

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Aula-08

**Representação de Torres e Sistemas de Aterramento
Análise das sobretensões geradas por descargas**

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Unicamp)

Anderson Ricardo Justo de Araújo (Unicamp)

14 de maio de 2021

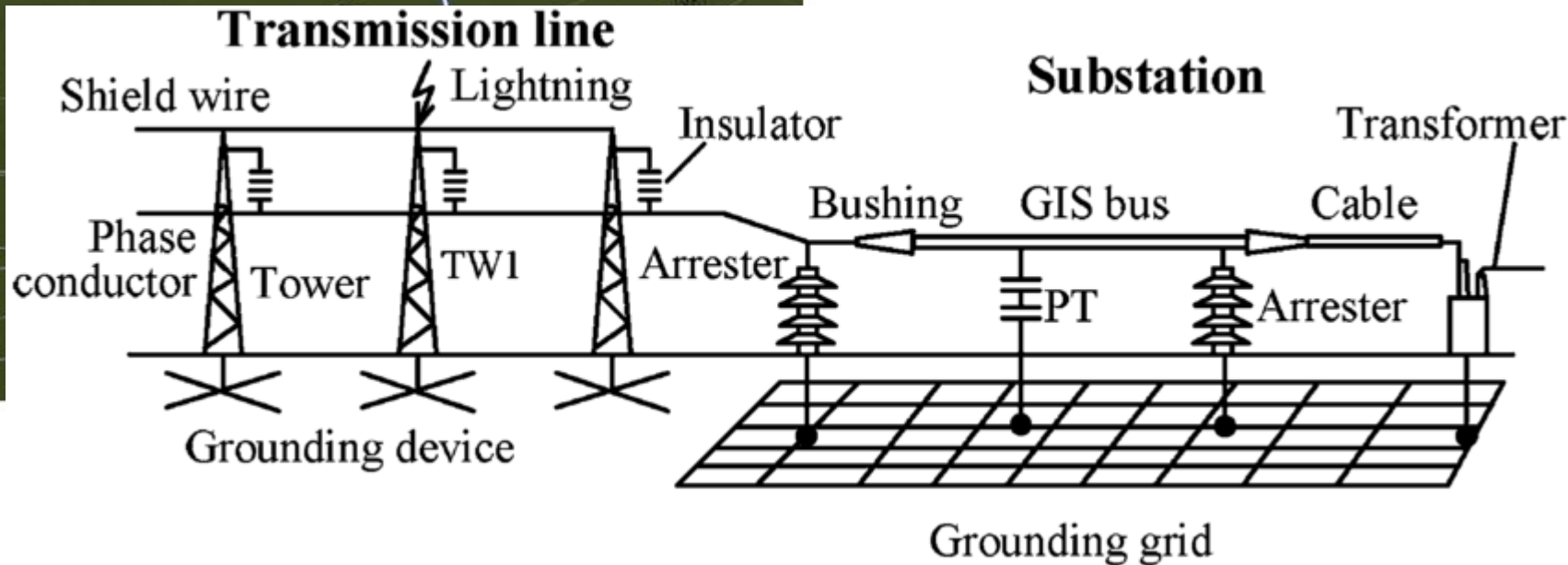
Tópicos

- ❑ Modelagem de um sistema de potência frente as descargas
- ❑ Representação do sistema de aterramento
- ❑ Representação de torres de transmissão
- ❑ Análise de sobretensões geradas por descargas

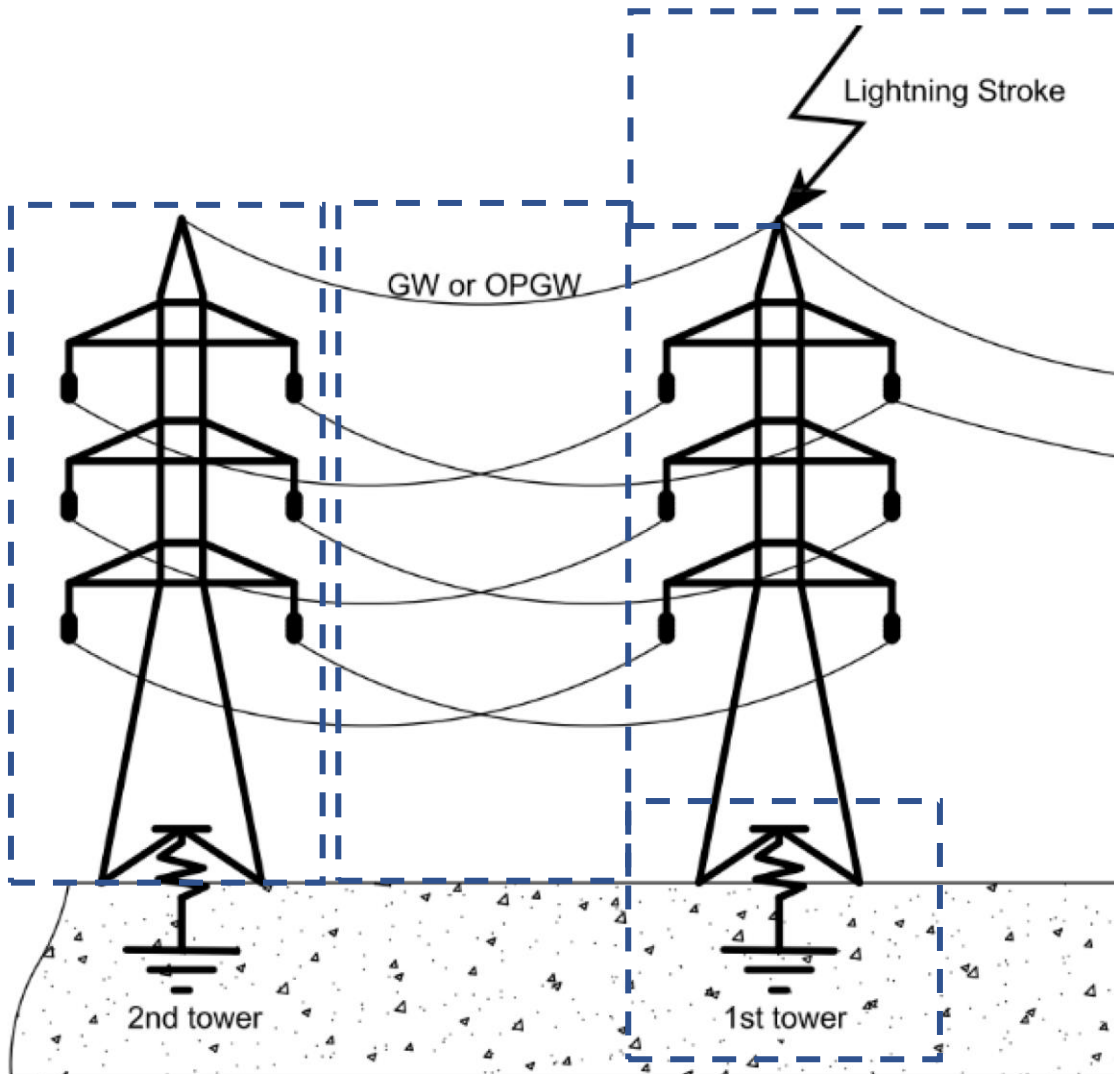
Modelagem dos componentes de um sistema

- O modelo elétrico de um componente é desenvolvido para estudar seu comportamento frente a um dado fenômeno.
- Seu desenvolvimento se baseia em diversas hipóteses e simplificações.
- Considerando uma descarga atmosférica, seu espectro de frequência varia entre **DC até dezenas de MHz**.
- Os resultados experimentais são tidos como resposta exata, porém a natureza de um fenômeno é sempre complexa e os modelos tentam computar de forma mais precisa tais respostas.

Sistema de potência frente a descargas atmosféricas

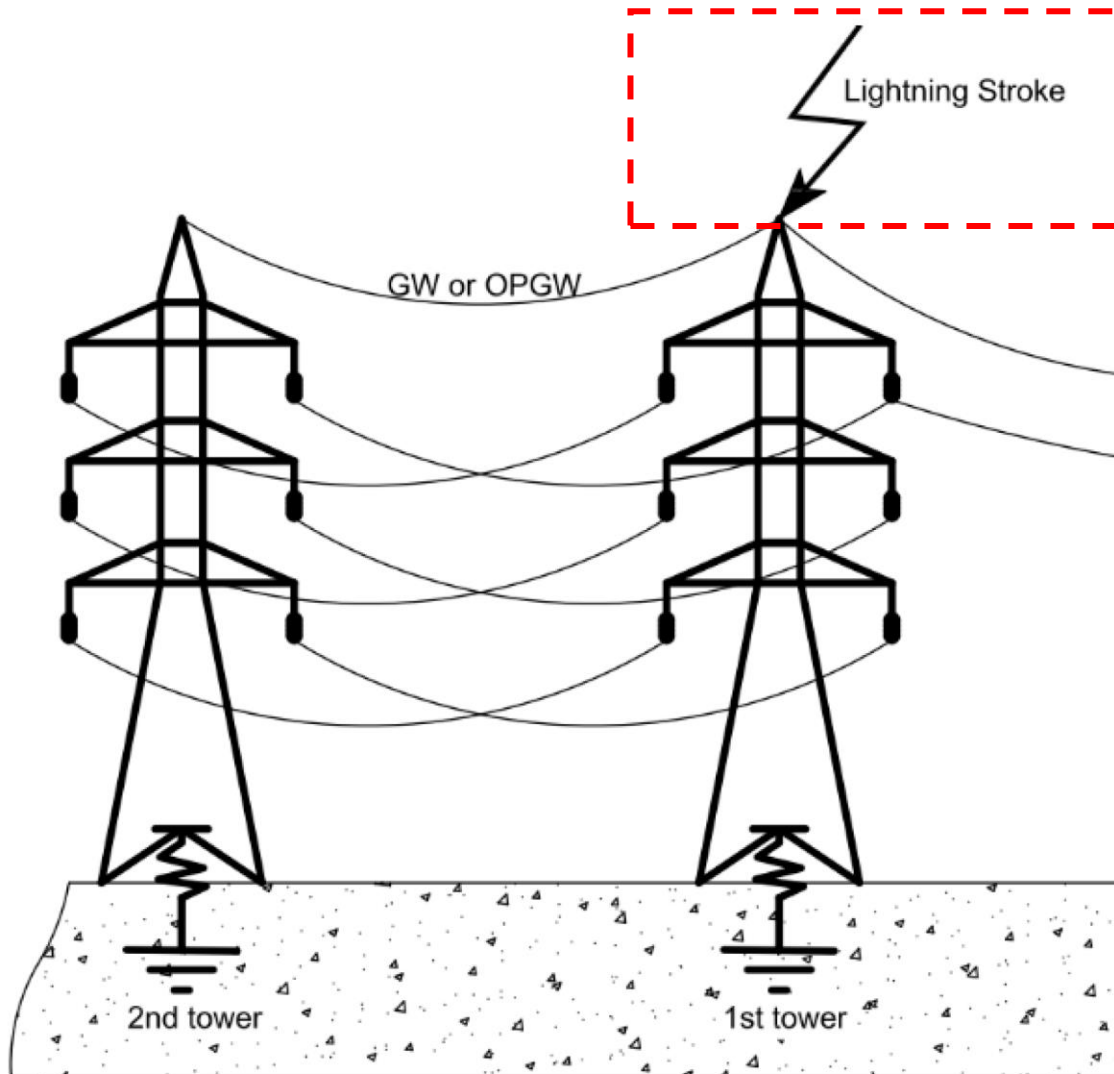


Sistema de potência frente a descargas atmosféricas



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

Descarga atmosférica



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

Modelagem de uma descarga atmosférica

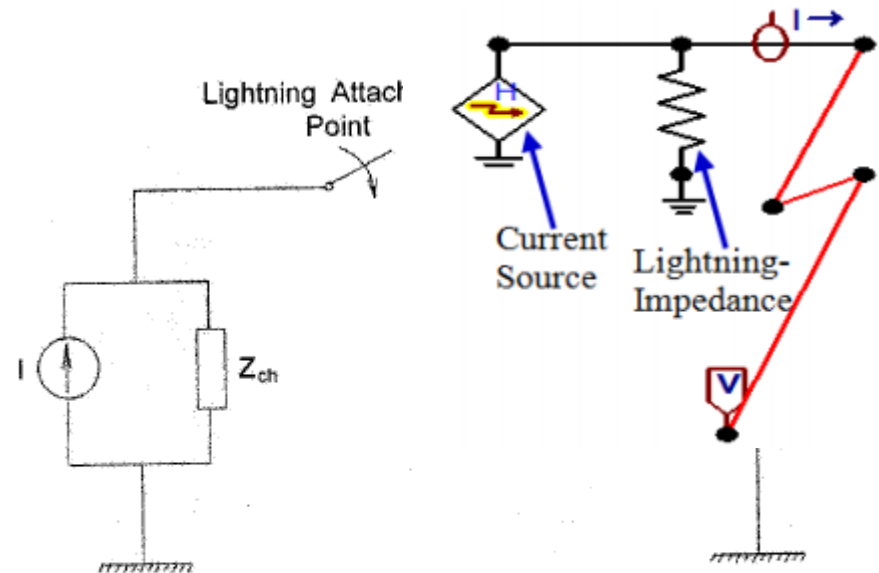
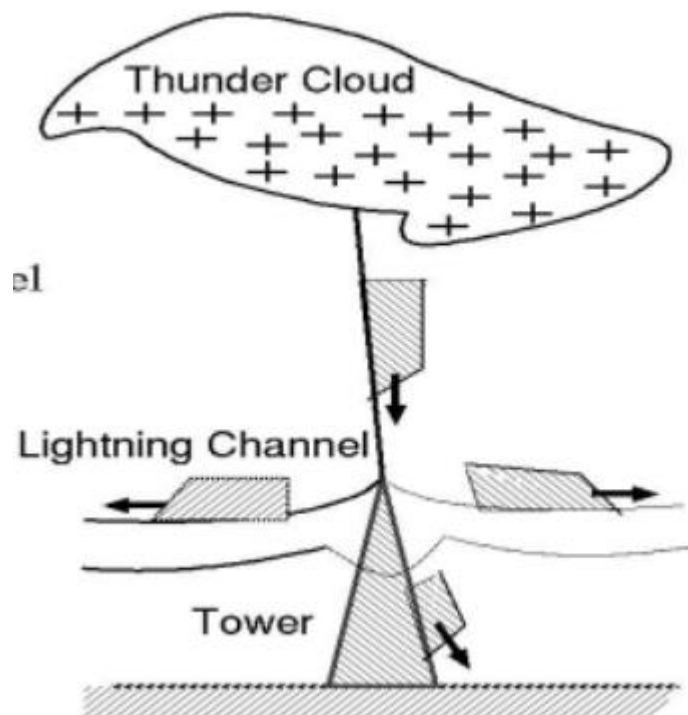
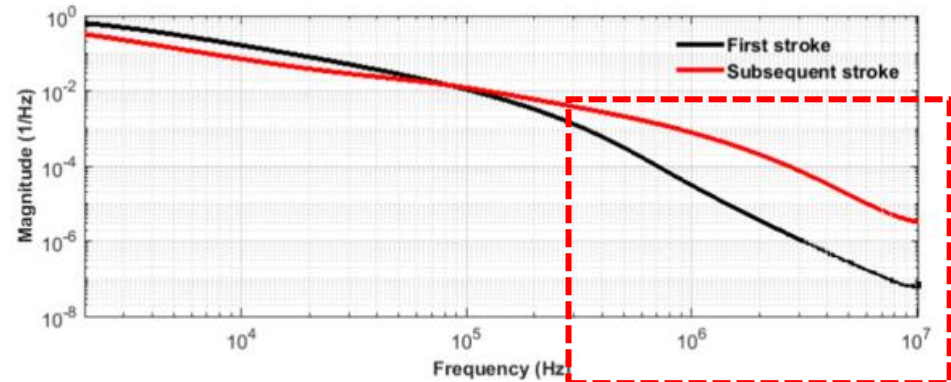
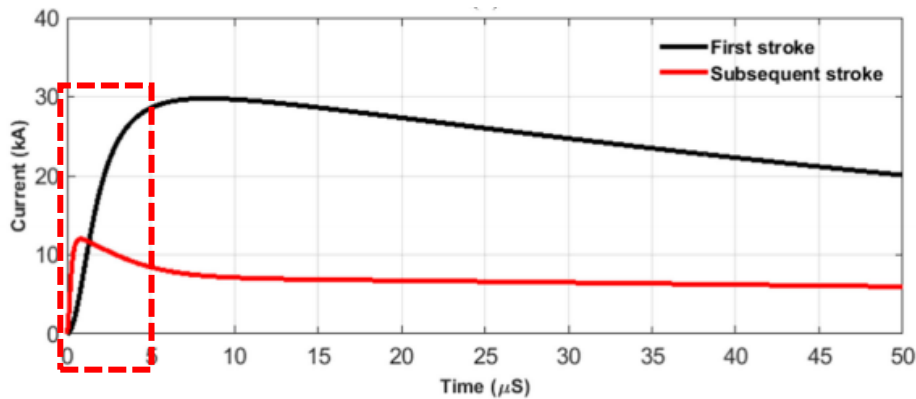
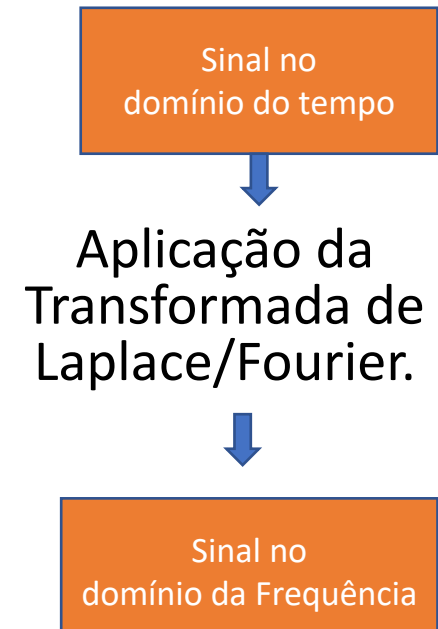
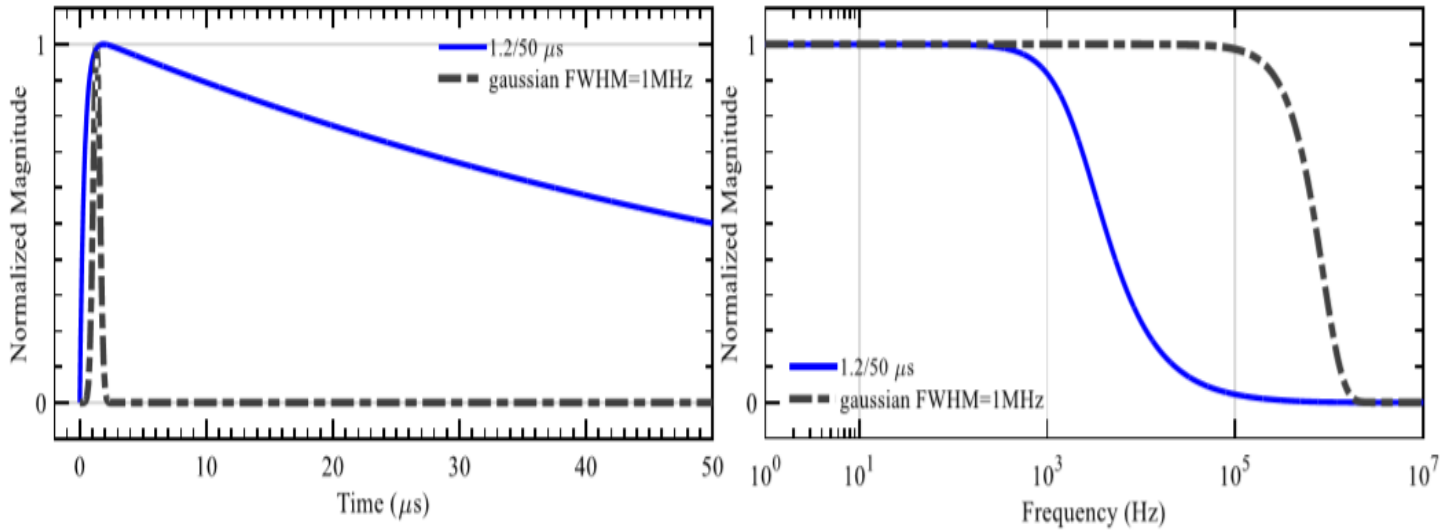
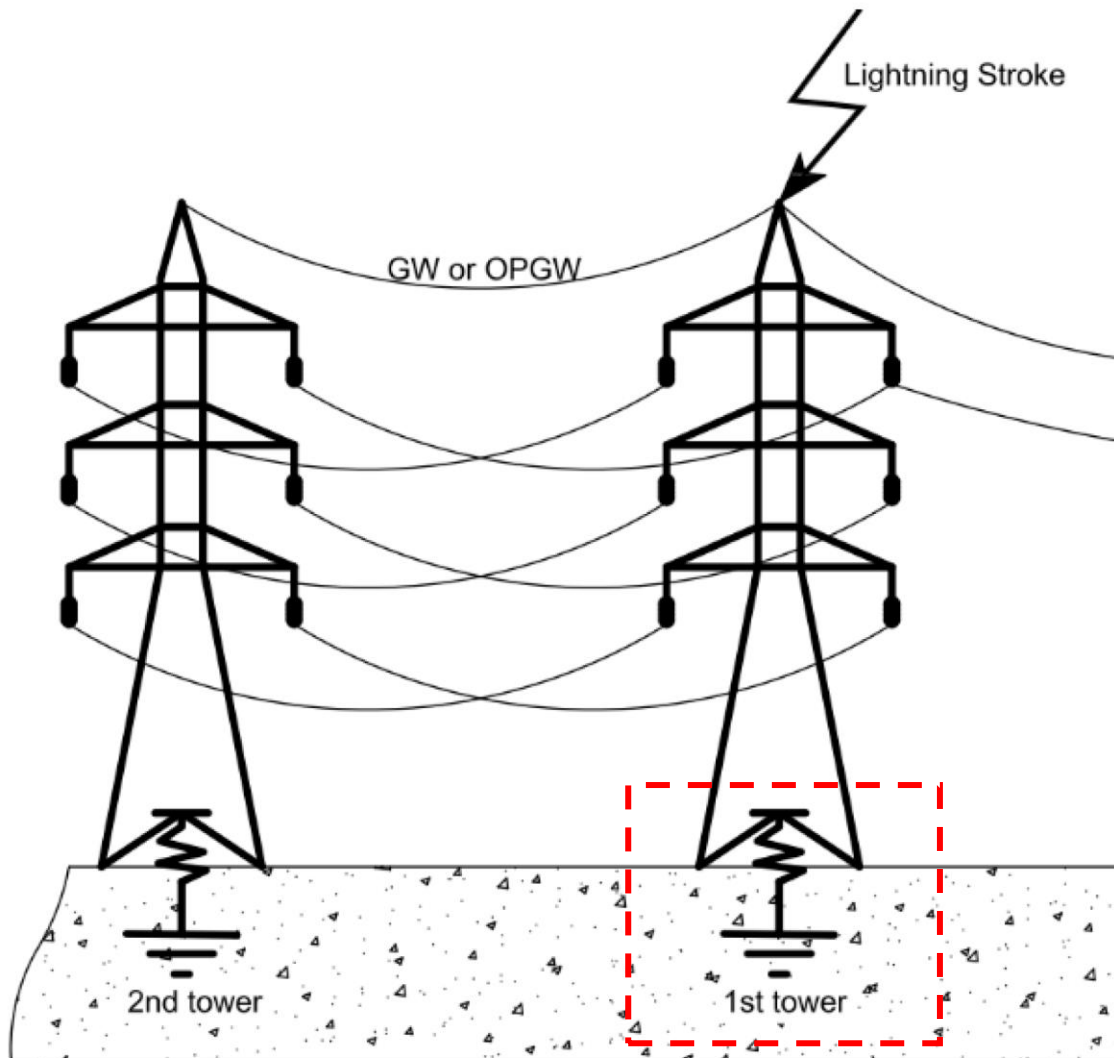


Fig. 3. Equivalent circuit for the case of lightning strike to ground or to an object of negligible height. Lightning is represented by a Norton equivalent circuit composed of an ideal current source representing the short-circuit current I in parallel with a lightning channel equivalent impedance Z_{ch} . Z_{gr} is the effective grounding impedance at the lightning attachment point, and I_{meas} is the current that would be measured at the attachment point.

