

IT308 - Tópicos em Técnicas de Alta Tensão II

Aterramento no Sistema Elétrico Aula-01

Anderson Ricardo Justo de Araújo
Pós-doutorado-UNICAMP

Anderson Ricardo Justo de Araújo

- [E-mails: ajusto@dsce.fee.unicamp.br](mailto:ajusto@dsce.fee.unicamp.br) ou
- anderjusto@yahoo.com.br
- [Skype: andersonjusto3](skype:andersonjusto3)

Tópicos

- Fenômenos transitórios;
- Objetivos do aterramento;
- Aterramento elétrico em baixas frequências;
- Aterramento elétrico em altas frequências;
- Grounding Potential Rise (GPR)

O que é um transitório eletromagnético (TEM)?

Um transitório eletromagnético é uma manifestação ou resposta elétrica local ou adjacente ocasionada por alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema elétrico (SE);

Os SEs estão sujeitos a diversos fenômenos transitórios que compreendem desde variações eletromecânicas, caracterizados por baixas frequências, até as variações abruptas das tensões e correntes causadas por mudanças bruscas nas condições do estado de equilíbrio ¹.

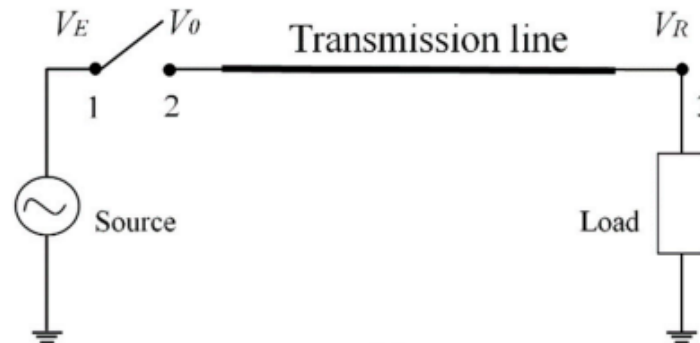


1-Transitórios por Gilson Paulillo, Mateus Duarte Teixeira e Ivandro Bacca, Qualidade de Energia, Megabarre Brasil

Classificação dos fenômenos que originam TEM-Espectro de frequência

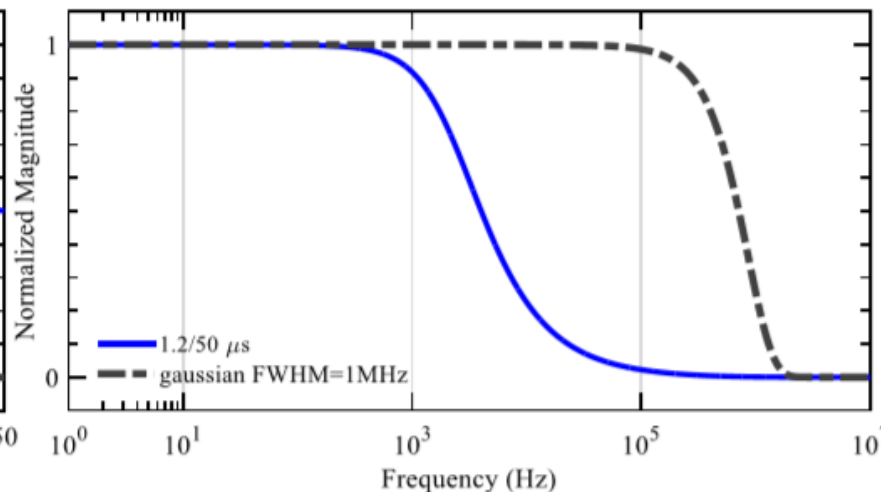
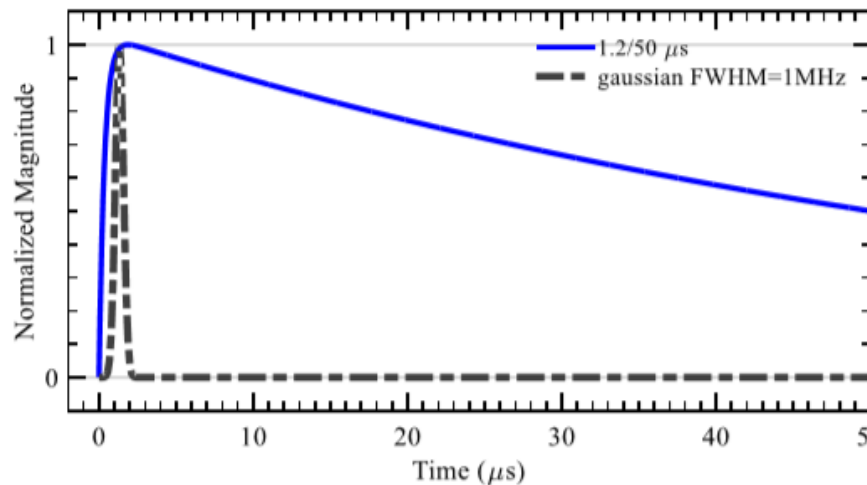
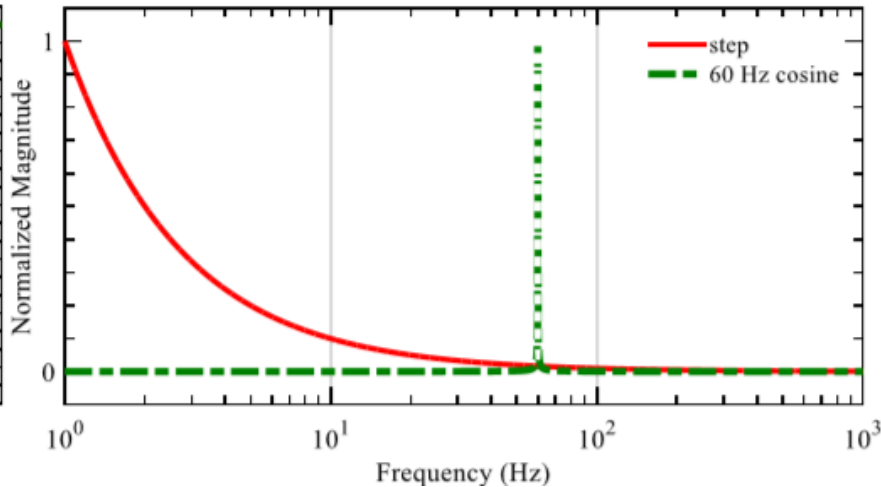
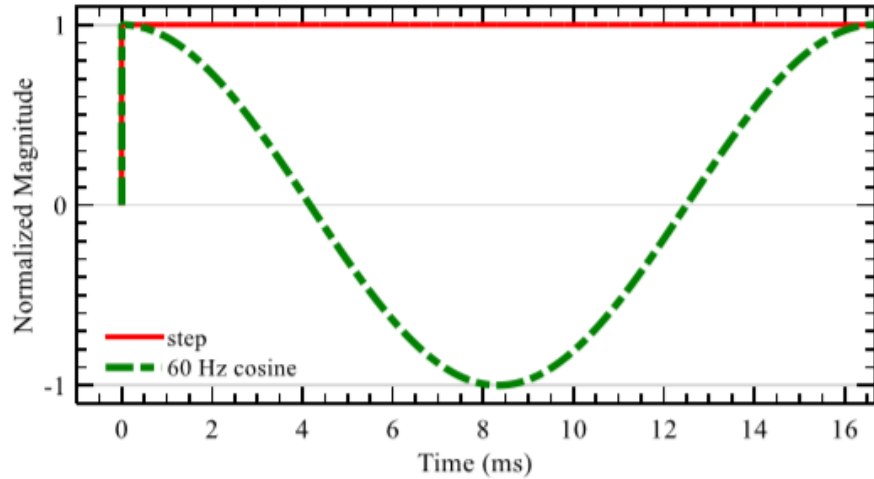
- Tabela Cigré¹

Origin	frequency range
Transformer energization ferroresonance	(DC) 0.1 Hz - 1 kHz
Load rejection	0.1 Hz - 3 kHz
Fault clearing	50/60 Hz - 3 kHz
Fault initiation	50/60 Hz - 20 kHz
Line energization	50/60 Hz - 20 kHz
Line reclosing	(DC) 50/60 Hz - 20 kHz
Transient recovery voltage	50/60 Hz - 20 kHz
Terminal faults	50/60 Hz - 20 kHz
Short line faults	50/60 Hz - 100 kHz
Multiple restrikes of circuit breaker	10 kHz - 1 MHz
Lightning surges, faults in substations	10 kHz - 3 MHz
Disconnecter switching (single restrike) and faults in GIS	100 kHz - 50 MHz



1-Adaptado de: Cigré 39. (1990). GUIDELINES FOR REPRESENTATION OF NETWORK ELEMENTS WHEN CALCULATING TRANSIENTS.

Espectro de frequência dos fenômenos que originam os TEMs¹



Sinal no domínio do tempo



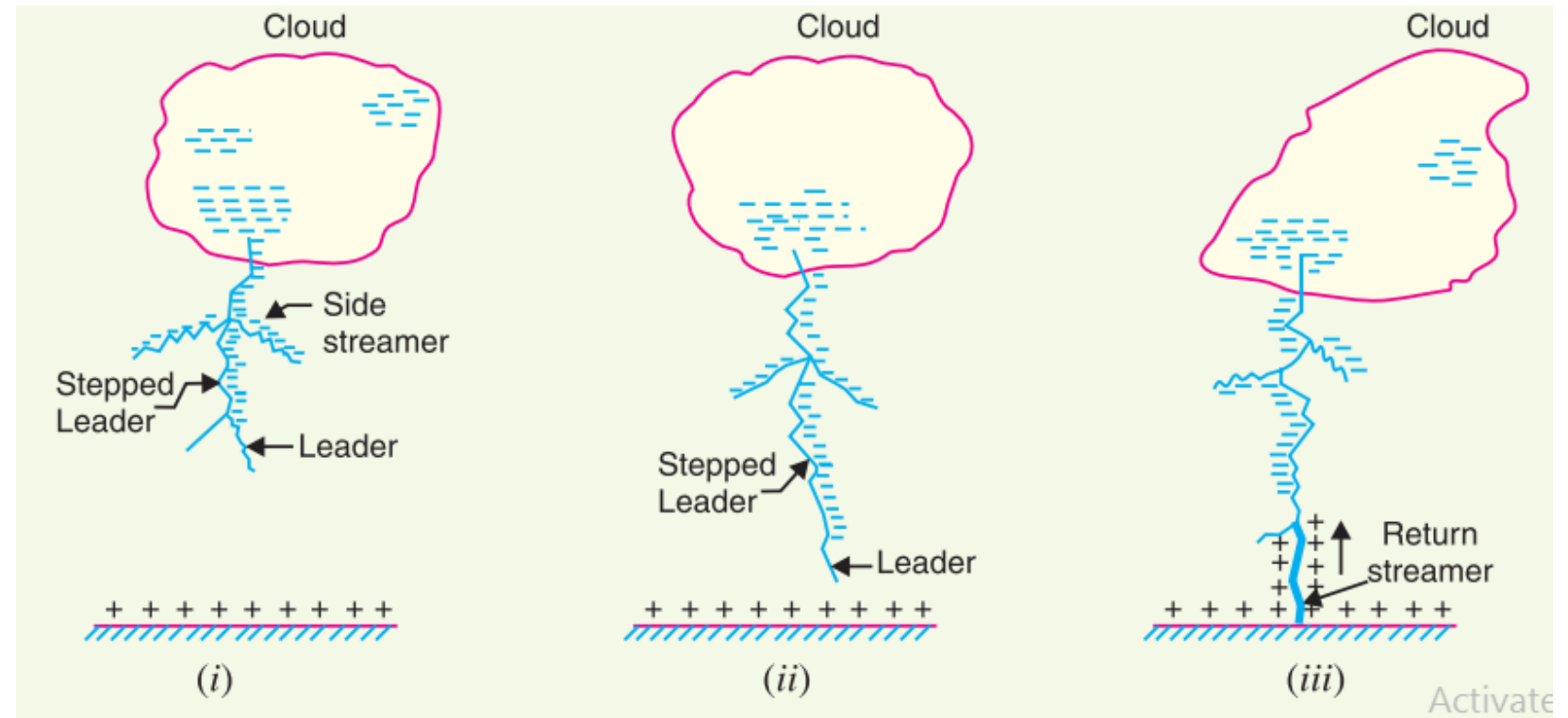
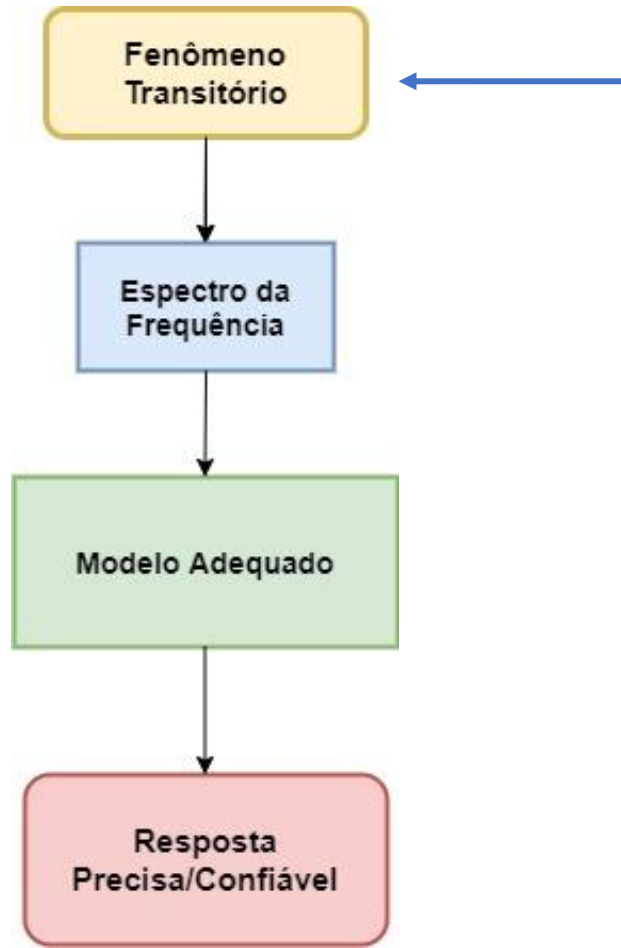
Aplicação da Transformada de Laplace.

Sinal no domínio da Frequência

1-Adaptado de: Caballero, P. T. (2018). INCLUSÃO DO EFEITO DA FREQUÊNCIA NO MODELO DE BERGERON: REPRESENTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CURTAS E LONGAS CONSIDERANDO TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS RESULTANTES DE OPERAÇÕES DE MANOBRAS E DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. UNESP-Ilha Solteira (Tese).

Descargas Atmosféricas (DAs)

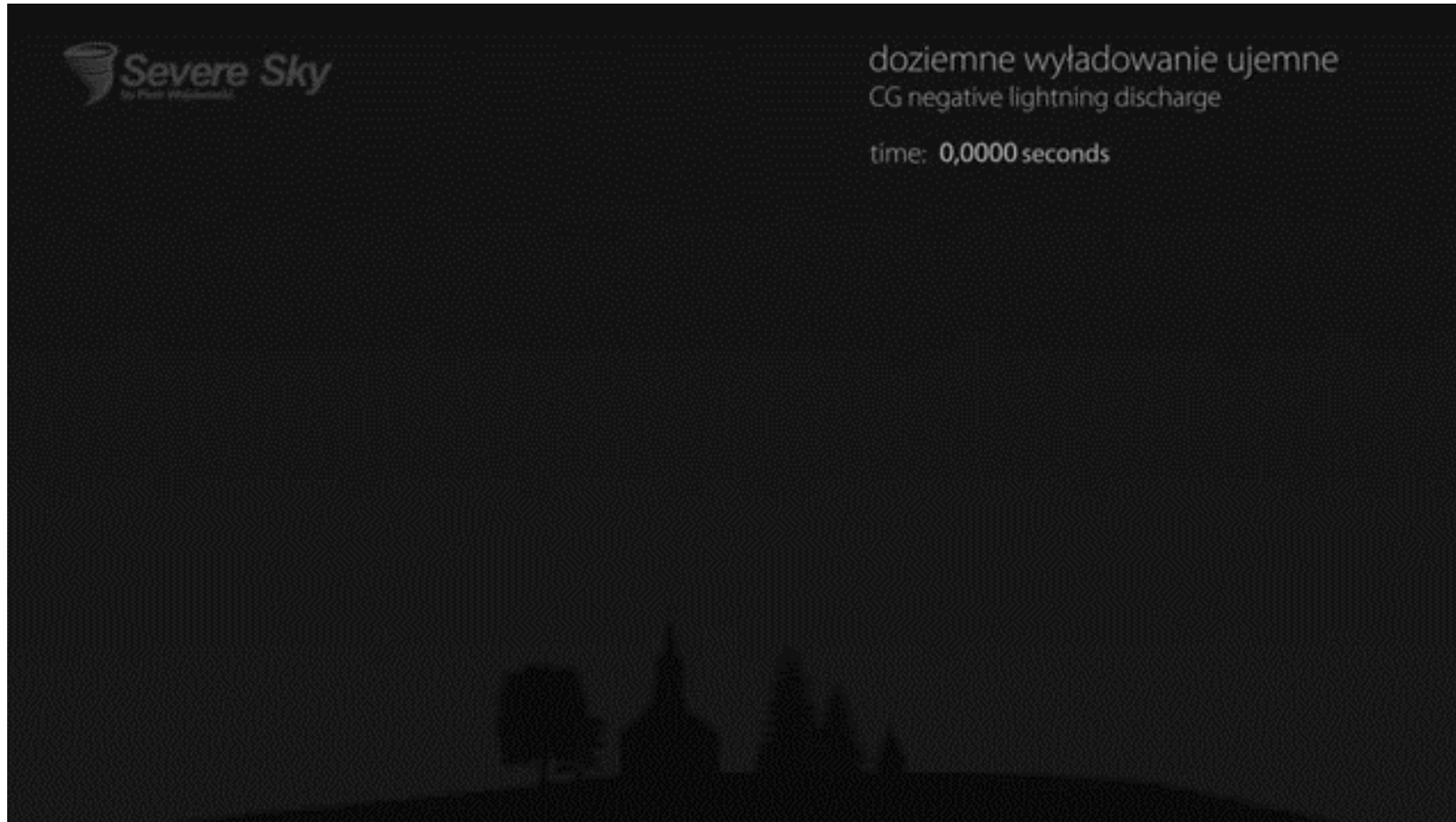
- primeira e subsequente descargas



Vídeos

- <https://www.youtube.com/watch?v=-qhD4CO0hD0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=uAOSu9LFb3g>
- <https://www.youtube.com/watch?v=RLWIBrweSU8>

Animação-Descarga Atmosférica

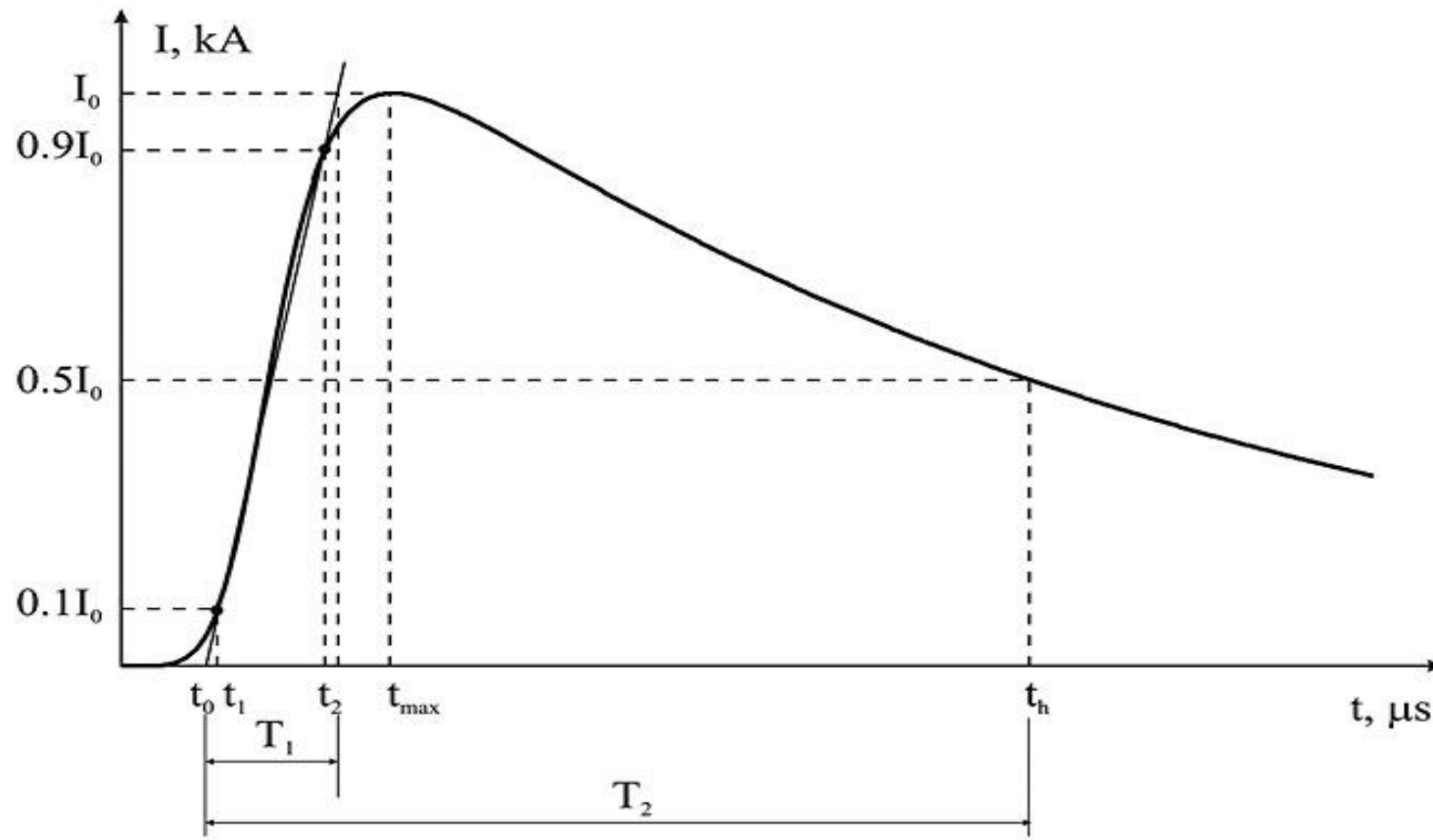
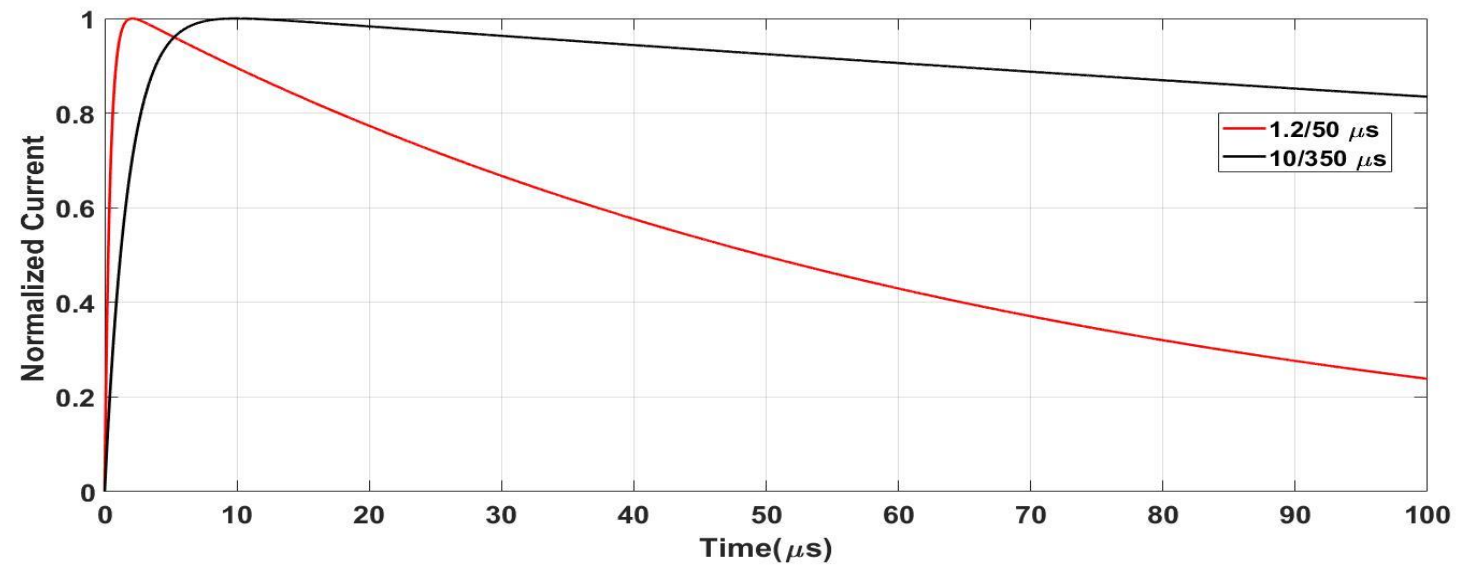




