

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Aula-10

Representação de Torres e Análise das sobretensões geradas por descargas

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Unicamp)

Anderson Ricardo Justo de Araújo (Unicamp)

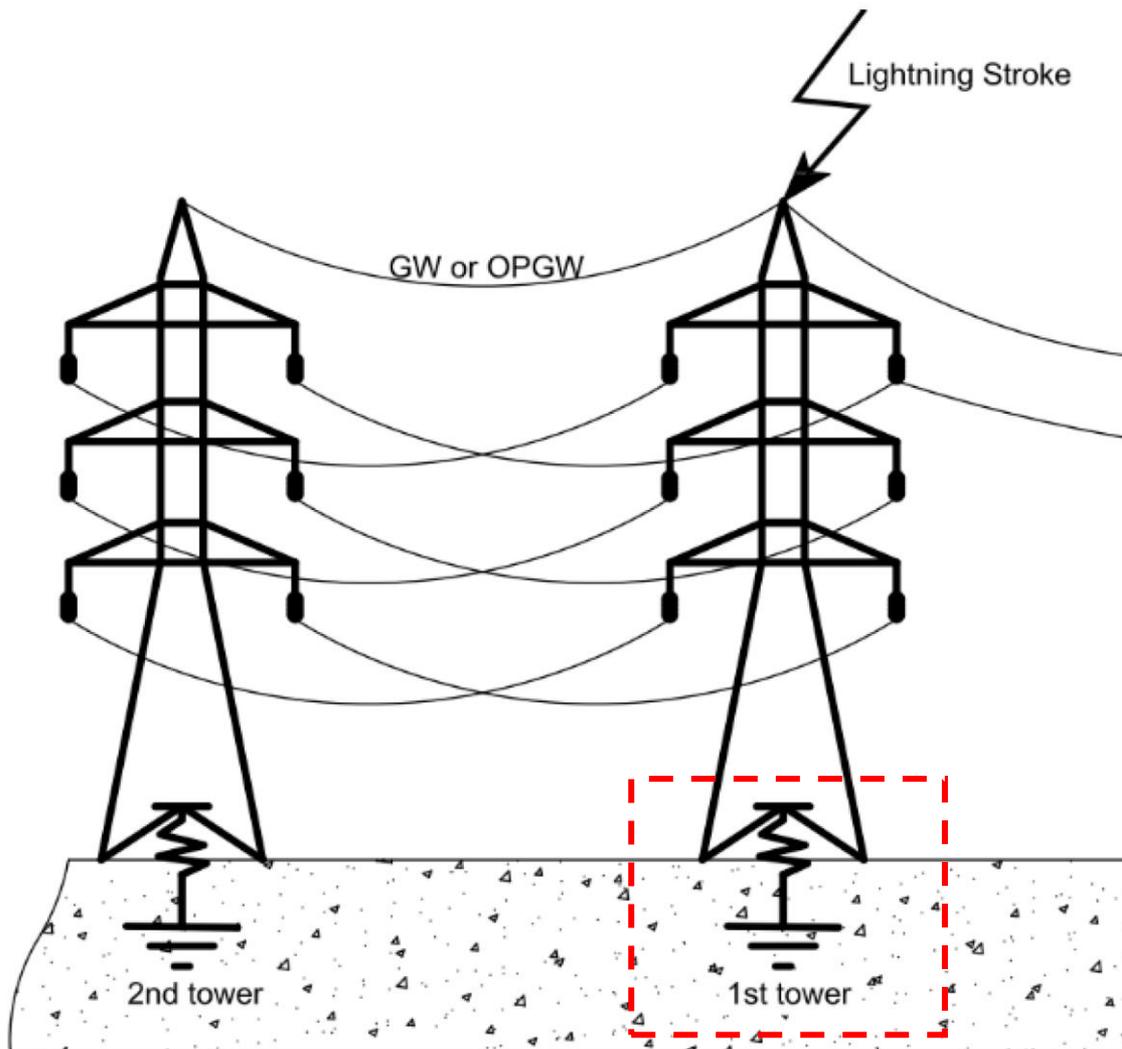
Jaimis Sajid Leon Colqui (Unicamp)

Novembro de 2022

Tópicos

- ❑ Representação de torres de transmissão;
- ❑ Modelagem de um sistema de potência frente às descargas
- ❑ Análise das sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas

Sistema de Aterramento



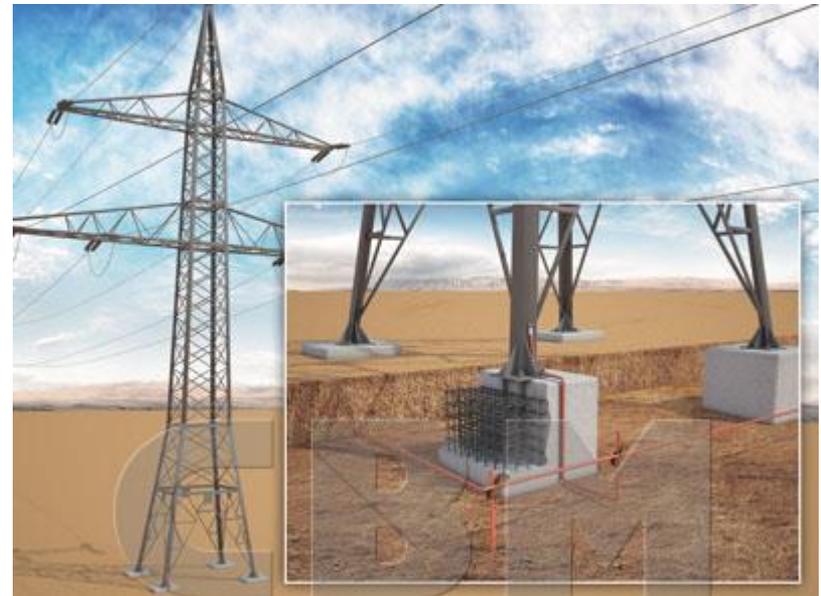
- (1) Descarga Atmosférica
- (2) Sistema de Aterramento
- (3) Torre de Transmissão
- (4) Linhas de Transmissão

Objetivos do aterramento

- Os sistemas de aterramento são compostos desde simples condutores metálicos até condutores dispostos em distintos arranjos formando malhas de aterramento, geralmente ocupando uma área considerável.

Os sistemas de aterramento são empregados para:

- fornecer uma baixa impedância para correntes de faltas pelo solo;
- reduzir as ondas de corrente refletidas a partir da base da torre, reduzindo a probabilidade de backflashovers;
- diminuir o potencial de toque e de passo para proteção de seres vivos próximos à essas estruturas



Natureza do solo

Solo é composto por uma composição complexa de matéria orgânica e minerais compactado em camadas;
Em termos de propriedade eletromagnéticas, o solo pode ser caracterizado por sua: resistividade (ρ), permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ);

A permeabilidade (μ) é praticamente constante, sendo equivalente à do vácuo ($\mu \approx \mu_0$). Entretanto, a resistividade (ρ) e a permissividade (ϵ) são significativamente afetadas por fatores ambientais tais como a umidade, a temperatura, a salidade, assim como pela frequência do sinal transitório injetado ao eletrodo.



Resistividade de solos

	NATUREZA DO SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot m$)
Teor de umidade ↑	Solos alagadiços/pantanosos	5 a 30
	Lodo	20 a 100
	Húmus	10 a 150
	Argila plástica	50
	Margas e argilas compactas	100 a 200
	Areia argilosa	50 a 500
	Areia silicosa	200 a 3000
	Solo pedregoso nu	1500 a 3000
	Solo pedregoso com relava	300 a 500
	Calcáreos moles	100 a 400
	Calcáreos compactos	1000 a 5000
	Calcáreos fissurados	500 a 1000
	Xisto	50 a 300
	Micaxisto	800
	Granito/Arenito	100 a 10000

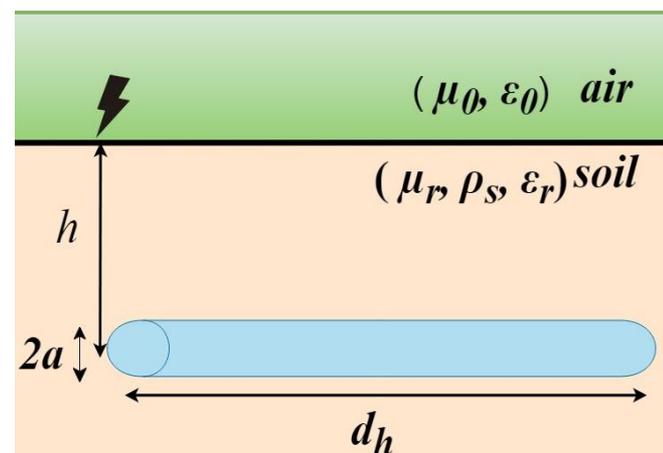
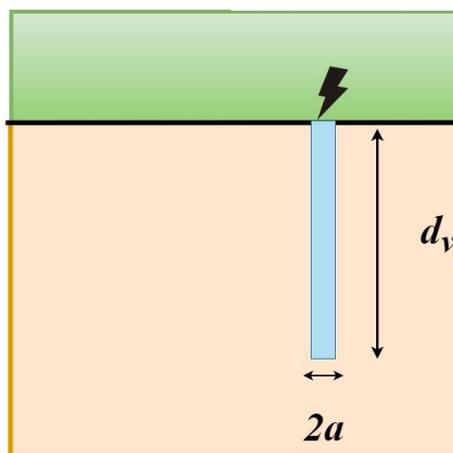
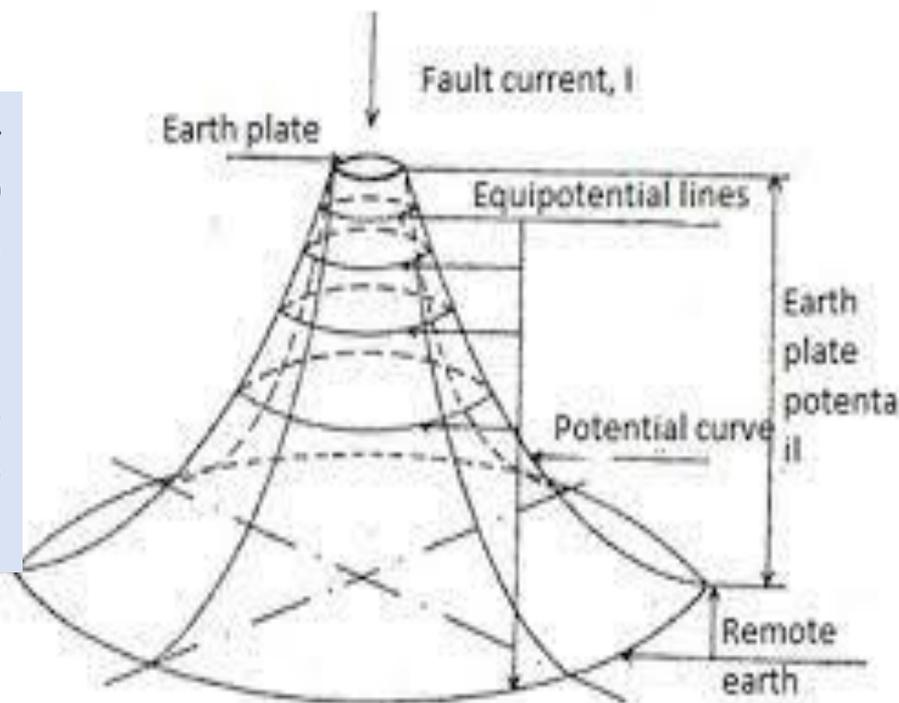
Ground Potential Rise (GPR)

A elevação de potencial (Ground Potential Rise-GPR), no domínio da frequência, é definida como sendo o produto entre a impedância do sistema de aterramento e a corrente impulsiva que flui pelo condutores que resulta em um potencial desenvolvido em relação a um ponto distante considerado (infinito) como sendo o potencial de aterramento remoto (0 V).

No domínio do tempo, o GPR é definido como:

$$v(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [i(t)] Z(j\omega) \}$$

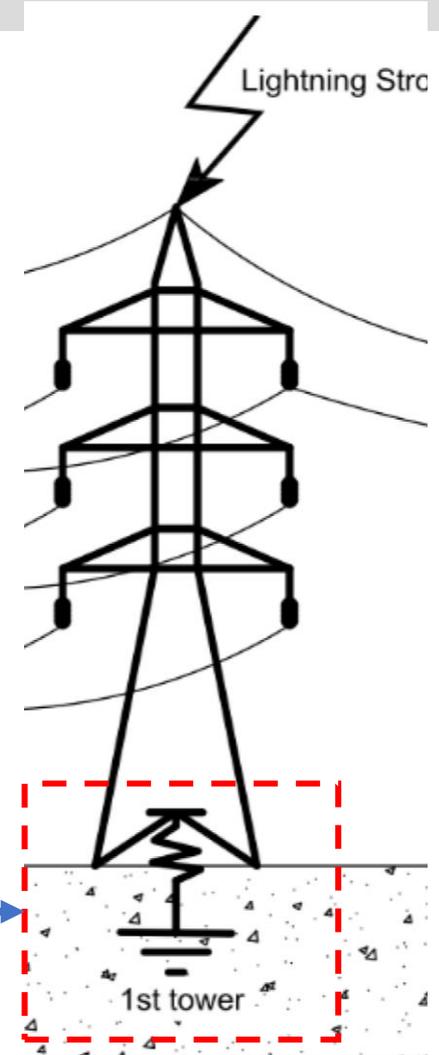
Sendo F a transformada de Fourier do sinal.