Espectro de frequência das descargas atmosféricas



Sistema de Aterramento



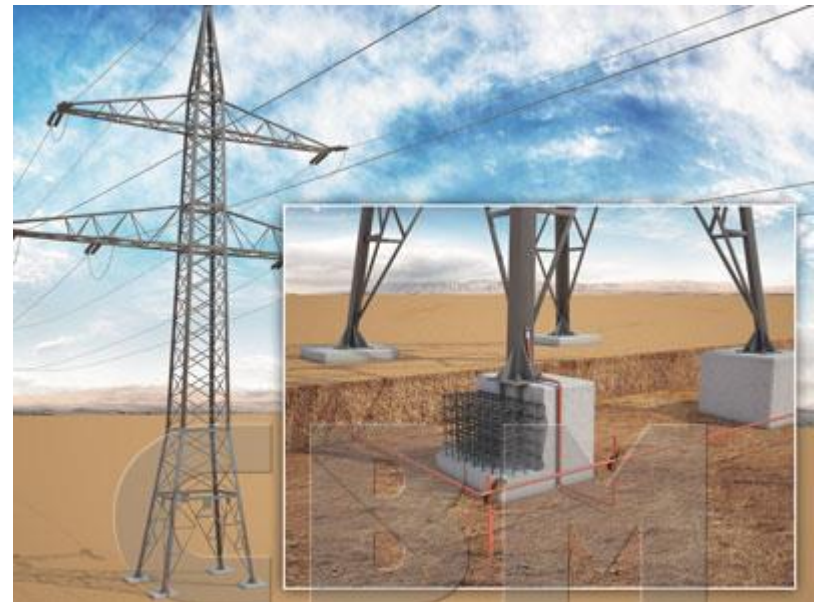
- (1) Descarga Atmosférica
- (2) Sistema de Aterramento
- (3) Torre de Transmissão
- (4) Linhas de Transmissão

Objetivos do aterramento

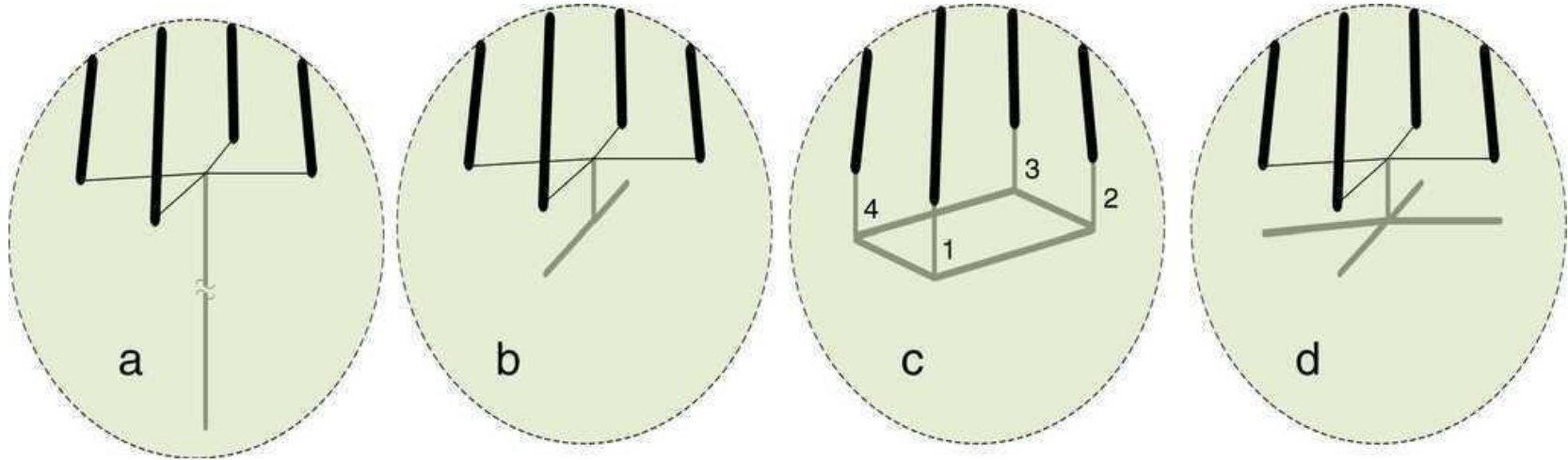
- Os sistemas de aterramento são compostos desde simples condutores metálicos até condutores dispostos em distintos arranjos formando malhas de aterramento, geralmente ocupando uma área considerável.

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



Sistemas de Aterramiento



Journal of Applied Research and Technology. 2017;15:545-54

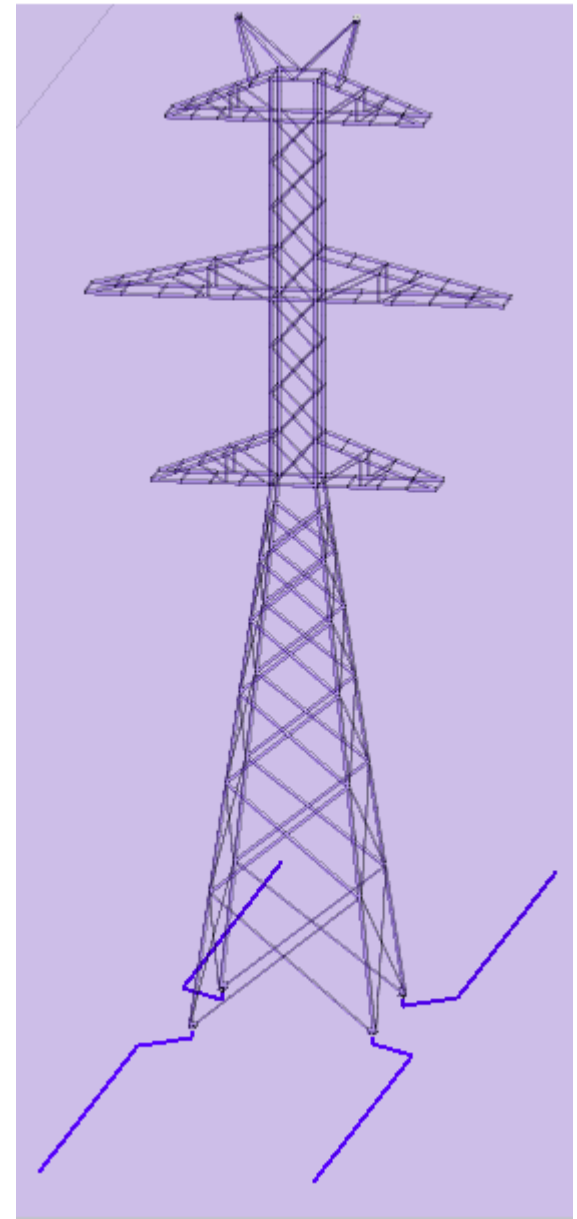
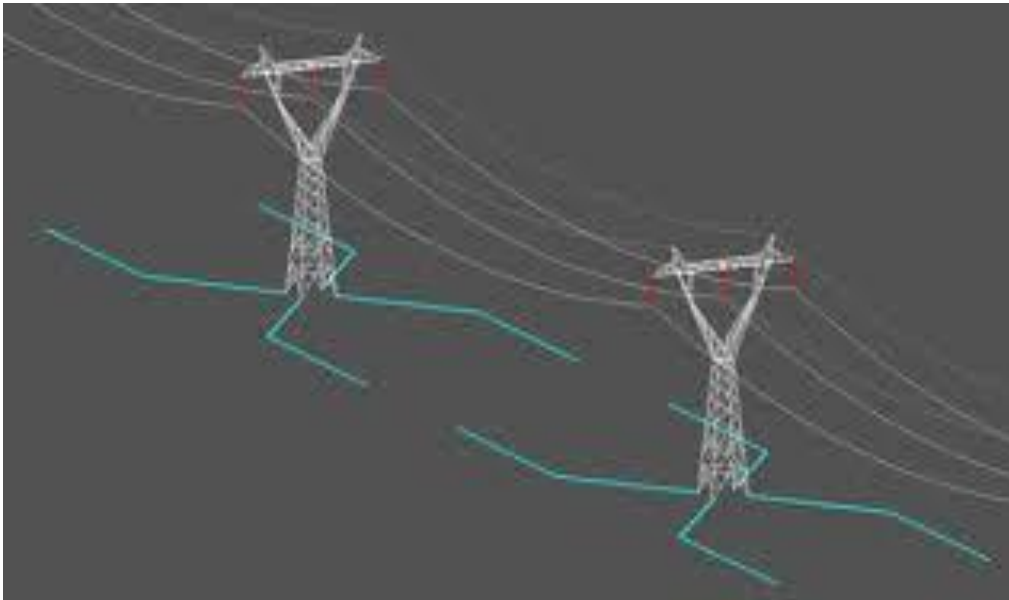
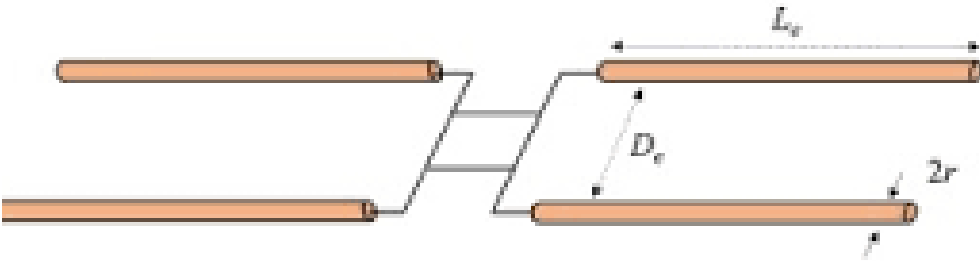
The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines

Reza Shariatinasab , Javad Gholinezhad

Department of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Sistemas de Aterrramento

- Cabos contrapesos



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

	<i>NATUREZA DO SOLO</i>	<i>RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot m$)</i>
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	

Modelagem dos sistemas de aterramento

Existem diversos modelos para computar a impedância dos eletrodos de aterramento na literatura, das quais são baseados em:

- ❖ Modelos a parâmetros concentrados;
- ❖ Modelos a parâmetros distribuídos;
- ❖ Modelos eletromagnéticos baseados nas equações de Maxwell usando métodos numéricos : Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Partial Element Equivalent Circuit (PEEC).

A Review of Methods for Grounding Grid Analysis

Petar Sarajčev, Slavko Vujević

University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture

Rudjera Boskovic bb, HR-21000, Split, Croatia.

E-mail: petar.sarajcev@fesb.hr, slavko.vujevic@fesb.hr

Como modelar corretamente o eletrodo de aterramento ?

Medições da impedância do solo

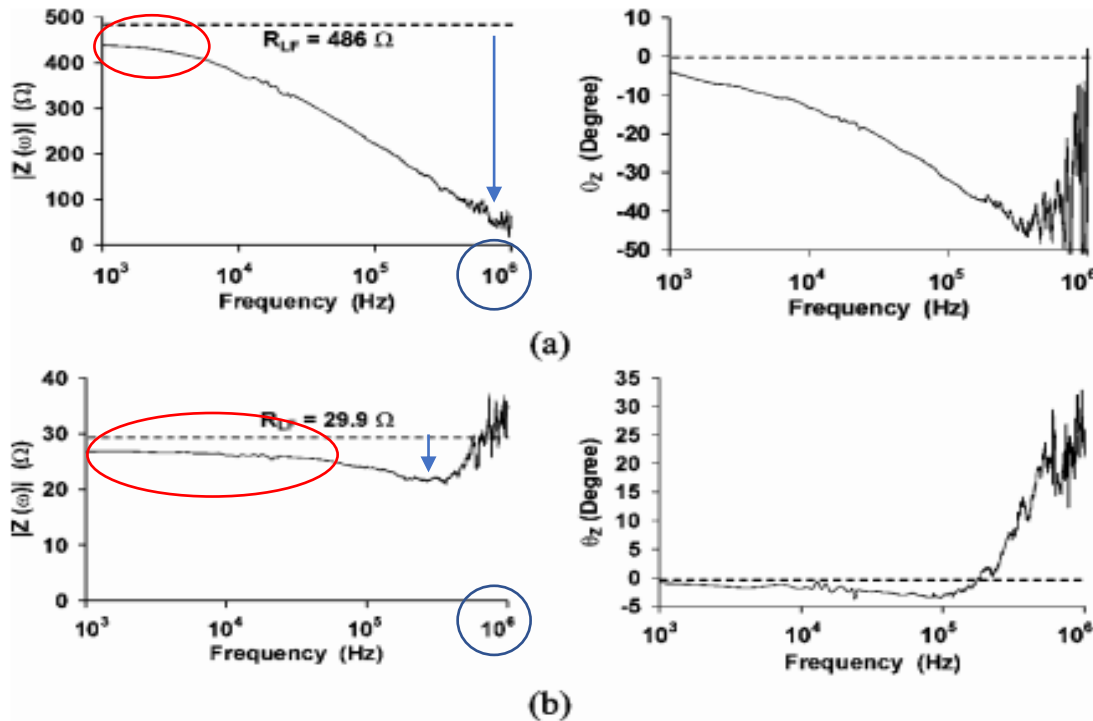
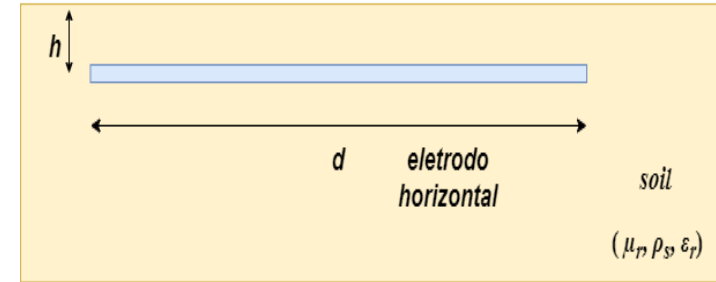


Fig. 8. Frequency diagram of the complex grounding impedance $Z(\omega)$ [ratio of the voltage and current phasors: $\underline{V}(\omega)/\underline{I}(\omega)$]. (a) High-resistivity soil ($4 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$)—12-m-long horizontal electrode. (b) Low-resistivity soil ($300 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$)—12-m-long horizontal electrode.



Solo real: efeito da frequência nos parâmetros elétricos do solo: resistividade ($\rho(f)$), permissividade ($\epsilon(f)$).

Em baixas freq., verifica-se um comportamento resistivo (fase ≈ 0)
Em altas freq., verifica-se um comp. capacitivo (fase negativa);

Adaptado de: "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation". Visacro et al.

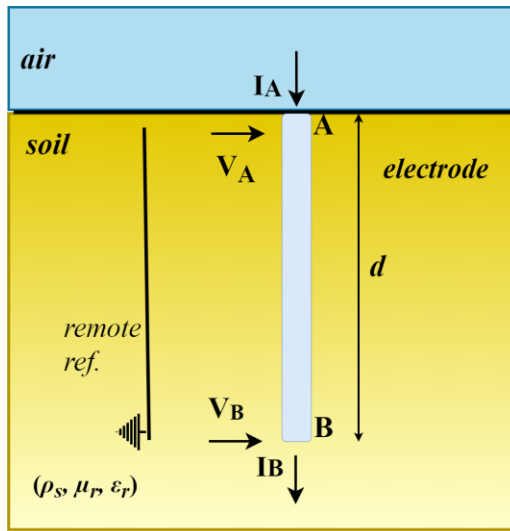
Modelagem do eletrodo de aterramento

Considere um eletrodo horizontal/vertical enterrado em um solo real, cujos parâmetros elétricos são independentes da frequência;

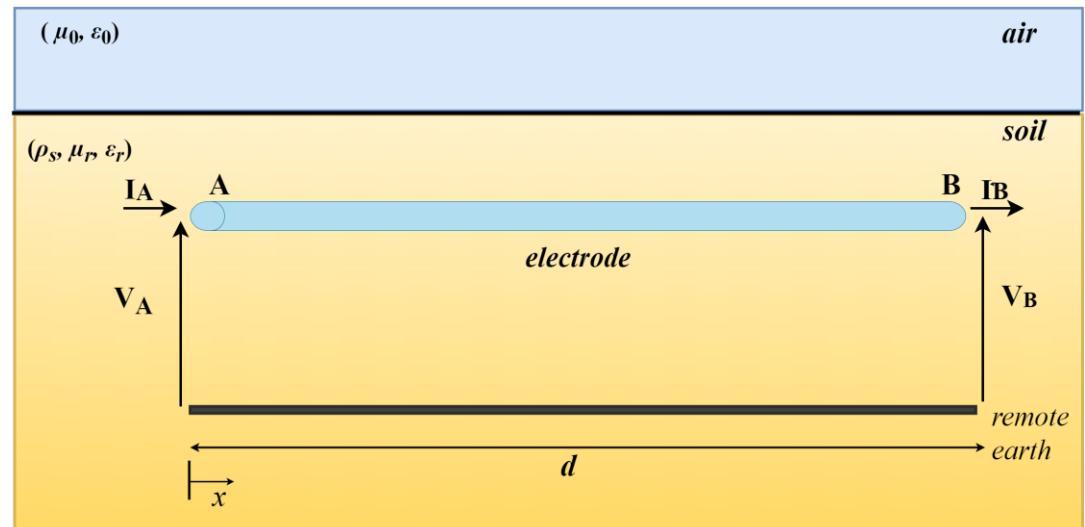
Usando o modelo a parâmetros distribuídos, um eletrodo de aterramento é interpretado como uma linha de transmissão curta. As tensões no terminais emissor e receptor são medidas em relação a um potencial remoto.

Injeta-se uma corrente I_A e pretende-se determinar a tensão V_A e a impedância de aterramento $Z(\omega)$ (impedância harmônica) em cada configuração.

Simplificação: Nesse modelo, a corrente no terminal receptor é nula (circuito em aberto).



(a)



Eletrodo horizontal

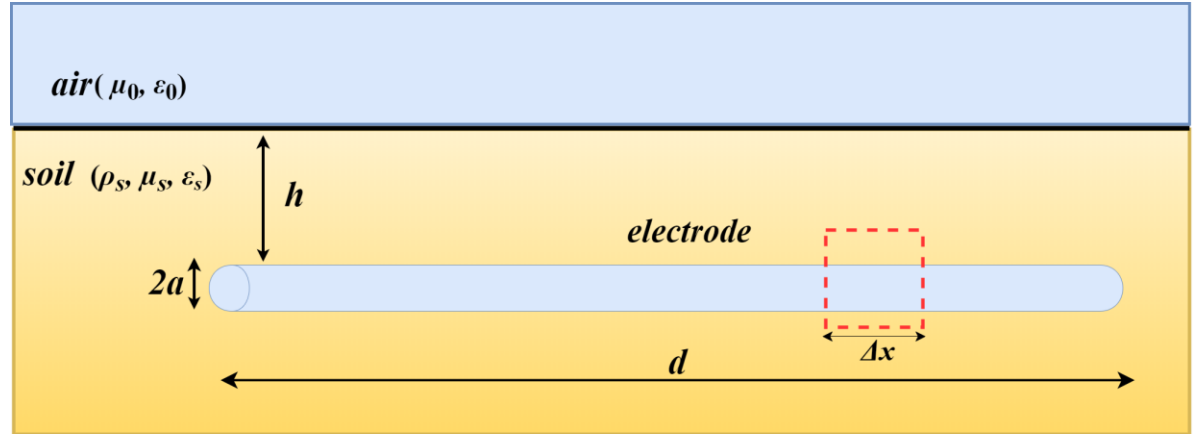
No modelo a parâmetros distribuídos, um segmento Δx pode ser representado pelo circuito elétrico infinitesimal.

Nesse circuito, verifica-se duas correntes: uma parcela longitudinal (I_L) e outra transversal (I_T);

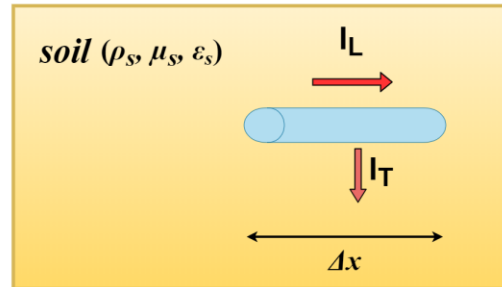
Os parâmetros r e L são a resistência e indutância longitudinais do eletrodo;

Os parâmetros R e C são a resistência de dispersão (ou aterramento) e a capacitância transversais do eletrodo.

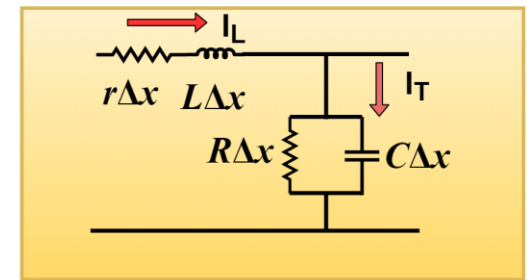
Observação: No modelo clássico de linhas de transmissão, o termo $R = 1/G$; Em linhas aéreas, $G \approx 0$. Entretanto para eletrodos, tem-se que $r \approx 0$.



(a)



(b)



(c)

Interpretação física

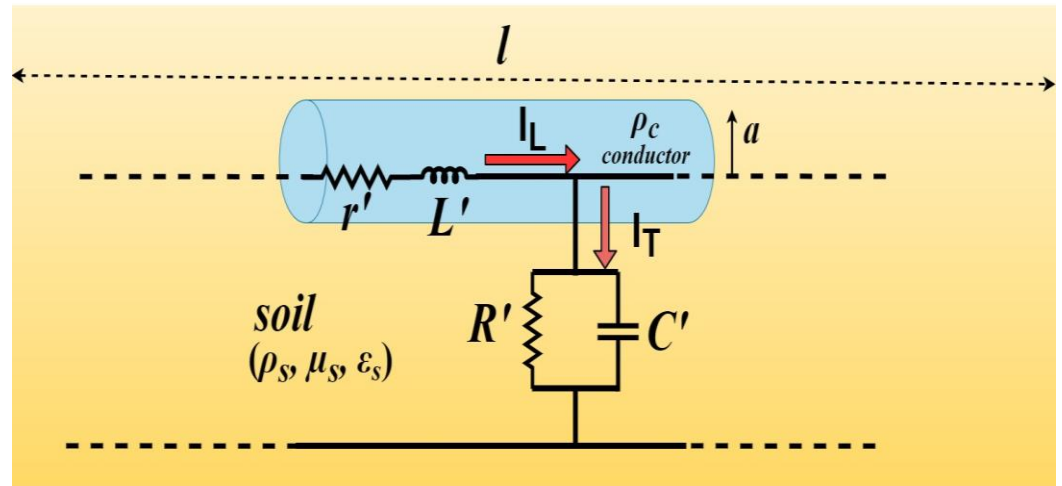
- r' (resistência longitudinal)

$$r' = \frac{r}{l} = \frac{\rho_c}{\pi a^2}$$

$$r' \ll R'$$

$$\Delta V = (r' + j\omega L')I_L \approx 0$$

$$\frac{I_T}{I_L} = \frac{1}{\rho\omega\epsilon} \gg 1$$



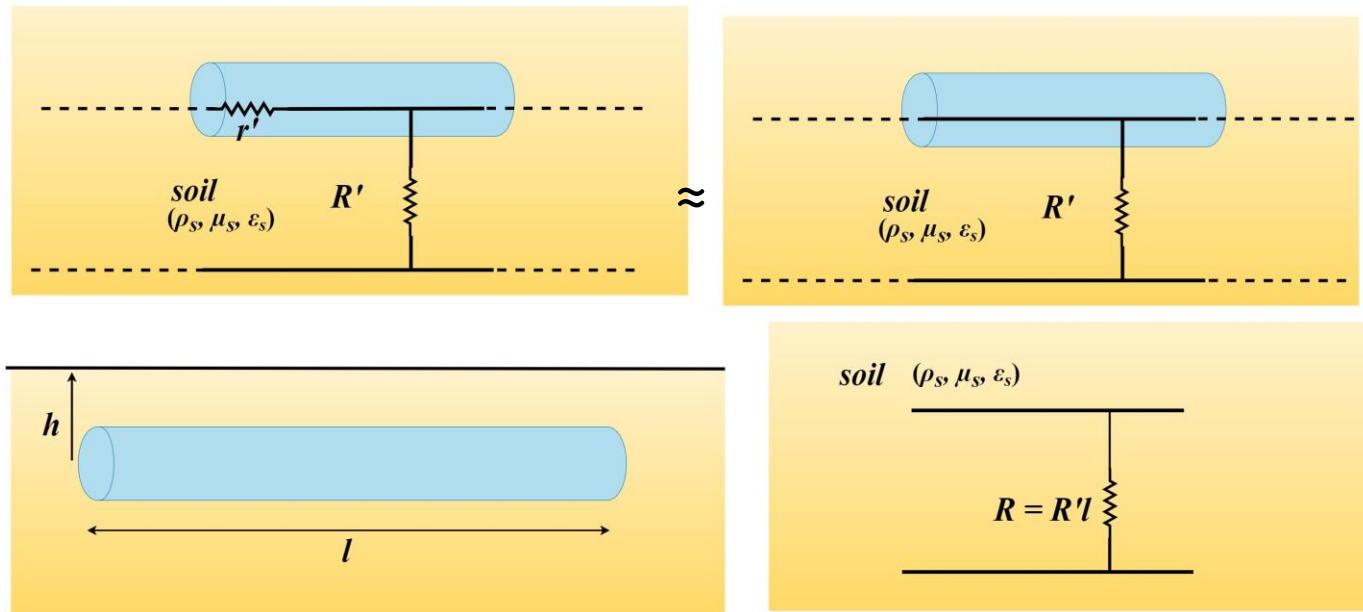
Modelo a parâmetros concentrados

Em baixas frequências ($\omega \approx 0$)

Os efeitos indutivos e capacitivos são desprezíveis quando $\omega \approx 0$;

Dessa forma, o comportamento elétrico é predominantemente resistivo, na qual o valor da resistência total de dispersão é observado nesse intervalo (de 0 a dezenas/centenas de Hz).

