

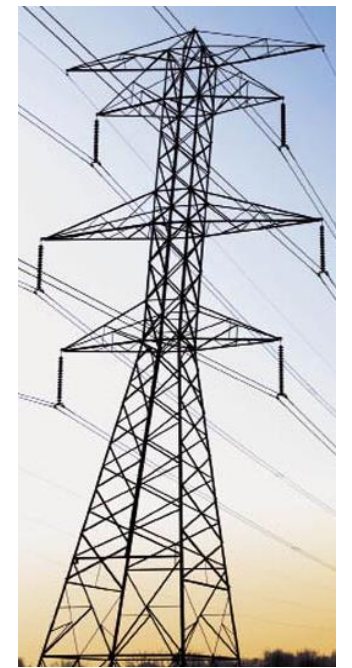
# IT308 - Tópicos em Técnicas de Alta Tensão II

## Modelagem de Torres de Transmissão no Sistema Elétrico Aula-05

**Anderson Ricardo Justo de Araújo**  
**Pós-doutorado-UNICAMP**

# Aula 05

- Flashover e Backflashover
- Modelos clássicos de torres de transmissão
- Modelagem de torres convencionais e torres elevadas
- Aterramento de torres de transmissão
- Sobretensões provocadas por DAs



# Introdução

- ❖ 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.

# Introdução

- ❖ Diversos modelos de torres para o cálculo das tensões provocadas por descargas atmosféricas foram desenvolvidos. 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).



# 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 visando o menor impacto visual e ambiental.

São construídas na forma de treliças com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço, concreto ou madeira.



# Torres Convencionais



Autoportante  
circuito duplo  
400 kV/45 m



Estaiada  
440 kV/46 m



Autoportante  
circuito simples  
138 kV/25 m

# Torres de transmissão elevadas



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



China-Yangtze  
River  
500 kV/345 m

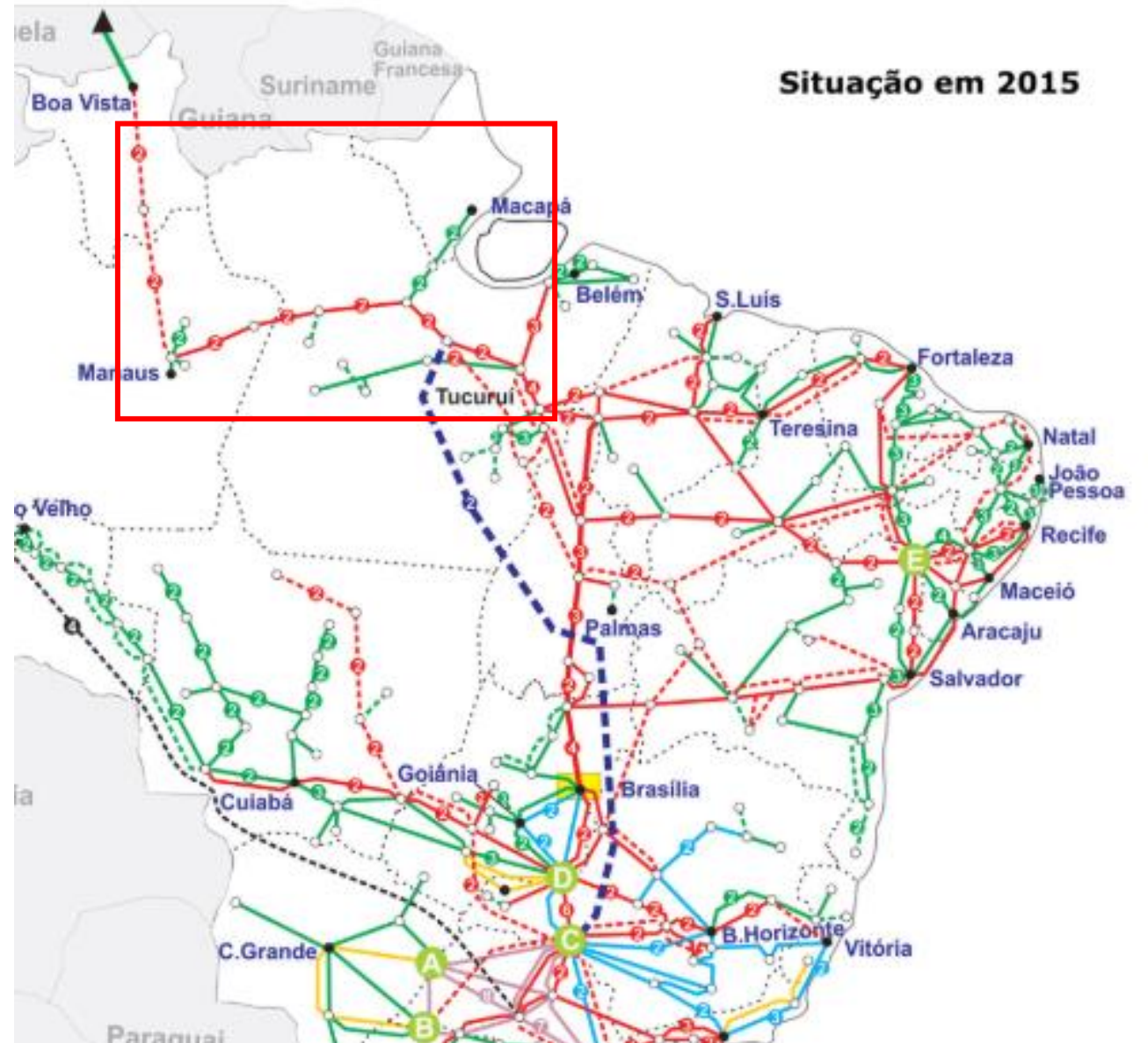


Germany-Rio Elba  
Elbekreuzung-2  
380 kV/227m



# Torre gigante da Tucuruí-Manaus-Macapá

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



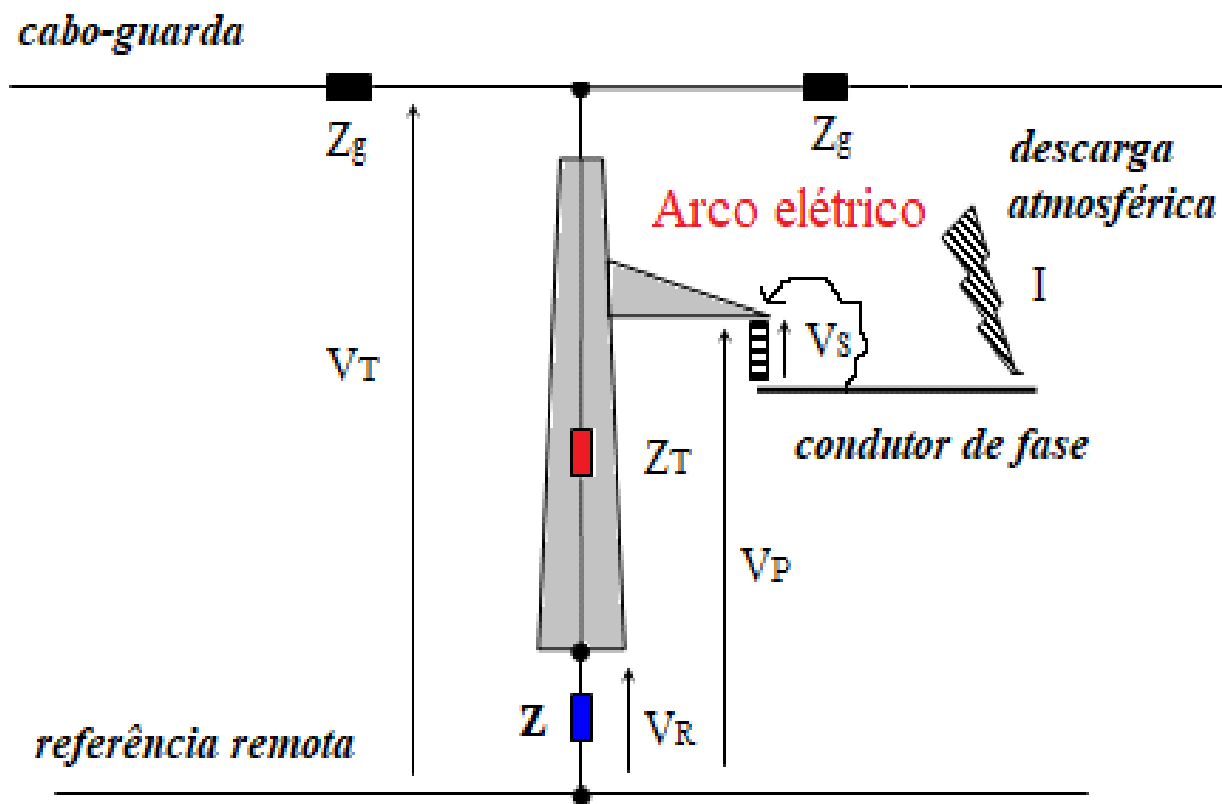
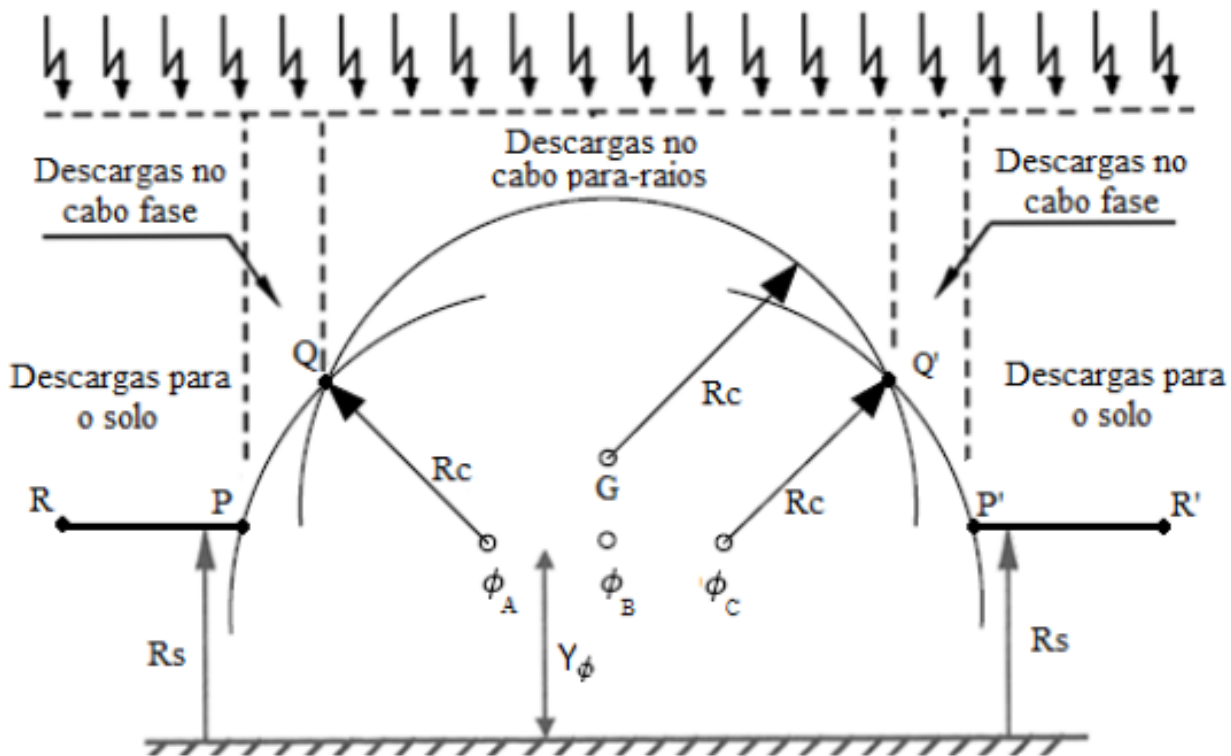


# Torres gigantes do sistema Tucuruí-Manaus-Macapá



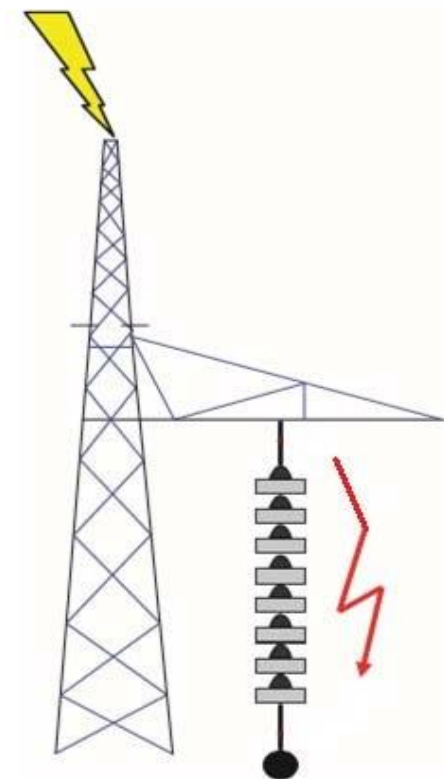
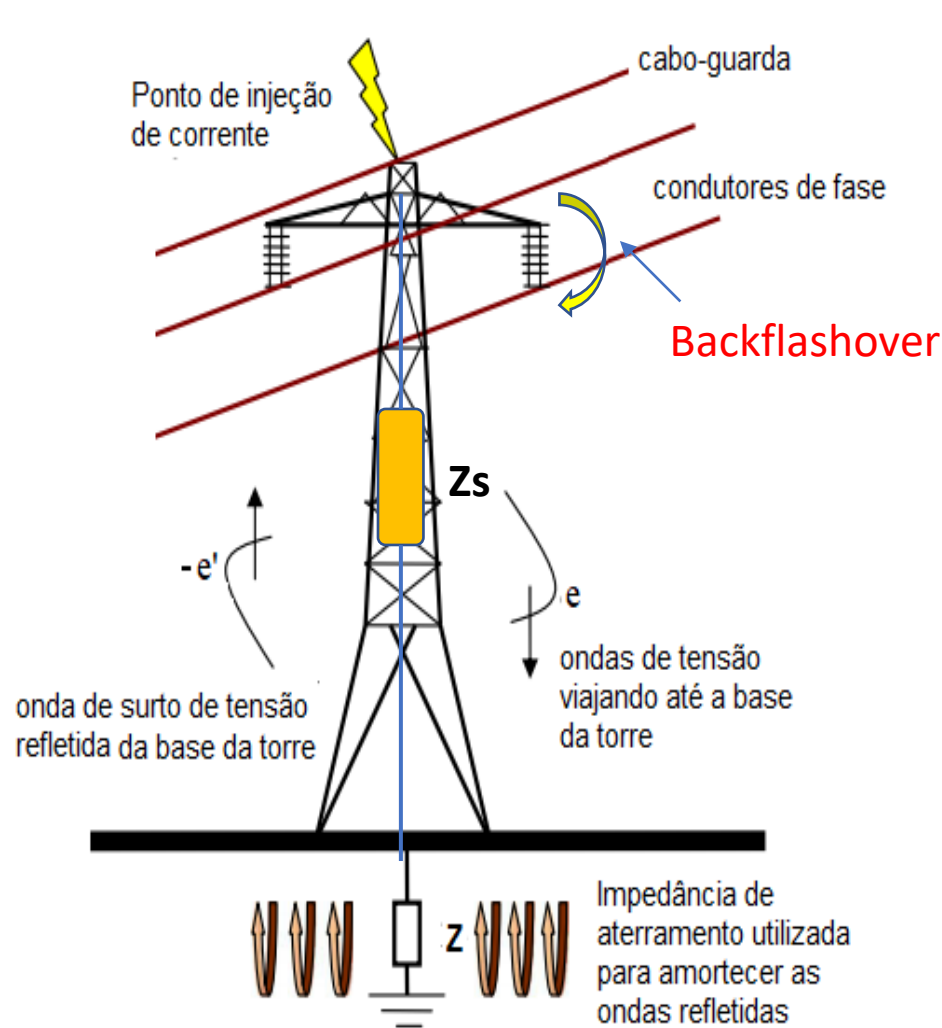
# Flashover

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.

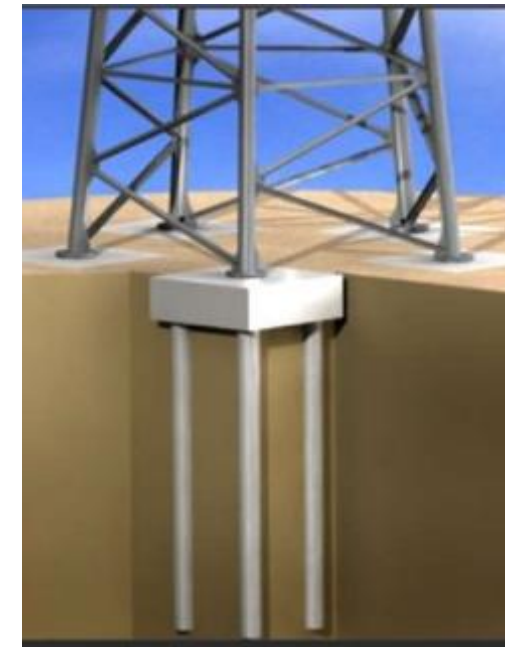
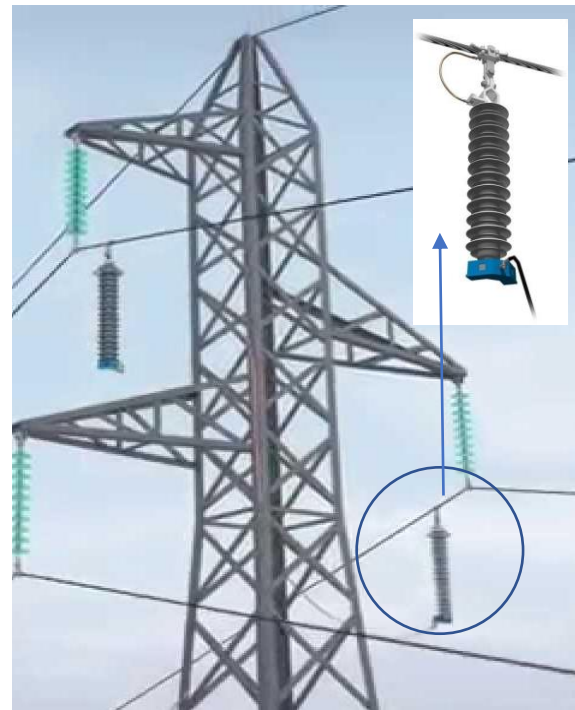




BFs afetam na qualidade da energia elétrica e provocam interrupções no fornecimento de energia. Além de perdas no faturamento e penalizações para as concessionárias.

**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).



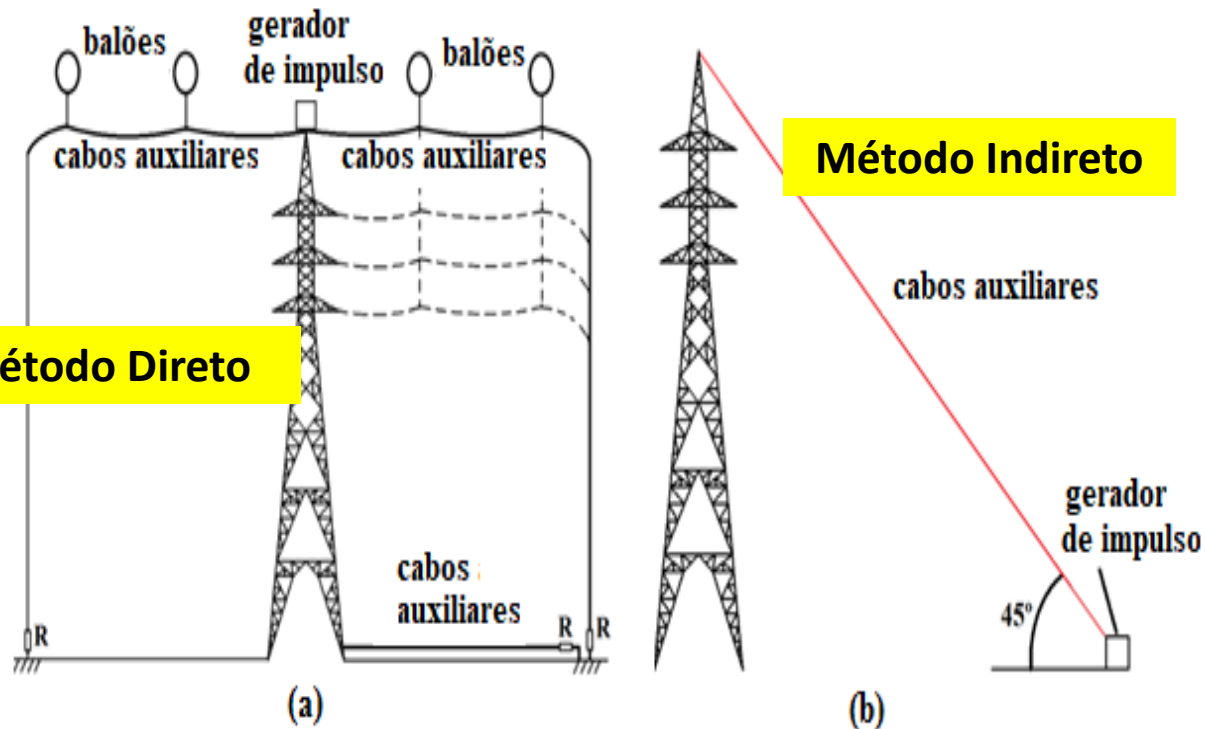
# BFs e surge arresters (pára-raio de linhas)