Como representar a impedância de aterramento ?

Há 3 formas de apresentar a impedância de aterramento:

- Impedância Harmônica $Z(j\omega)$;
- Impedância impulsiva- Z_p ;
- Resistência estática R_{dc} ;

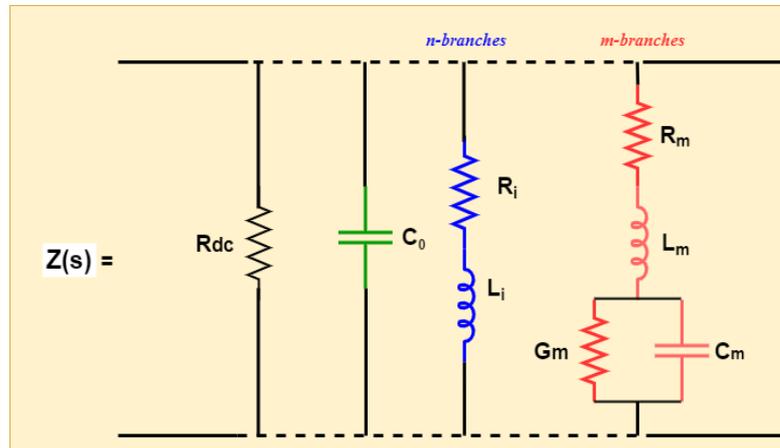
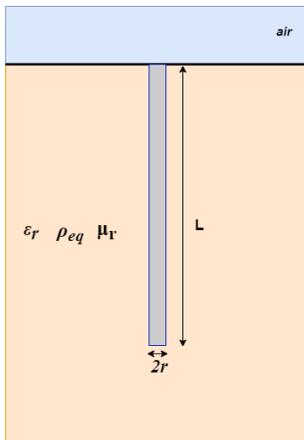
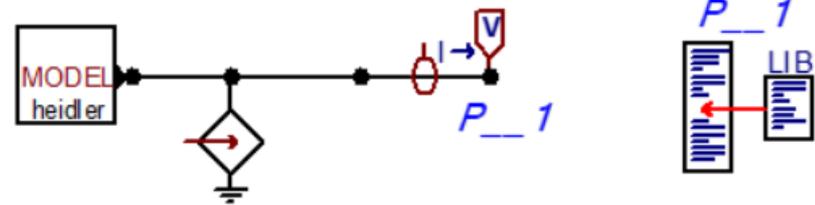
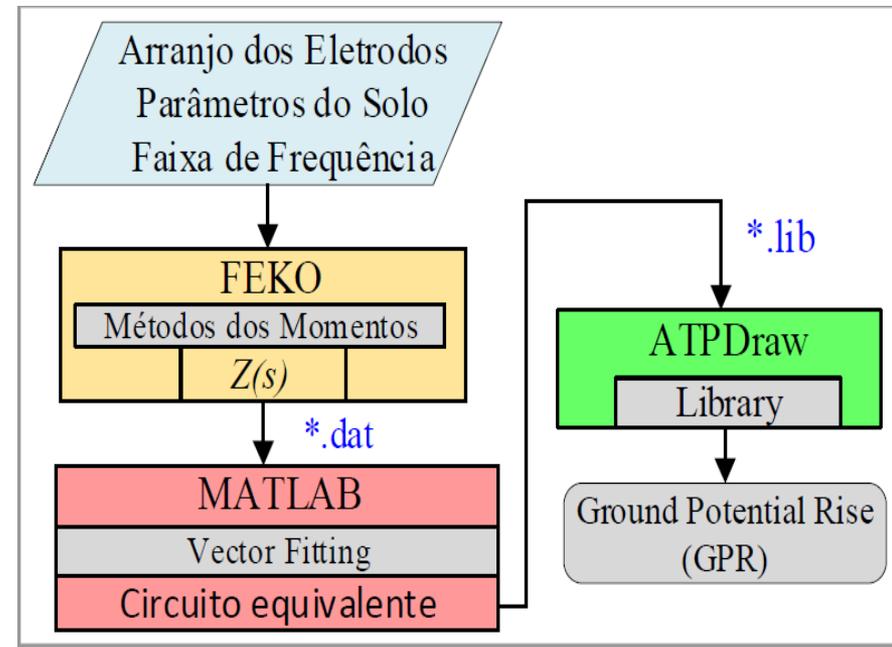


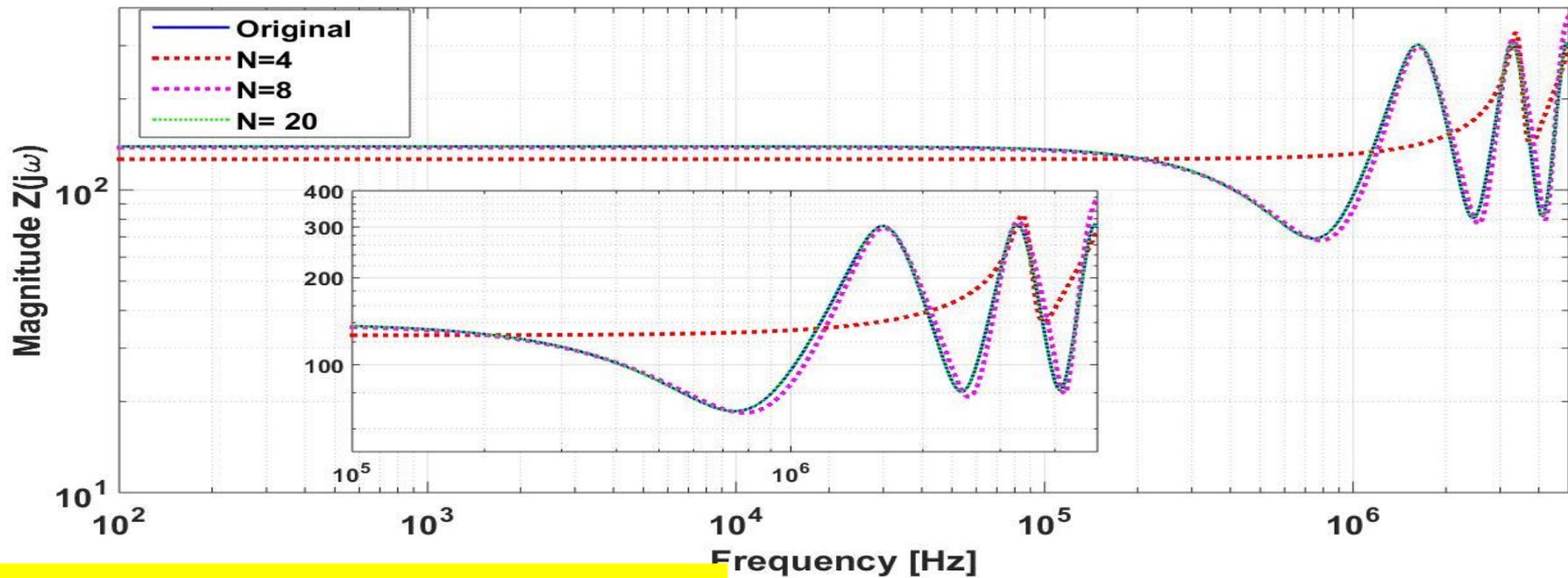
$Z(j\omega)$, Z_p ou R ?

Vector Fitting

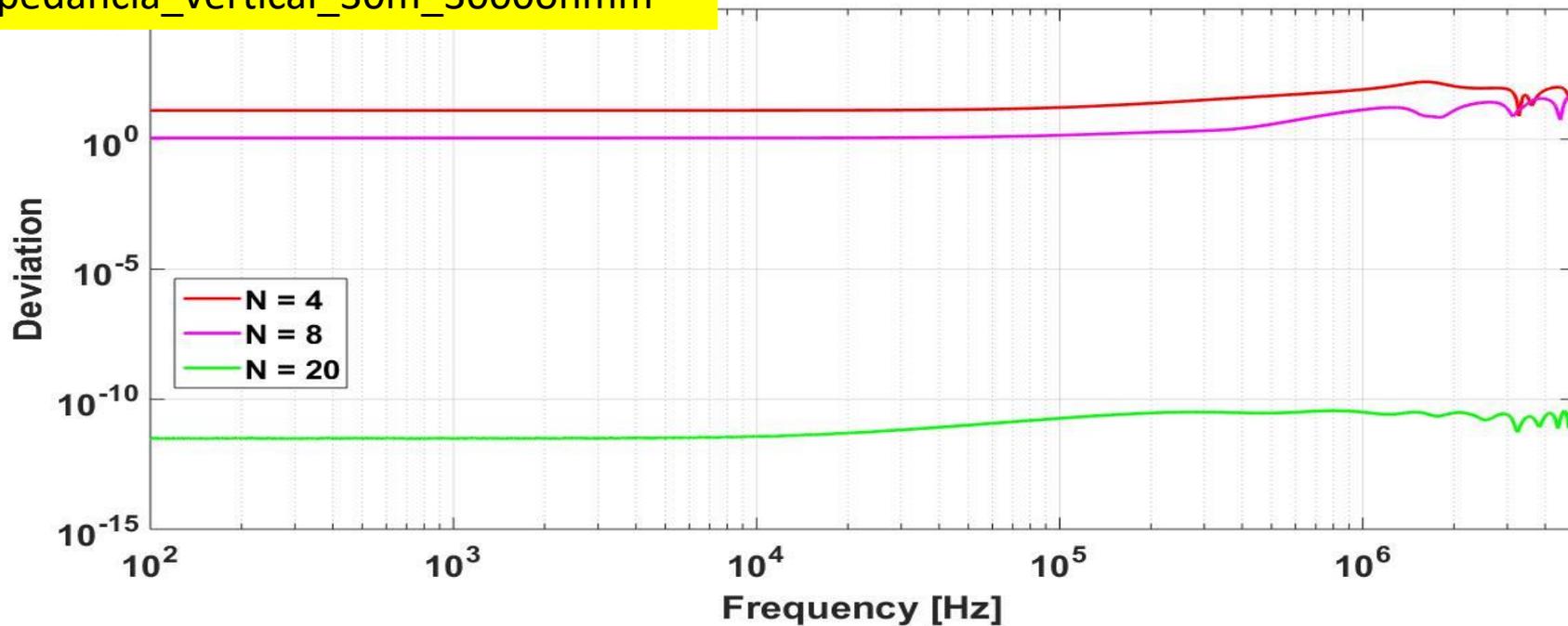
$$Z_h(s) \approx Z_{h,fit}(s) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{c_k}{s + a_k} \right) + d + sh.$$

Onde c_k é o residuo e a_k é o polo de cada ramo.
 O circuito RL sintetiza polos reais; O circuito RLGC sintetiza polos complexos; A representação por circuito não é única, pois depende do número de polos (n).



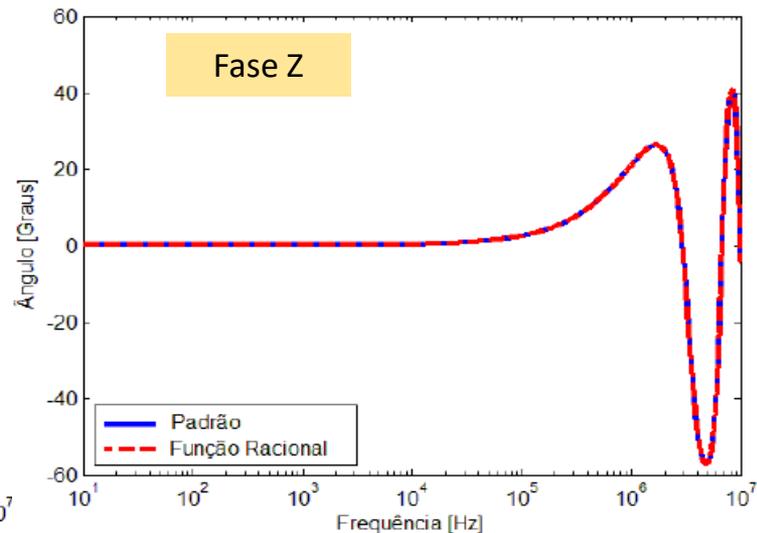
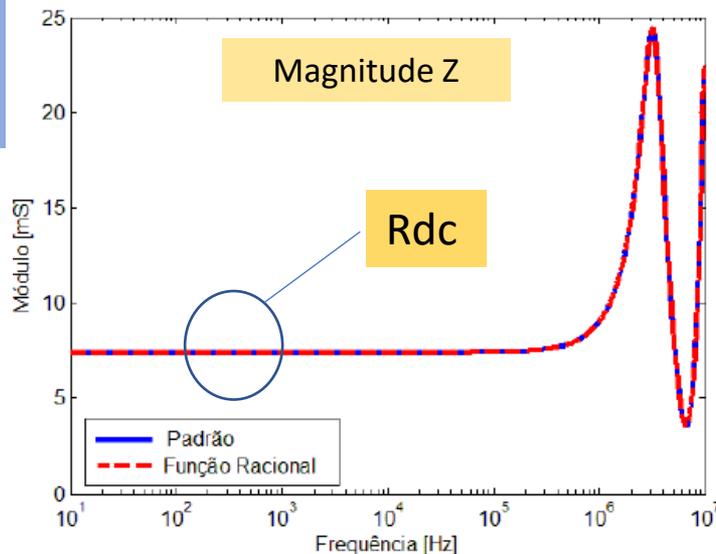
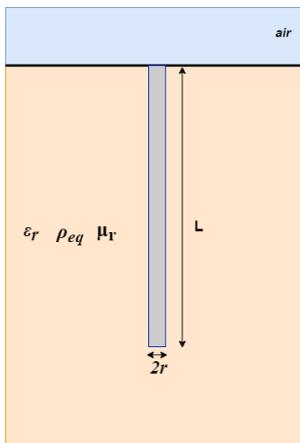