Após uma dada frequência, definida em breve, os efeitos indutivos ou capacitivos serão significativos.



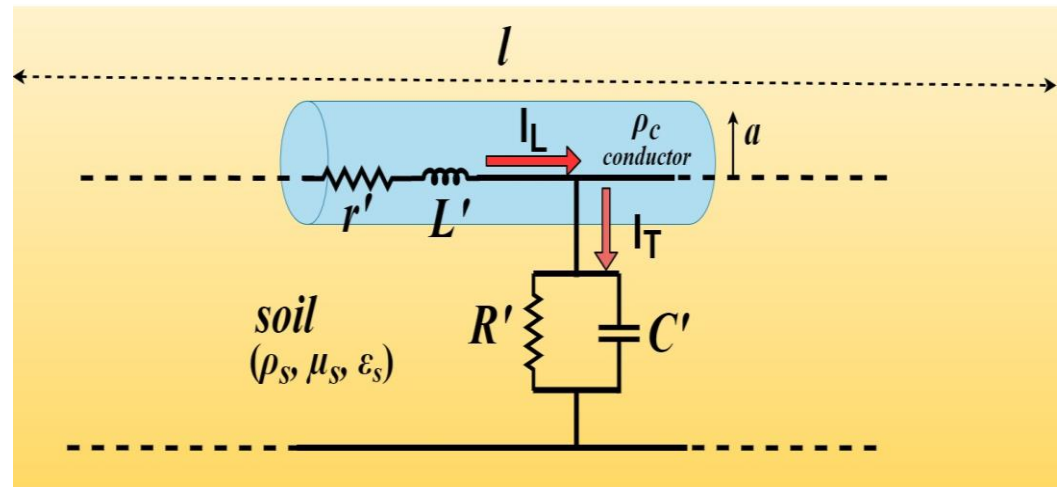
It é predominante para as baixas frequências

Em altas frequências ($\omega \rightarrow \infty$)

Em altas frequências, tem-se que a relação I_T/I_L tende a zero, ou seja I_L torna-se significativa.

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{I_T}{I_L} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\rho \omega \epsilon} \approx 0$$

Nessas condições, os efeitos indutivos são predominantes em um dado intervalo da frequência. Porém, dependendo dos valores de ρ e ϵ do solo e do comprimento do eletrodo, a corrente de dispersão do solo será elevada em altas frequências. Isso ocorre devido às ressonâncias entre o L' e C' , e o comportamento indutivo e capacitivo ocorrem em faixas de frequências.



Assim, deve-se computar $Z(\omega)$ em magnitude e fase para ter um entendimento amplo da impedância de aterramento de um dado eletrodo.

Modelo a parâmetros distribuídos

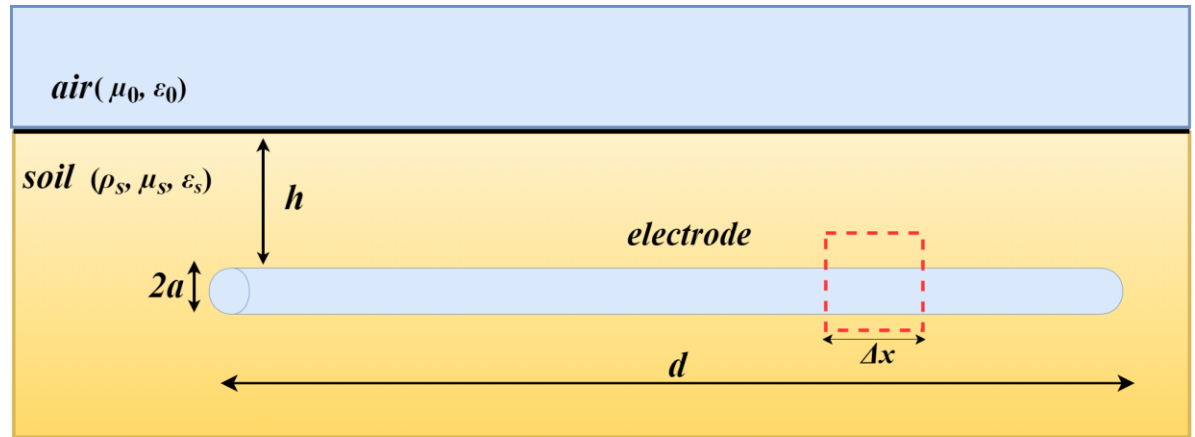
No modelo a parâmetros distribuídos, um segmento Δx pode ser representado pelo circuito elétrico infinitesimal.

Nesse circuito, verifica-se duas correntes: uma parcela longitudinal (I_L) e outra transversal (I_T);

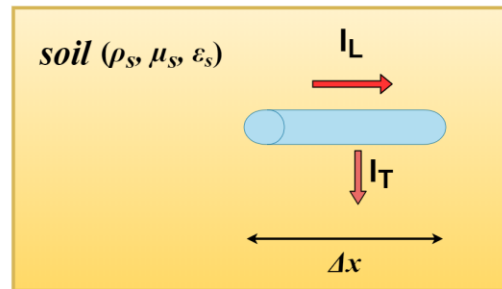
Os parâmetros r e L são a resistência e indutância longitudinais do eletrodo;

Os parâmetros R e C são a resistência de dispersão (ou aterramento) e a capacitância transversais do eletrodo.

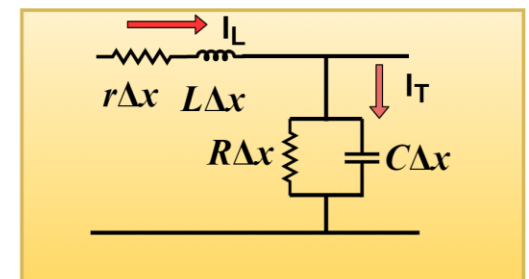
Observação: No modelo clássico de linhas de transmissão, o termo $R = 1/G$; Em linhas aéreas, $G \approx 0$. Entretanto para eletrodos, tem-se que $r \approx 0$.



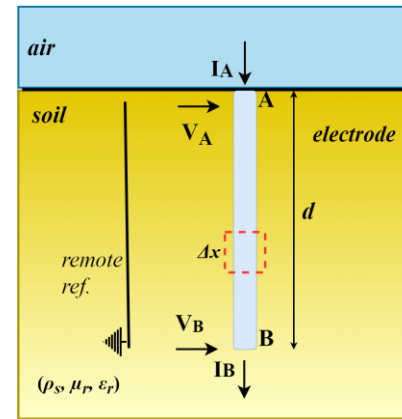
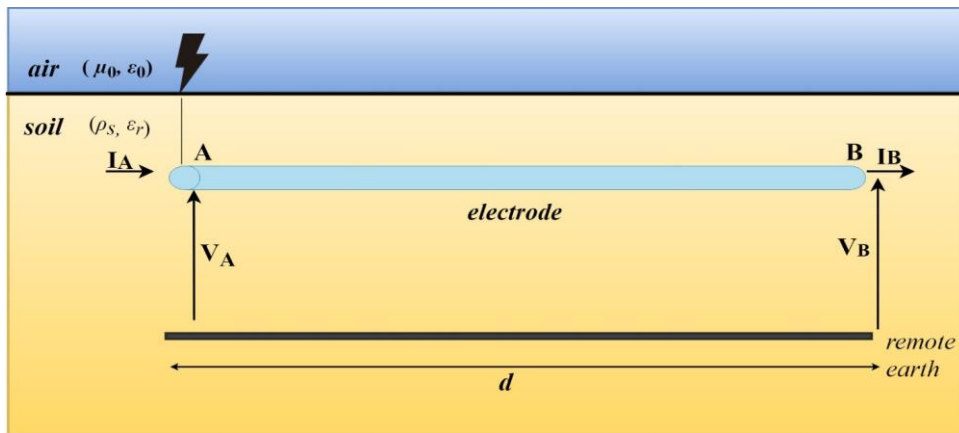
(a)



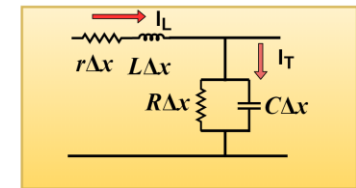
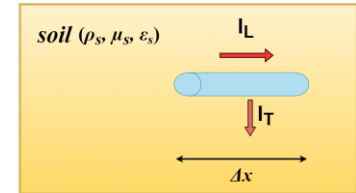
(b)



(c)



(a)



(c)

Transmission Line Equations

$$\gamma = \sqrt{(r' + j\omega L')(1/R' + j\omega C')}$$

$$V_A(x) = V_B(x) \cosh(\gamma d) - Z_C I_B(x) \sinh(\gamma d)$$

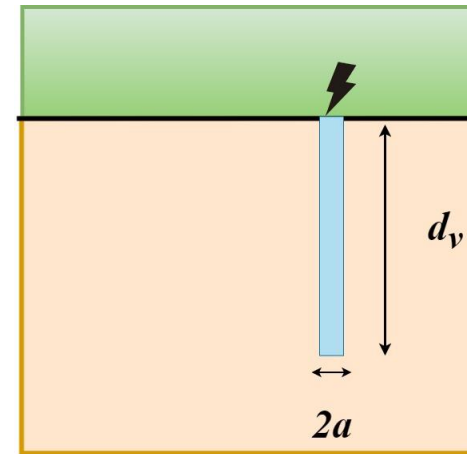
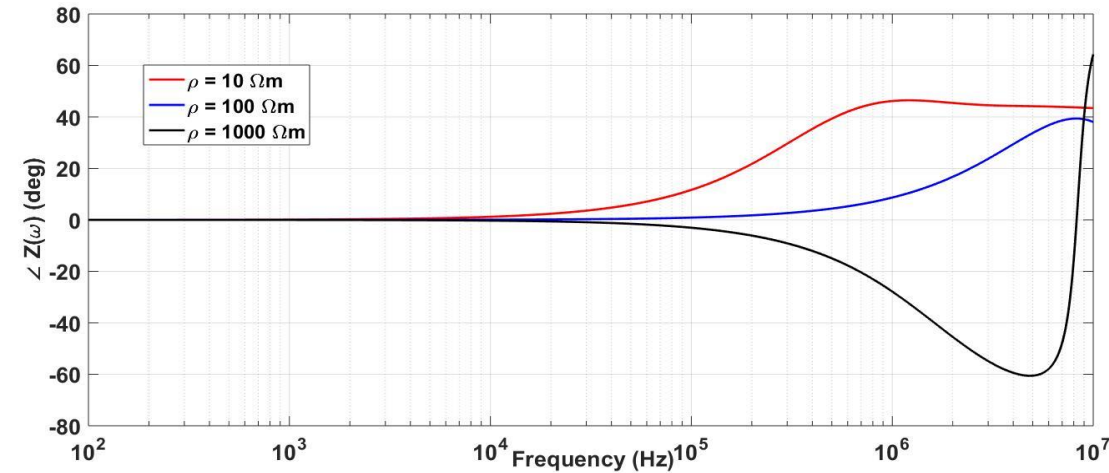
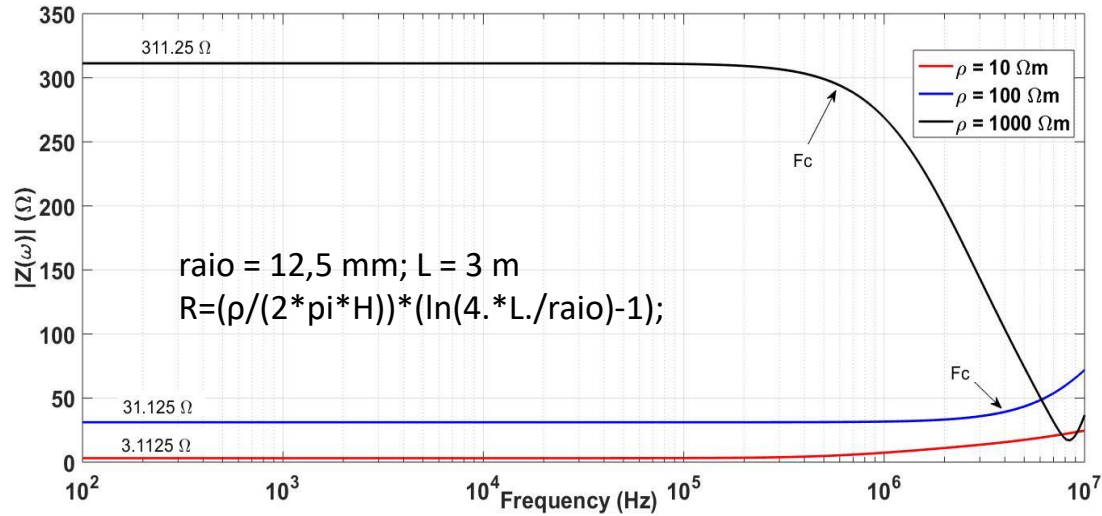
$$Z_C = \sqrt{\frac{(r' + j\omega L')}{(1/R' + j\omega C')}}$$

$$I_A(x) = \frac{1}{Z_C} V_B(x) \sinh(\gamma d) + I_B(x) \cosh(\gamma d)$$

$$Z_{gr}(\omega) = \frac{V_A}{I_A} = Z_C \coth(\gamma(\omega)d)$$

1 Adaptado de: "A Simplified Method for Calculating the Impedance of Vertical Grounding Electrodes Buried in a Horizontally Stratified Multilayer Ground", Caetano et al.

Impedância eletrodo vertical



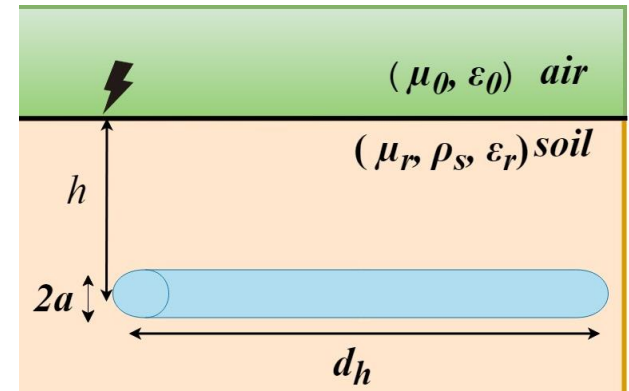
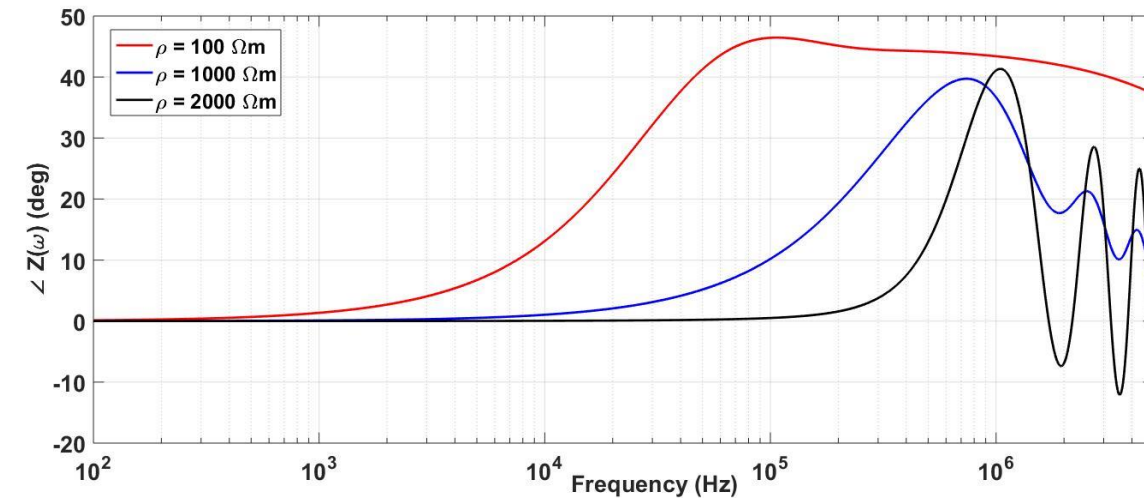
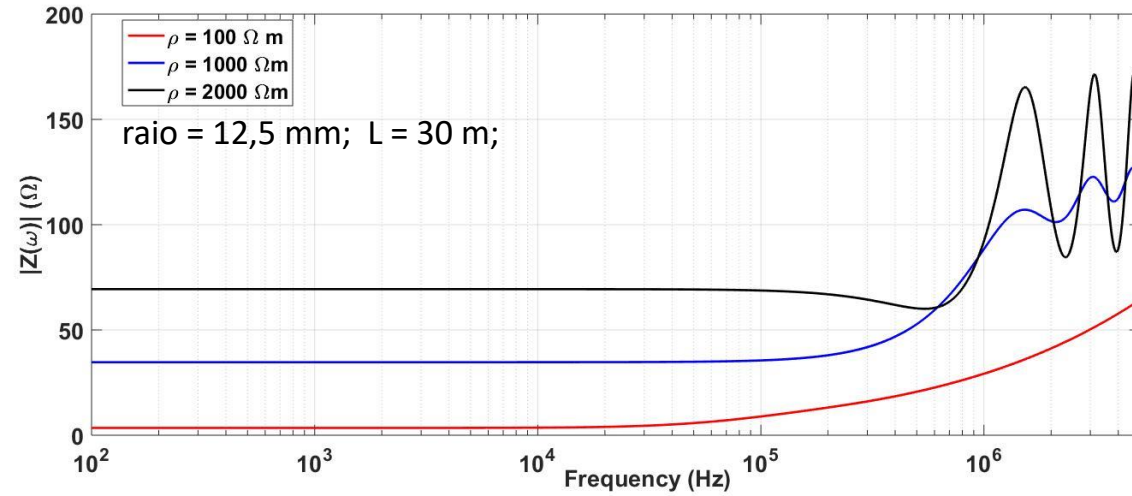
$$r_v = \frac{\rho c}{\pi a^2}$$

$$L_v = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2d}{a} \right) - 1 \right]$$

$$C_v = \pi \epsilon_0 \epsilon_r(f) \left[\ln \left(\frac{4d}{a} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$G_v = R_v^{-1} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r(f) \rho(f)} C_v$$

Impedância eletrodo horizontal



$$r_h = \frac{\rho_c}{\pi a^2}$$

$$L_h = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2d_h}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right]$$

$$C_h = \pi \epsilon_0 \epsilon_r(f) \left[\ln \left(\frac{2d_h}{\sqrt{2ha}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$G_h = R_h^{-1} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r(f) \rho(f)} C_h$$

Vantagens dos Métodos Numéricos

- Estudar topologias complexas de aterramento;
- Inclusão do efeito da frequência nos parâmetros elétricos / estratificação dos solos;
- Mapeamento do campo eletromagnético em quanto ponto.

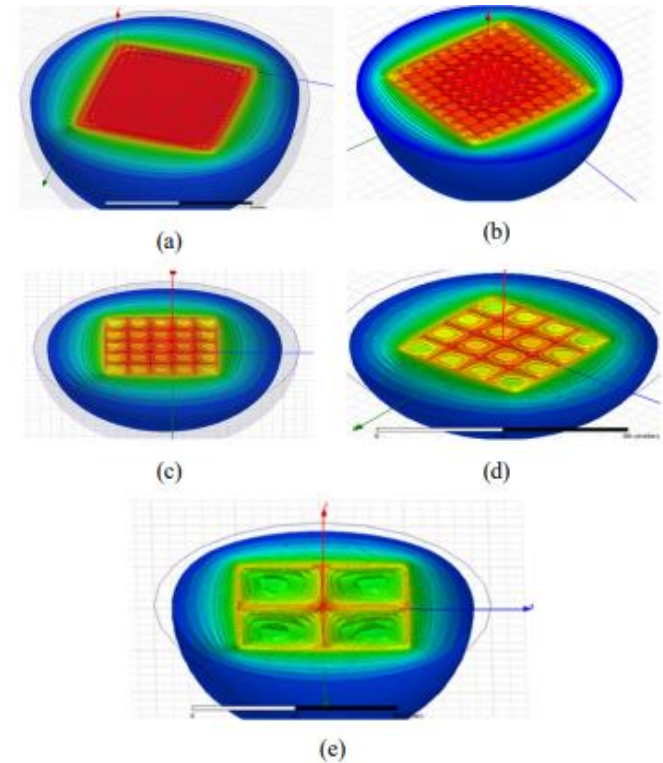


Figure 5. Earth potential for ground meshes, with spacing of (a) 2.5m x 2.5m, (b) 5m x 5m, (c) 10m x 10m, (d) 12m x 12m and (e) 25m x 25m.