TVNweather.com



Equações que modelam as DAs

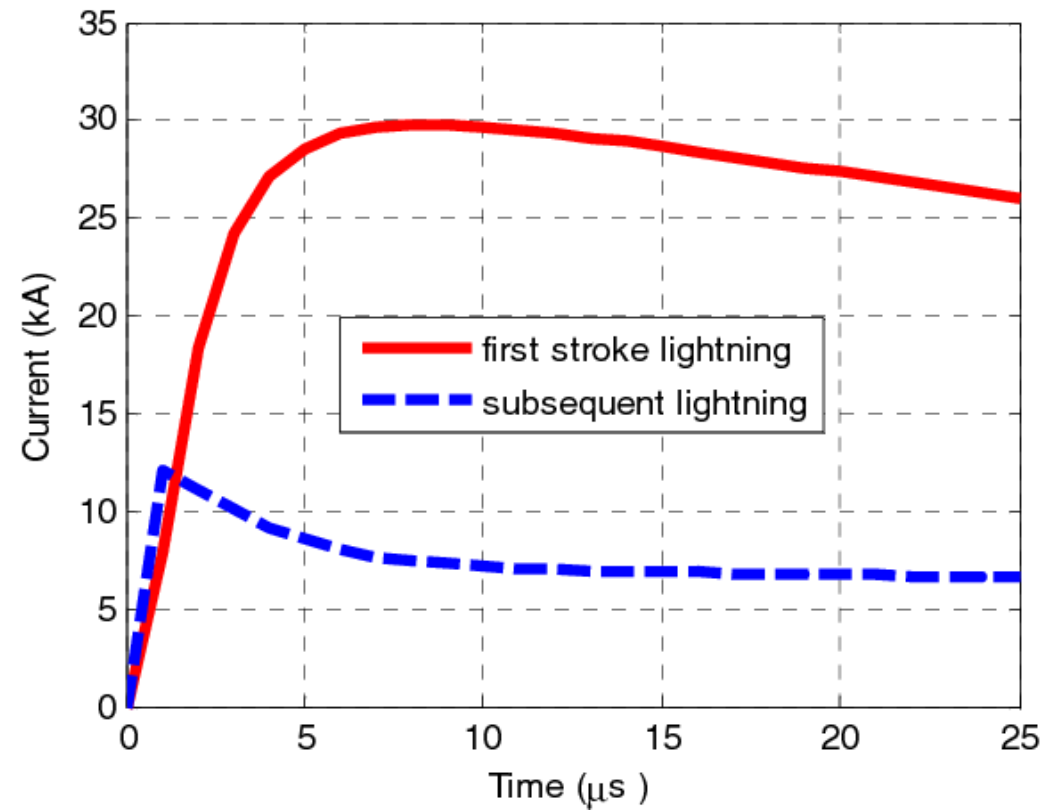


$$i(t) = I_0 (\exp(-at) - \exp(-bt))$$

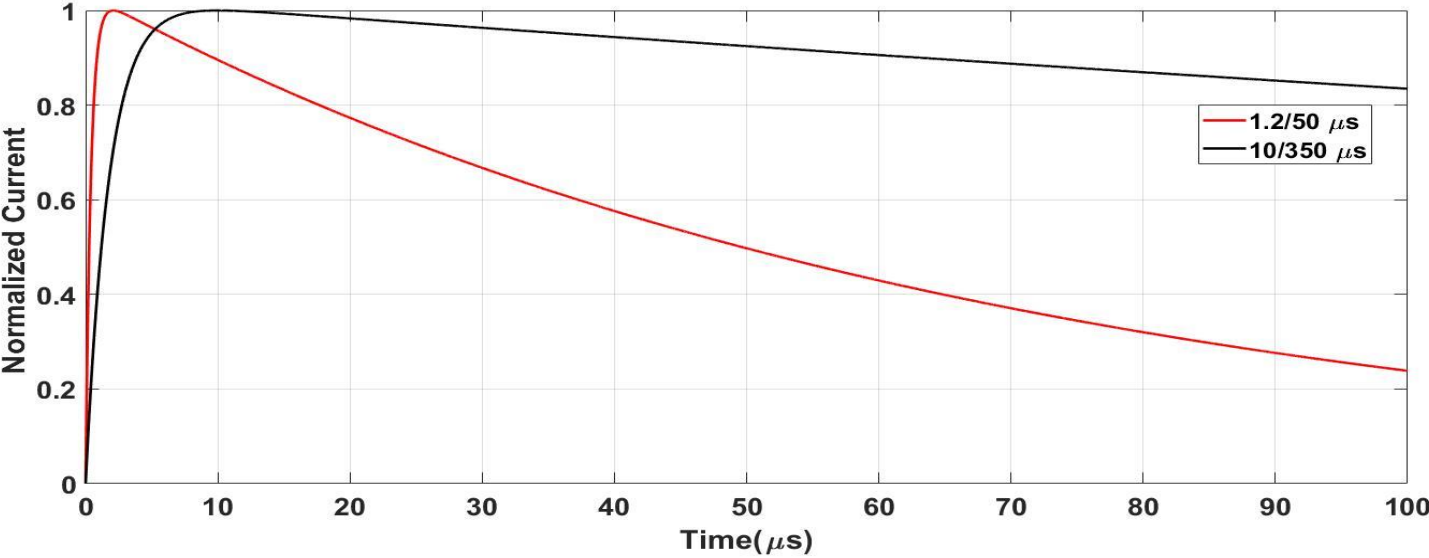
Função de Heidler

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

Parameters	I_0	τ_1	τ_2	n	I_0	τ_1	τ_2	n
First stroke	28	1.8	95	2	--	--	--	--
Subsequent stroke	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

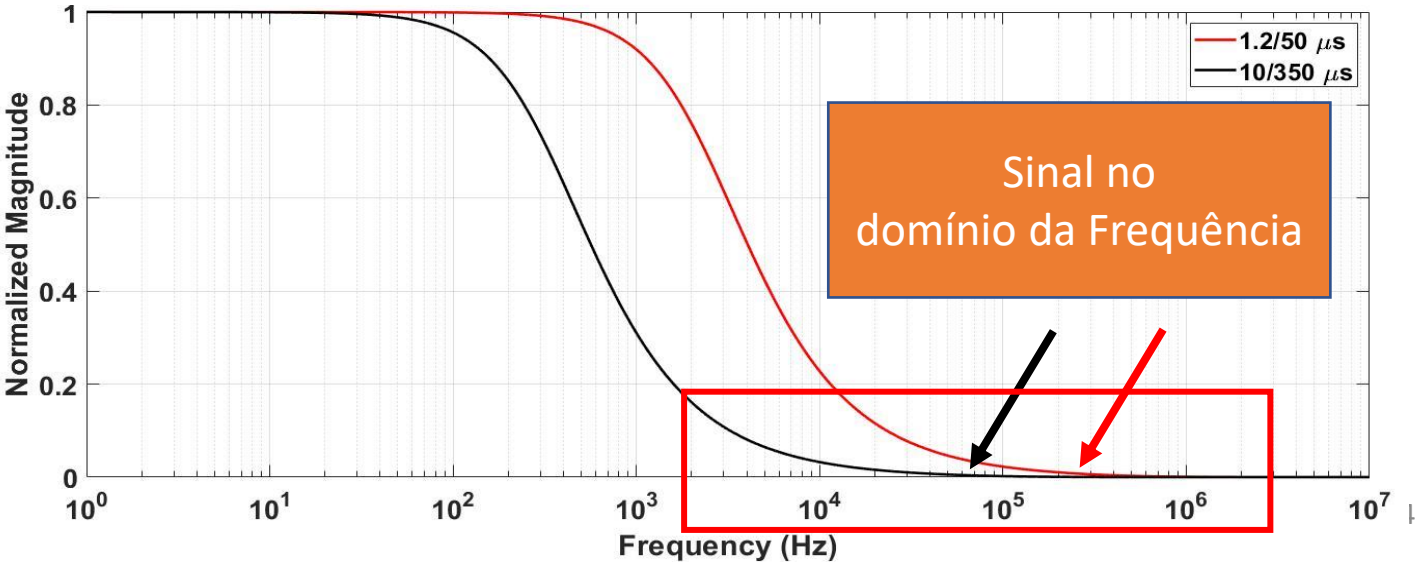


Espectro da freq. Descarga Atmosférica



$$i(t) = I_0 (\exp(-at) - \exp(-bt))$$

Transformada de Laplace.



$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^{n_1}}{1 + (t/\tau_1)^{n_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

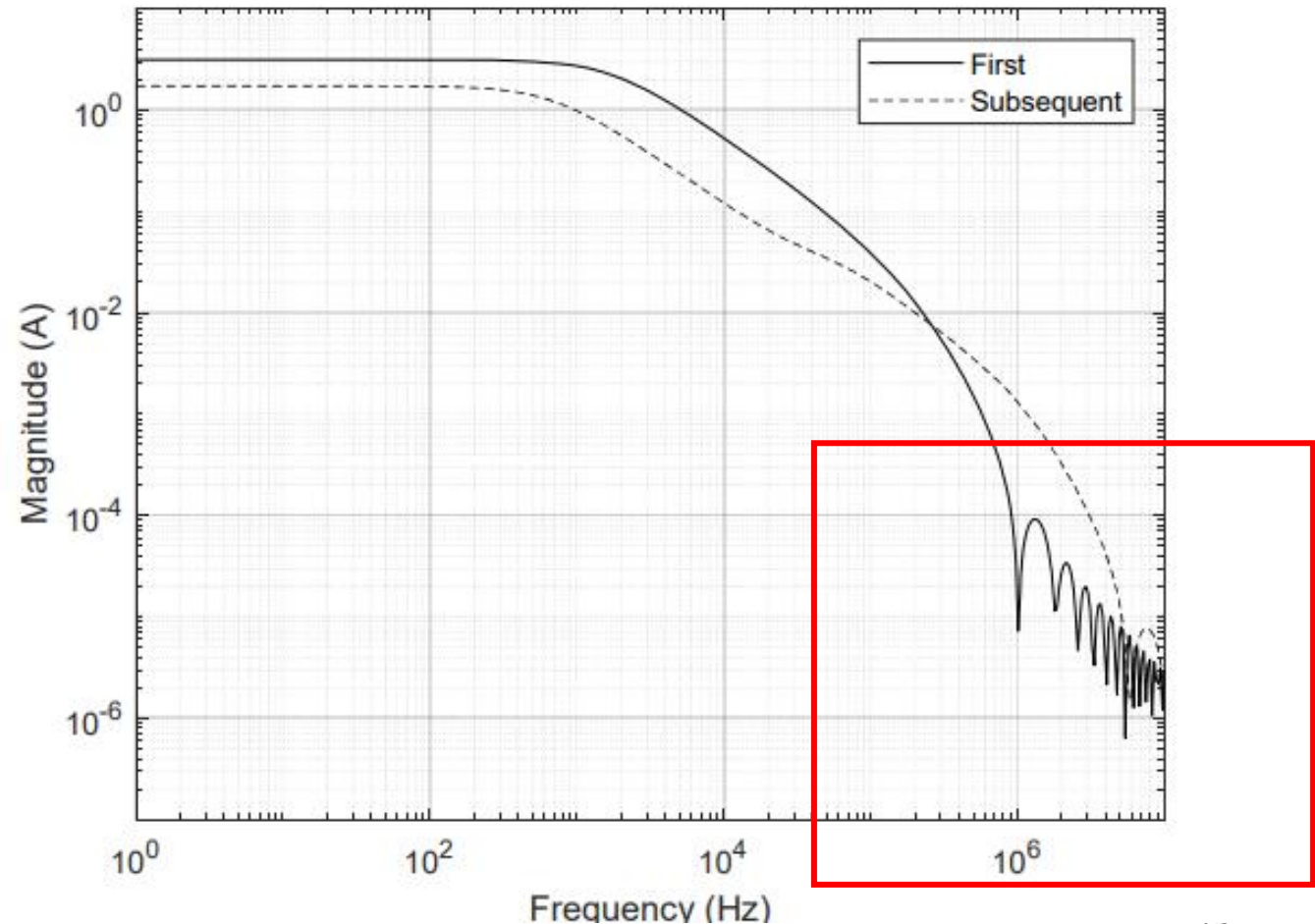
Transformada de Laplace.



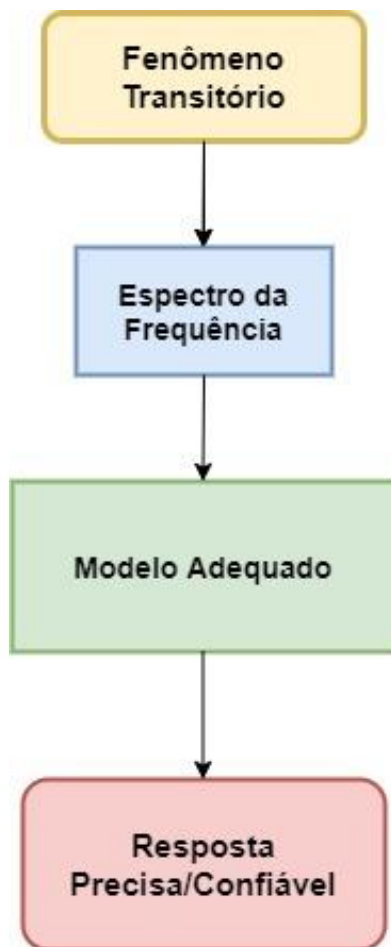
Sinal no domínio da Frequência



following parameters: $I_{01}=10.7$ kA, $\tau_{11}=0.25$ μ s, $\tau_{21}=2.5$ μ s, $n_1=2$, and $I_{02}=6.5$ kA, $\tau_{12}=2.1$ μ s, $\tau_{22}=230$ μ s, $n_2=2$. In both the cases, the magnitude of the current decreases quickly as frequency increases.

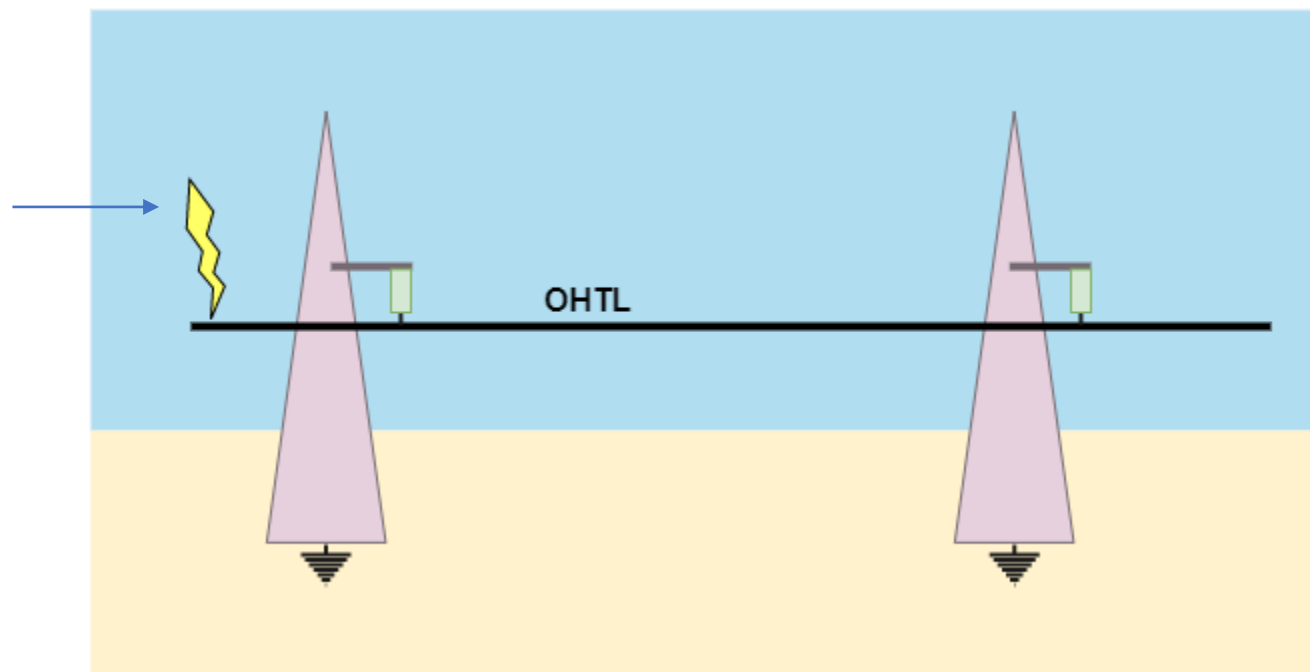


Qual a importância do espectro da frequência ?

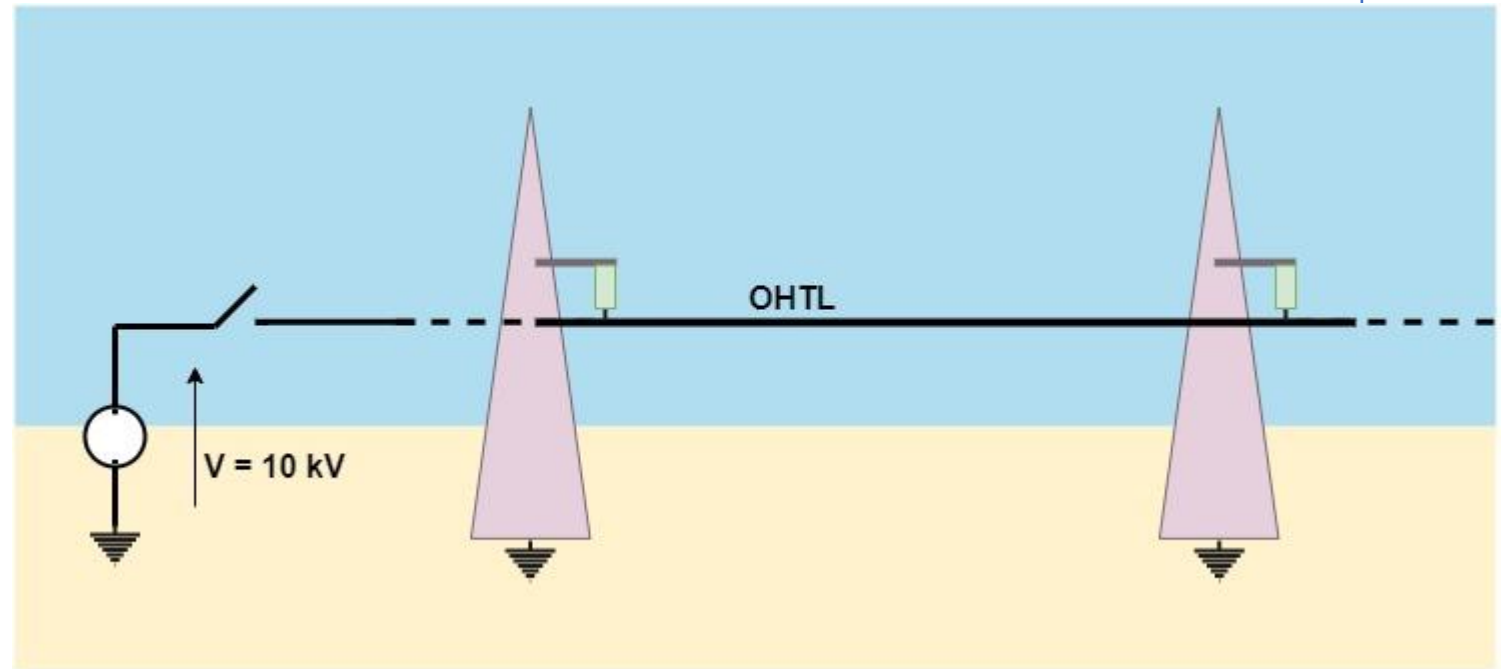
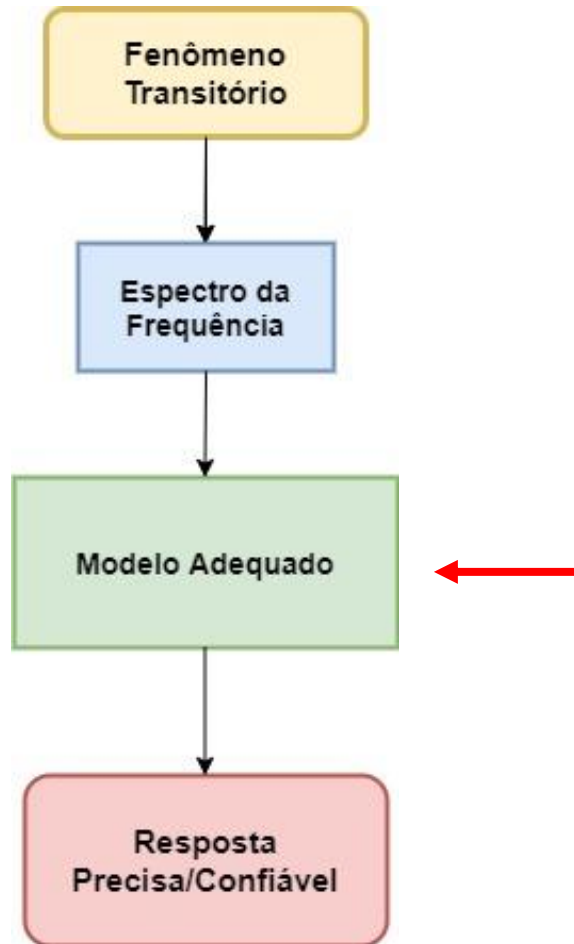