impedancia_vertical_30m_3000ohmm

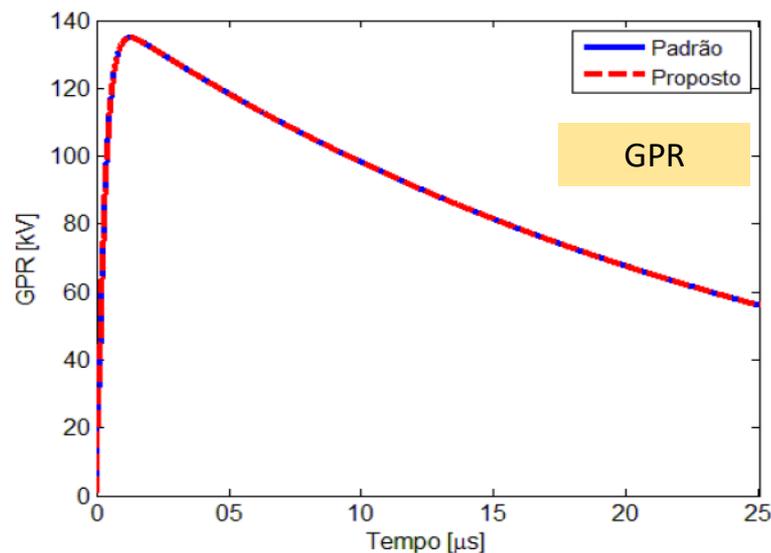
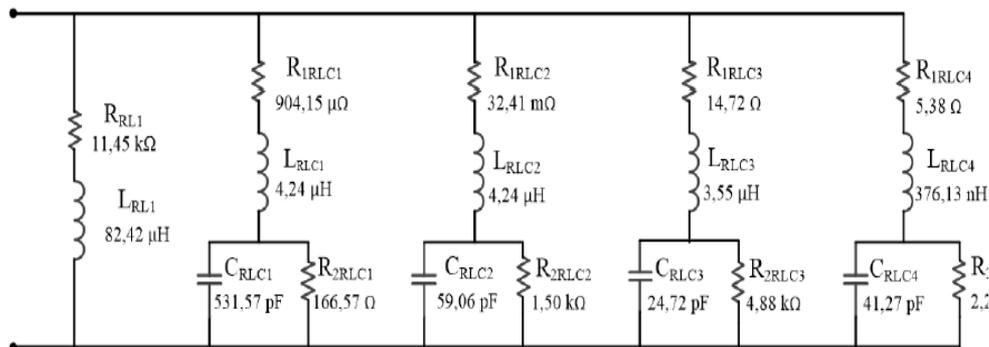


Vector Fitting

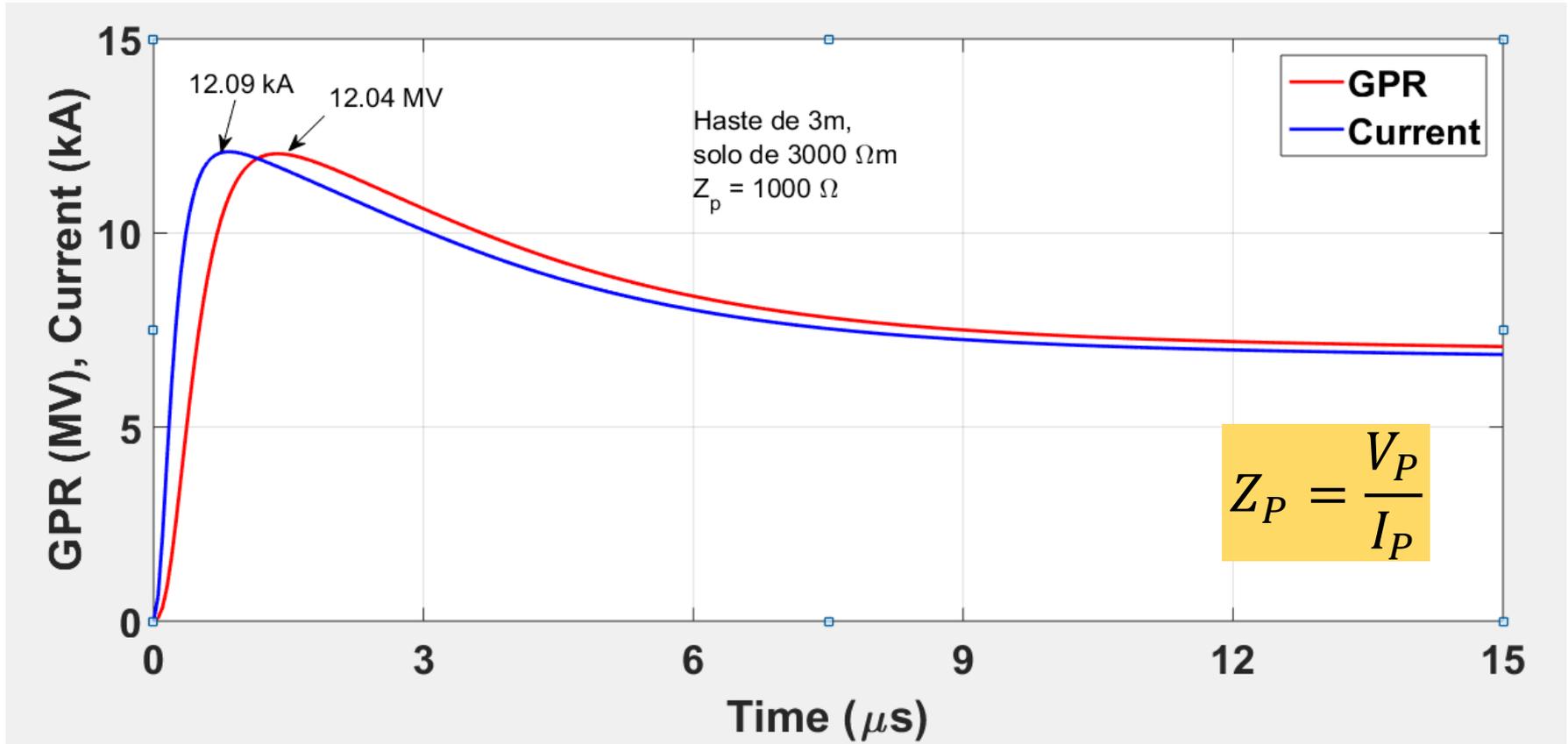
Eletrodo horizontal:
 Raio = 7mm , L = 10 m,
 $\rho = 1.000 \Omega\text{m}$



Circuito sintetizado



Impedância Impulsiva- Z_p



The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications

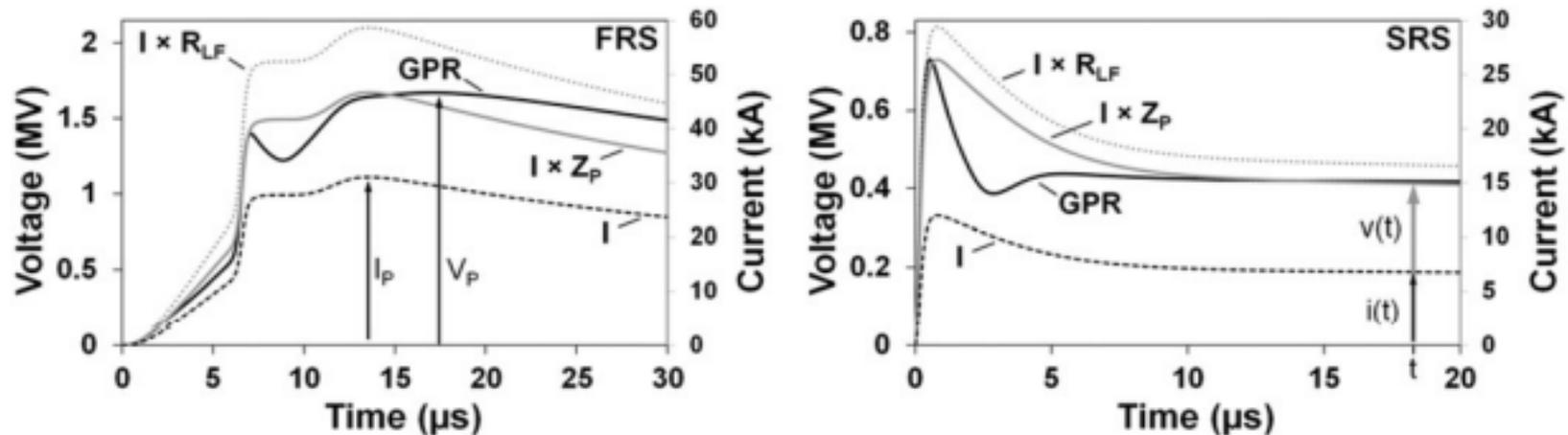
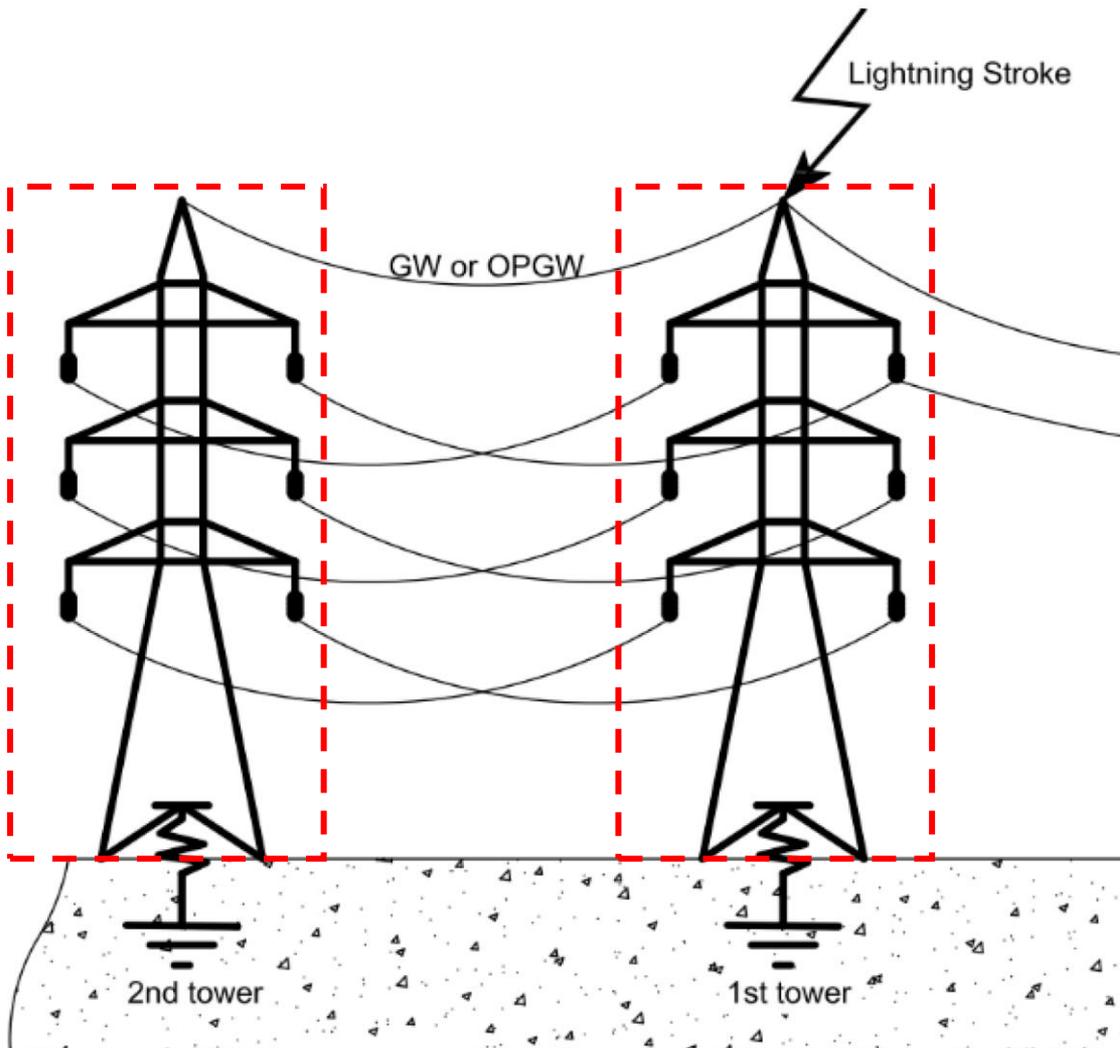


