

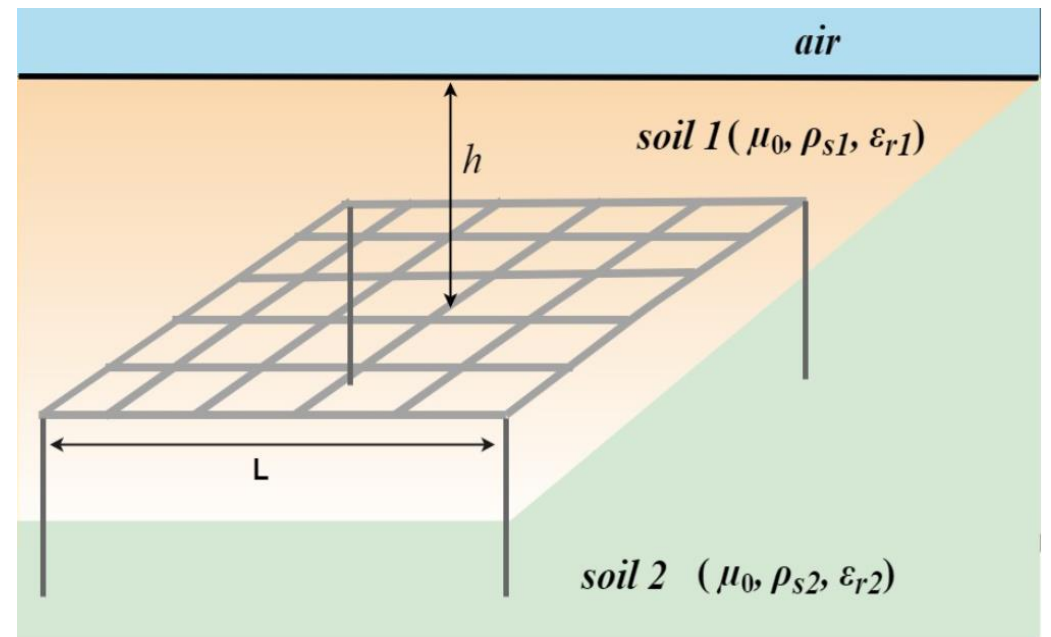
# IT308 - Tópicos em Técnicas de Alta Tensão II

## Aterramento no Sistema Elétrico Aula-04

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

# Aula 04

- Modelagem de malhas;
- Malhas em solos estratificados;
- Malhas interconectadas;
- Potencial de passo e toque;
- SPDA;



# Malhas de Aterramento

Malhas de aterramento (MAs) desempenham um papel fundamental na continuidade e na operação confiável de um sistema de energia elétrica. MAs devem fornecer um caminho de baixa impedância para altas correntes causadas por faltas à terra ou pelas descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão que devem ser escoadas para o solo.

MAs são projetadas para minimizar as tensões de passo e toque visando à segurança de pessoas e a proteção dos equipamentos nas subestações elétricas e em plantas industriais.

Diversos modelos para computar a impedância de uma MA são baseados em:

- (i) fórmulas analíticas;
- (ii) modelagem por parâmetros concentrados ou distribuídos usando a teoria de circuitos ou
- (iii) por métodos numéricos empregados na resolução das equações de Maxwell, tais como o Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos Finitos (MEF)
- (iv) modelos híbridos que combinam a teoria de circuitos e os métodos numéricos, tais como o Partial Element Equivalent Circuit (PEEC).

# Composição

As MAs são constituídas por um grande reticulado de eletrodos horizontais (EHs) enterrados a uma dada profundidade e que são interligados por juntas mecânicas ou soldas em suas conexões cruzadas (nós).

Adicionalmente, diversos eletrodos verticais (VEs) (hastes) são inseridos nesses nós ou ao longo do contorno da malha de modo a se obter a impedância mais baixa possível, o que resulta em uma área considerável do terreno

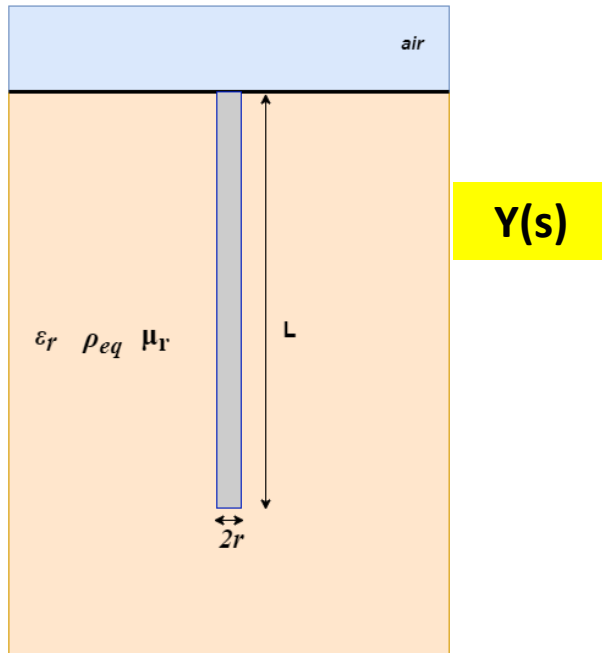
Diversos aspectos devem ser levados em consideração para se calcular com precisão a impedância de aterramento das MAs, tais como:

- Solos estratificados;
- Variação dos parâmetros elétricos do solo (resistividade e permissividade) com a frequência,
- Acoplamento mútuo entre os condutores,
- Ionização do solo,
- o arranjo dos condutores na malha;
- Tipo de distúrbio que origina o transitório eletromagnético.

# Modelagem

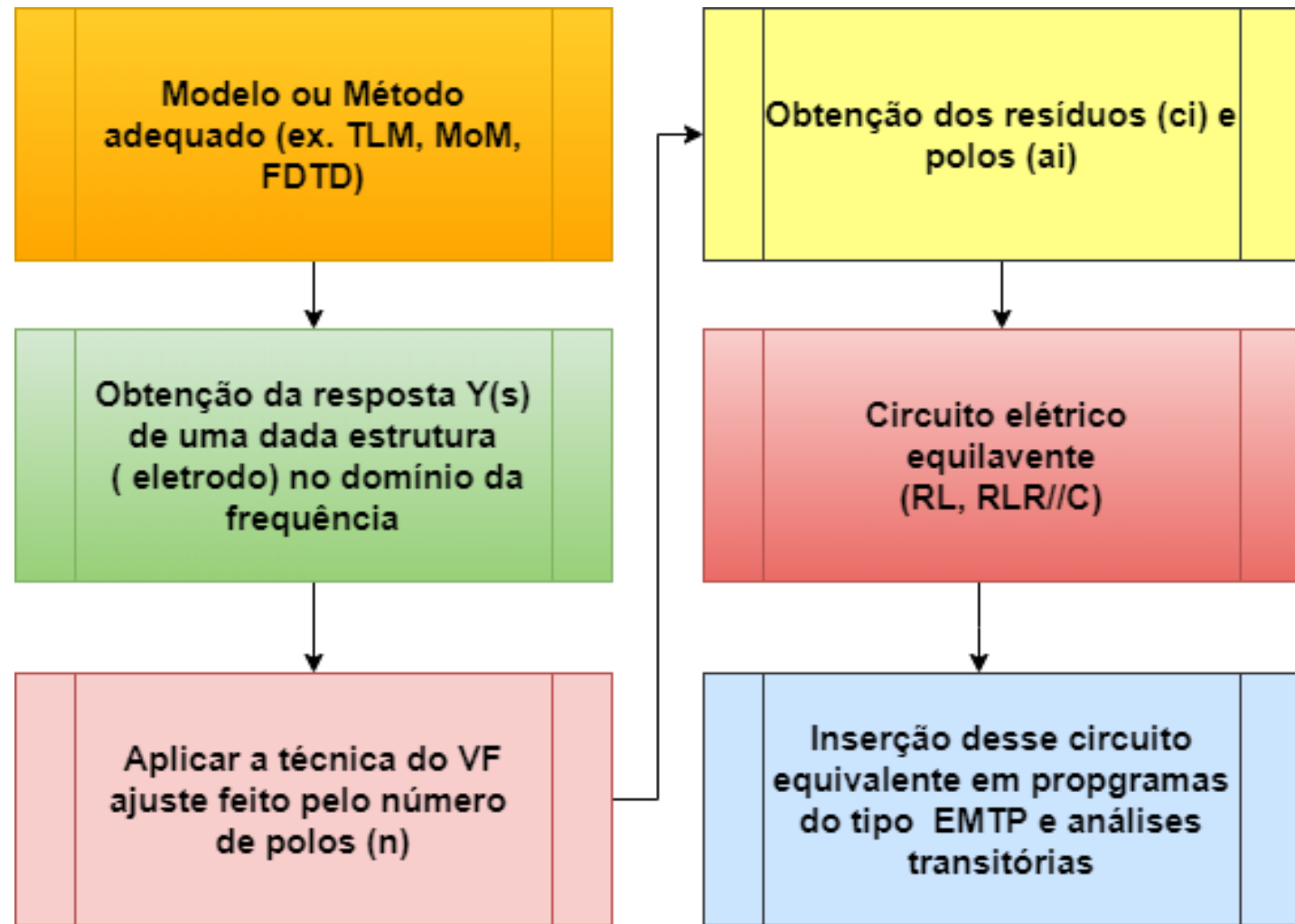
- (1)-Malha composta por eletrodos horizontais
  - MoM e Vector Fitting
- (2)-Malha composta por eletrodos horizontais+verticais
  - Eletrodos Verticais-Transmission Line Modeling (TLM) e Vector Fitting
  - Eletrodos Horizontais-Teoria eletromagnética- Modelo a parâmetros concentrados

# Eletrodo Vertical-Vector Fitting



$$YA(s) = \frac{I(s)}{V(s)}$$

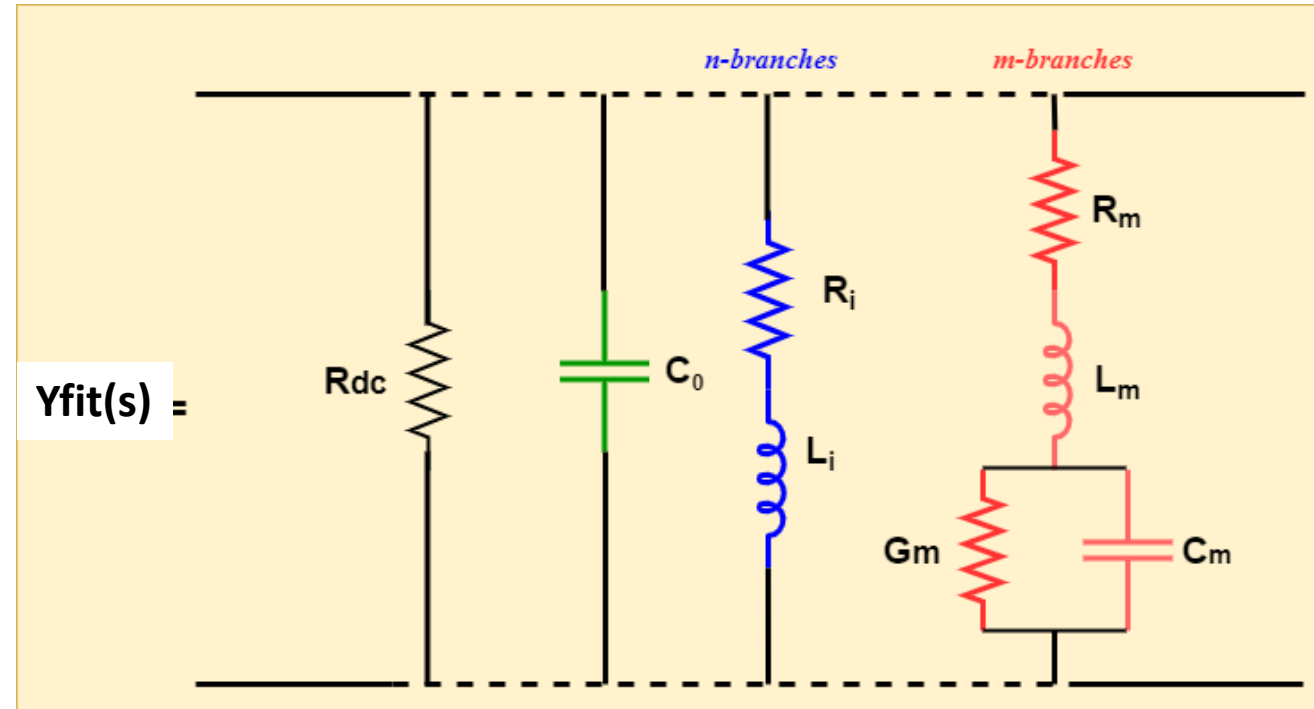
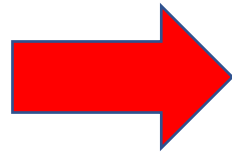
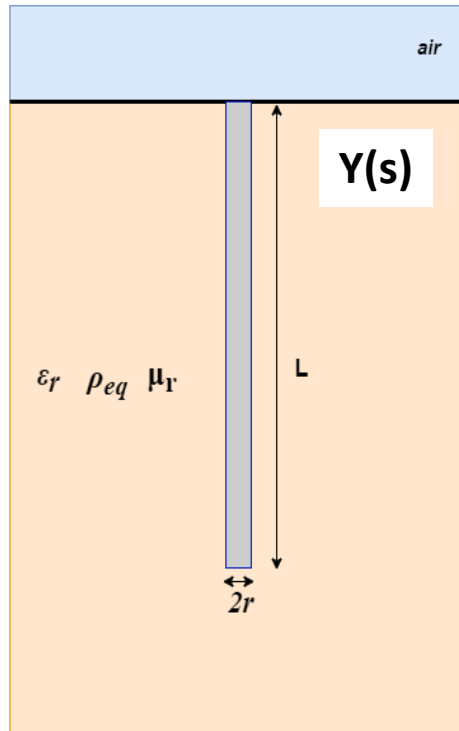
$$Y_A(s) = D + sE + \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s - a_i}$$



Onde  $c_i$  é o resíduo e  $a_i$  é o polo de cada ramo. E  $n$  é o número de polos

O VF fornece o circuito elétrico mais próximo (menor error) para uma dada  $Y(s)$ .

# Admitância de aterramento

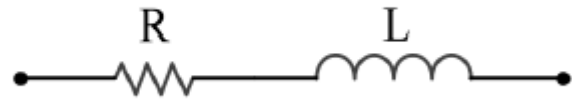


$$Y_{fit}(s) = D + sE + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{s - a_i}$$

# Cálculo dos parâmetros de circuitos

## Polos Reais

$$F_R(s) = \frac{c_i}{s - a_i}$$



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

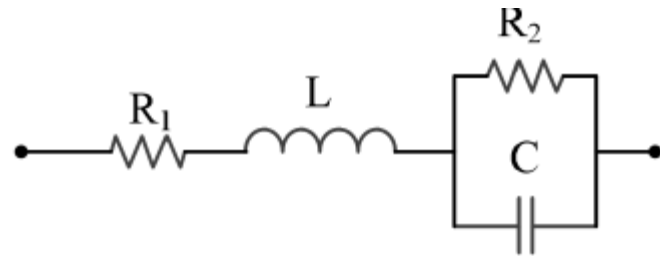
$$L = \frac{1}{c_i}$$

$$R = -\frac{a_i}{c_i}$$

## Polos Complexos Conjugados

$$F_C(s) = \frac{c_1}{s - a_1} + \frac{c_2}{s - a_2}$$

$$F_C(s) = \frac{(c_1 + c_2)s - (c_1a_2 + c_2a_1)}{s^2 - (a_1 + a_2)s + (a_1a_2)}$$



$$Y_c = \frac{1}{L} \frac{s + \left(\frac{1}{R_2C}\right)}{s^2 + \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2C}\right)s + \left(\frac{R_1}{LR_2C} + \frac{1}{LC}\right)}$$

$$L = \frac{1}{(c_1 + c_2)}$$

$$R_1 = \frac{K}{(c_1 + c_2)}$$

$$k = \left[ -(a_1 + a_2) + \left( \frac{c_1a_2 + c_2a_1}{c_1 + c_2} \right) \right]$$