Linha de transmissão atingida por um raio

Descarga Atmosférica

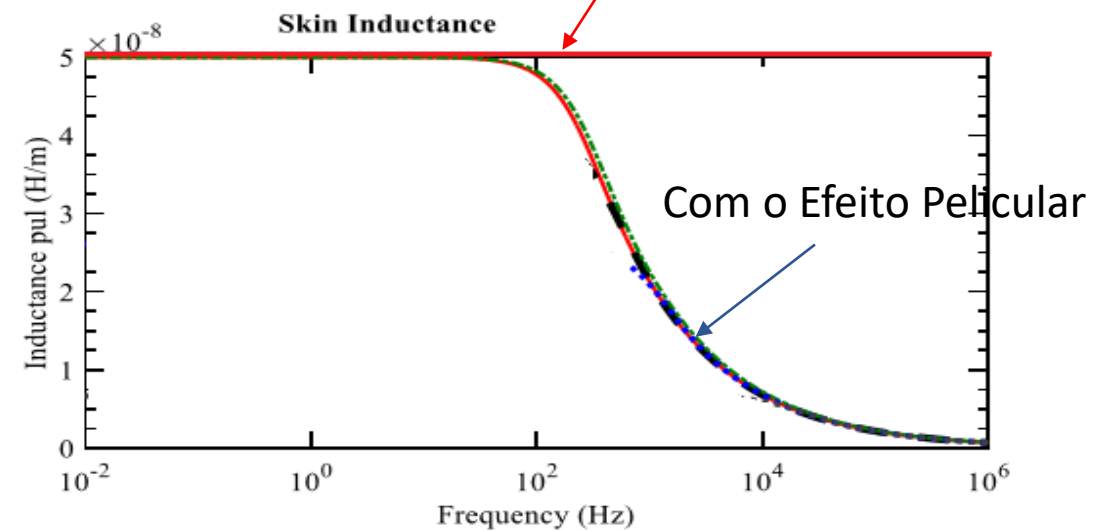
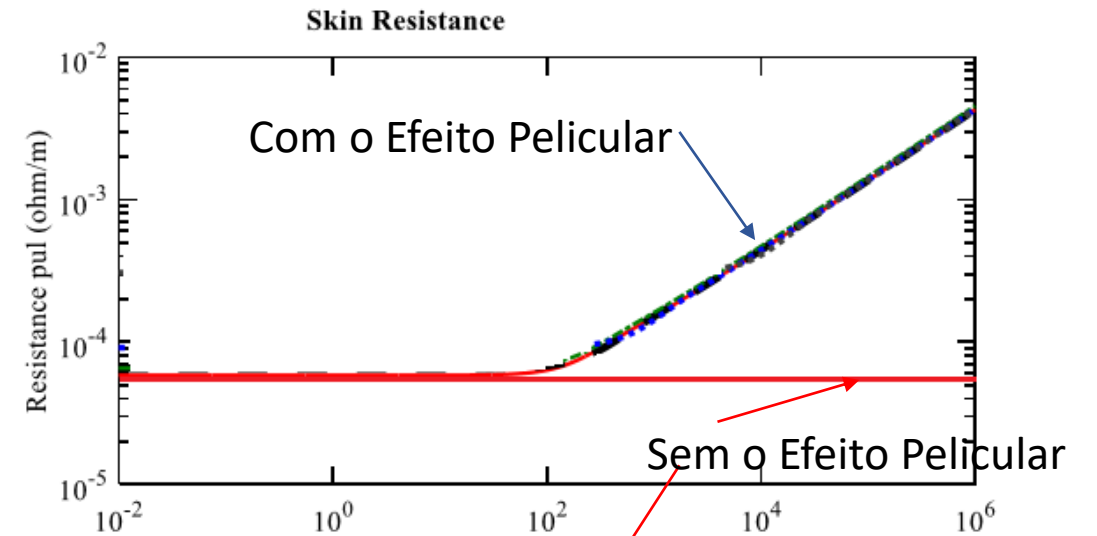
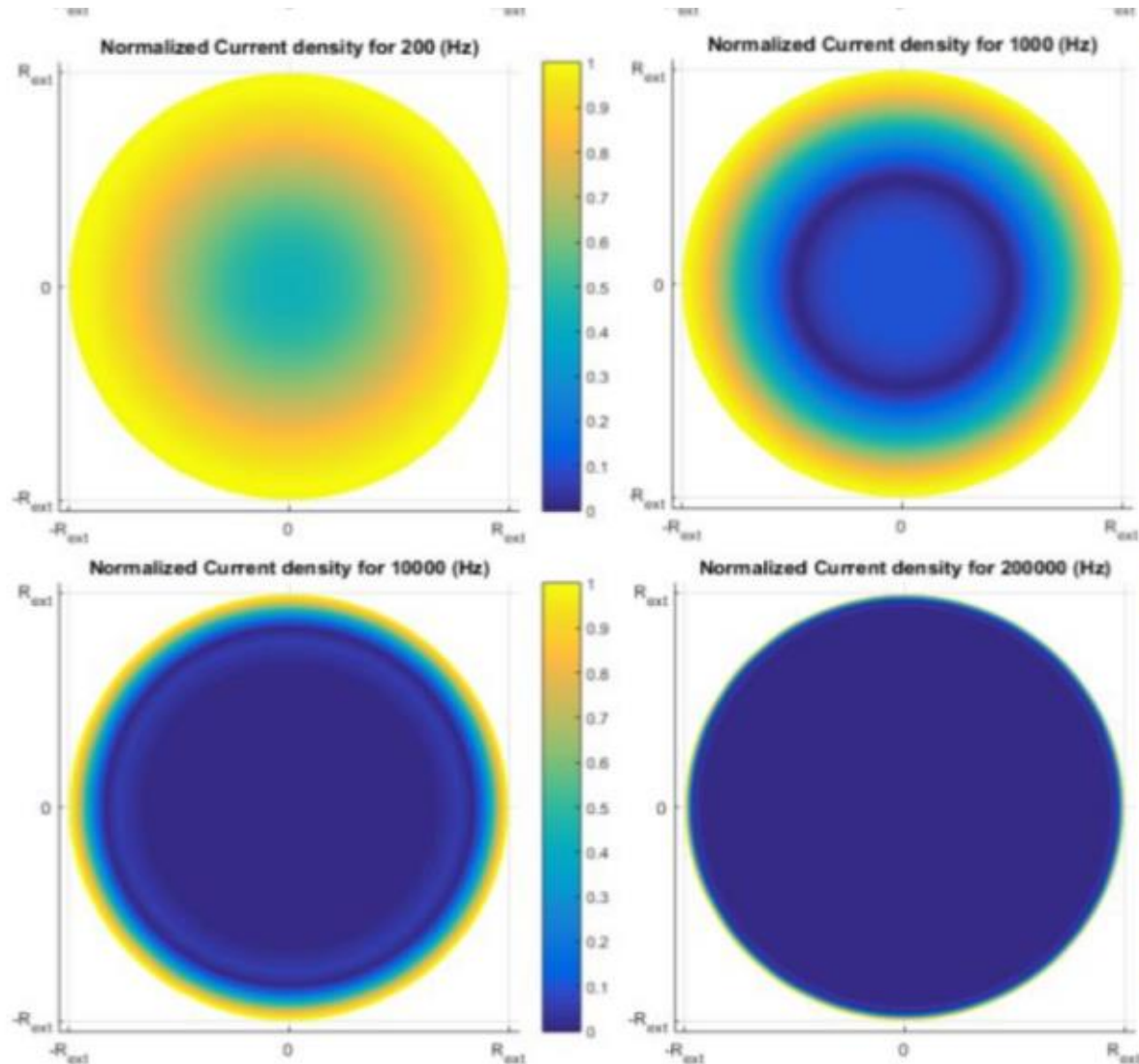


Modelagem da LT

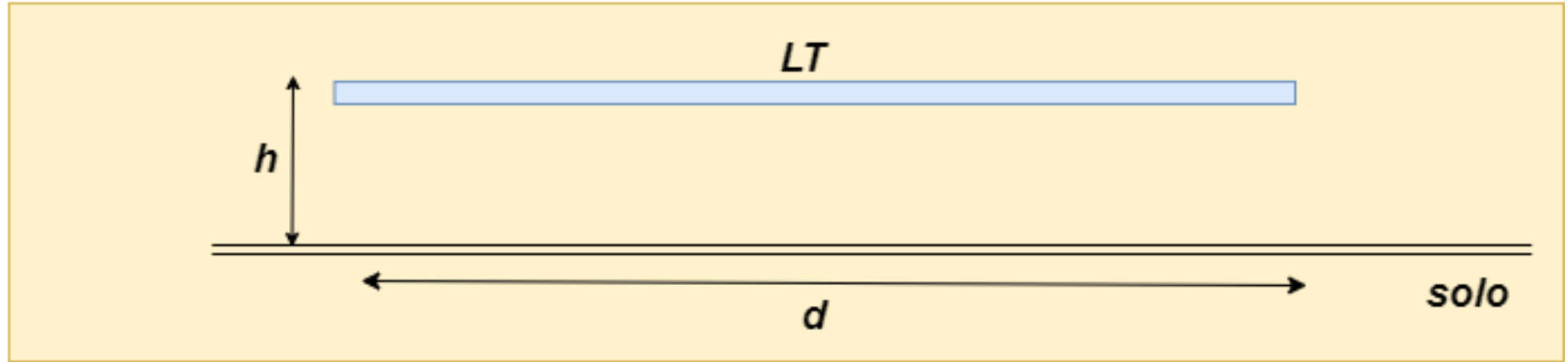
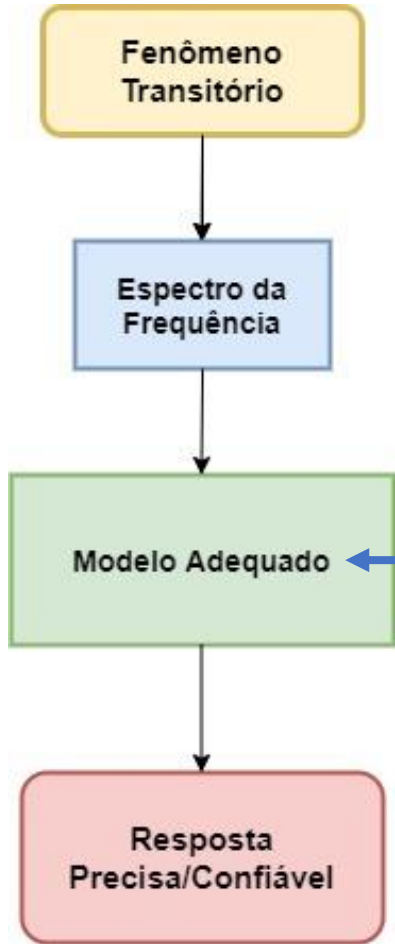


Parâmetros da linha (Resistência e Indutância)

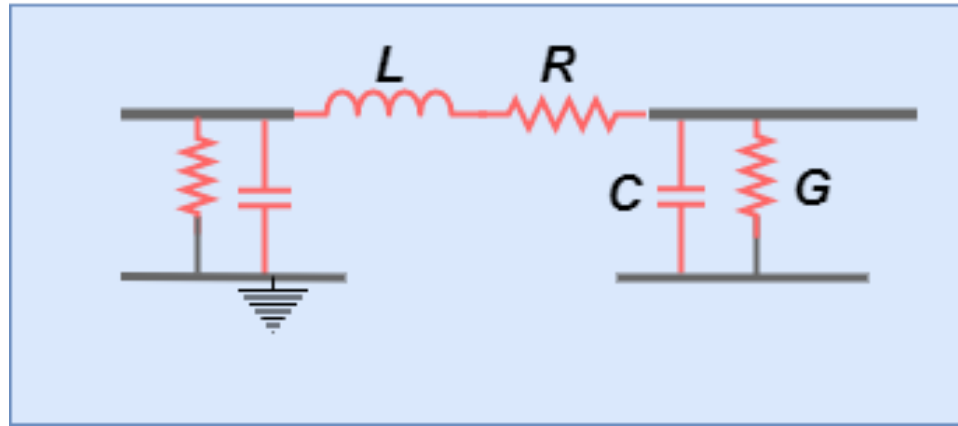
Efeito Pelicular



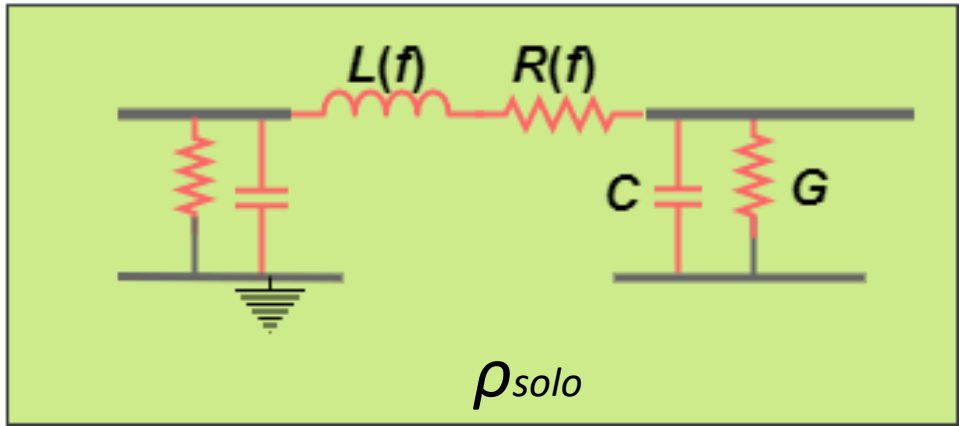
Modelo a Parâmetros Distribuídos



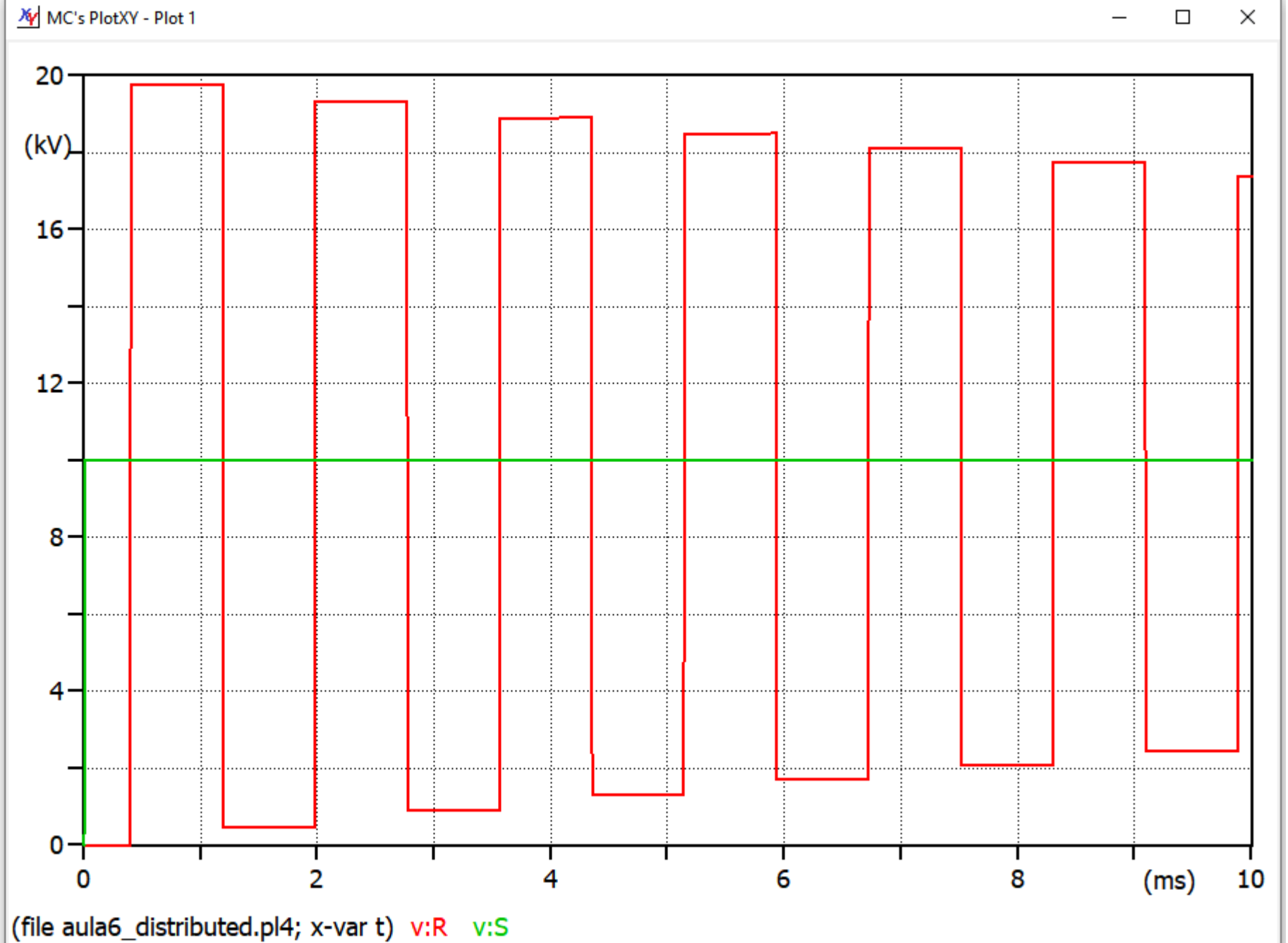
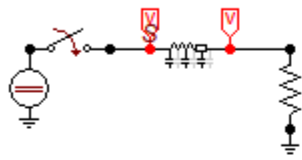
Modelo a Parâmetros Concentrados



Modelo J.Marti

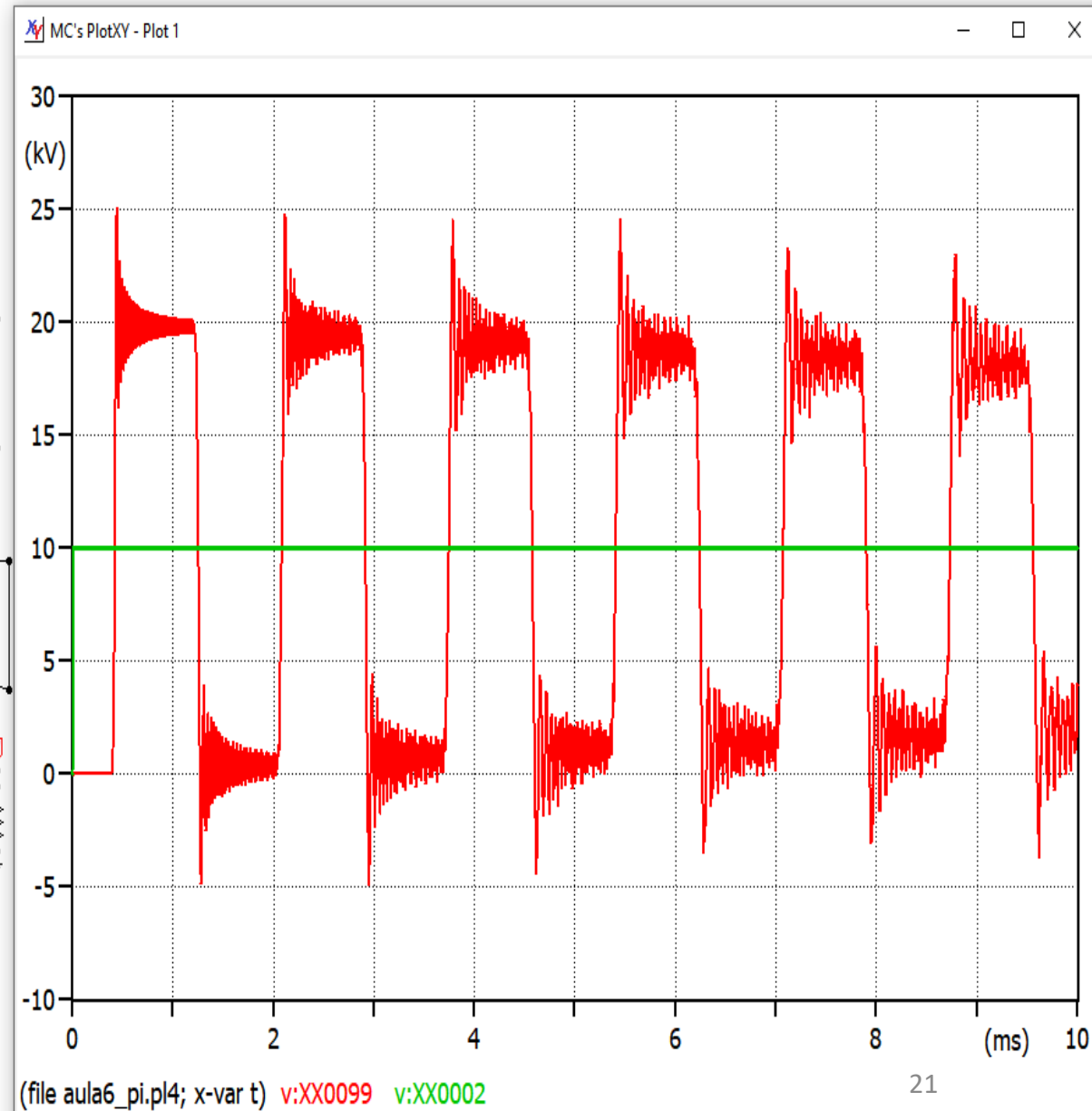


Modelo a P.
Distribuídos



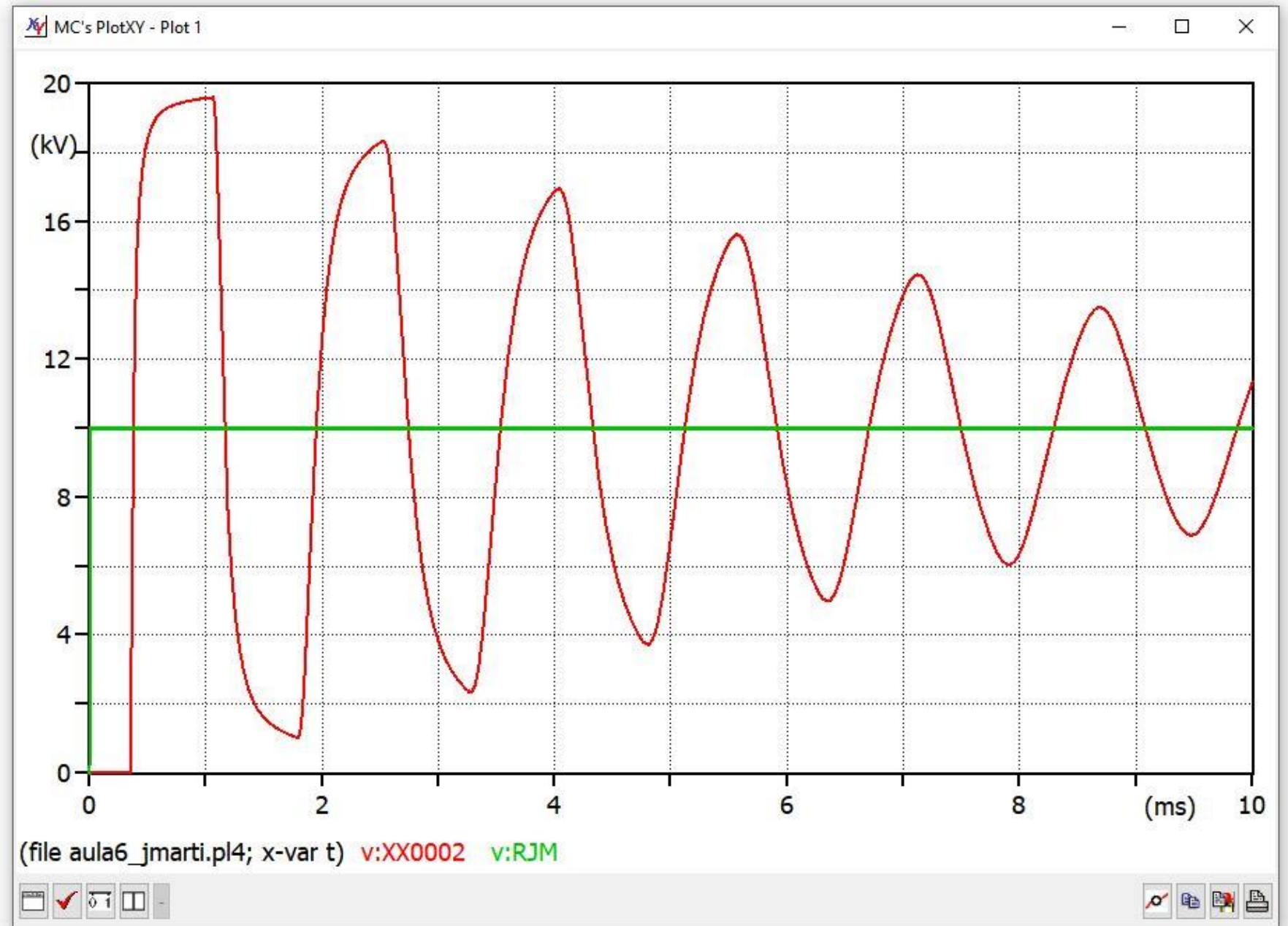
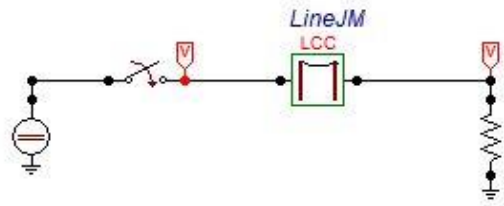
Simulações ATP

