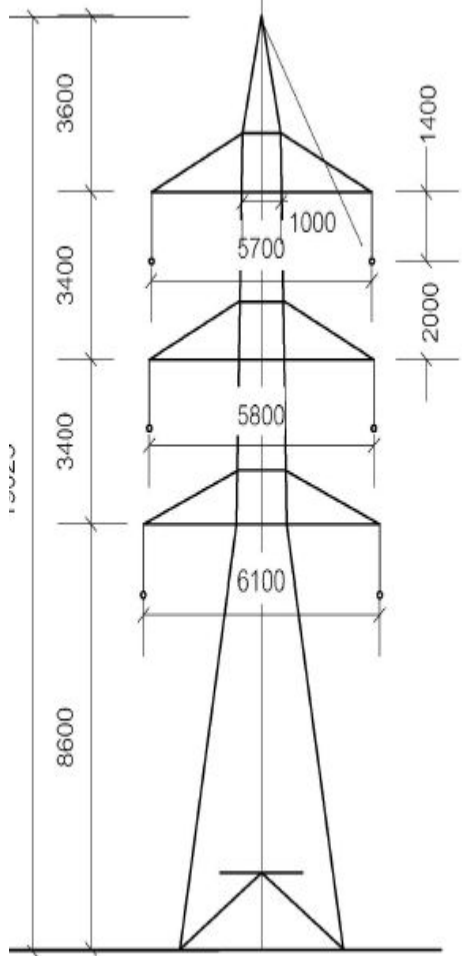
Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System

P. Yadee and S. Premrudeepreechacharn

Configuração da torre e modelo

$$V_{fo} = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}}$$

V_{fo} is a flashover voltage (kV),
 K_1 is $400 * L$,