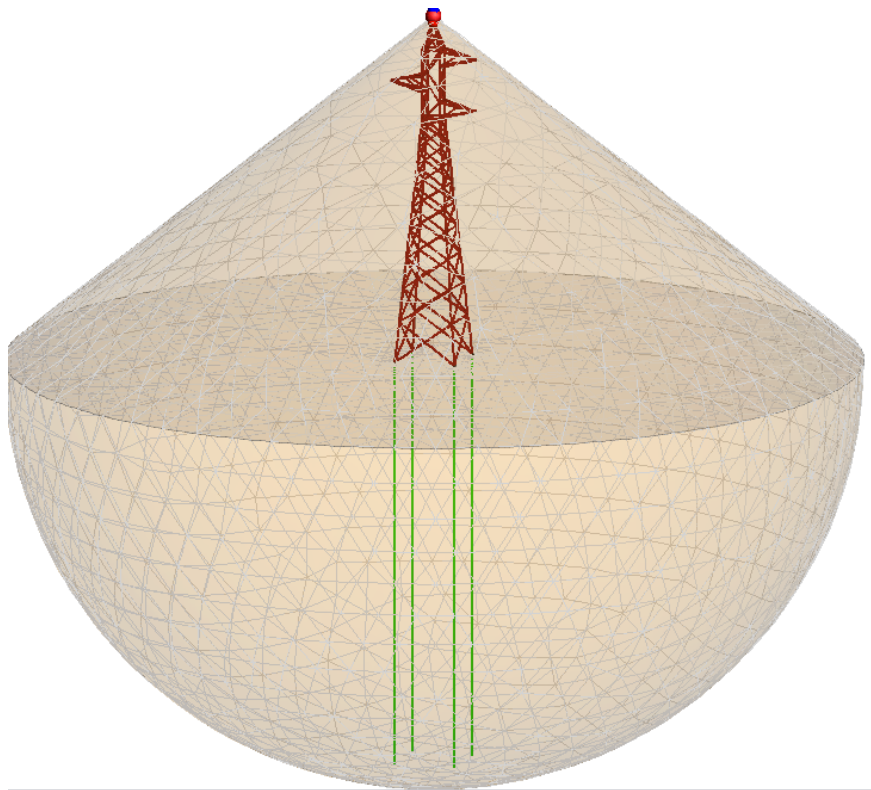


Figure 3 Reinforcement of a wind turbine with foundation earth electrode

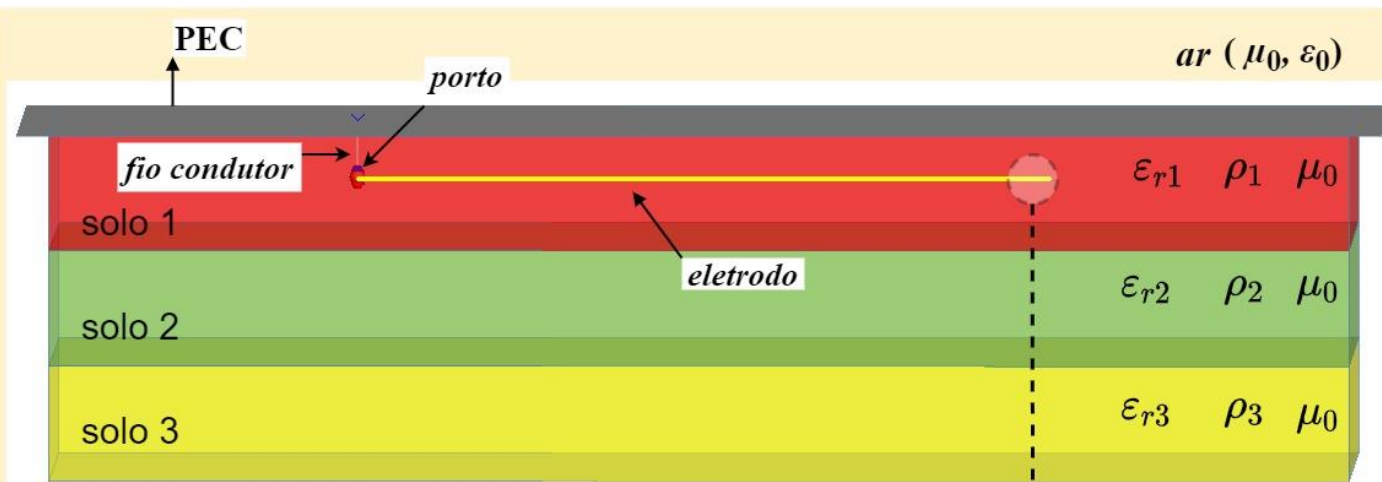
Modelos Eletromagnéticos

Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos Finitos (MEF) e Partial Element Equivalent Circuit (PEEC).

- ✓ Custo computacional Elevado (tempo e memória);
- ✓ Precisão condicionada ao mesh;



FEKO MoM



(a)

Plane / ground

Ground medium

- No ground (homogeneous free space medium)
- Perfect electric (PEC) ground plane at Z=0
- Perfect magnetic (PMC) ground plane at Z=0
- Homogeneous half space in region Z<0 (reflection coefficient approximation)
- Homogeneous half space in region Z<0 (exact Sommerfeld integrals)
- Planar multilayer substrate

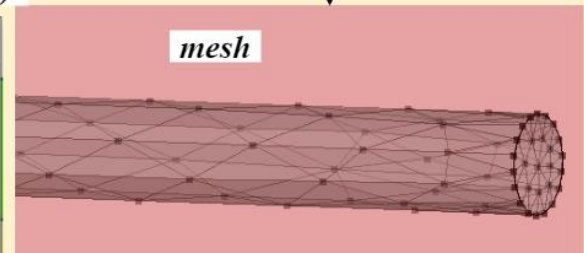
	Media preview	Ground plane	Thickness	Medium
Layer 0		PEC	+inf	Free space
Layer 1		None	1	Ground1
Layer 2		None	1	ground2
Layer 3		None	1	ground3
Layer 4		None	-inf	Free space

Add Remove

Z value at the top of layer 1 0

Note: To confine the planar multilayer substrate to a specific region, the Region medium must be set to Plane / ground (finite).

OK Apply Cancel



Modify wire port (geometry)

Edge Union1.Wire3

Place port on

- Segment
- Vertex

Location on wire

- Start
- Middle
- End
- Other

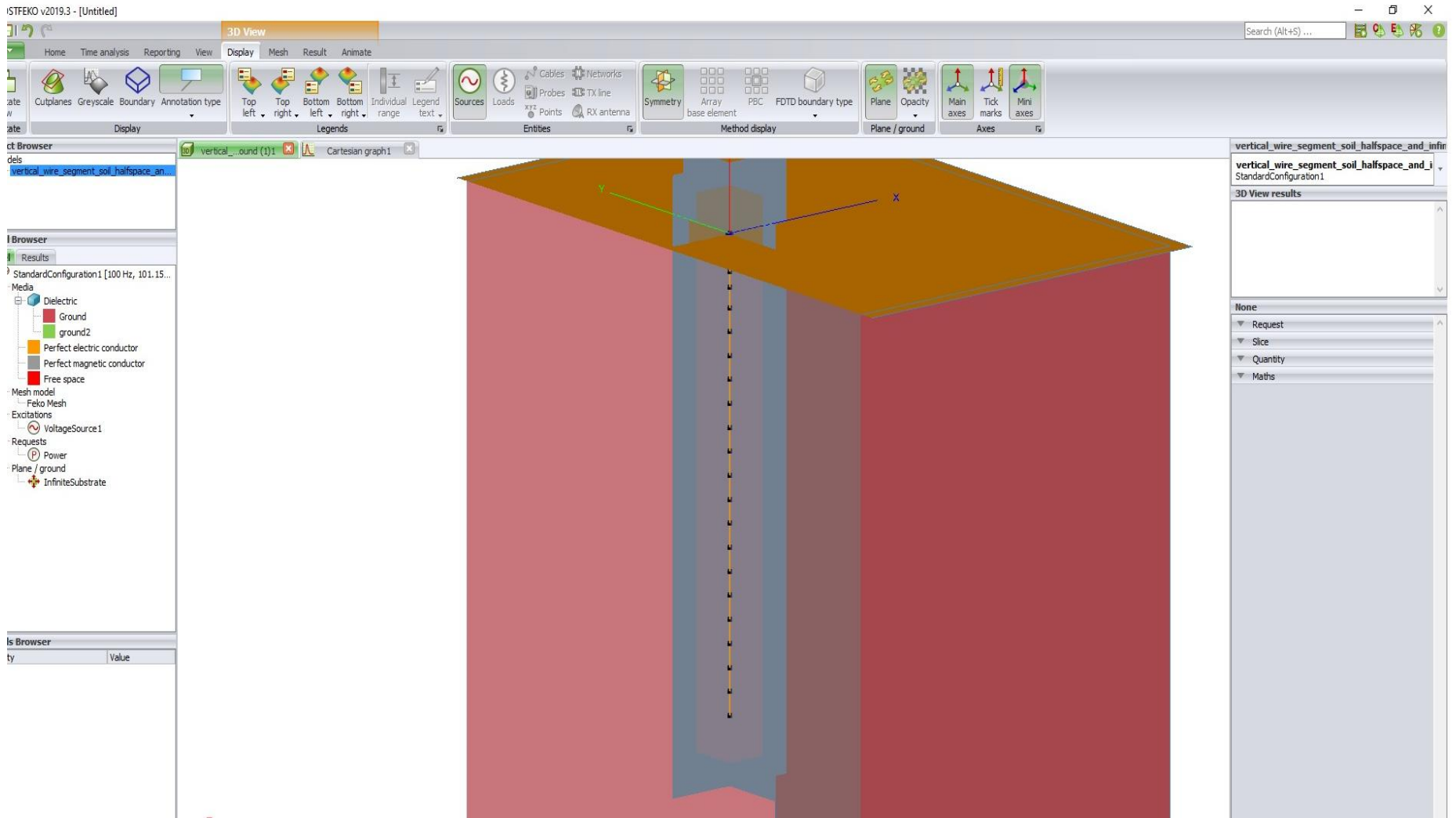
% 0.0

Reverse polarity

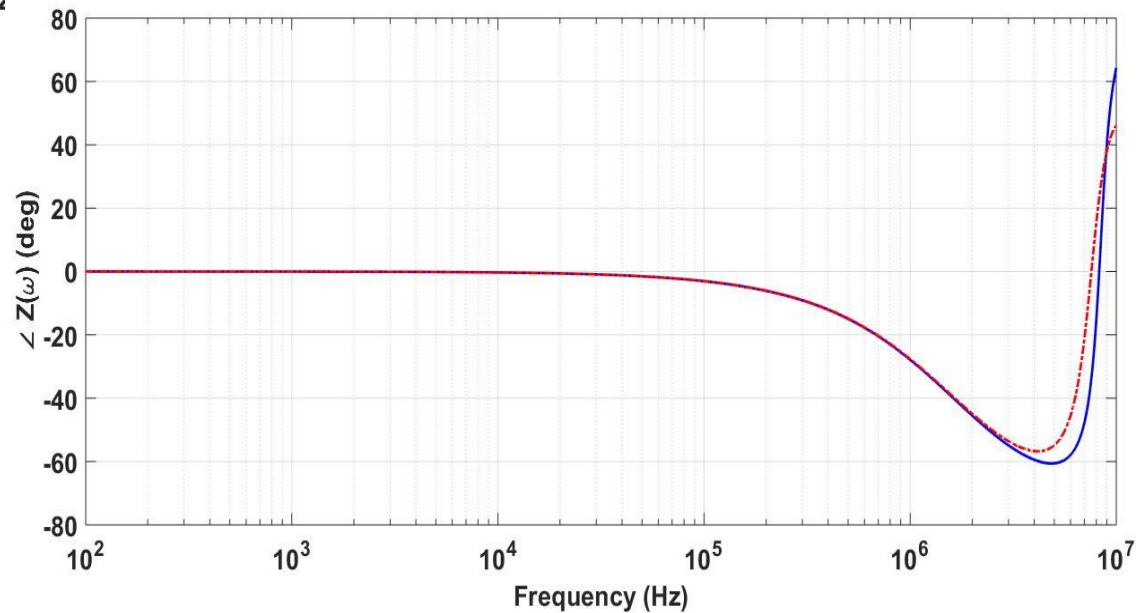
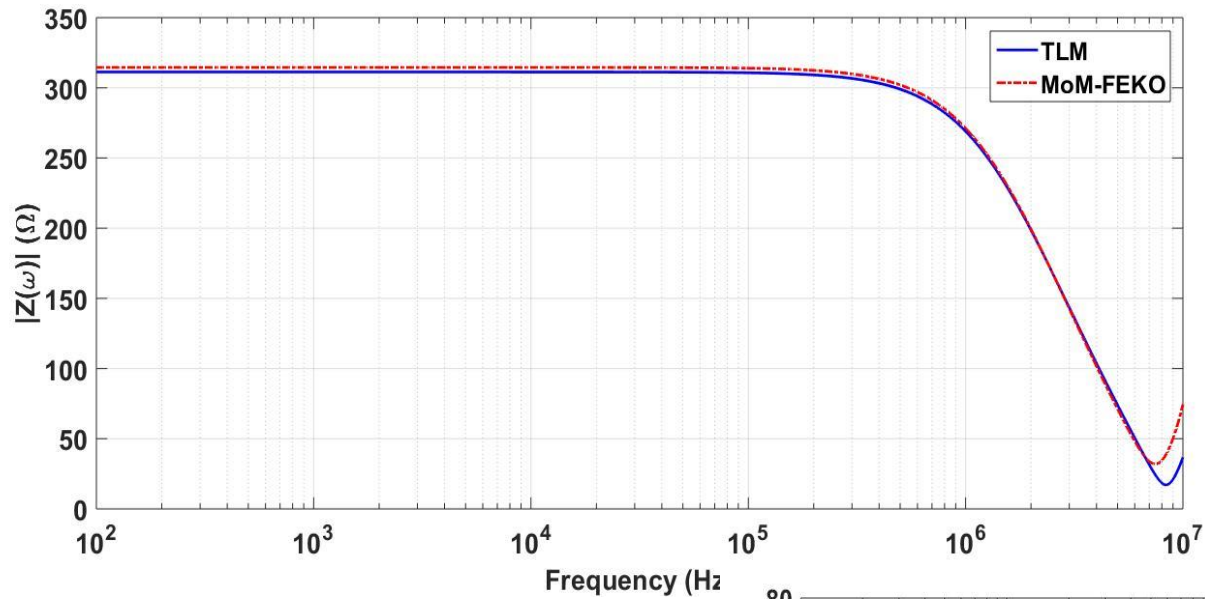
Label Port1

OK Apply Cancel

Haste modelada no FEKO



Comparação MoM x TLM



Comparação de Modelos (TLM, RLC e EMC)

- TLM-Transmission line Model
- EMC-Eletromagnetic Compatibility
- RLC-Concentrado a altas frequências;

On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod

Leonid Grcev, *Senior Member, IEEE*, and Marjan Popov, *Senior Member, IEEE*

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\log \frac{4\ell}{a} - 1 \right] (\Omega) \quad (2a)$$

$$C = 2\pi\epsilon\ell \left[\log \frac{4\ell}{a} - 1 \right] (F)$$

$$L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} \left[\log \frac{2\ell}{a} - 1 \right] (H). \quad (2b)$$

Here, symbols are given in Fig. 1(a), and $\ell \gg a$. Although the results from (1) are somewhat larger than those from (2), both sets of formulas lead to similar results for the impedance to ground. In this paper, we use (2) since it leads to a better match with the EM model.

Parameters of the R-L-C circuit, (1) and (2), are also used in a distributed-parameter circuit [6], [7]

$$R' = \frac{1}{G'} = R\ell (\Omega m); \quad C' = \frac{C}{\ell} (F/m); \quad L' = \frac{L}{\ell} (H/m). \quad (3)$$

The transmission line may be considered as open at the lower end, and the input impedance (equivalent to the harmonic impedance to ground) is [7]

$$Z = Z_0 \coth \gamma \ell \quad (4a)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega L'(G' + j\omega C')}. \quad (4b)$$

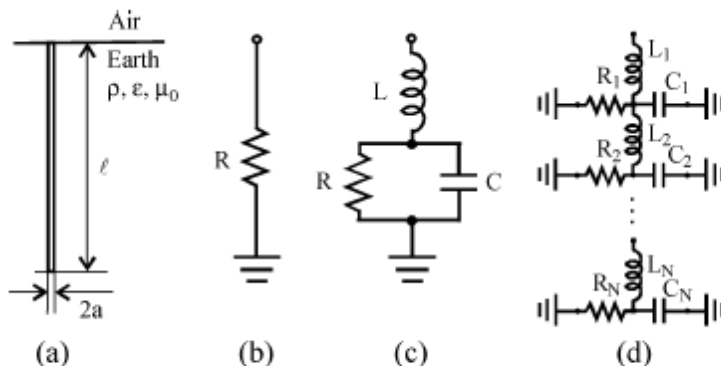
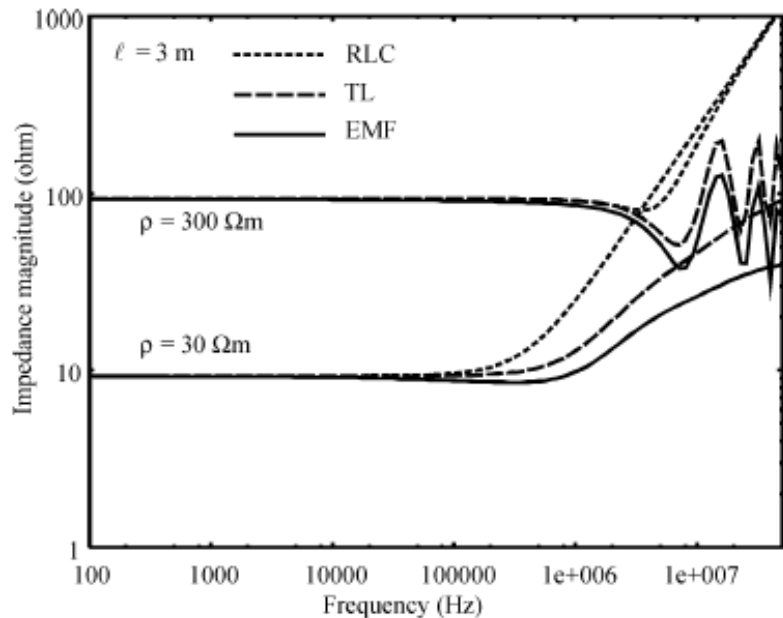
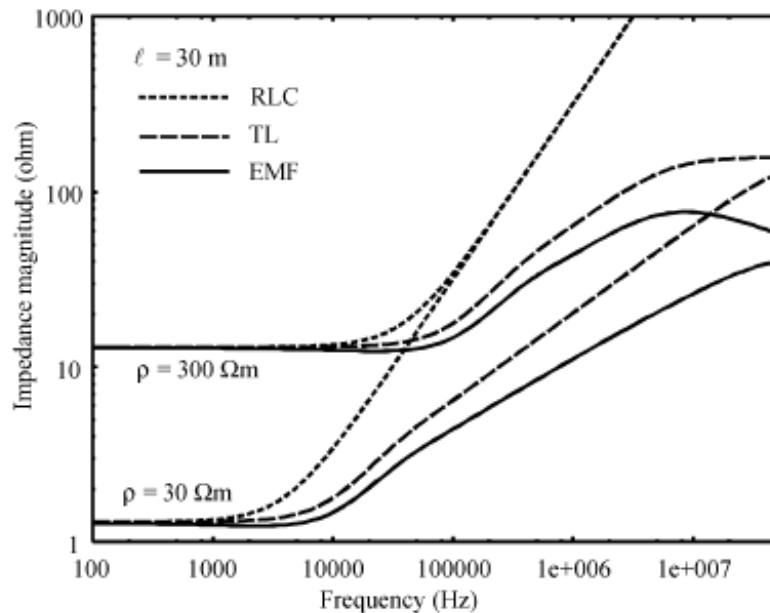


Fig. 1. Low-current models of a vertical ground rod. (a) Physical situation. (b) Low-frequency equivalent circuit. (c) High-frequency lumped R-L-C circuit. (d) High-frequency distributed parameters circuit.



(a)



(b)

Fig. 3. Harmonic impedance to ground of (a) short $\ell = 3$ m and (b) long $\ell = 30$ -m ground rods in more conductive ($\rho = 30 \Omega\text{m}$) and in less conductive ($\rho = 300 \Omega\text{m}$) soil.

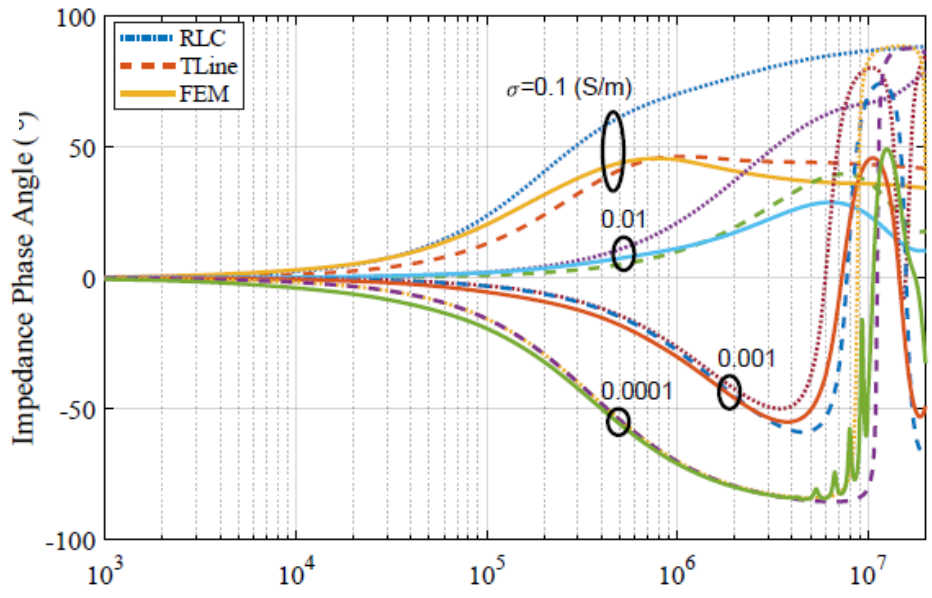
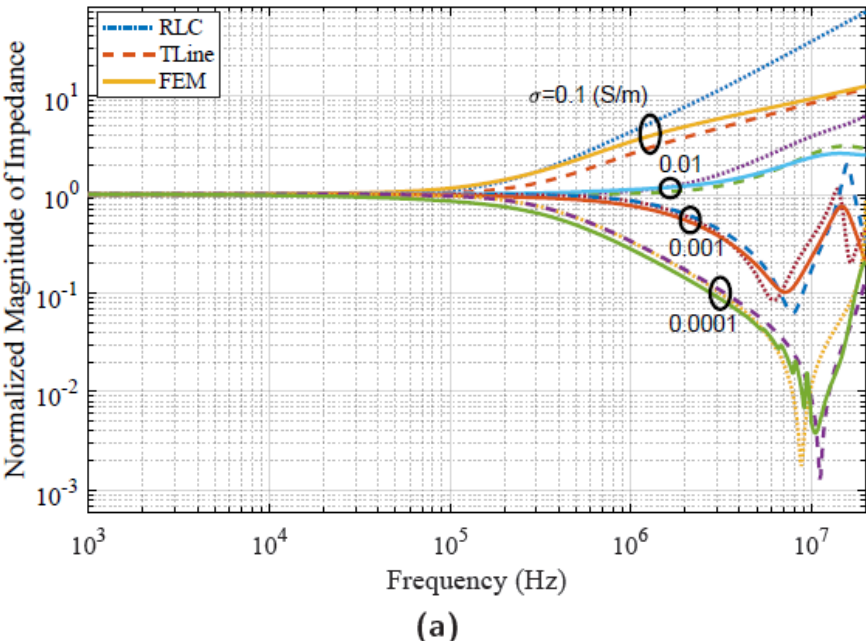
- The lumped R-L-C circuit can be used in its validity domain or for the preliminary analysis, with the knowledge that it might greatly overestimate the ground rod impedance at high frequencies.
- The discrete approximate distributed-parameter circuit reduces the overestimation of the ground rod impedance at high frequencies in comparison with the lumped R-L-C circuit. One should also check the sensitivity of the overall results to this change.

- If further reduction of the overestimation of the impedance to ground at high frequencies is needed, the EM model might be used. Equivalent circuit parameters can be determined by the described curve matching procedure.

Electromagnetic Transient Modelling of Power Transmission Line Tower and Tower-Footing Grounding System

Thesis Full-text available January 2020

Fig. 3.13: Normalized magnitude (a) and phase angle (b) of harmonic impedance of 3 m vertical grounding electrode for $\epsilon_r = 10$ along with its phase angle.