Modelo a P.
Concentrados



Simulações ATP

Modelo Jmarti



Modelos

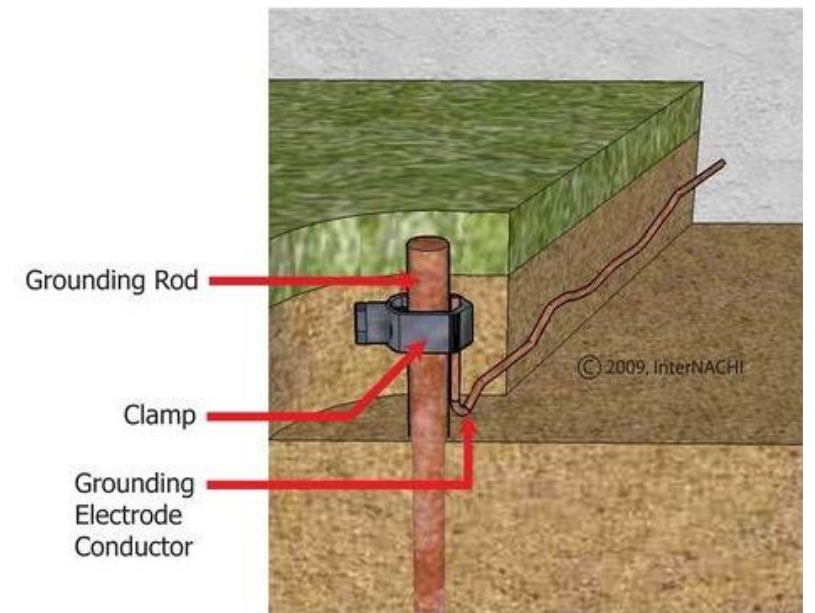
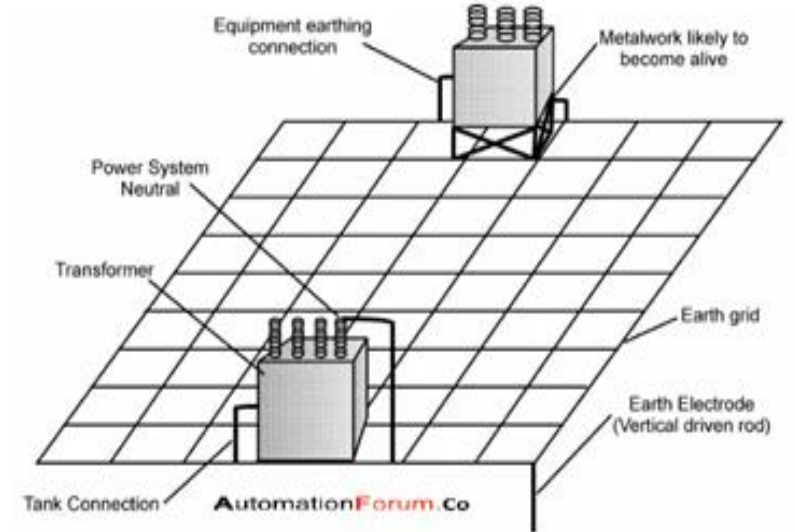
- Nota-se que distintos modelos podem ser empregados para estudar o mesmo fenômeno. Deve-se ter em mente quais são as peculiaridades em cada modelo.
- Os resultados experimentais são tidos como resposta exata (ou referência).
- Entretanto, a natureza de um fenômeno é sempre complexa e os modelos matemáticos/físicos tentam computar de forma mais precisas tais respostas.

Objetivos do Aterramento

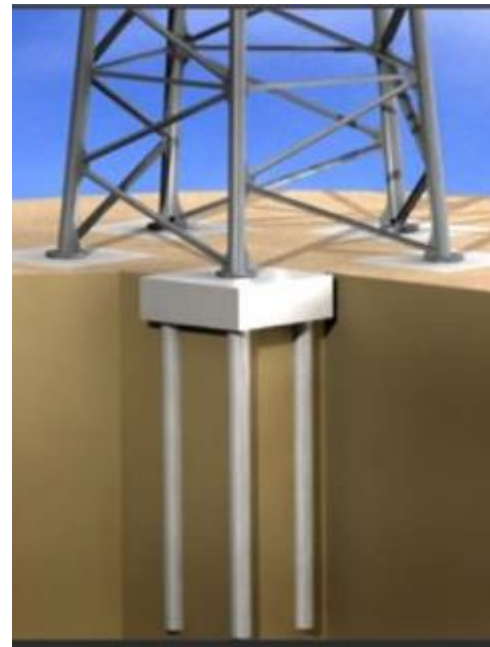
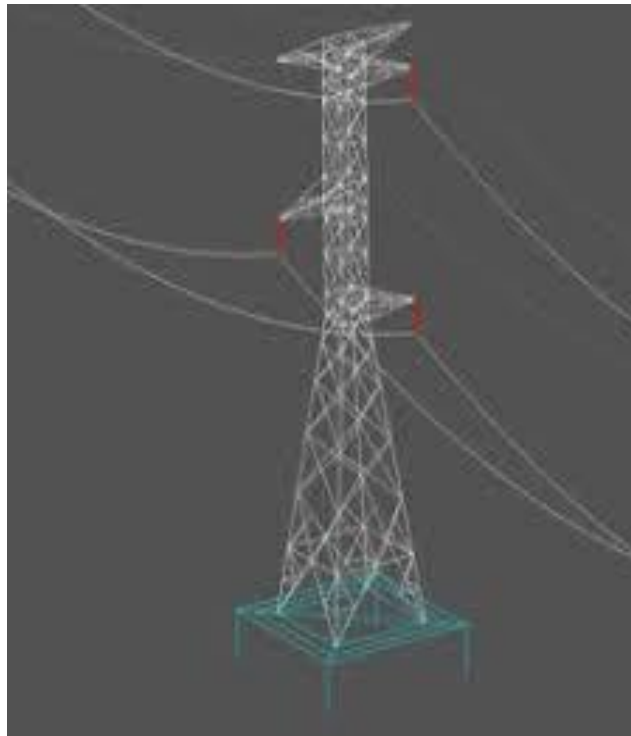
- Dissipar as correntes de falta/descargas atmosféricas da linha para solo;
- Reduzir as reflexões das ondas de corrente ao longo da torre de transmissão (↓ Backflashovers);
- Reduzir o potencial de passo e toque para a proteção de pessoas
- Garantir uma elevação de potencial que não danifique os equipamentos elétricos das subestações ;
- Estabelecer um potencial de referência para os equipamentos elétricos;

O aterramento é composto por três partes:

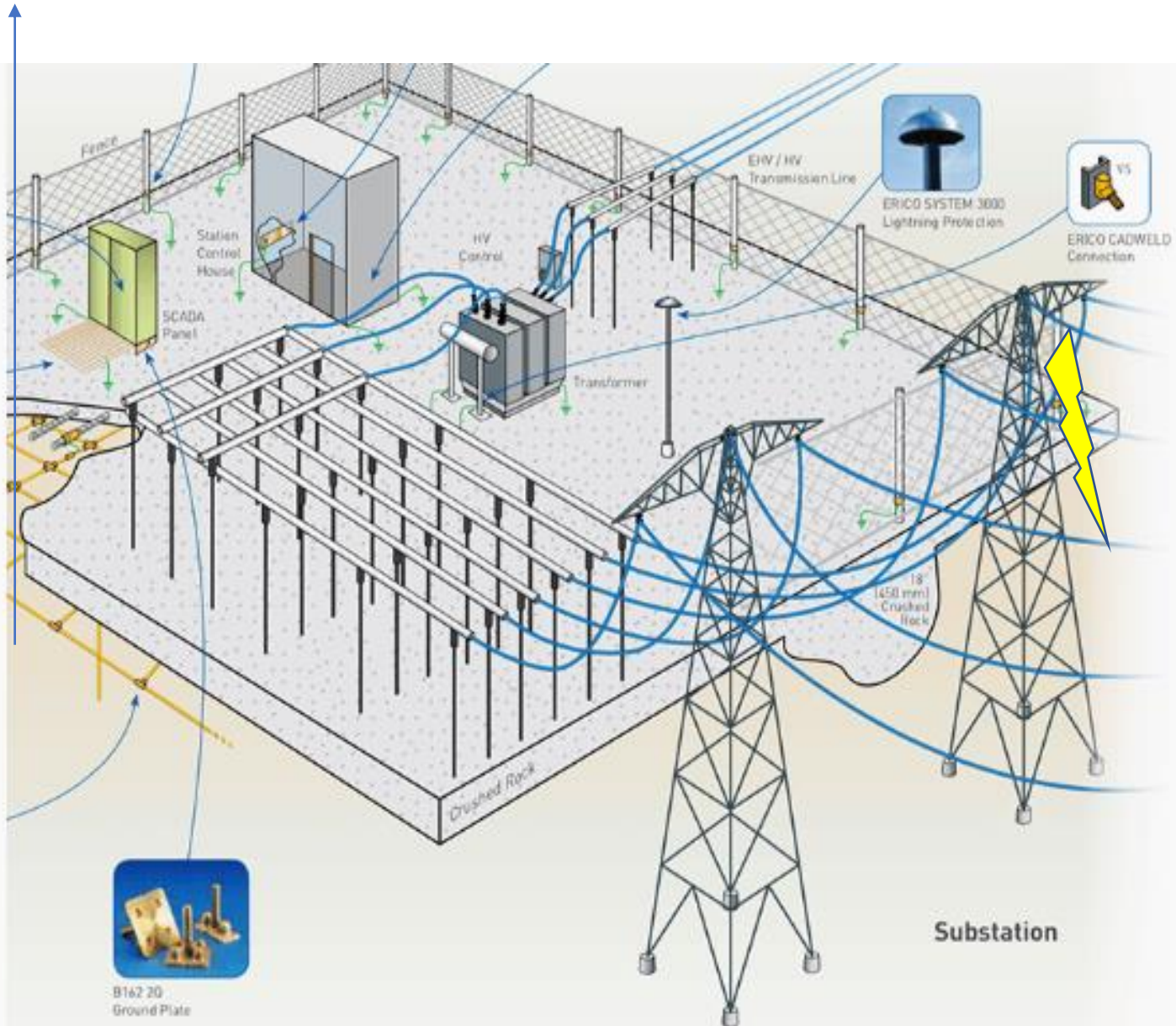
- ❖ Condutores metálicos que conectam um sistema elétrico/equipamento aos eletrodos/malha;
- ❖ Eletrodos metálicos enterrados em um dado solo;
- ❖ Solo que circunda o eletrodo.



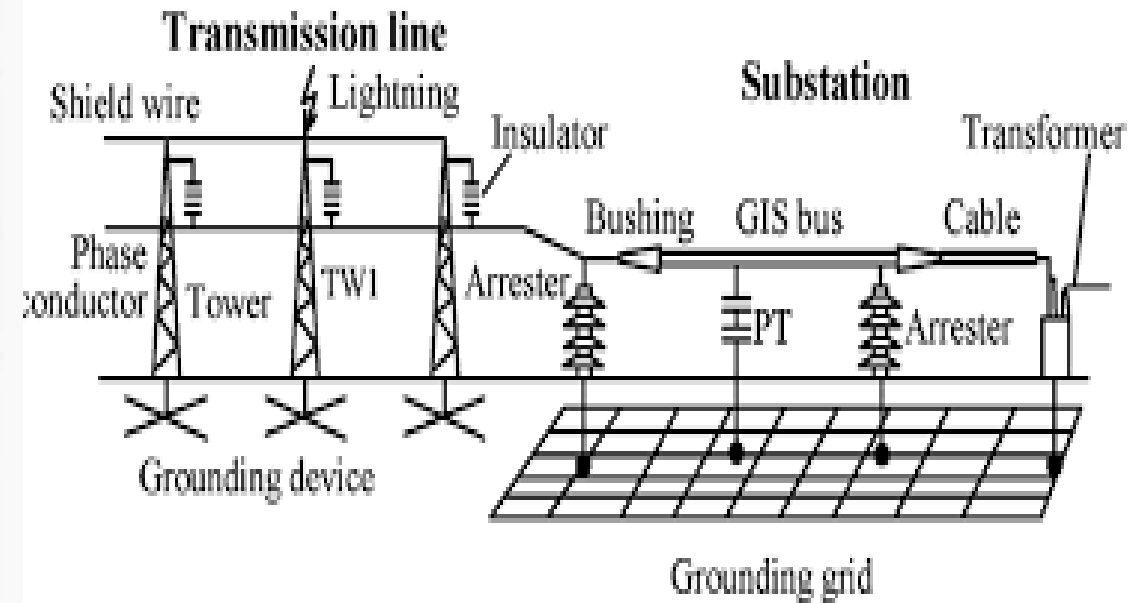
Aterramento em torres de transmissão



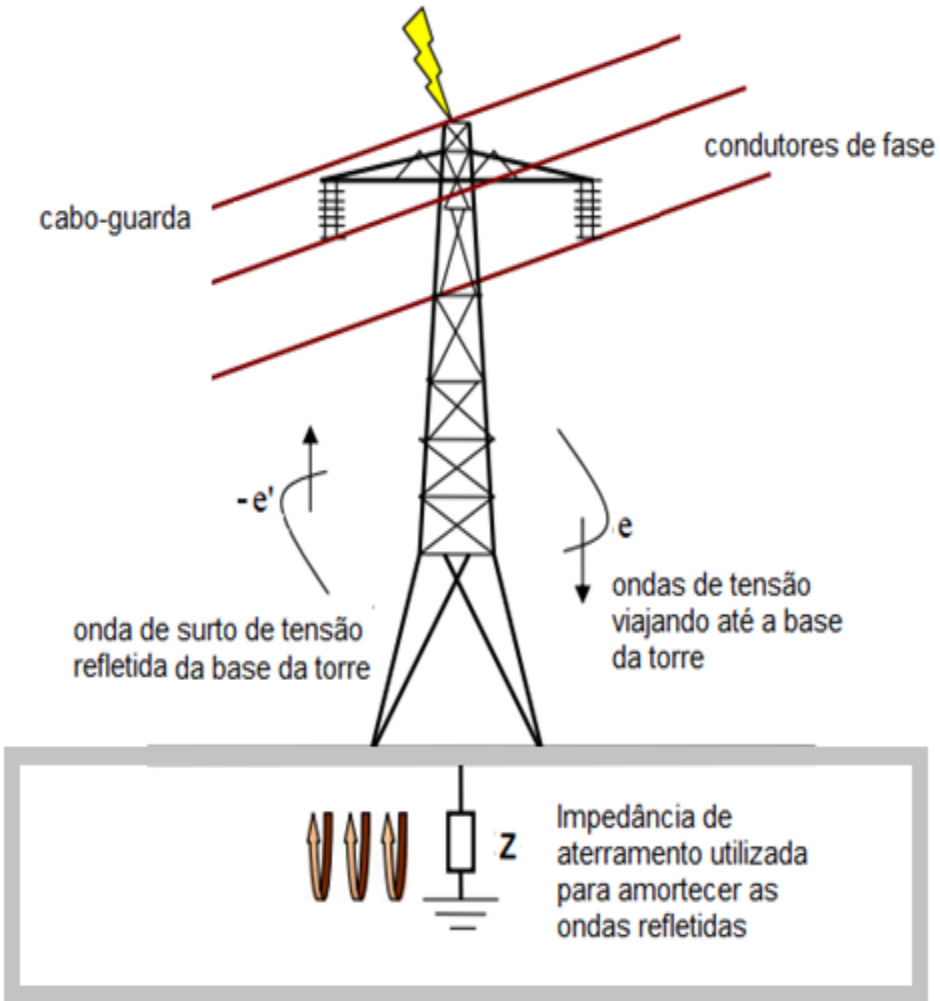
Malhas de aterramento



Aterramento em subestações elétricas



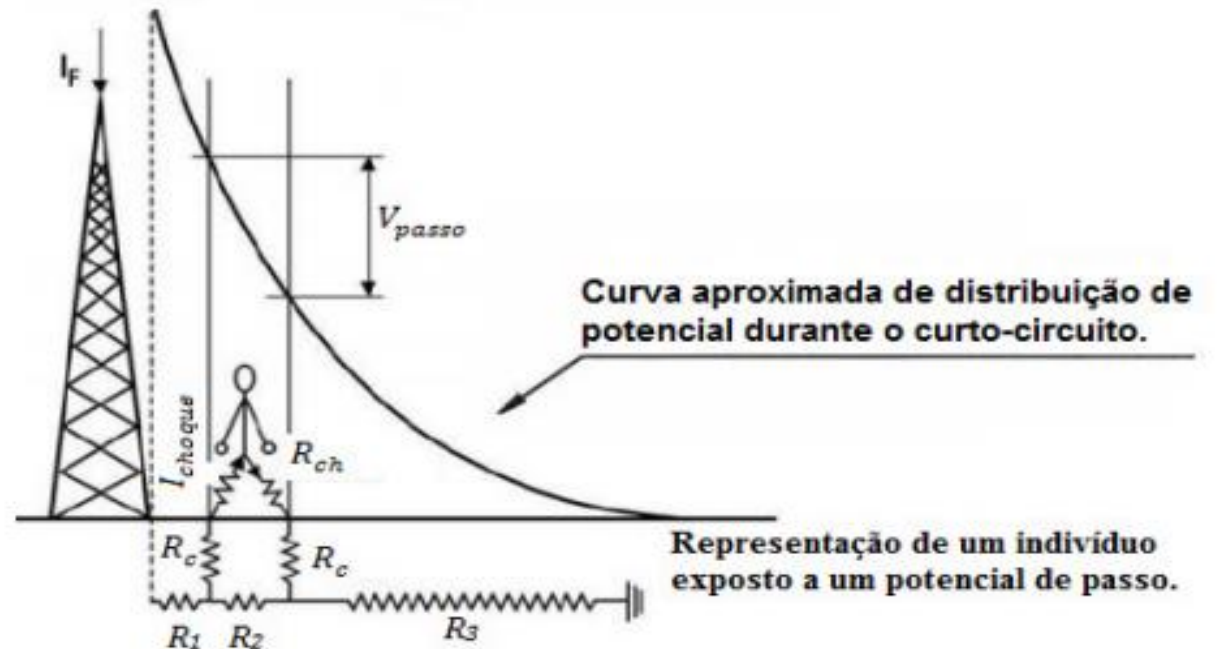
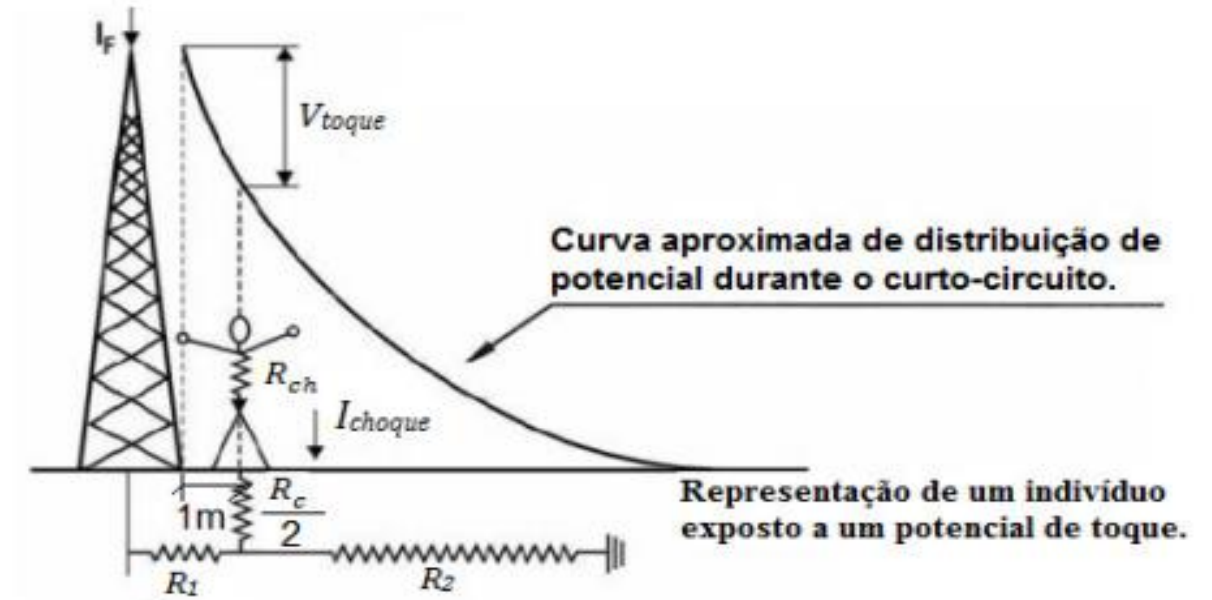
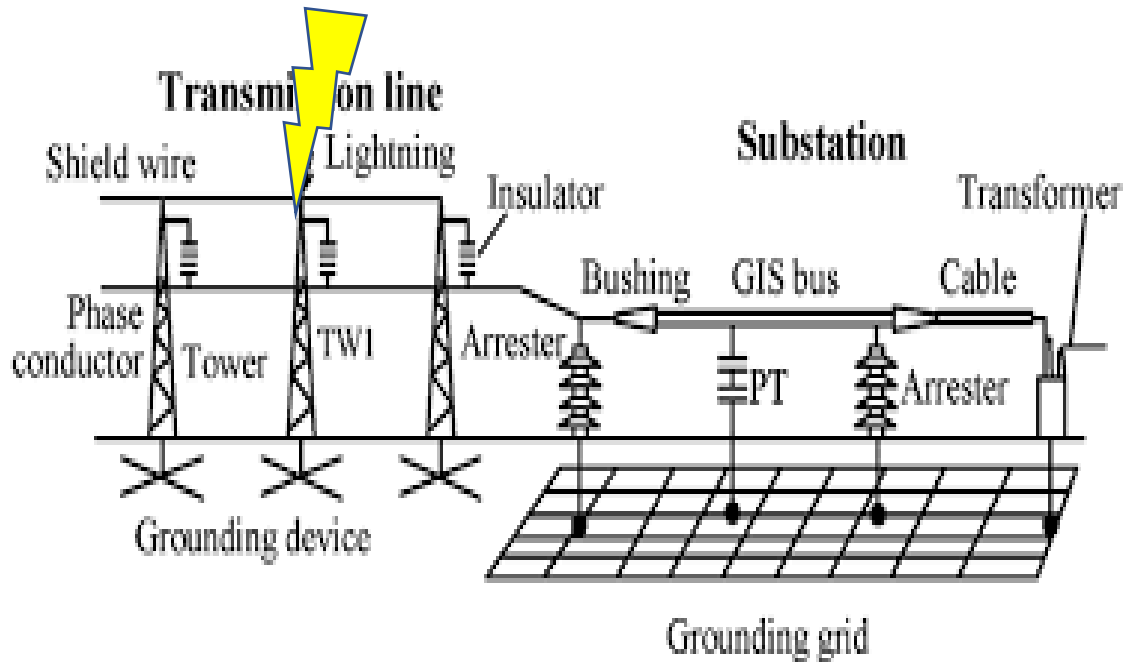
Torre atingida por uma DA¹