 K_2 is $710 * L$,
 L is insulator length, (meter),
 t is elapsed time after lightning stroke, μs .



(c) The span of towers 8 spans with line matching.

Double circuit with one over head ground wire.

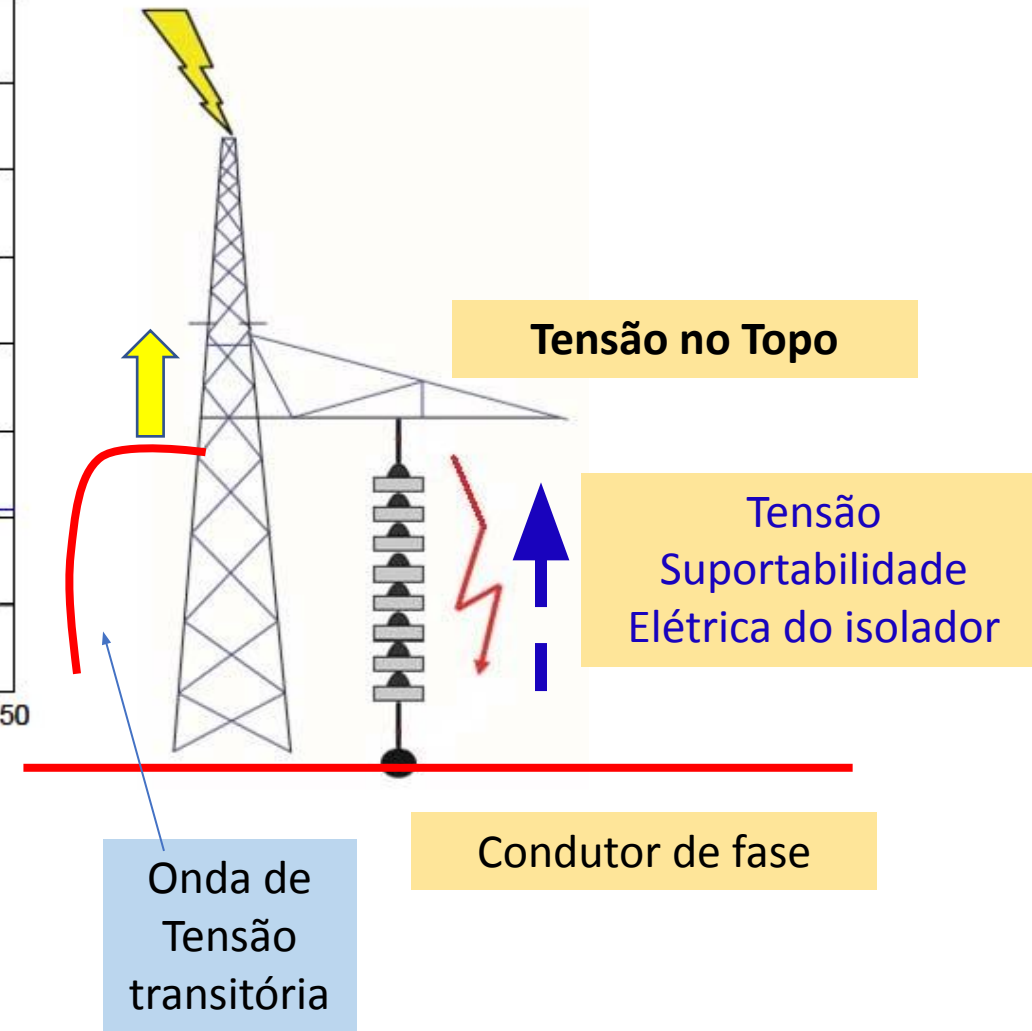
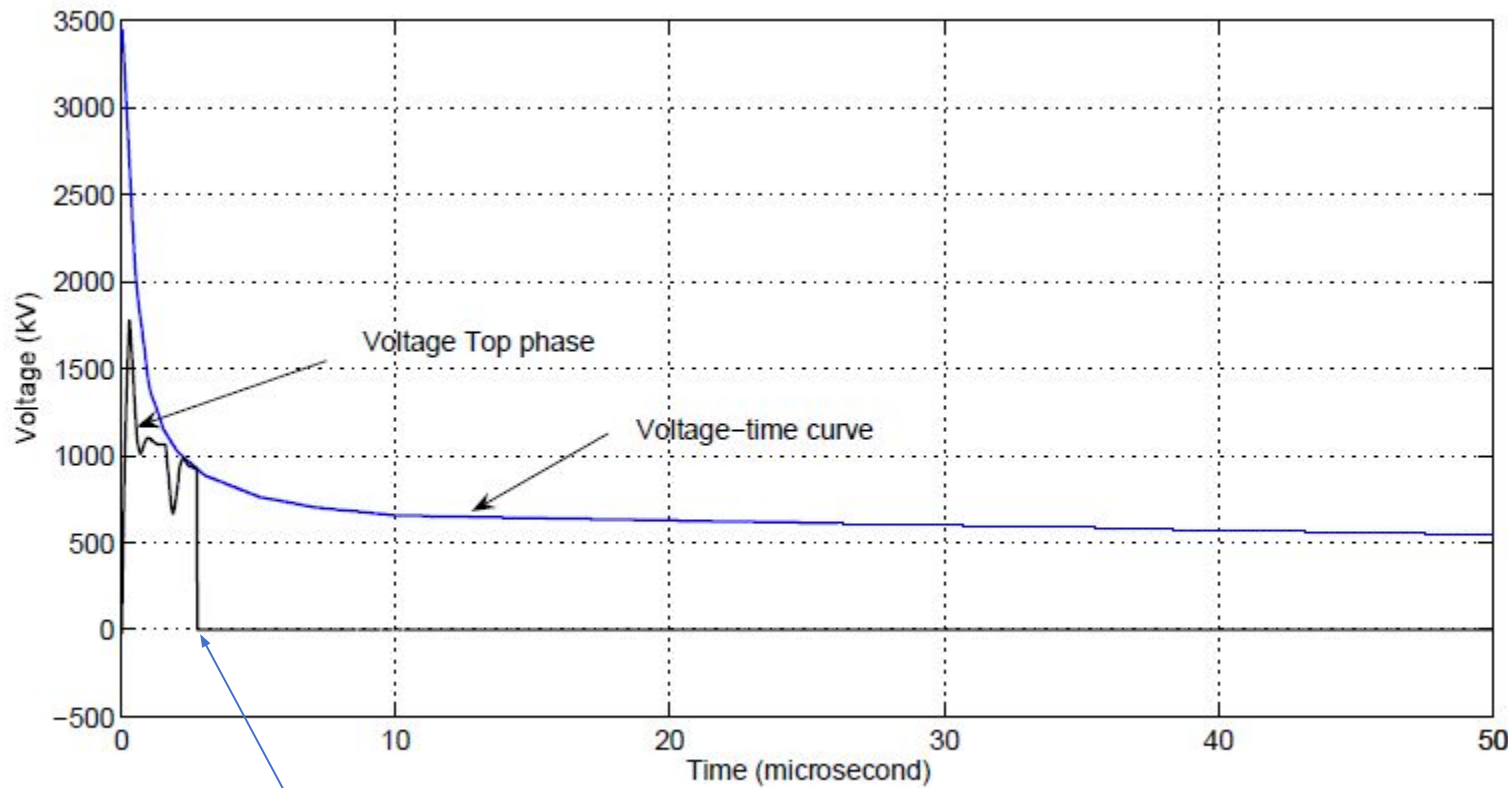