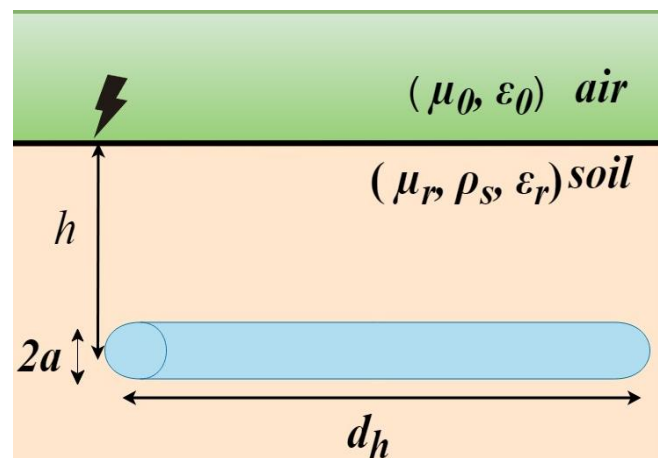
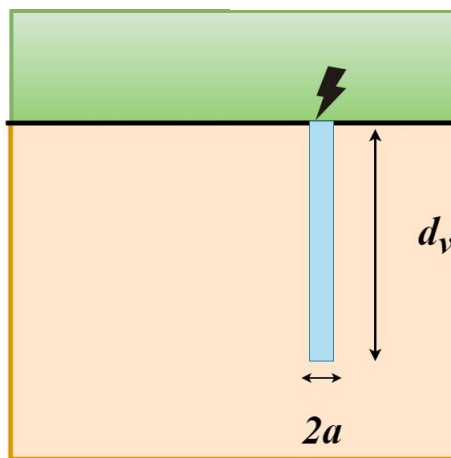
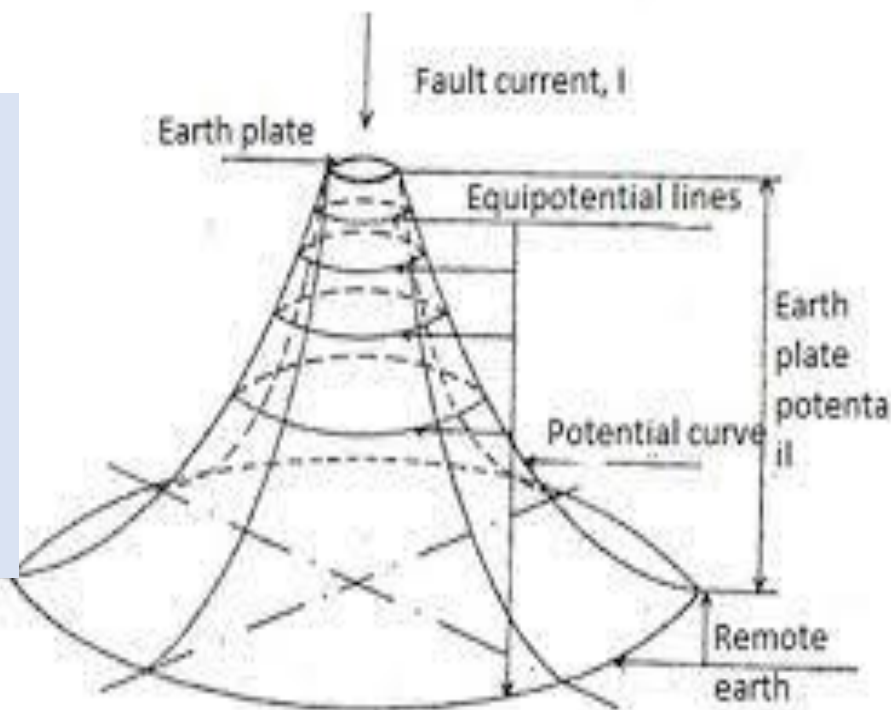
Ground Potential Rise (GPR)

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:

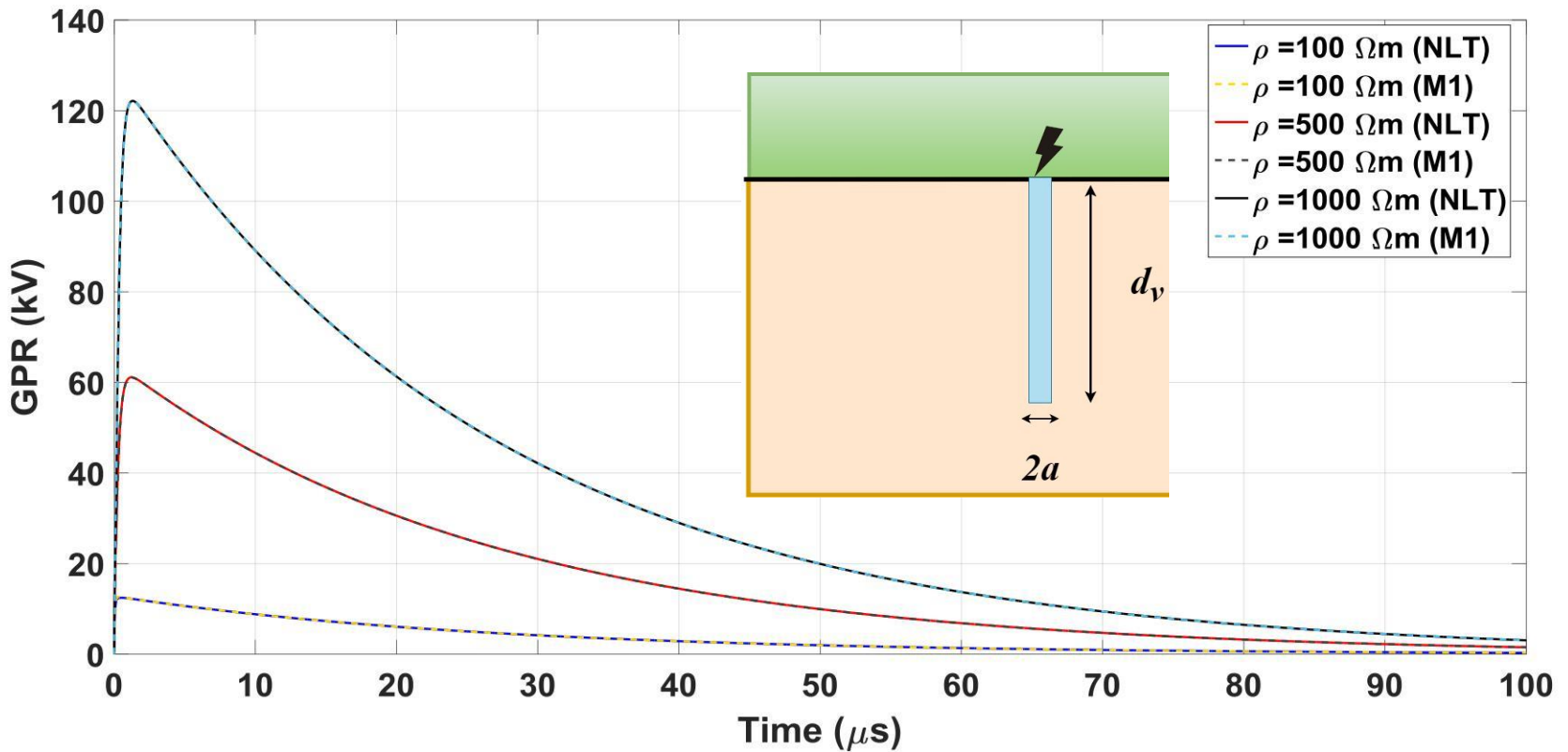
$$v(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} [i(t)] Z(j\omega) \}$$

Sendo F a transformada de Fourier do sinal.



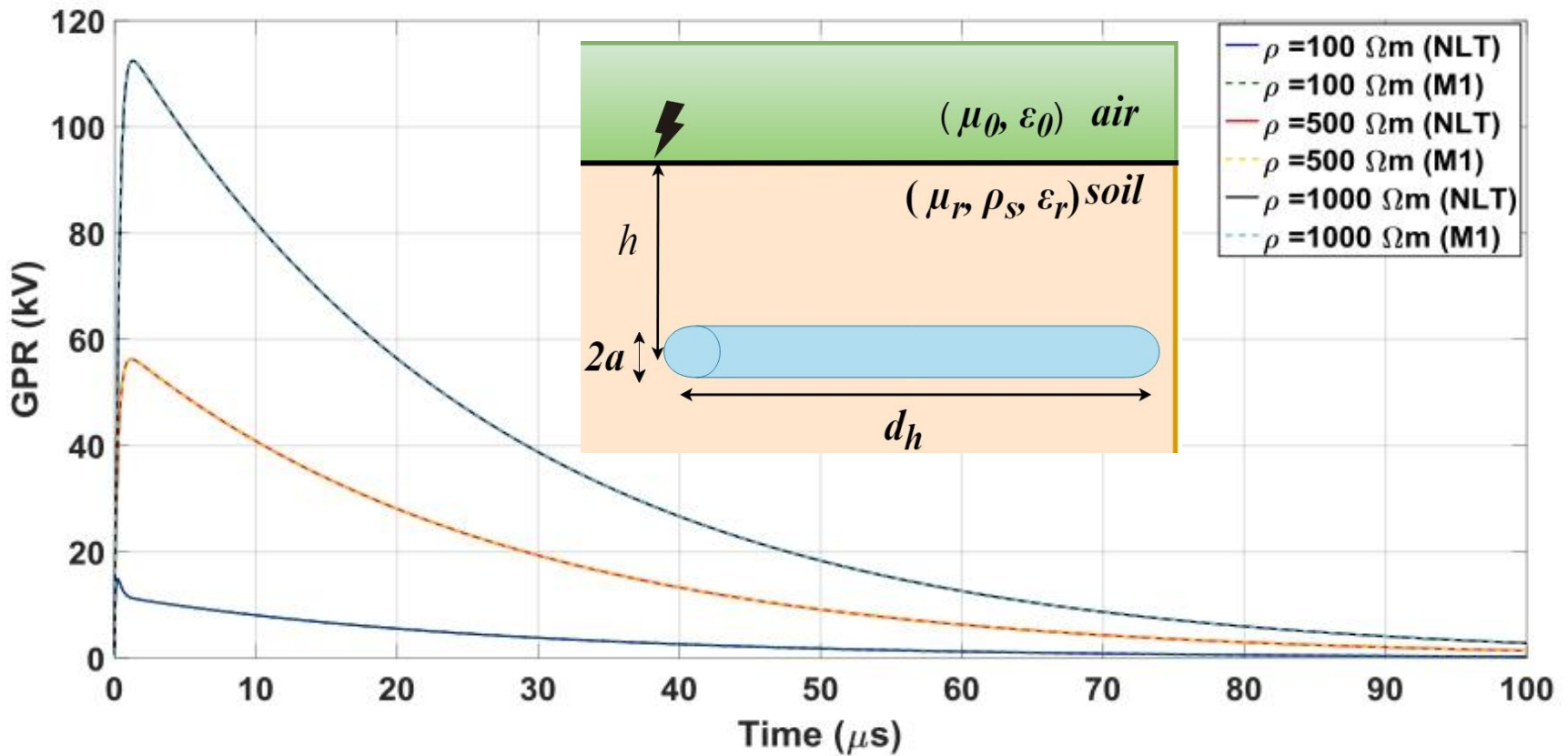
Ground Potential Rise (GPR)

Eletrodo vertical



Ground Potential Rise (GPR)

Eletrodo horizontal

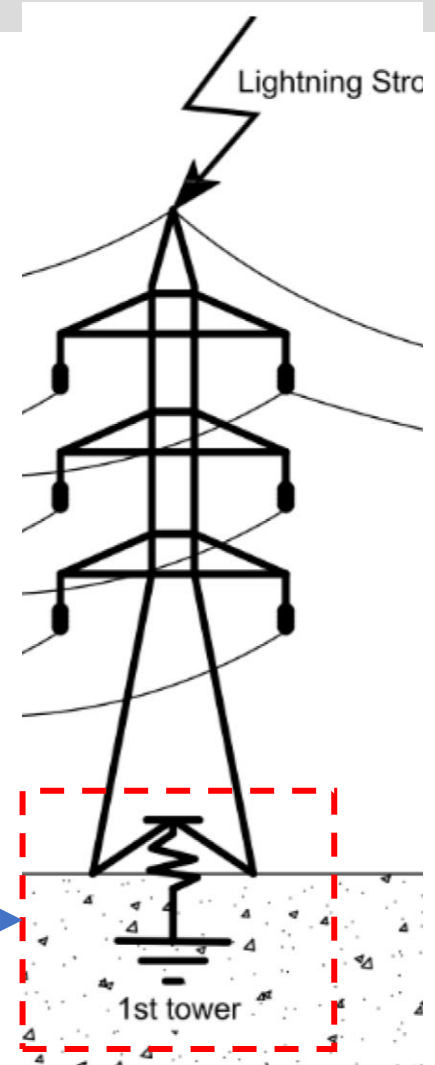


Como representar a impedância de aterramento ?

Há duas formas de apresentar a impedância de aterramento.

- Circuito completo usando o vector fitting- $Z(s)$
- Impedância impulsiva- R

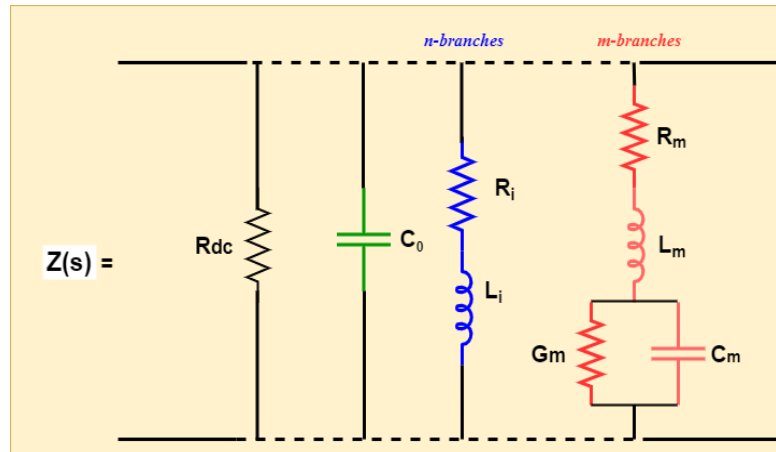
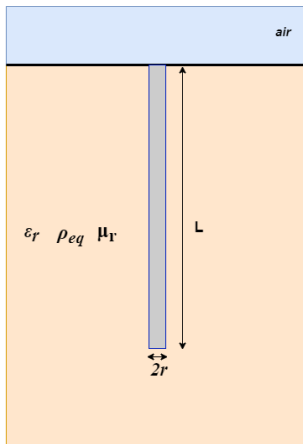
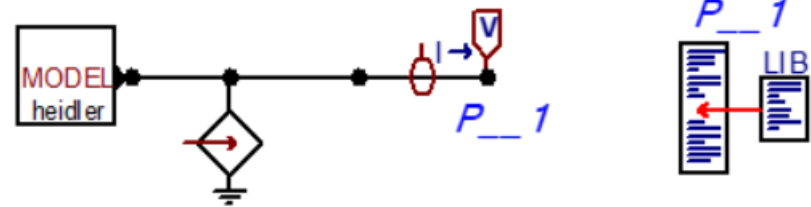
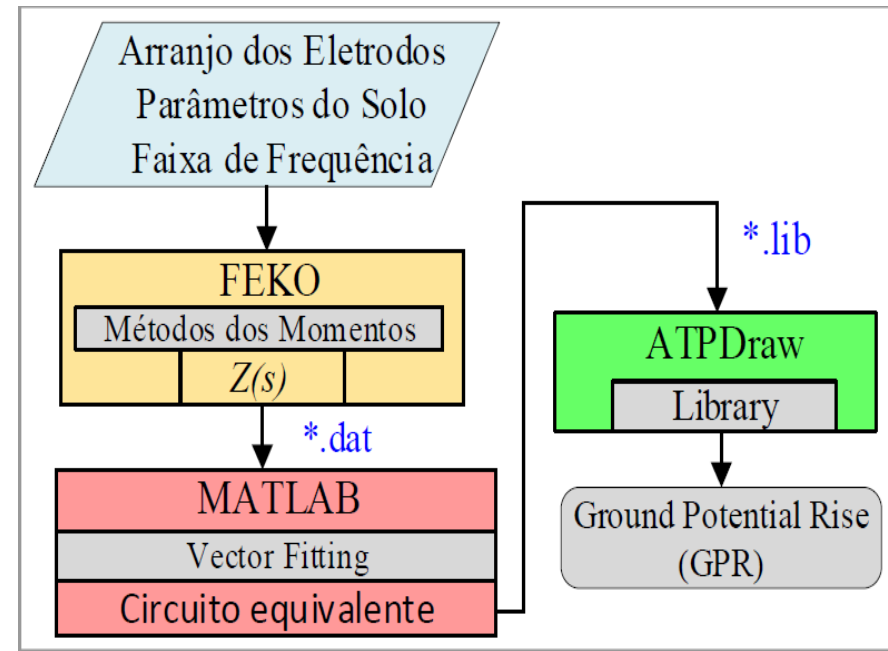
$Z(s)$ ou R ?



Vector Fitting

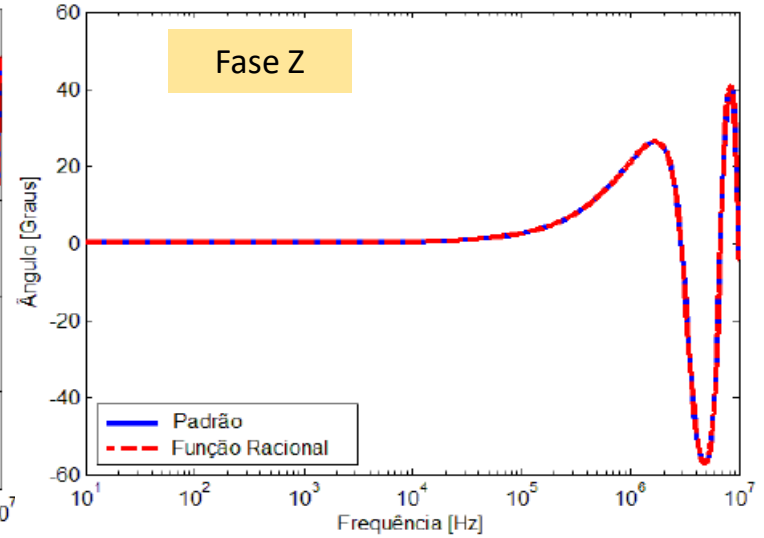
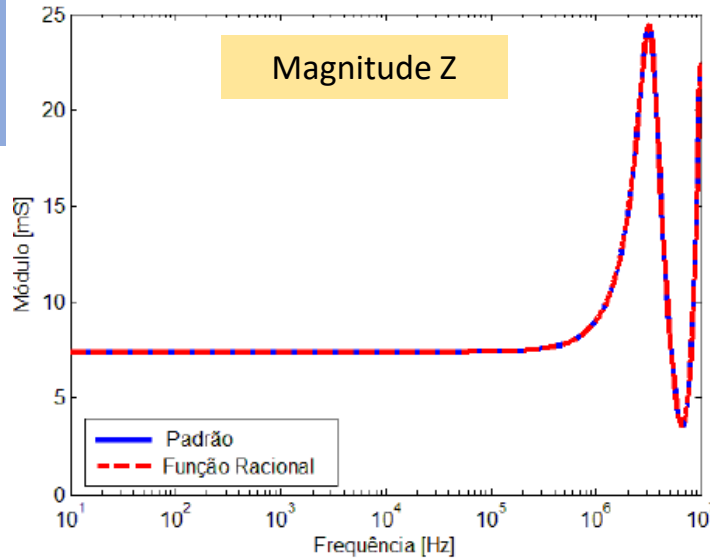
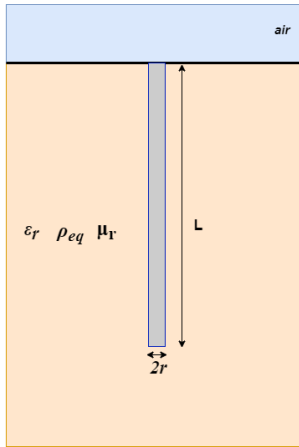
$$Z_h(s) \approx Z_{h,fit}(s) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{c_k}{s + a_k} \right) + d + sh.$$

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).

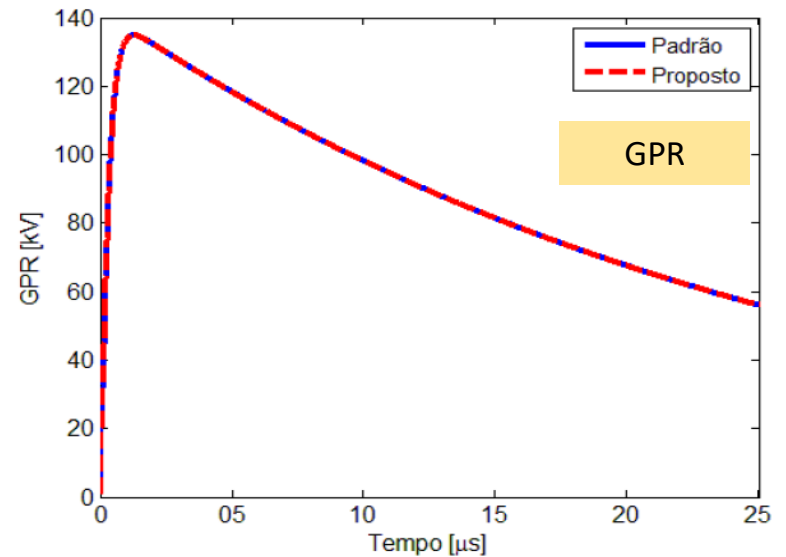
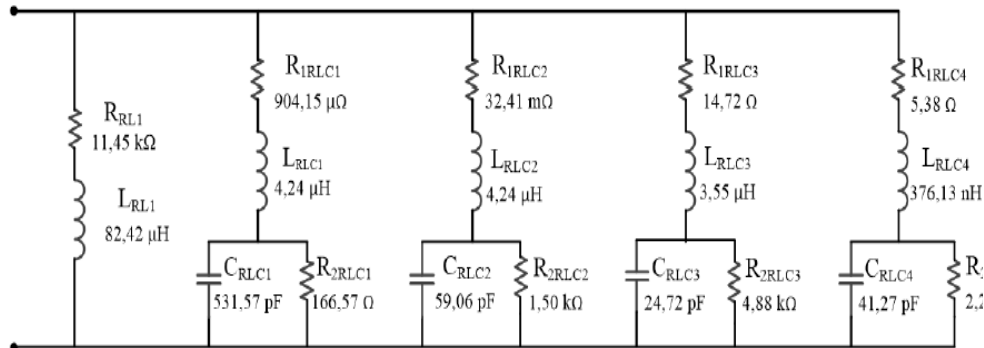