Fig. 2. Response of a 60-m long horizontal electrode (radius of 0.5 cm) buried 0.5 m deep in a 2000-Ω·m soil subjected to representative currents of FRS and SRS, under different representations: physical representation, $R_{LF} = 69 \Omega$ and $Z_P = 54 \Omega$ (FRS) and 61Ω (SRS).

$$v(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [i(t)] Z(j\omega) \}$$

Torres de Transmissão

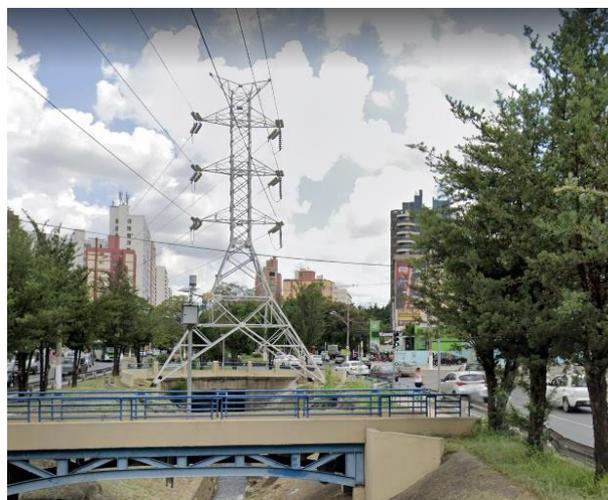


- (1) Descarga Atmosférica
- (2) Sistema de Aterramento
- (3) Torre de Transmissão
- (4) Linhas de Transmissão

As torres de transmissão (TTs) são estruturas de suporte das linhas de transmissão com o objetivo de sustentar os cabos condutores e pára-raios para o transporte da energia elétrica;

Deve-se respeitar as distâncias adequadas de segurança, referentes aos campos elétricos e magnéticos e criar o menor impacto visual e ambiental (possível).

São construídas na forma de treliças com perfis de aço galvanizado montadas sobre uma base de concreto.



Torres gigantes na Amazônia

<https://www.youtube.com/watch?v=oBNv6jvCrtg> →



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

Torres de transmissão elevadas

Torres Convencionais



Estaiada
440 kV/46 m



China-Yangtze
River
500 kV/385 m



Autoportante
circuito duplo
400 kV/45 m



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



Autoportante
circuito simples
138 kV/25 m

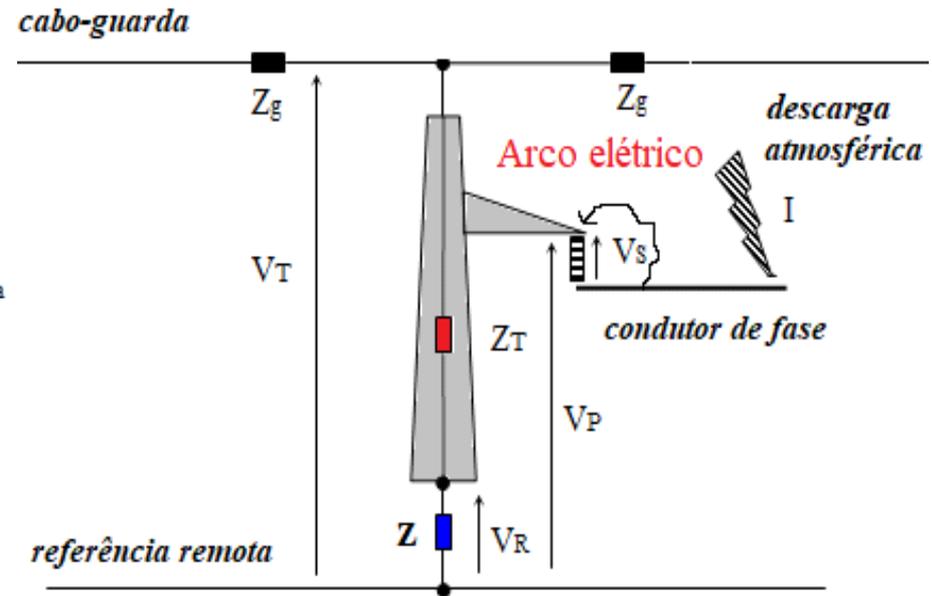
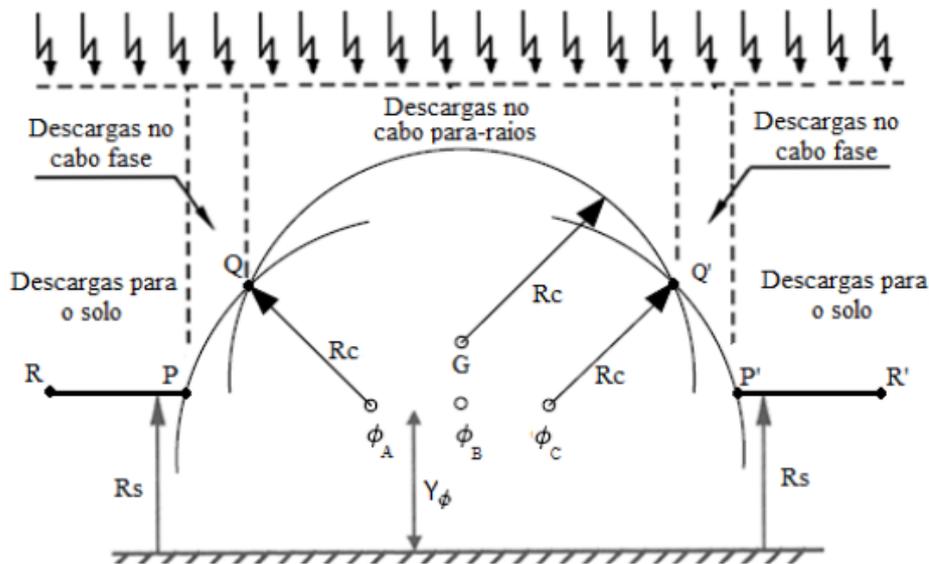
Germany-Rio Elba
Elbekreuzung-2
380 kV/227m

- ❖ As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de distúrbios causados em linhas de transmissão no Brasil;
- ❖ As descargas atmosféricas geram sobretensões nas torres e podem causar o backflashover (BF).
- ❖ Os BFs exercem importante influência no desempenho de um sistema de transmissão, para todos em solos de media e alta resistividade.
- ❖ Os BFs podem levar aos desligamentos da linha.
- ❖ A análise de descargas atmosféricas nas torres das linhas de transmissão desempenham um papel fundamental na sua proteção e diversos parâmetros devem ser levadas em consideração.

- ❖ Diversos modelos de torres para o cálculo das tensões provocadas por descargas atmosféricas são disponíveis na literatura. Nesses modelos, a impedância de surto e a impedância de aterramento são fundamentais para análises transitórias;
- ❖ Diversos modelos de torres de transmissão e metodologias para o cálculo da impedância de surto têm sido desenvolvidos e aplicados pelos pesquisadores;
- ❖ A impedância de aterramento é representada por uma simples resistência nas análises transitórias, o que pode levar às incertezas;
- ❖ Tais modelos não consideram:
 - (i) as treliças e os braços das torres de transmissão em sua modelagem;
 - (ii) a resistividade do solo-desenvolvidas para um solo condutor ideal;
 - (iii) a impedância de aterramento e sua dependência com a frequência;
 - (iv) torres de altura elevadas (torres gigantes).

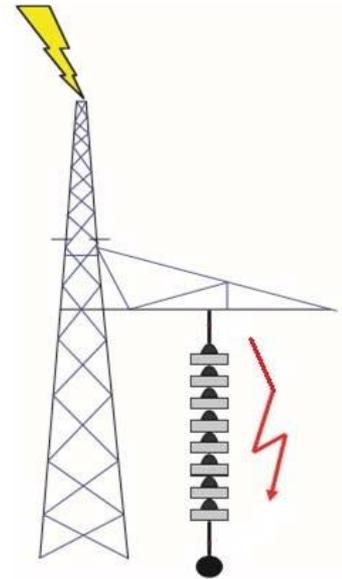
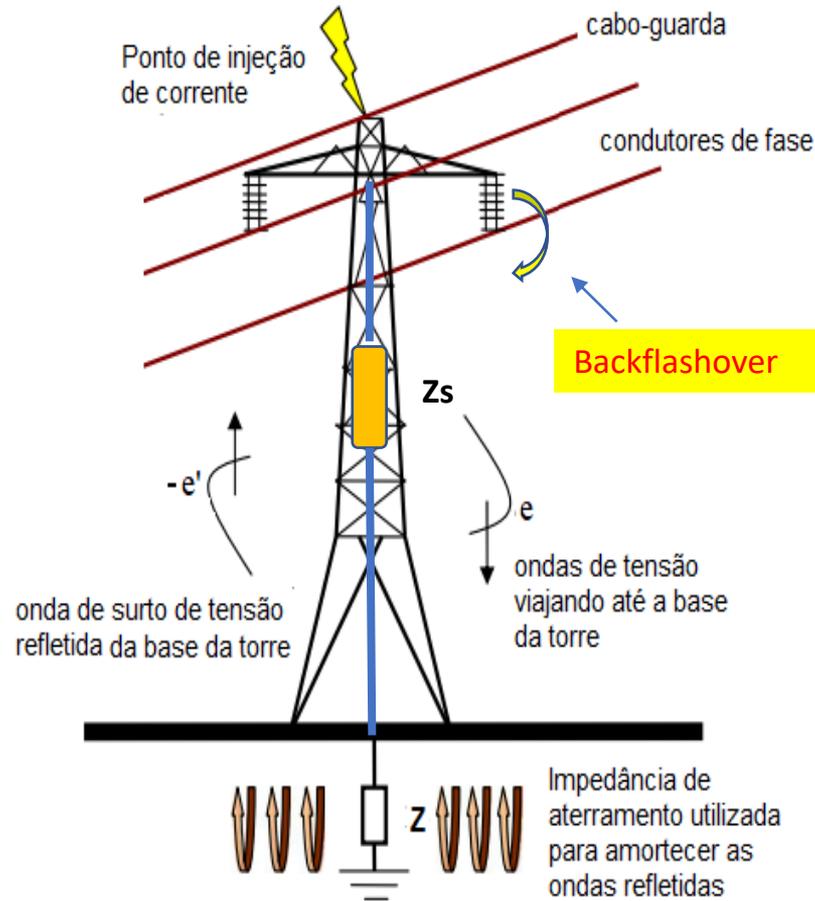
Flashover

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 pela impedância de aterramento da torre e pelo topo da torre, elevando o potencial nos braços das torres, gerando reflexões múltiplas ao longo da torre atingida.
- ❖ Se essas tensões exceder o *limiar crítico de flashover* (CFO), um BF ocorrerá sobre a cadeia de isoladores.

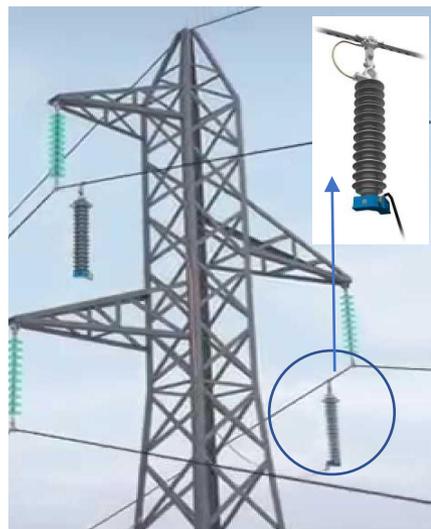


Redução dos Backflashovers

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).