Fig. 8. The back flashover mechanism.

occur, a parallel switch is applied. If the voltage across the insulator exceeds the insulator voltage withstand capability, the back flashover occurs. The back flashover is simulated by closing the parallel switch. Once the back flashover occurs, the voltage across insulator goes down to zero. The waveform of voltage across insulator, when back flashover occurs at 4 μ sec., is shown in Fig. 8.

Overvoltage caused by wavefront varying with 20 kA stroke current

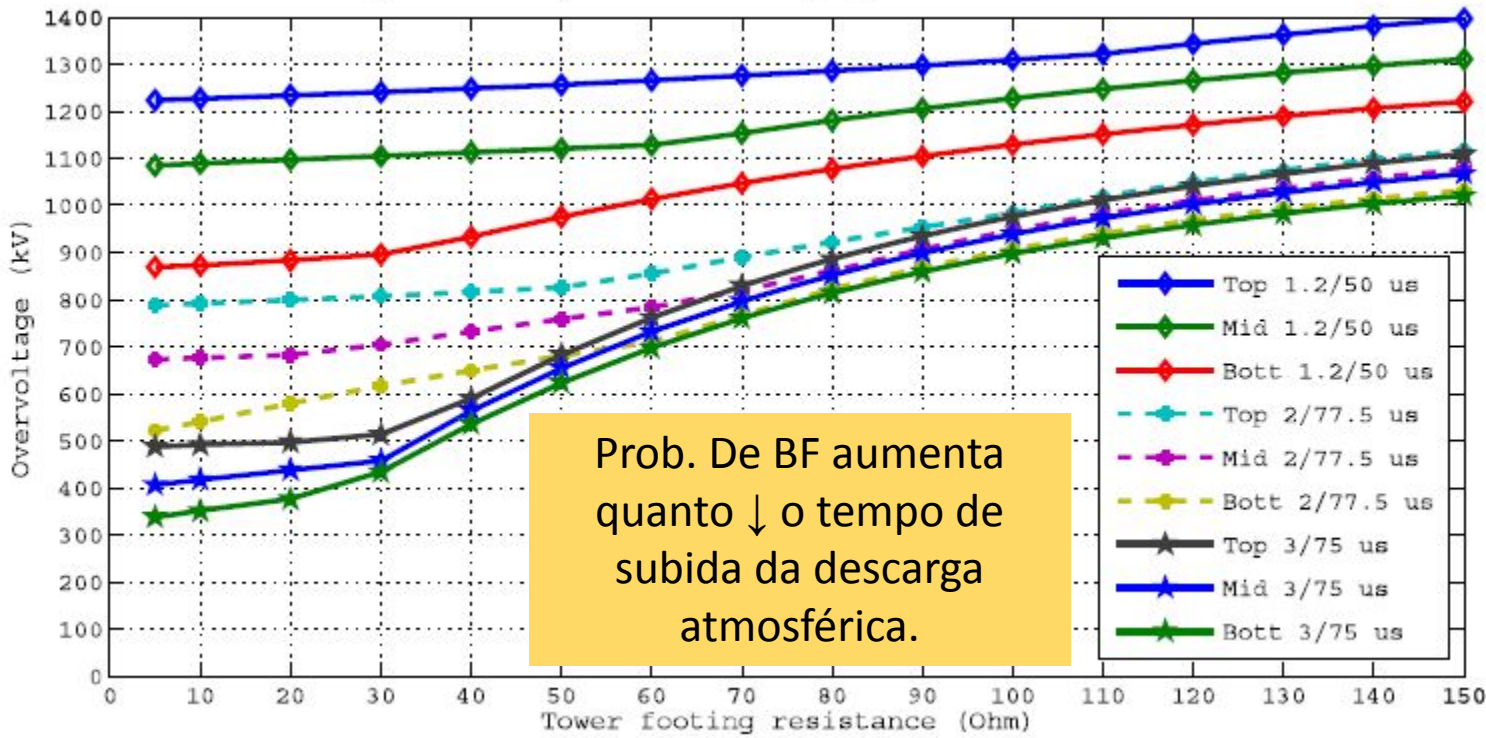
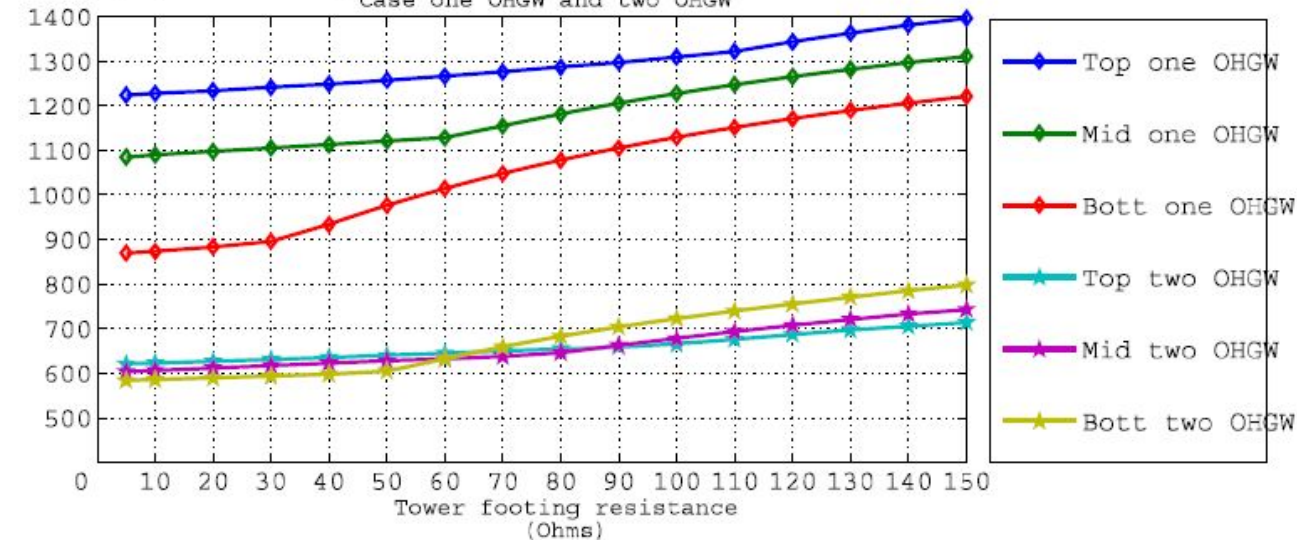


TABLE III : OVERVOLTAGE FLASHOVER AT INSULATOR WITH DIFFERENT MAGNITUDE OF STROKE.

Tower footing resistance (ohms)	Overvoltage Flashover											
	at stroke Is 20 kA			at stroke Is 30 kA			at stroke Is 40 kA			at stroke Is 50 kA		
	Top	Mid	Bott	Top	Mid	Bott	Top	Mid	Bott	Top	Mid	Bott
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X
10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X
20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X
30	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X
40	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X
50	X	X	X	√	X	X	√	X	X	√	X	X
60	X	X	X	√	X	X	√	X	X	√	X	X
70	X	X	X	√	X	X	√	X	X	√	X	X
80	X	X	X	√	X	X	√	X	X	√	X	X

Ocorrência de BFs aumenta com ↑ Resistência de aterramento e amplitude da corrente injetada

Voltage (kV) Overvoltage by wave front 1.2/50 us at Is 20 kA Case one OHGW and two OHGW



Prob. De BF aumenta quanto há apenas um cabo guarda

Simulações considerando a freq. nos parâmetros do solo

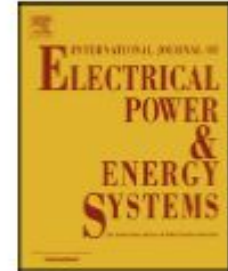
Electrical Power and Energy Systems 116 (2020) 105547



Contents lists available at ScienceDirect

Electrical Power and Energy Systems

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes



Evaluating the overvoltage performance of an overhead line taking into account the frequency-dependence of its tower's grounding electrodes with high soil resistivity