# 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)



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

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

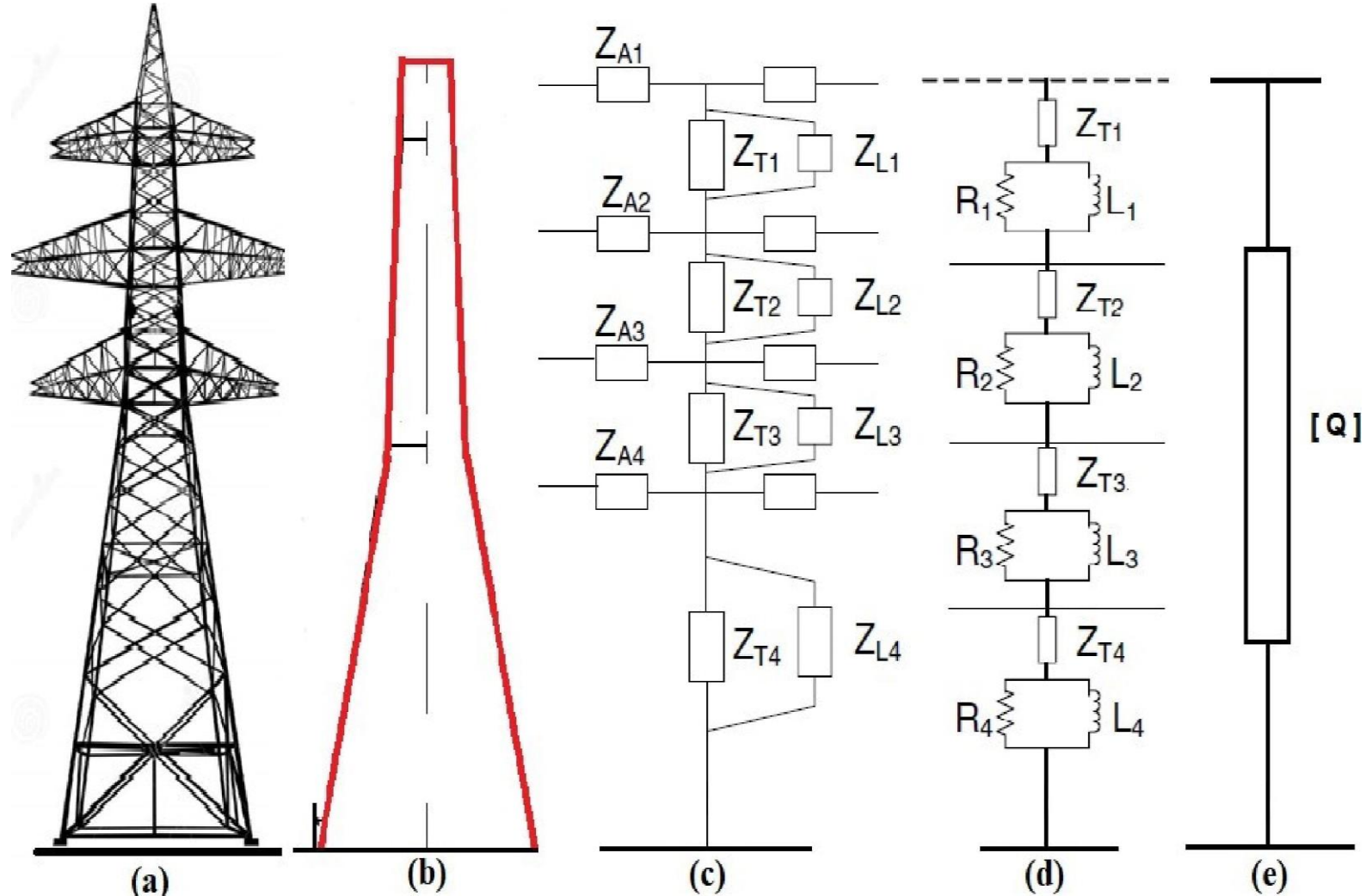


# Modelagem de torres de transmissão

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

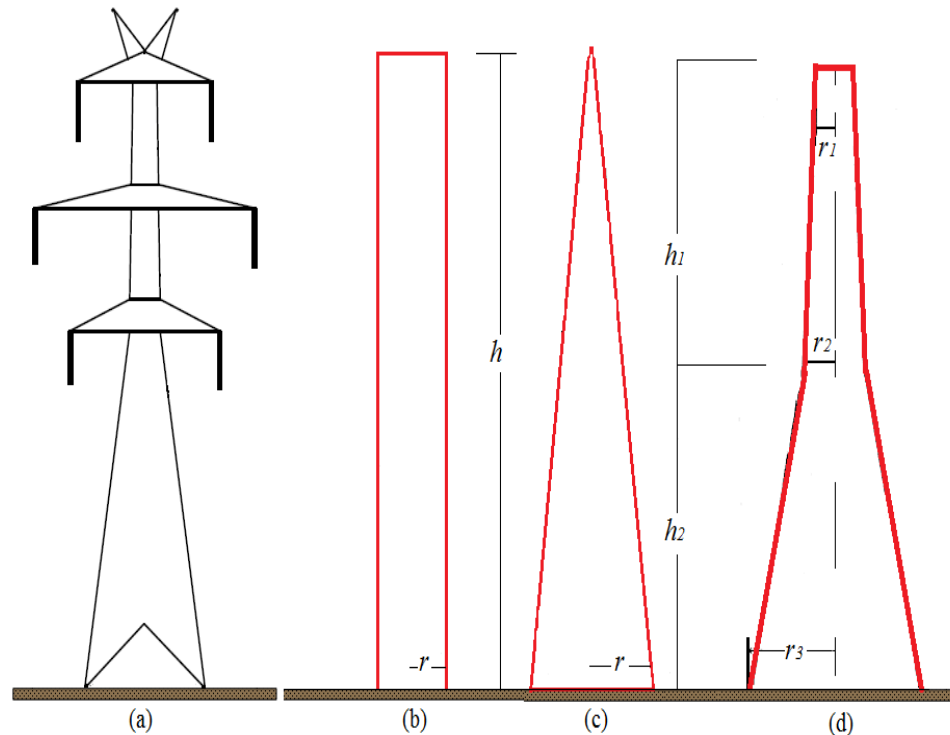
Esses são classificados em:

- (a) Modelos aproximados por geometria simples;
- (b) Modelos compostos por multicondutores;
- (c) Modelos de torre "multi-andaes";
- (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            | $Z_T = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right)$                                       |

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

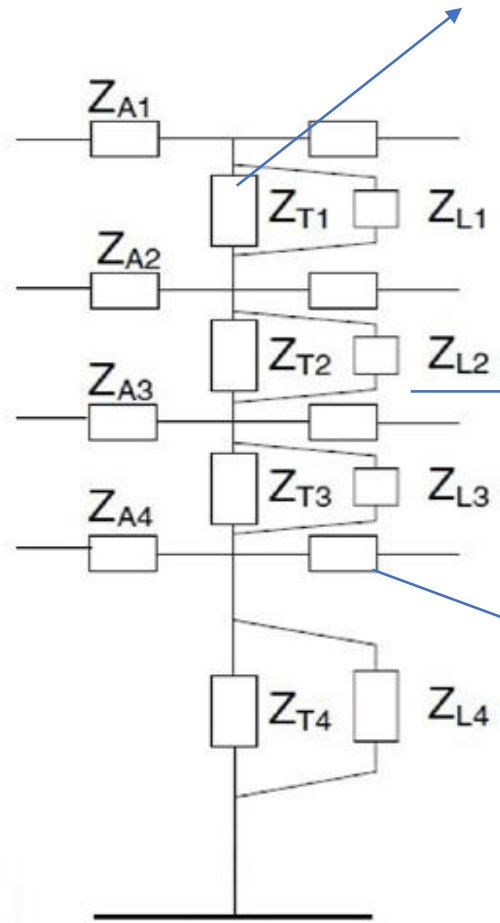
# Modelos multicondutores

- ❖ 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.



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

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



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

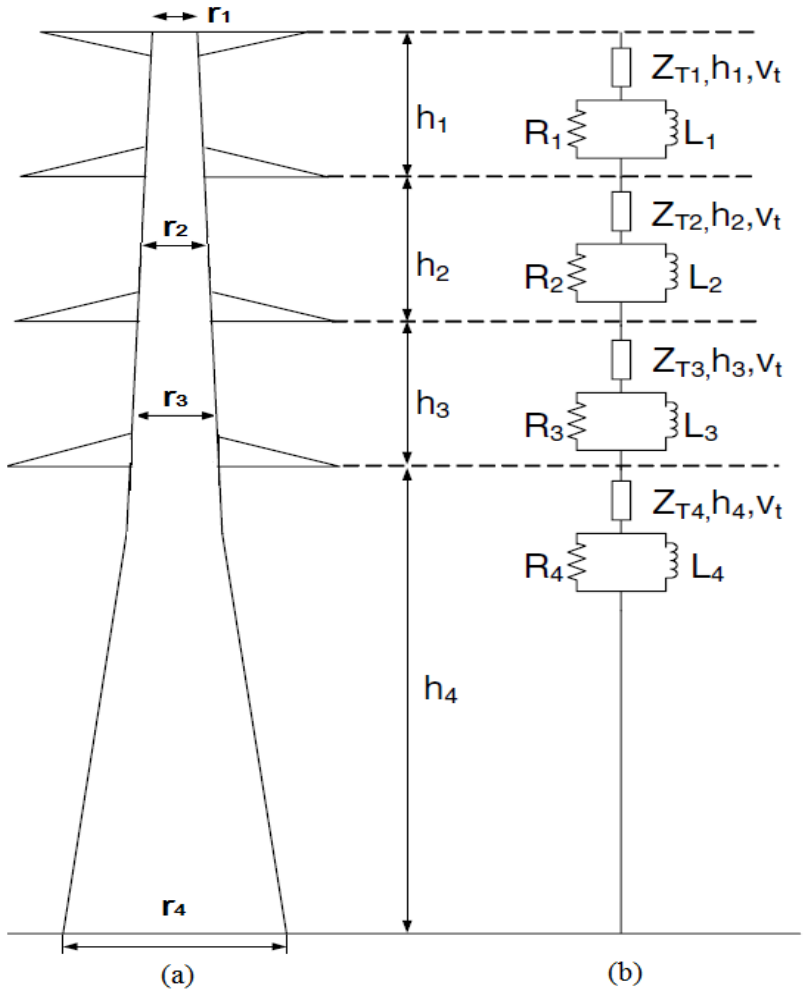
$$Z_{Lk} = 9Z_{Tk}$$

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



# Modelos “Multi-andares”

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



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

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

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

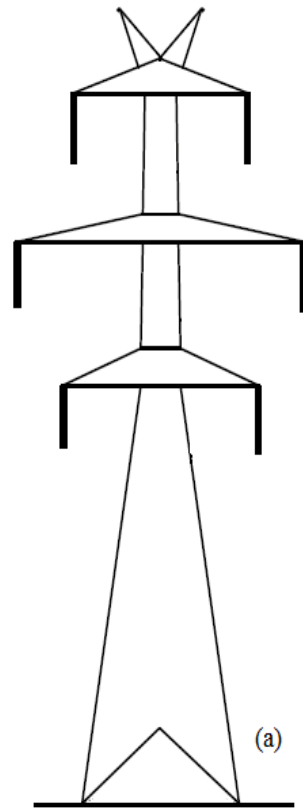
$$L_i = R_i \frac{h}{v_T} k_i$$

# Modelos de torres dependentes da frequência

❖ Representam a torre de transmissão por linha de transmissão no domínio da frequência.

❖ A torre de transmissão é representada por uma linha uniforme, como uma impedância de surto dependente da frequência.

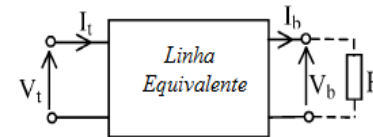
❖ A torre é representada por um *quadripolo* e as correntes e tensões são descritas pelas equações hiperbólicas da linha no domínio da frequência.



(a)



(b)



(c)

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

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

# Modelagem de torres no ATP

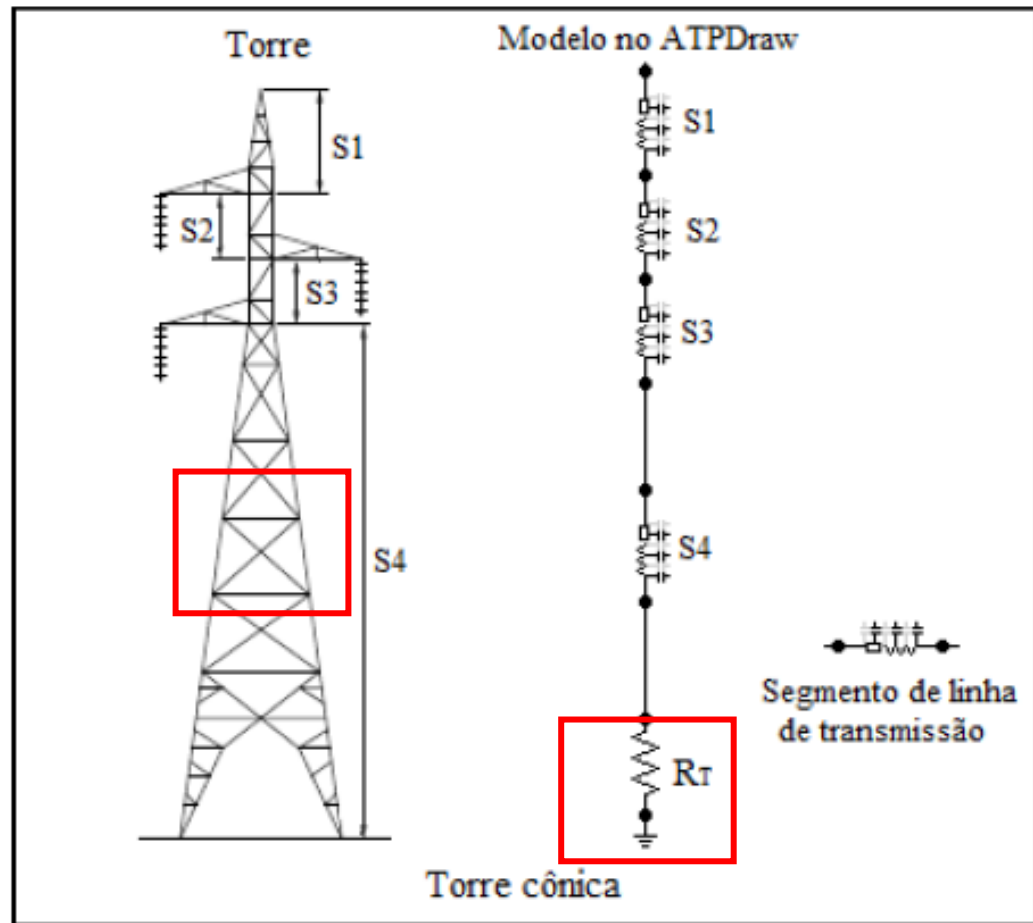
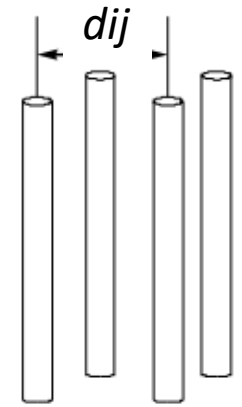


Figura 3-17: Modelagem da torre cônica no ATPDraw.

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

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

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



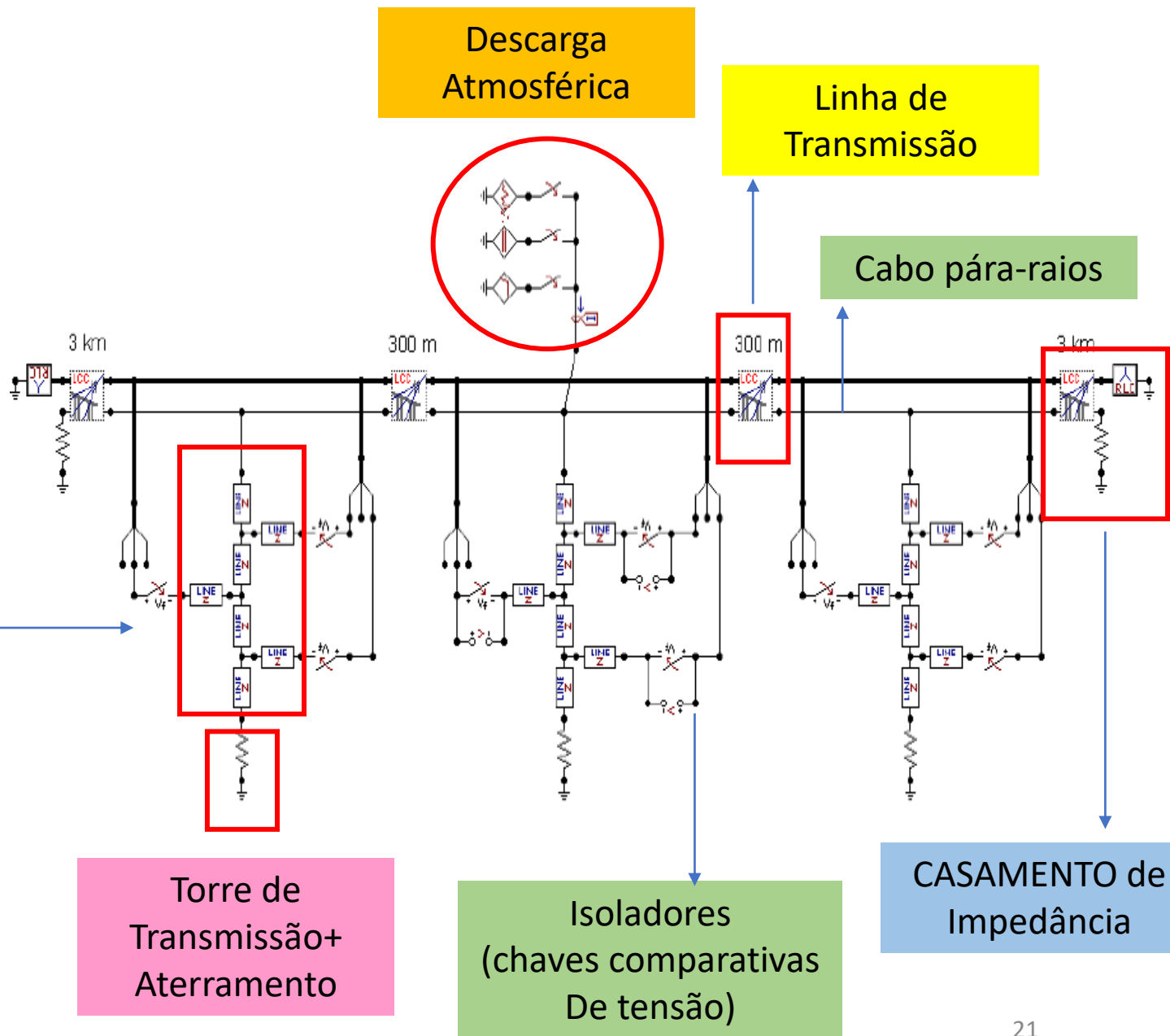
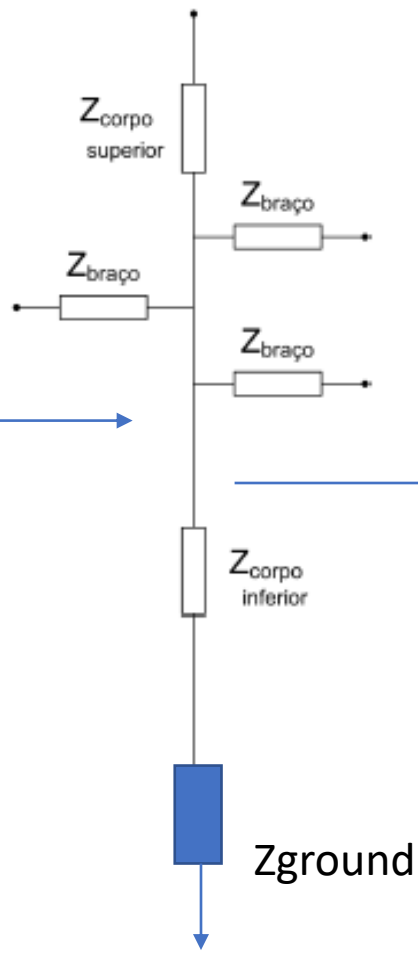
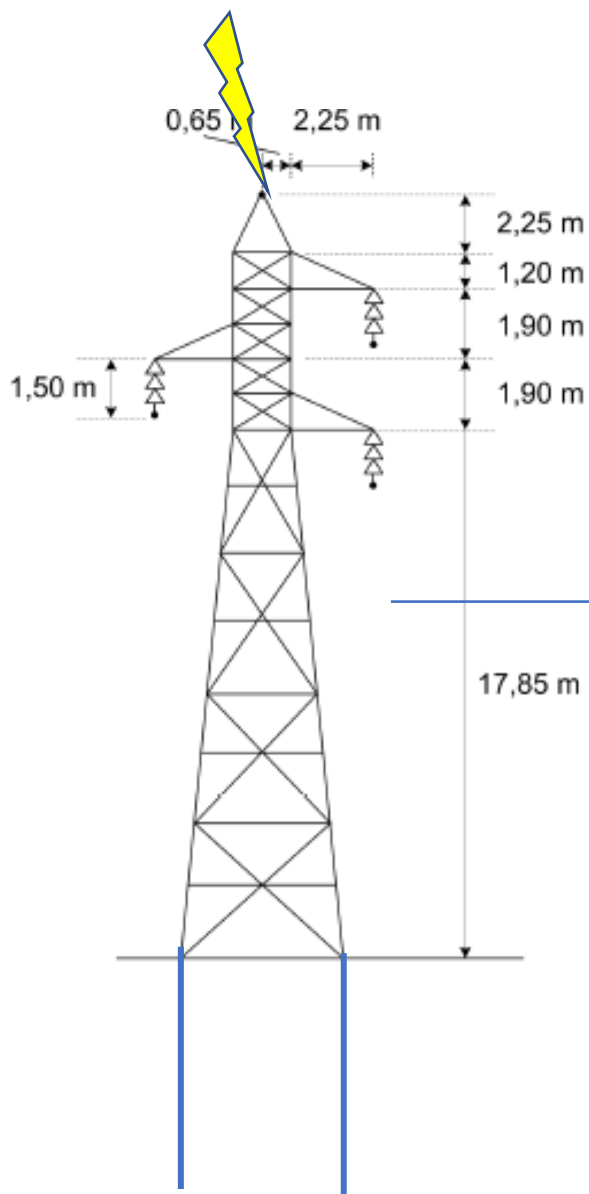
Nas Equações (3-26) a (3-28),  $n$  é o número de condutores paralelos,  $h$  é a distância do ponto mais alto de cada segmento ao solo,  $d_{ij}$  é a distância entre os condutores verticais  $i$  e  $j$  de cada segmento e  $r$  o raio dos condutores cilíndricos. Nos segmentos das torres em que os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