Vector Fitting

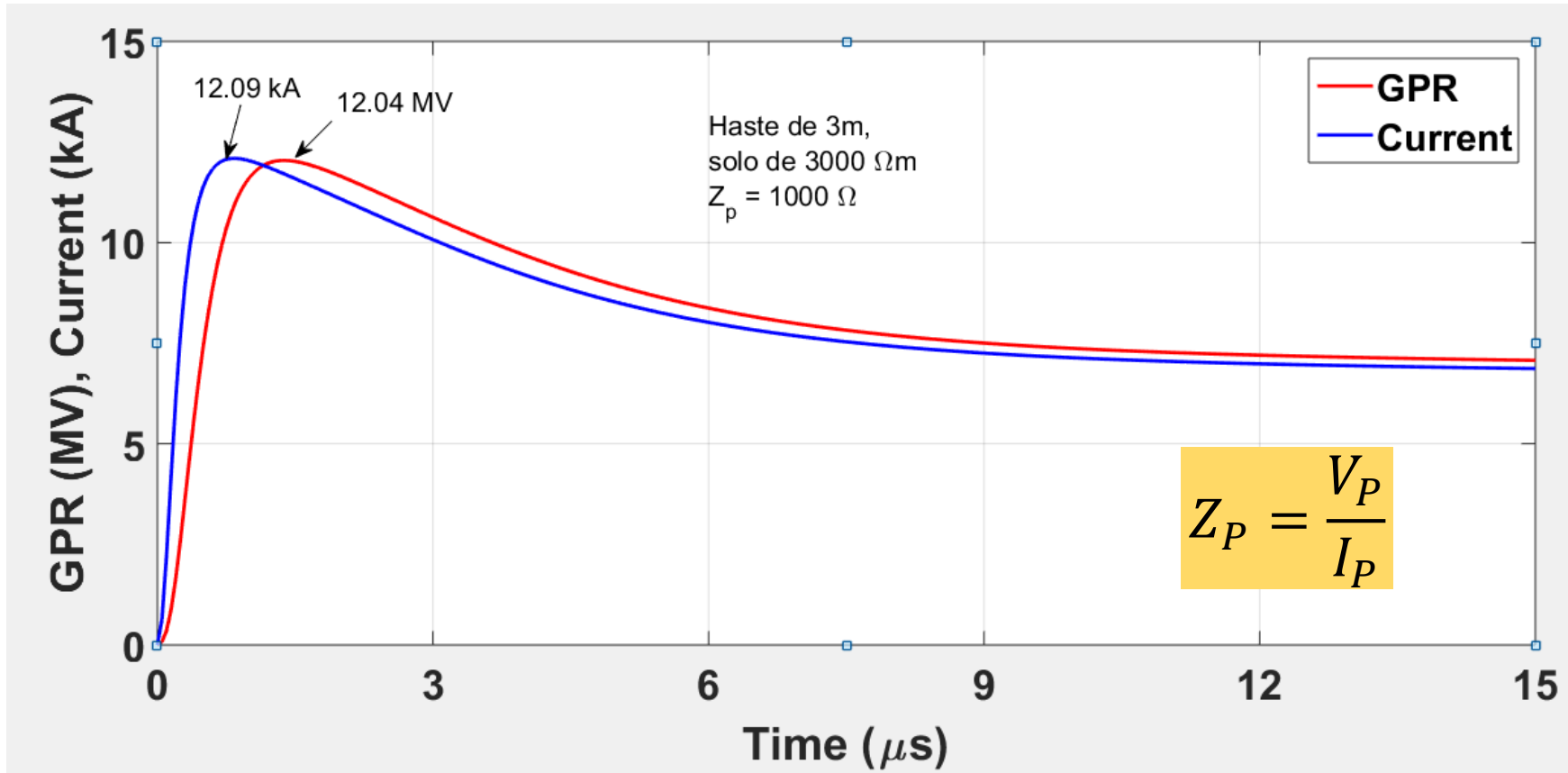
Eletrodo horizontal:
Raio = 7mm , L = 10 m,
 $\rho = 1.000 \Omega\text{m}$



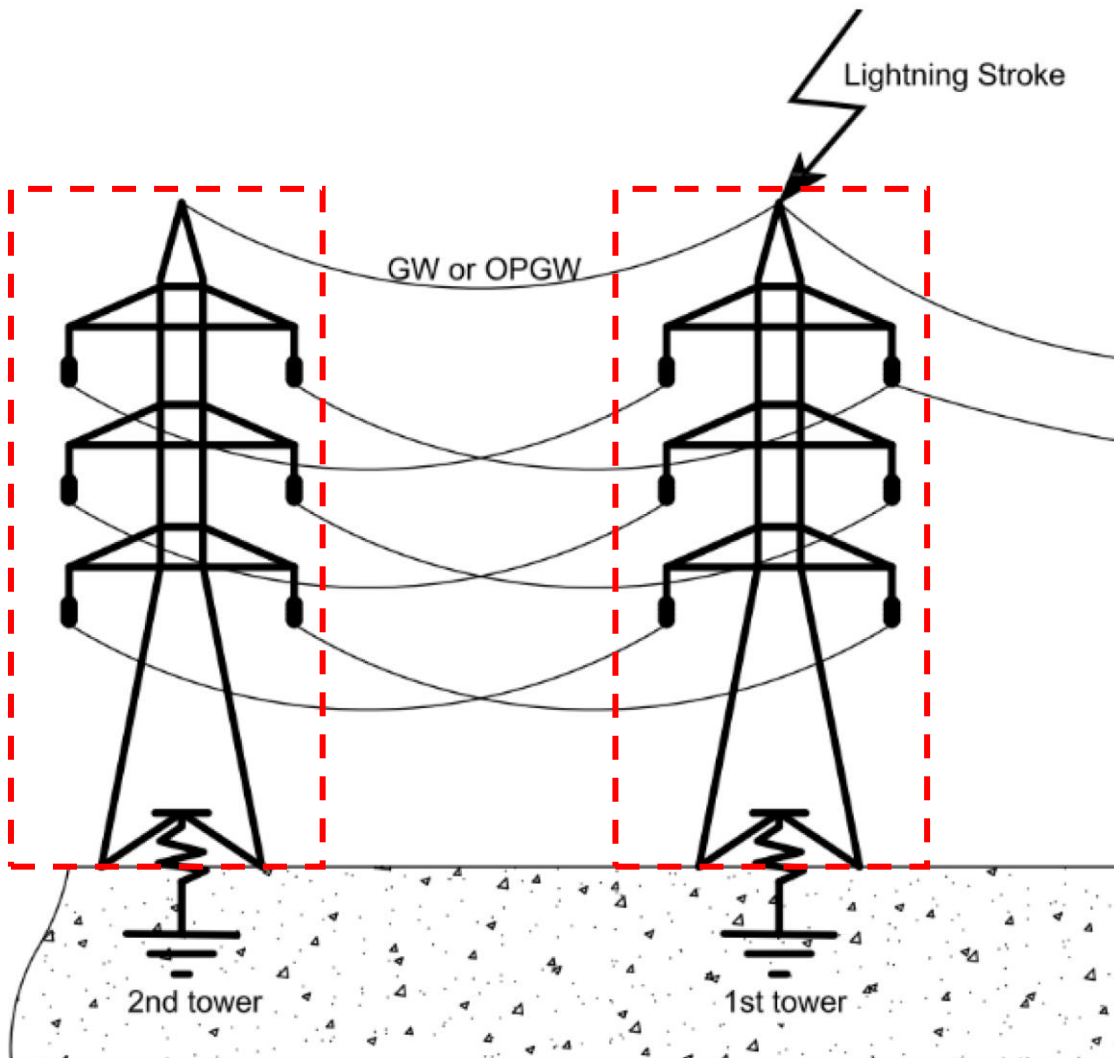
Circuito sintetizado



Impedância Impulsiva- Z_p



Torres de Transmissão



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

Torres de transmissão (TTs)

As TTs são estruturas de suporte das linhas de transmissão com o objetivo de sustentar os cabos condutores e pára-raios;

Deve-se respeitar as distâncias adequadas de segurança, tensão e criar o menor impacto visual e ambiental.

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

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



Torres Convencionais

Torres de transmissão elevadas



Estaiada
440 kV/46 m



China-
Yangtze
River
500 kV/345
m

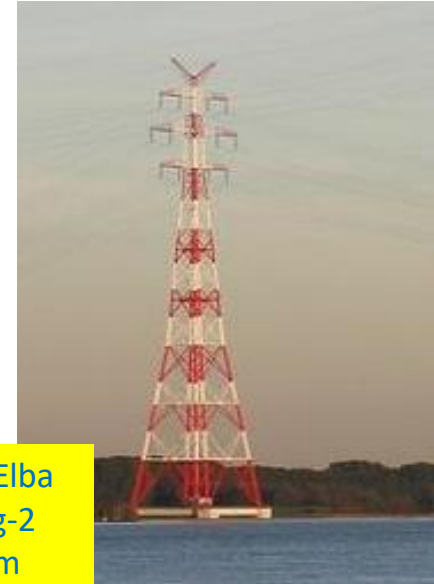


Autoportante
circuito duplo
400 kV/45 m



Autoportante
circuito simples
138 kV/25 m

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



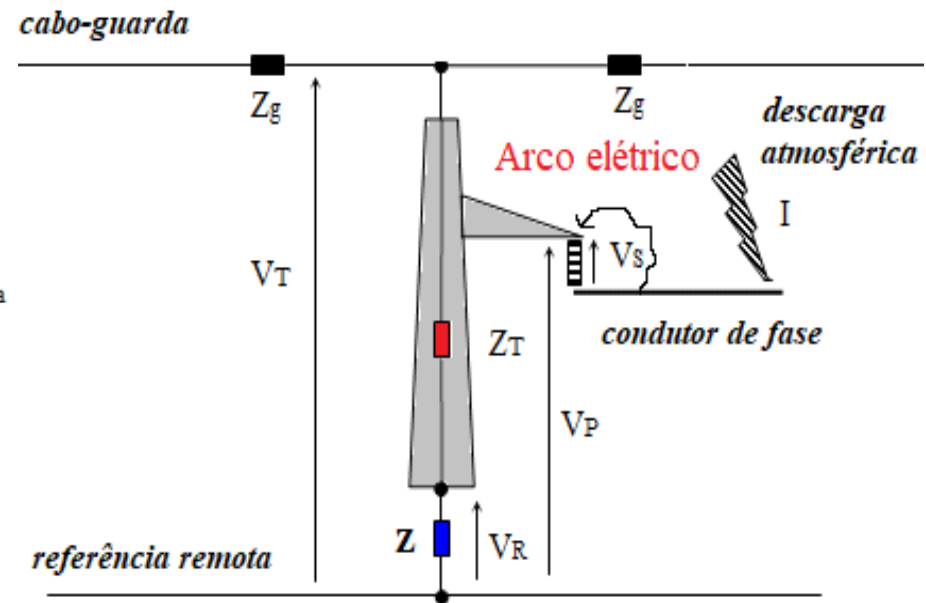
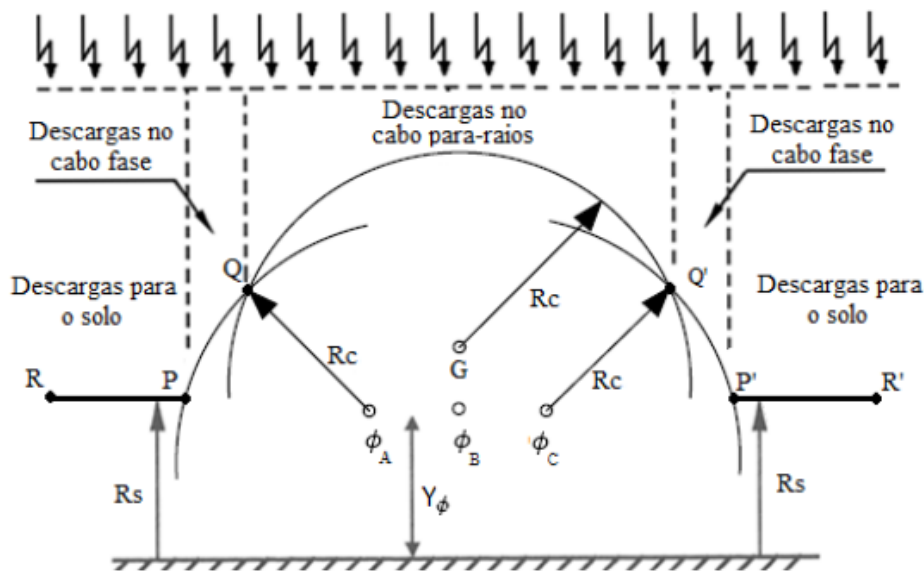
Germany-Rio Elba
Elbekreuzung-2
380 kV/227m

- ❖ 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, 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 e blackouts.
- ❖ 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).

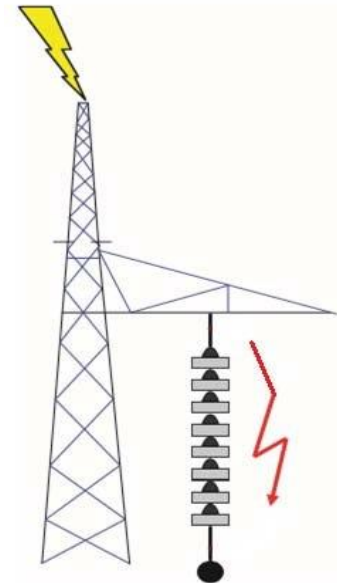
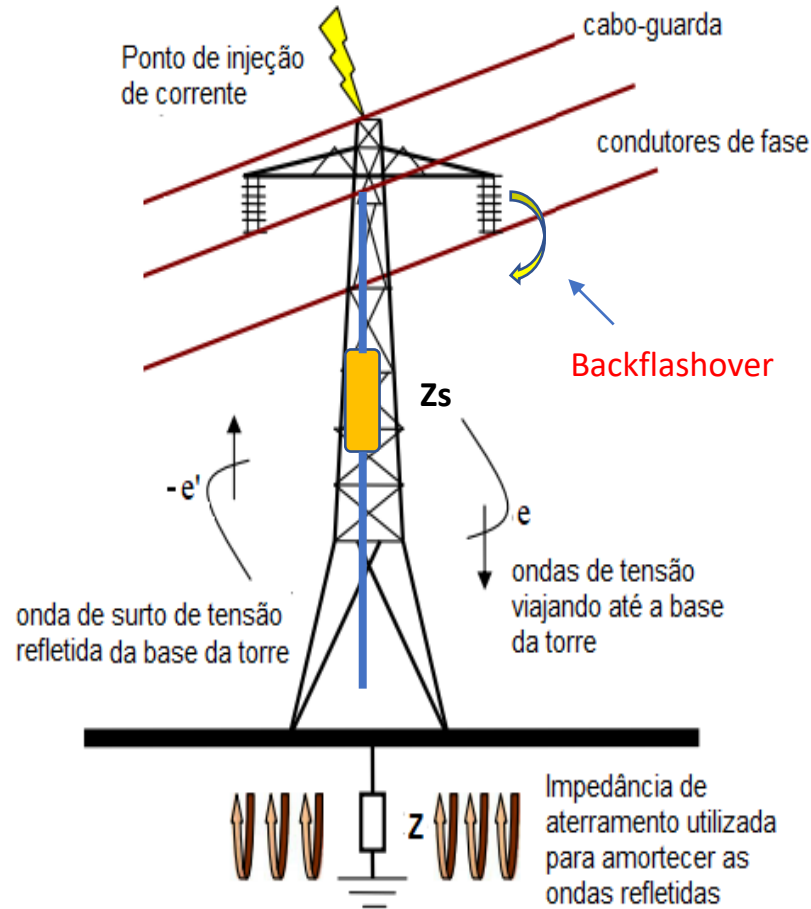
Flashover

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.

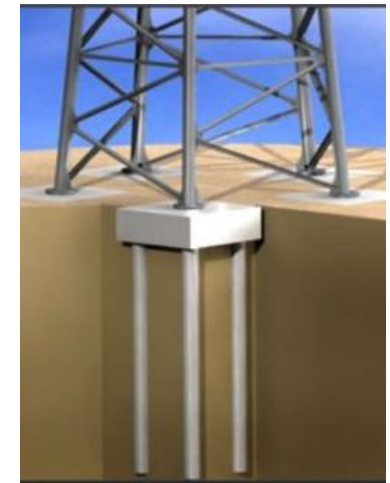
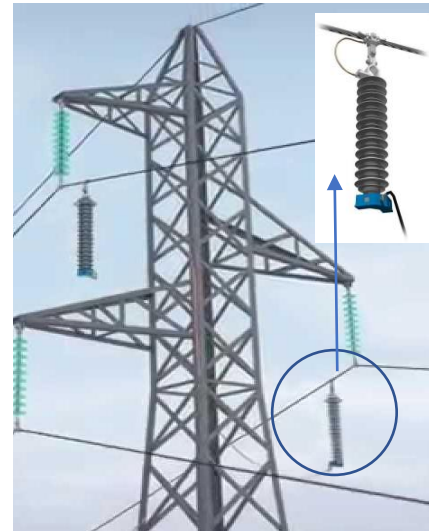


Redução dos Backflashovers

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).



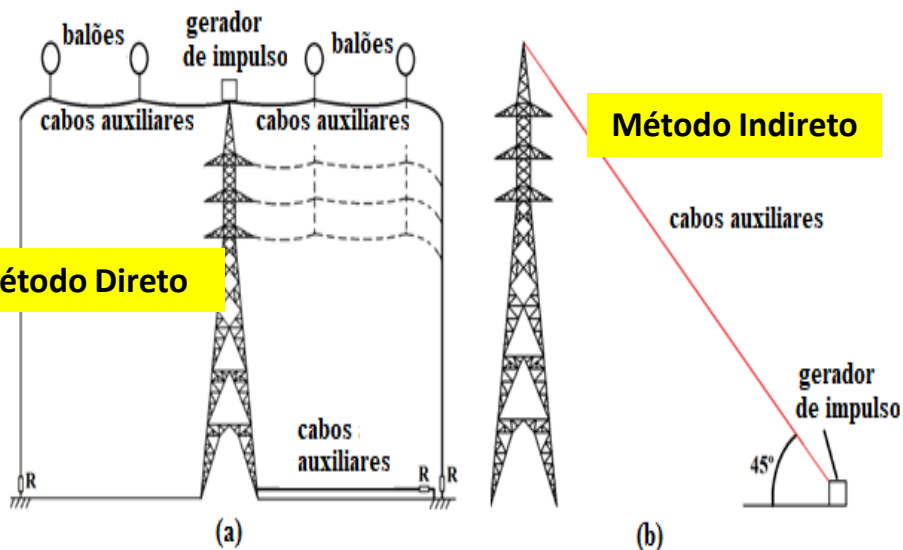
BFs e surge arresters (pára-raio de linhas)



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)**



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

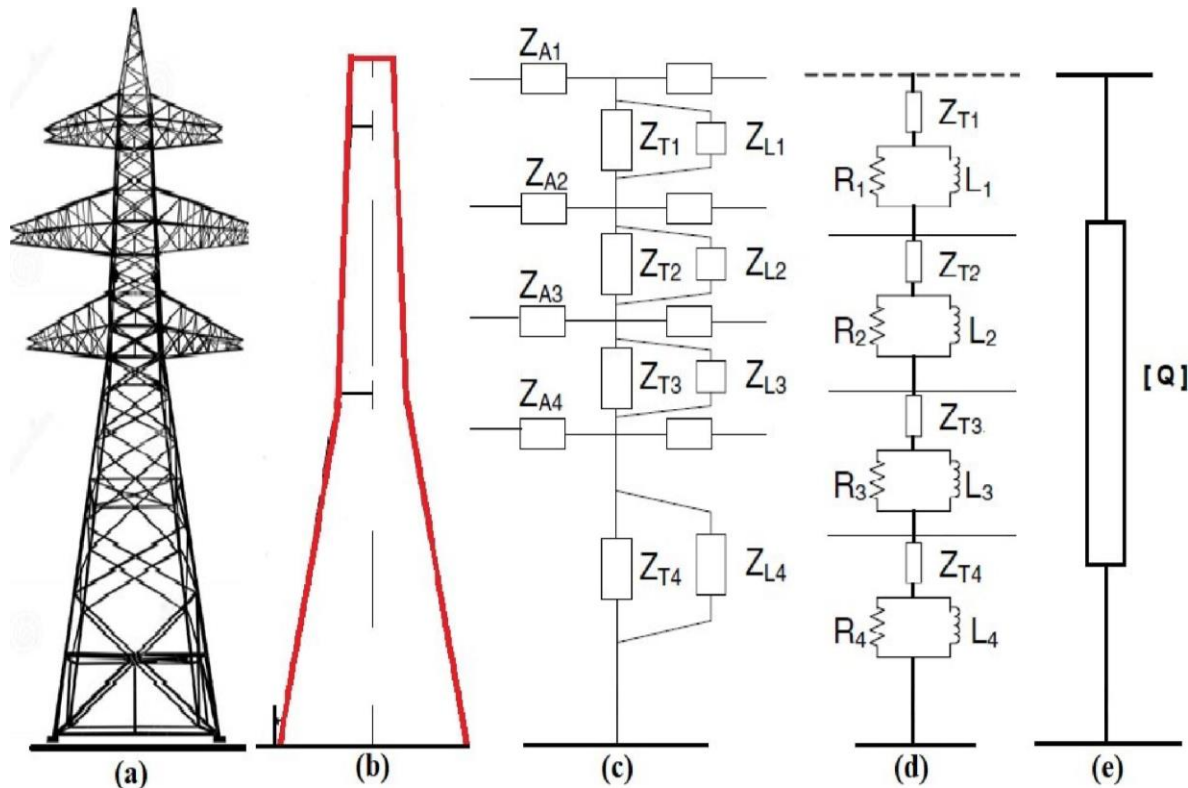
$$Z_{surto} = \frac{V_{max}}{I(t_{max})}$$

Modelagem de torres de transmissão

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

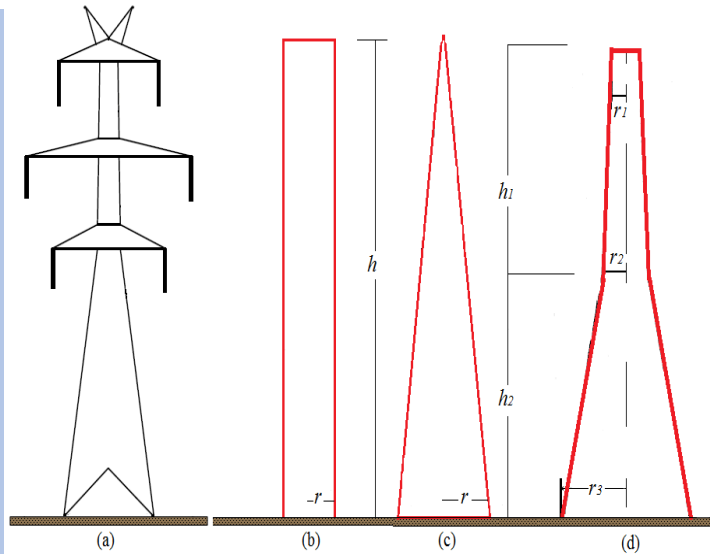
Esses são classificados em:

- (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

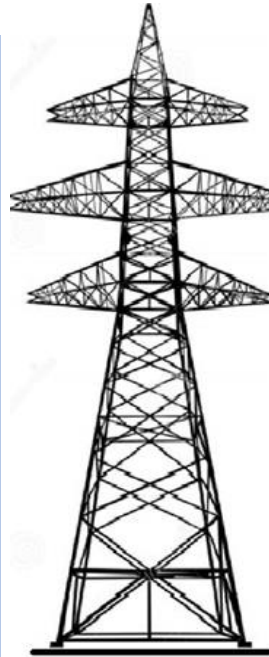


Ref.	Aprox.	Impedância de surto da torre
Chisholm	Cônica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right)$
Chisholm	Cilíndrica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right) - 60$
Chisholm	Tronco de sólidos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

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

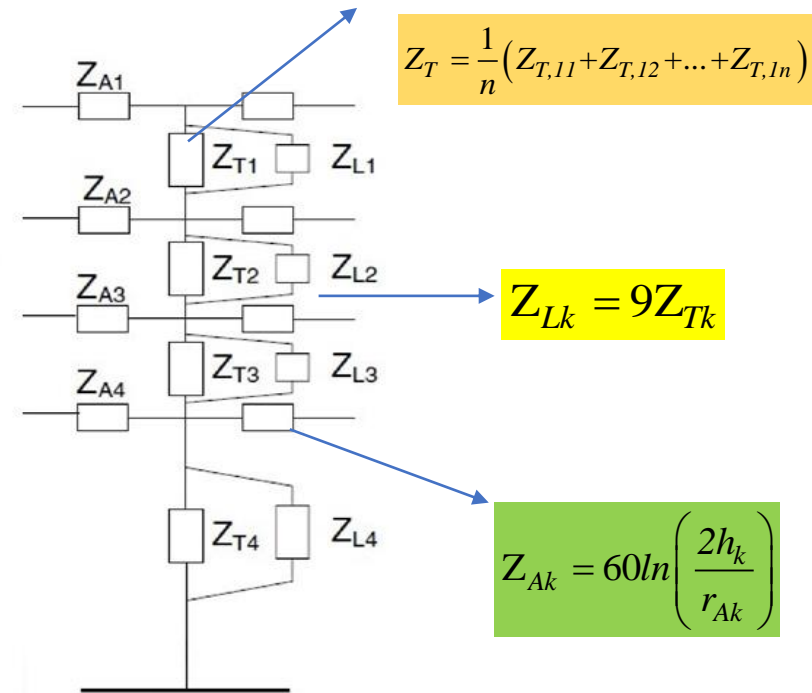
Modelos multicondutores

- ❖ 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.