Silvia Piliškić^{a,*}, Ivo Uglešić^b, Bruno Jurišić^c

^a Croatian Transmission System Operator, Croatia

^b University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Croatia

^c KONČAR Electrical Engineering Institute, Croatia

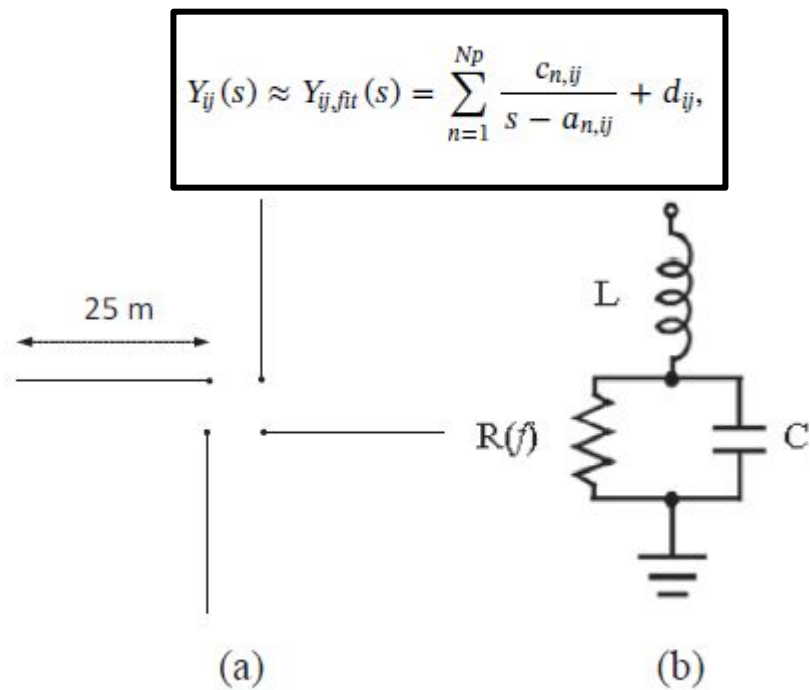


Fig. 4. 4 × L arrangement of the tower grounding system.

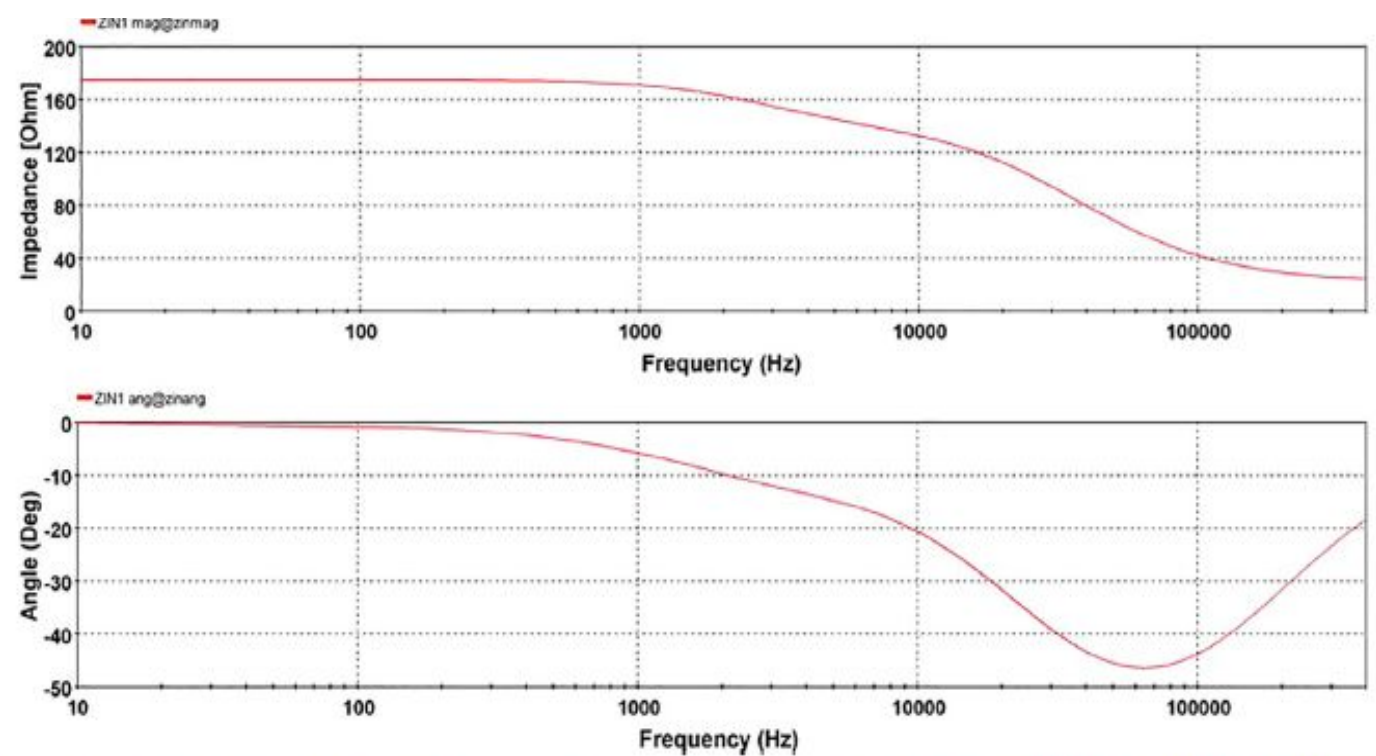


Fig. 8. Input impedance of the frequency-dependent tower grounding electrode for the specific soil resistivity 5724 Ωm modelled in an EMTP-type software.

Imp. De aterramento modelada por:
 (i) Parâmetro constante;
 (ii) dependente da freq-Vector Fitting.