Backflashover Impedância de aterramento mal-dimensionada



Potencial de Passo e Toque



Natureza do solo

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

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



Resistividade de solos

NATUREZA DO SOLO

RESISTIVIDADE ($\Omega \cdot m$)

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

Medições da impedância do solo

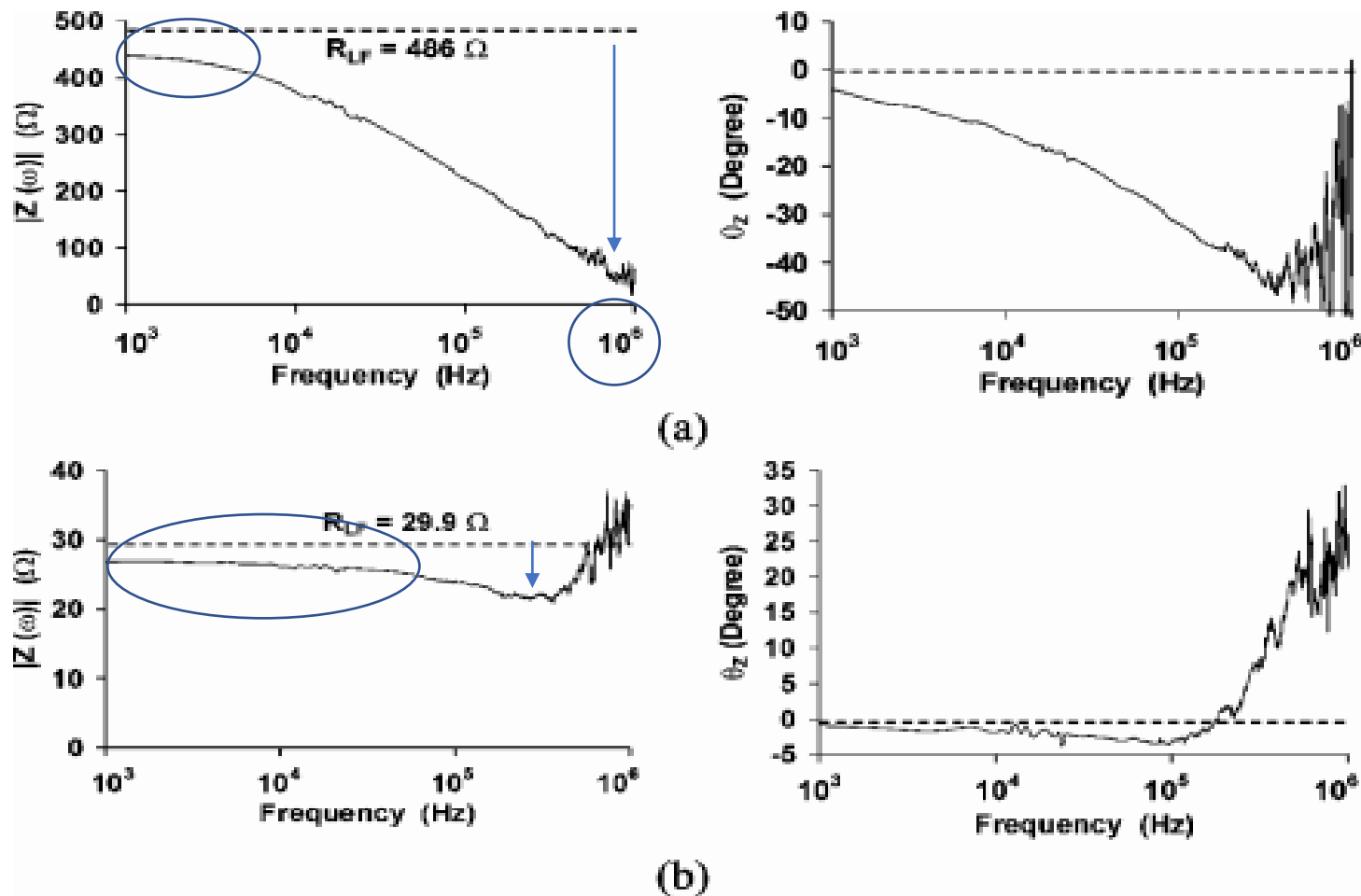
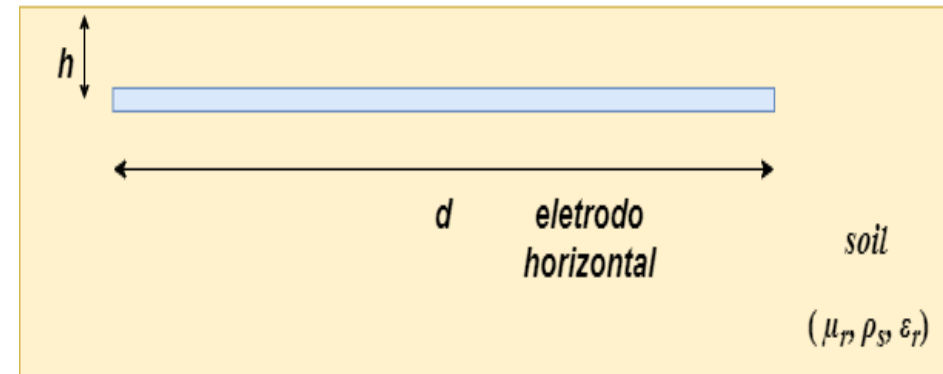


Fig. 8. Frequency diagram of the complex grounding impedance $Z(\omega)$ [ratio of the voltage and current phasors: $\underline{V}(\omega)/\underline{I}(\omega)$]. (a) High-resistivity soil ($4 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$)—12-m-long horizontal electrode. (b) Low-resistivity soil ($300 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$)—12-m-long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

Como modelar corretamente o eletrodo de aterramento ?

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

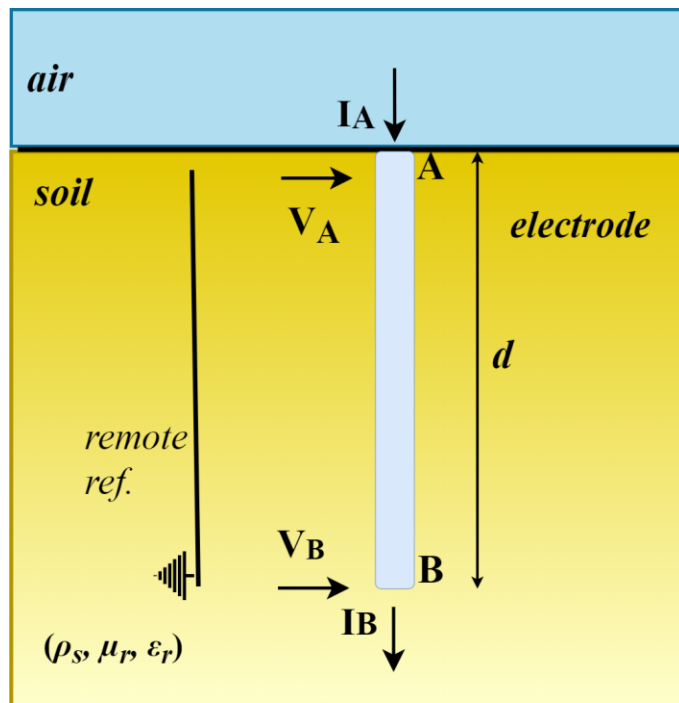
Modelagem do eletrodo de aterramento

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

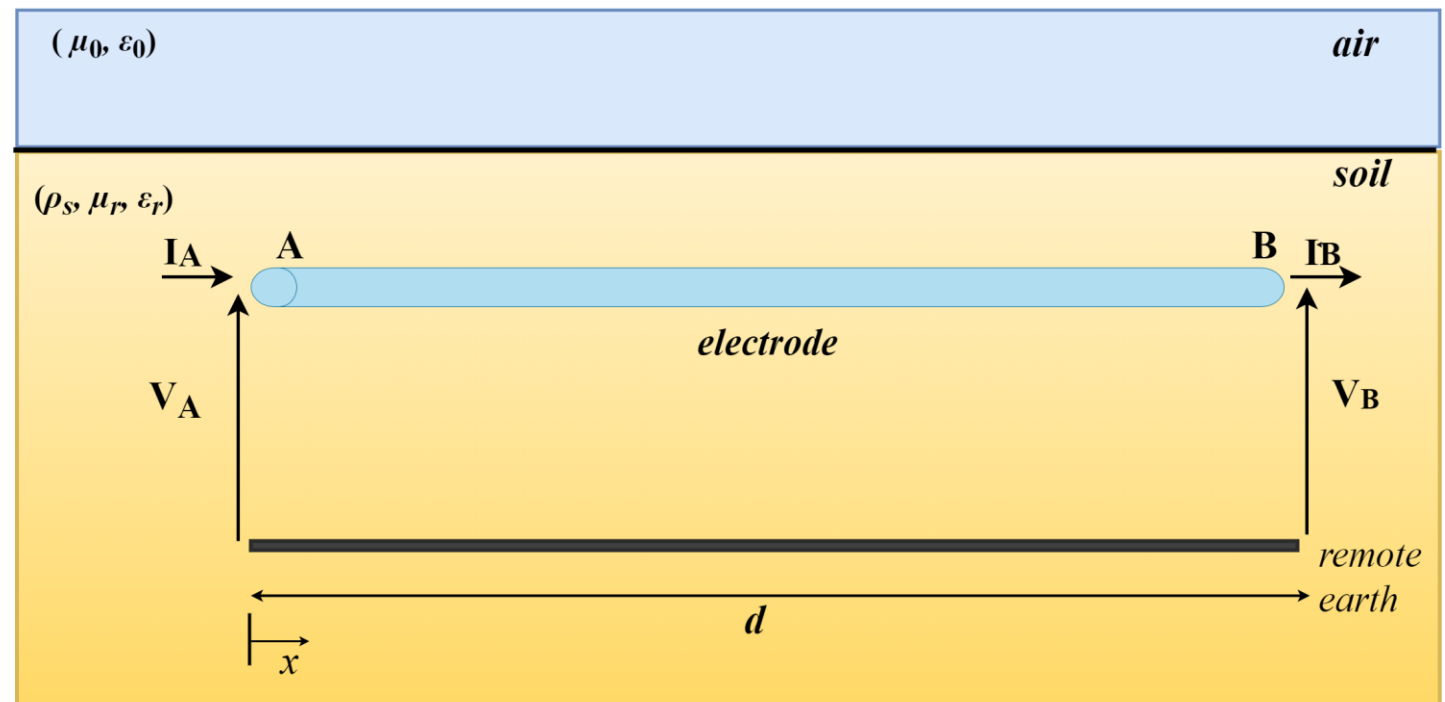
Usando o modelo a parâmetros distribuídos, um eletrodo de aterramento é interpretado como uma linha de transmissão curta. As tensões no terminais emissor e receptor são medidas em relação a um potencial remoto.

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)



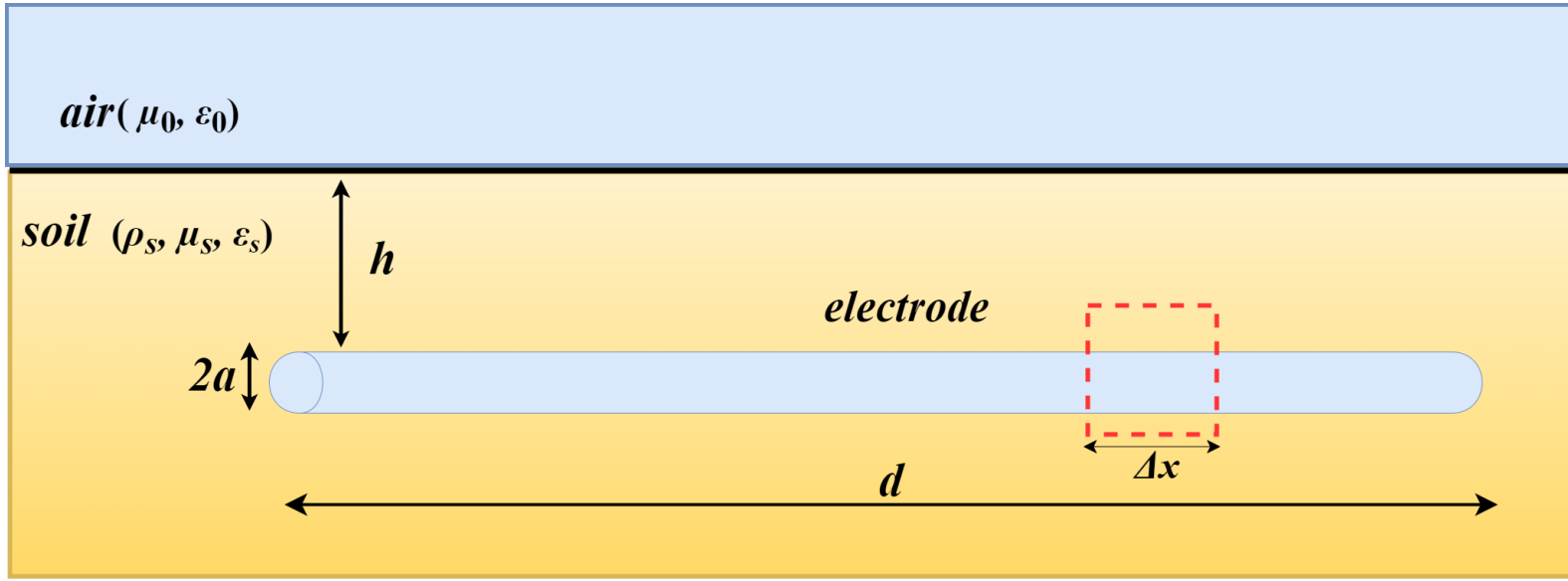
Eletrodo horizontal

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

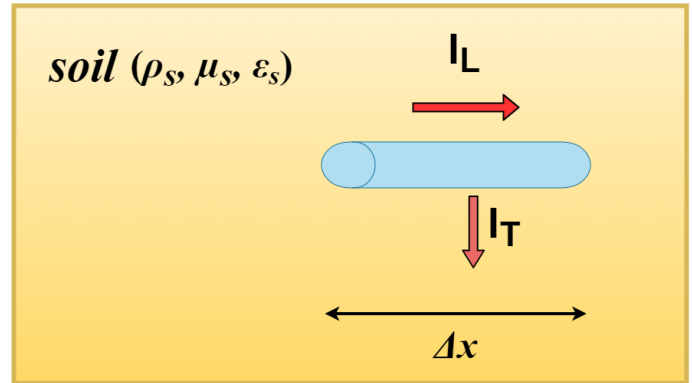
Nesse circuito, verifica-se duas correntes: uma parcela longitudinal (I_L) e outra transversal (I_T);

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.

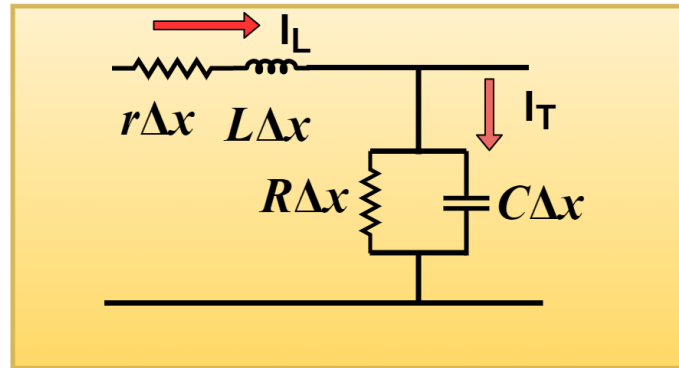
Observação: No modelo clássico de linhas de transmissão, o termo $R = 1/G$; Em linhas aéreas, $G \approx 0$. Entretanto para eletrodos, tem-se que $r \approx 0$.



(a)



(b)



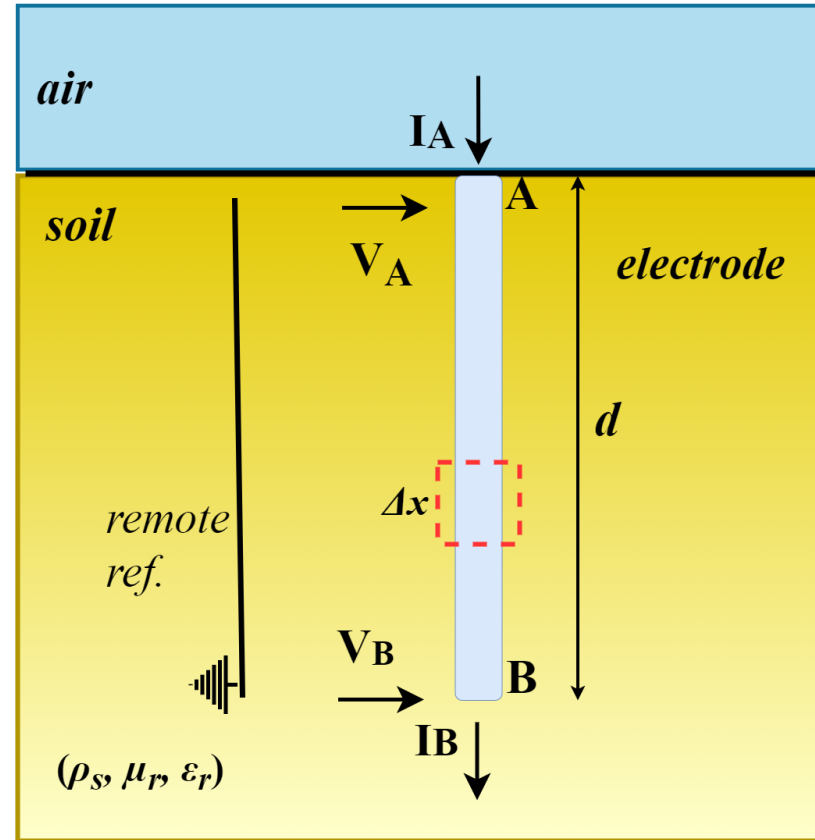
(c)

Eletrodo vertical

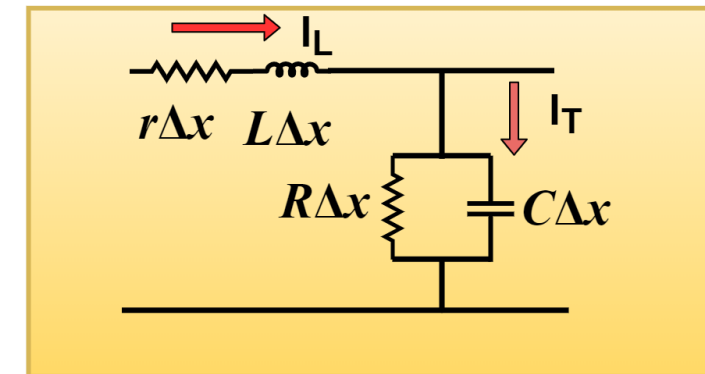
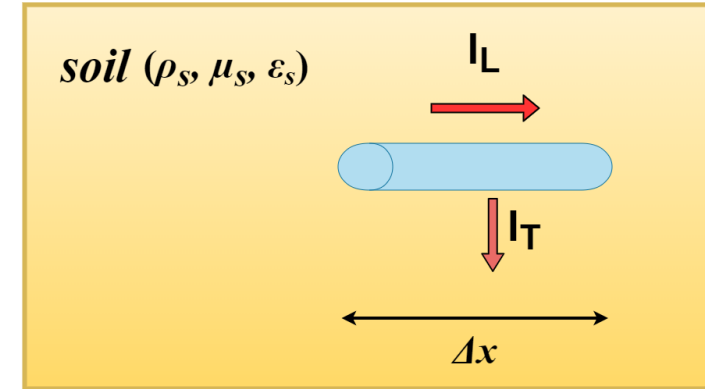
O mesmo modelo é adotado para o condutor vertical.

As equações das tensões e correntes são calculadas pelas equações hiperbólicas das linhas de transmissão.