$$C = \frac{(c_1 + c_2)}{a_1a_2 + kQ}$$

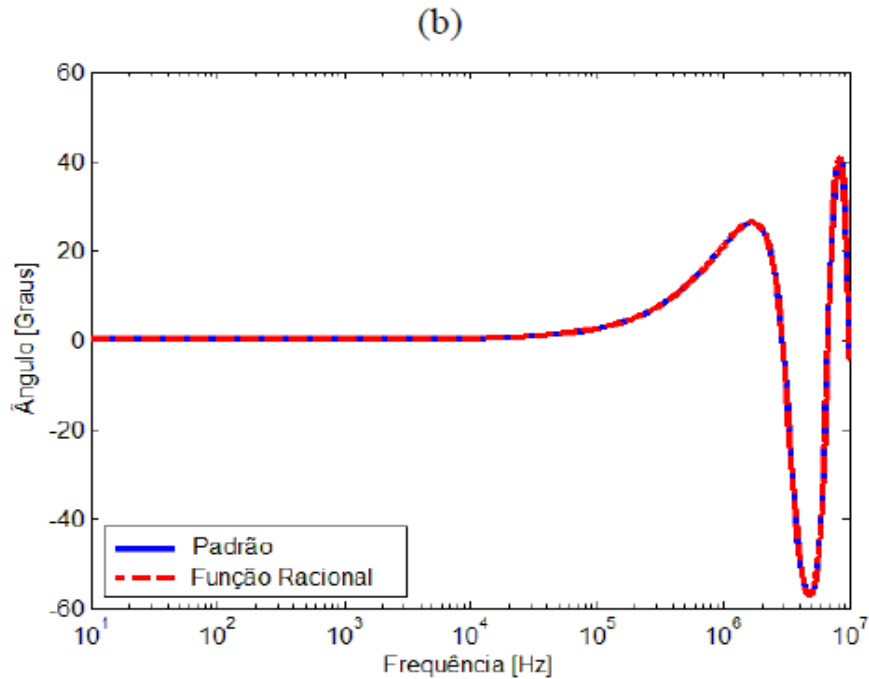
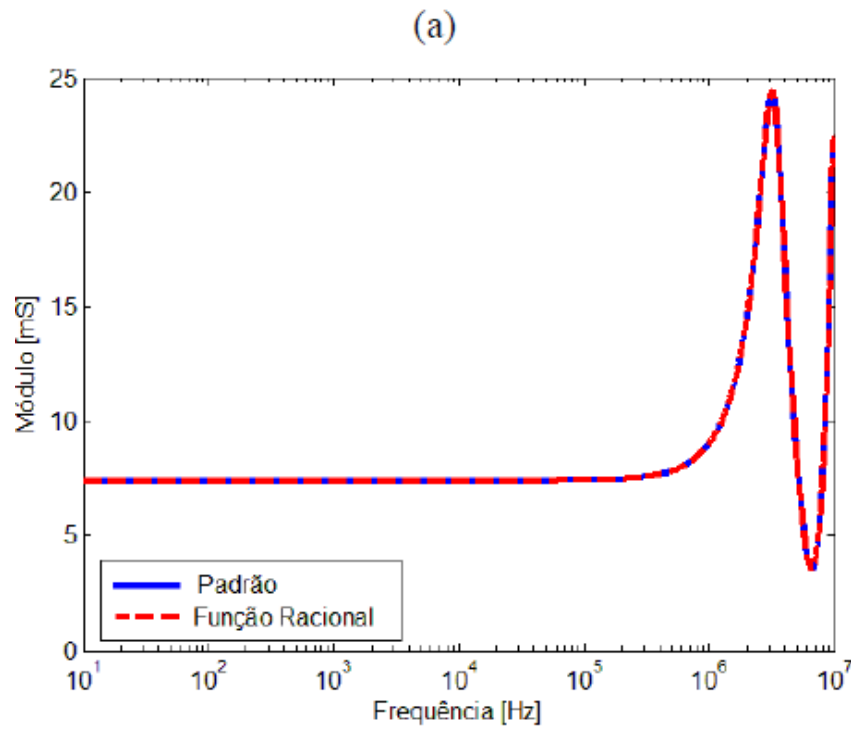
$$R_2 = -\frac{1}{CQ}$$

$$Q = \frac{c_1a_2 + c_2a_1}{c_1 + c_2}$$



# Exemplo-Eletrodo horizontal

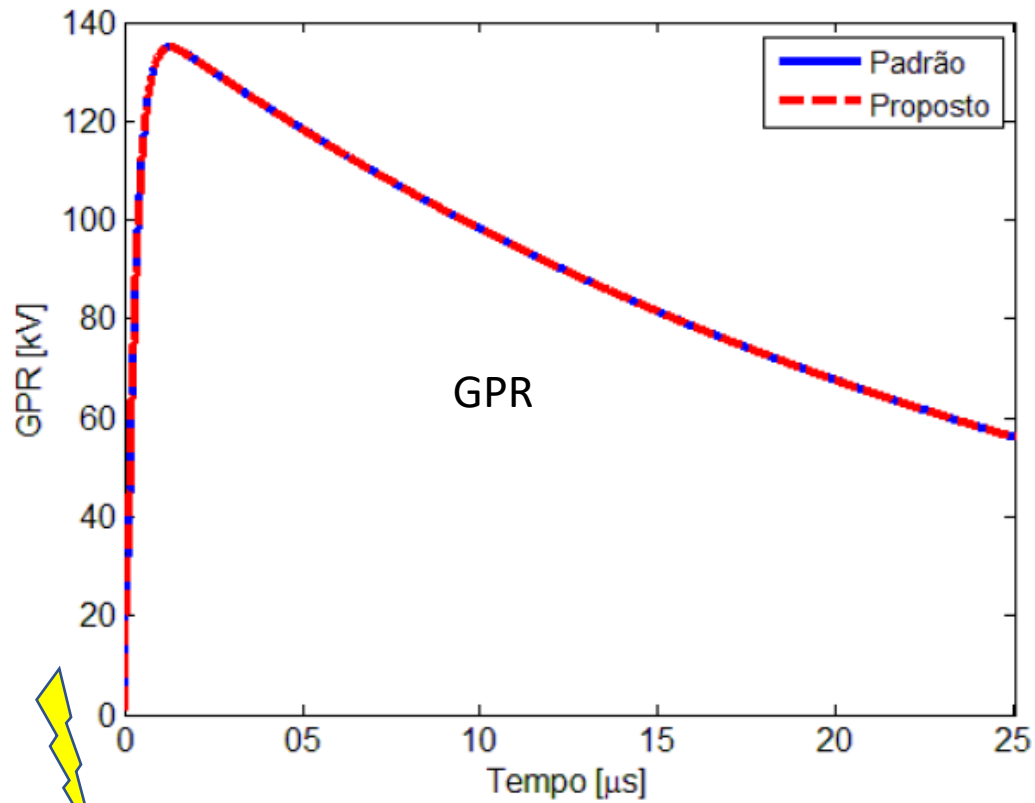
Raio = 7mm , L = 10 m,  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$



Polo real

Polos complexos

$$FR(s) = \frac{1,2133 \times 10^4}{s - (-1,3894 \times 10^8)} + \frac{(1,1788 \times 10^5 - j3,2809 \times 10^4)}{s - (-5,6470 \times 10^6 + j2,0289 \times 10^7)} + \frac{(1,1788 \times 10^5 + j3,2809 \times 10^4)}{s - (-5,6470 \times 10^6 - j2,0289 \times 10^7)} + \frac{(1,1787 \times 10^5 - j1,0563 \times 10^4)}{s - (-5,6470 \times 10^6 + j6,2927 \times 10^7)} + \frac{(1,1787 \times 10^5 + j1,0563 \times 10^4)}{s - (-5,6470 \times 10^6 - j6,2927 \times 10^7)} + \frac{(1,4090 \times 10^5 - j2,7333 \times 10^3)}{s - (-6,2200 \times 10^6 + j1,0675 \times 10^8)} + \frac{(1,4090 \times 10^5 + j2,7333 \times 10^3)}{s - (-6,2200 \times 10^6 - j1,0675 \times 10^8)} + \frac{(1,3293 \times 10^6 + j9,1372 \times 10^3)}{s - (-1,2551 \times 10^7 + j2,5381 \times 10^8)} + \frac{(1,3293 \times 10^6 - j9,1372 \times 10^3)}{s - (-1,2551 \times 10^7 - j2,5381 \times 10^8)}$$



1 ramo RL polo real  
4 ramos RLRC polos complexos conjugados

$$F_C(s) = \frac{c_1}{s - a_1} + \frac{c_2}{s - a_2}$$

$$L = \frac{1}{(c_1 + c_2)}$$

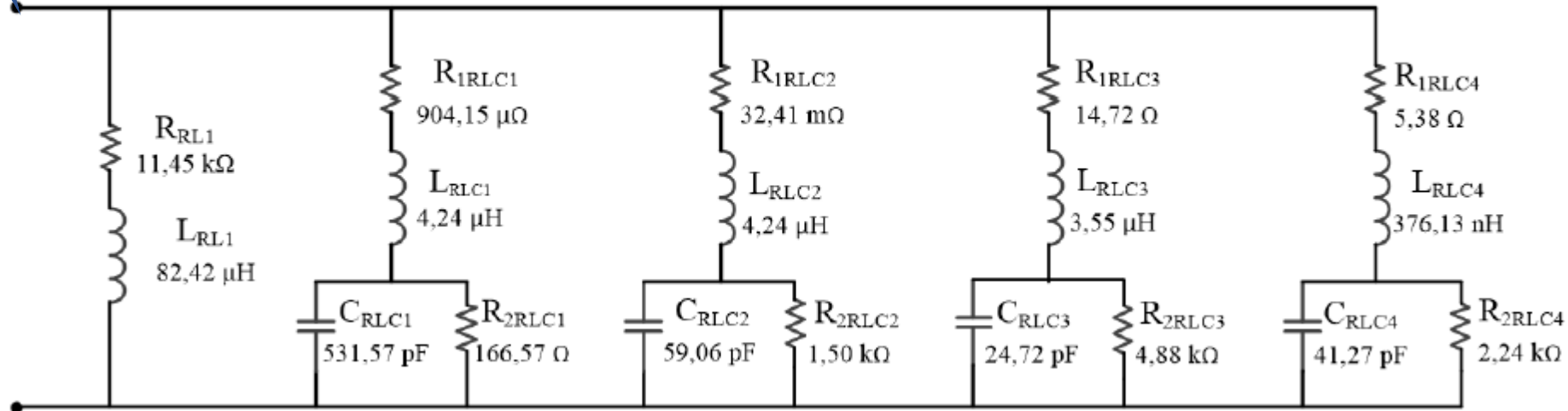
$$R_1 = \frac{K}{(c_1 + c_2)}$$

$$k = \left[ -(a_1 + a_2) + \left( \frac{c_1 a_2 + c_2 a_1}{c_1 + c_2} \right) \right]$$

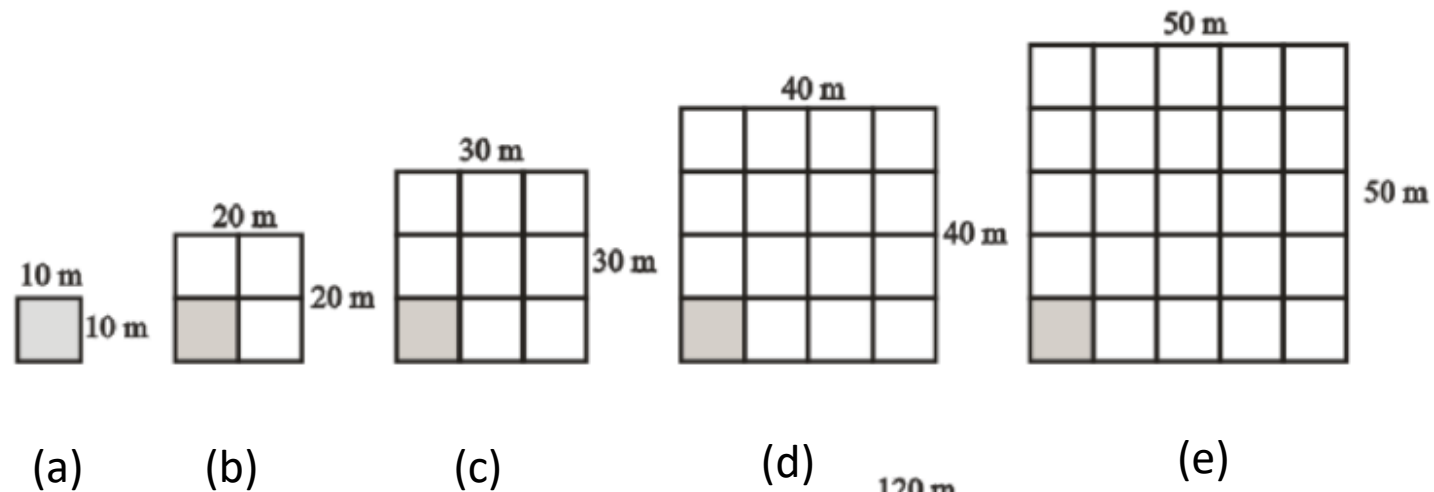
$$C = \frac{(c_1 + c_2)}{a_1 a_2 + kQ}$$

$$R_2 = -\frac{1}{CQ}$$

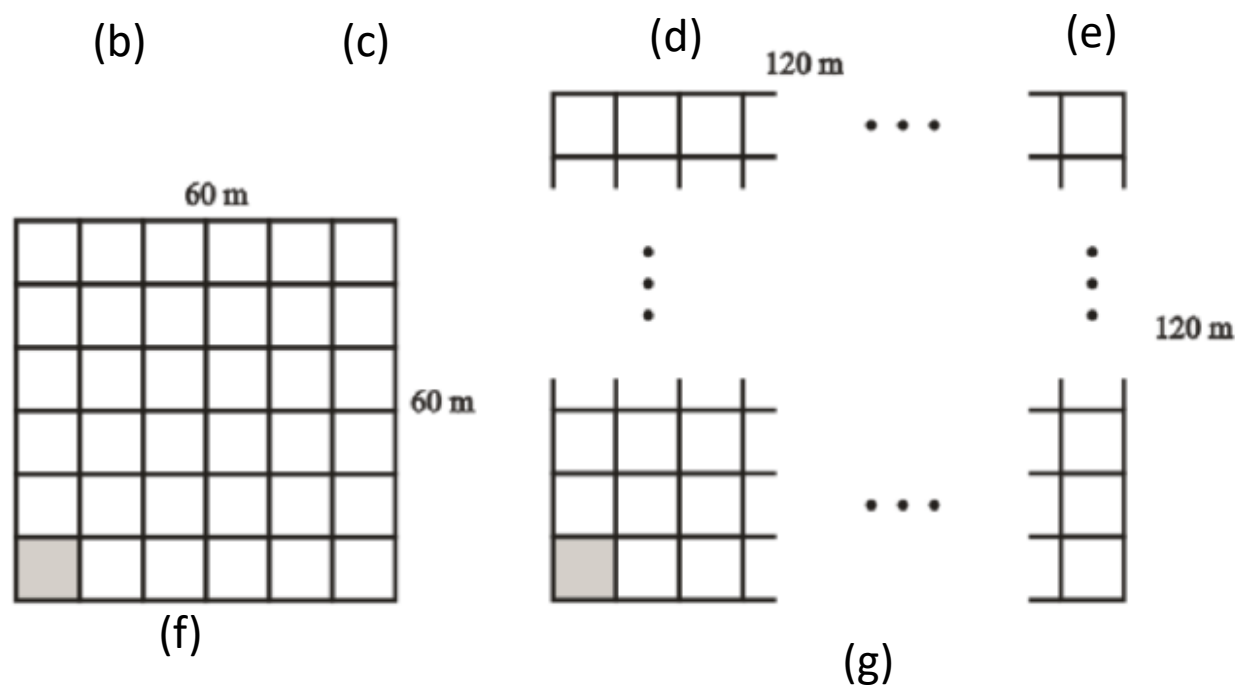
$$Q = \frac{c_1 a_2 + c_2 a_1}{c_1 + c_2}$$