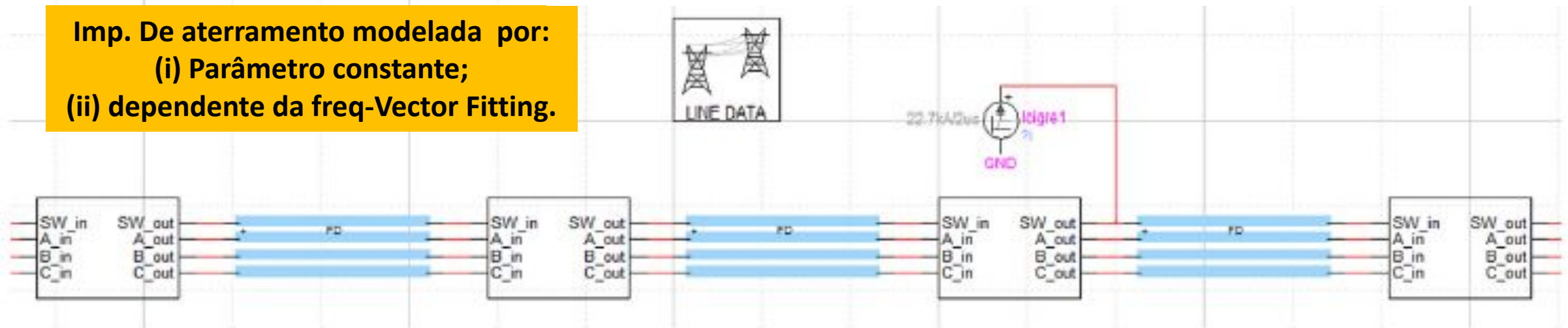
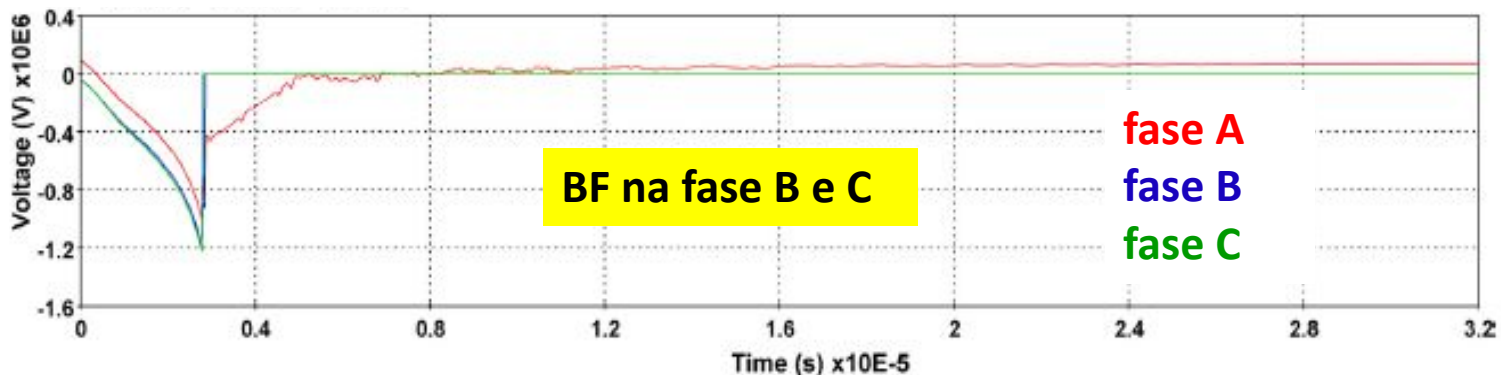
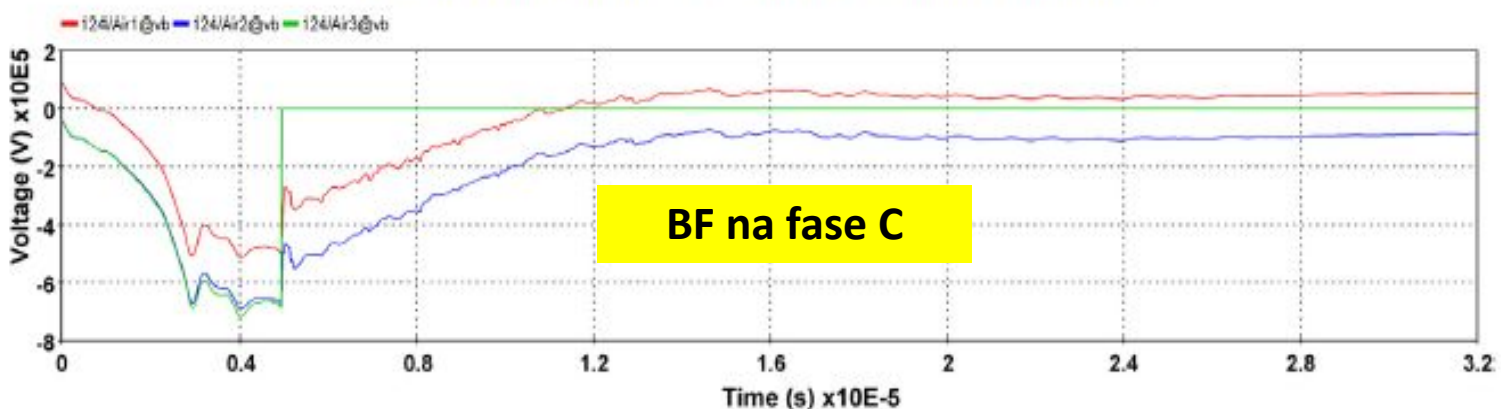


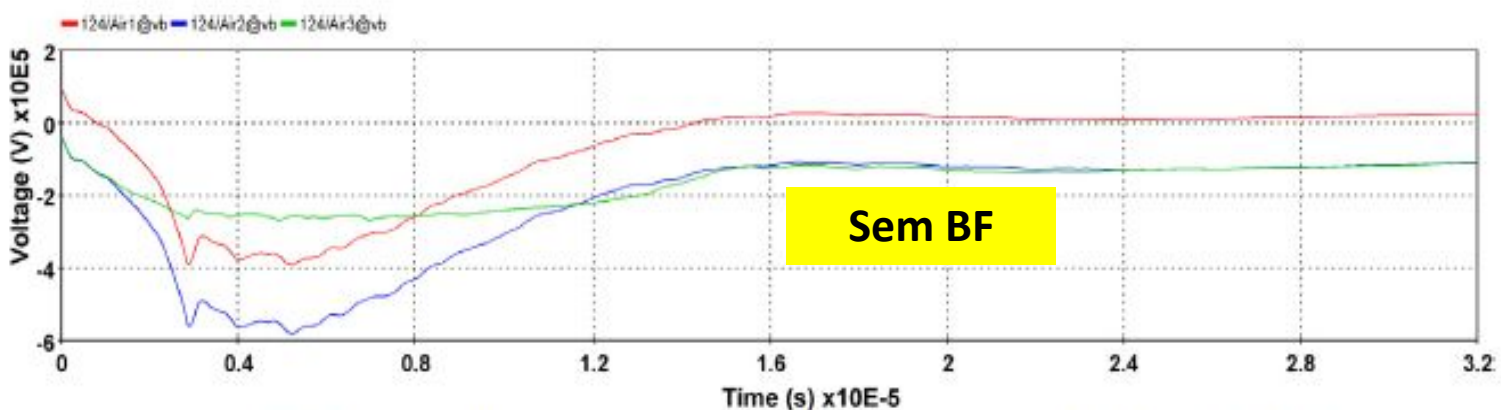
Fig. 9. A part of the EMTP model (3 spans) of the lightning strike to the 110 kV overhead line.