Todos os parâmetros são calculados (r' , L' , C' e R') por unidade de comprimento (p.u.c)



(a)



(c)

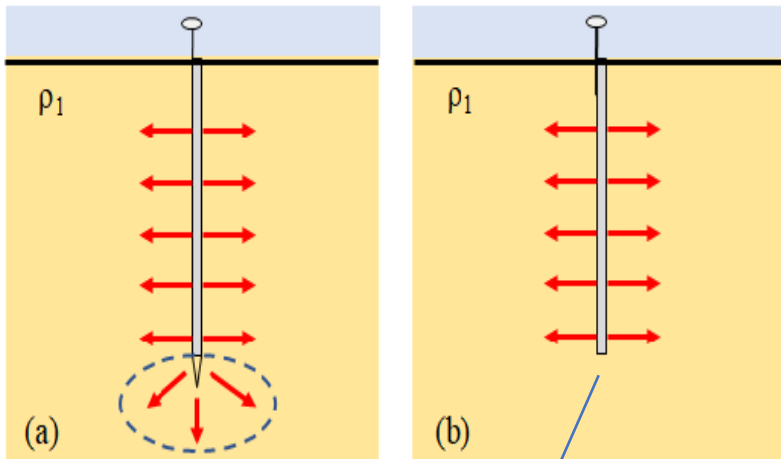
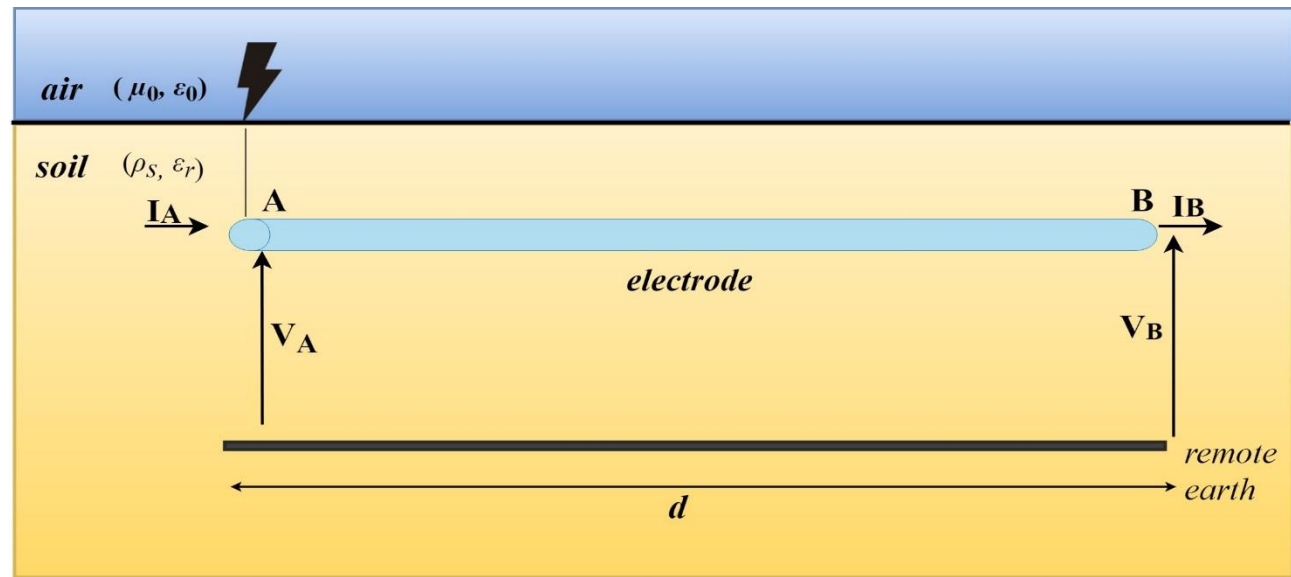


Figure 1. Current density along the length of a rod in a homogeneous soil: (a) real situation and (b) with the vertical electrode tip disregarded – adapted from [6].

Simplificação da corrente no terminal B ($I_B = 0$)

Tem-se que: $\omega = 2\pi f$ é a freq. angular e f é a freq. do sinal injetado no eletrodo.

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



Transmission Line Equations

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

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

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

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

Interpretação física

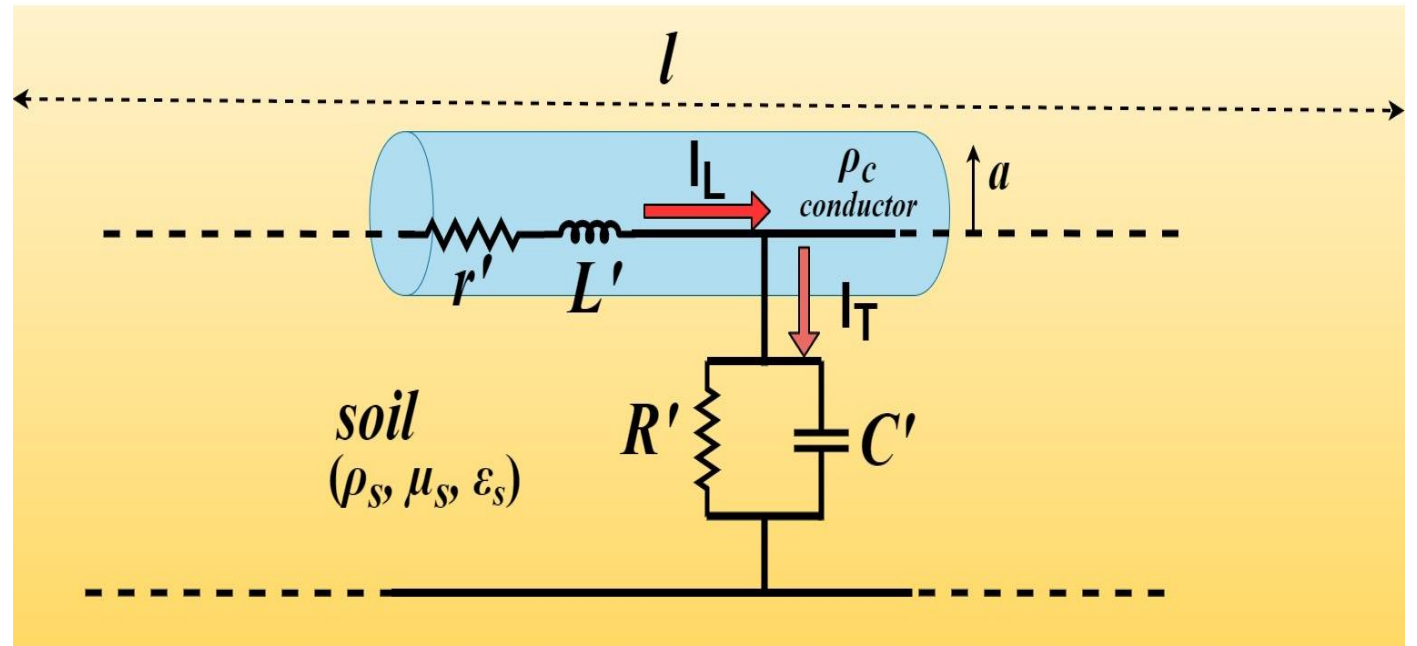
- r' (resistência longitudinal)

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

$$r' \ll R'$$

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

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

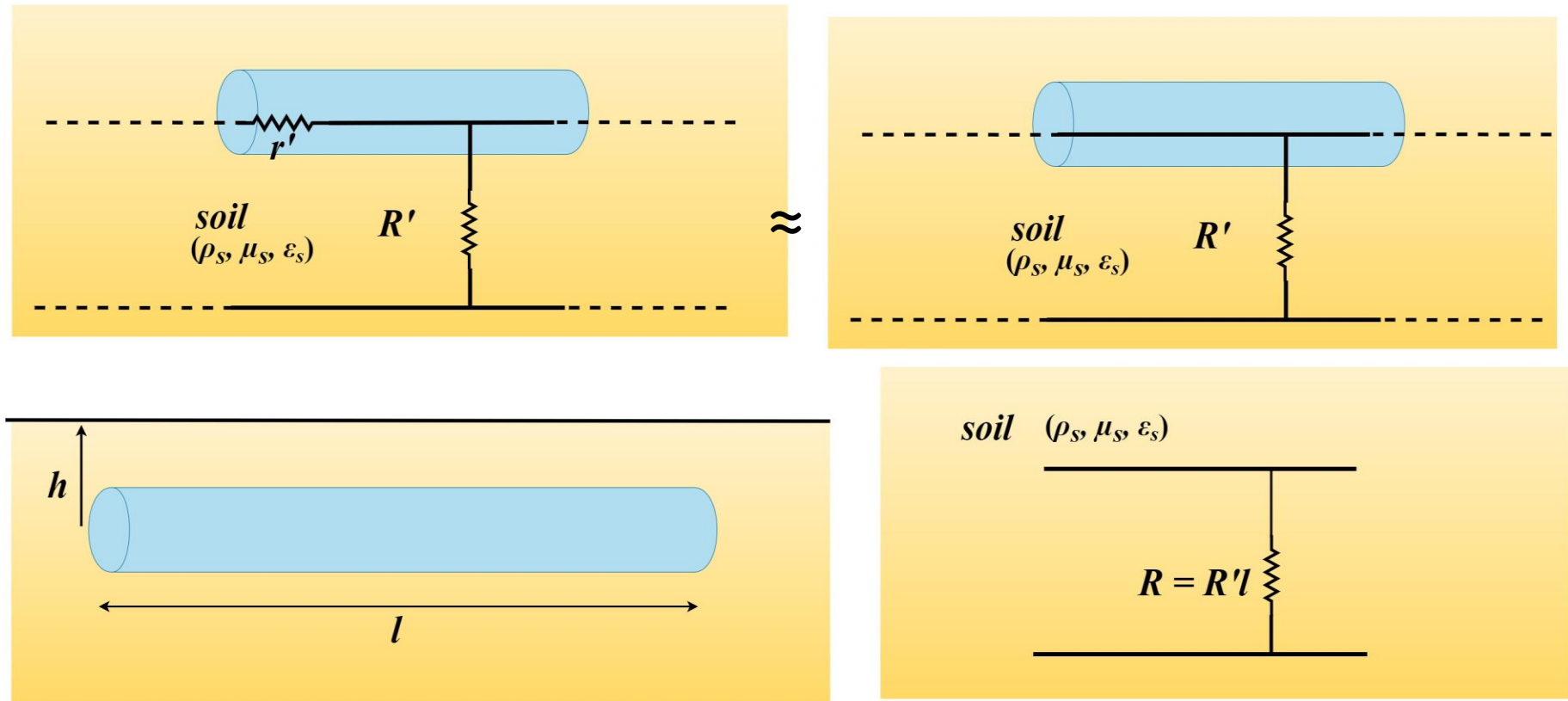


Em baixas frequências ($\omega \approx 0$)

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.



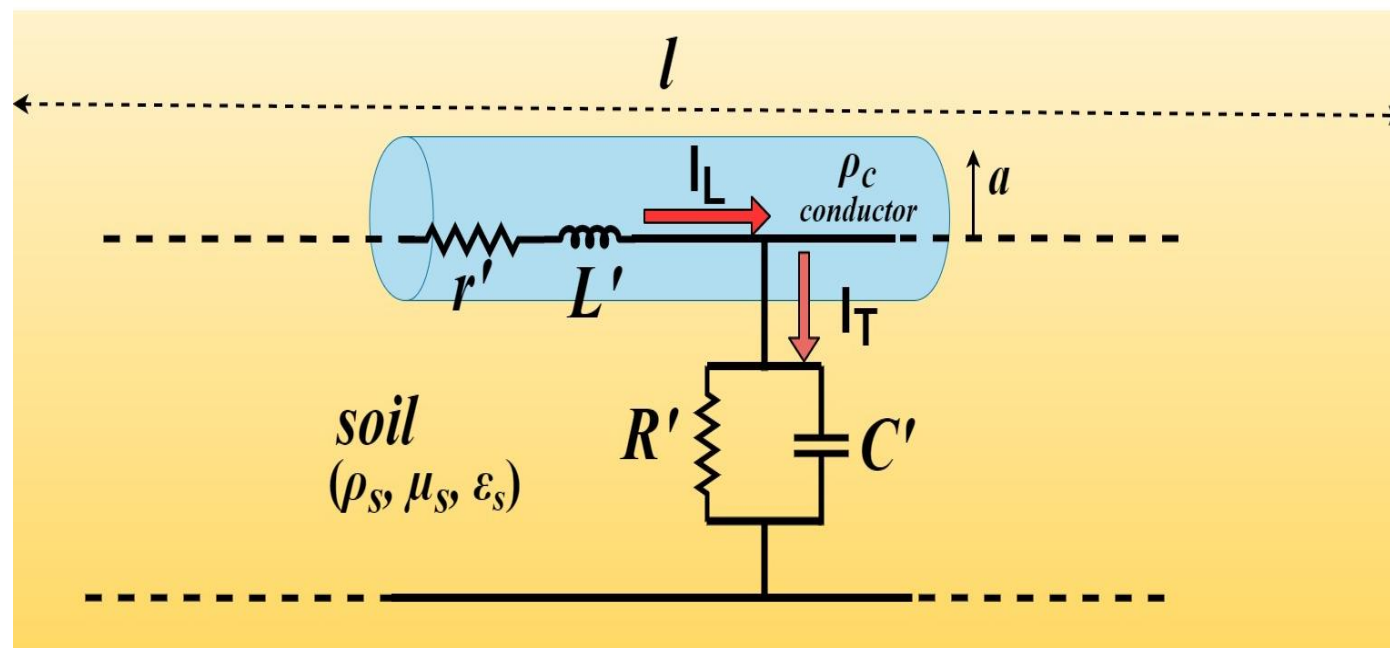
It é predominante para as baixas frequências

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.

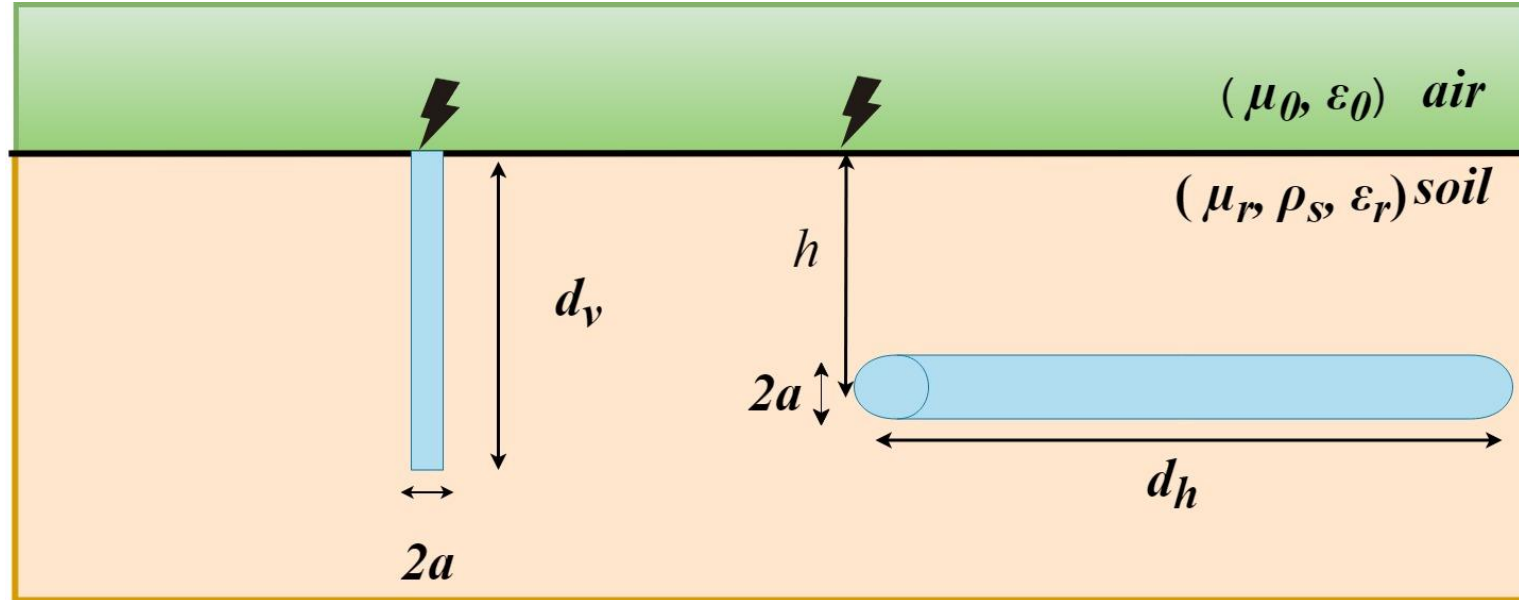
$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{I_T}{I_L} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{1}{\rho \omega \epsilon} \approx 0$$

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.

Parâmetros r' , L' , R' e C' ?



Equações propostas por Sunde (1949)

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

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

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

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

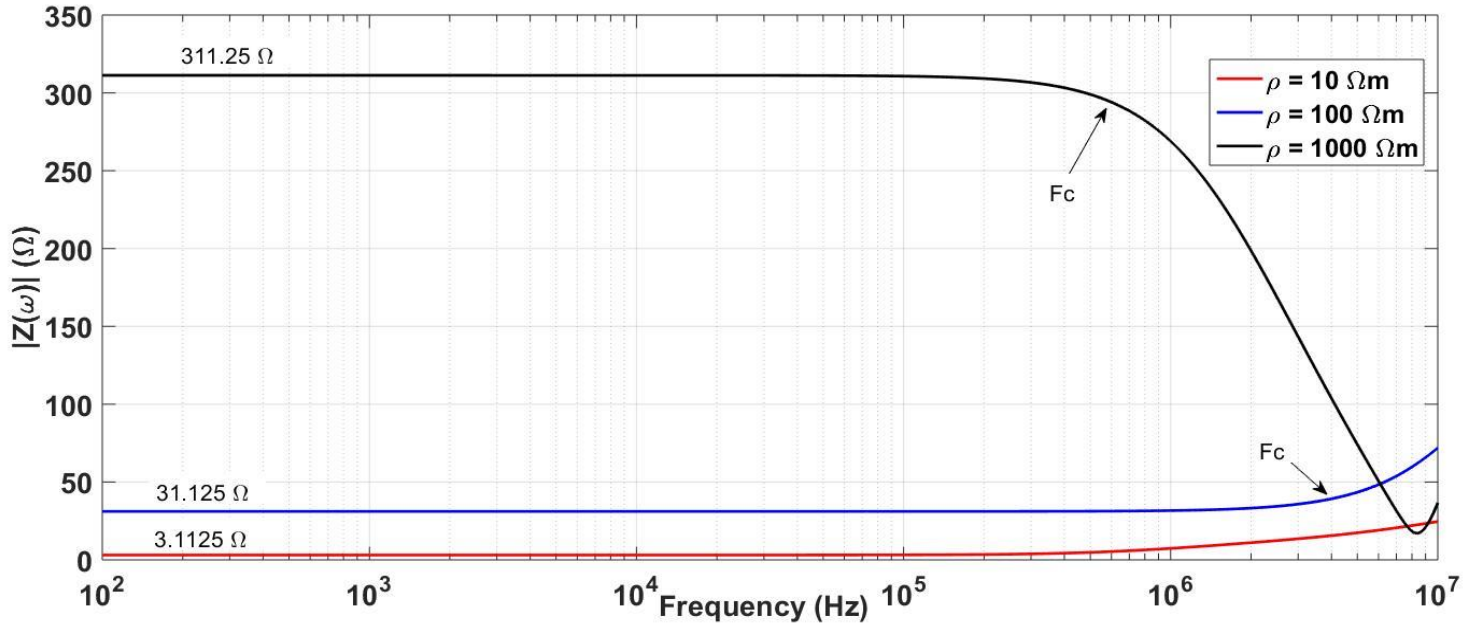
$$r_h = \frac{\rho_c}{\pi a^2}$$

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

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

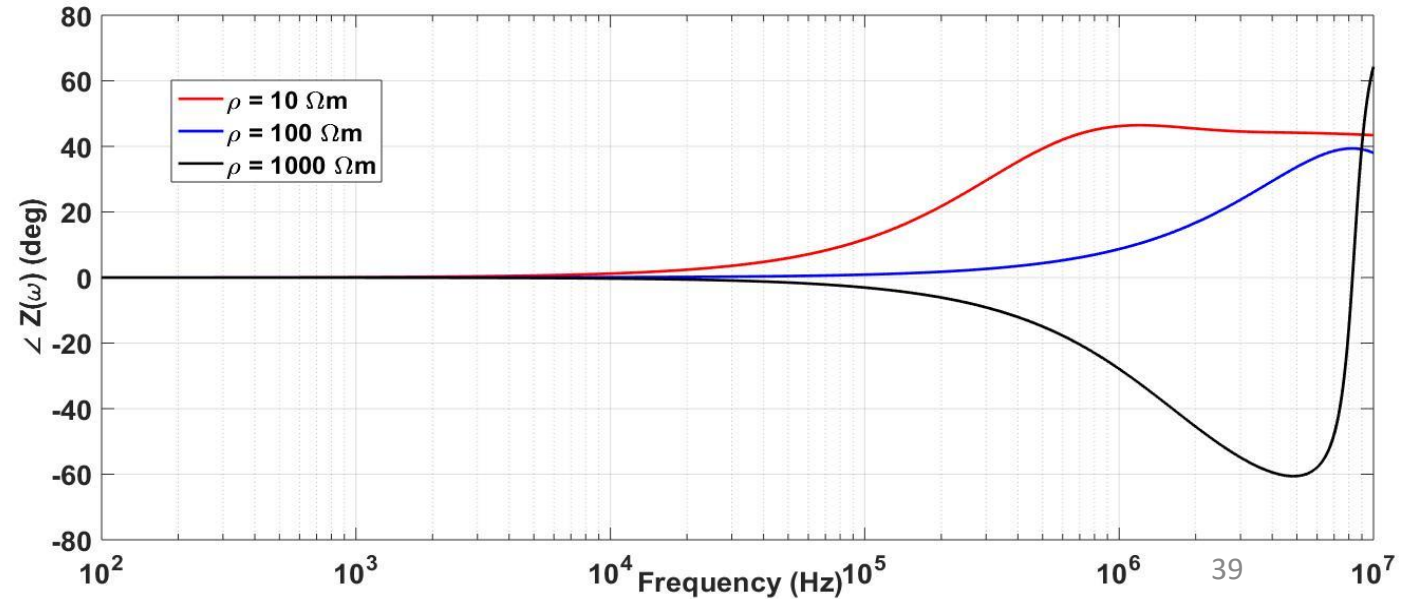
$$G_h = R_h^{-1} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r (f) \rho (f)} C_h$$