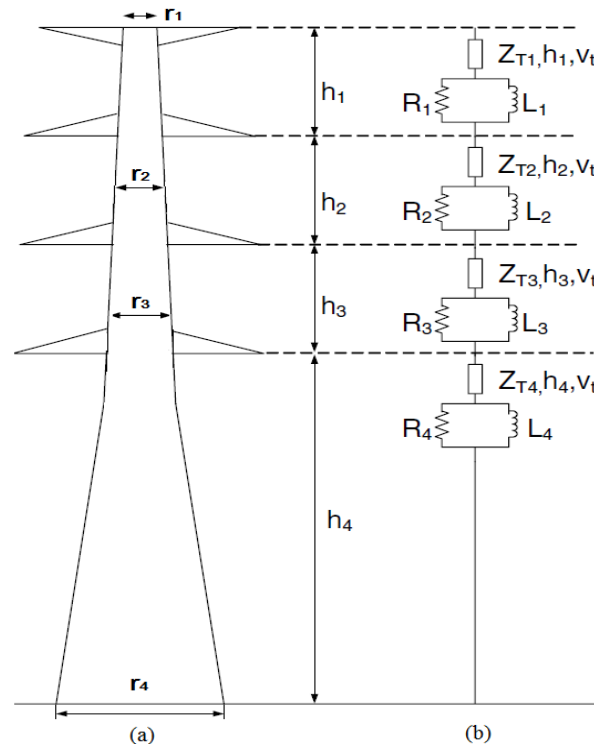
$$Z_{T,kk} = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right]$$

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



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;



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

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

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

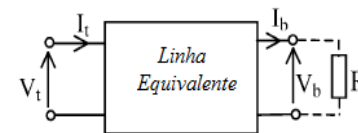
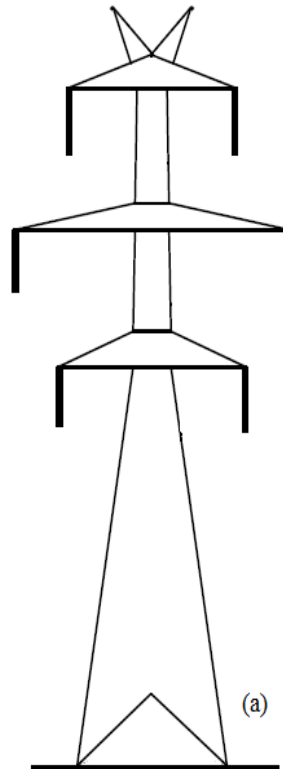
$$L_i = R_i \frac{h}{v_T} k_i$$

Modelos de torres dependentes da frequência (Quadripolo)

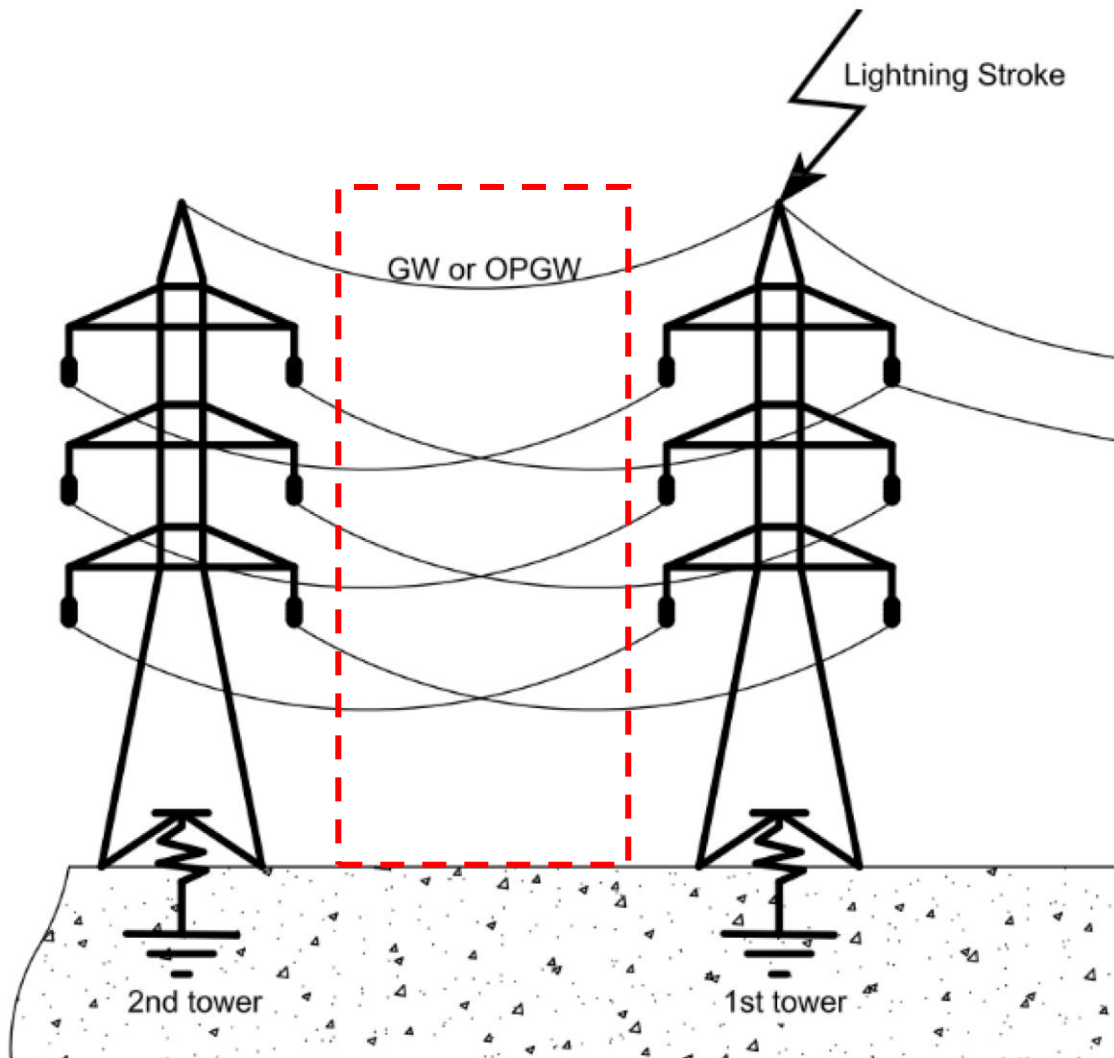
- ❖ Representam a torre de transmissão por linha de transmissão no domínio da frequência.
- ❖ A torre de transmissão é representada por uma linha uniforme, como uma impedância de surto dependente da frequência.
- ❖ A torre é representada por um *quadripolo* e as correntes e tensões são descritas pelas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

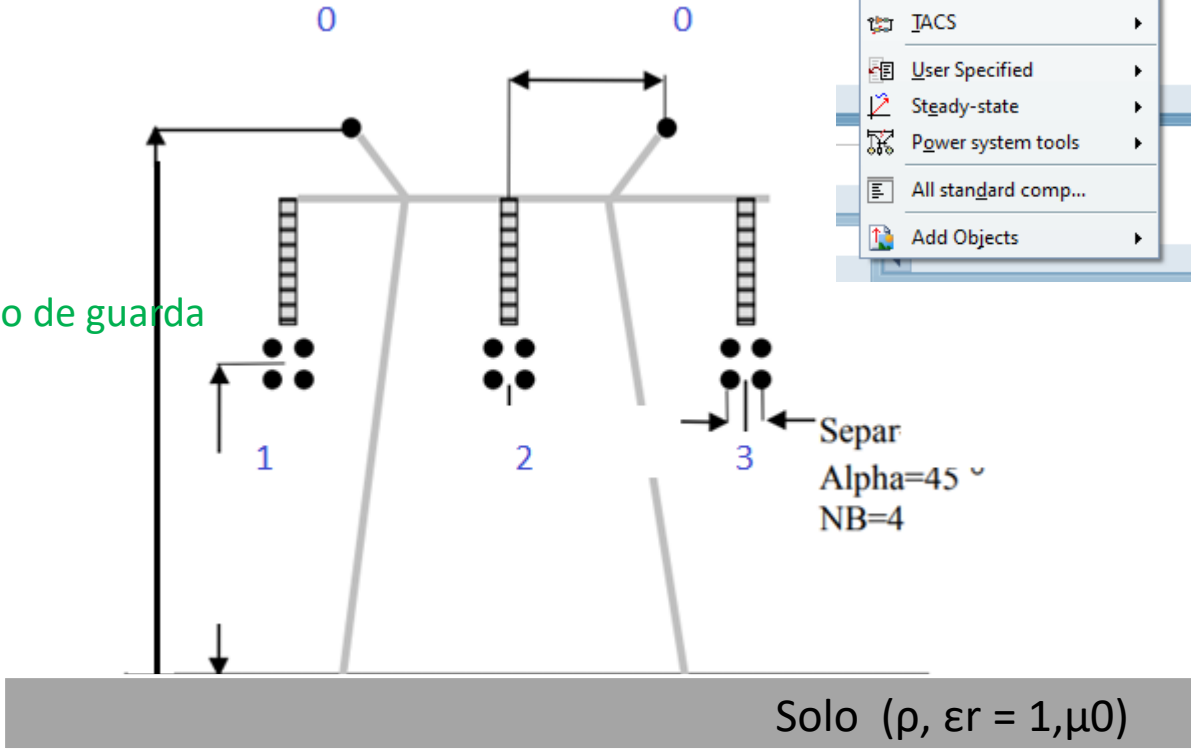
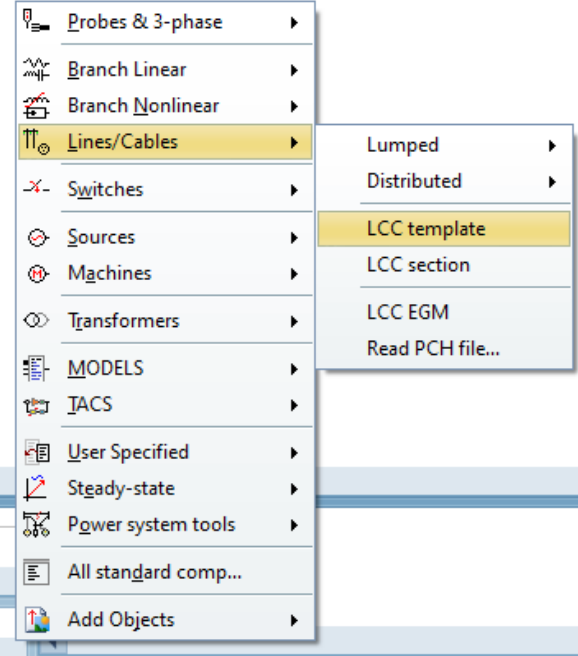
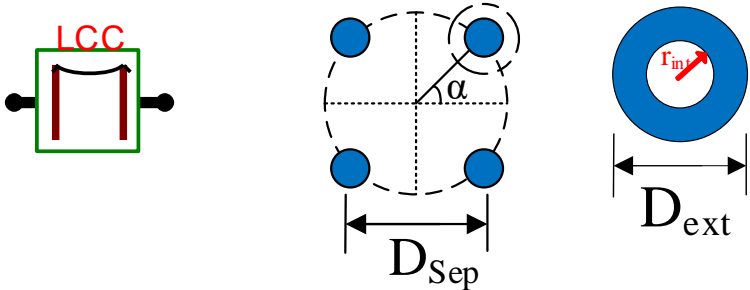
❖ Energização de uma Linha de transmissão trifásica

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

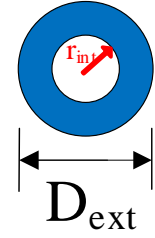
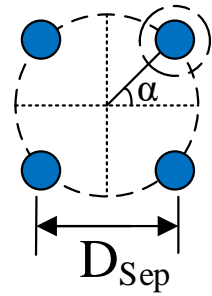
Semlyen

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

Exemplos de representação de sistemas de potência;

Influência :

- dos parâmetros do solo variants com a frequência;
- do número dos cabos guarda;
- da resistência de aterramento;
- tempo de subida da corrente de descarga
- Presença de surge arrester

Modelagem de torres no ATP

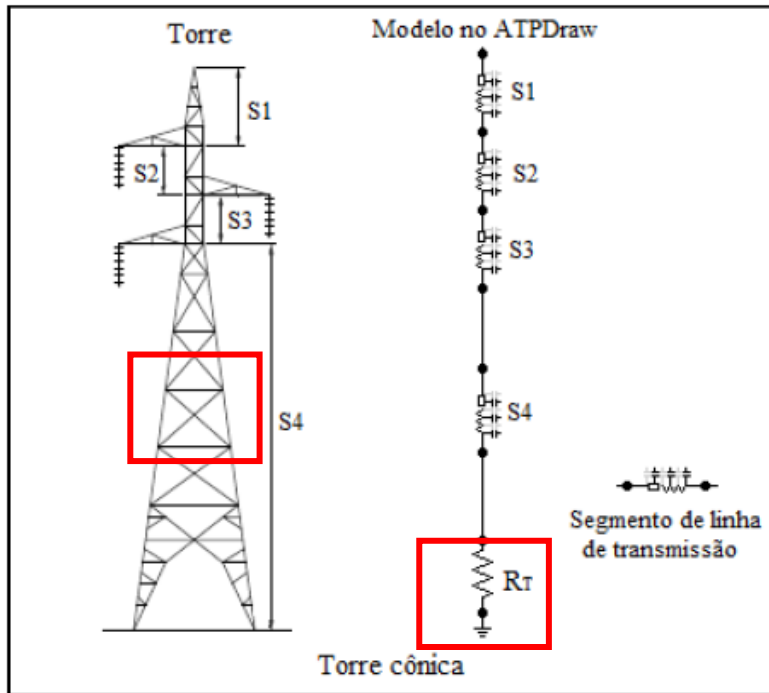
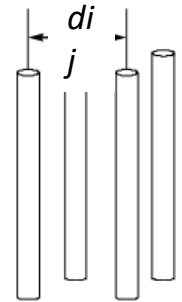


Figura 3-17: Modelagem da torre cônica no ATPDraw.

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

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

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

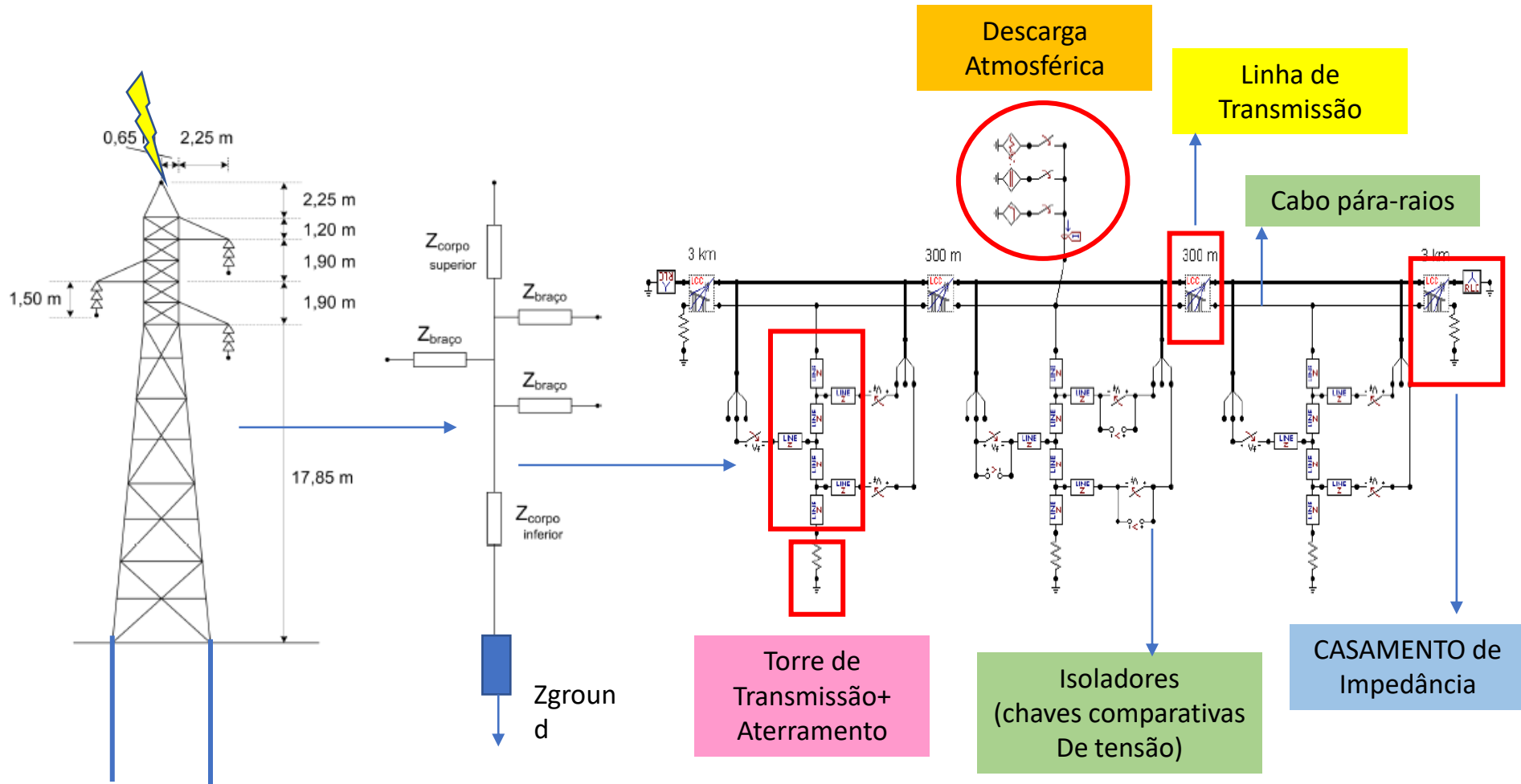


Nas Equações (3-26) a (3-28), n é o número de condutores paralelos, h é a distância do ponto mais alto de cada segmento ao solo, d_{ij} é a distância entre os condutores verticais i e j de cada segmento e r o raio dos condutores cilíndricos. Nos segmentos das torres em que os condutores não sejam paralelos,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

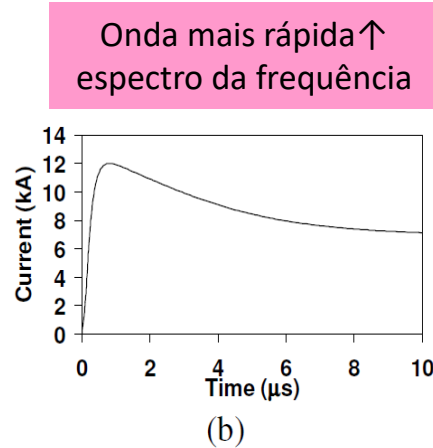
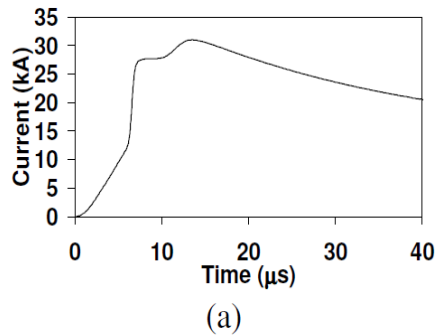
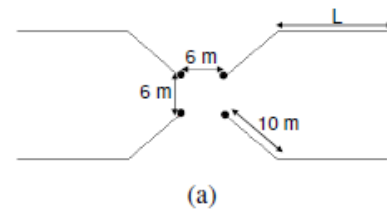


Fig.1. Representative current waveforms with median peak currents and front times of first (a) and subsequent (b) strokes. FST: $I_p = 31.1$ kA, $Td30=3.8$ μ s, SUB: $I_p = 11.8$ kA, $Td30 = 0.67$ μ s.

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

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

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).

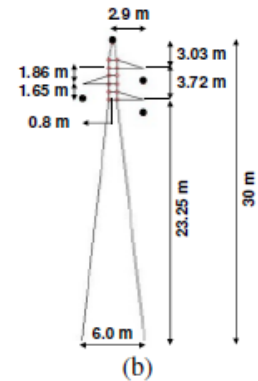
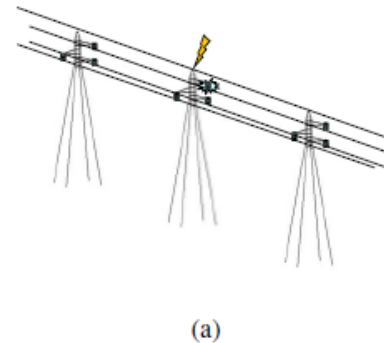


Fig. 3. Representation of direct strike to the tower (a) and the simulated 138-kV transmission line tower configuration (b).

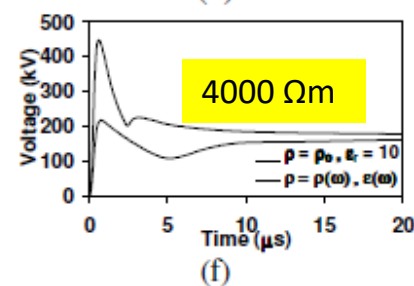
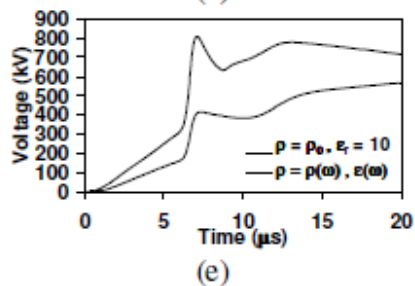
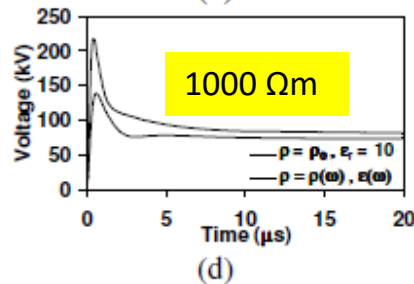
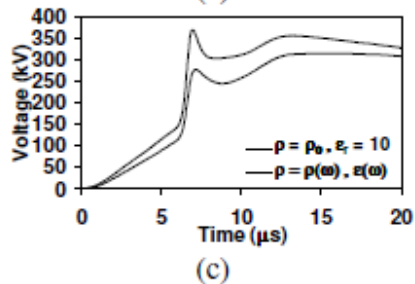
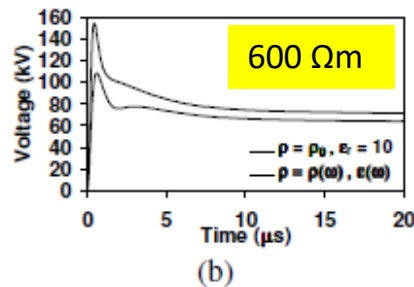
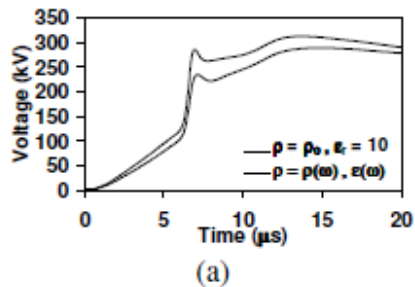
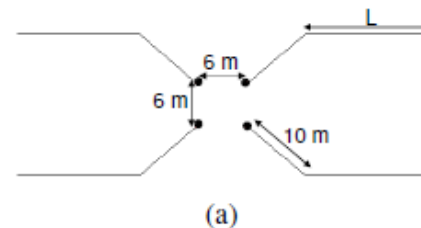


Fig. 4. Simulated GPR of the 138-kV-line tower footing under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters for different values of soil resistivity ρ_0 . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600 Ω .m, (c),(d) 1000 Ω .m, (e),(f) 4000 Ω .m.