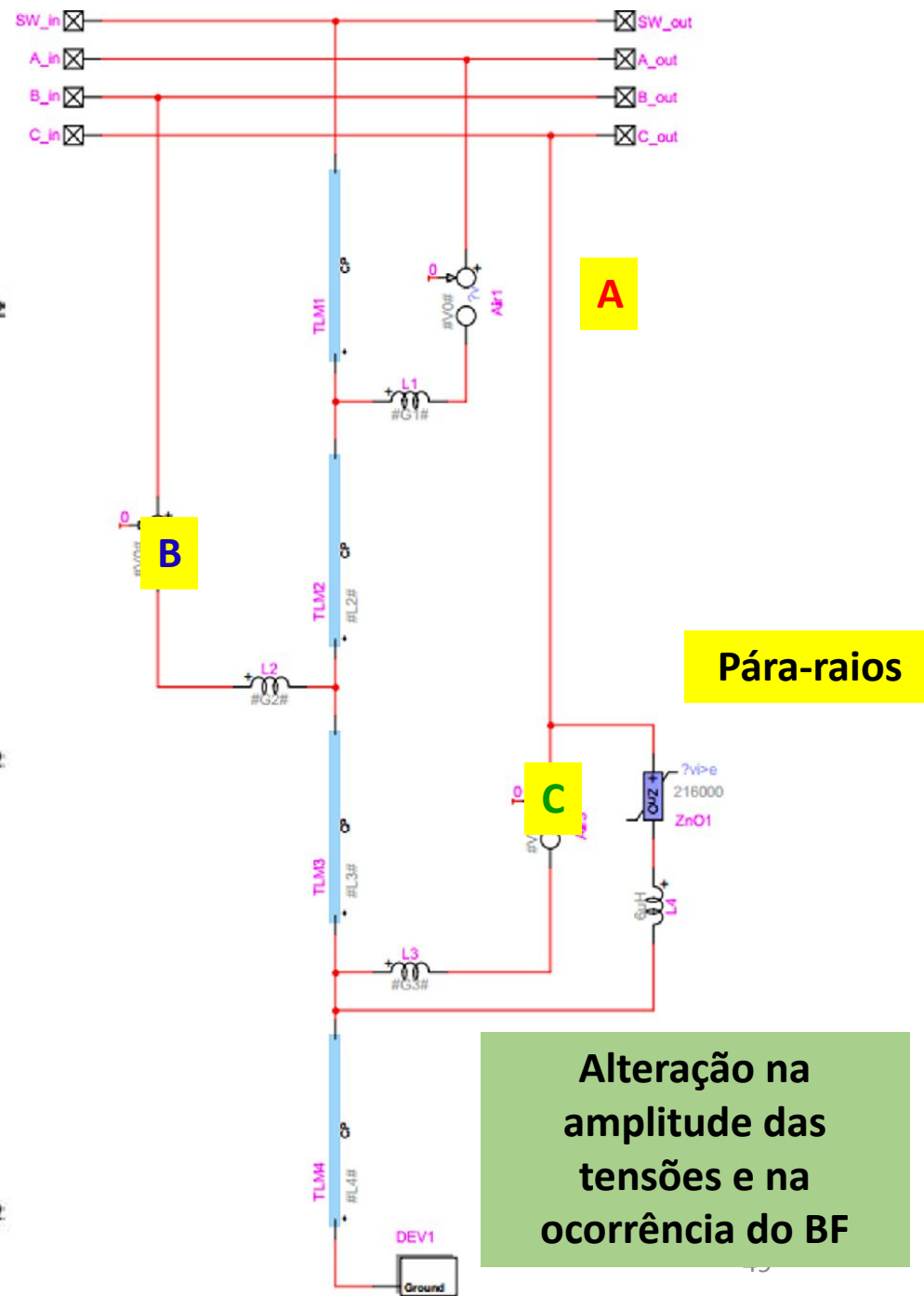
(i) with constant tower grounding resistance equal to 175 Ω