# (1) Malha composta por eletrodos horizontais modeladas pelo MoM e VF



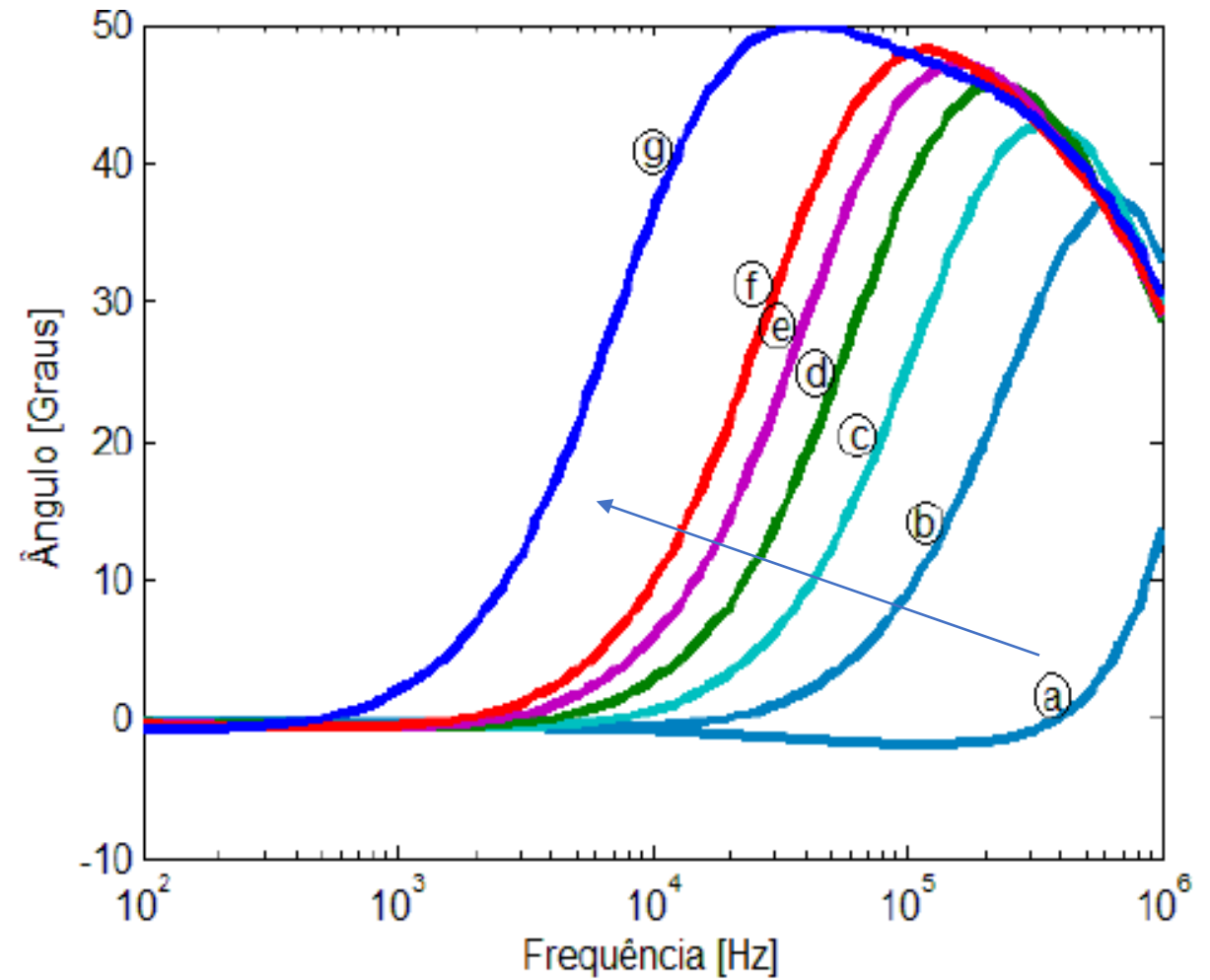
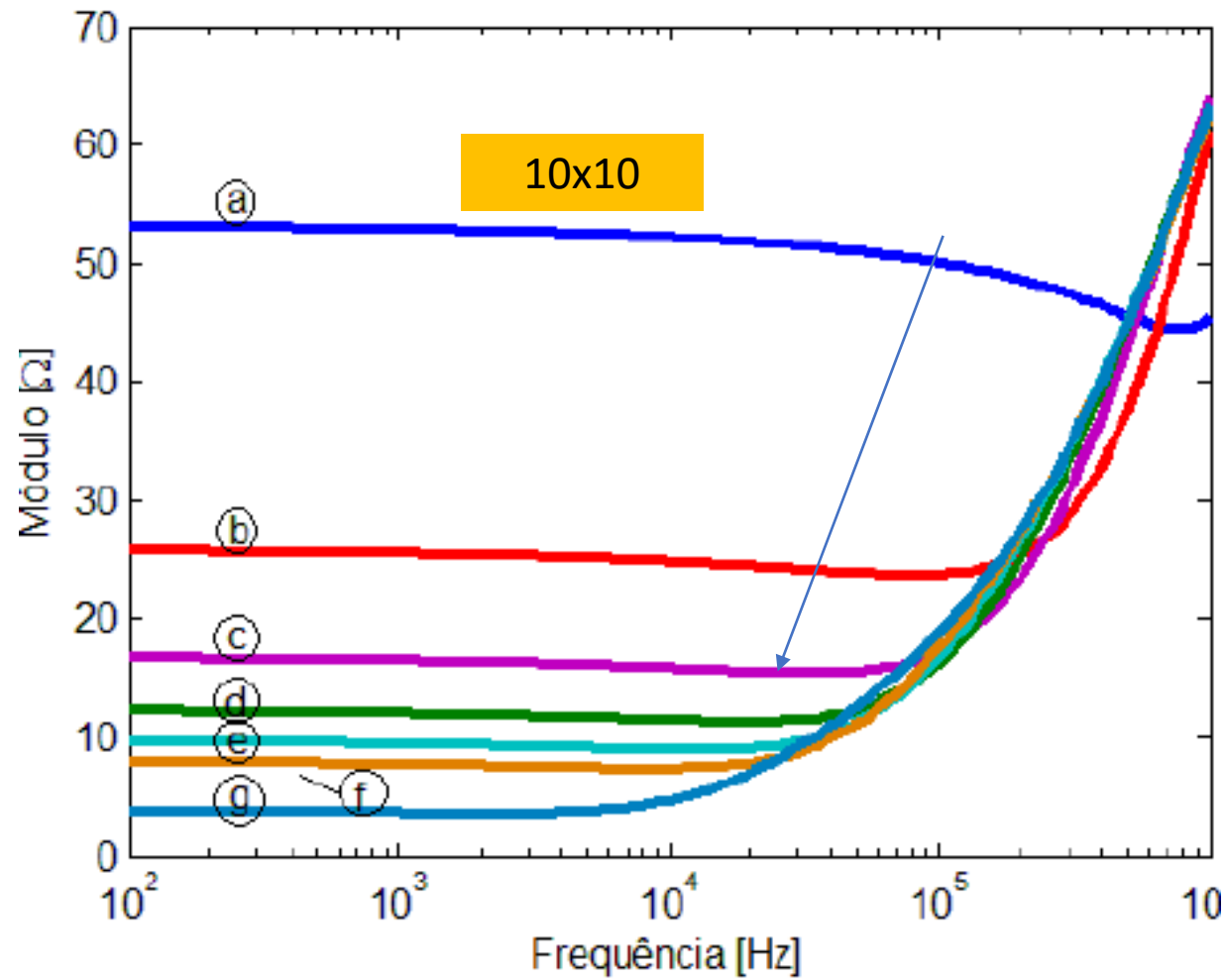
Impedância Calculada por um método numérico (MoM) via Matlab e sintetizada pelo Vector Fitting



Nas simulações foram considerados os mesmos dados de entrada que em Grcev e Heimbach (1997), isto é, eletrodos de cobre (resistividade igual a  $1,724 \times 10^8 \Omega\text{m}$ ) com raio de  $7 \times 10^{-3} \text{ m}$ , enterrados a uma profundidade de 0,5 m, em solo de resistividade elétrica de  $1000 \Omega\text{m}$  e permissividade elétricas relativa igual a 9.

UMA PROPOSTA DE REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO DIRETAMENTE NO DOMÍNIO DO TEMPO

# Impedância de Malhas-eletrodos horizontais



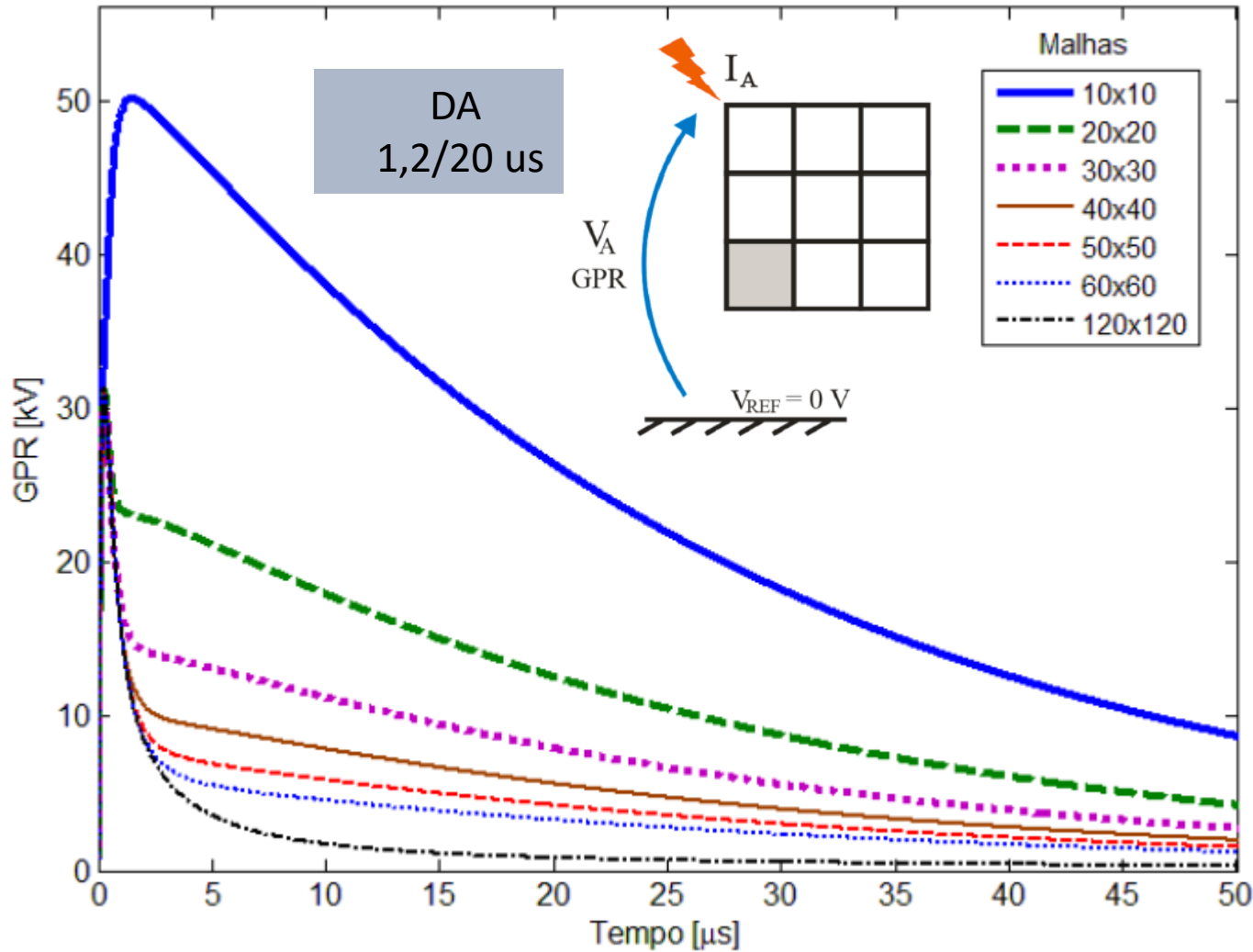
# Resíduos

Malhas		
10x10	20x20	50x50
Resíduos		
$-16,1012 \times 10^{-3}$	$-53,4710 \times 10^{-3}$	$-333,0837 \times 10^{-3}$
$-95,9139 \times 10^{-3}$	$-312,7573 \times 10^{-3}$	-2,0299
$-716,1318 \times 10^{-3}$	-1,9654	-11,6803
-3,0872	-9,0770	-62,0848
-20,7999	-50,7101	-366,0416
-63,0525	-199,1777	$-4,1735 \times 10^3$
-458,2135	$-1,2764 \times 10^3$	$34,9255 \times 10^3$
$-1,0841 \times 10^3$	$-13,0935 \times 10^3$	$5,5567 \times 10^3$
$-171,4369 \times 10^3$	$92,8693 \times 10^3$	$9,5938 \times 10^3$
$3,1507 \times 10^6$	$2,4587 \times 10^6$	$2,6769 \times 10^6$
$(39,9122 - j78,6353) \times 10^3$	$(-84,9360 - j29,7105) \times 10^3$	$(-51,5348 - j33,5560) \times 10^3$
$(39,9122 + j78,6353) \times 10^3$	$(-84,9360 + j29,7105) \times 10^3$	$(-51,5348 + j33,5560) \times 10^3$

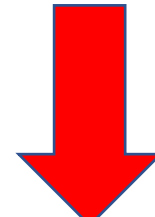
# Polos

Polos		
-522,1032	-457,1261	-432,0214
$-2,4666 \times 10^3$	$-2,0631 \times 10^3$	$-1,9176 \times 10^3$
$-8,8844 \times 10^3$	$-7,0308 \times 10^3$	$-6,4131 \times 10^3$
$-28,9712 \times 10^3$	$-21,8763 \times 10^3$	$-19,7010 \times 10^3$
$-87,6841 \times 10^3$	$-63,7435 \times 10^3$	$-57,2003 \times 10^3$
$-249,4773 \times 10^3$	$-175,9718 \times 10^3$	$-162,2448 \times 10^3$
$-676,0449 \times 10^3$	$-466,0119 \times 10^3$	$-295,9174 \times 10^3$
$-1,8074 \times 10^6$	$-1,2351 \times 10^6$	$-1,0070 \times 10^6$
$-9,3687 \times 10^6$	$-2,0402 \times 10^6$	$-2,5237 \times 10^6$
$-157,4501 \times 10^6$	$-120,4843 \times 10^6$	$-140,3103 \times 10^6$
$(-5,8597 + j6,7572) \times 10^6$	$(-10,6815 + j5,0379) \times 10^6$	$(-8,8517 + j6,2662) \times 10^6$
$(-5,8597 - j6,7572) \times 10^6$	$(-10,6815 - j5,0379) \times 10^6$	$(-8,8517 - j6,2662) \times 10^6$

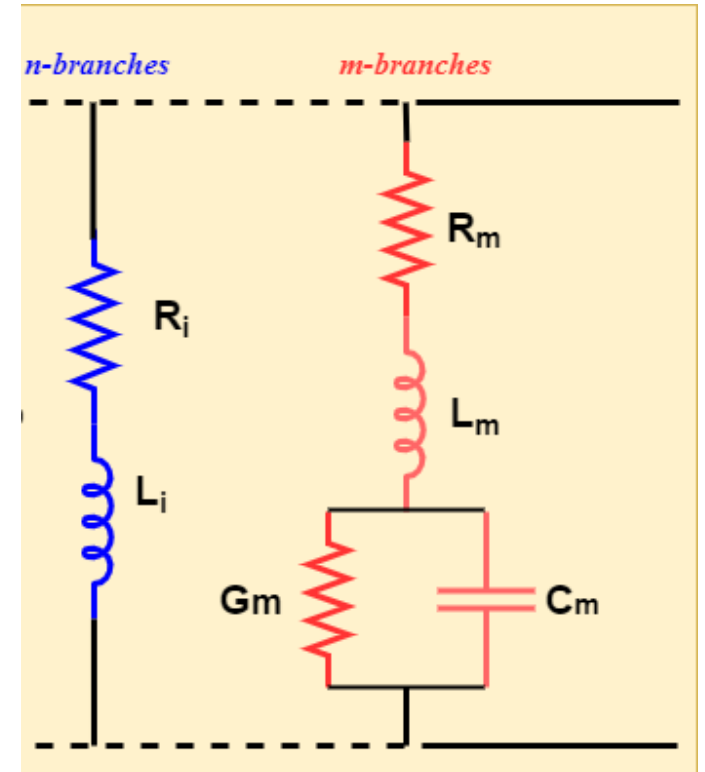
# Grounding Potential Rise (GPR)



A partir dos Resíduos e Polos, monta-se um circuito a parâmetros concentrados Yfit(s)

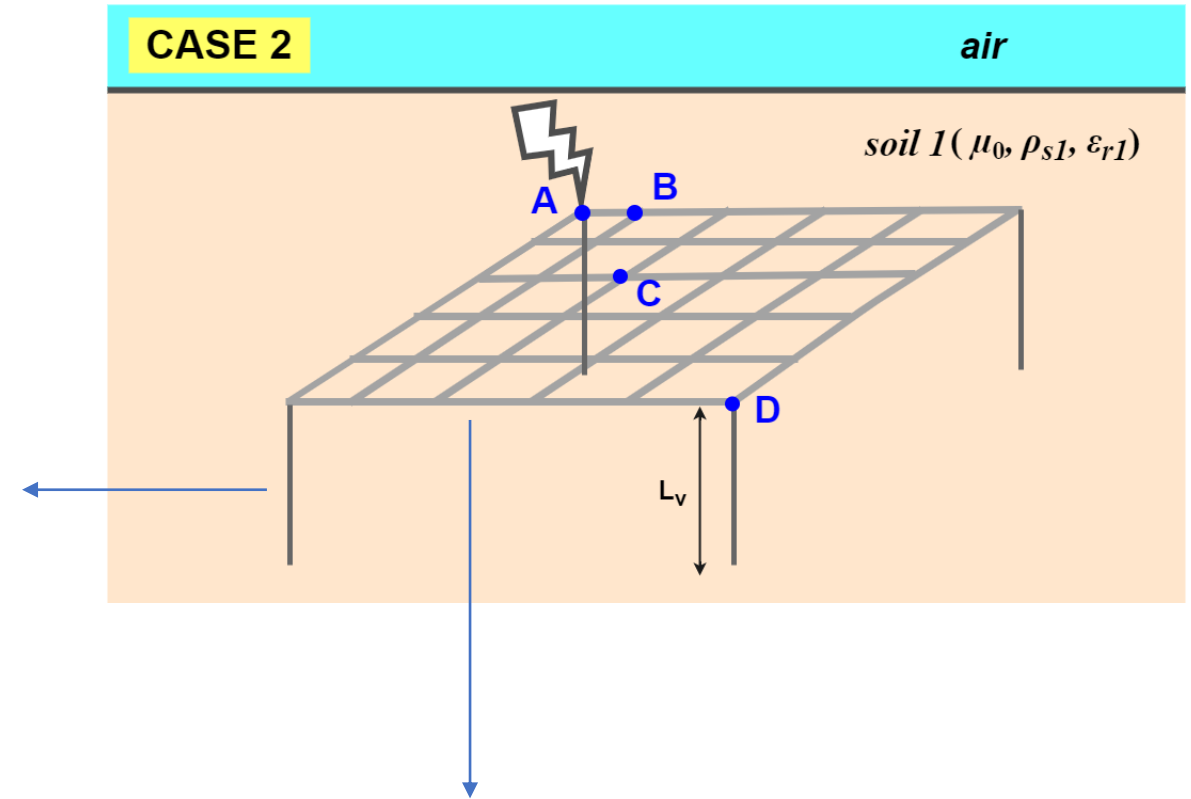


Yfit(s)