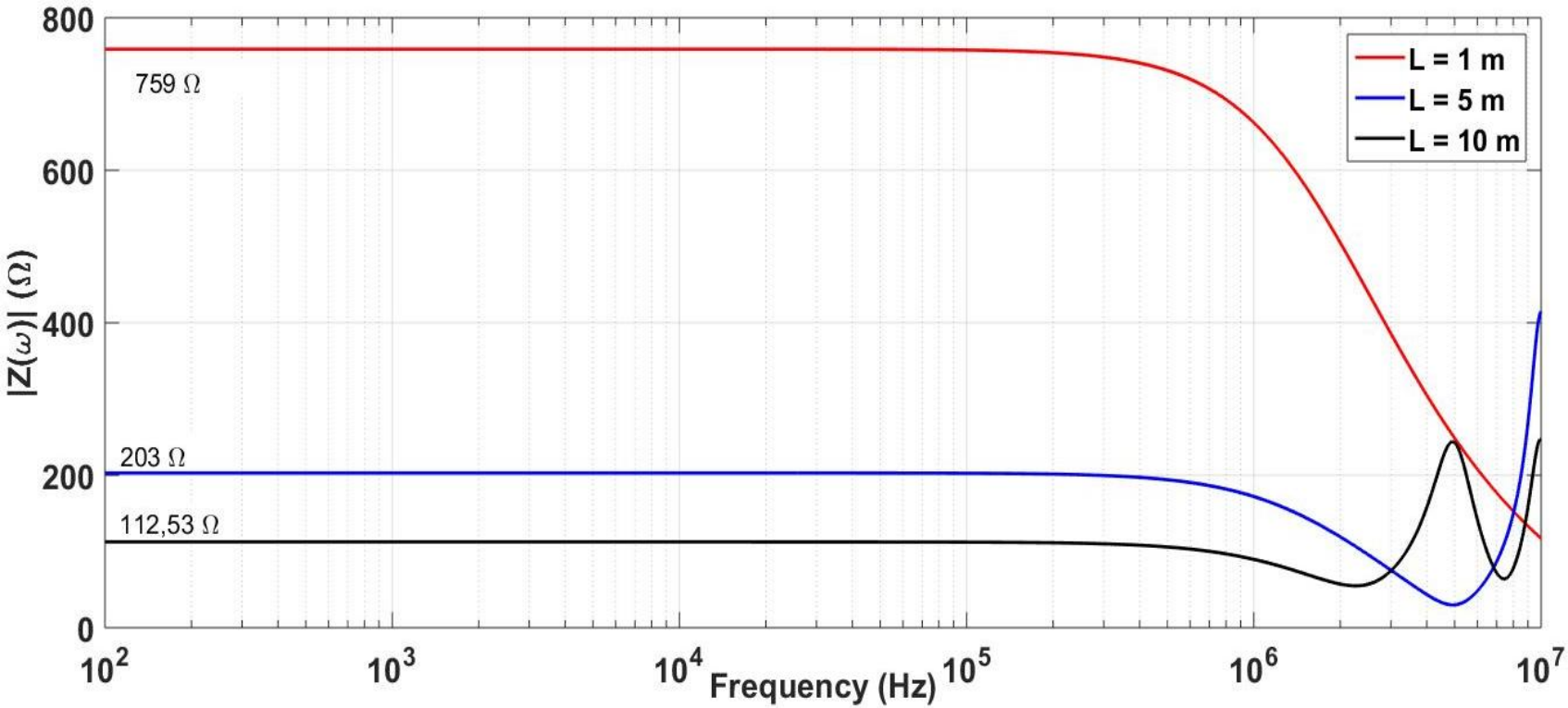
Impedância eletrodo vertical



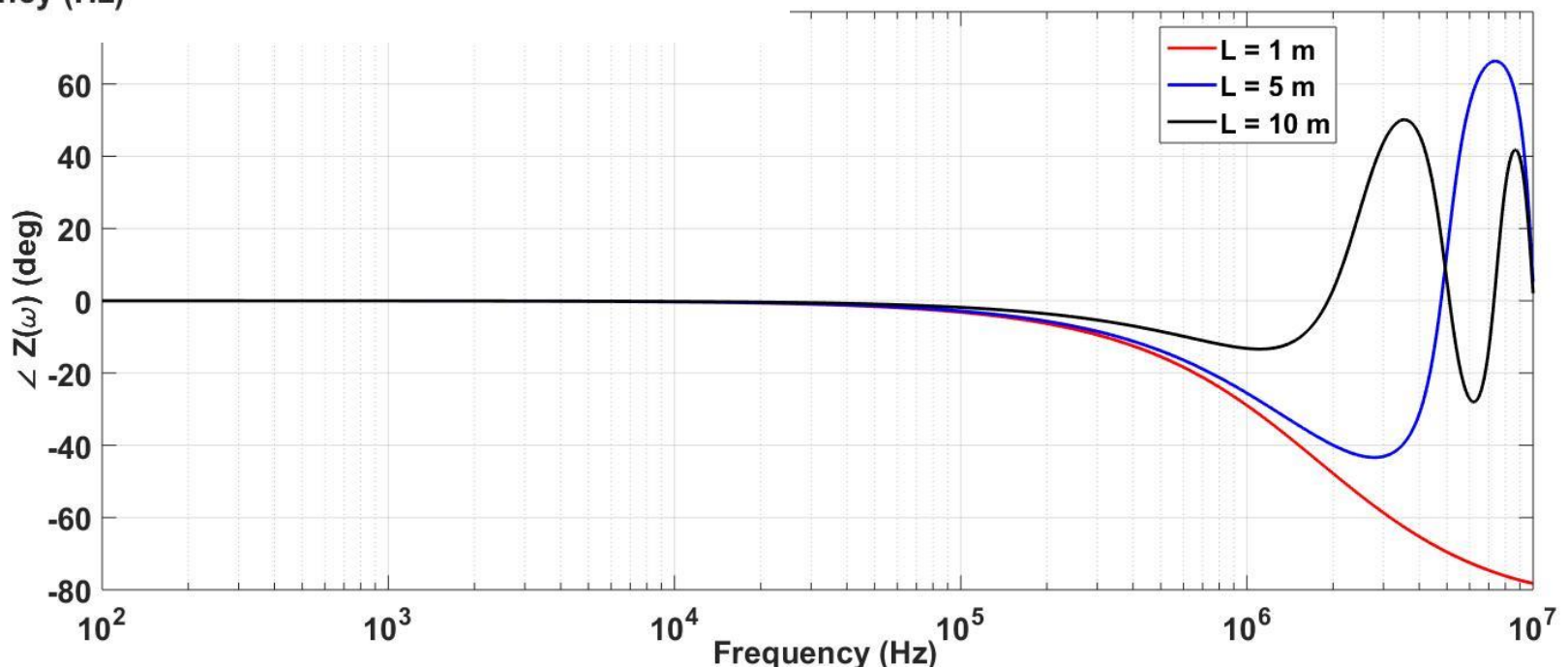
raio = 12,5 mm; L = 3 m

$$R = (\rho / (2 * \pi * H)) * (\ln(4 * L / \text{raio}) - 1);$$

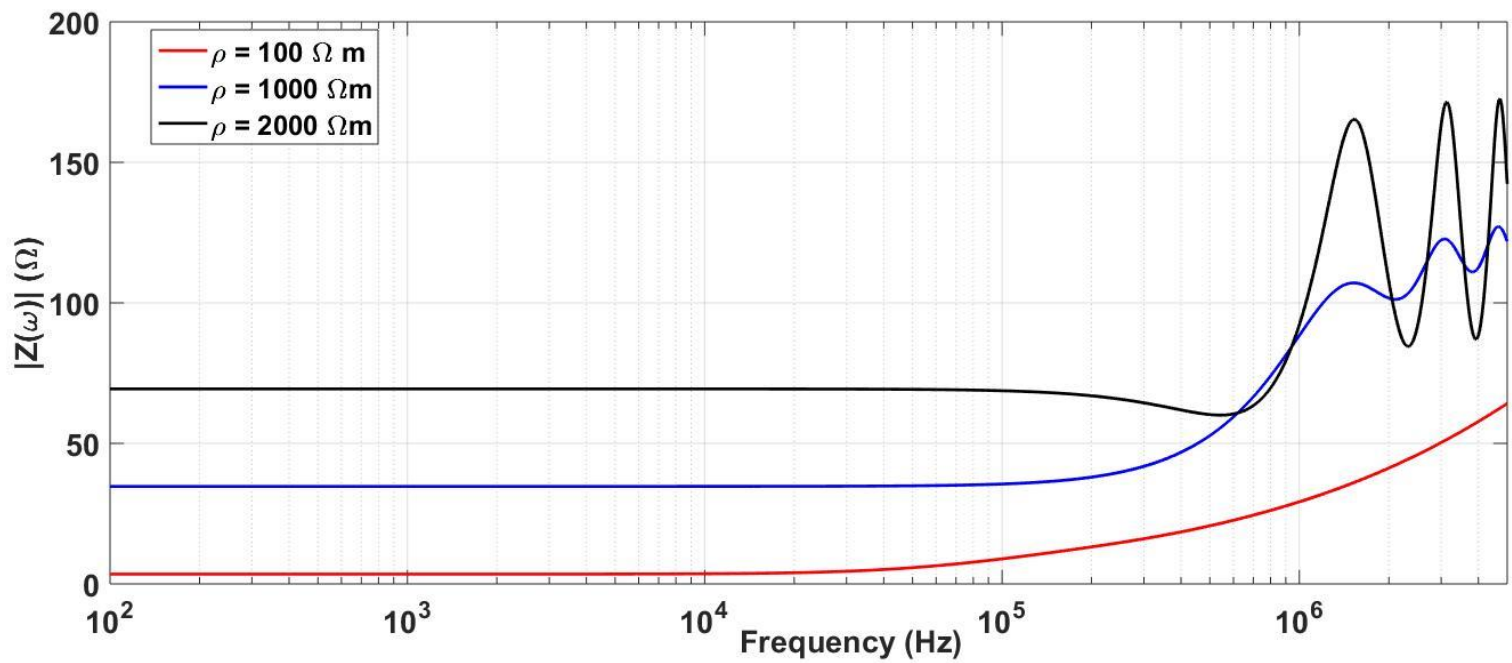




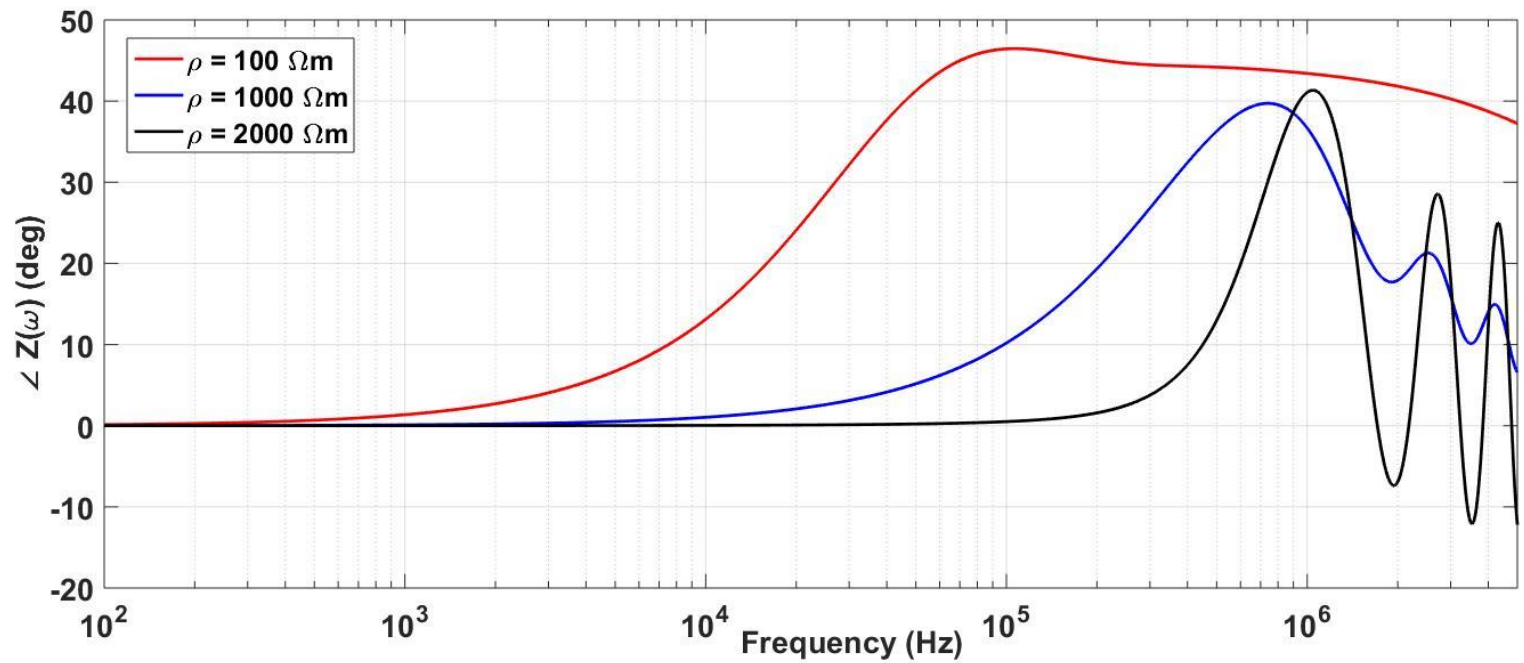
raio = 12,5 mm; $\rho = 1.000$ m
 $R = (\rho / (2 * \pi * H)) * (\ln(4 * L / \text{raio}) - 1);$



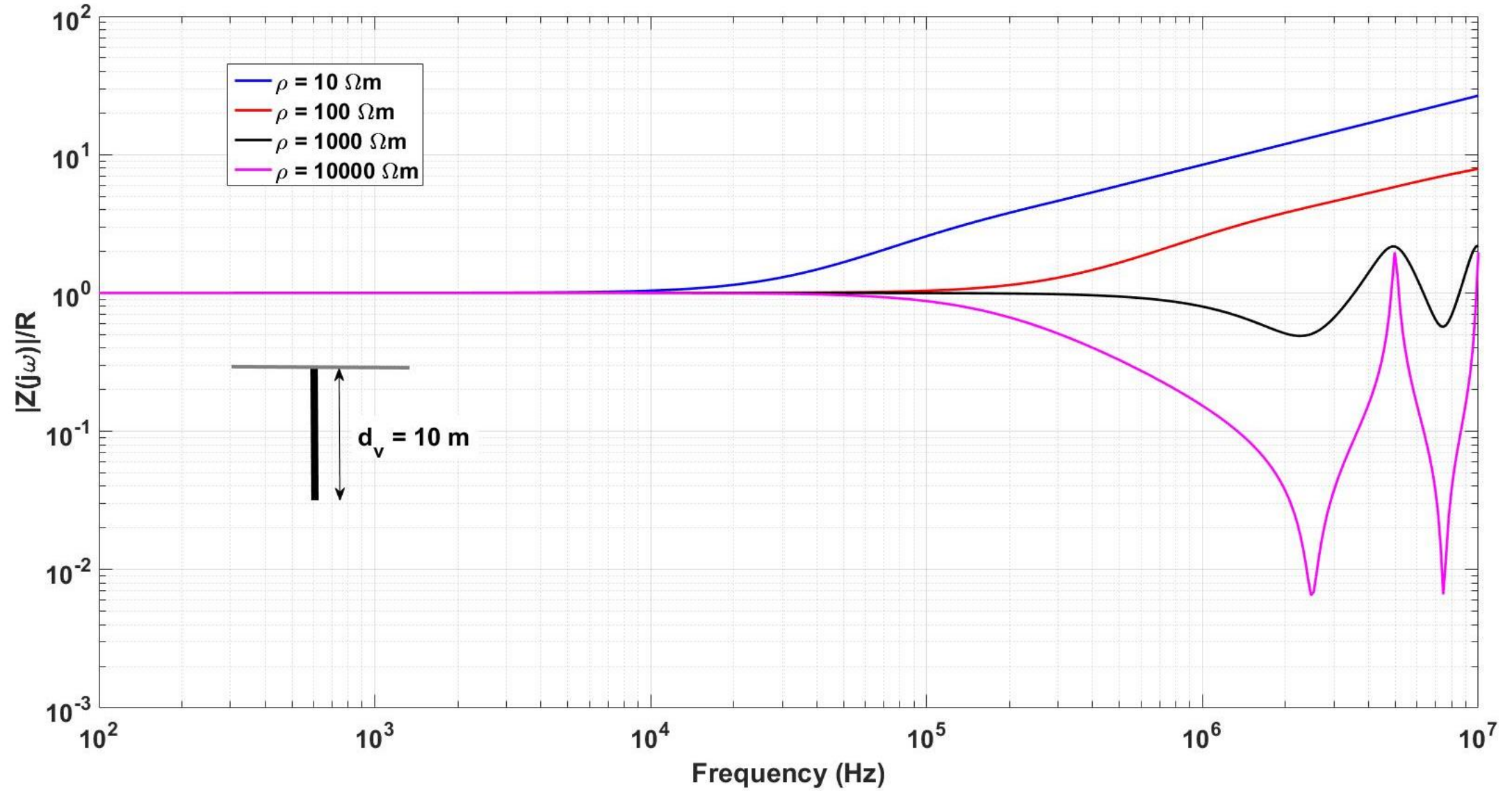
Impedância eletrodo horizontal



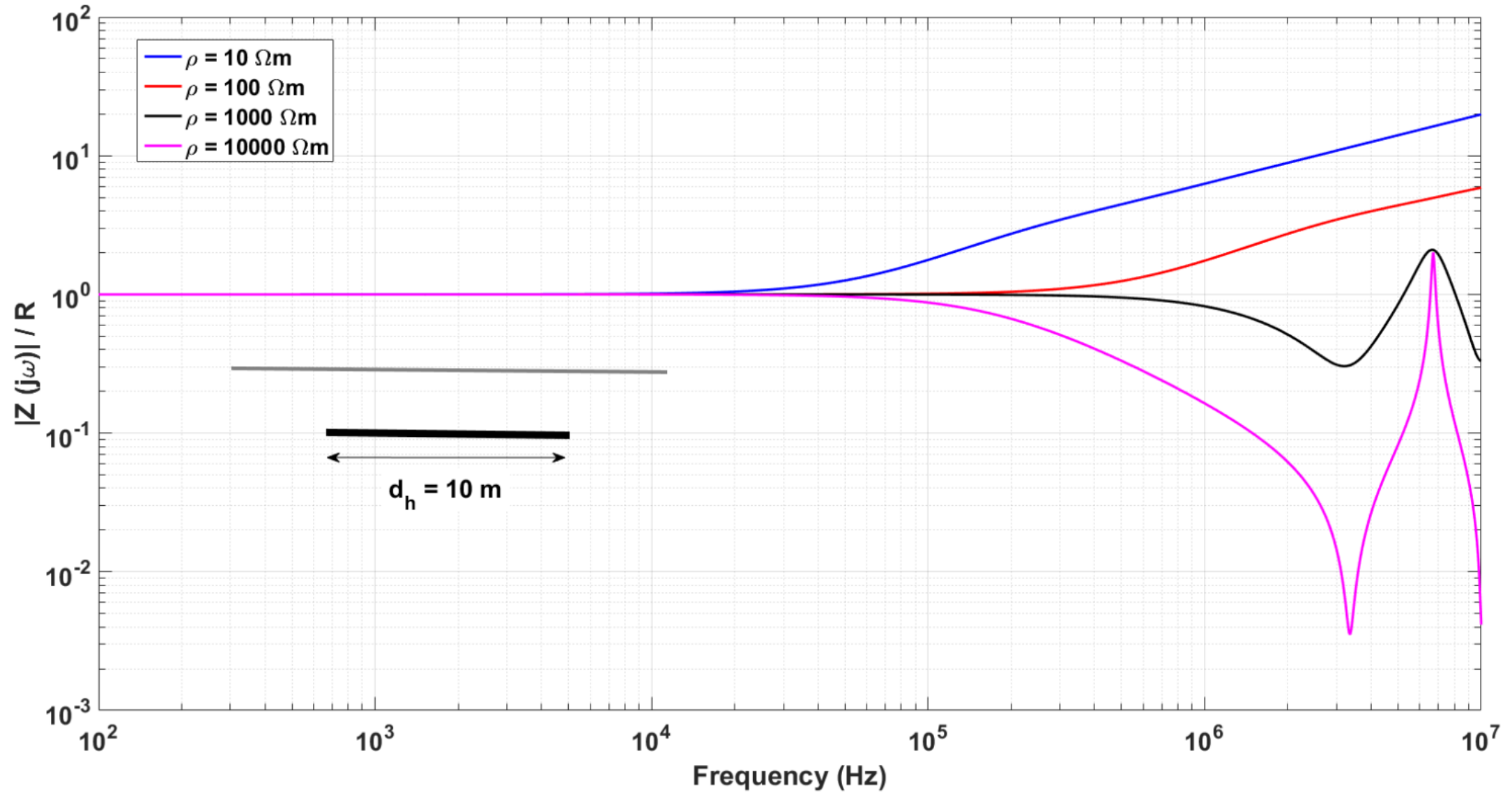
raio = 12,5 mm; L = 30 m;



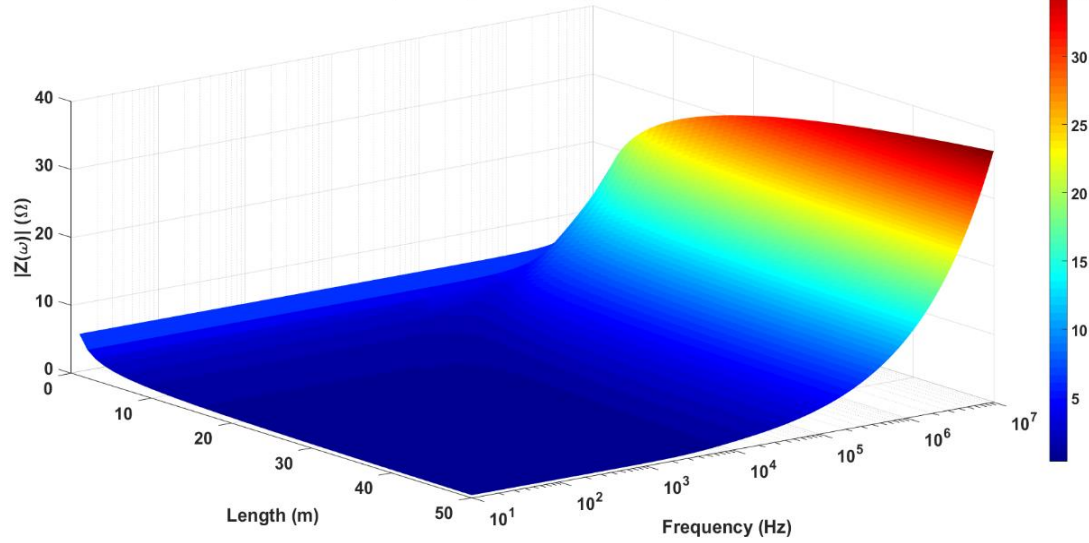
Impedância de um eletrodo vertical (normalizada)