(ii) with frequency-dependent tower grounding impedance



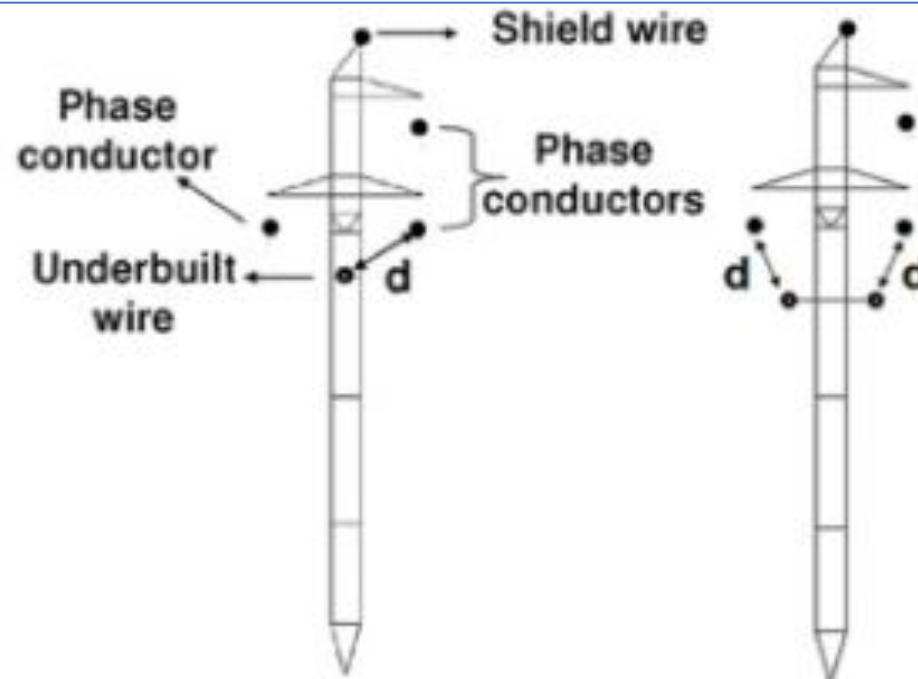
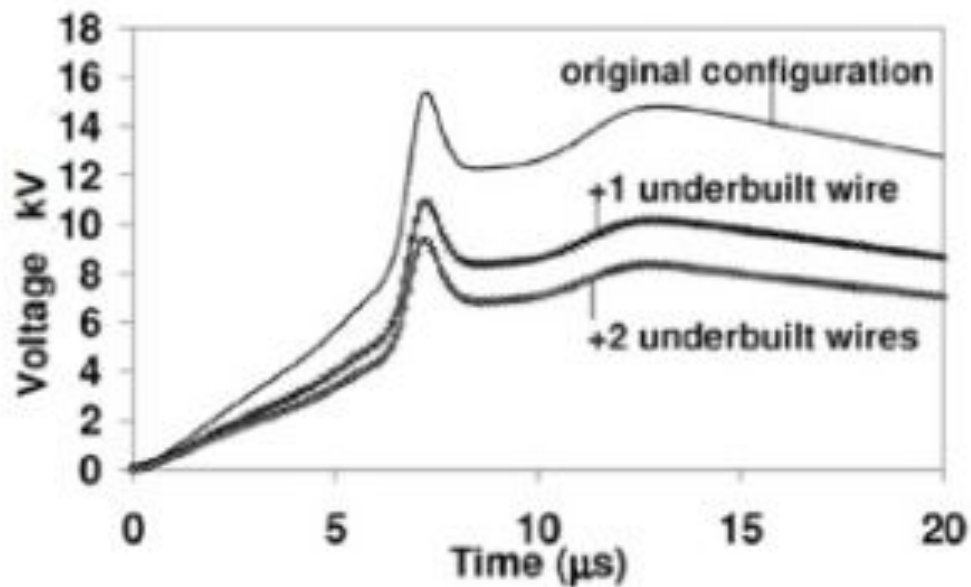
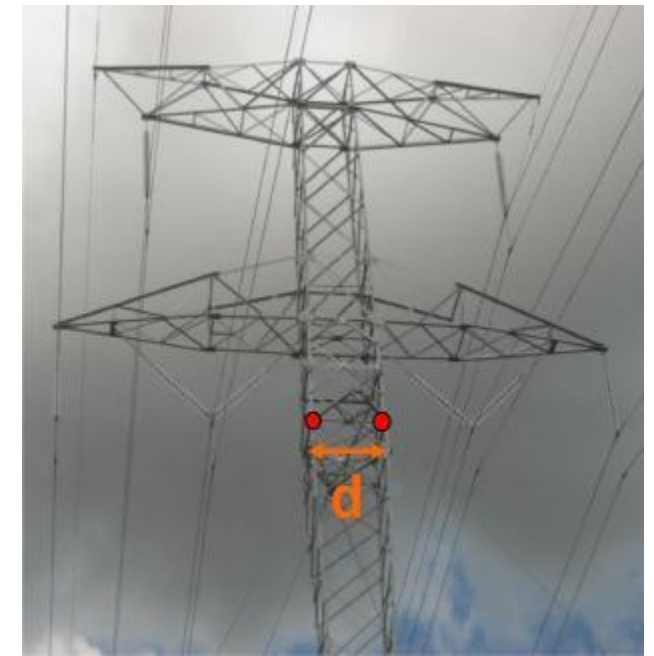
(iii) with frequency-dependent tower grounding impedance and LSA in the phase C



Review of measures to improve the lightning performance of transmission lines

Silverio Visacro  , Fernando Henrique Silveira

Uso de pára-raios underbuilt



Diminuição da impedância de aterramento-método não-convencional



(a)

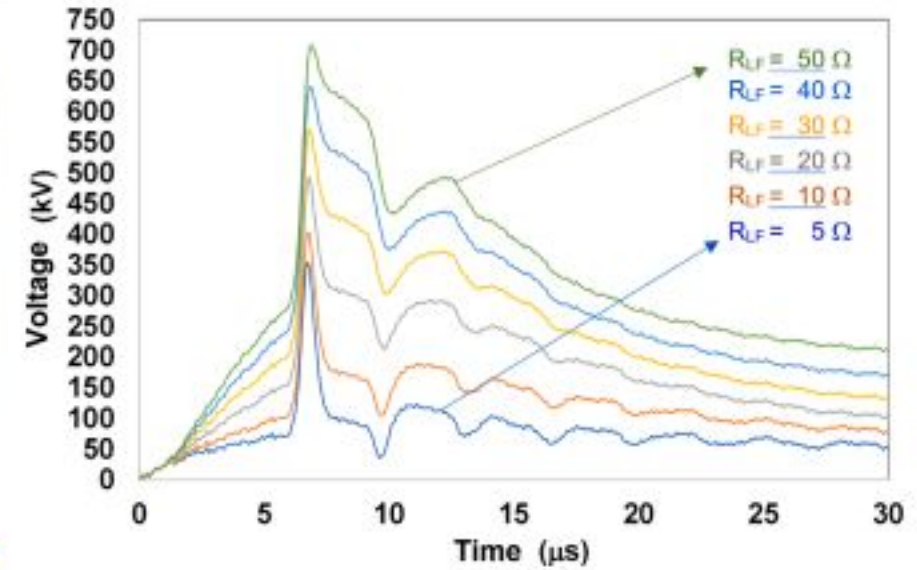
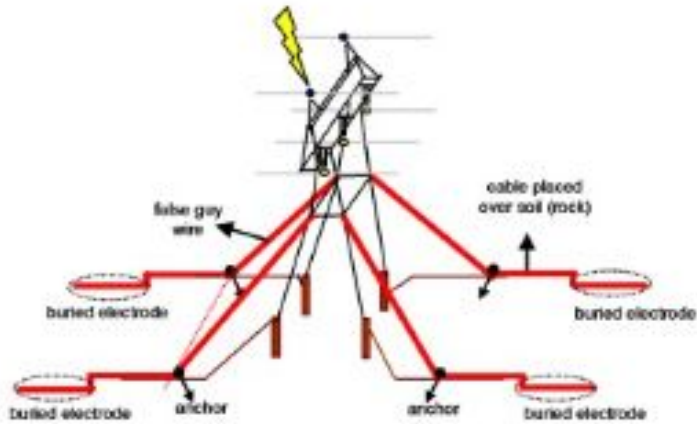