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

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 (Ω .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

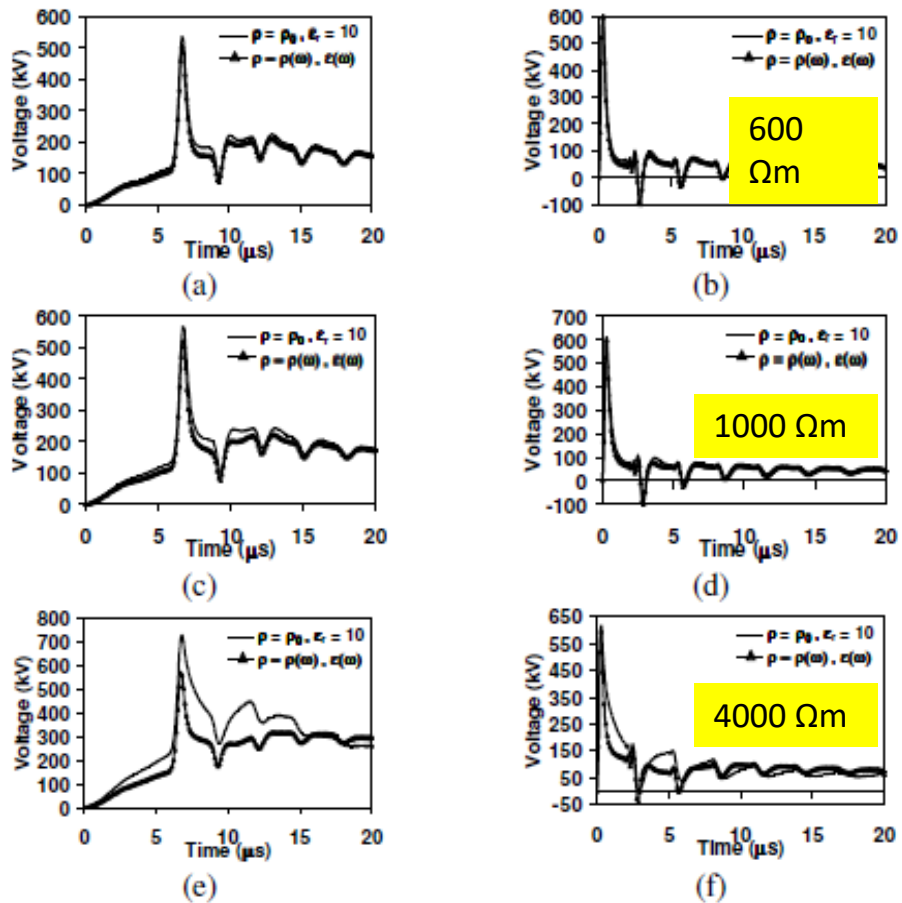


TABLE II
OVERVOLTAGE PEAK DEVELOPED ACROSS UPPER INSULATOR STRING

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),

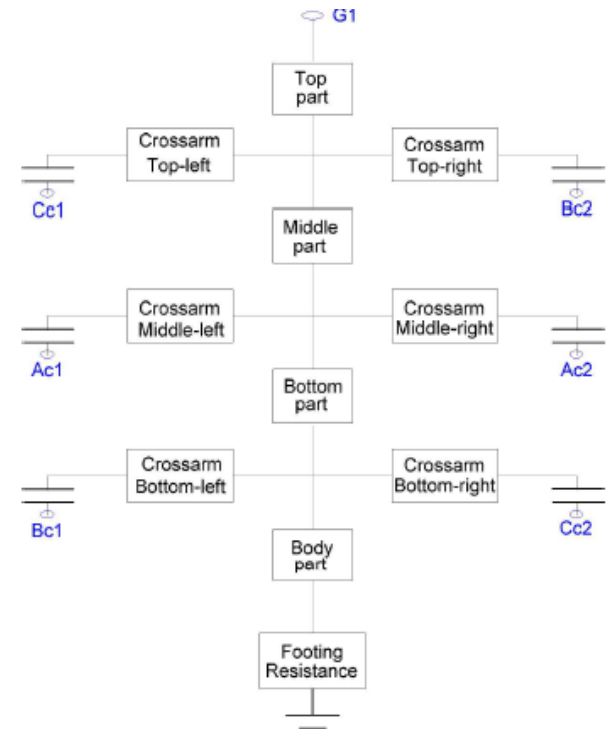
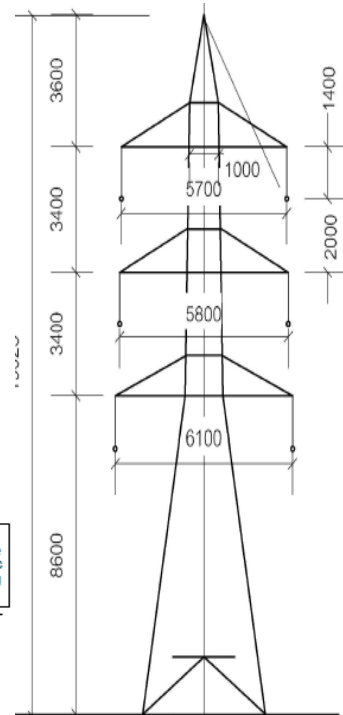
K_1 is $400 * L$,

K_2 is $710 * L$,

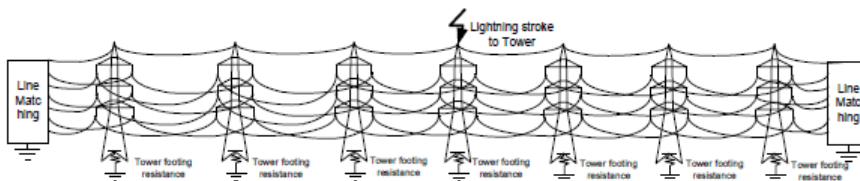
L is insulator length, (meter),

t is elapsed time after lightning stroke, μs .

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

Overvoltage caused by wavefront varying with 20 kA stroke current

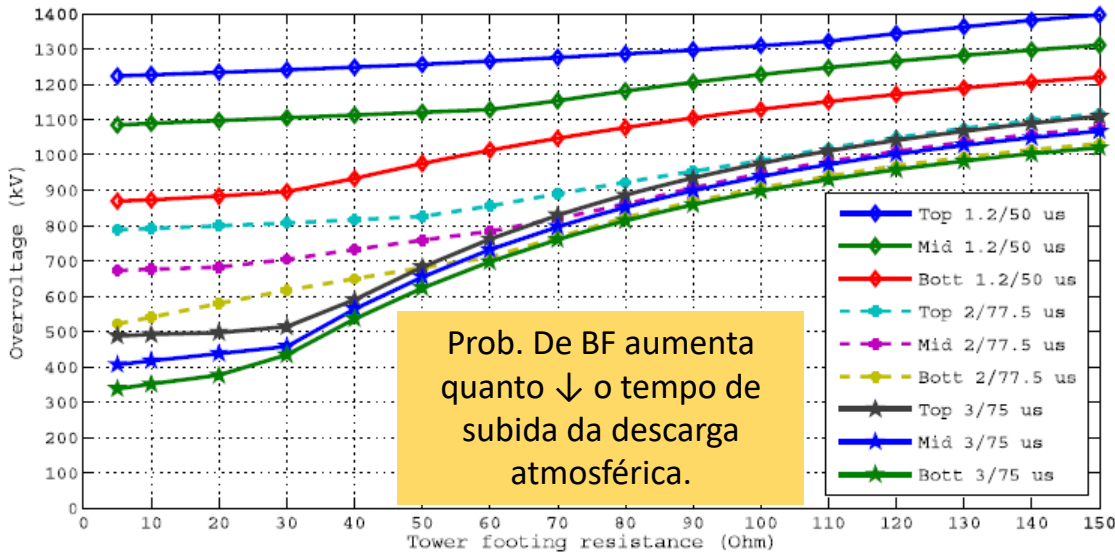
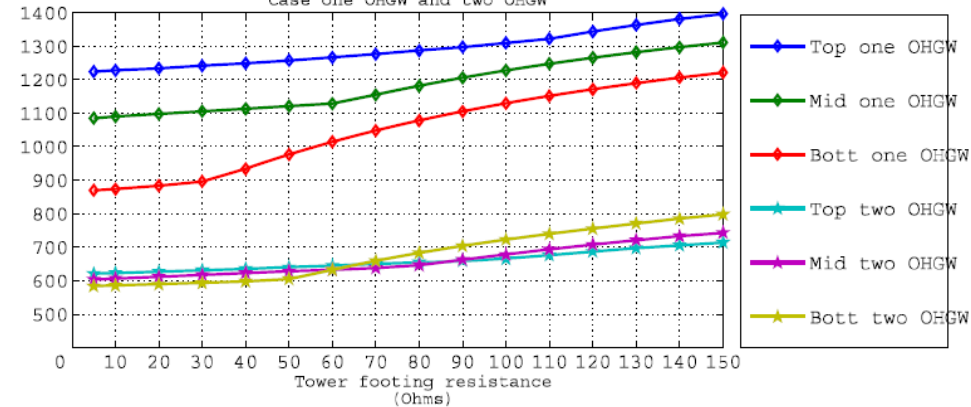


TABLE III : OVERVOLTAGE FLASHOVER AT INSULATOR WITH DIFFERENT MAGNITUDE OF STROKE.

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

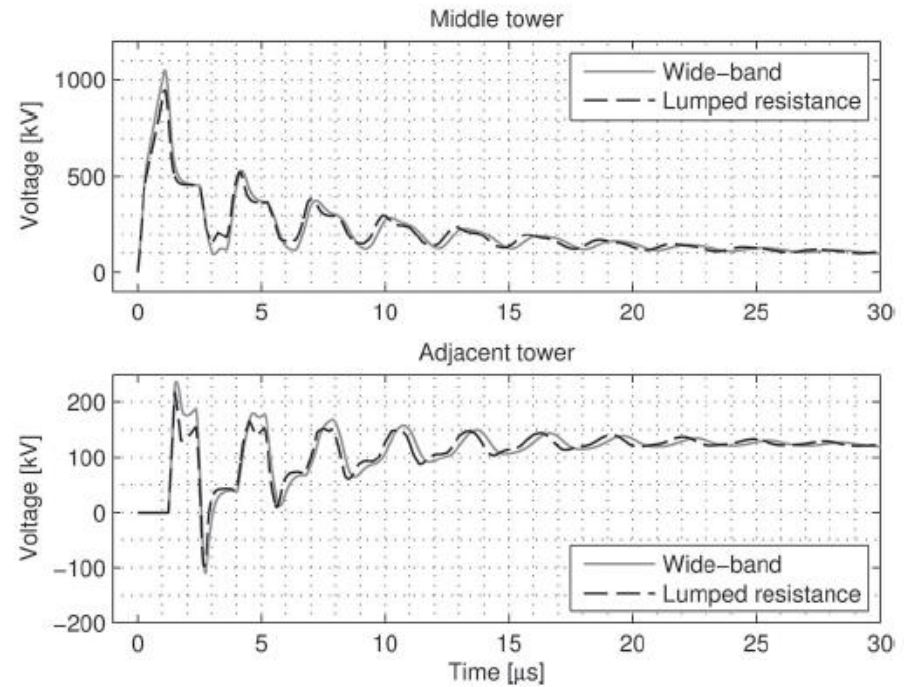
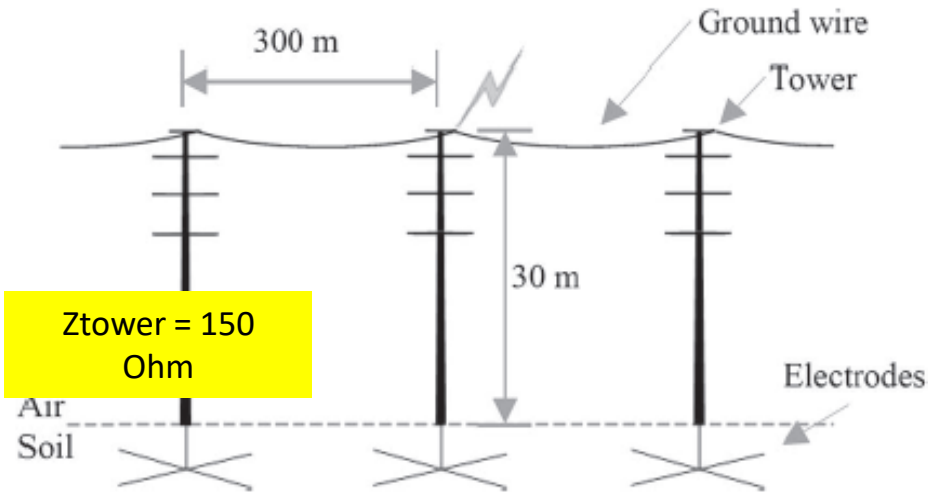
Ocorrência de BFs aumenta com ↑ Resistência de aterramento e amplitude da corrente injetada

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



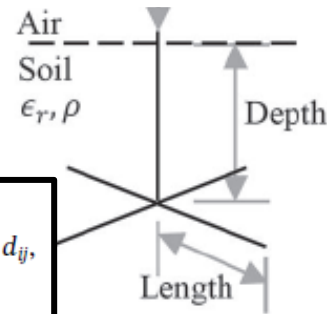
Inclusion of Field-Solver-Based Tower Footing Grounding Models in Electromagnetic Transient Programs

Andrzej Holdyk and Bjørn Gustavsen, *Fellow, IEEE*



$t_h = 600 \mu s$. Each tower is grounded assuming a counterpoise electrode with identical parameters: soil relative permittivity $\mu_r = 1$, soil resistivity $\rho = 700 \Omega \cdot m$, counterpoise length of 25 m, and depth of 1 m (see Fig. 3).

$$Y_{ij}(s) \approx Y_{ij,fit}(s) = \sum_{n=1}^{N_p} \frac{c_{n,ij}}{s - a_{n,ij}} + d_{ij},$$



Diferenças significativas entre as tensões (valores de pico);

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



$$Y_{ij}(s) \approx Y_{ij,fit}(s) = \sum_{n=1}^{Np} \frac{c_{n,ij}}{s - a_{n,ij}} + d_{ij},$$

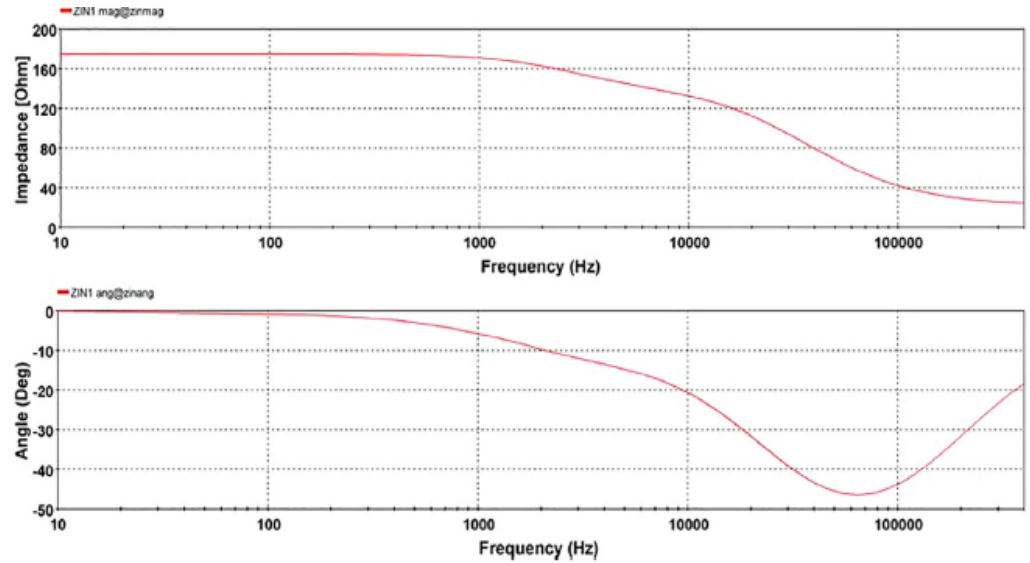
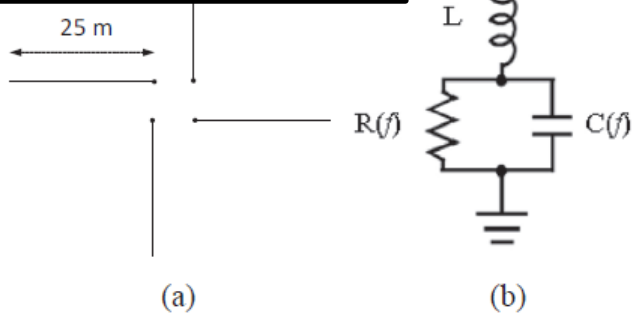


Fig. 4. 4 × L arrangement of the tower grounding system.

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

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

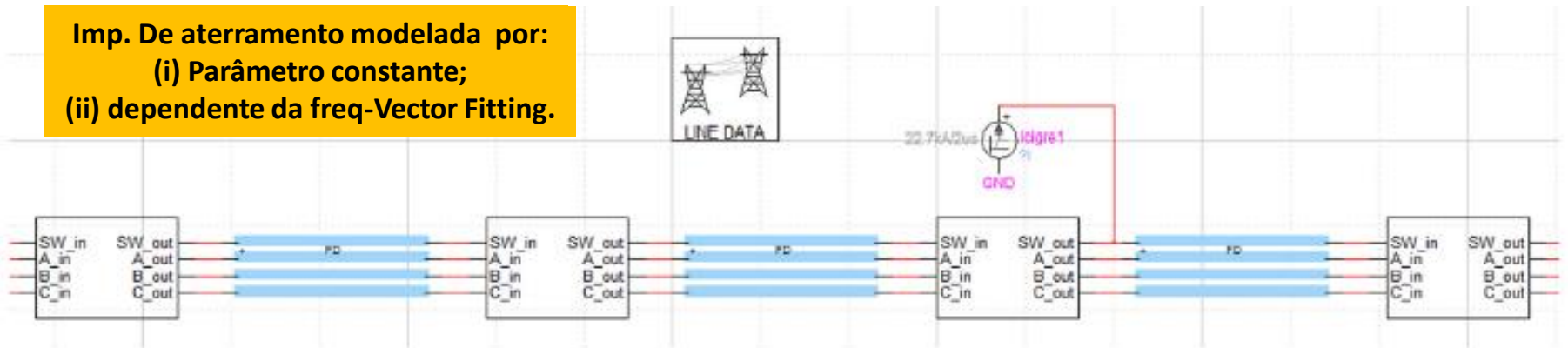
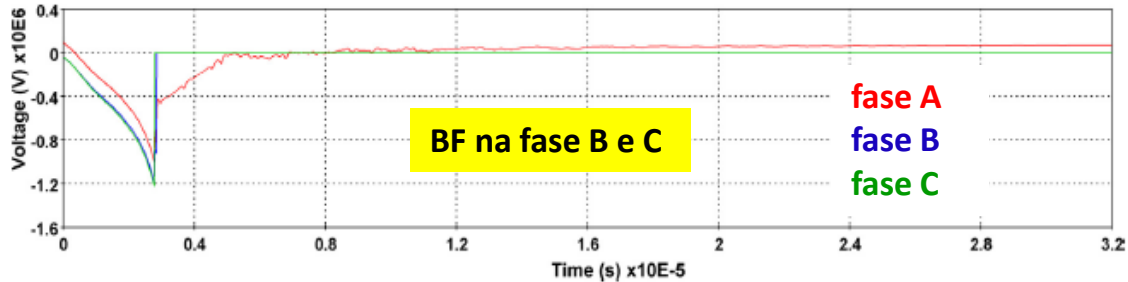
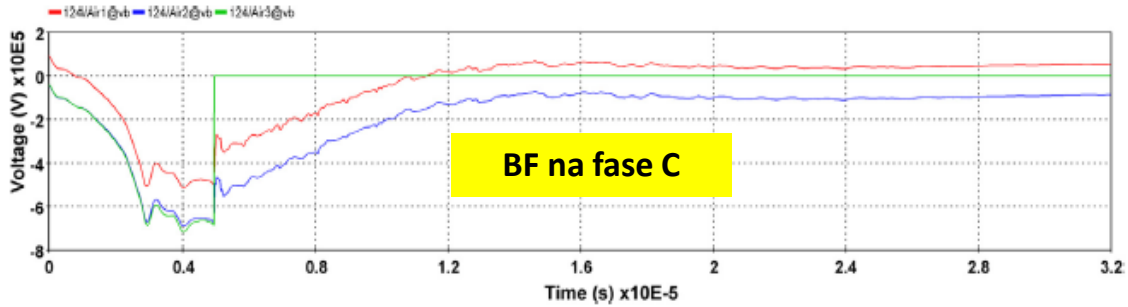


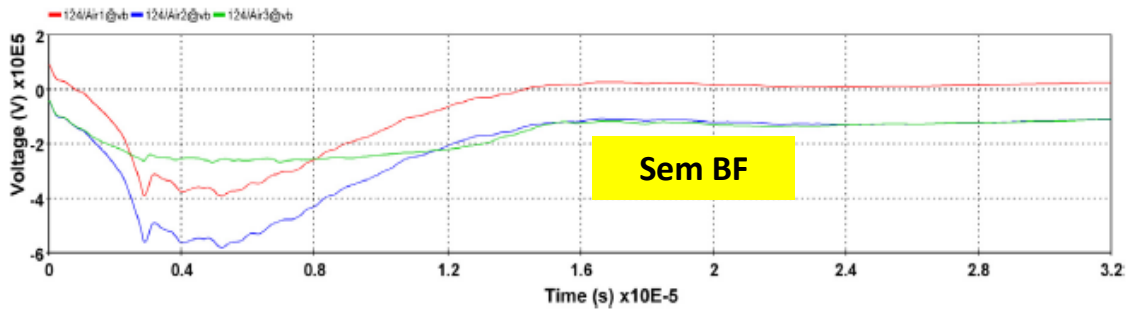
Fig. 9. A part of the EMTYP model (3 spans) of the lightning strike to the 110 kV overhead line.



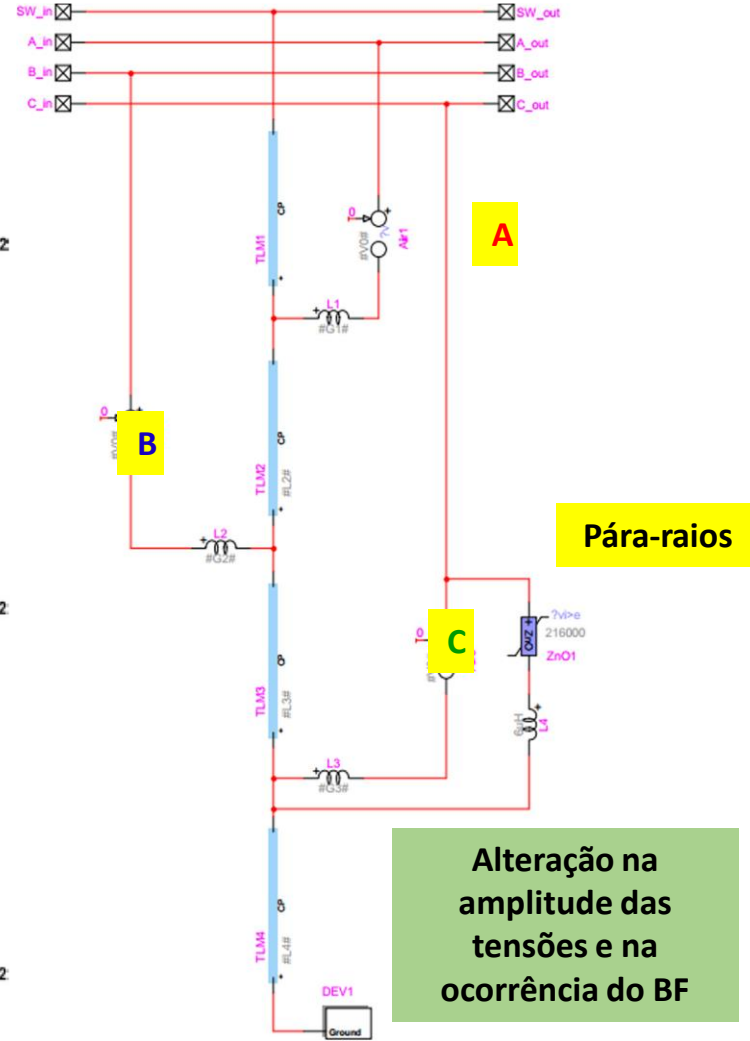
(i) with constant tower grounding resistance equal to 175 Ω



(ii) with frequency-dependent tower grounding impedance



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



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) 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.

- Exercício 01- entregar até 17/05/21
- Exercício 02-entregar até 01/06/21

Enviar para:

anderjusto@yahoo.com.br
ajusto@dsce.fee.unicamp.br