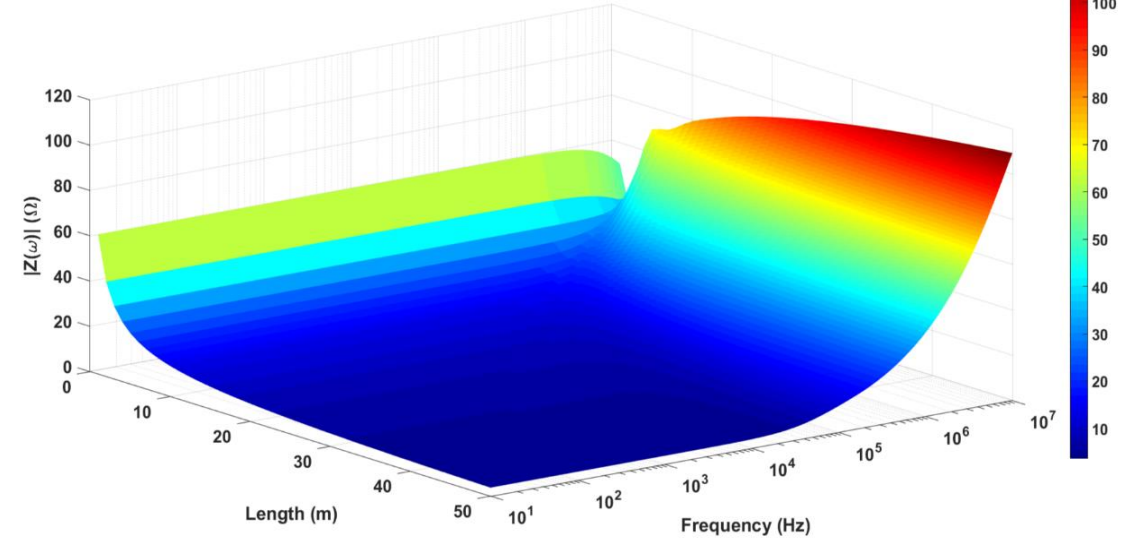
Impedância de um eletrodo horizontal (normalizada)



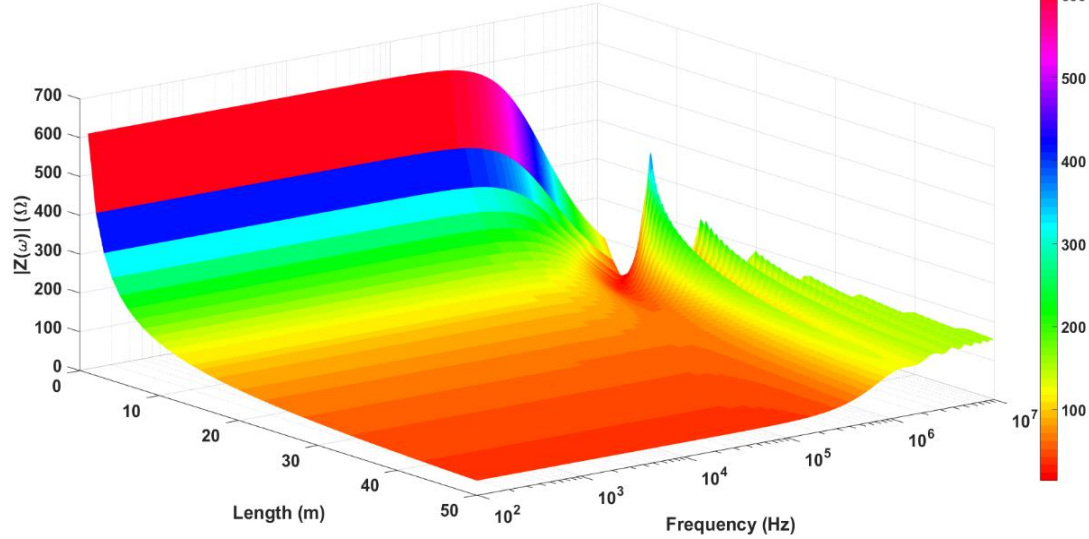
$|Z|$ with frequency-independent electrical parameters of soil
(constant parameters $\rho_0 = 10 \Omega\text{m}$)



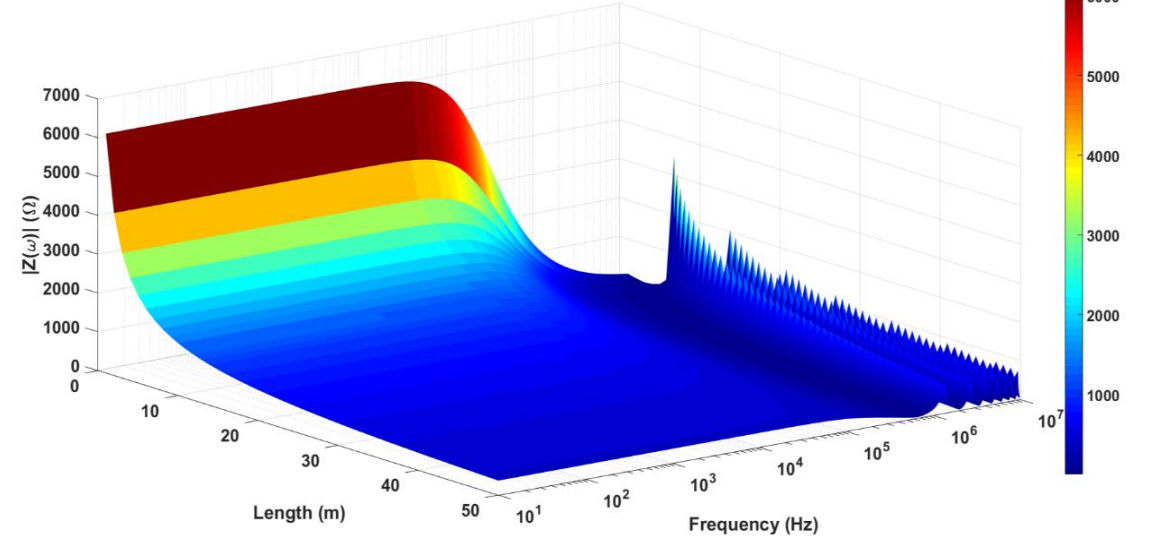
$|Z|$ with frequency-independent electrical parameters of soil
(constant parameters $\rho_0 = 100 \Omega\text{m}$)



$|Z|$ with frequency-independent electrical parameters of soil
(constant parameters $\rho_0 = 1000 \Omega\text{m}$)

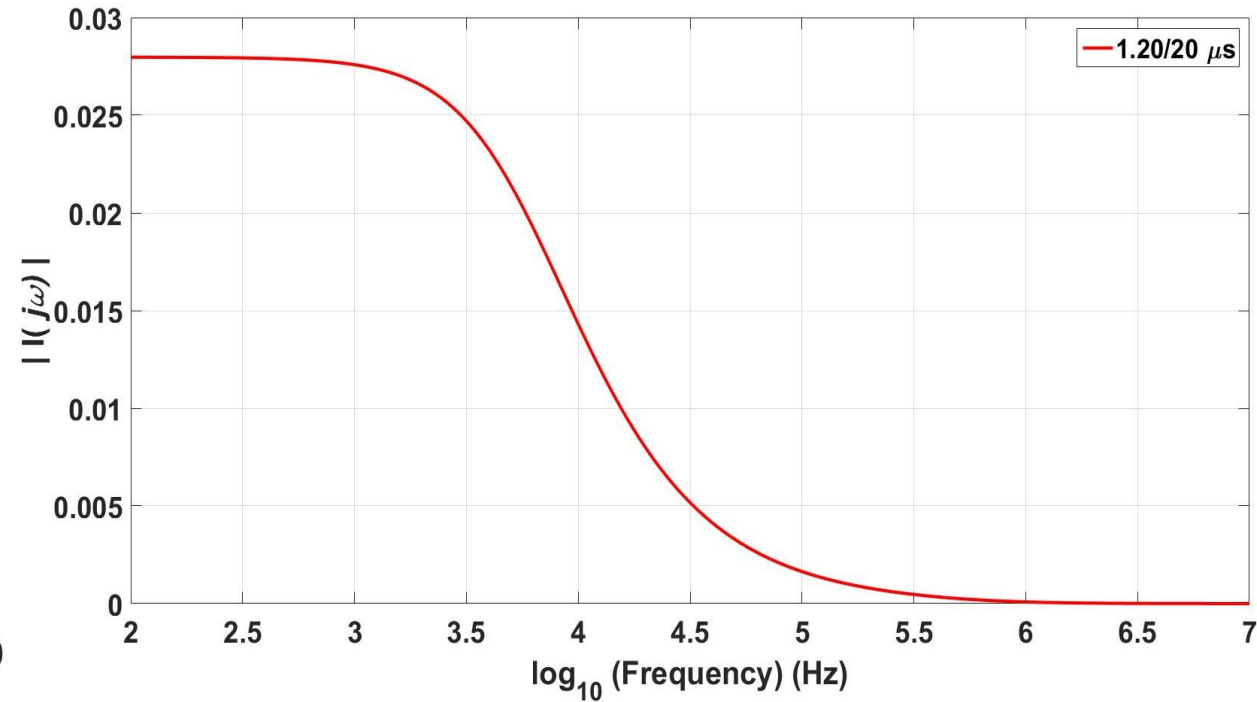
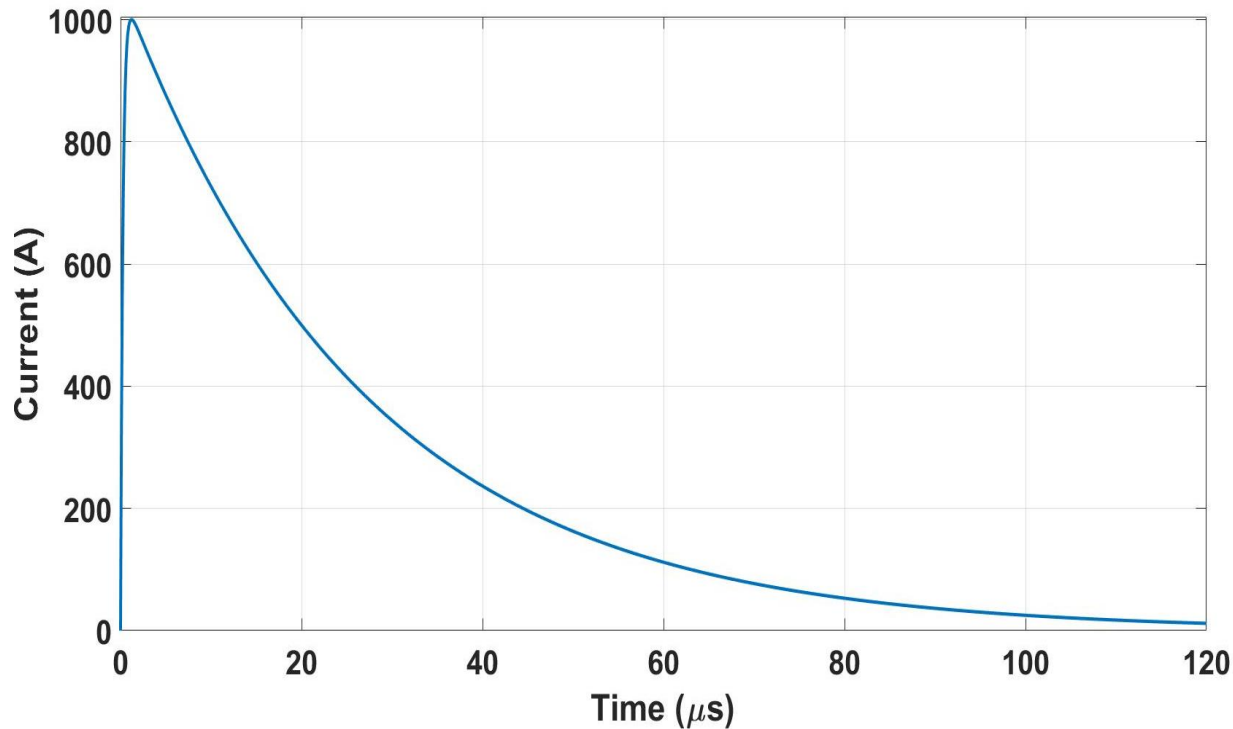


$|Z|$ with frequency-independent electrical parameters of soil
(constant parameters $\rho_0 = 10 \text{ k}\Omega\text{m}$)



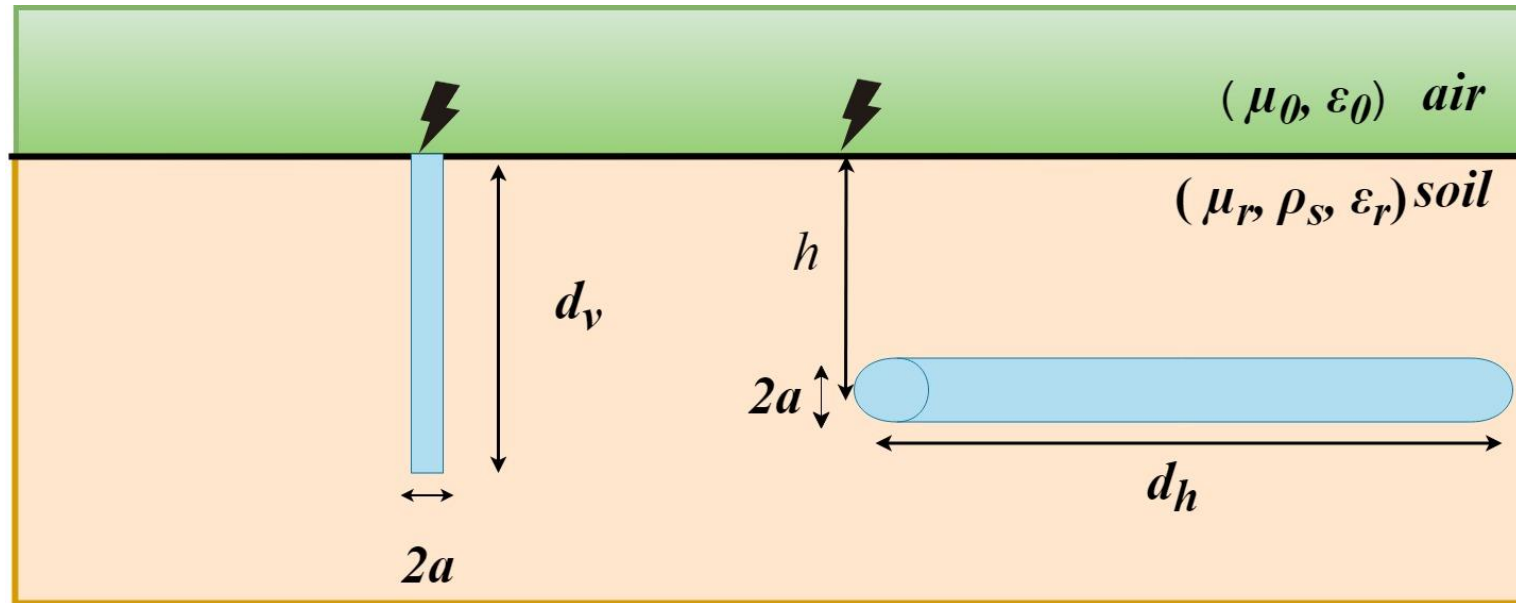
Grounding Potencial Rise (GPR)

GPR é definido como o produto entre a impedância de aterramento e a corrente que flui pelo eletrodo.
(Uso da transformada inversa de Laplace)

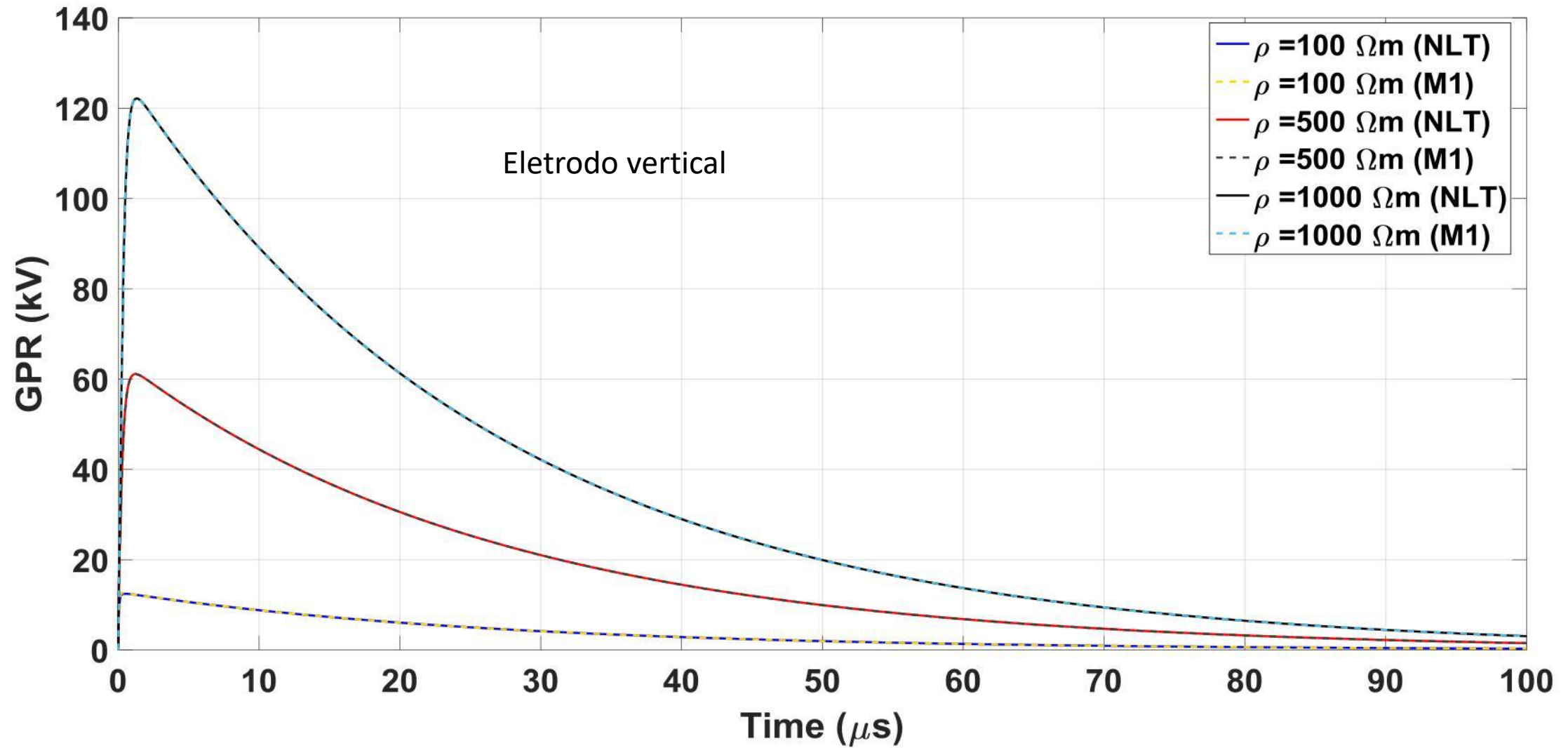


described as: $i_k(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, where $I_0 = 1.057 \text{ kA}$, $\alpha = 3.7424 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
and $\beta = 3.8462 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ (1.20/20 μs exponential curve).

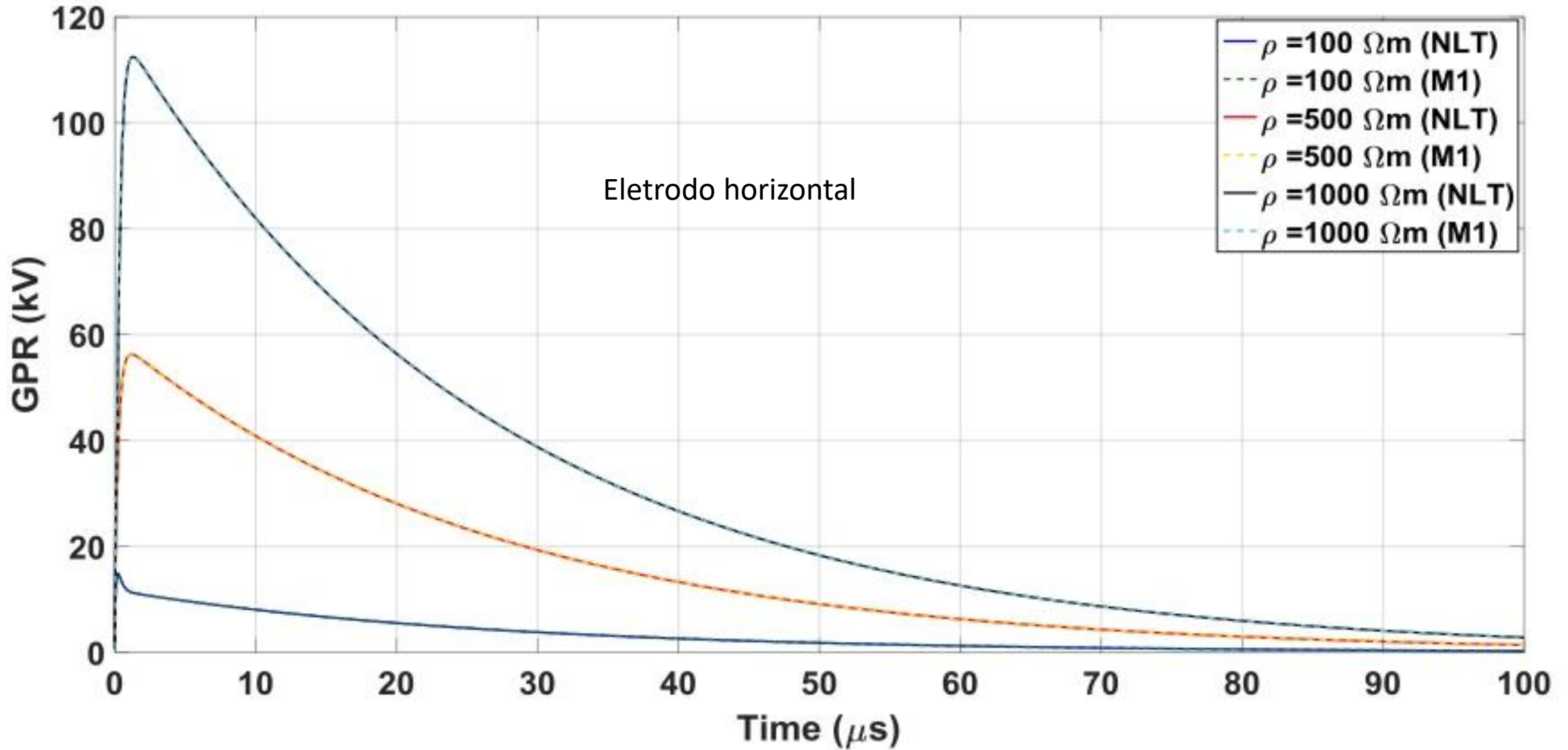
GPR para eletrodos vertical e horizontal



Grounding Potential Rise (GPR)



Grounding Potential Rise (GPR)



Aula-2

- Impedância Impulsiva;
- Comprimento Efetivo;
- Métodos numéricos;
- Variação dos parâmetros do solo com a frequência;
- Estratificação do solo;
- Ionização do solo;