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

Aluno: Arlison Júnior de Oliveira



# Modelagem de torres no ATP



## Modelagem de torres convencionais



Autoportante  
circuito duplo  
400 kV/45 m



Estaiada  
440 kV/46 m

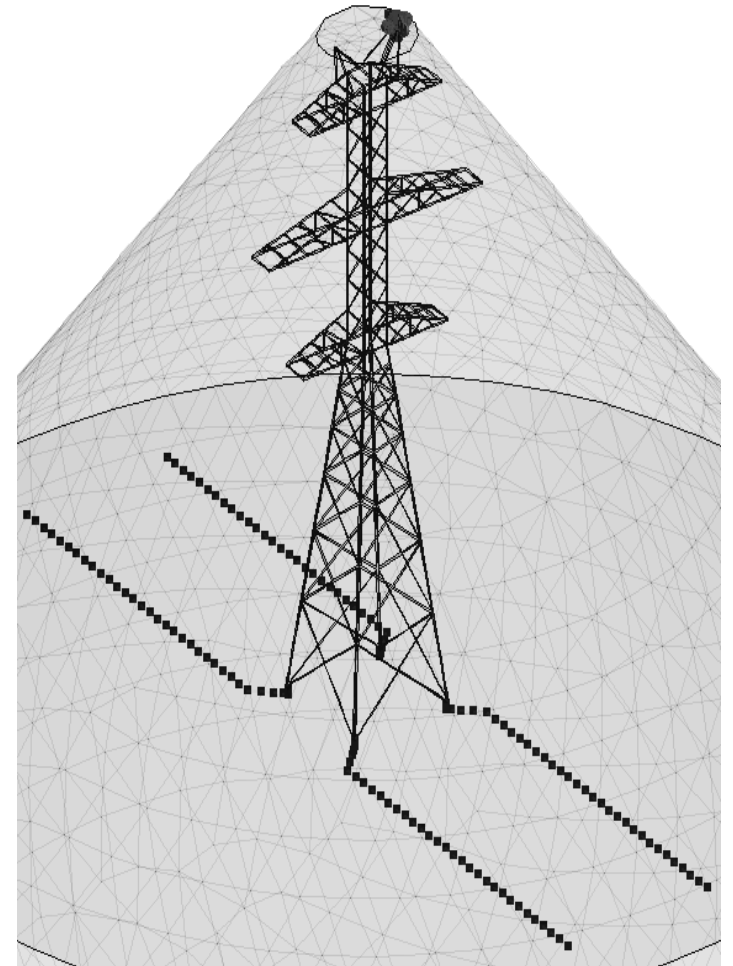


Autoportante  
circuito simples  
138 kV/25 m

# Representação de torres de transmissão no domínio do tempo

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

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

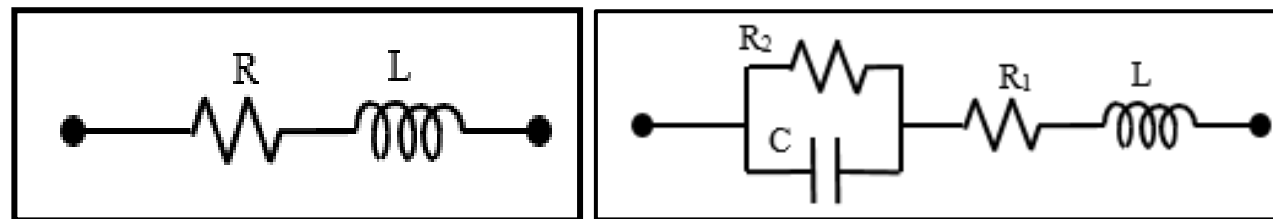


# Vector Fitting

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

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

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



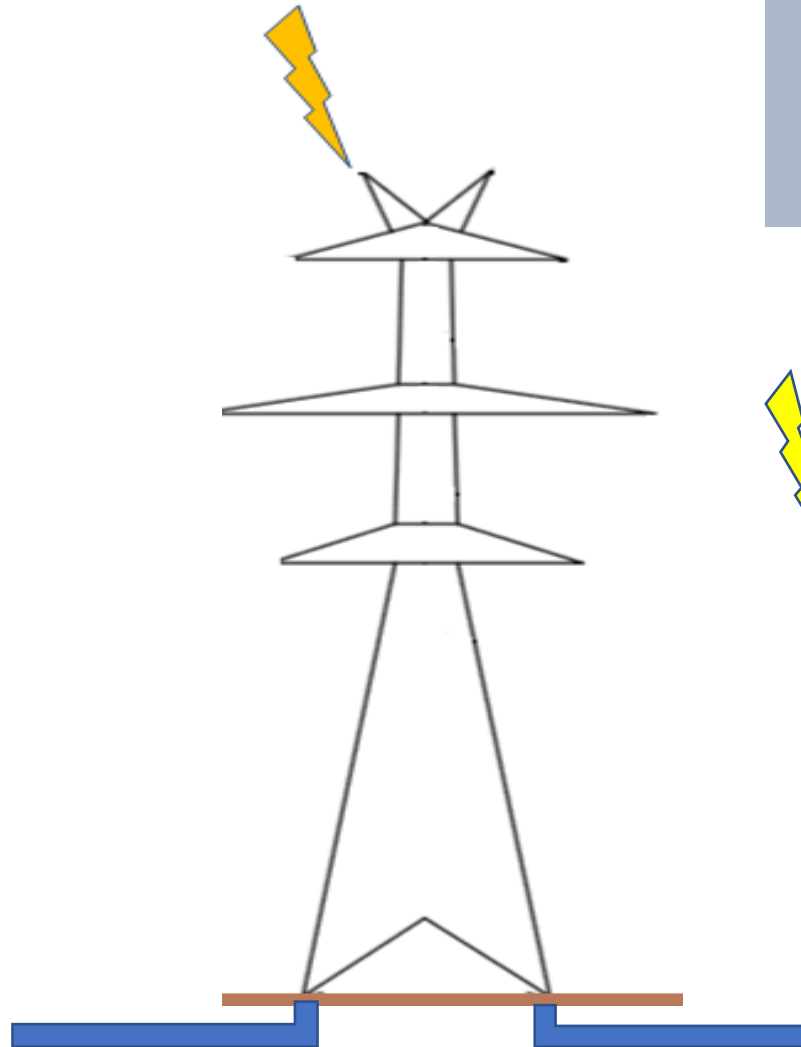
$$Y_{RL}(s) = \frac{1}{L} \frac{1}{\left( s + \frac{R}{L} \right)}$$

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

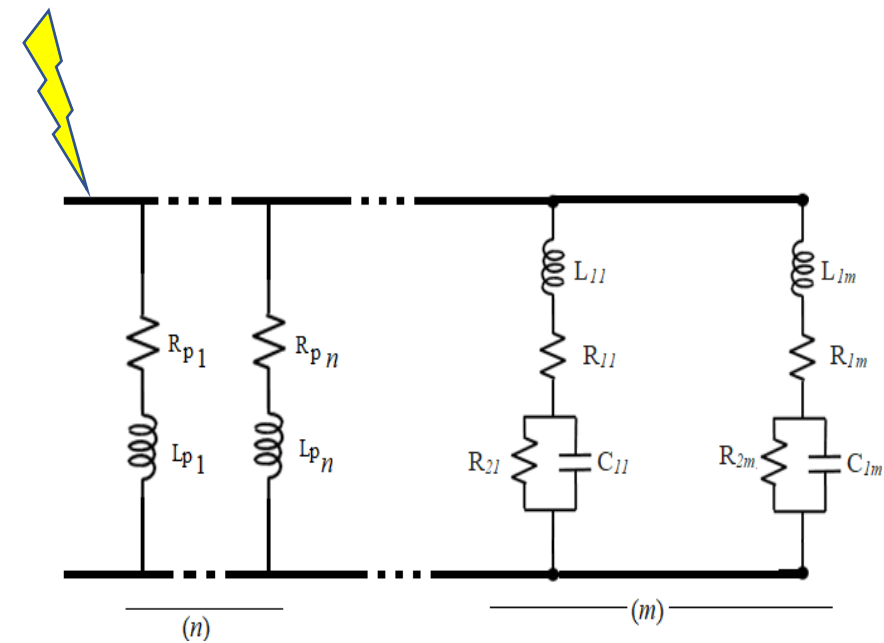


# Circuito representativo no domínio do tempo

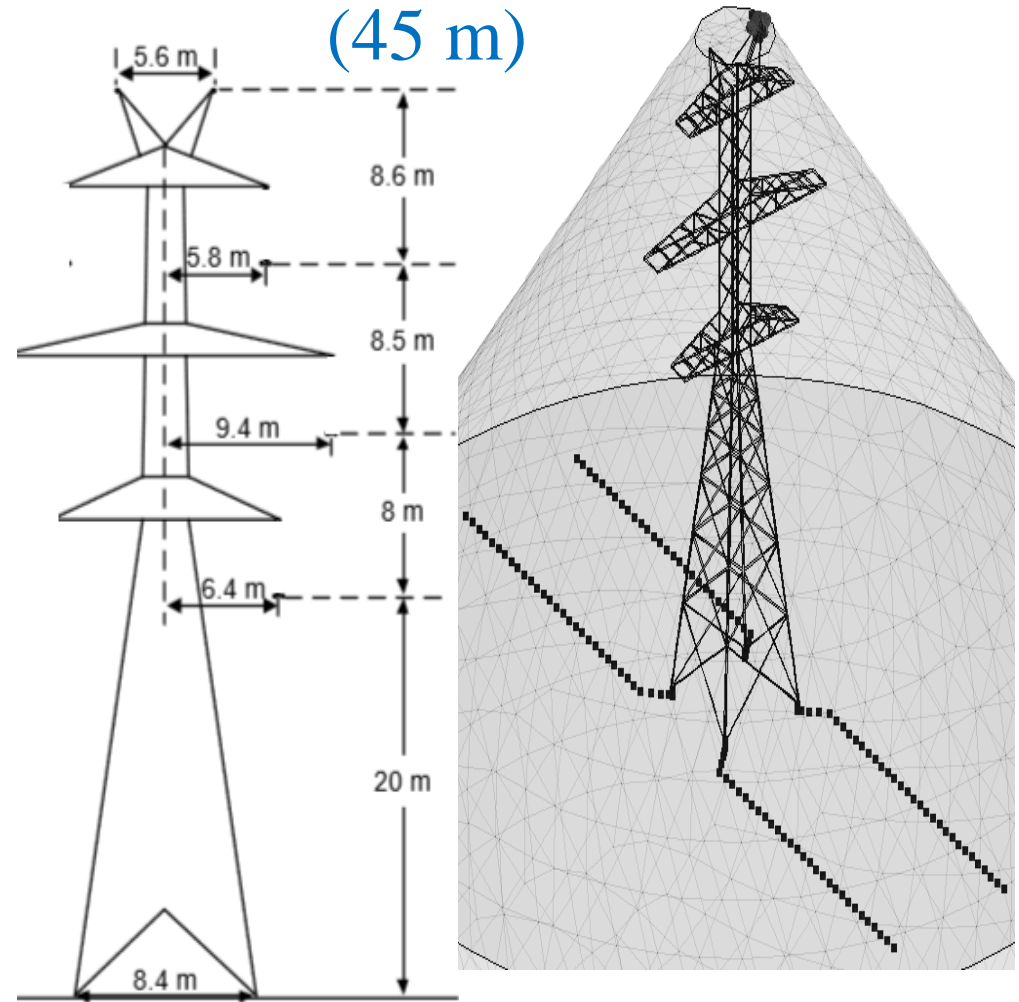
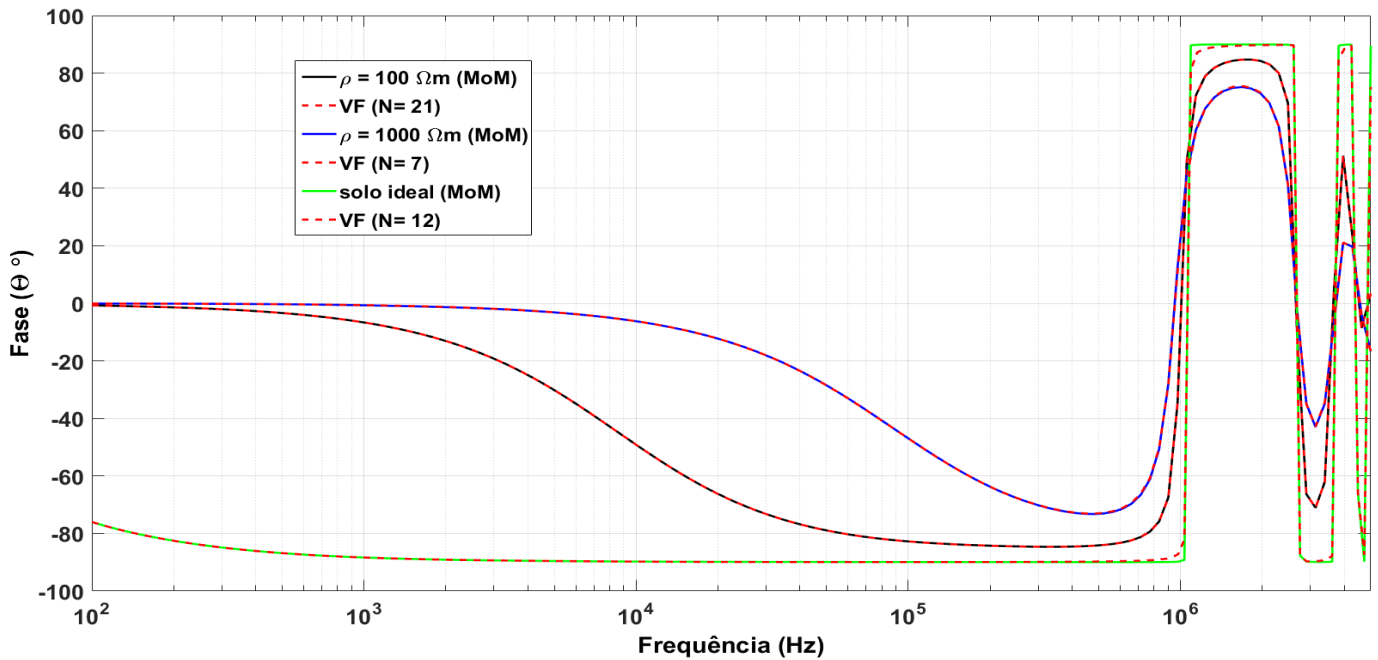
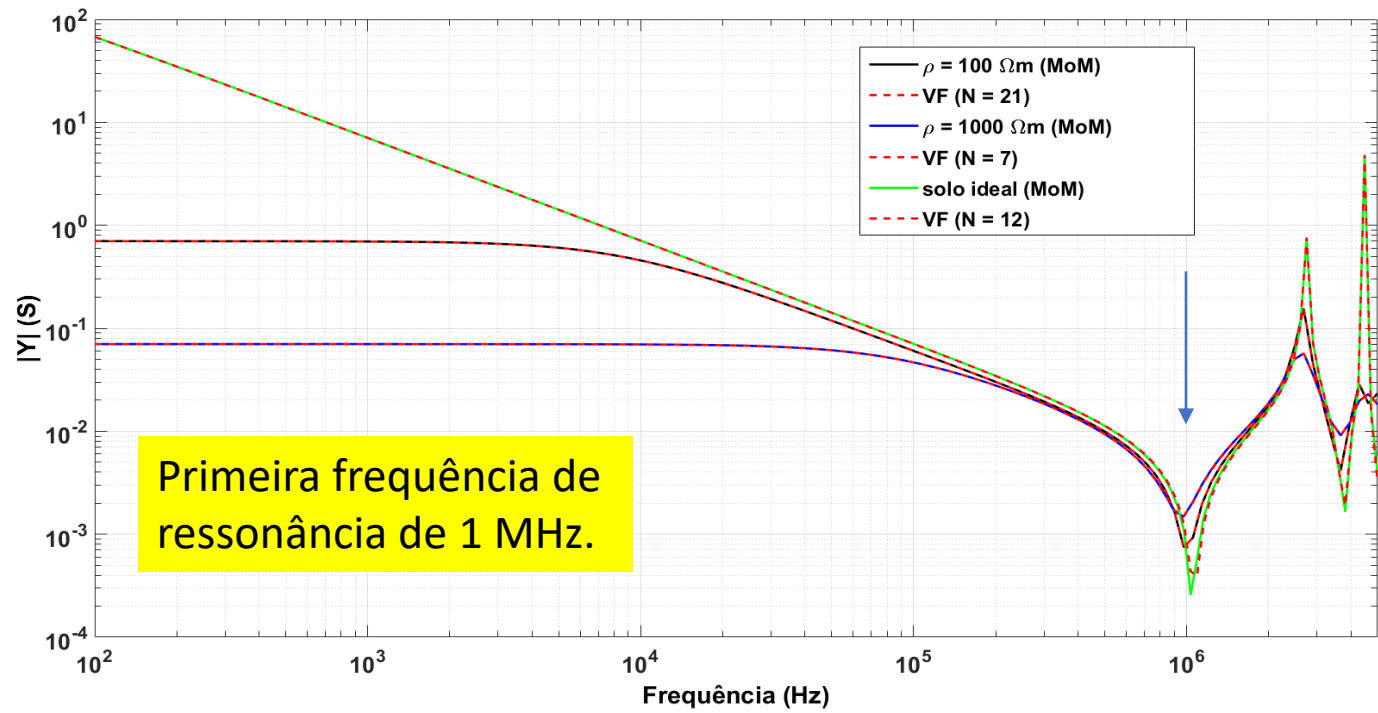
- O circuito representativo de uma torre de transmissão, convencional ou gigante, é composto por  $n$  circuitos RL série e  $m$  circuitos RL(R||C) para representar a admitância da torre para uma dada resistividade e geometria
- A partir dessas simulações, uma análise sobre a influência de diversos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



Considera a torre metálica mais o aterramento



# Modelagem da torre 400 kV (45 m)



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

Resíduos e polos do VF para torre T<sub>2</sub> e solo ideal.

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

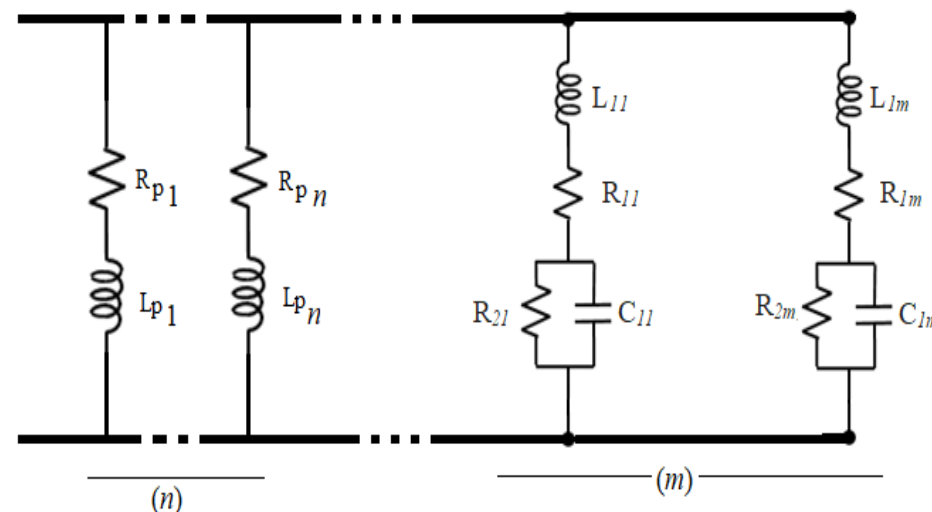
Parâmetros dos circuitos RL (polos reais) considerando solo ideal.

|       | R <sub>p</sub> (Ω) | L <sub>p</sub> (H) |
|-------|--------------------|--------------------|
| n = 1 | 120.0239           | 0.00503345         |
| n = 2 | 14.0650            | 0.00706683         |
| n = 3 | 0.8632             | 0.00086959         |
| n = 4 | 0.0035             | 0.00002320         |

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

|       | R <sub>x1</sub> (Ω) | L <sub>x1</sub> (H) | R <sub>x2</sub> (Ω) | C <sub>x</sub> (nF) |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| m = 1 | 0.1175              | 0.0279e-4           | 0.1400e5            | 0.2456              |
| m = 2 | 2.2022              | 0.1360e-4           | -0.6926e5           | 0.0927              |
| m = 3 | 0.0743              | 0.0618 e-4          | -4.8823e5           | 0.5488              |

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



Resíduos e polos do VF para torre  $T_2$  e solo  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$

| Resíduos ( $c_i$ )   | Polos ( $a_i$ )       |
|----------------------|-----------------------|
| 3.9562e4             | -5.6776e5             |
| 7.8671e4 ± 9.5456e3i | -1.4030e6 ± 1.6535e7i |
| 4.1623e4 ± 2.0804e4i | -2.8563e6 ± 2.7832e7i |
| 1.0434e6 ± 9.1619e5i | -5.4399e7 ± 5.5483e7i |

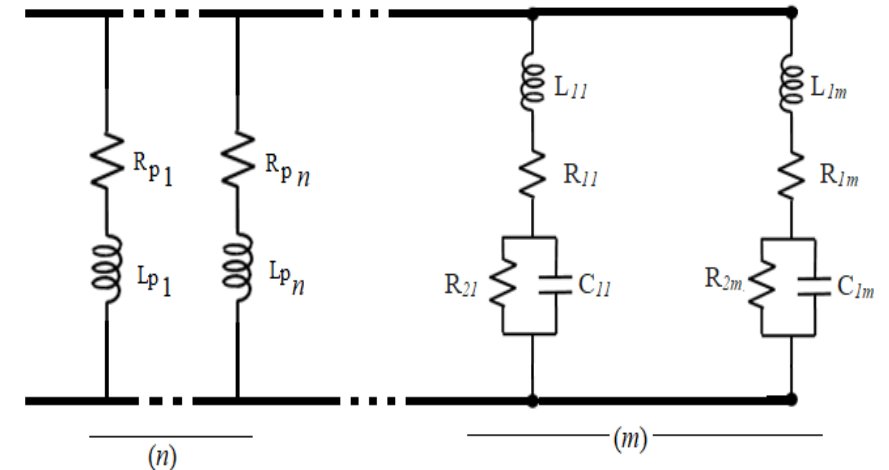
Parâmetros dos circuitos RL (polos reais) considerando  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$

|         | $R_p (\Omega)$ | $L_p (\text{H})$ |
|---------|----------------|------------------|
| $n = 1$ | 14.3512        | 25.2769e-6       |

Parâmetros para os circuitos RL(R||C) (polos complexos) considerando  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ .

|         | $R_{X1} (\Omega)$ | $L_{X1} (\text{H})$ | $R_{X2} (\Omega)$ | $C_X (\text{F})$ |
|---------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| $m = 1$ | 21.6678           | 6.3556e-6           | -2.9228e3         | 567.1516e-12     |
| $m = 2$ | 201.4171          | 12.0127e-6          | -1.0520e3         | 85.9871e-12      |
| $m = 3$ | 49.4158           | 479.2096e-9         | 460.0103          | 382.7507e-12     |

O circuito representativo é composto por  $n = 1$  circuitos RL e  $m = 3$  circuitos RL(R//C)