## (2) Malhas –eletrodos modelados separadamente

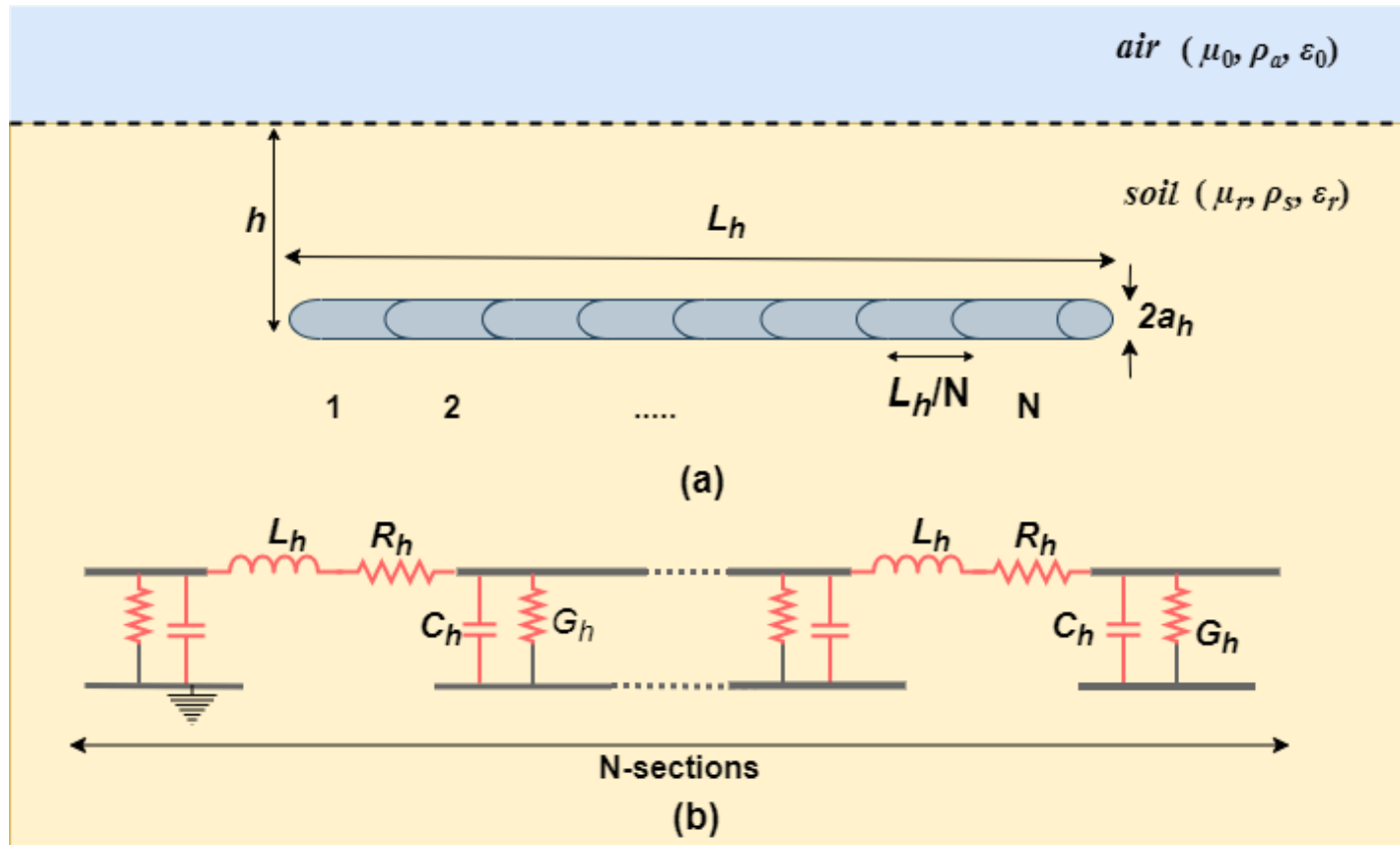
- Eletrodos verticais - modelos a parâmetros distribuídos usando a teoria de Linhas de Transmissão e Vector Fitting;



- Eletrodos horizontais - Teoria eletromagnética e modelo a parâmetros concentrados;



# Eletrodos Horizontais-Modelo a parâmetros concentrados



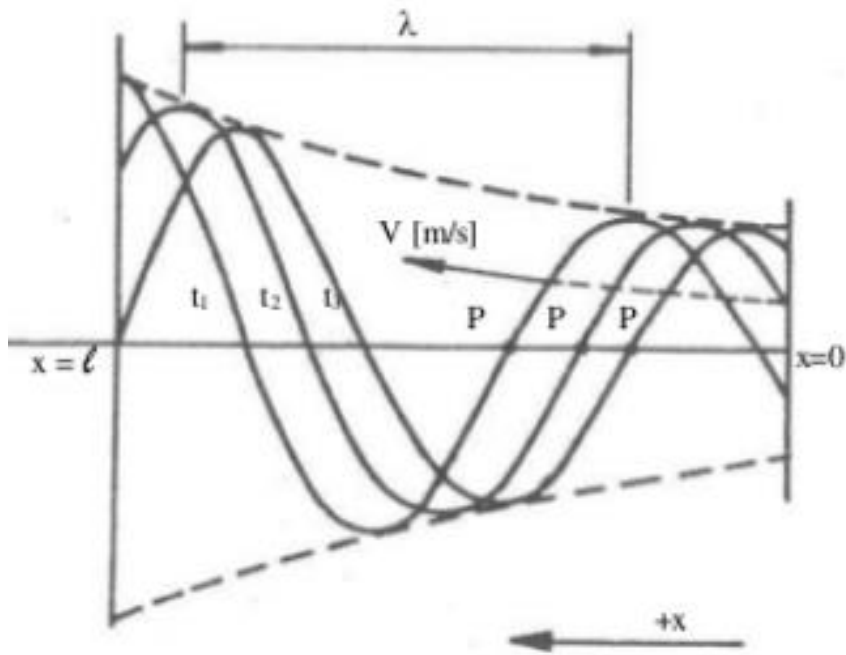
Quando  $l_e \gg d$ , as equações de Sunde não podem ser empregadas. Nesse caso, são propostas as fórmulas de Cecconi:

$$L_h = \frac{\mu_0 l_e}{4\pi} \left[ \ln \frac{2l_e}{r_h} + \ln \frac{l_e}{d} - 2 + \frac{2d}{l_e} - \frac{d^2}{l_e^2} + \frac{1}{2} \frac{d^4}{l_e^4} \right];$$

$$C_h = \frac{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r l_e^2}{2L_h}; \quad G_h = \frac{C_h}{\rho_s \epsilon_0 \epsilon_r}; \quad R_h = \frac{\rho_c}{\pi r_h^2} \quad (5)$$

# Critério para escolher ( $l_e$ )

Comprimento de onda em um dado meio (m)



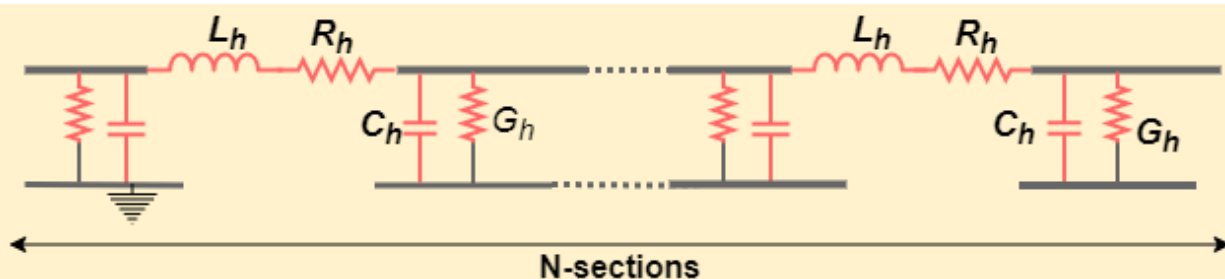
$$\gamma = \sqrt{j2\pi f \mu_m (1/\rho_m + j2\pi f \epsilon_m)} = \alpha + j\beta$$

$$\sigma_m = 1/\rho_m \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta};$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_m \epsilon_m}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_m}{\omega \epsilon_m} \right)^2} + 1 \right]}$$

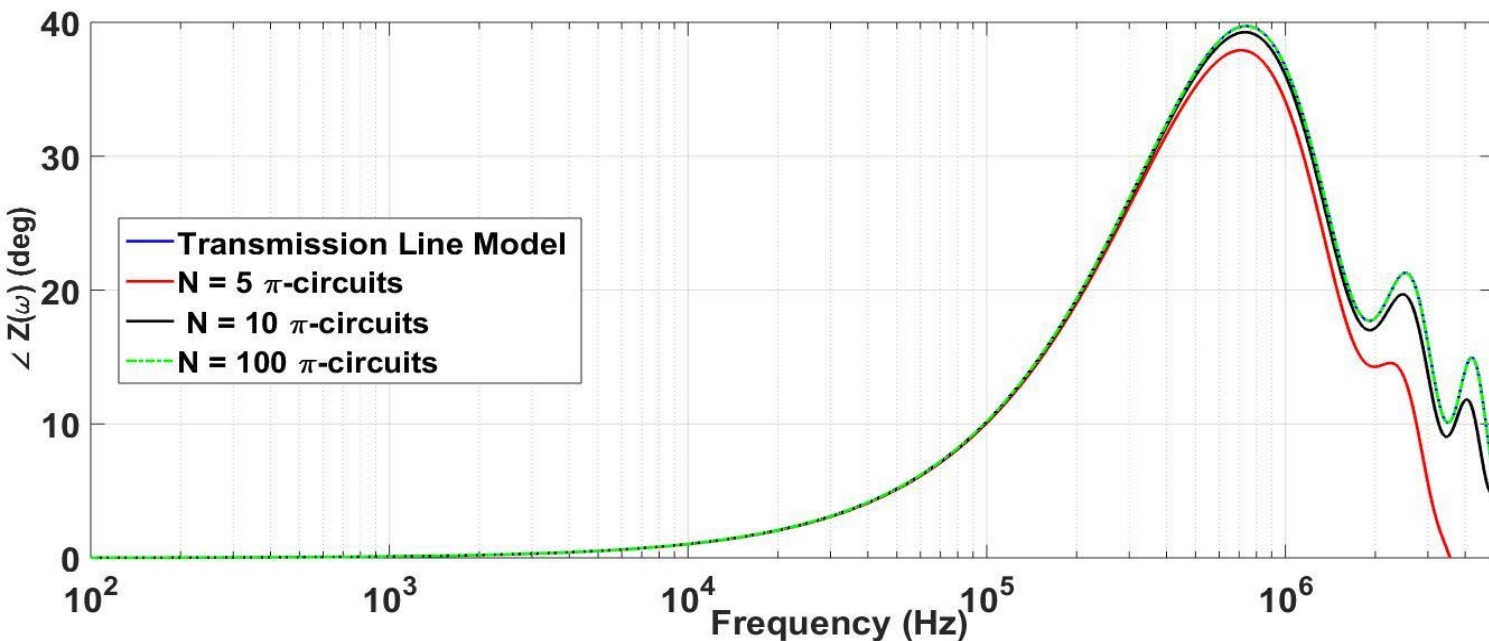
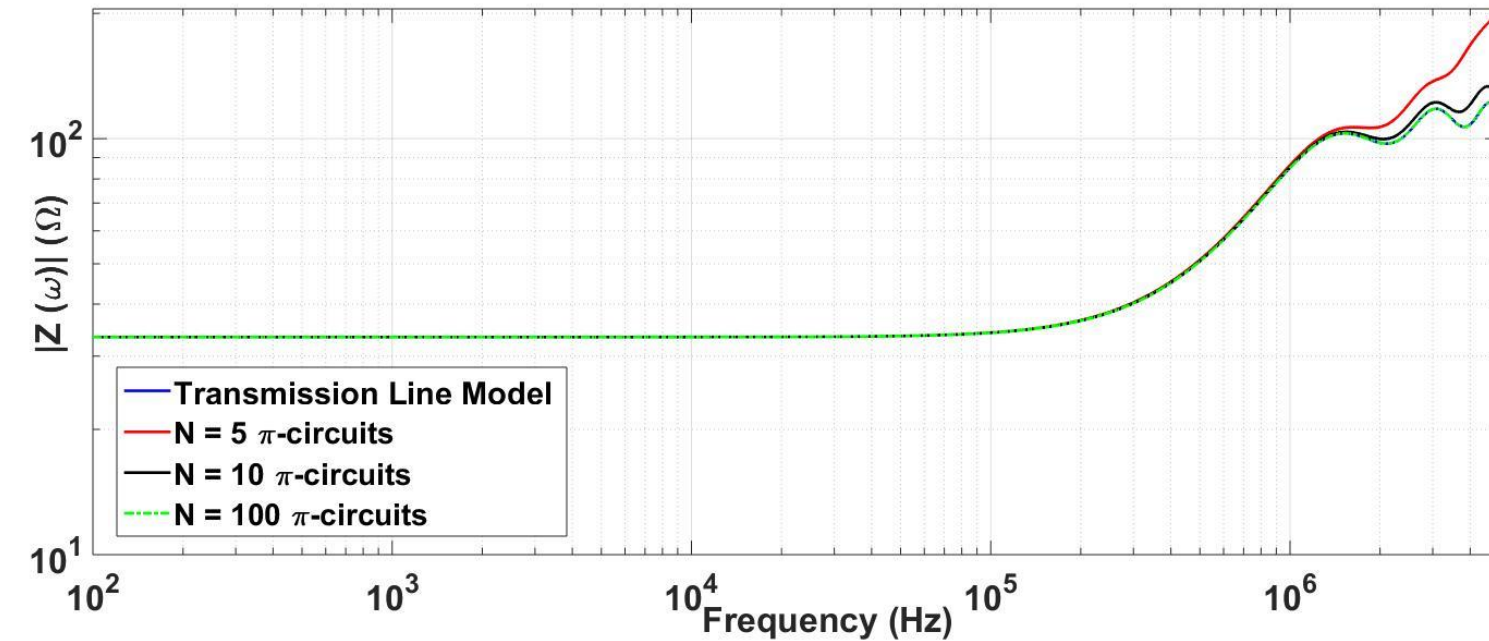
$$L_{crit} = \lambda/10;$$

$$2a_h/10 \leq l_e \leq L_{crit}$$



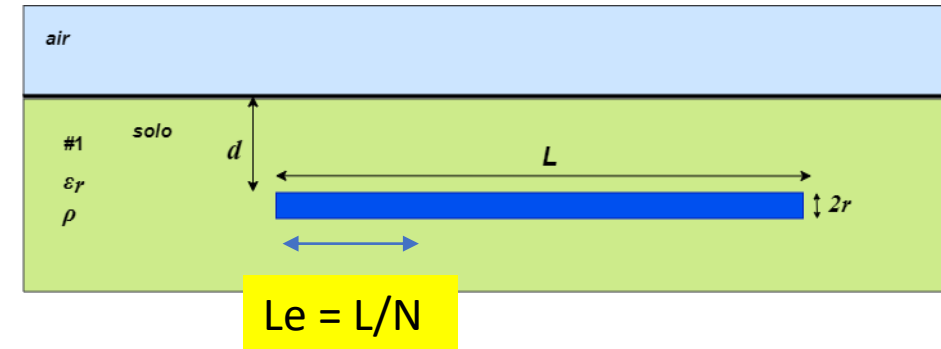
Se essa condição é satisfeita, pode-se representar um eletrodo por uma cascata de N-circuitos pi.