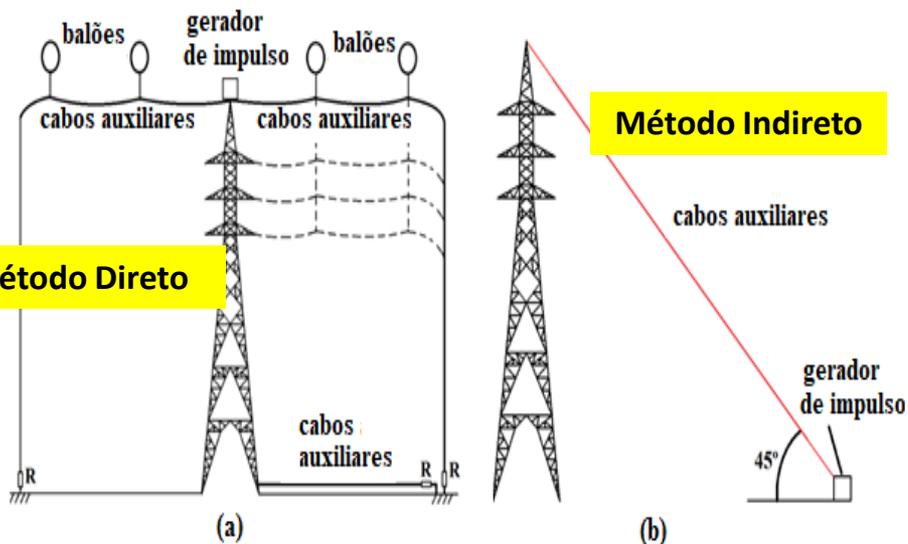
BFs e surge arresters (pára-raio de linhas)



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)**



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

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

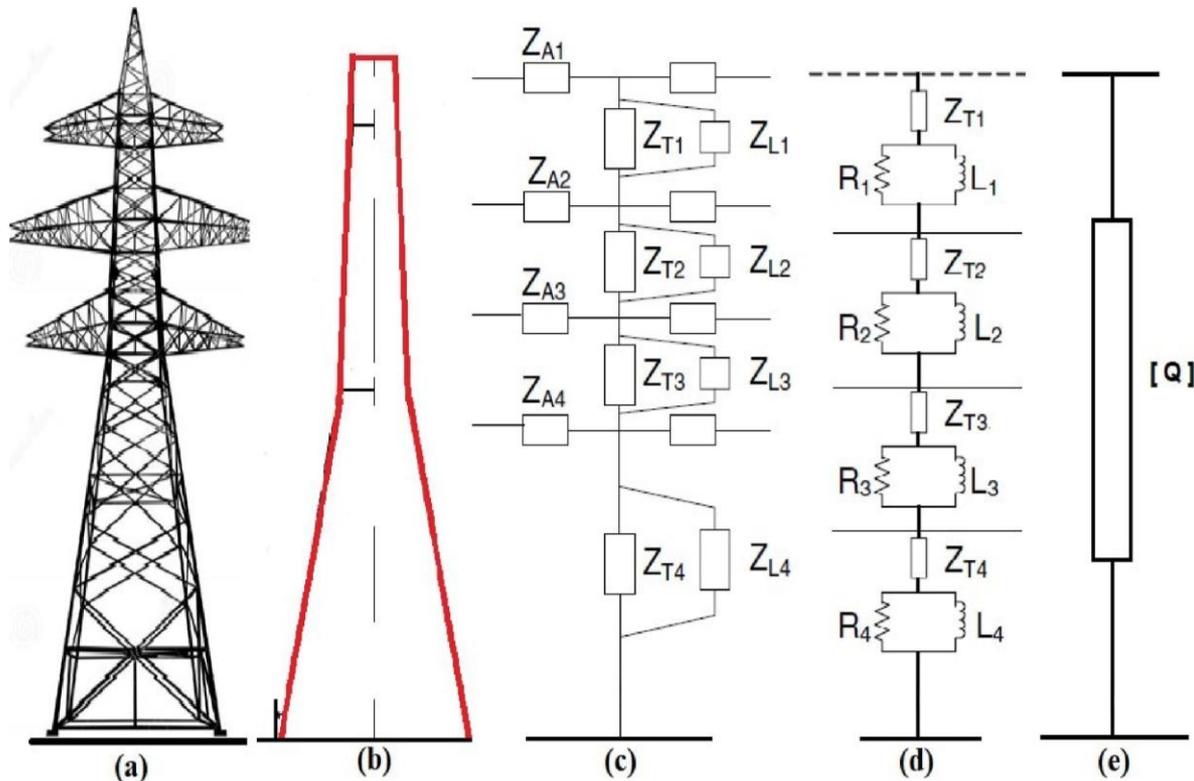


Modelagem de torres de transmissão

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

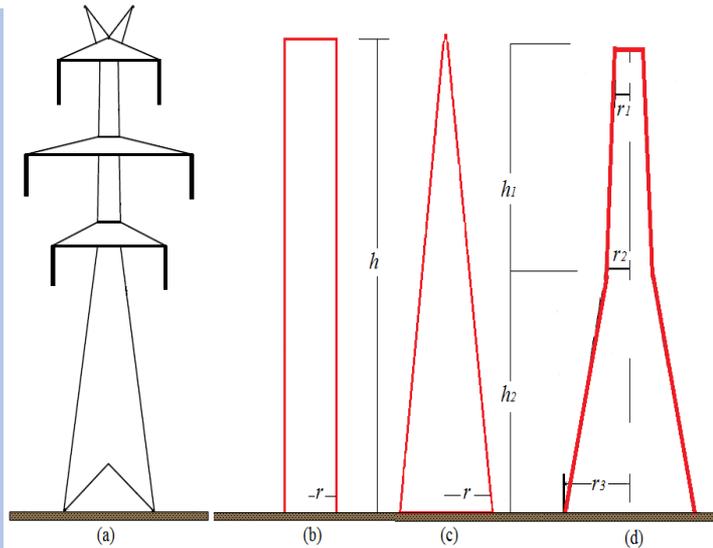
Esses são classificados em:

- (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.



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	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right)$

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

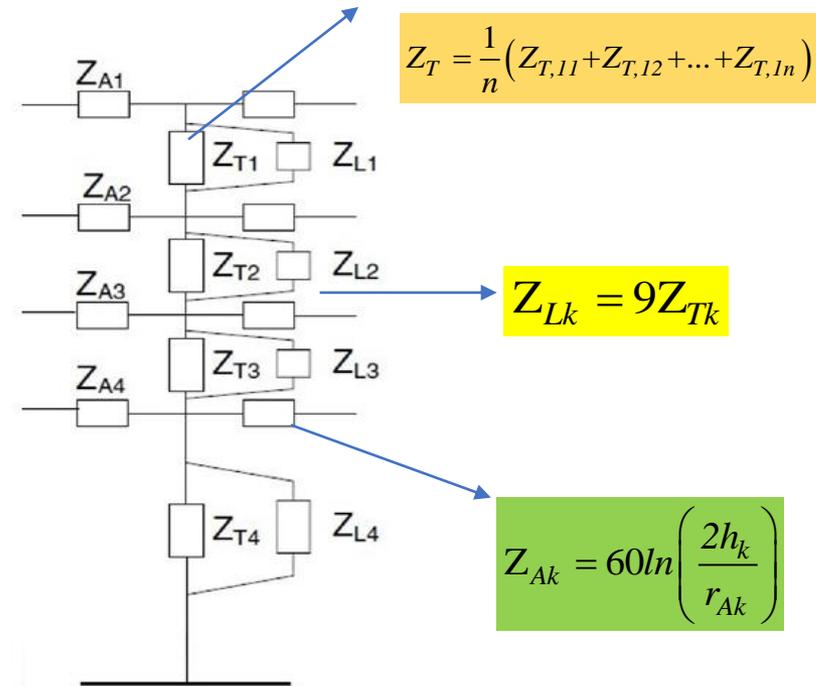
Modelos multicondutores

- ❖ 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.



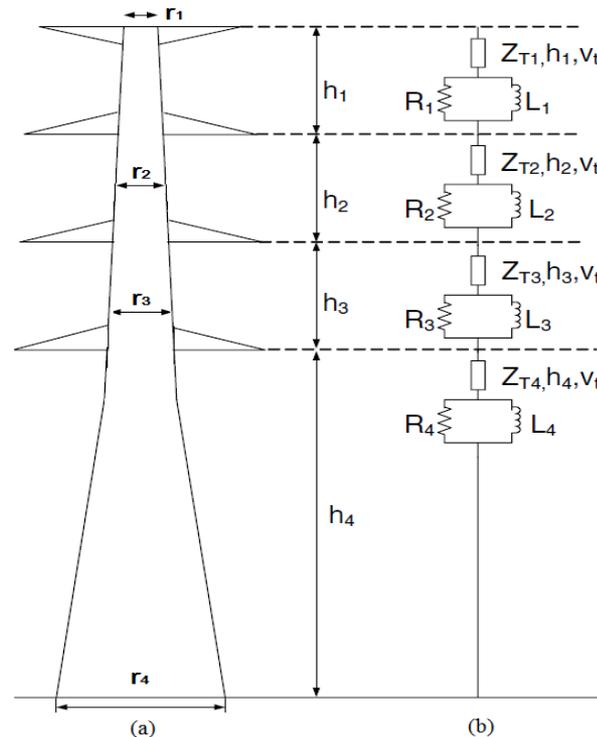
$$Z_{T,kk} = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right]$$

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



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;



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

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

$$R_4 = -2Z_{T_4} \ln(\sqrt{\gamma})$$

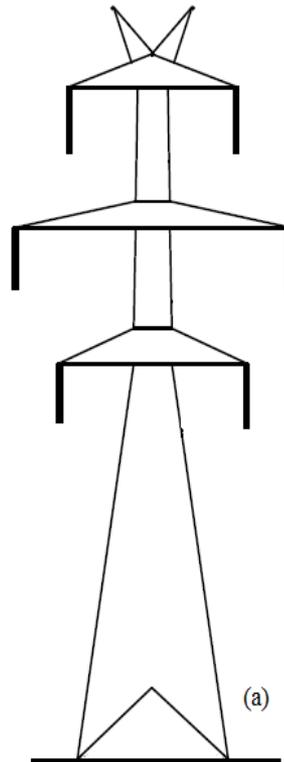
$$L_i = R_i \frac{h}{v_T} k_i$$

Modelos de torres dependentes da frequência (Quadripolo)

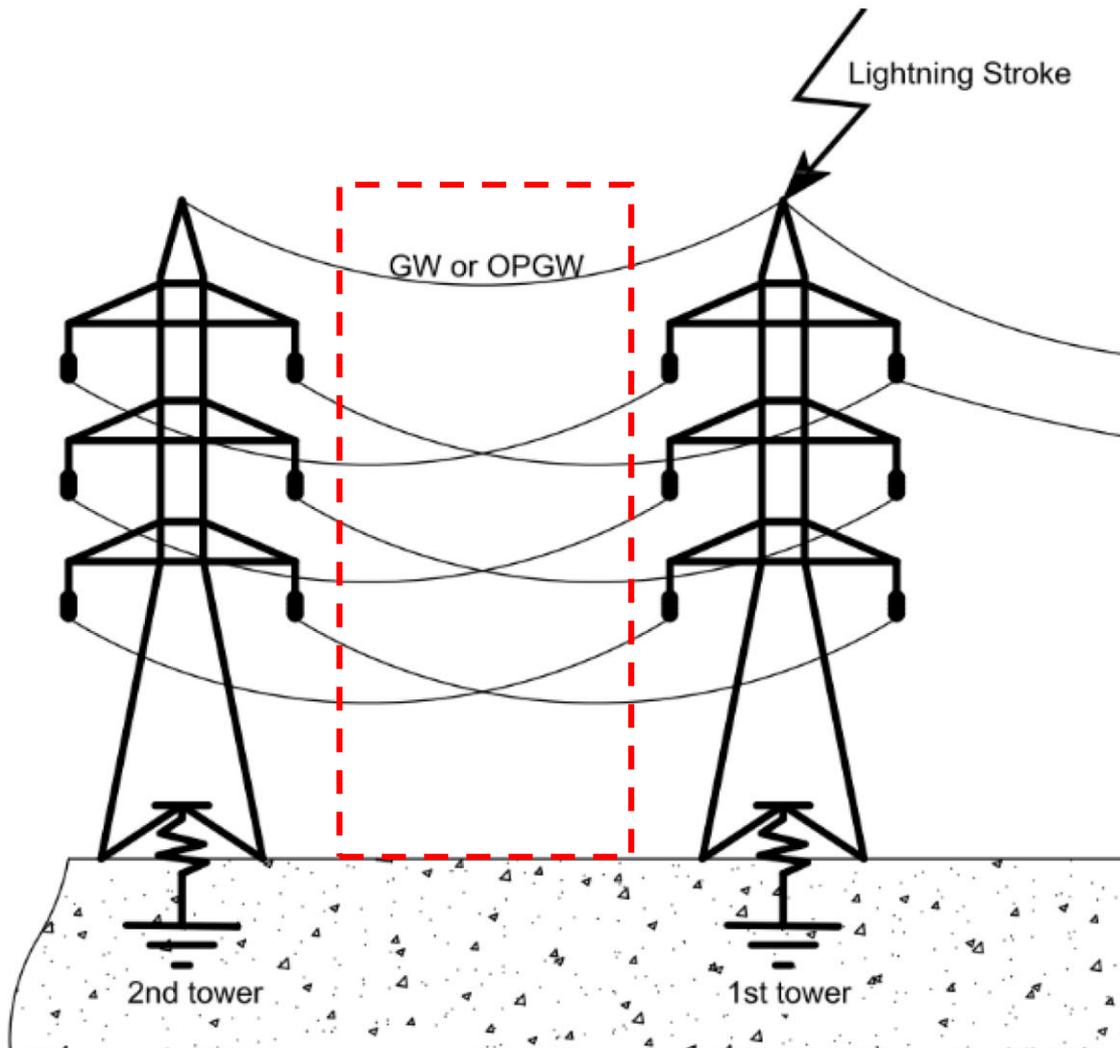
- ❖ Representam a torre de transmissão por linha de transmissão no domínio da frequência.
- ❖ A torre de transmissão é representada por uma linha uniforme, como uma impedância de surto dependente da frequência.
- ❖ A torre é representada por um *quadripolo* e as correntes e tensões são descritas pelas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