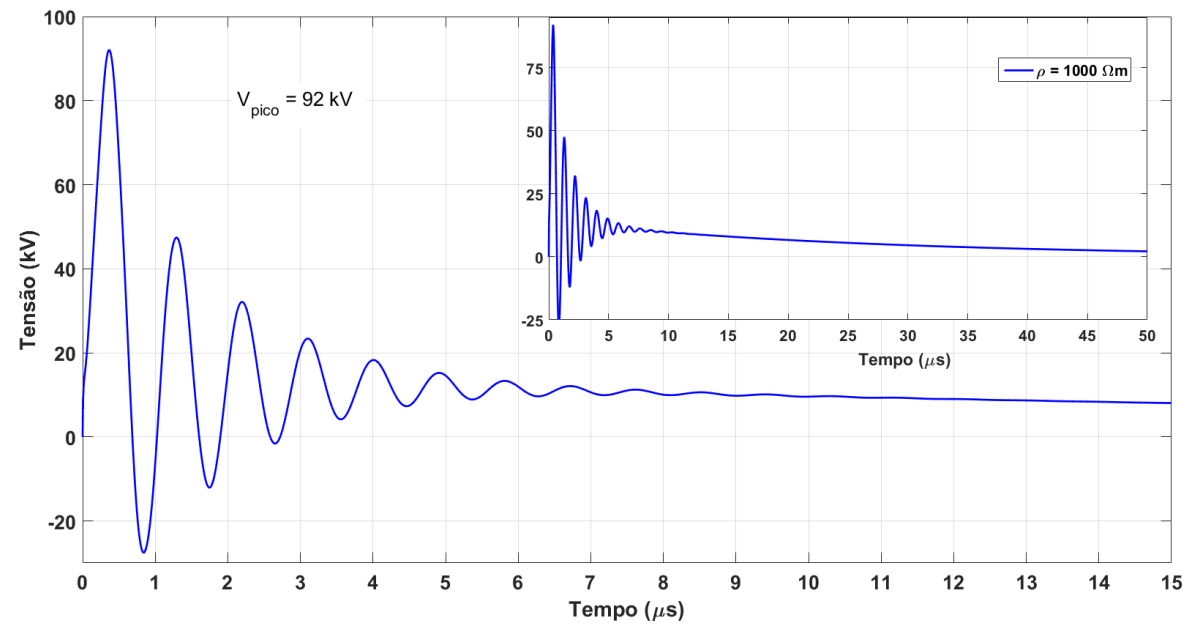
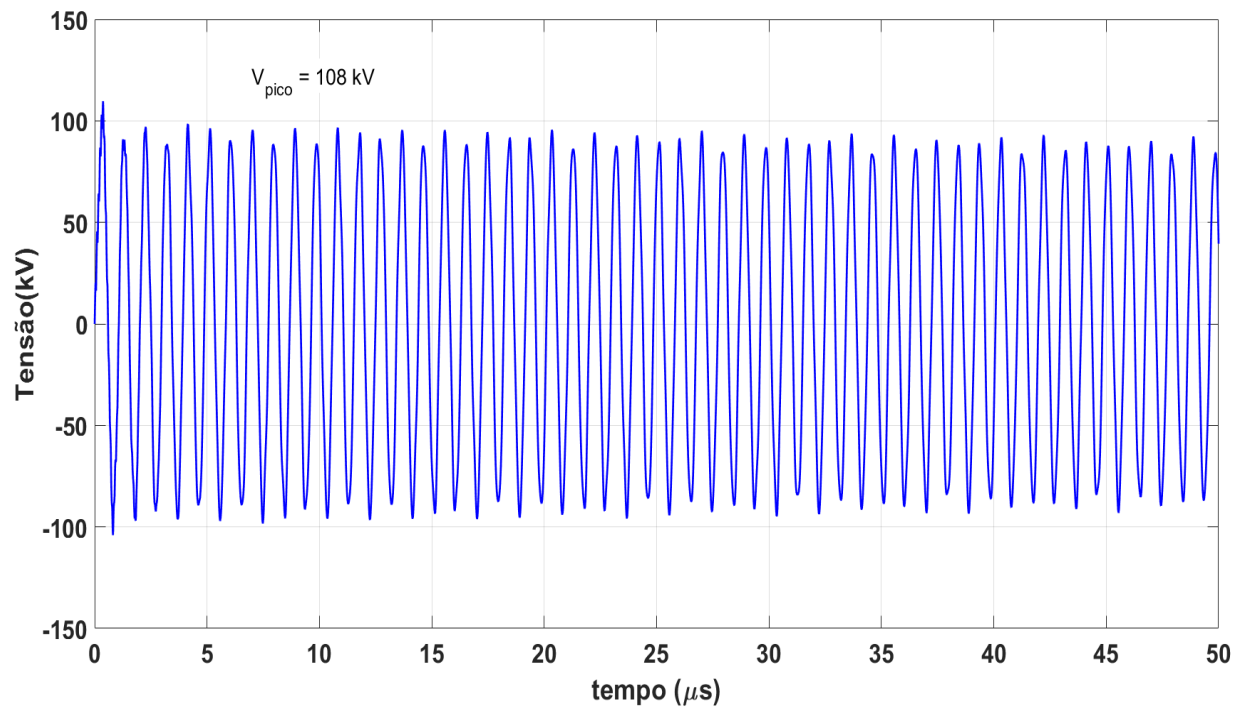
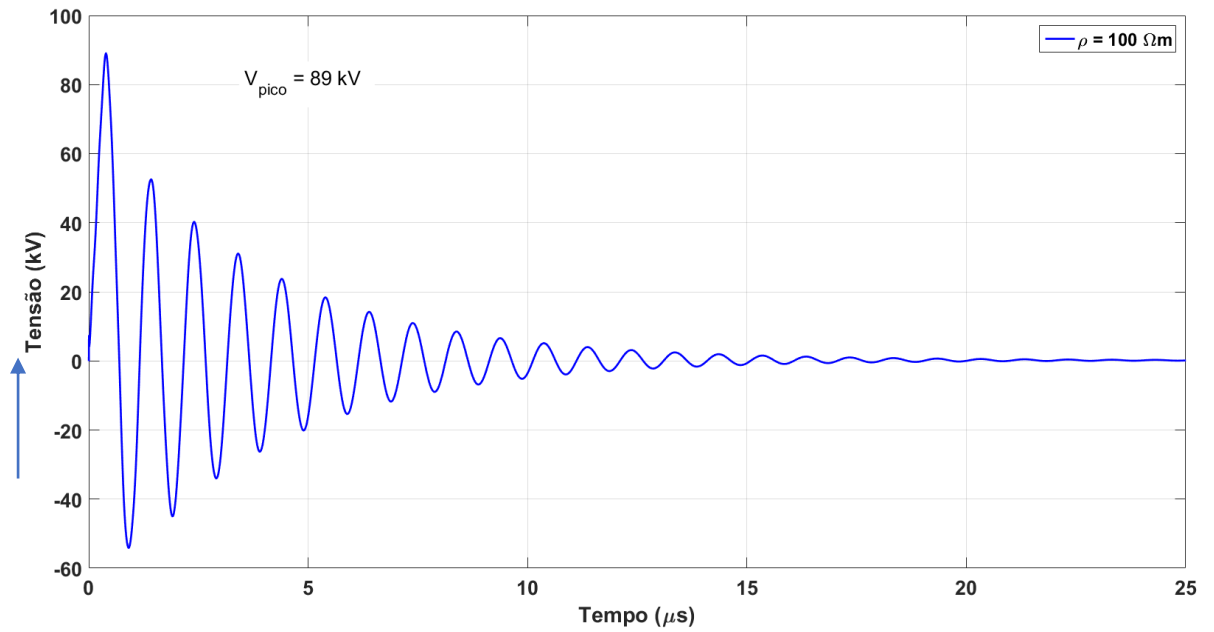
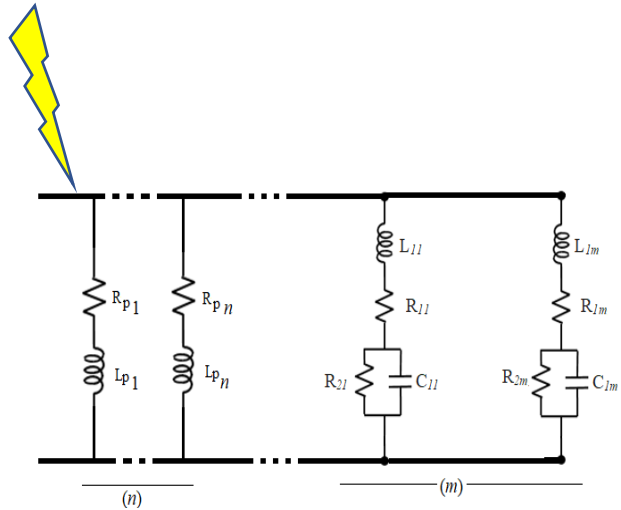
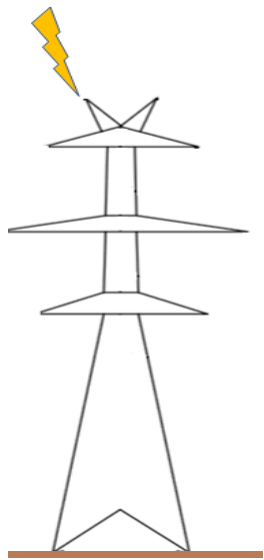


Resumo para T2

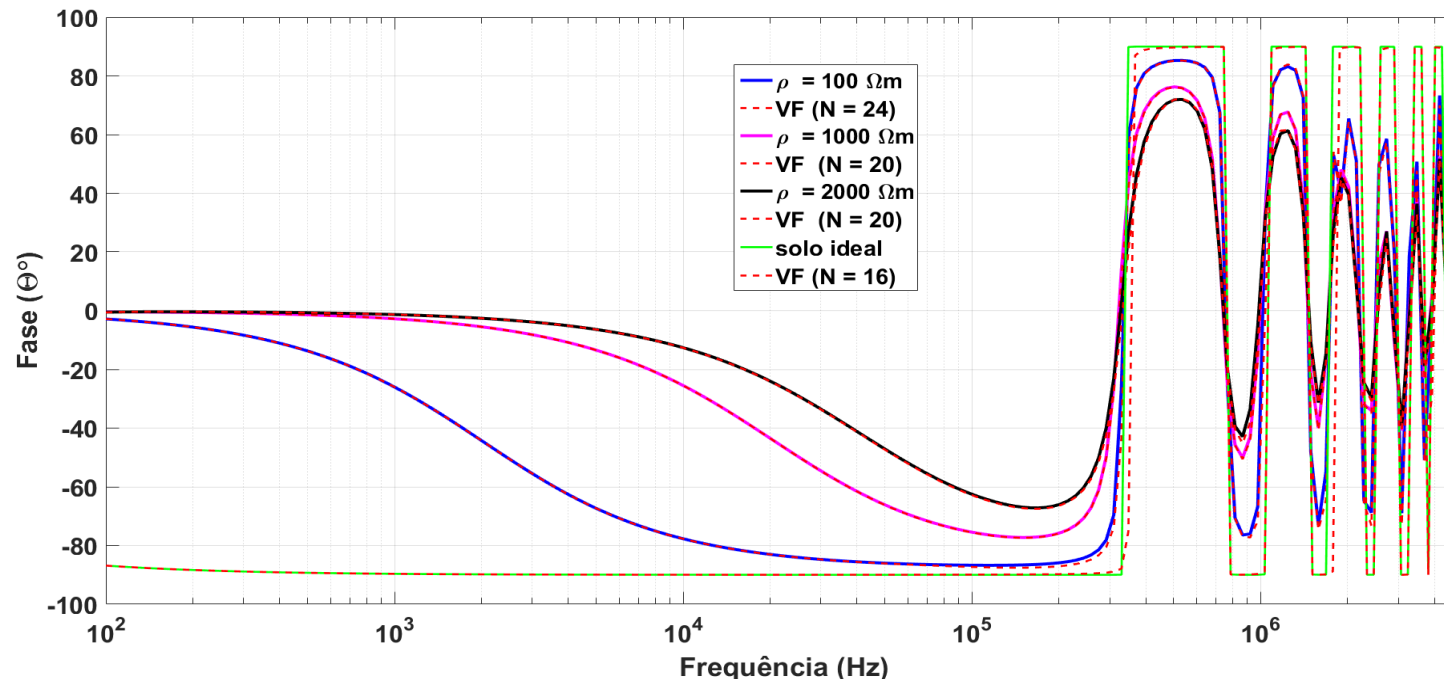
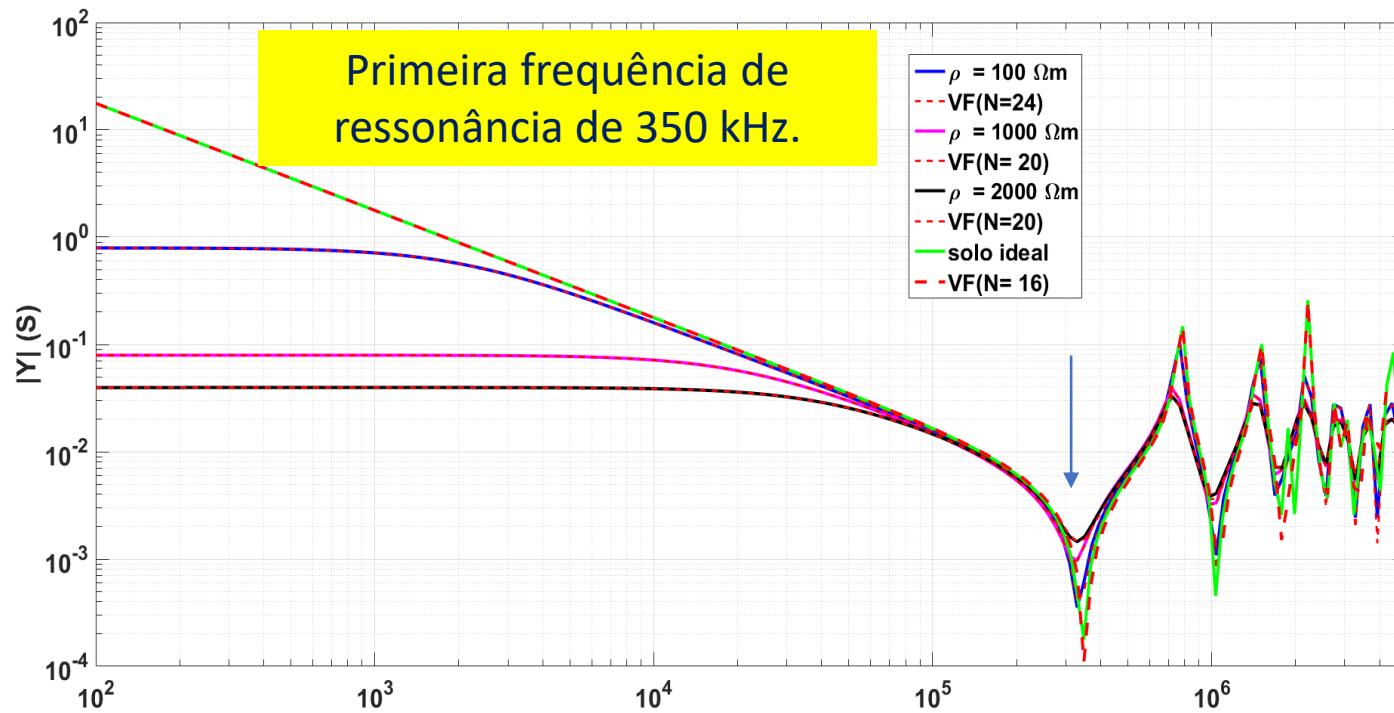
| solos                 | $n$ | $m$ |
|-----------------------|-----|-----|
| Ideal                 | 4   | 3   |
| 100 $\Omega\text{m}$  | 4   | 9   |
| 1000 $\Omega\text{m}$ | 1   | 3   |

Influência da resistividade do solo no número de ramos ( $n+m$ )

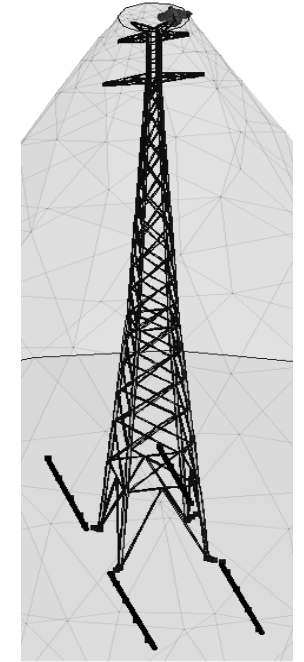




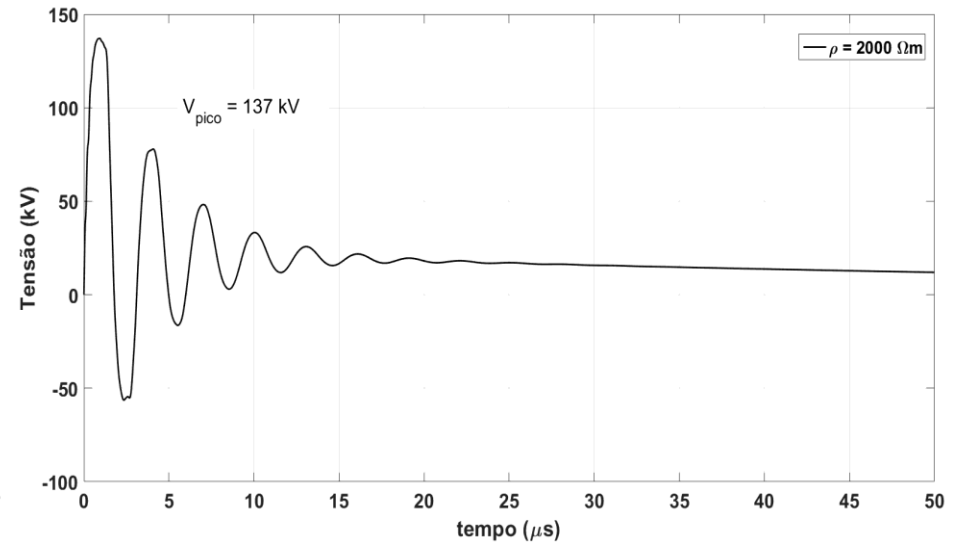
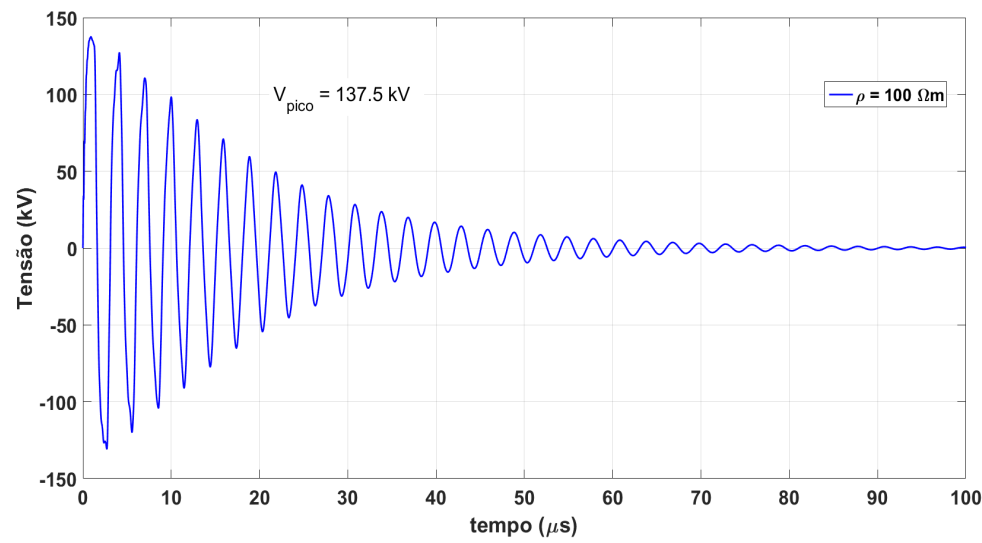
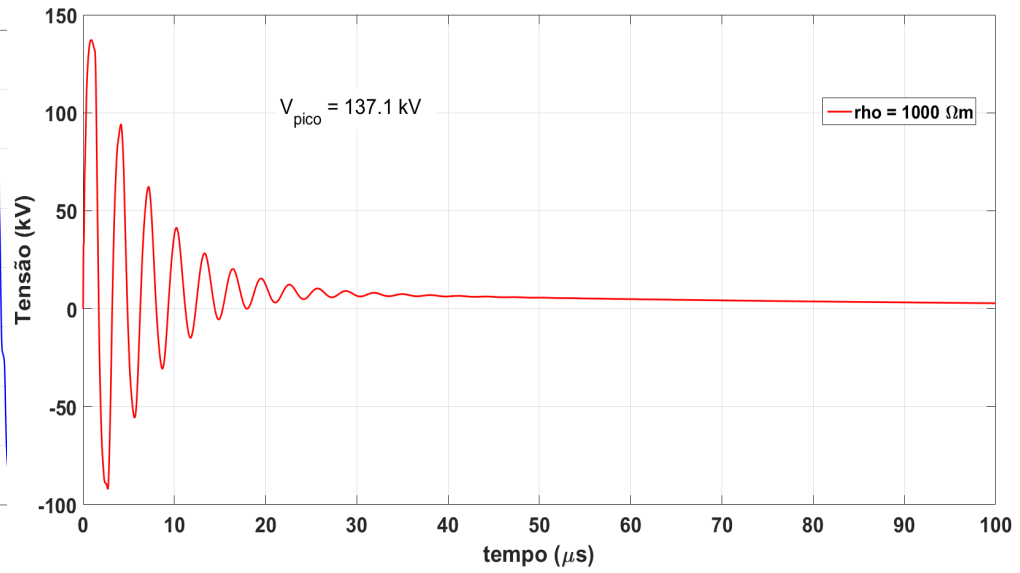
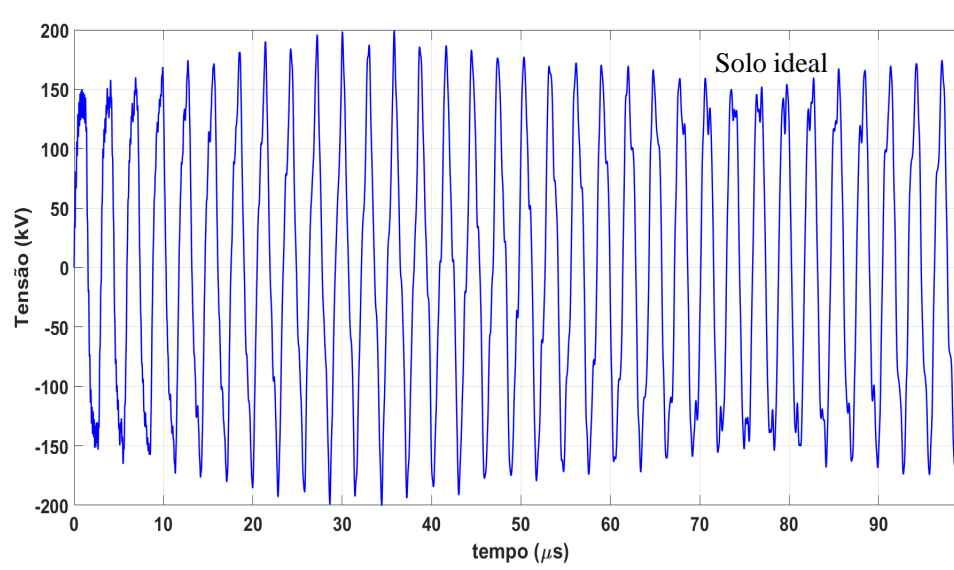
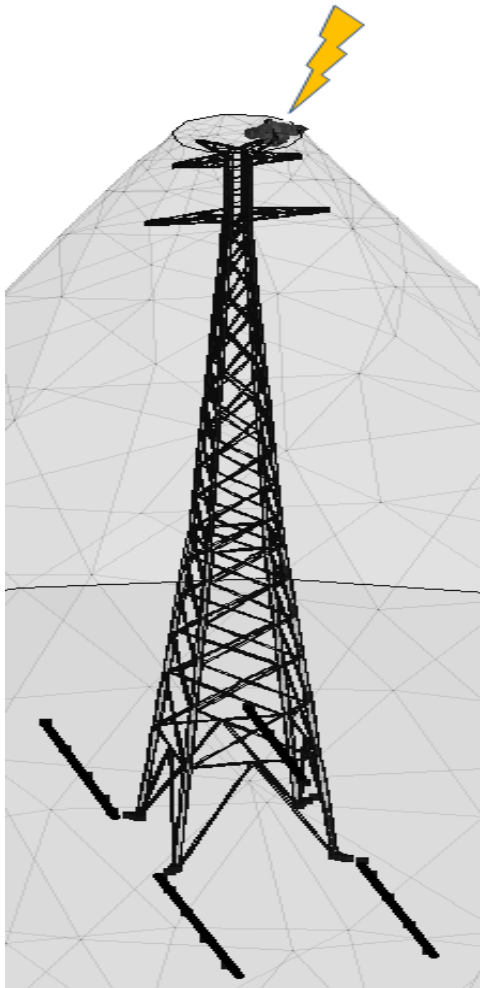
Primeira frequência de ressonância de 350 kHz.