# Influência de N



$l_e = 6; 3 \text{ e } 0.3 \text{ m}$

Verifica-se que somente quando  $N = 100$  tem-se que a condição (\*) é satisfeita e o eletrodo é adequadamente representado pelo circuito pi.



$$L_h = \frac{\mu_0 l_e}{4\pi} \left[ \ln \frac{2l_e}{r_h} + \ln \frac{l_e}{d} - 2 + \frac{2d}{l_e} - \frac{d^2}{l_e^2} + \frac{1}{2} \frac{d^4}{l_e^4} \right];$$

$$C_h = \frac{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r l_e^2}{2L_h}; \quad G_h = \frac{C_h}{\rho_s \epsilon_0 \epsilon_r}; \quad R_h = \frac{\rho_c}{\pi r_h^2}$$

# Modelagem da Malha a Parâmetros Concentrados

The studied grid electrode is a 4-meshe grid with dimensions of 12mx12m, made of copper conductors of  $r=7\text{mm}$  radius and it is buried at a depth of  $d = 0,6\text{m}$  in a soil with  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r = 36$  and  $\mu_r = 1$ . The electrode is excited, in point A of fig.2, by a lightning current:

$$i_2(t) = 10 \cdot (e^{-14300t} - e^{-540000t}) \text{ kA.}$$

For the grid electrode the propagation constant has the value:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{j2\pi \cdot f_x \mu_0 \mu_r (\sigma + j2\pi \cdot f_x \epsilon_0 \epsilon_r)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sqrt{j2\pi \cdot 10^7 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot (0,01 + j \cdot 2\pi \cdot 10^7 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 36)} = 0,3 + j1,3$$

The phase constant  $\beta_2$  is equal to 1,3 rad/m so the wave length has the value:

$$\lambda = \frac{2\pi}{1,3} = 4,83\text{m}$$

so the length,  $l$ , of an elementary cell is chosen:

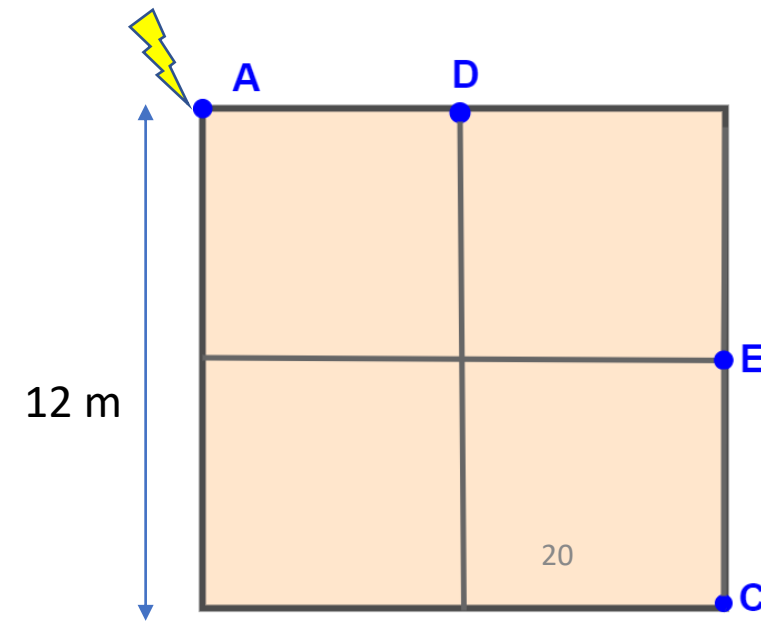
$$l = 0,24\text{m} < \frac{\lambda}{10} = 0,483\text{m}$$

$$L_h = \frac{\mu_0 l_e}{4\pi} \left[ \ln \frac{2l_e}{r_h} + \ln \frac{l_e}{d} - 2 + \frac{2d}{l_e} - \frac{d^2}{l_e^2} + \frac{1}{2} \frac{d^4}{l_e^4} \right];$$

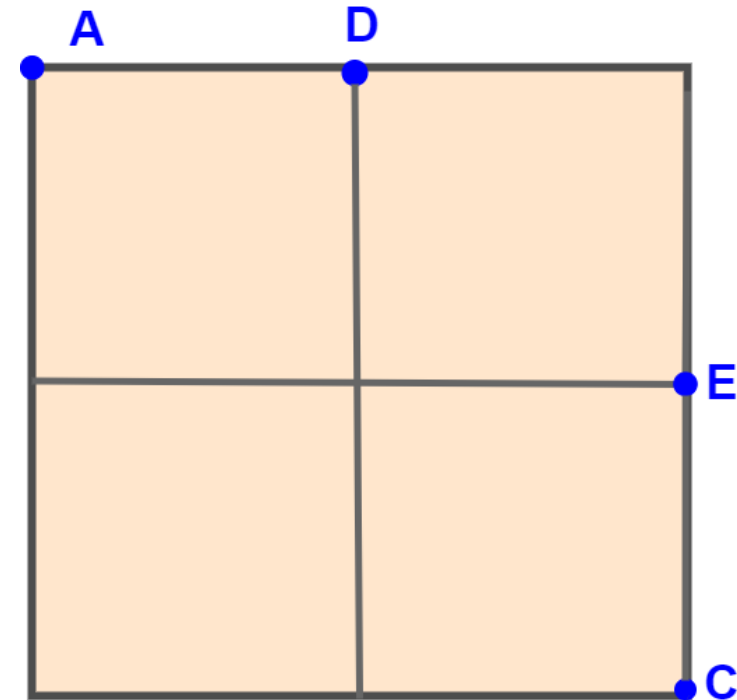
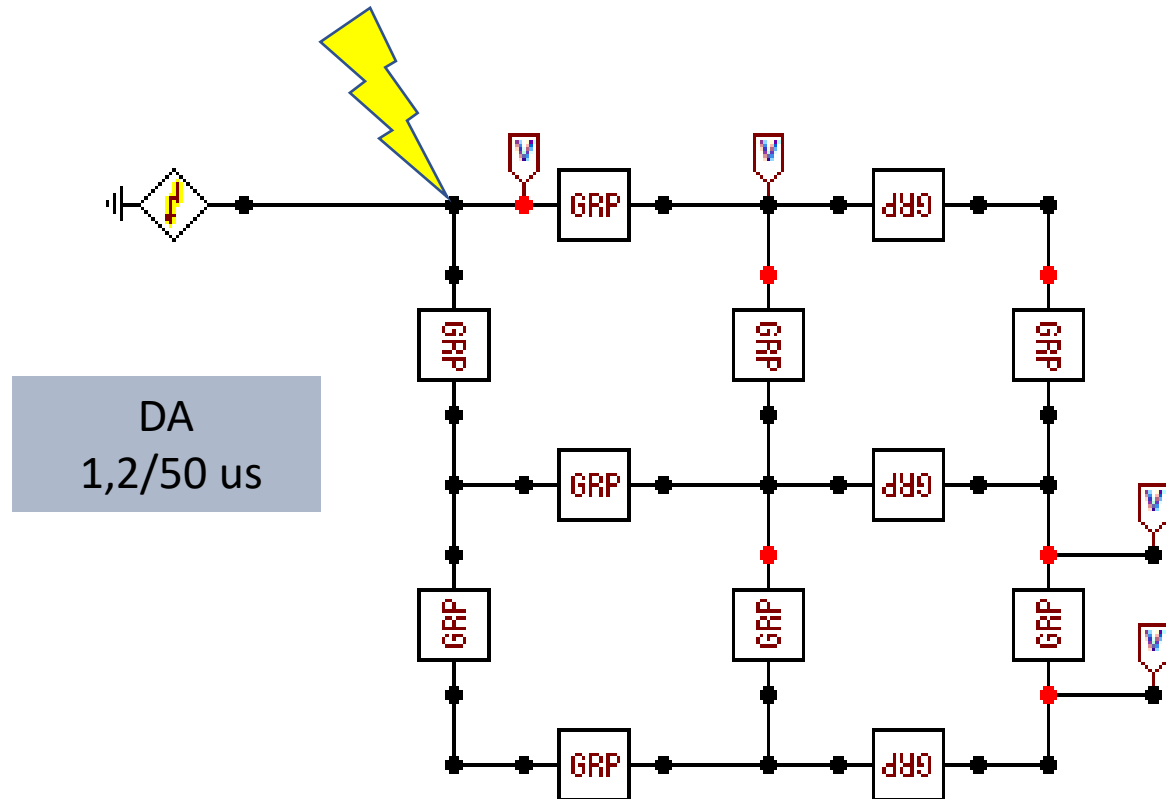
$$C_h = \frac{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r l_e^2}{2L_h}; \quad G_h = \frac{C_h}{\rho_s \epsilon_0 \epsilon_r}; \quad R_h = \frac{\rho_c}{\pi r_h^2}$$

$Le = 12/50 = 0,24;$   
 $N = 50$  pis em cada segmento

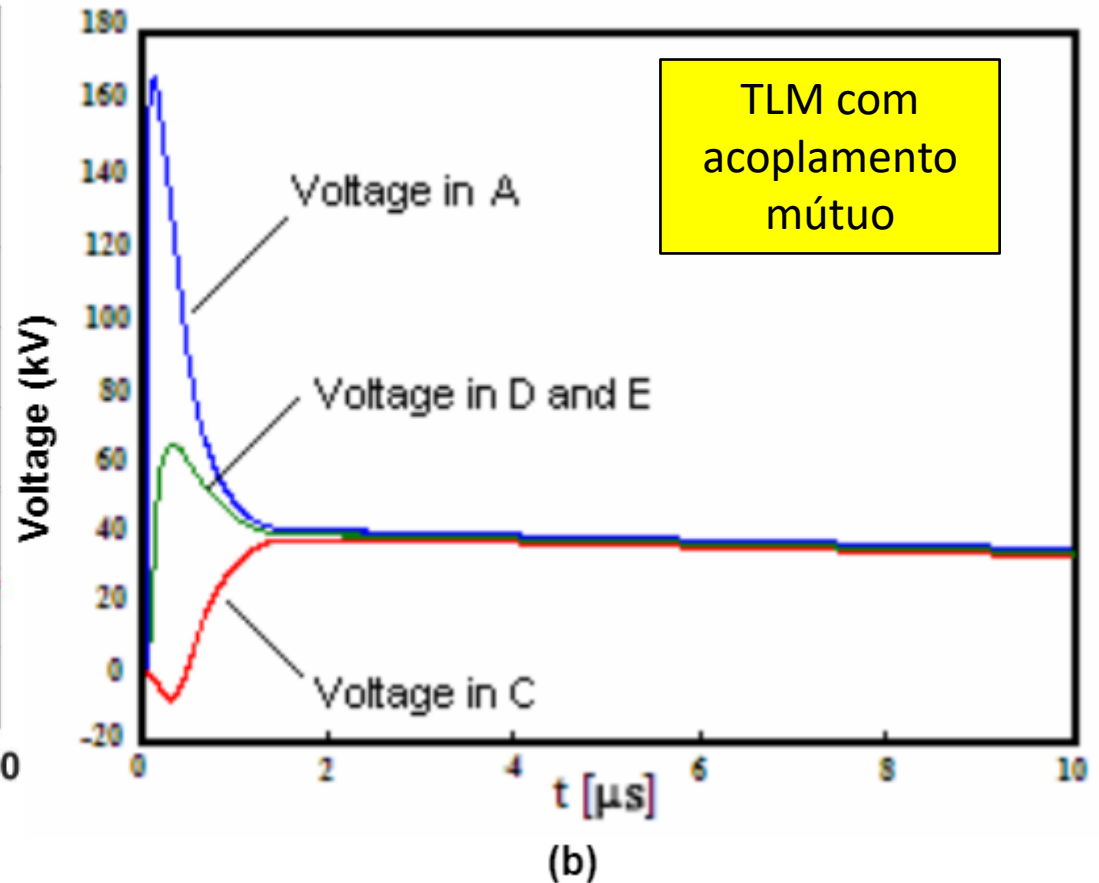
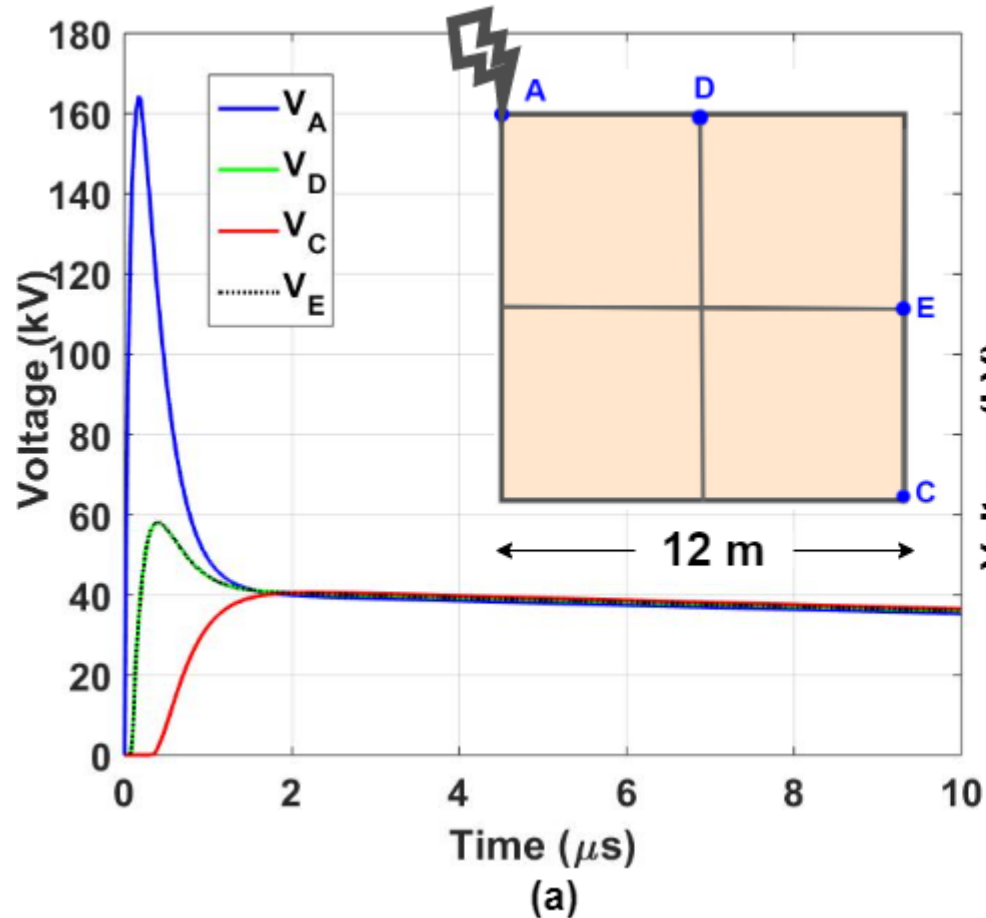
Lumped parameters	grounding grid
$R_E'$	1300 $\Omega$
$L'$	0,47 $\mu\text{H}$
$C'$	25 pF
R	27 $\mu\Omega$