Fig. 2. Reduction of the amplitude of the overvoltage across the upper insulator string of a 230 kV TL, whose guyed tower is submitted to a typical first return stroke current (peak current of 31 kA and front-time of 3,8 μs) by decreasing the tower-footing low-frequency resistance (increasing the length of the counterpoise wires).

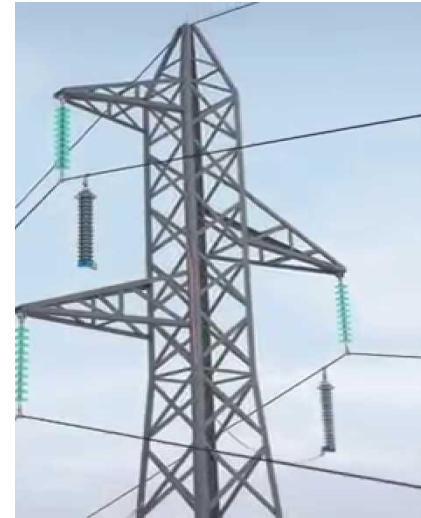
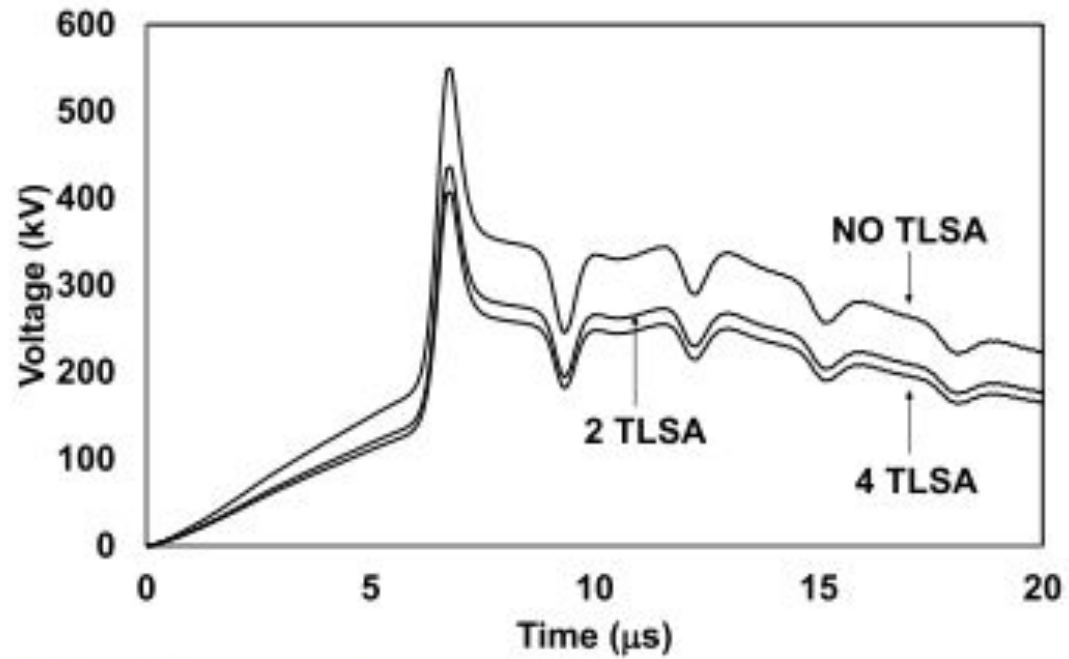


Fig. 6. Illustration of the reduction of overvoltage across the unprotected insulator strings by installing surge arrester devices in parallel with the lower insulator strings of the guyed tower of a double-circuit 230 kV TL [Fig. 9(a)]. Simulated case: strike of a typical first return stroke to the tower top at a lateral. Peak current of 31 kA and front-time of 3.8 μ s. Tower-footing impedance Z_p of the own and adjacent towers of 20 Ω .

Conclusões

- As descargas atmosféricas podem ocorrer de forma direta e indireta nos LTs.
- A impedância de aterramento empregada geralmente nas simulações em transitórios eletromagnéticos é representada por uma resistência constante, na qual não representa o comportamento adequado das sobretensões implicado em análises transitórias errôneas.
- Os diversos modelos propostos mostram a importância da representação das torres de transmissão no cômputo das sobretensões causadas por descargas atmosféricas e na previsão dos backflashovers.
- Deve-se considerar o efeito da frequência no parâmetros do solo para uma análise precisa das sobretensões provocadas pela DAs;
- Deve-se buscar a menor impedância de aterramento possível combinando com os pára-raios de linha (surge arrester), para-raios (ou cabos) underbuilt . Nota-se uma melhor performance da LT e os riscos de um BF são significativamente reduzidos.

- Artigos de interesse

<http://www.ihu.unisinos.br/159-noticias/entrevistas/591727-os-impactos-ambientais-das-linhas-de-transmissao-de-energia-eletrica-entrevista-especial-com-larissa-donida-biasotto>

(Impacto das torres e fontes renováveis).

https://en.wikipedia.org/wiki/Yangtze_River_power_line_crossings (Torre gigante China)

https://www.youtube.com/watch?time_continue=26&v=oBNv6jvCrtg&feature=emb_logo

- (Torre gigante em Almerim, Pará)

Torres 238 e 241 no Google Maps <https://maps.app.goo.gl/KyLRRGxYQmGq8o2d8>

- Descarga atmosférica