## Torre gigante Elbekreuzung-1



As magnitudes e as fases das admitâncias obtidas para a torre de transmissão gigante ElbeKreuzung-1 para os solos de resistividade  $\rho = 100, 1000$  e  $2000 \Omega\text{m}$  e um solo ideal, ajustadas pela técnica do *Vector Fitting* (VF).



| Solo de $\rho = 100 \Omega\text{m}$ | Altura | Primeira Freq. de Ressonância | Período            | Pico de Tensão (kV) |
|-------------------------------------|--------|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| Autoportante circuito simples       | 25 m   | 2 MHz                         | 0,50 $\mu\text{s}$ | 96                  |
| Autoportante circuito duplo         | 45 m   | 1 MHz                         | 1 $\mu\text{s}$    | 89                  |
| Torre estaiada                      | 46 m   | 0,9 MHz                       | 1,20 $\mu\text{s}$ | 93                  |
| Torre gigante Elbekreuzung-1        | 189 m  | 350 kHz                       | 3 $\mu\text{s}$    | 137                 |
| Torre gigante Elbekreuzung-2        | 227 m  | 250 kHz                       | 4 $\mu\text{s}$    | 120                 |
| Torre gigante da Amazônia (T238)    | 300 m  | 200 kHz                       | 5 $\mu\text{s}$    | 90                  |

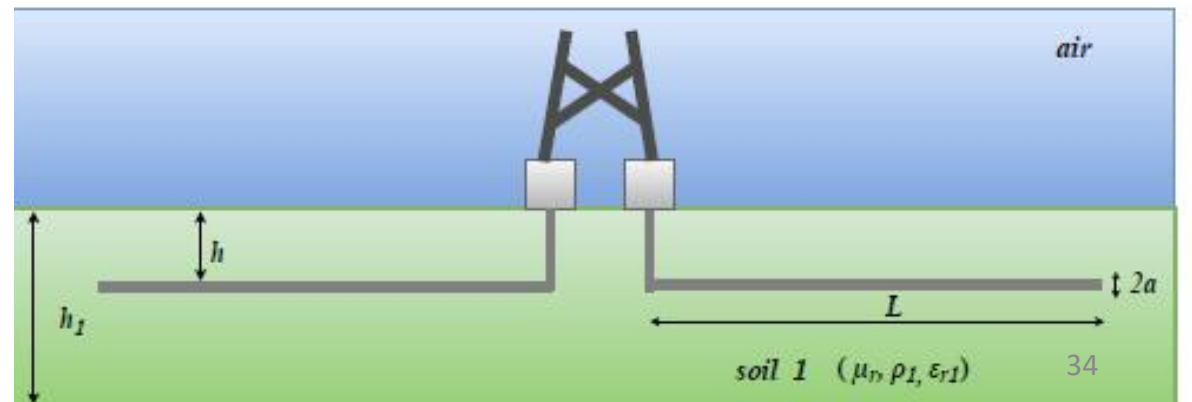
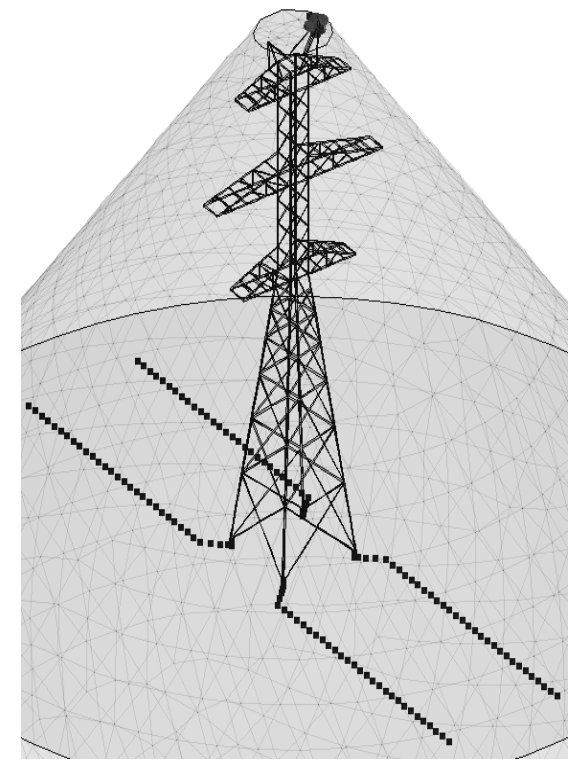
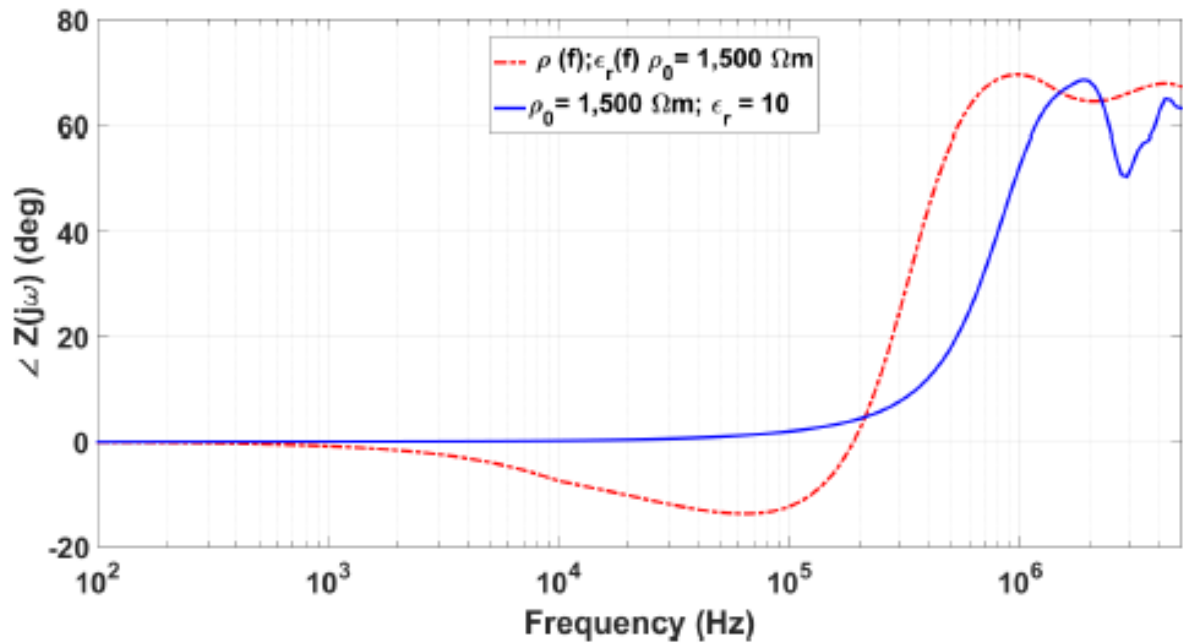
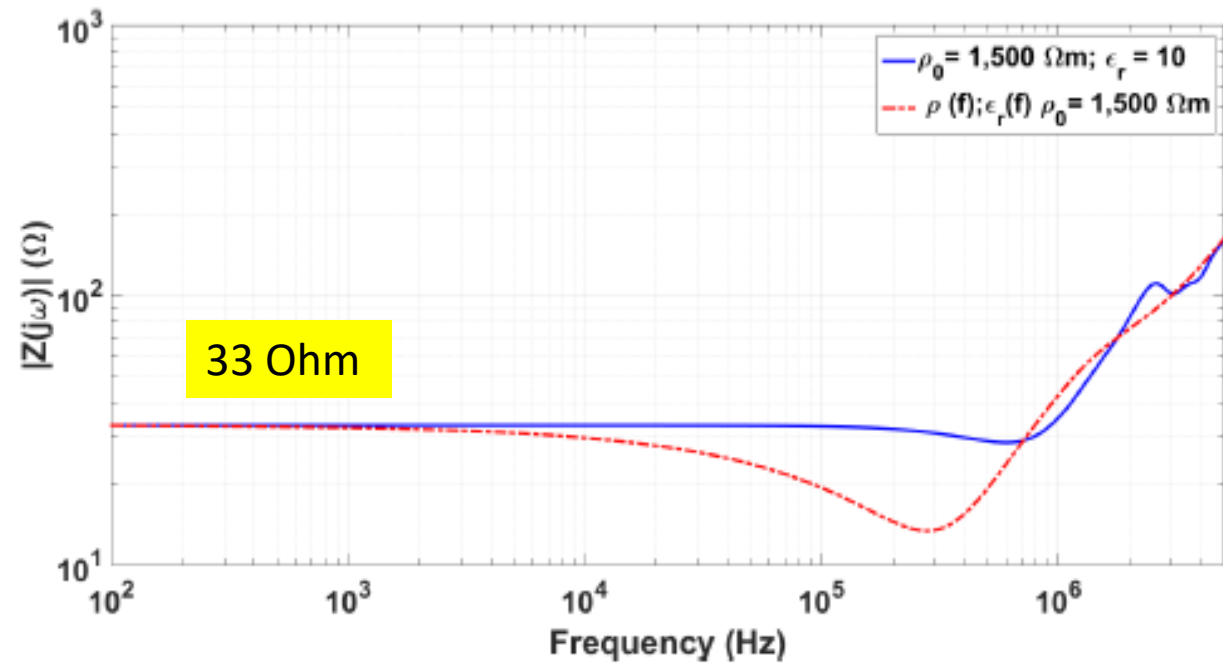
- Quanto mais alta a torre, menor é a frequência de primeira ressonância.
- Mais oscilações é verificada na  $|Y(s)|$ .
- Maior é o período da tensão provocadas pela descarga atmosférico.
- Quanto aos picos da tensão, para torres gigantes, esse valor é decrescente. Entranto, para torres convencionais não há um comportamento convergente.

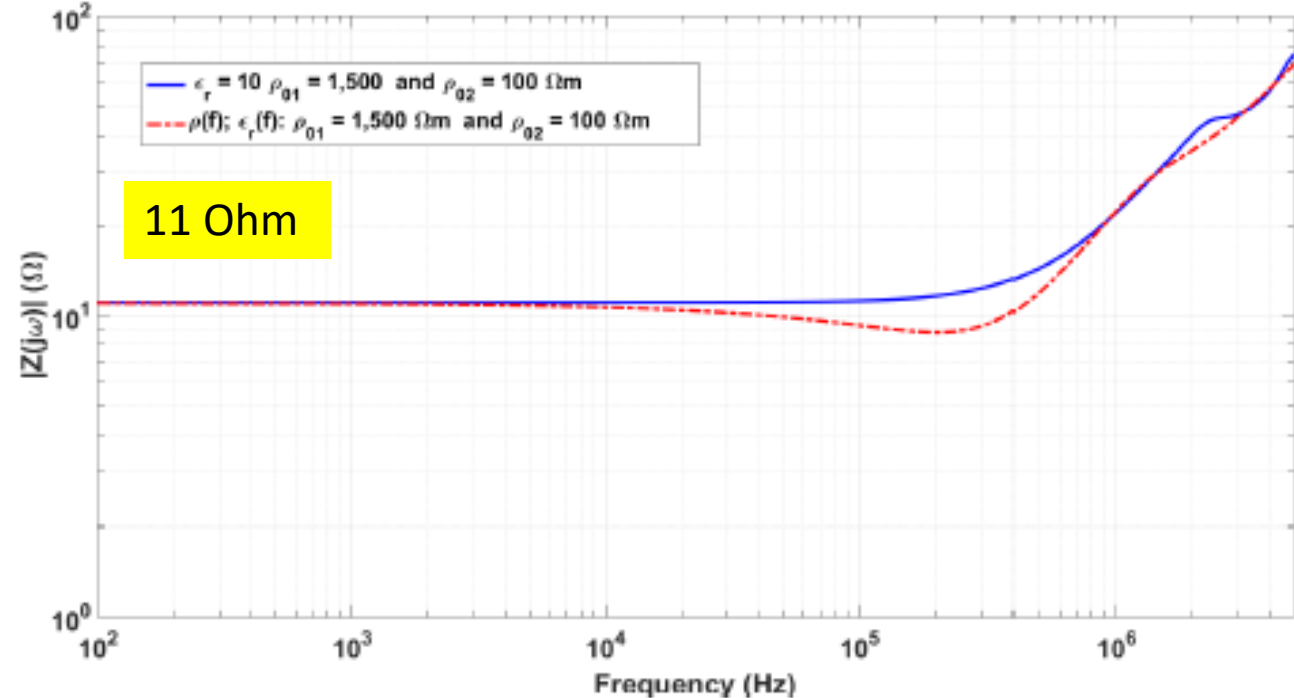


## Tensões produzidas pelas descargas em torres

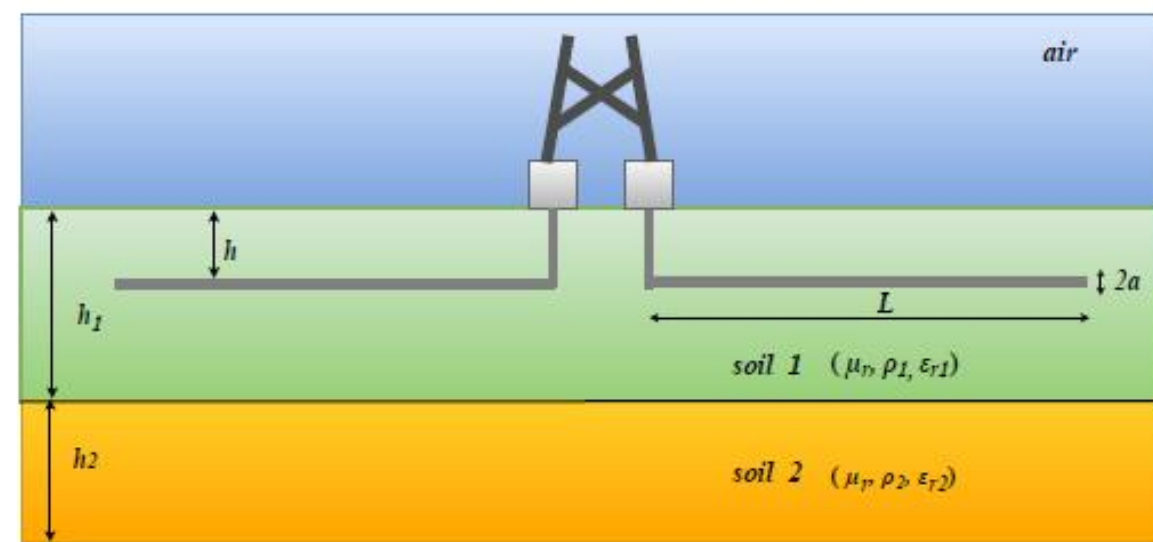
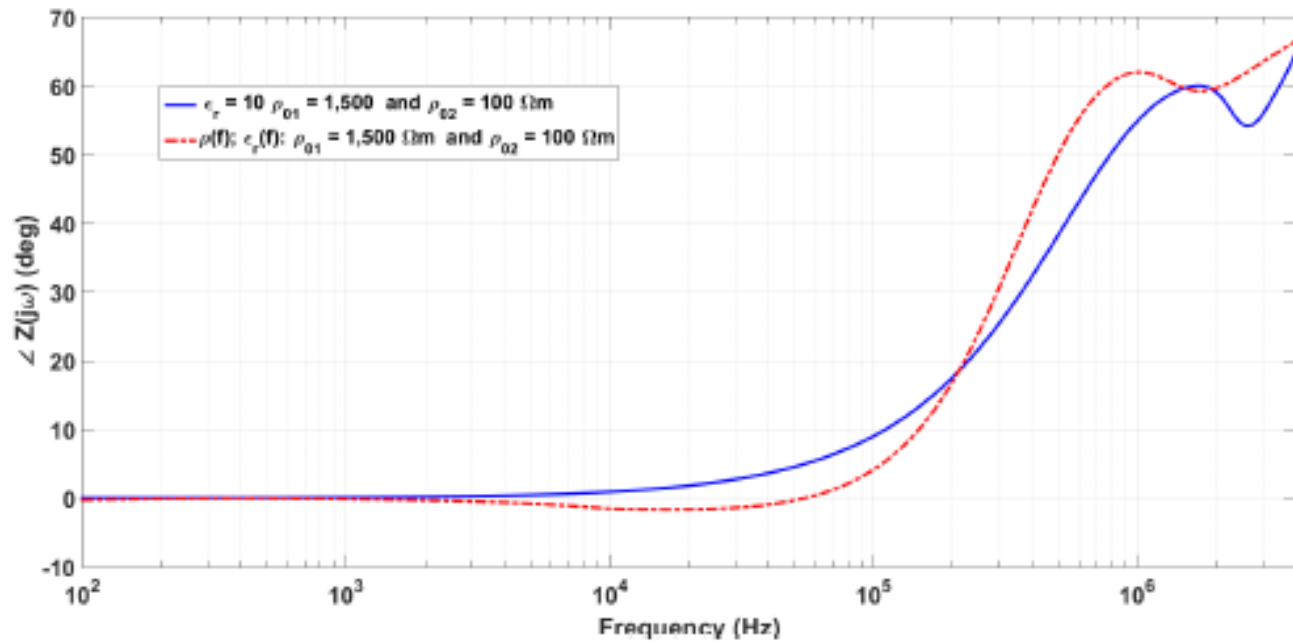
- Em um solo ideal, a tensão induzida para todas as torres apresentam um comportamento oscilatório sem amortecimento. Tal fenômeno ocorre devido aos polos complexos apresentarem parte imaginária muito maior que a parte real. Fisicamente, as perdas são muito pequenas devido a própria estrutura metálica;
- Em um solo real, as tensões apresentam comportamento oscilatório amortecido, na qual a resistividade é o fator determinante (dissipação de energia pelo solo e comportamento assintótico). As oscilações são amortecidas rapidamente, devido a dissipação da corrente elétrica pelo solo através do sistema de aterramento.

# Efeito da frequência nos parâmetros do solo

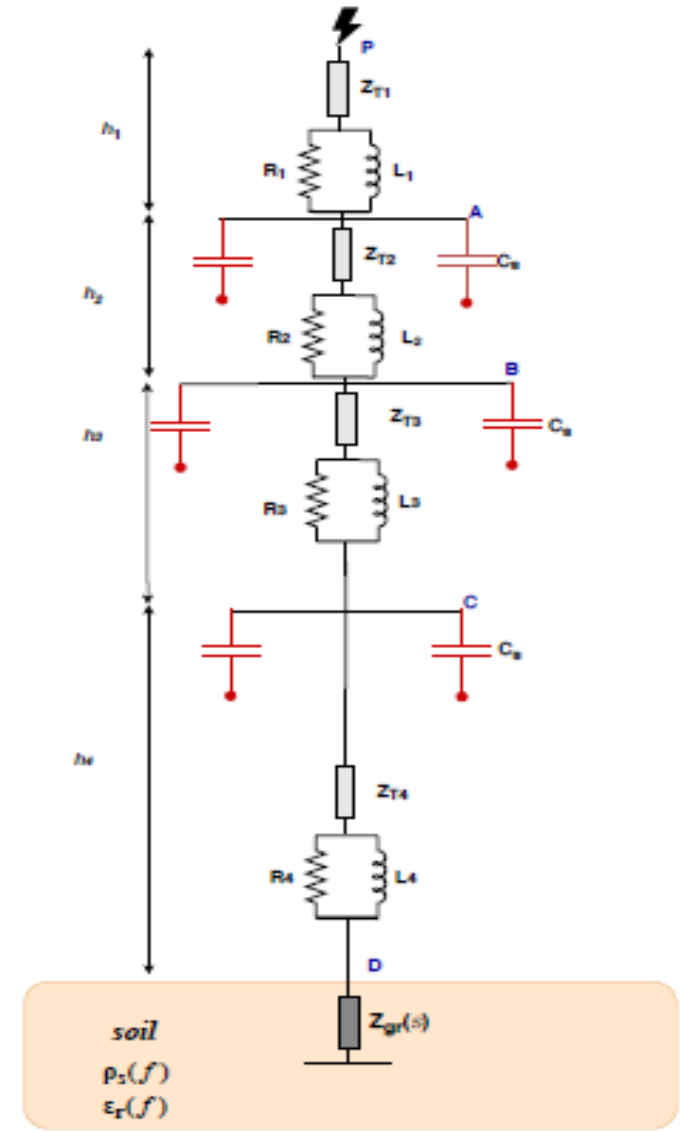
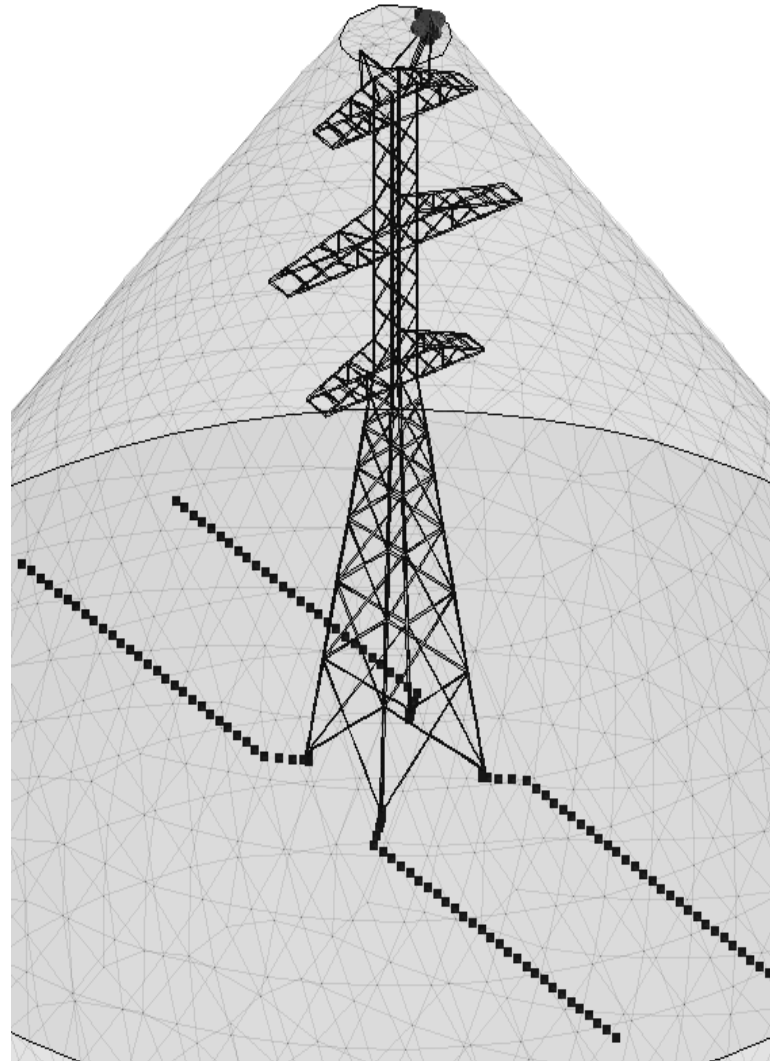




The grounding impedance of horizontal electrode presents a resistive behaviour at low frequencies and they may assume inductive or capacitive behaviour at high frequencies, when the soil parameters are constant. when the frequency dependence is taken into account, a significant reduction in the grounding impedance is noted for high resistive soil.