# Circuito da Malha no ATP

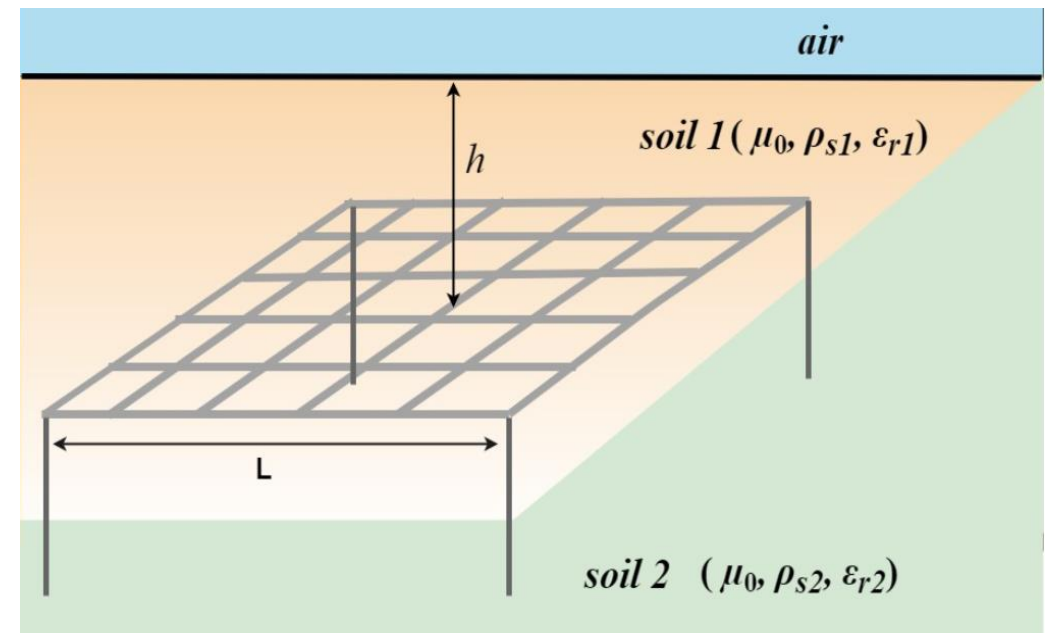


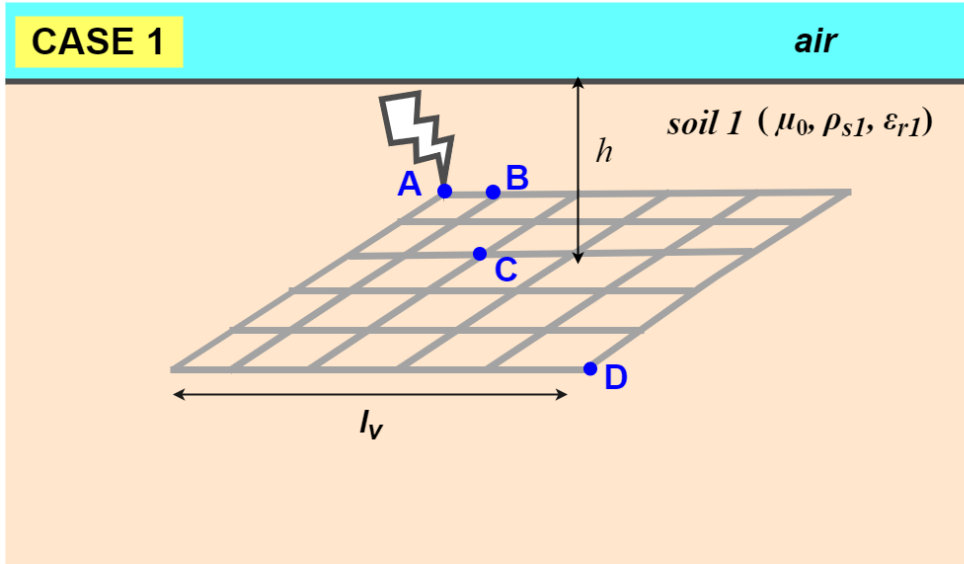
# Tensões nos pontos A, B, E e C



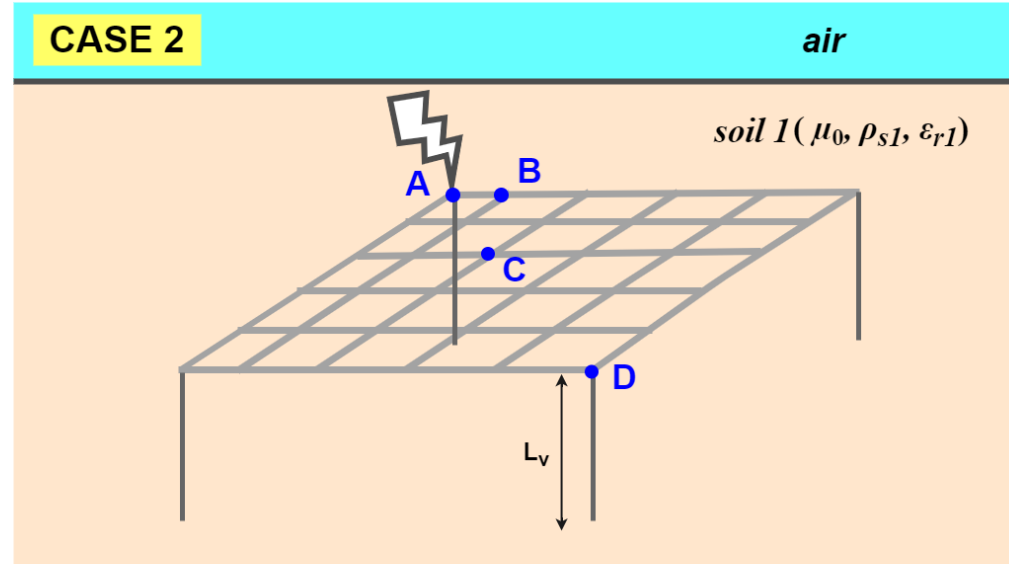
# Malha com e sem hastes verticais

- Malha de 30x30m (Solos homogêneos e estratificados)
- 4 hastes verticais de 12 m-Transmission Line Model e Vector Fitting;
- Condutores horizontais modelados por 30 circuitos pis.

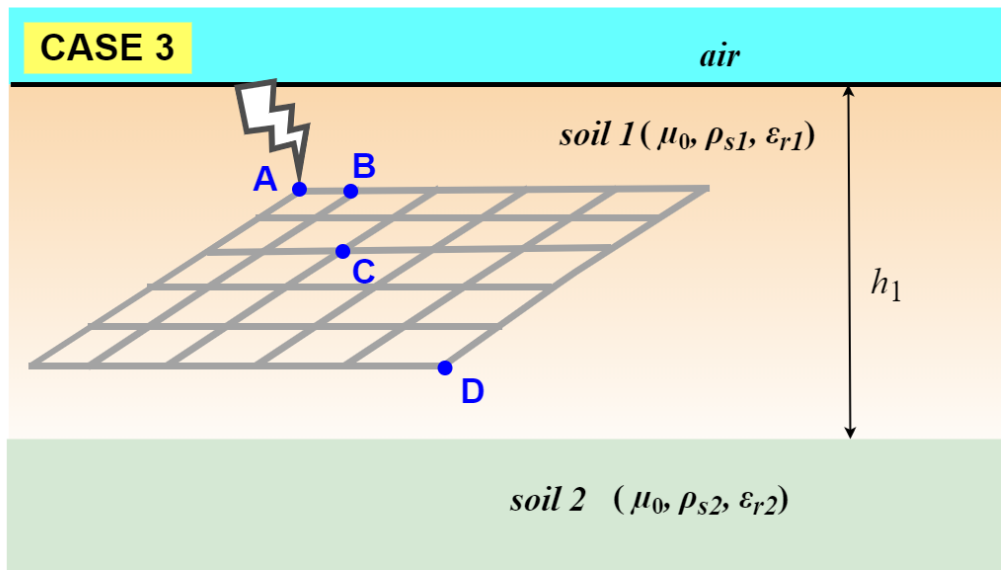




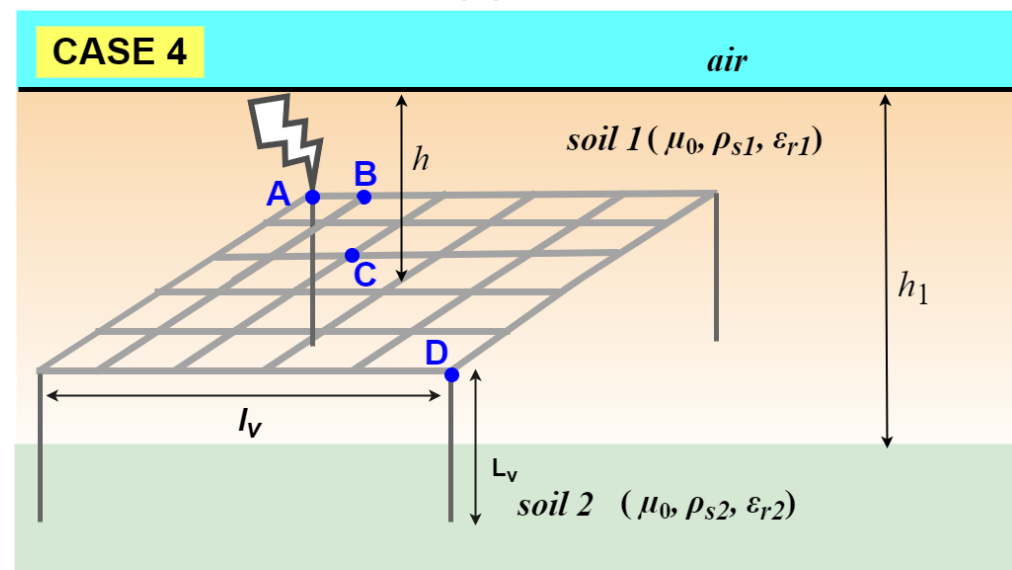
(a)



(b)



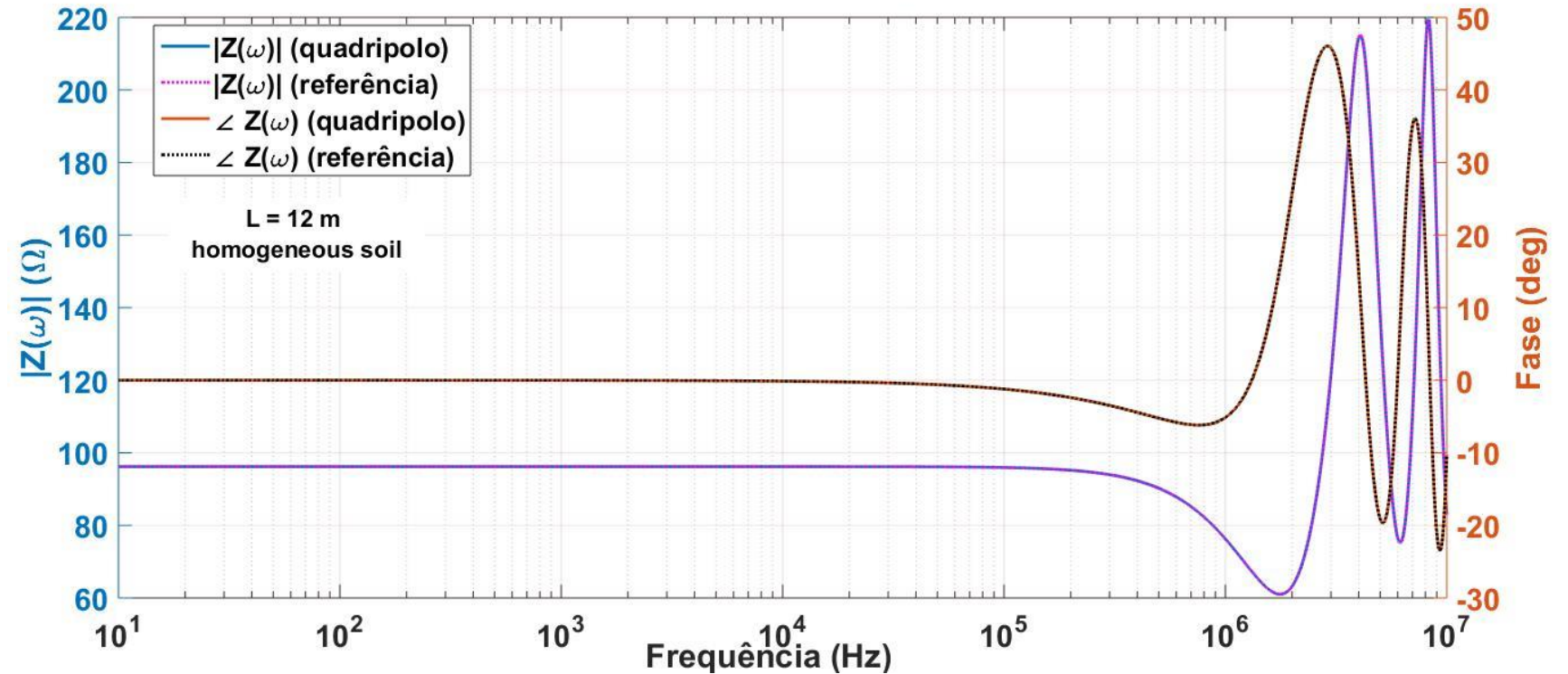
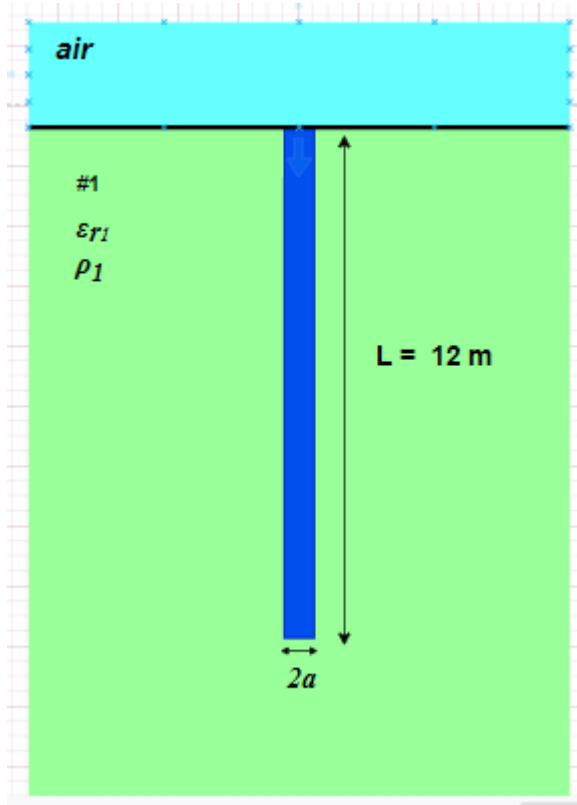
(c)



(d)



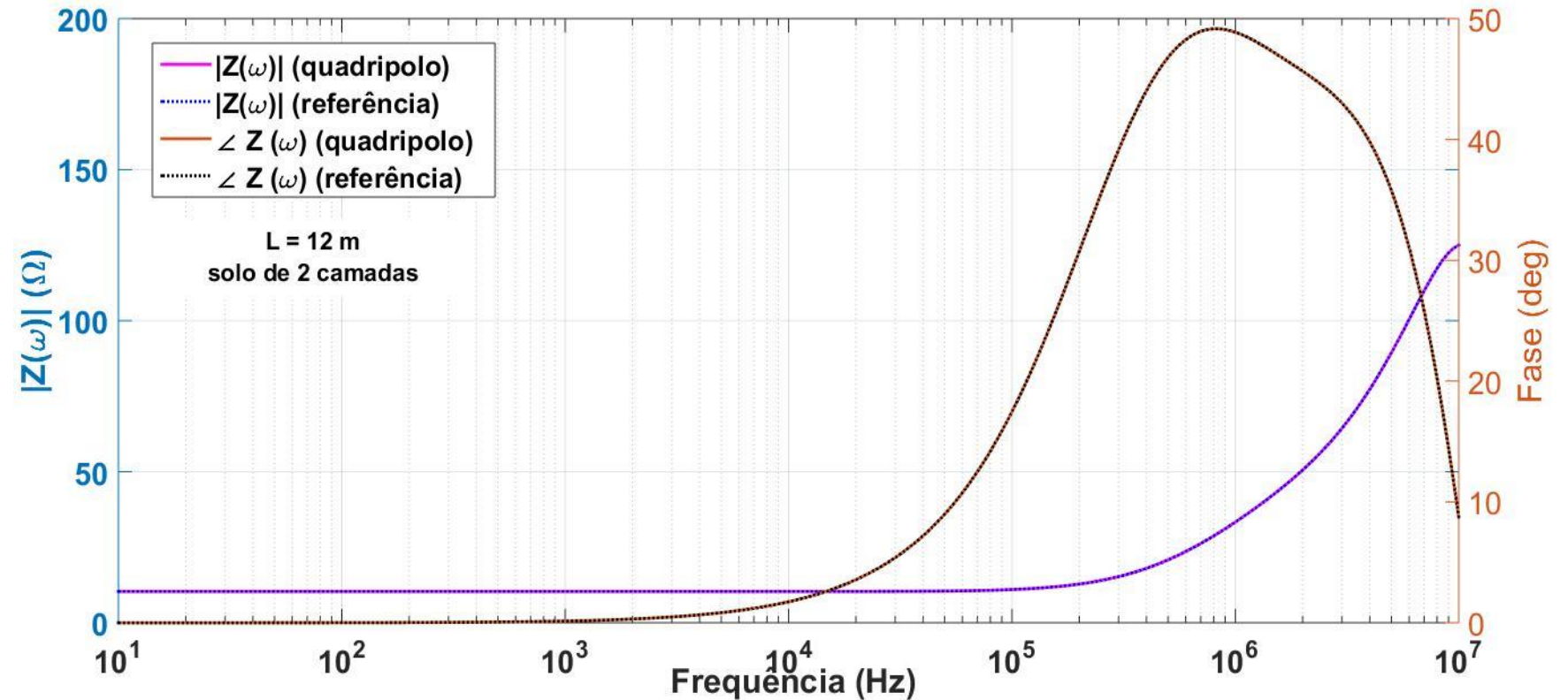
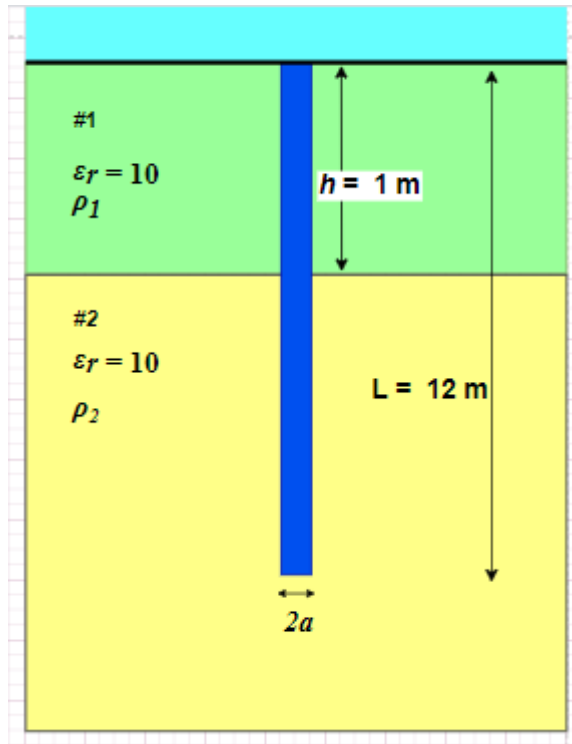
# Eletrodo vertical solo homogêneo