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

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



Linhas de Transmissão



- (1) Descarga Atmosférica
- (2) Sistema de Aterramento
- (3) Torre de Transmissão
- (4) Linhas de Transmissão

Modelagem da linha de transmissão

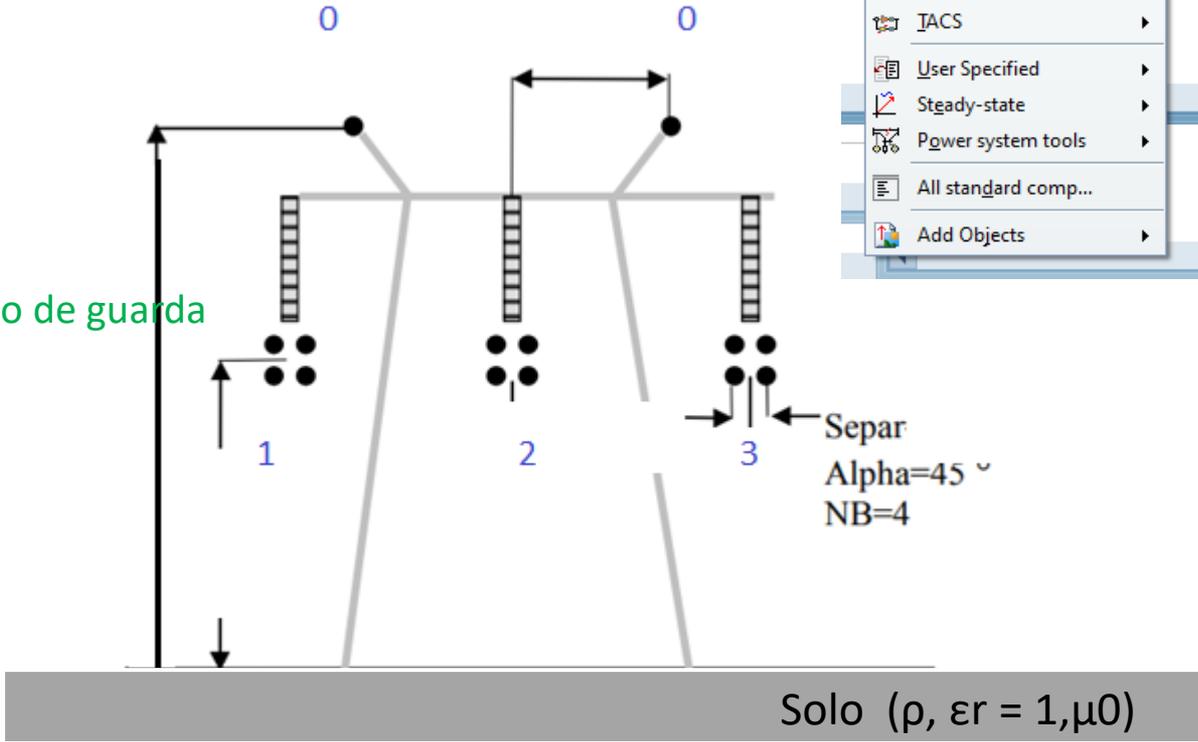
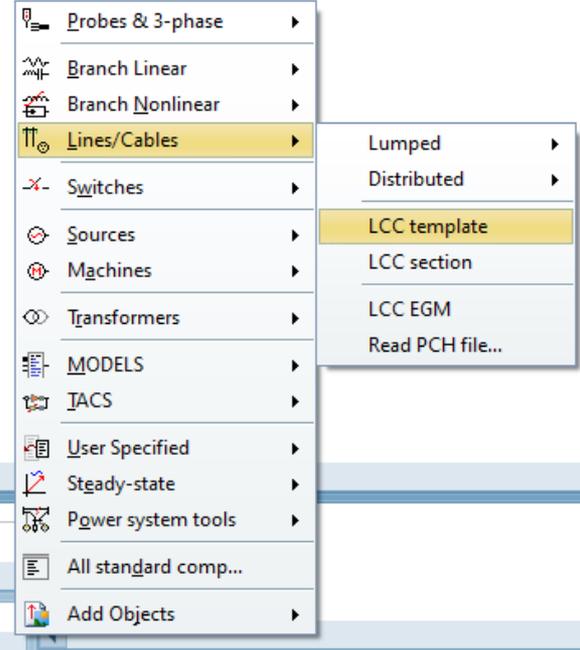
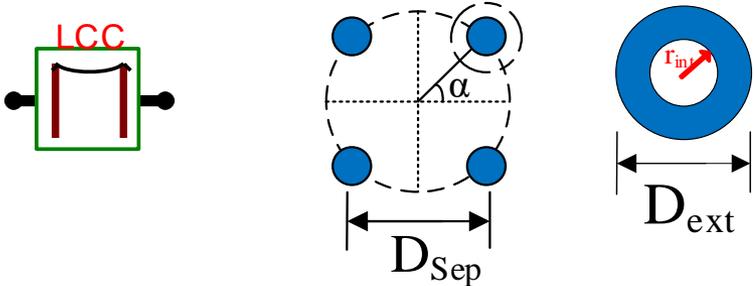
❖ Energização de uma Linha de transmissão trifásica

Condutores de fase

- Longitude
- Tensão

Condutores de fase

- Resistencia
- Raio_in
- Raio_ext
- Condutores de cabo de guarda
- Resistencia
- Raio_in
- Raio_ext



Simulação de manobras em linhas de transmissão.

Line/Cable Data: 500kV

Model | Data | Nodes

System type

Name: 500kV

Overhead Line

#Ph: 3

Standard data

Rho [ohm*m] 1000

Freq. init [Hz] 0.1

Length [km] 100

Model

Type

Bergeron

PI

JMarti

Noda

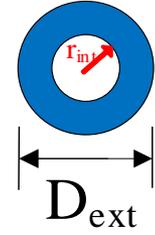
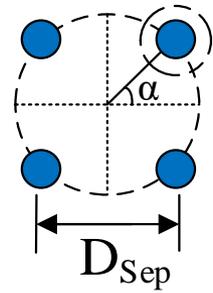
Semlyen

Comment: CS-525 KV CAND-MELO 4XDOVE PR:1XACO3/8 E OPGW

Order: 0

Label:

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify



Line/Cable Data: 500kV

Model | Data | Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.4335	1.177	0.1181	-10.8	31.62	12.23	45.7	45	4
2	2	0.4335	1.177	0.1181	0	32.62	12.83	45.7	45	4
3	3	0.4335	1.177	0.1181	10.8	31.62	12.23	45.7	45	4
4	0	0.36	0.67	0.724	9.05	42.25	23.7	0	0	0
5	0	0.36	0.457	0.724	-9.05	42.25	23.7	0	0	0

0 indica o para-raio

Add row Insert copy row Delete last row Delete this row Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Análise das sobretensões geradas pelas DAs

Deve-se considerar:

- os parâmetros do solo variantes com a frequência, umidade, porosidade, estratificação;
- a resistência R_{dc} / impedância de aterramento Z_p ;
- o número de cabos guarda;
- Formas de onda da Das (amplitude e tempo de subida)
- Presença de pára-raio de linhas (surge arresters);
- O comprimento da cadeia de isoladores.

Modelagem de torres no ATP

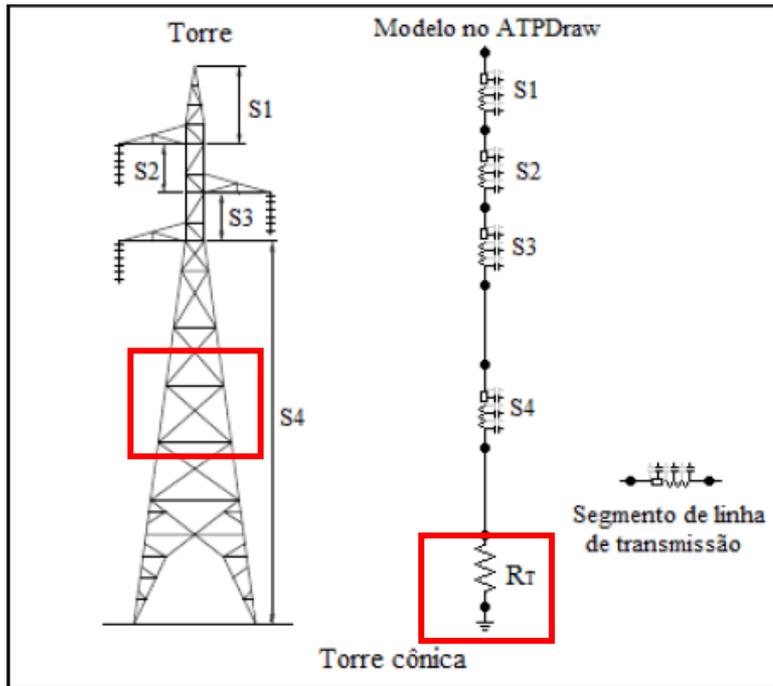
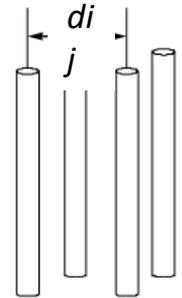


Figura 3-17: Modelagem da torre cônica no ATPDraw.

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

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

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

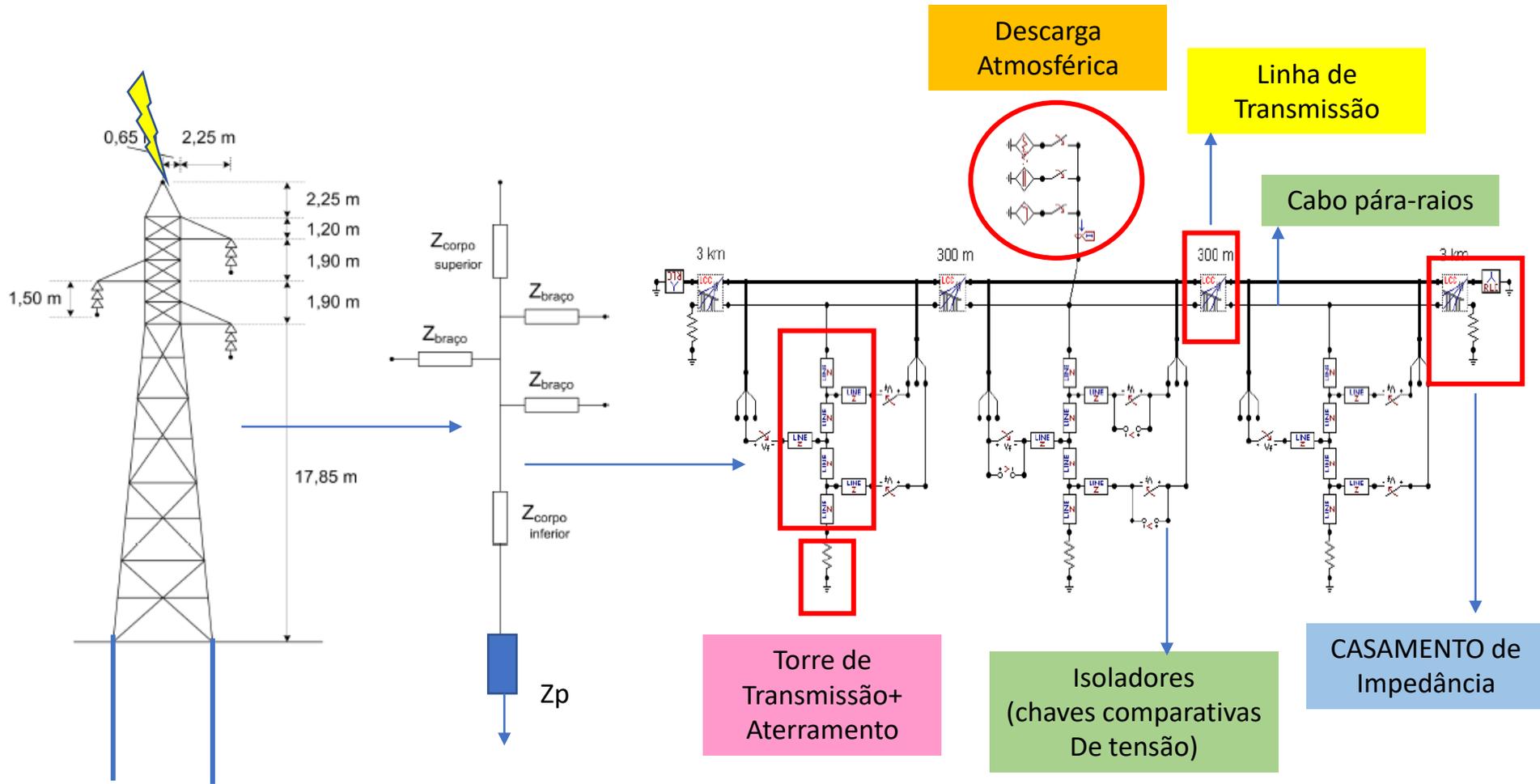


Nas Equações (3-26) a (3-28), n é o número de condutores paralelos, h é a distância do ponto mais alto de cada segmento ao solo, d_{ij} é a distância entre os condutores verticais i e j de cada segmento e r o raio dos condutores cilíndricos. Nos segmentos das torres em que os condutores não sejam paralelos,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



Recent Developments on the Lightning Performance of Transmission Lines

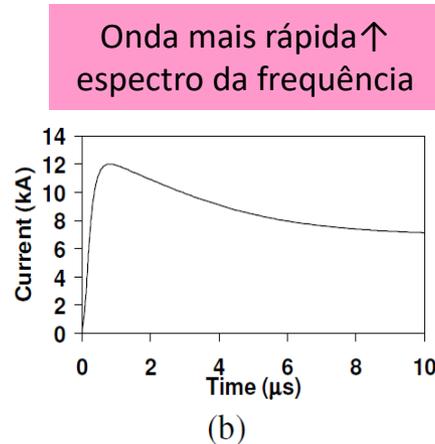
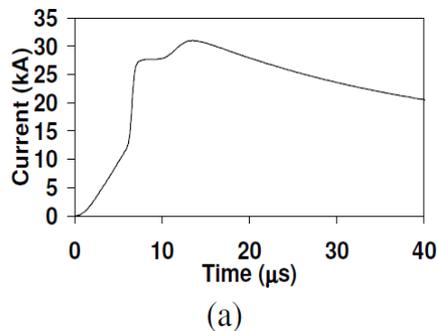
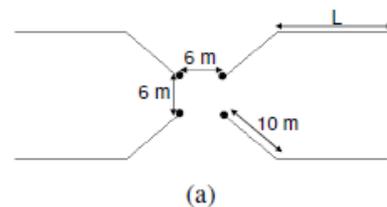


Fig.1. Representative current waveforms with median peak currents and front times of first (a) and subsequent (b) strokes. FST: $I_p = 31.1$ kA, $Td_{30} = 3.8$ μ s, SUB: $I_p = 11.8$ kA, $Td_{30} = 0.67$ μ s.