# Efeito da frequência nas sobretensões

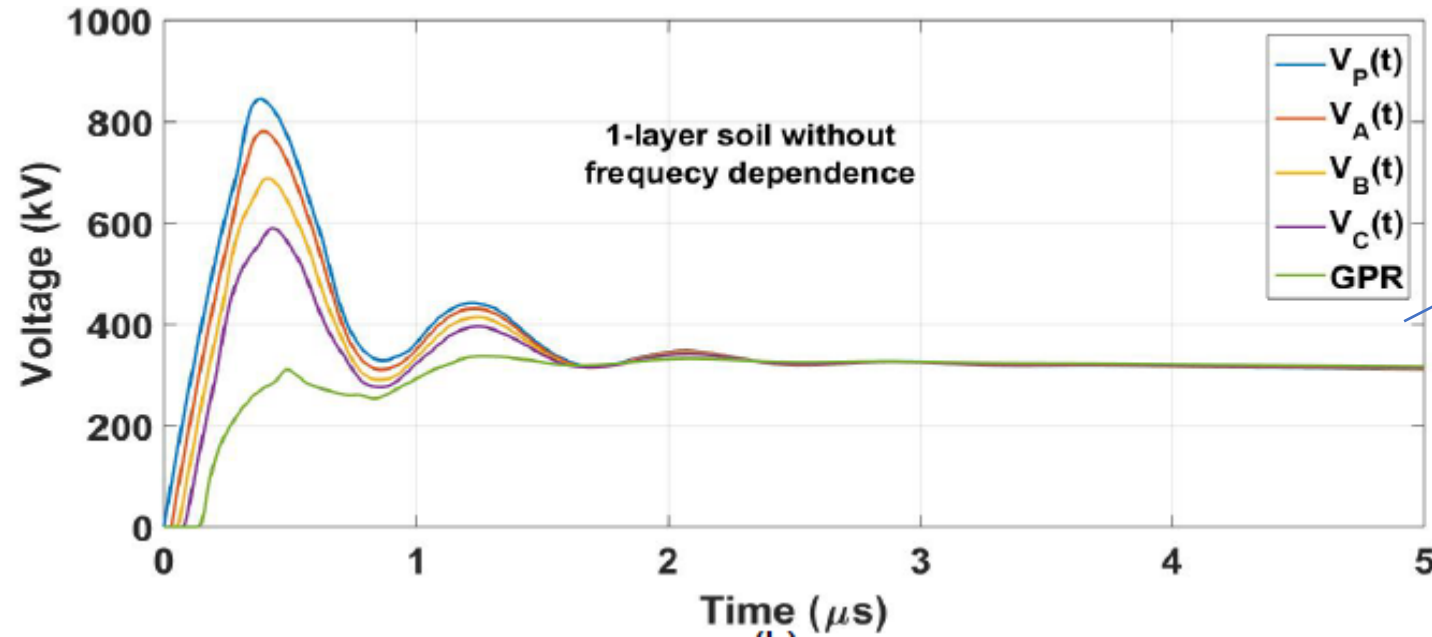
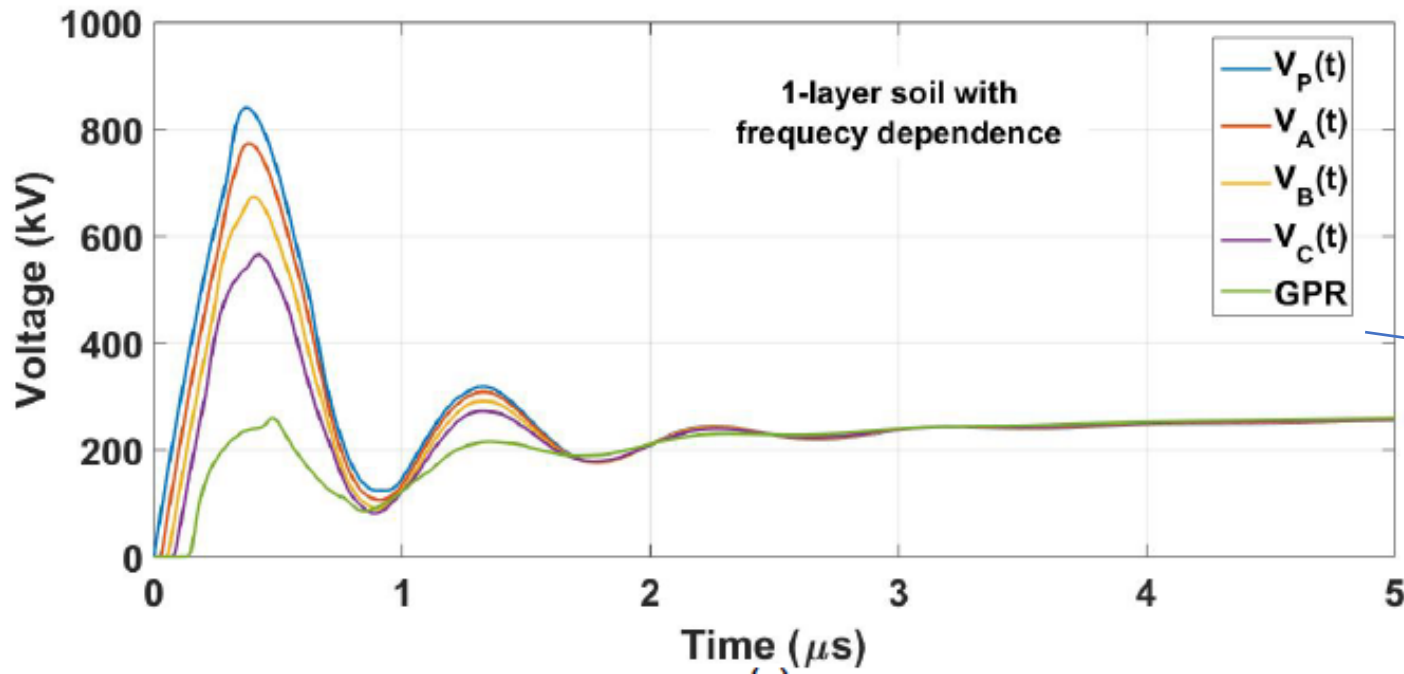


structure [25]. The heights of each section are:  $h_1 = 8.6$  m,  $h_2 = 8.50$  m,  $h_3 = 8.0$  m and  $h_4 = 20$  m. The surge impedances are:  $Z_{T1} = \dots = Z_{T4} = 120 \Omega$  and the velocity of the traveling wave considered is  $v = 300,000$  km/s. The resistances are:

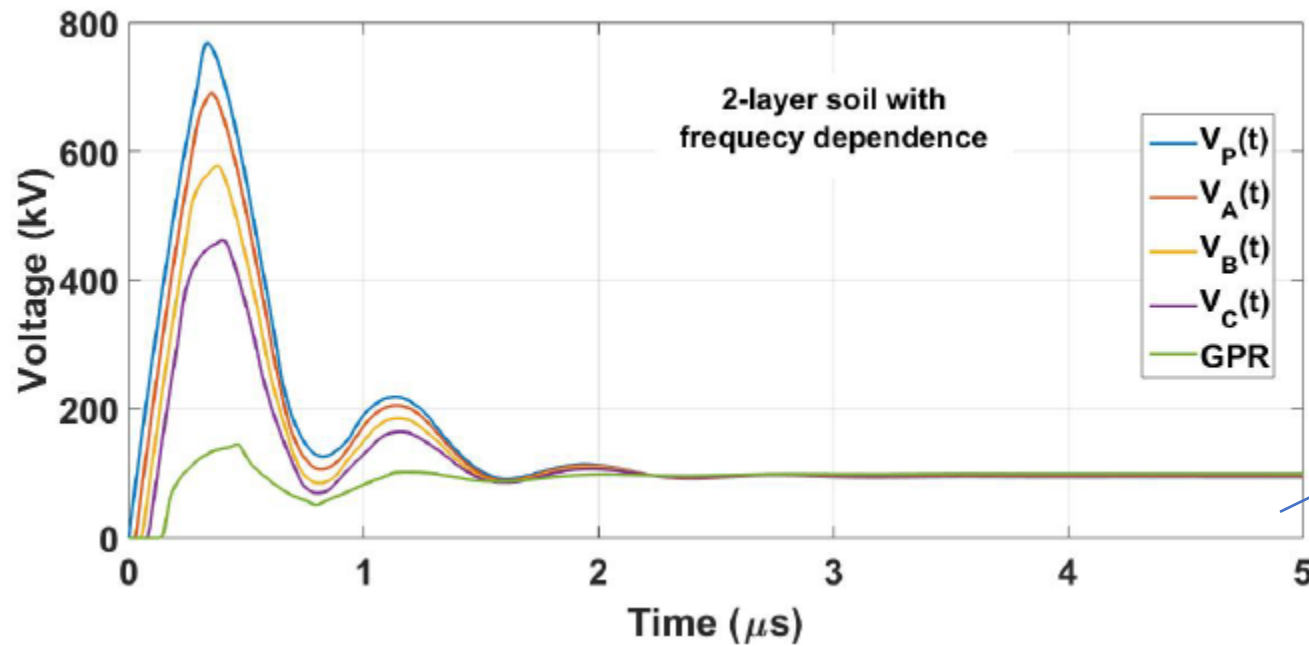
$R_1 = 6.2 \Omega$ ,  $R_2 = 10.6 \Omega$ ,  $R_3 = 10 \Omega$ ,  $R_4 = 26.8 \Omega$ . The inductances are:  $L_1 = 1.90 \mu\text{H}$ ,  $L_2 = 3.20 \mu\text{H}$ ,  $L_3 = 3.0 \mu\text{H}$  and  $L_4 = 8.0 \mu\text{H}$ .



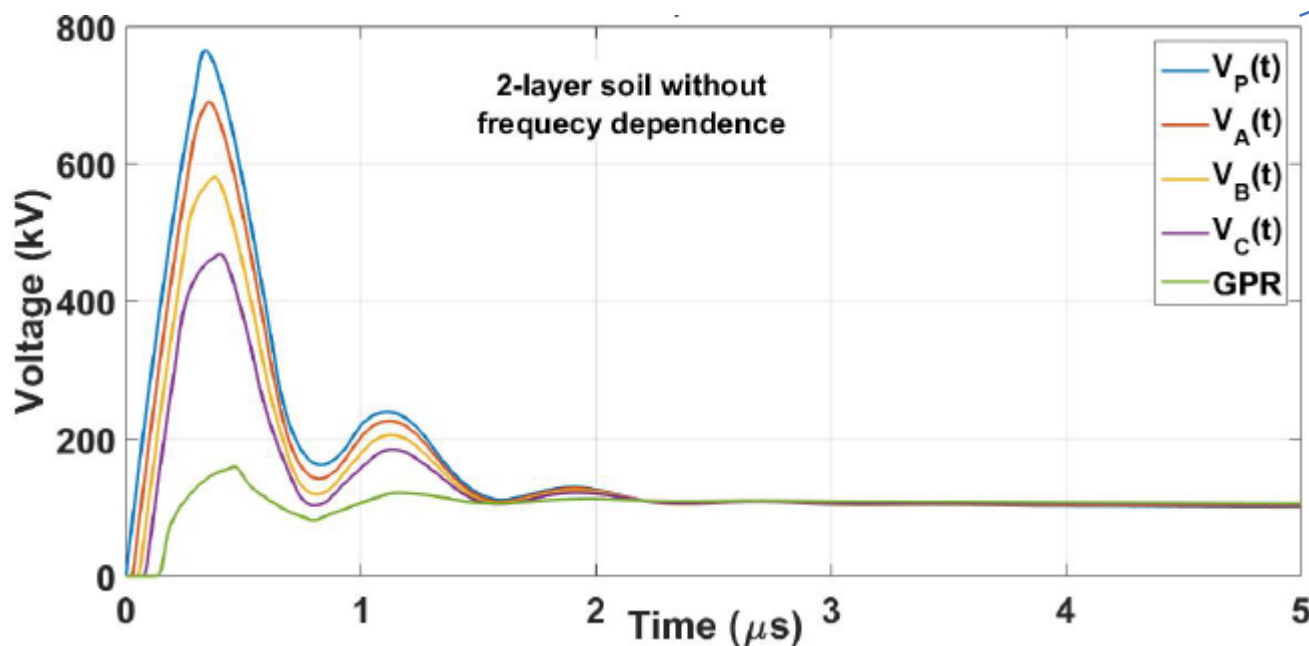
## Tensões nos braços da torre



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



| 2-layer soil |     |     |
|--------------|-----|-----|
| Voltage (kV) | WFD | NFD |
| $V_P(t)$     | 768 | 765 |
| $V_A(t)$     | 691 | 690 |
| $V_B(t)$     | 578 | 581 |
| $V_C(t)$     | 462 | 468 |
| GPR          | 144 | 159 |



- The transient voltages at different parts of the transmission tower are strongly modified, specially in the peaks values, when a stratified soil with frequency dependence is considered. It can be seen a reduction of the peaks of all transient voltages, where the GPR present the highest reduction when a second layer of soil is added and the frequency dependence on soil parameters are computed, as presented in Table II. For stratified soils, GPR peaks are reduced as well as is its damping wave-shape.

# Recent Developments on the Lightning Performance of Transmission Lines

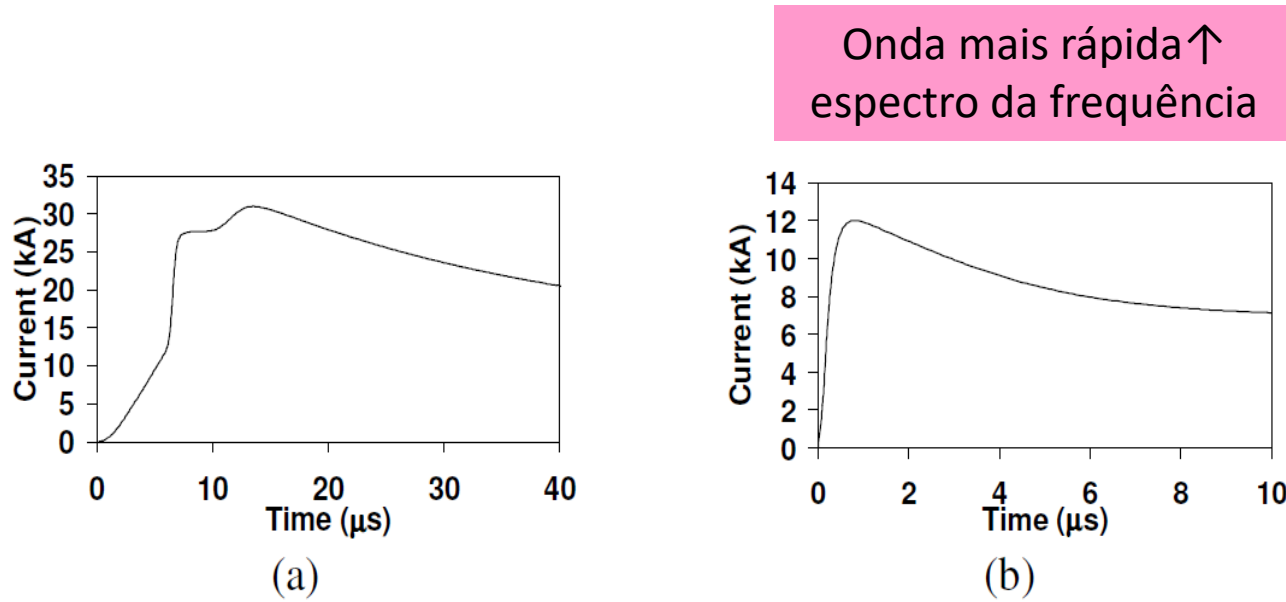


Fig.1. Representative current waveforms with median peak currents and from times of first (a) and subsequent (b) strokes. FST:  $I_p = 31.1$  kA,  $T_{d30} = 3.8$   $\mu$ s, SUB:  $I_p = 11.8$  kA,  $T_{d30} = 0.67$   $\mu$ s.

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

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

Dependência dos  
parâmetros elétricos do  
solo com a frequência

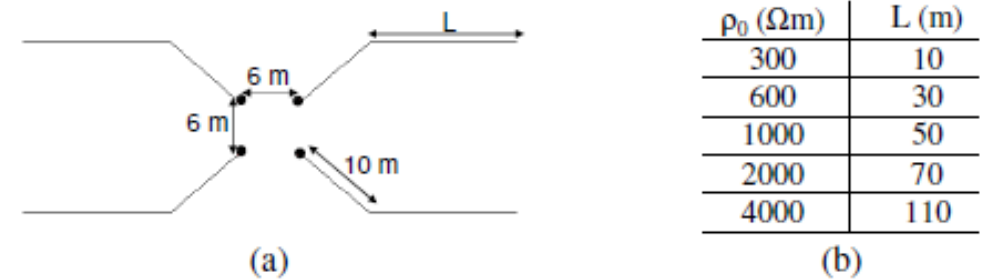


Fig. 2. Simulated grounding electrode arrangement (a) and electrode length as a function of soil resistivity (b).

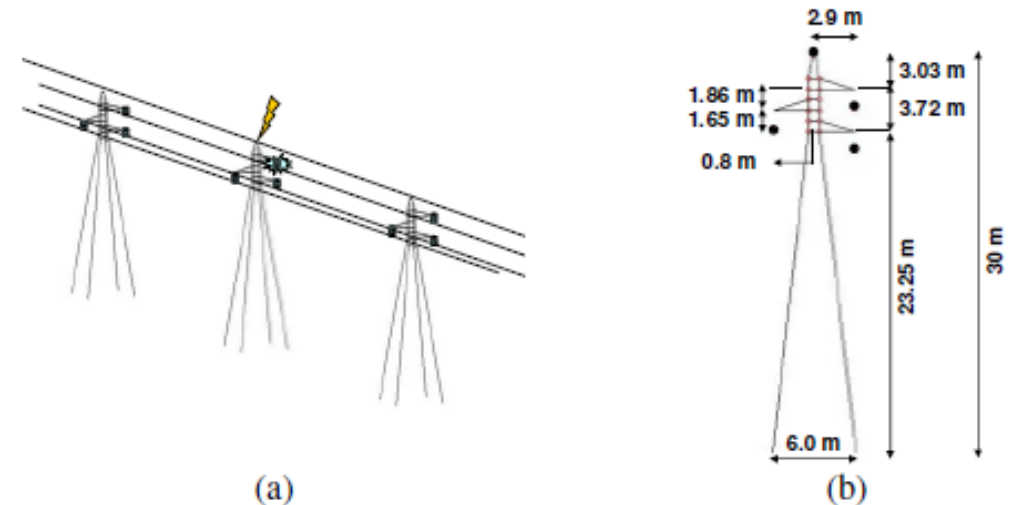
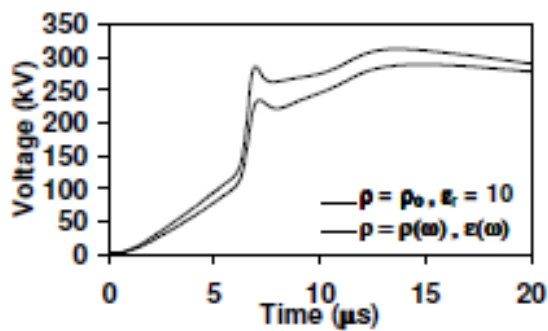
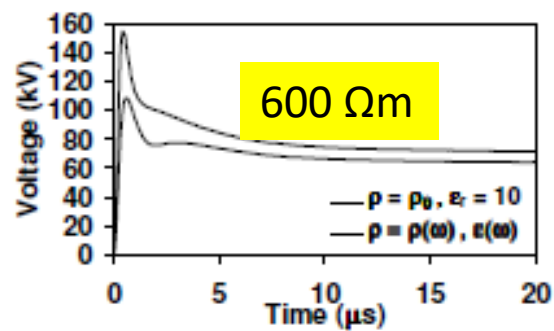


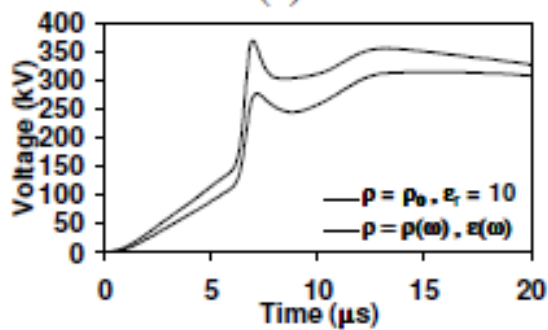
Fig. 3. Representation of direct strike to the tower (a) and the simulated 138-kV transmission line tower configuration (b).



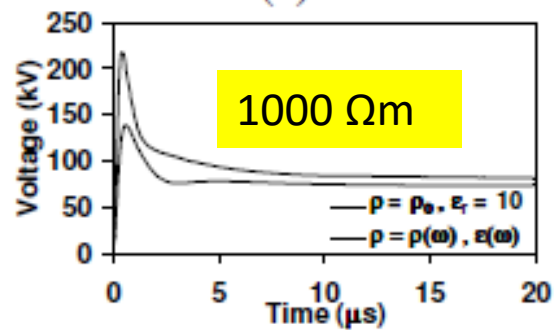
(a)



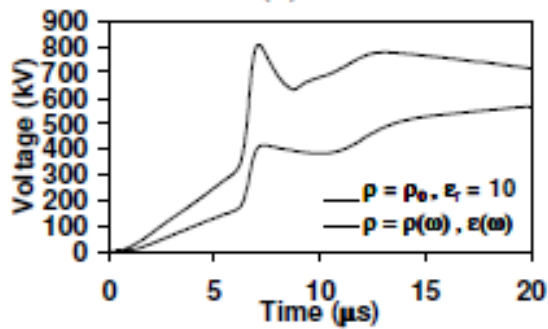
(b)



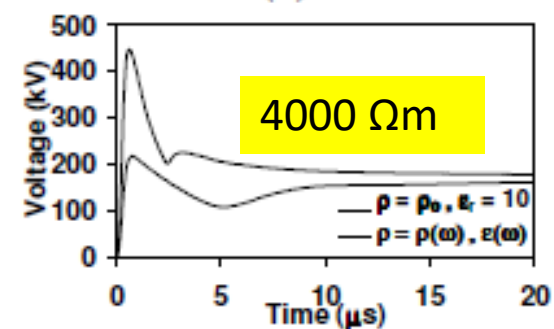
(c)



(d)

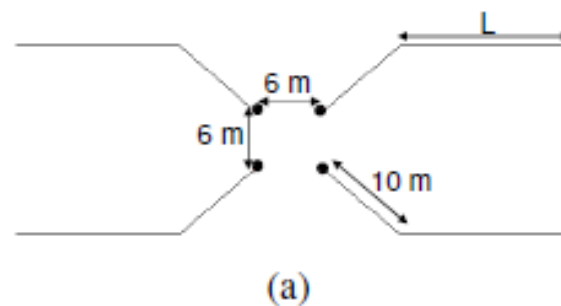


(e)



(f)

Fig. 4. Simulated GPR of the 138-kV-line tower footing under the assumption of constant and frequency-dependent soil parameters for different values of soil resistivity  $\rho_0$ . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600  $\Omega$ .m, (c),(d) 1000  $\Omega$ .m, (e),(f) 4000  $\Omega$ .m.