$a = 12,5\text{ mm}$  e  $\rho = 1,000\text{ Ohmm}$

Cálculo usando o quadripolo e em seguida Vector Fitting

# Eletrodo vertical solo estratificado

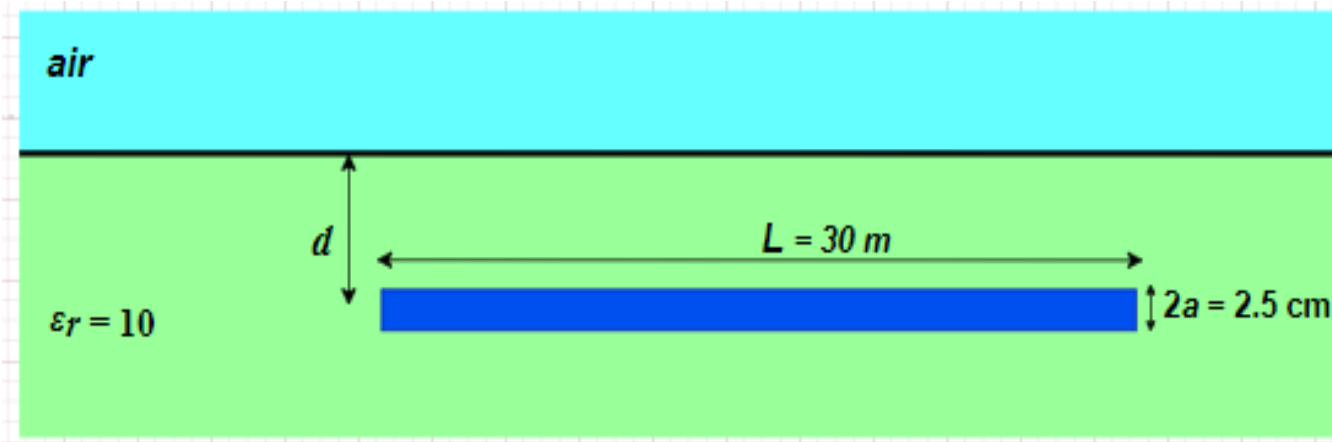


$a = 12,5\text{ mm}$  e  $\rho_1 = 1,000\text{ Ohmm}$  e  $\rho_2 = 500\text{ Ohmm}$

Cálculo de  $Z(s)$  usando o quadrupolo e em seguida Vector Fitting com  $Y(s)$

# Eletrodo horizontal solo Homogêneo

- Cálculo usando a teoria eletromagnética



F<sub>max</sub> = 1MHz, p = 1,000 Ohmm e N = 30

Raio = 12,5 mm,  $d = 0,5$ ,  $L = 30\text{ m}$ , solo de  $\rho_m = 1000\text{ Ohmm}$ ,  $\epsilon_m = 10\epsilon_0$ ,  $\mu_m = \mu_0$ .  
 Freq. Máx. Do sinal de entrada: 1 MHz

1)-Cálculo da função de propagação

$$\gamma = \sqrt{\left( j2\pi 10^6 4\pi 10^{-7} \left( \frac{1}{1000} + j2\pi 10^6 10 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \right) \right)} = \alpha + j\beta = 0.04818 + j0.08193$$

Cálculo de Lambda  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 76.68$

3)-Cálculo de Lcrit:  $L_{crit} = \lambda/10 = 7,668$

4)-Cálculo do comprimento elementar  $l_e = \frac{L}{N} = \frac{30}{30} = 1$

# Eletrodo Horizontal

## A Simplified Method for Calculating the Impedance of Vertical Grounding Electrodes Buried in a Horizontally Stratified Multilayer Ground

Publisher: IEEE

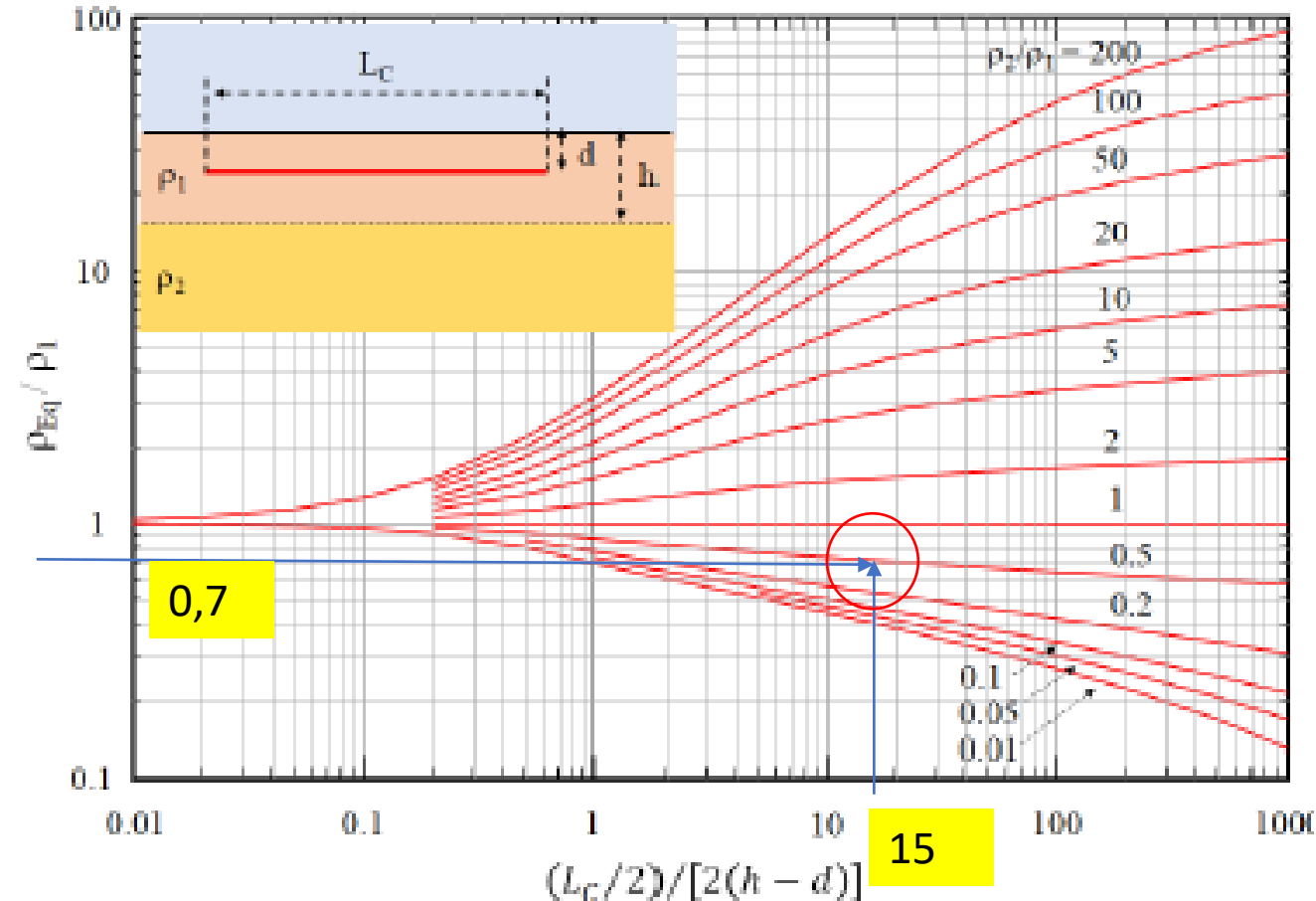
Cite This

PDF

6 Author(s)

C.E.F. Caetano ; R. Batista ; J.O.S. Paulino ; W.C. Boaventura ; I.J.S. Lopes ; E.N. Cardoso All Authors

Ábaco de Endrenyi



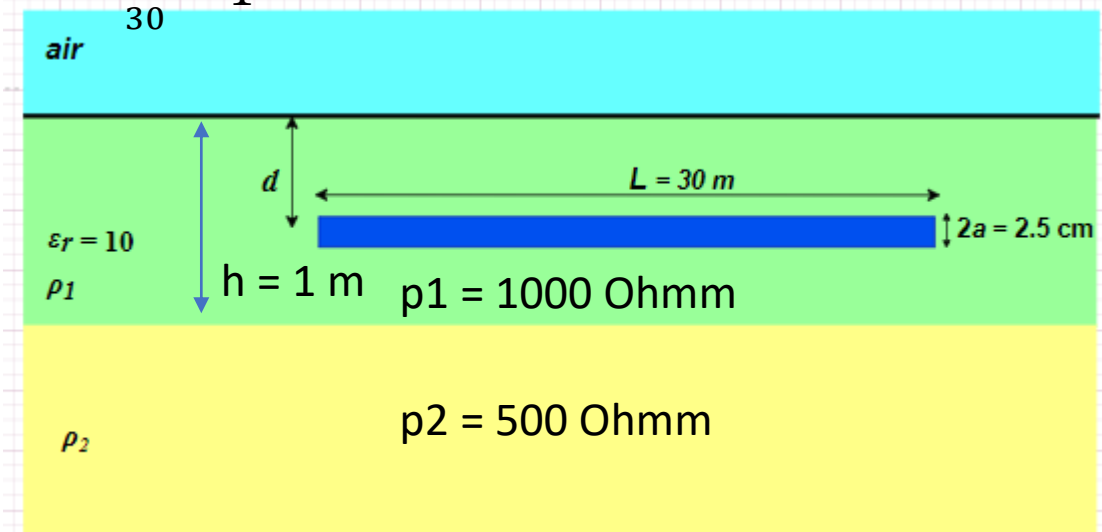
$$\gamma = \sqrt{\left(j2\pi10^64\pi10^{-7}\left(\frac{1}{700} + j2\pi10^610 \cdot 8.8510^{-12}\right)\right)} =$$

$$= \alpha + j\beta = 0.06209 + j0.0908$$

Cálculo de Lambda  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 69,10m$

3)-Cálculo de Lcrit:  $L_{crit} = \lambda/10 = 6,91m$

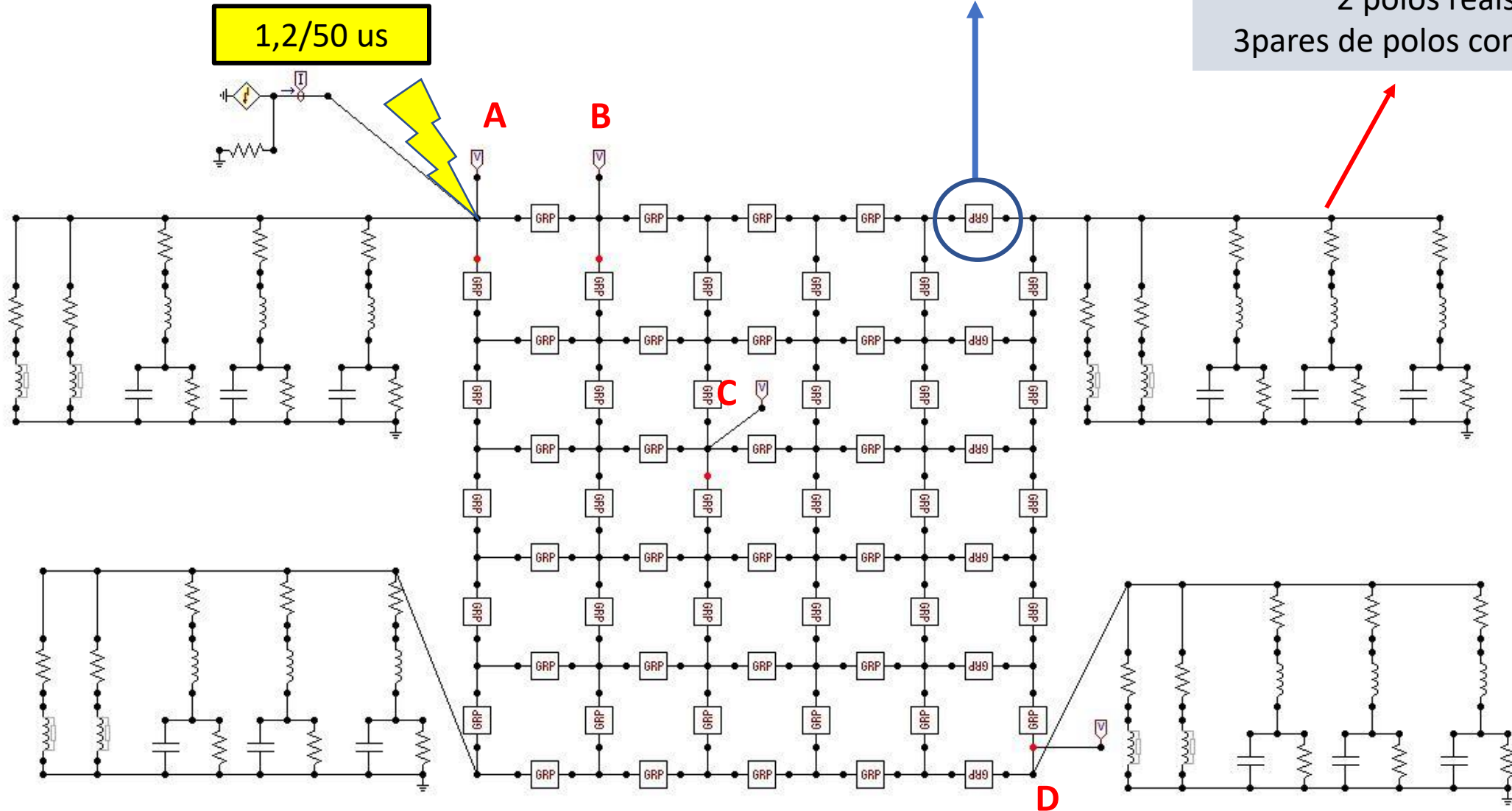
4)-Cálculo do comprimento elementar  $l_e = \frac{L}{N} = \frac{30}{30} = 1$



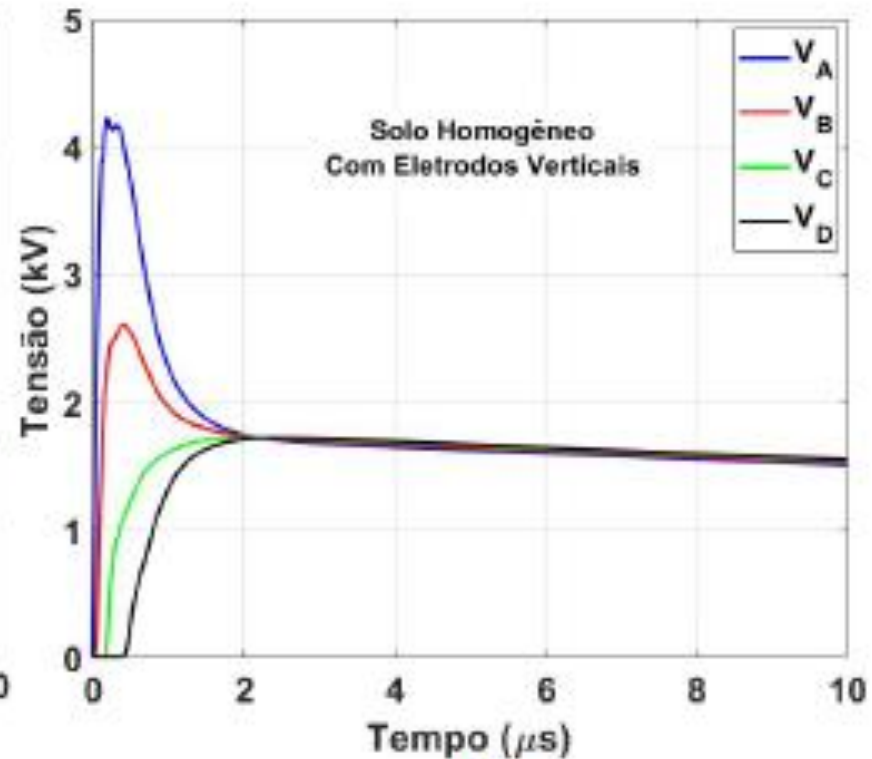
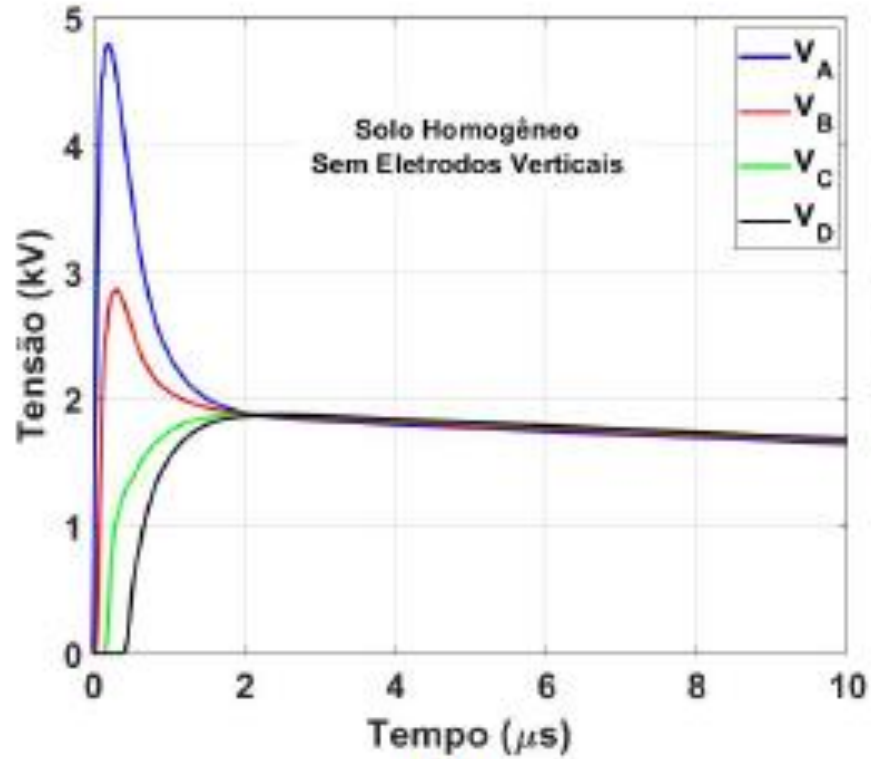
# Circuito da Malha no ATP