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

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

Dependência dos
parâmetros elétricos do
solo com a frequência



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).

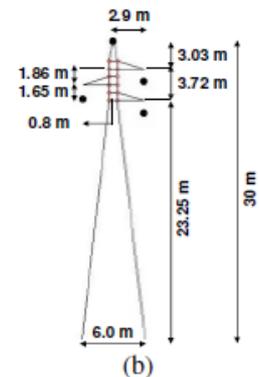
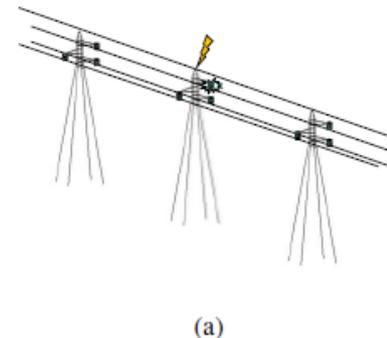


Fig. 3. Representation of direct strike to the tower (a) and the simulated 138-kV transmission line tower configuration (b).

GPR na base da torre

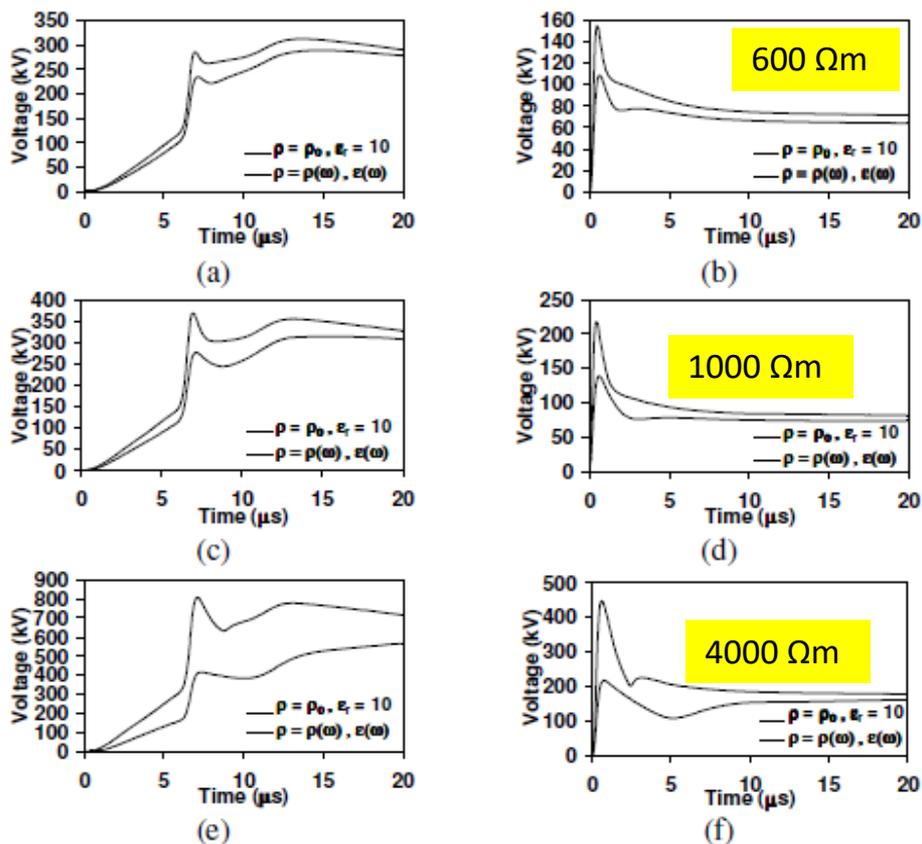


Fig. 4. Simulated GPR of the 138-kV-line tower footing under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters for different values of soil resistivity ρ_0 . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600 $\Omega\cdot\text{m}$, (c),(d) 1000 $\Omega\cdot\text{m}$,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

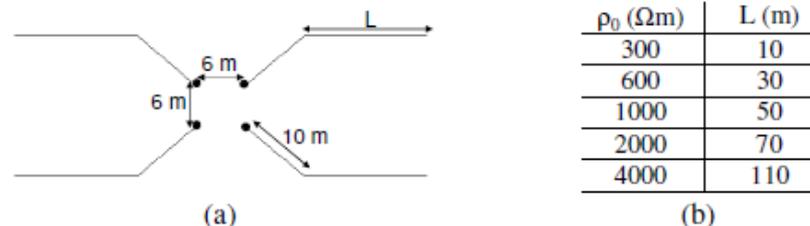


Fig. 2. Simulated grounding electrode arrangement (a) and electrode length as a function of soil resistivity (b).

Zg impedância à baixa frequência

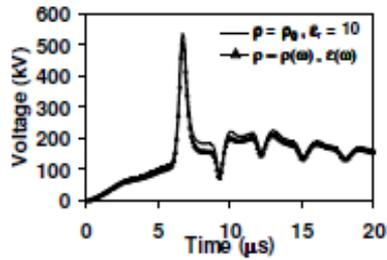
$$Z_P = \frac{V_P}{I_P}$$

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

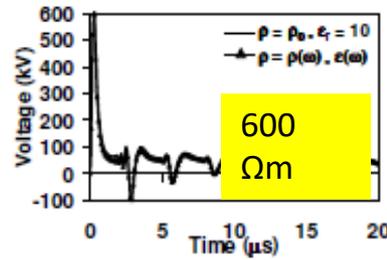
ρ_0 ($\Omega\cdot\text{m}$)	L (m)	R_g (Ω)	Impulse impedance Z_p					
			FST			SUB		
			$\rho=\rho_0,$ $\epsilon_r=10$ (Ω)	$\rho=\rho(\omega)$, $\epsilon(\omega)$ (Ω)	$\Delta\%$	$\rho=\rho_0,$ $\epsilon_r=10$ (Ω)	$\rho=\rho(\omega),$ $\epsilon(\omega)$ (Ω)	$\Delta\%$
300	10	11.1	10.4	9.9	-4.4	9.3	7.8	-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

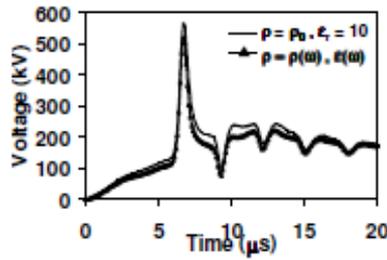
Sobretensão na cadeia de isoladores fase A



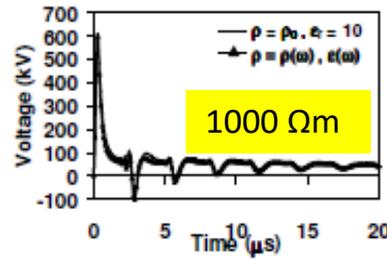
(a)



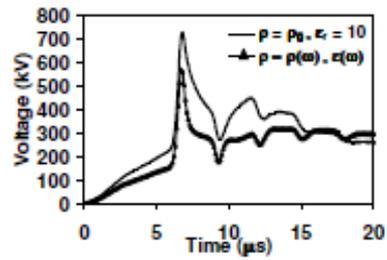
(b)



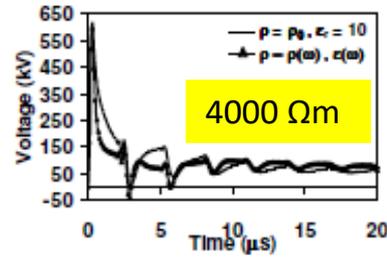
(c)



(d)



(e)



(f)

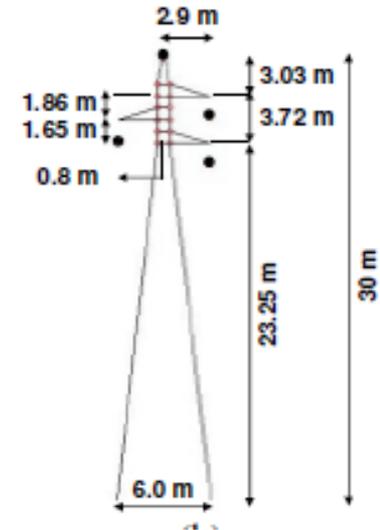


TABLE II

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

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

V_{fo} is a flashover voltage (kV),

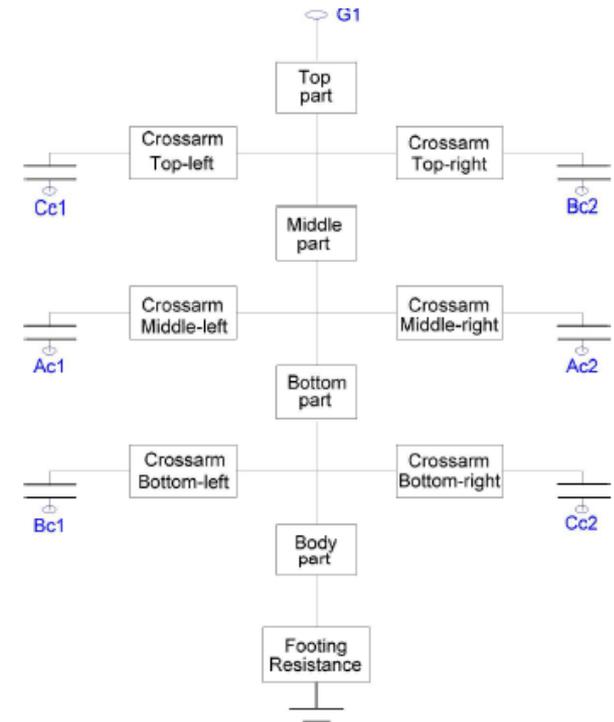
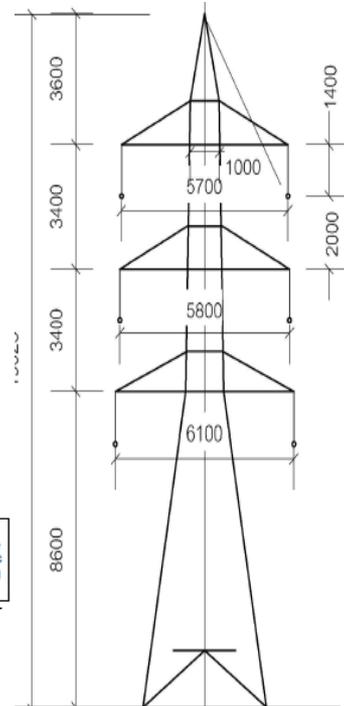
K_1 is $400 * L$,

K_2 is $710 * L$,

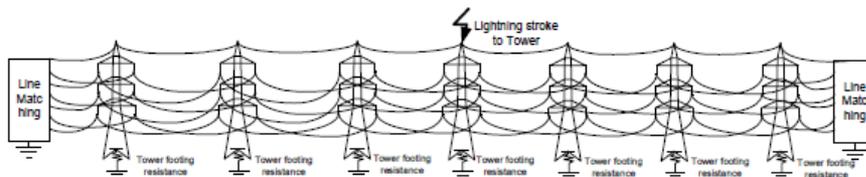
L is insulator length, (meter),

t is elapsed time after lightning stroke, μ s.

Configuração da torre e modelo



Double circuit with one over head ground wire.