(a)

| $\rho_0$ ( $\Omega$ m) | L (m) |
|------------------------|-------|
| 300                    | 10    |
| 600                    | 30    |
| 1000                   | 50    |
| 2000                   | 70    |
| 4000                   | 110   |

(b)

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

Zg impedância à baixa frequência

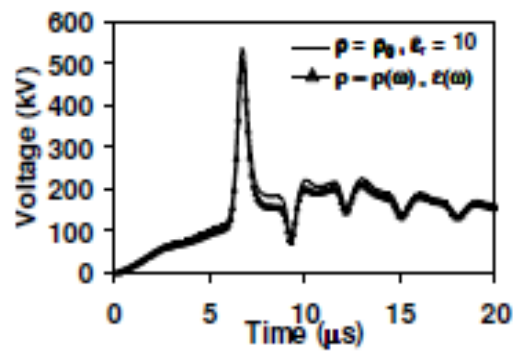
$$Z_P = \frac{V_P}{I_P}$$

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

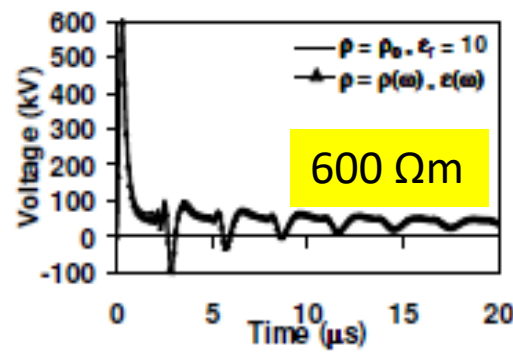
| $\rho_0$<br>( $\Omega$ .m) | L<br>(m) | Rg<br>( $\Omega$ ) | Impulse impedance Zp                         |   |            |  |   |            |
|----------------------------|----------|--------------------|--|---|------------|--|---|------------|
|                            |          |                    | FST  |   |            | SUB  |   |            |
|                            |          |                    | $\rho=\rho_0, \epsilon_r=10$<br>( $\Omega$ ) | $\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$<br>( $\Omega$ ) | $\Delta\%$ | $\rho=\rho_0, \epsilon_r=10$<br>( $\Omega$ ) | $\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$<br>( $\Omega$ ) | $\Delta\%$ |
| 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      |

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

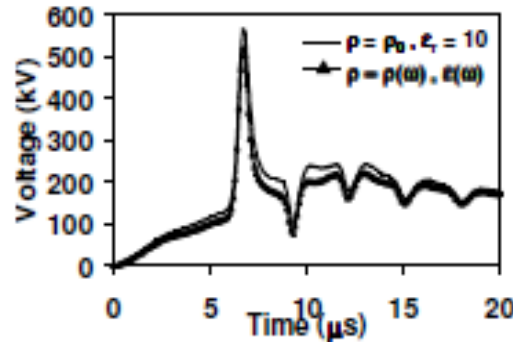




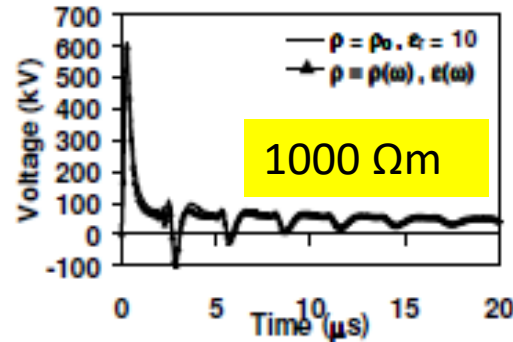
(a)



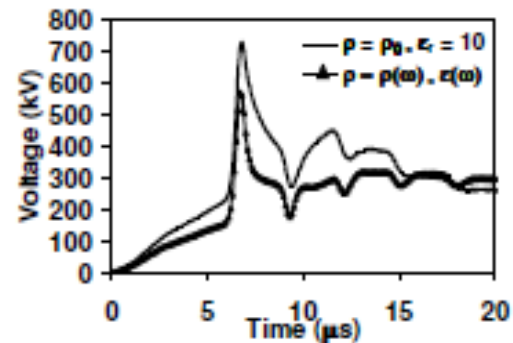
(b)



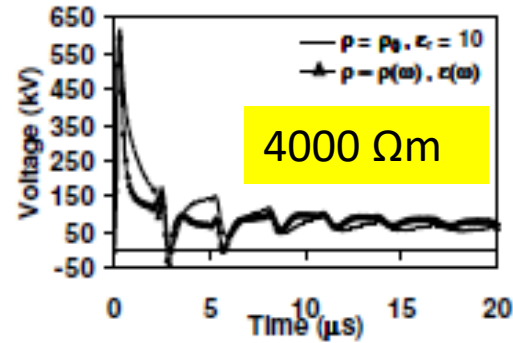
(c)



(d)



(e)



(f)

TABLE II

OVERVOLTAGE PEAK DEVELOPED ACROSS UPPER INSULATOR STRING

| $\rho_0$<br>( $\Omega.m$ ) | L<br>(m) | Overvoltage (kV)                  |  |            |                                   |  |            |
|----------------------------|----------|-----------------------------------|--|------------|-----------------------------------|--|------------|
|                            |          | FST                               |  |            | SUB                               |  |            |
|                            |          | $\rho=\rho_0,$<br>$\epsilon_r=10$ | $\rho=\rho(\omega),$<br>$\epsilon_r(\omega)$ | $\Delta\%$ | $\rho=\rho_0,$<br>$\epsilon_r=10$ | $\rho=\rho(\omega),$<br>$\epsilon_r(\omega)$ | $\Delta\%$ |
| 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  $\rho_0$ . (Left column: First stroke; Right column: Subsequent stroke). (a),(b) 600  $\Omega.m$ . (c),(d) 1000  $\Omega.m$ . (e),(f) 4000  $\Omega.m$ .



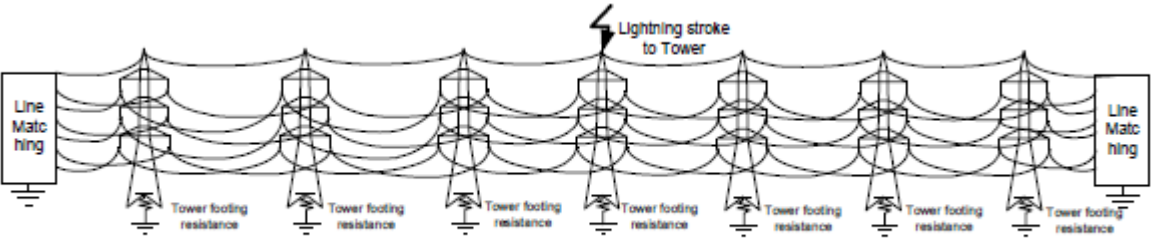
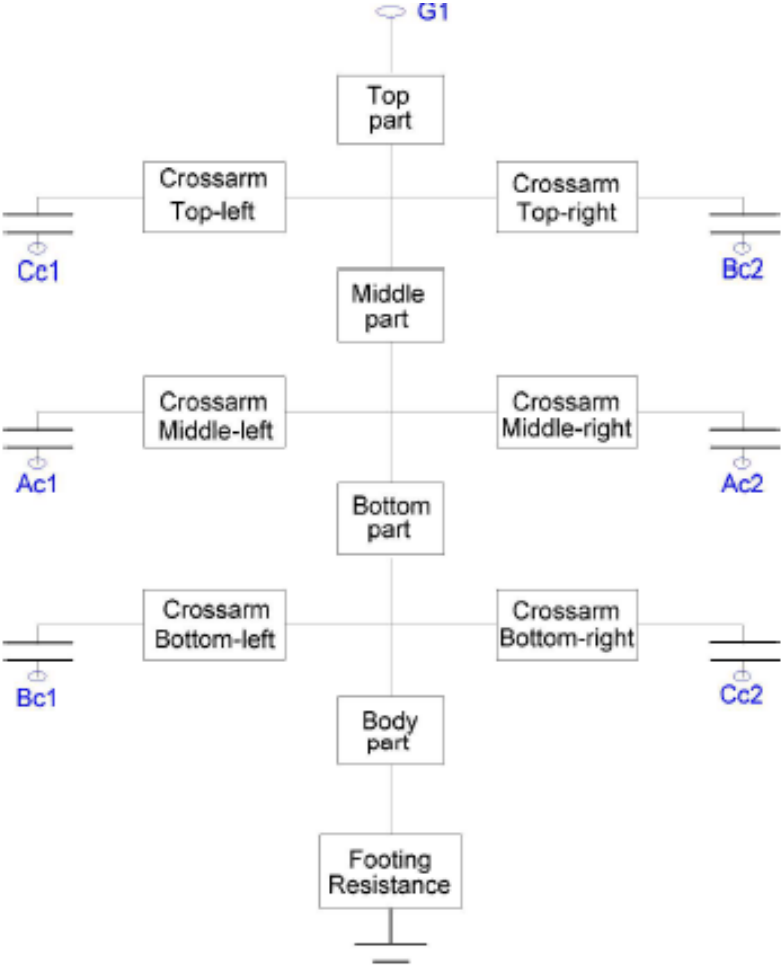
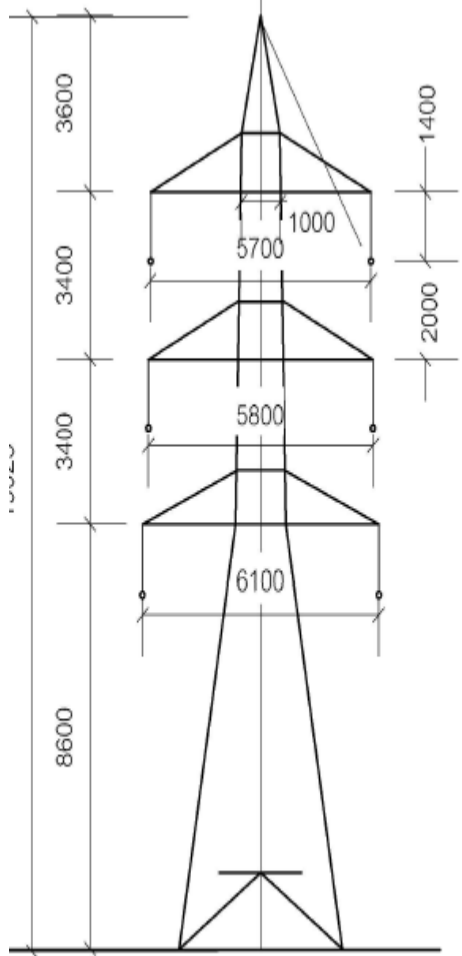
# Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System

P. Yadee and S. Premrudeepreechacharn

## Configuração da torre e modelo

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

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



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

Double circuit with one over head ground wire.

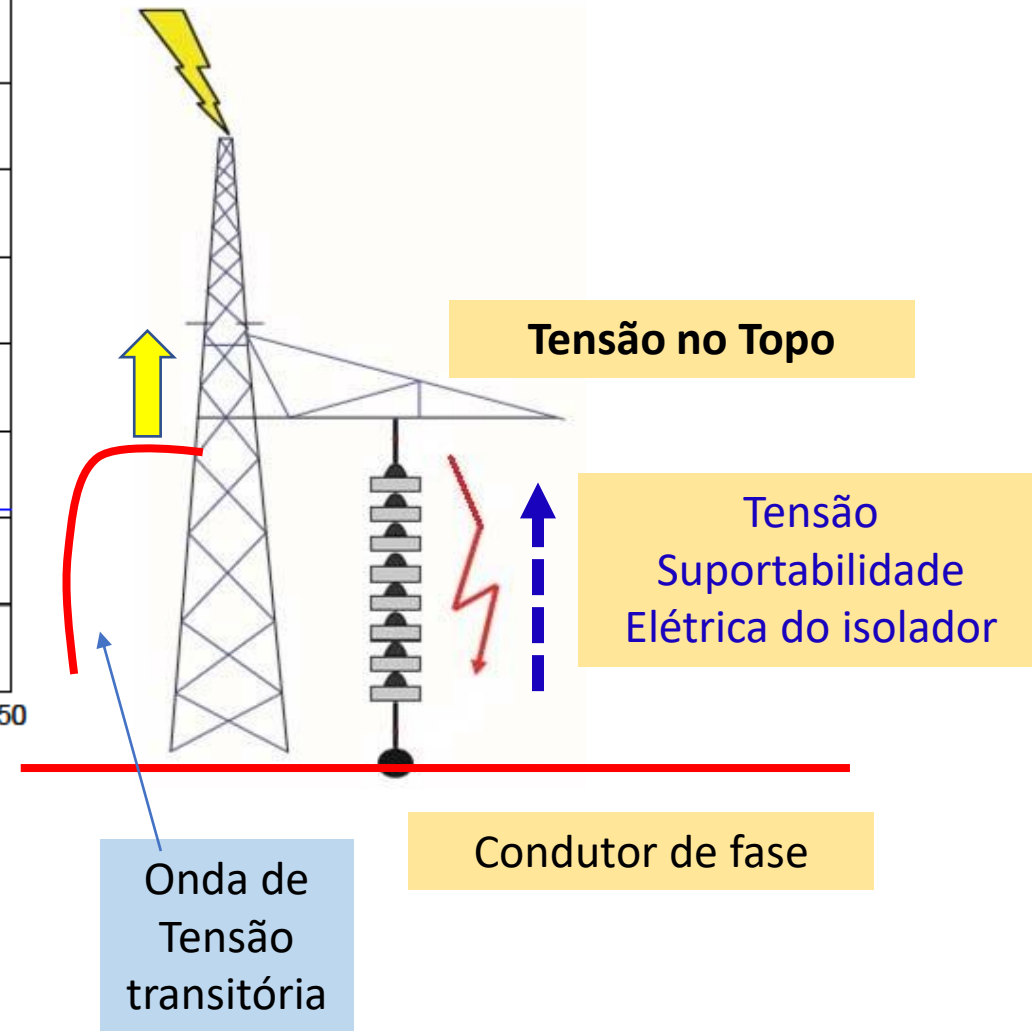
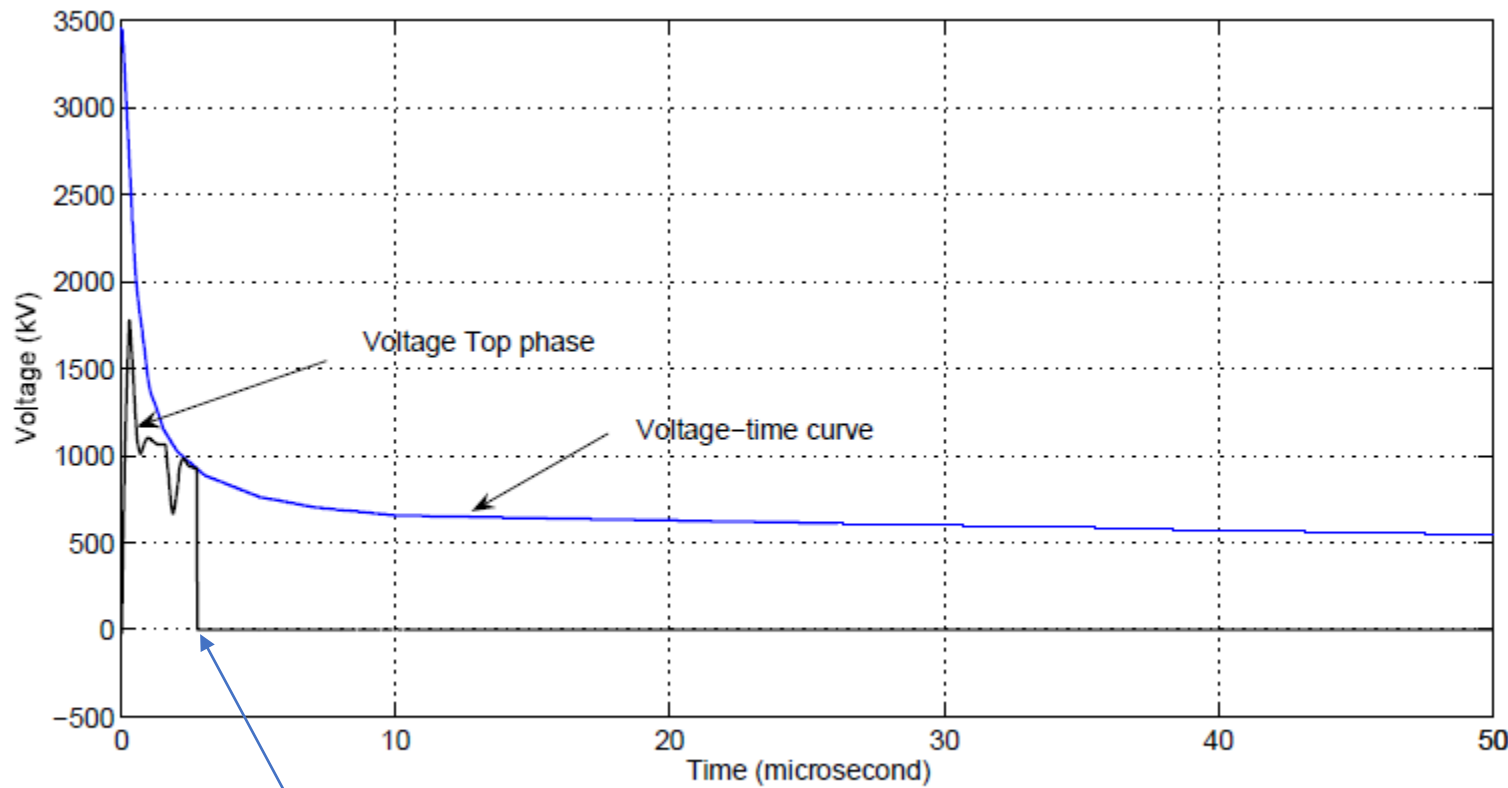


Fig. 8. The back flashover mechanism.

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

Overvoltage caused by wavefront varying with 20 kA stroke current

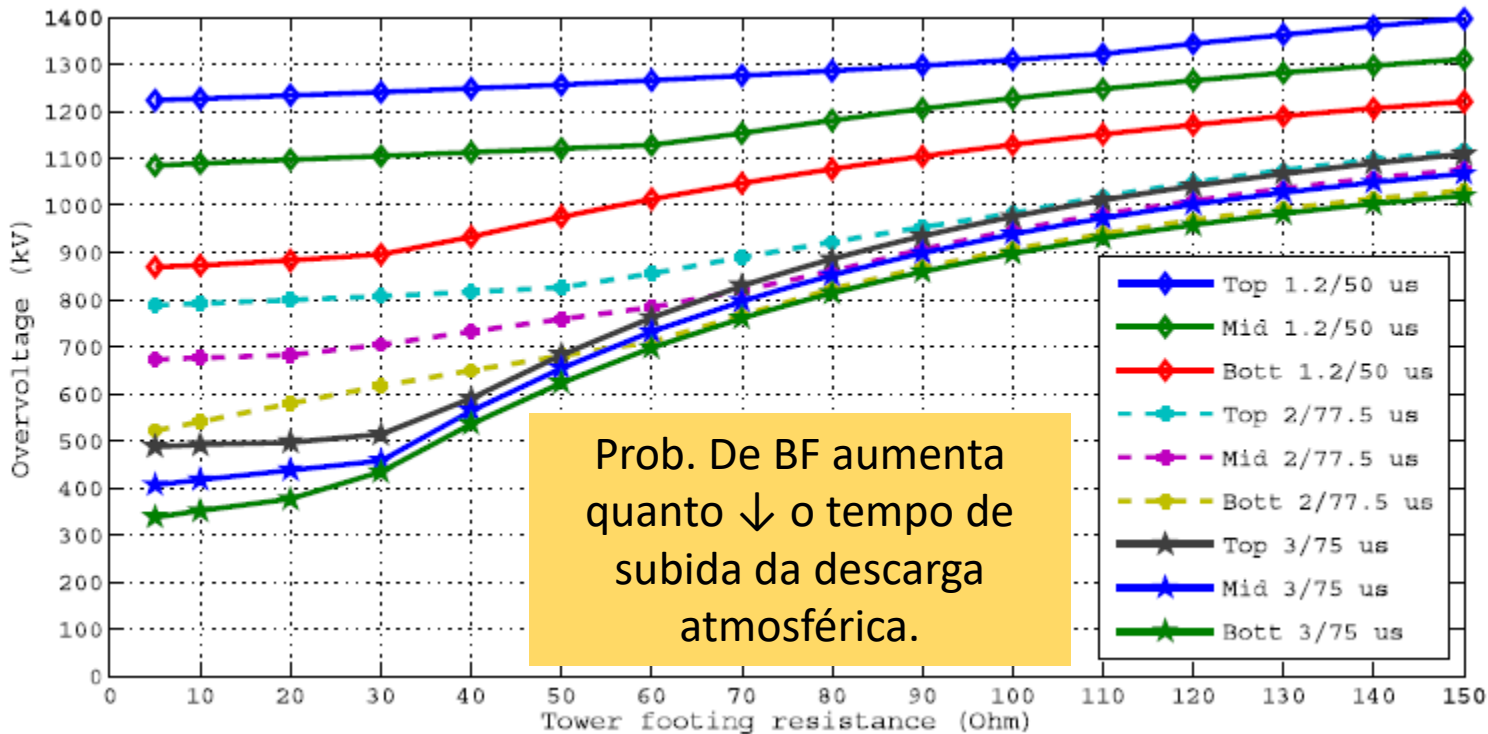
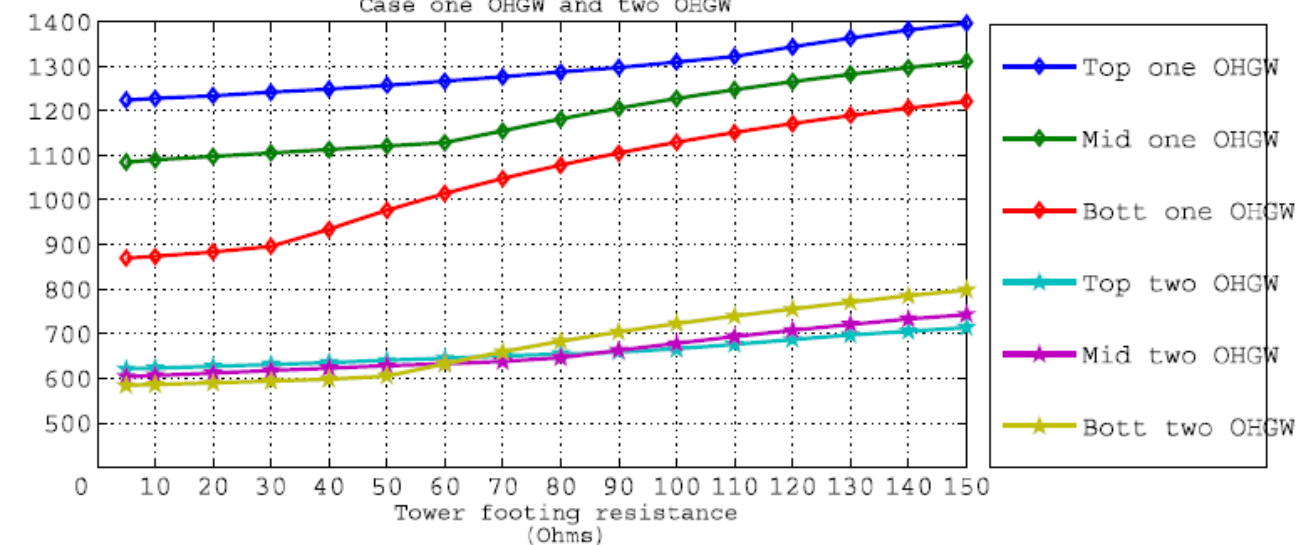


TABLE III : OVERVOLTAGE FLASHOVER AT INSULATOR WITH DIFFERENT MAGNITUDE OF STROKE.

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

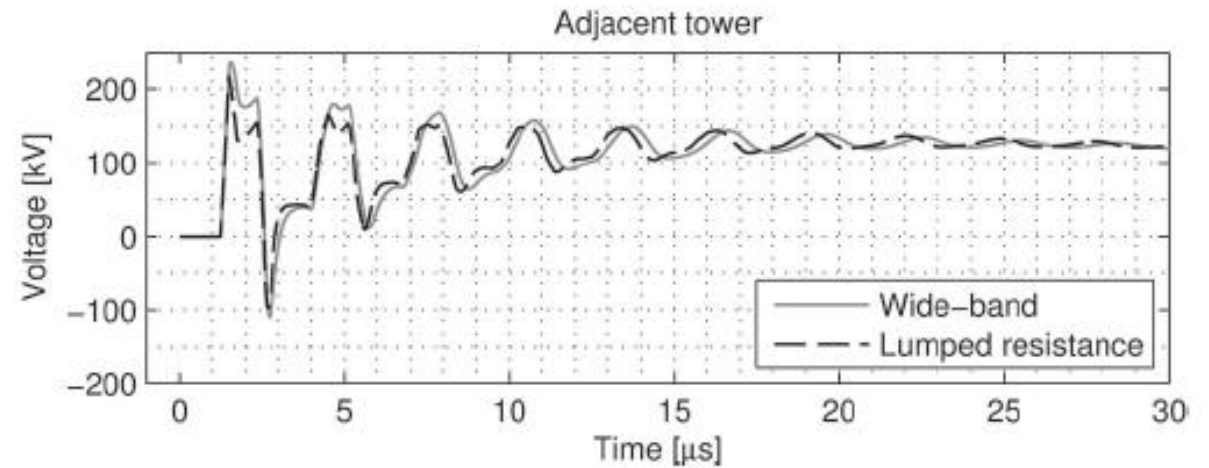
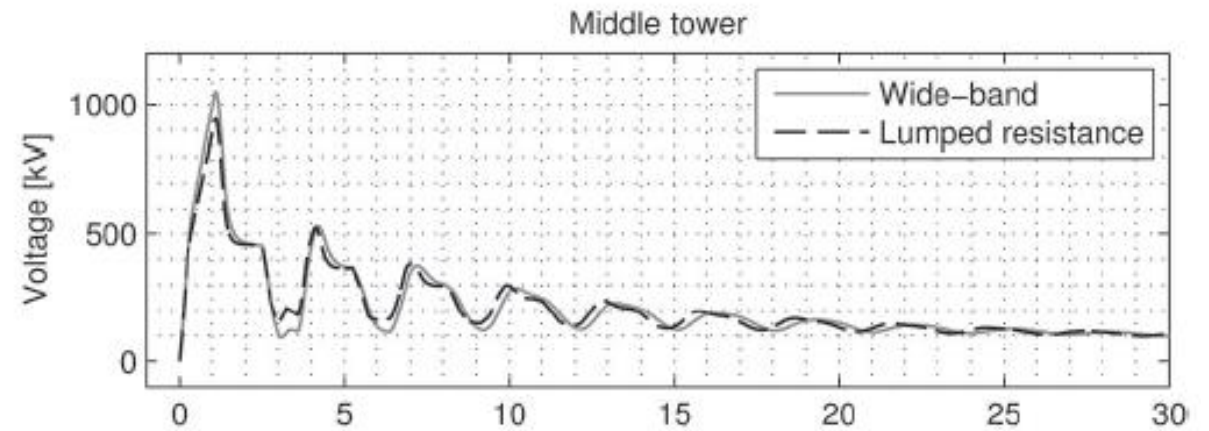
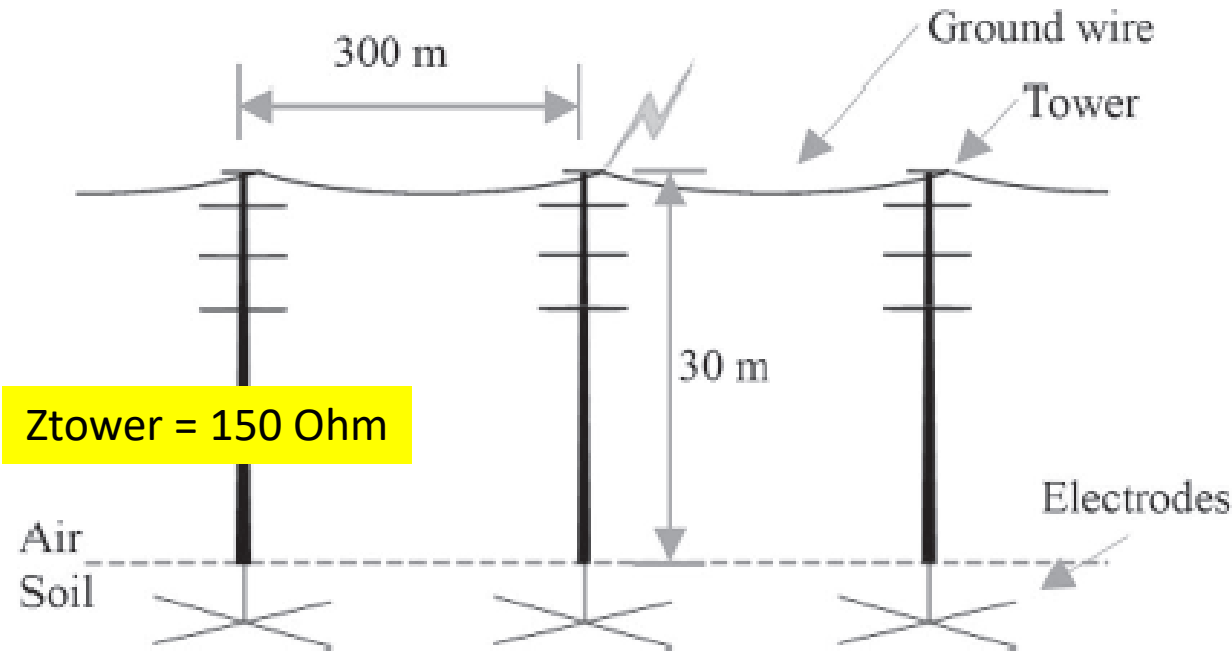
Ocorrência de BFs aumenta com ↑ Resistência de aterramento e amplitude da corrente injetada

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



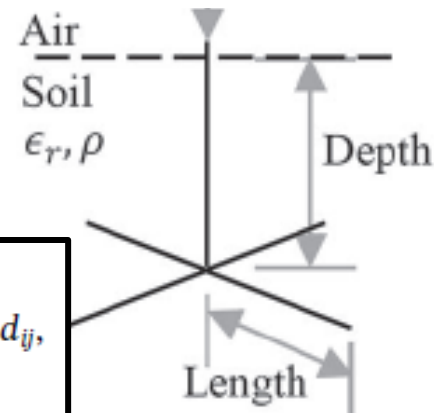
# Inclusion of Field-Solver-Based Tower Footing Grounding Models in Electromagnetic Transient Programs

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);

# Simulações considerando a freq. nos parâmetros do solo

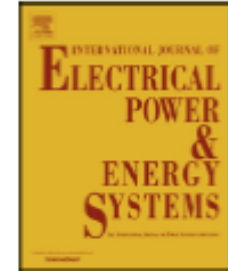
Electrical Power and Energy Systems 116 (2020) 105547



Contents lists available at ScienceDirect

Electrical Power and Energy Systems

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ijepes](http://www.elsevier.com/locate/ijepes)



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



Silvia Piliškić<sup>a,\*</sup>, Ivo Uglešić<sup>b</sup>, Bruno Jurišić<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Croatian Transmission System Operator, Croatia

<sup>b</sup> University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Croatia

<sup>c</sup> KONČAR Electrical Engineering Institute, Croatia



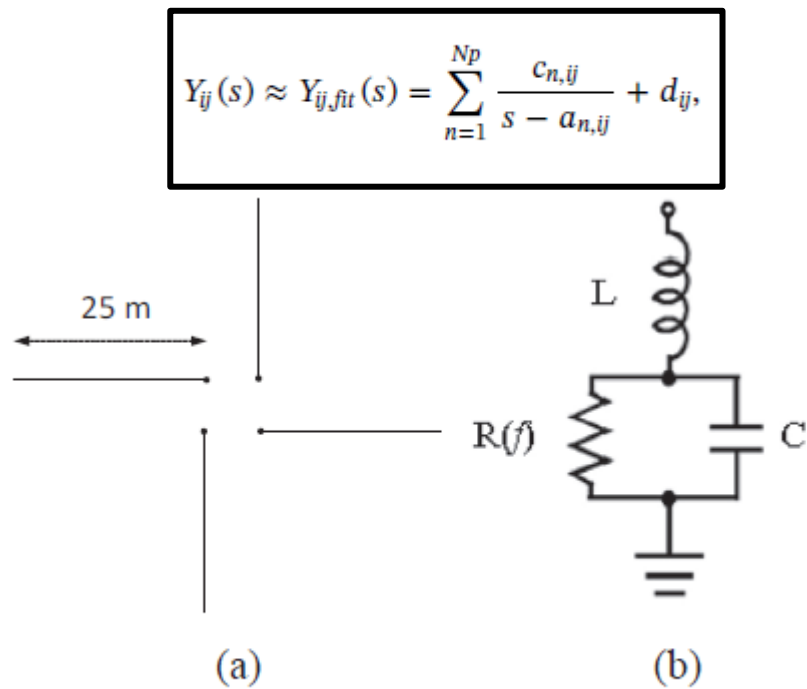


Fig. 4. 4 × L arrangement of the tower grounding system.

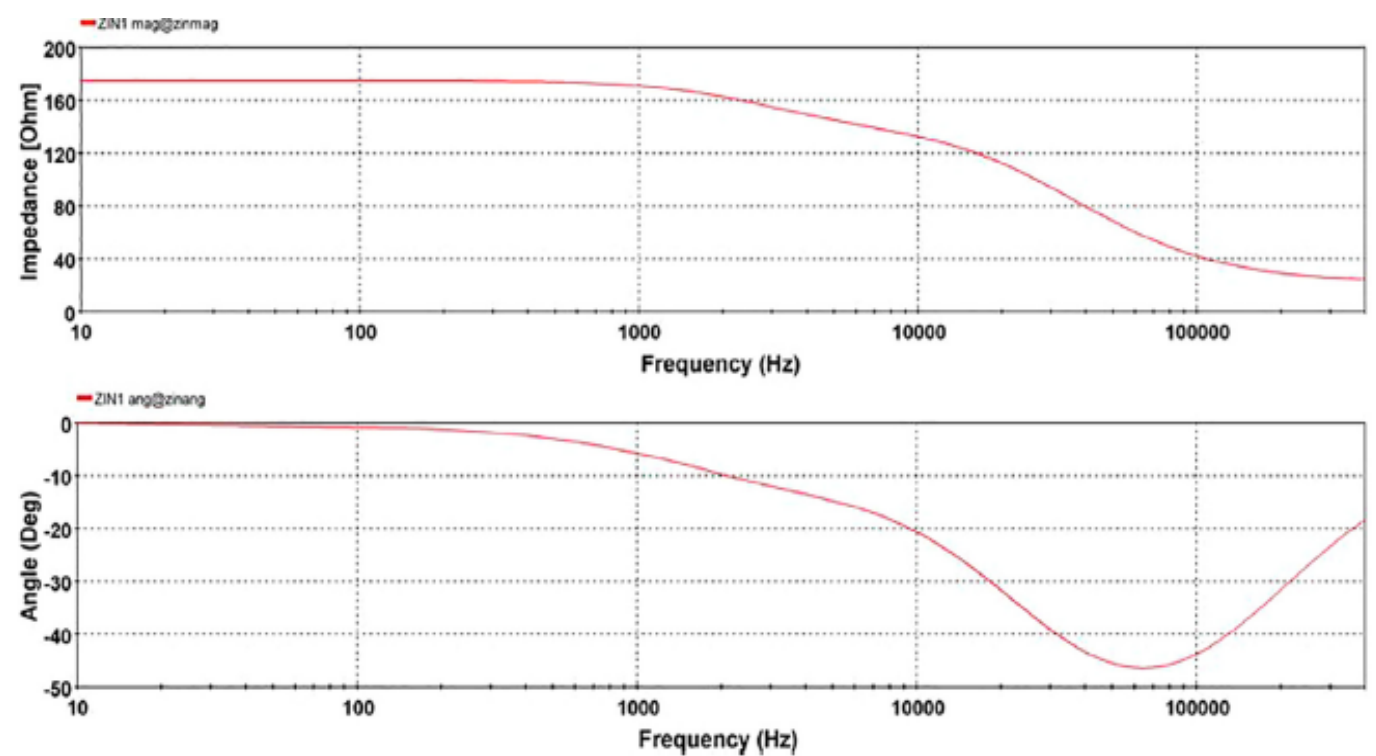


Fig. 8. Input impedance of the frequency-dependent tower grounding electrode for the specific soil resistivity 5724 Ωm modelled in an EMTP-type software.

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

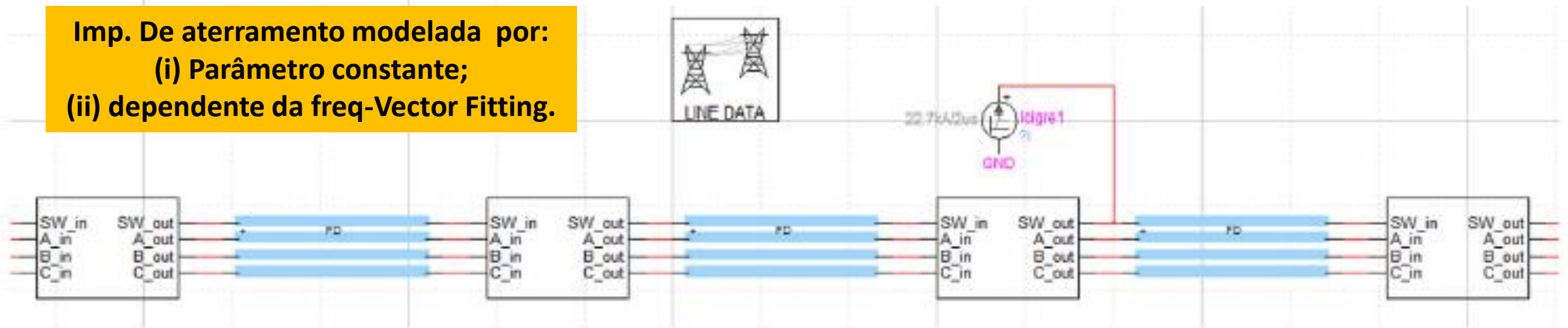
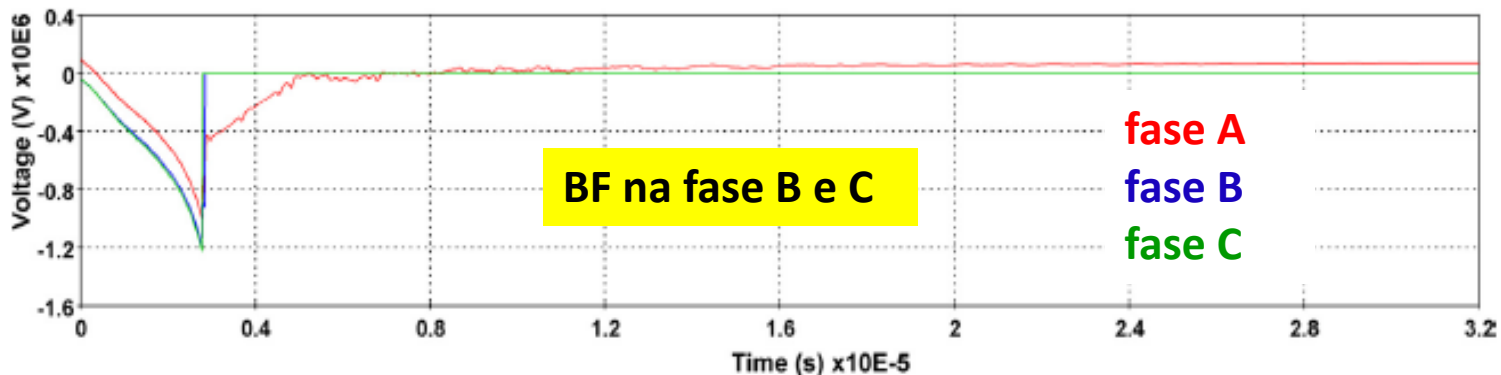
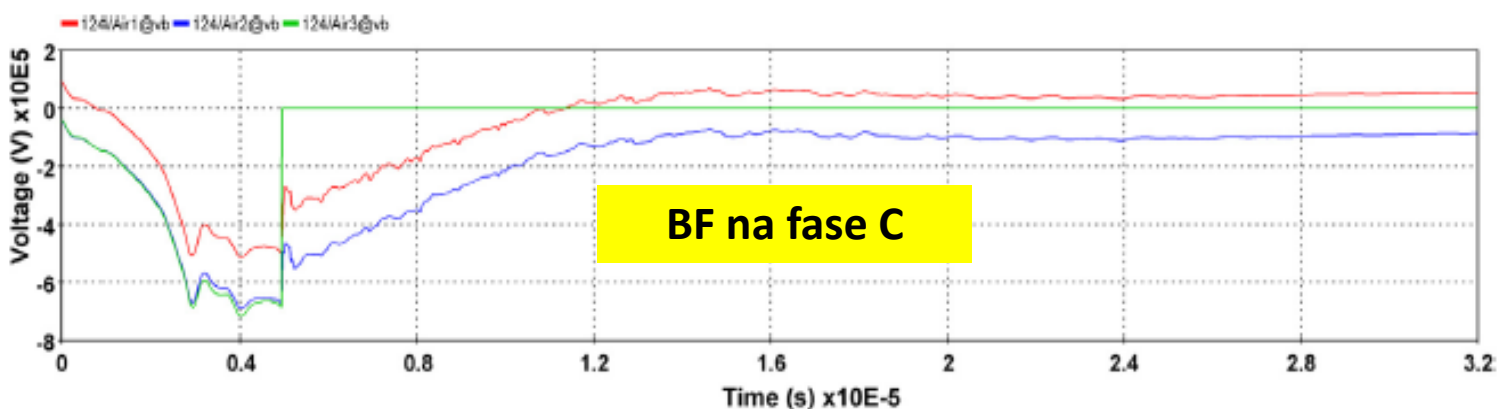


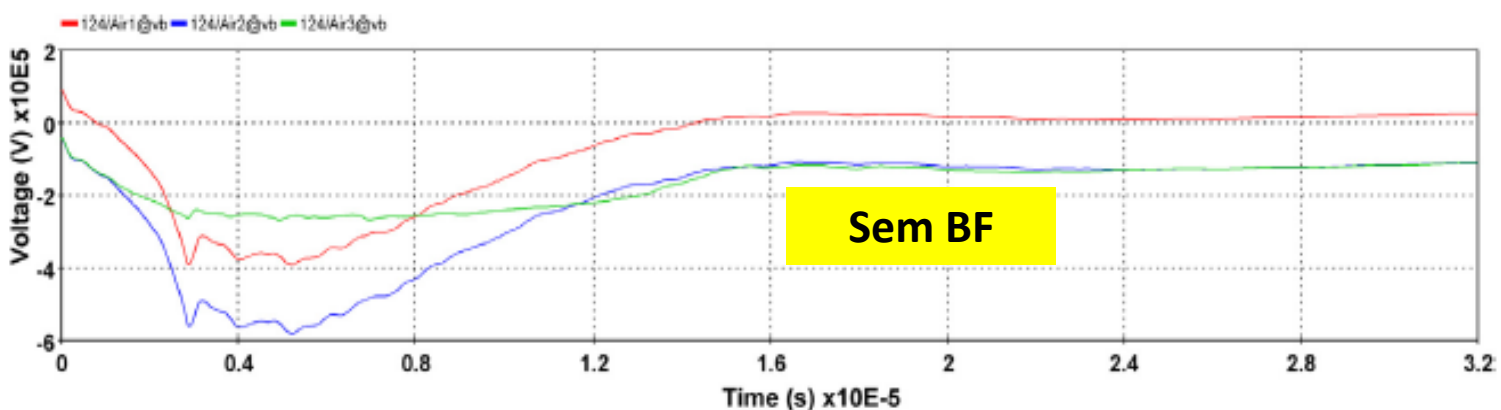
Fig. 9. A part of the EMTP model (3 spans) of the lightning strike to the 110 kV overhead line.



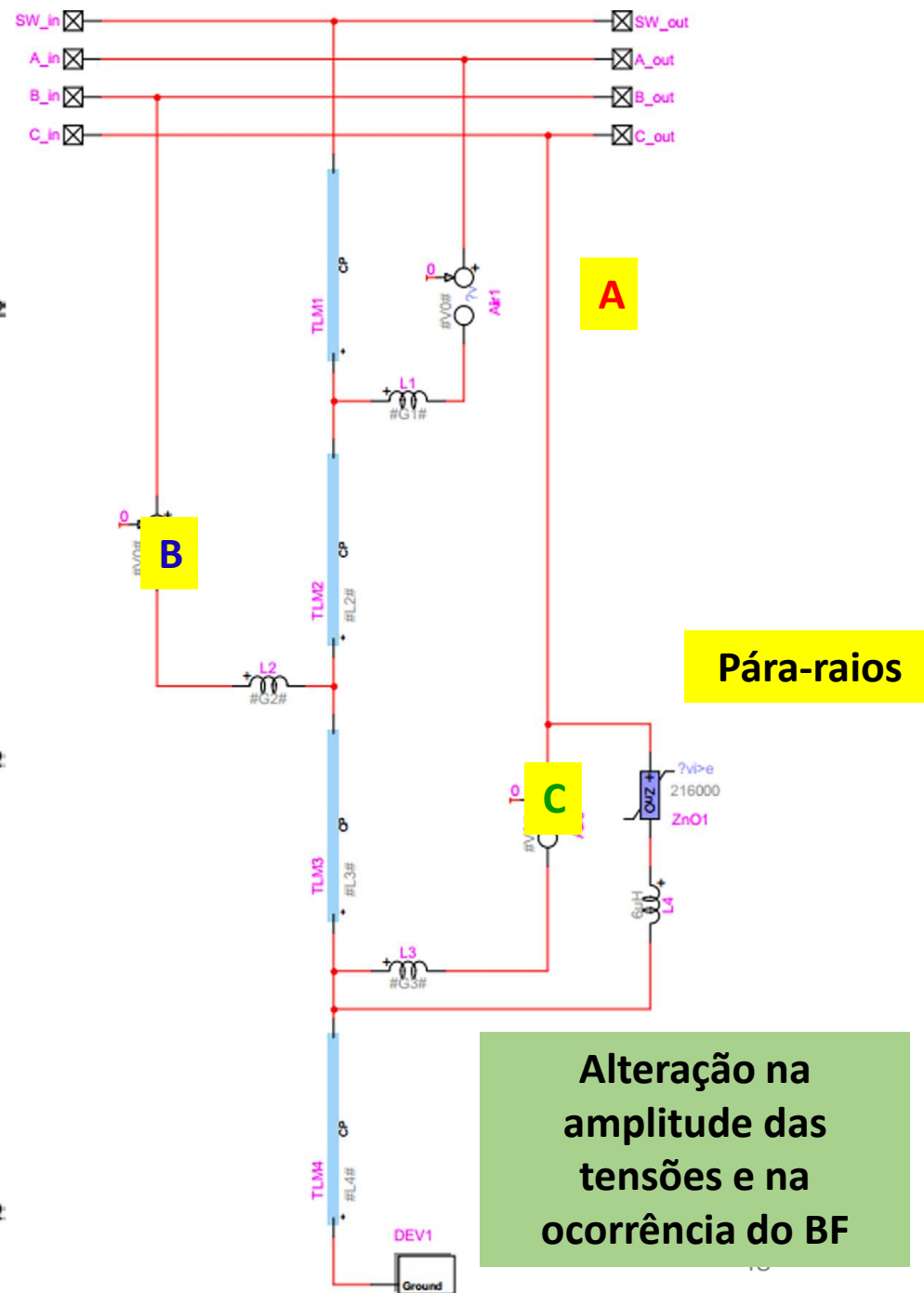
(i) with constant tower grounding resistance equal to  $175 \Omega$



(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.

- Artigos de interesse

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

(Impacto das torres e fontes renováveis).

[https://en.wikipedia.org/wiki/Yangtze\\_River\\_power\\_line\\_crossings](https://en.wikipedia.org/wiki/Yangtze_River_power_line_crossings) (Torre gigante China)

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=26&v=oBNv6jvCrtg&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=26&v=oBNv6jvCrtg&feature=emb_logo)

- (Torre gigante em Almerim, Pará)

- Obrigado!