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

Influência de diversos fatores na probabilidade de um backflashover

Menor tempo de frente

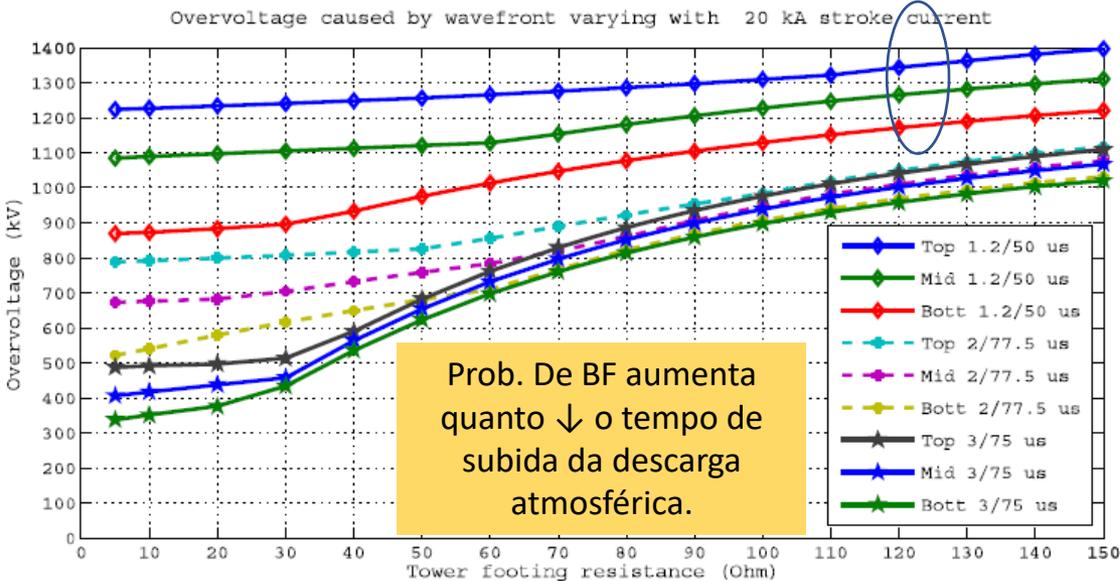
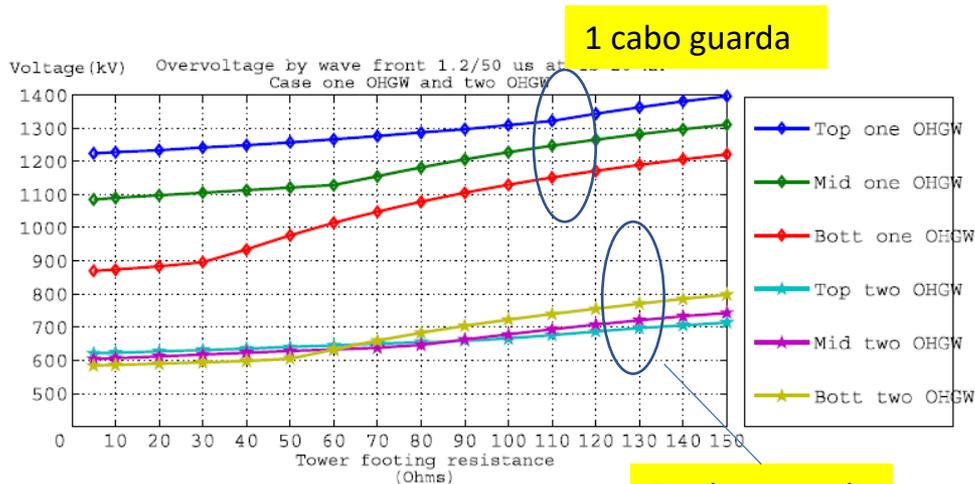


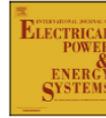
TABLE III : OVERVOLTAGE FLASHOVER AT INSULATOR WITH DIFFERENT MAGNITUDE OF STROKE.

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



Prob. De BF ↑ aumenta quanto há apenas um cabo guarda



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

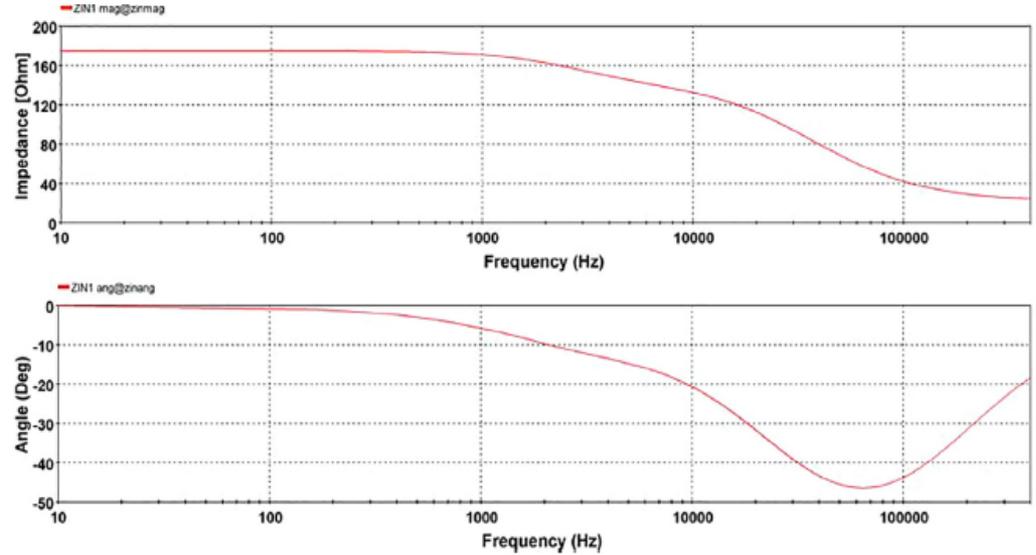
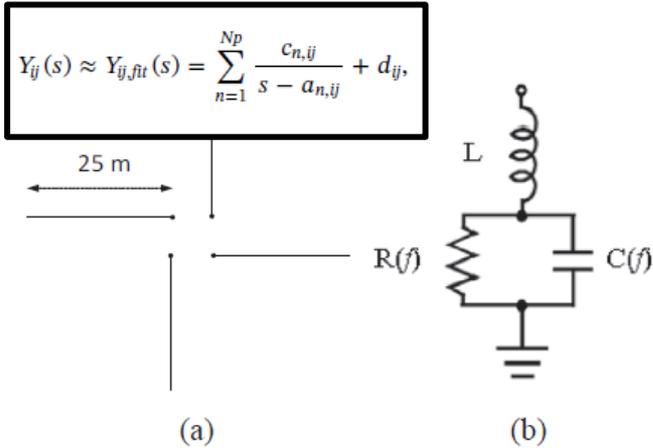


Fig. 4. 4 × L arrangement of the tower grounding system.

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.

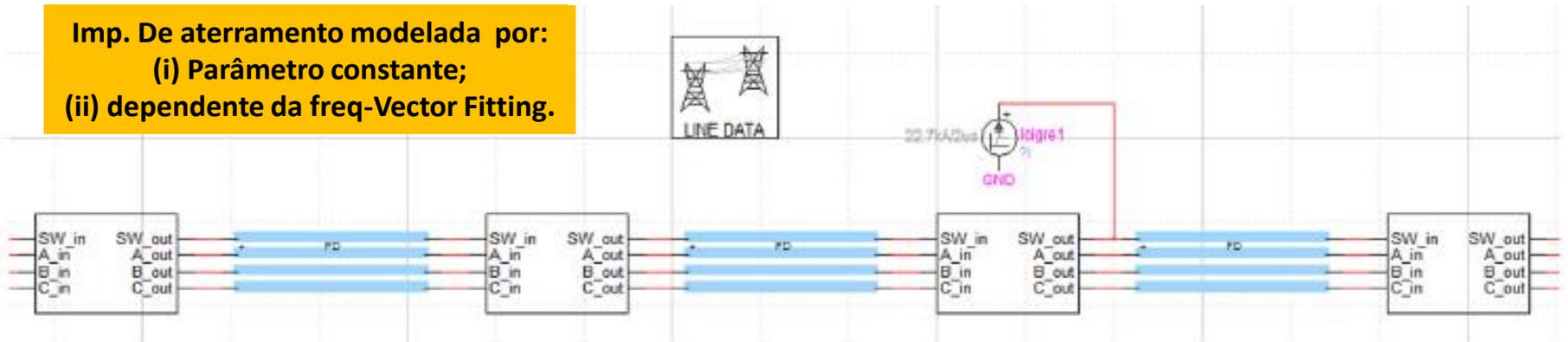


Fig. 9. A part of the EMTP model (3 spans) of the lightning strike to the 110 kV overhead line.



Review of measures to improve the lightning performance of transmission lines

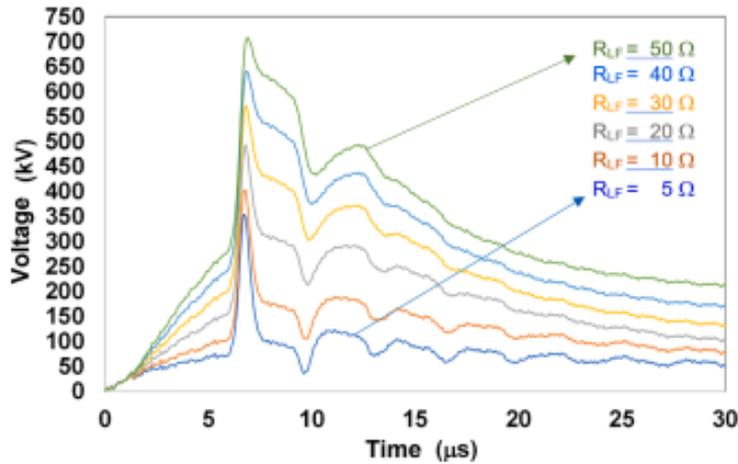


Fig. 2. Reduction of the amplitude of the overvoltage across the upper insulator string of a 230 kV TL, whose guyed tower is submitted to a typical first return stroke current (peak current of 31 kA and front-time of 3,8 µs) by decreasing the tower-footing low-frequency resistance (increasing the length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

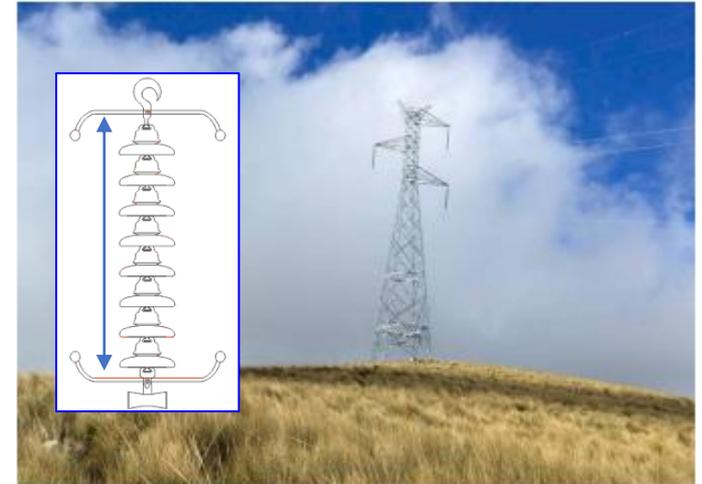


Fig. 7. Increasing the insulation strength of TLs by the elongation of the insulator strings: illustration of the very long strings of the 220 kV single circuit TL that allowed increasing the CFO of the TL to 1.7 MV.

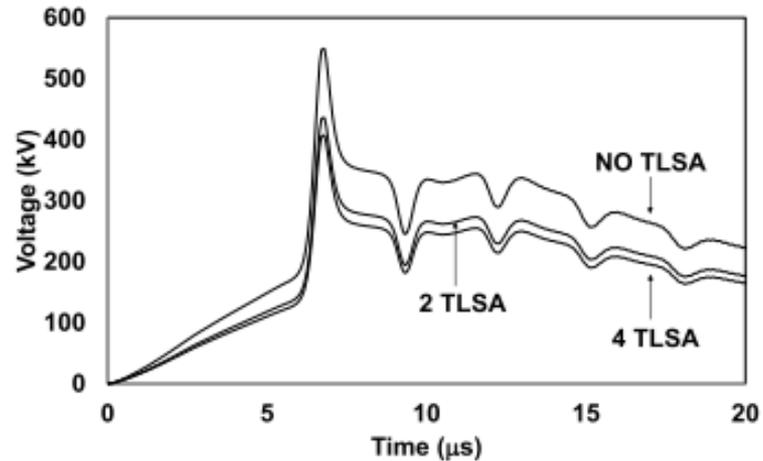


Fig. 6. Illustration of the reduction of overvoltage across the unprotected insulator strings by installing surge arrester devices in parallel with the lower insulator strings of the guyed tower of a double-circuit 230 kV TL [Fig. 9(a)]. Simulated case: strike of a typical first return stroke to the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

Conclusões

- A impedância de aterramento empregada geralmente nas simulações em transitórios eletromagnéticos é representada por uma resistência constante, na qual não representa o comportamento adequado para análises das tensões transitórias resultantes.
- Deve-se considerar os diversos efeitos (frequência no par. do solo, ionização, teor de umidade) 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. Nota-se uma melhor performance da LT e os riscos de um BF são significativamente reduzidos.
- Os diversos modelos propostos mostram a importância da estimação da impedância de surto das torres de transmissão na previsão de sobretensões causadas por descargas atmosféricas e na sua prevenção.