Comprimento de 30 m  
Cada grupo-6m com 6 pis

Haste vertical de 12 m,  
circuito obtido pelo VF  
2 polos reais  
3 pares de polos complexos



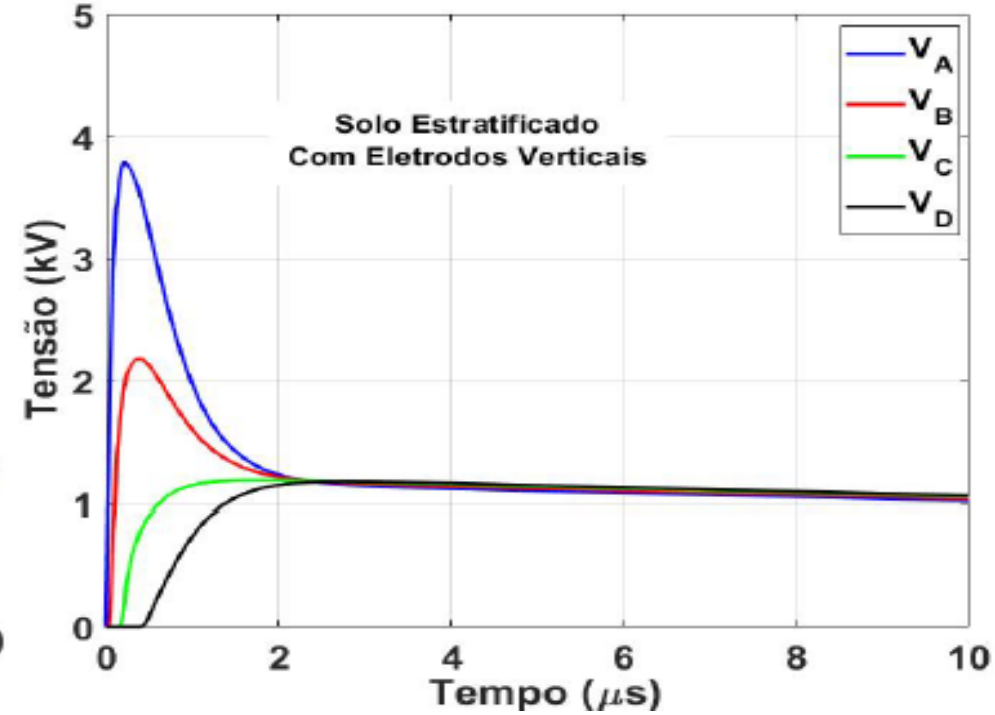
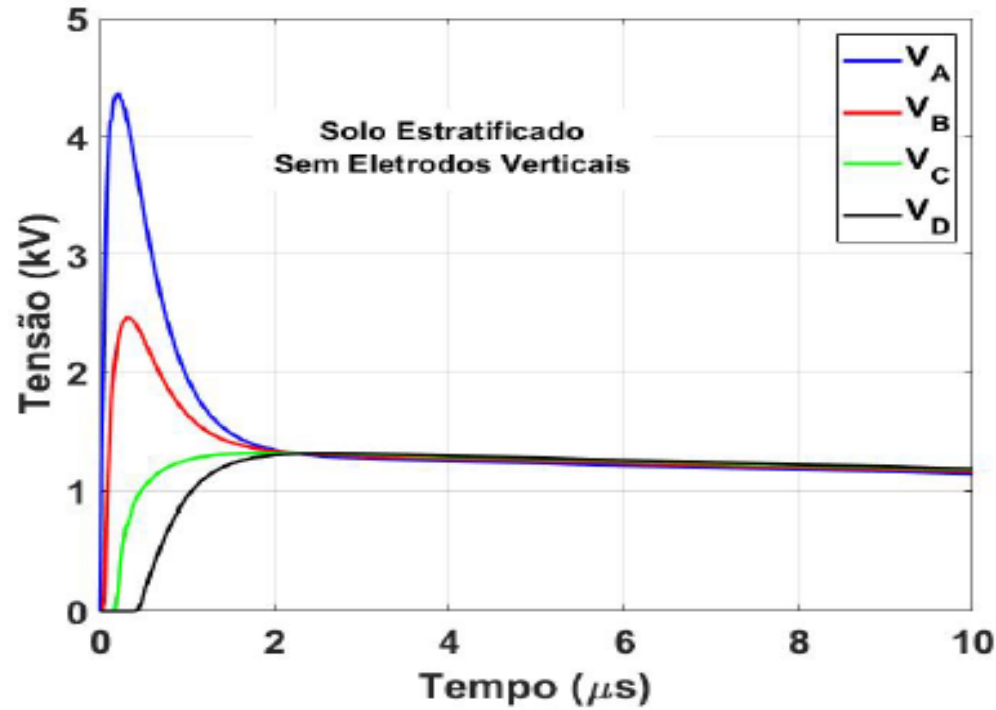
# Solo Homogêneo de 1.000 Ohm



Solo Homogêneo			
Nó	Caso 1	Caso 2	Red.(%)
A	4.83	4.225	12.5
B	2.87	2.60	9.40
C	1.87	1.72	8.0
D	1.87	1.72	8.0



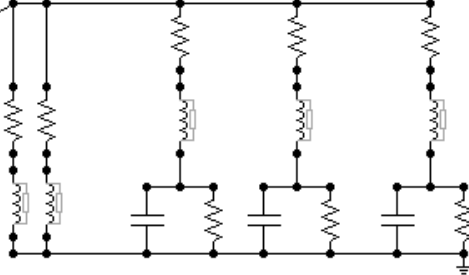
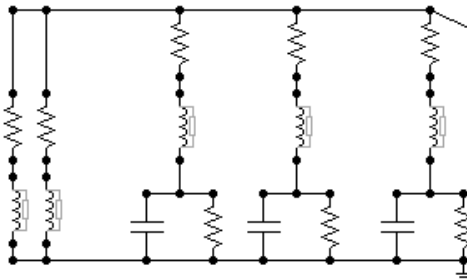
# Solo estratificado de 700 Ohmm



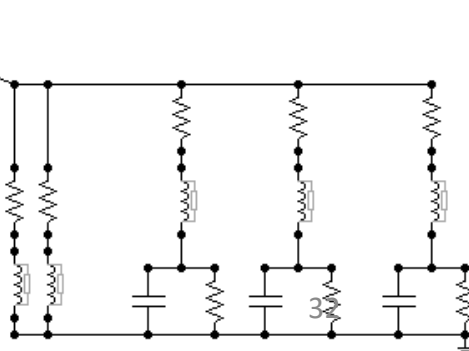
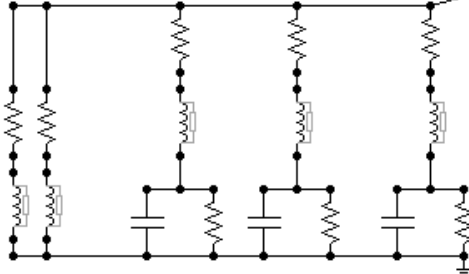
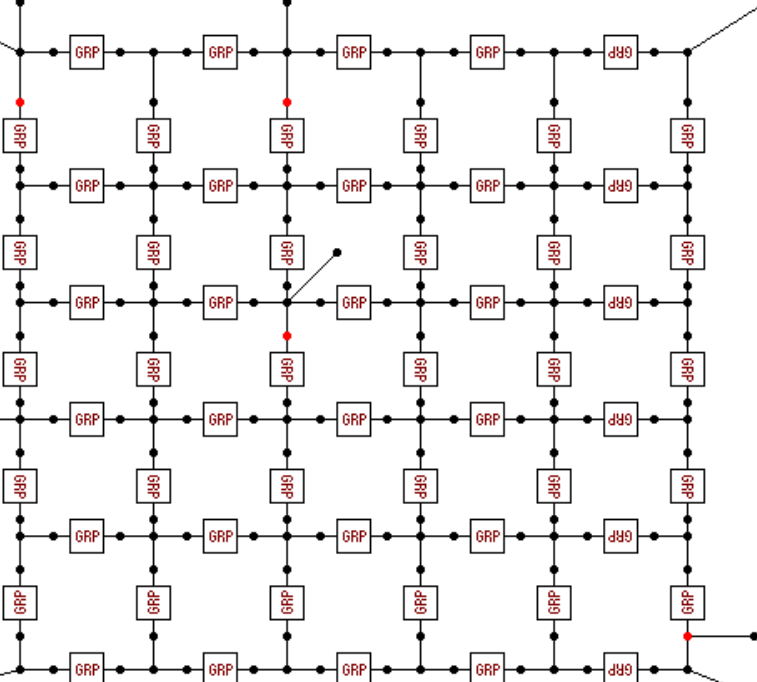
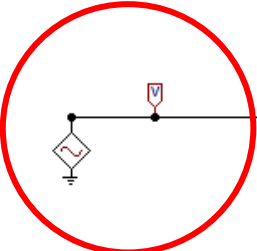
Solo Estratificado		
Caso 3	Caso 4	Red.(%)
4.36	3.80	12.85
2.47	2.18	11.75
1.32	1.18	10.60
1.32	1.17	11.33

# Impedância de MAs

$p=1000 \text{ ohm m}$   
 $\text{raio}=12.5\text{mm}$   
 $\text{profundidade}=0.5\text{m}$   
 $\epsilon_r=10$   
6 pis, 1pi/1m, cada célula

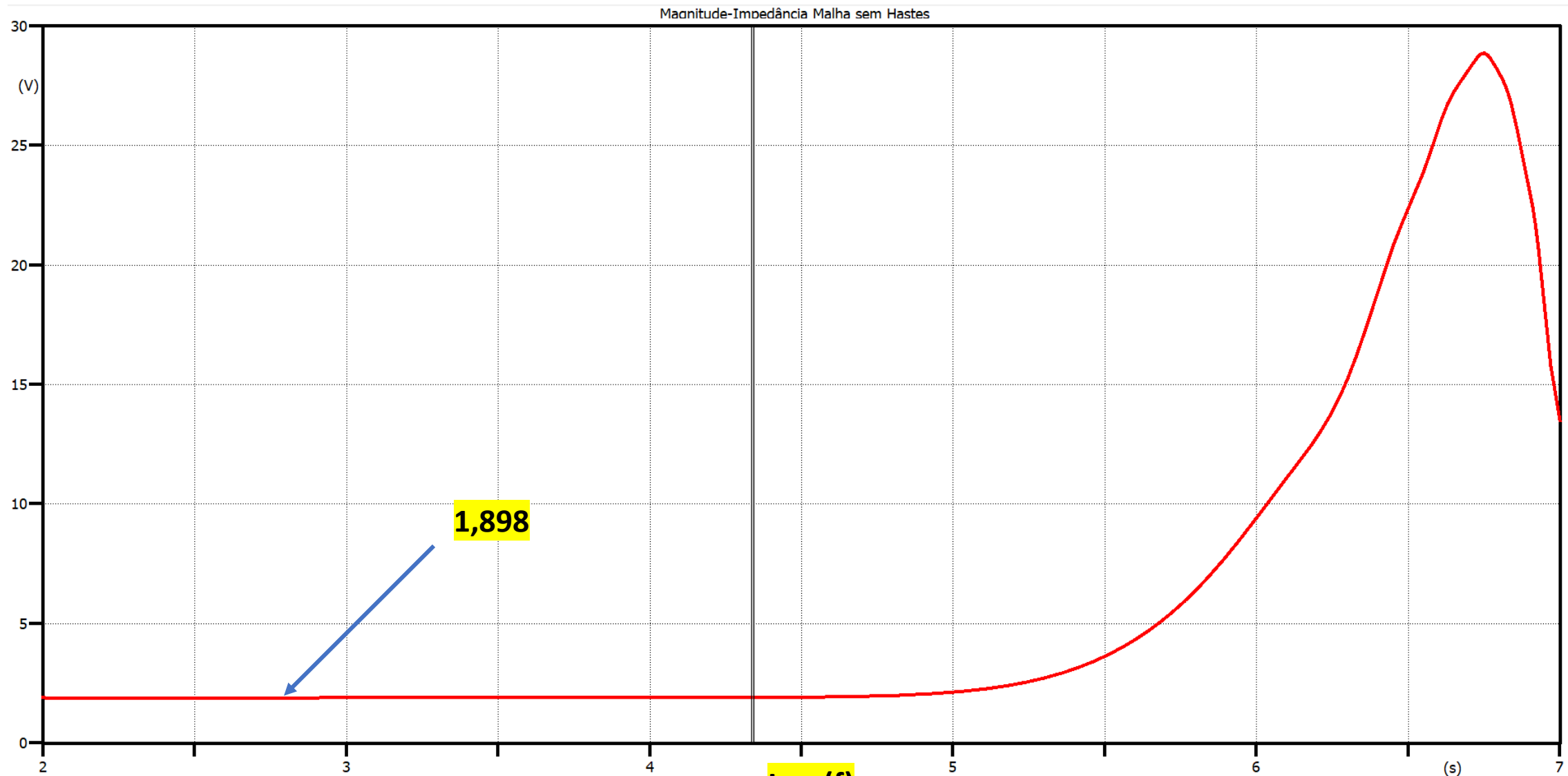


**Impedância  
No domínio  
Da Frequência**





# Magnitude Impedância sem Hastes

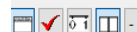


**|Z|**

**1,898**

**Log (f)**

(file malha\_30x30\_1000ohm\_sem\_hastes\_impedancia.pl4; x-var t) v:XX0007

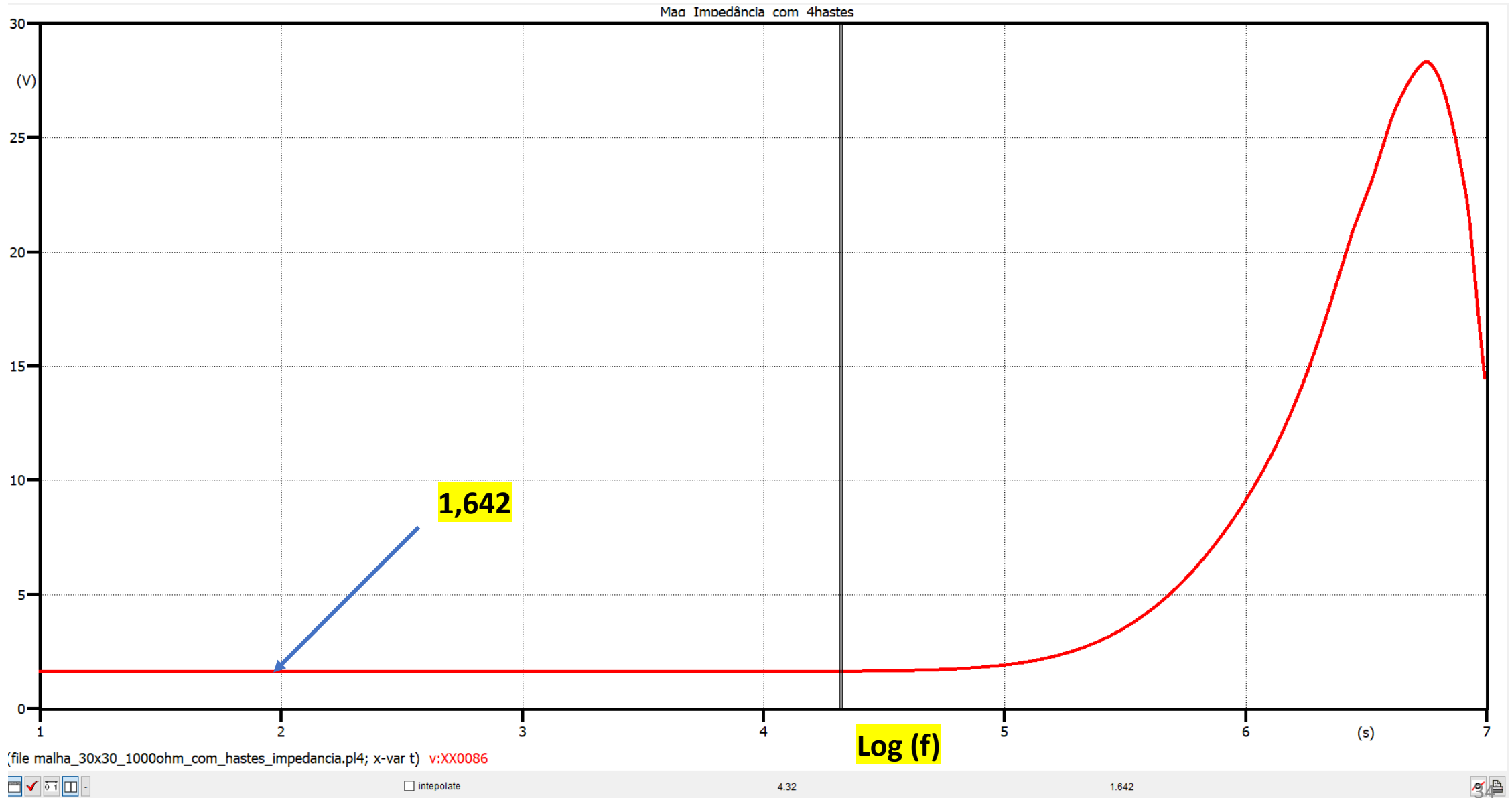


Intepolate

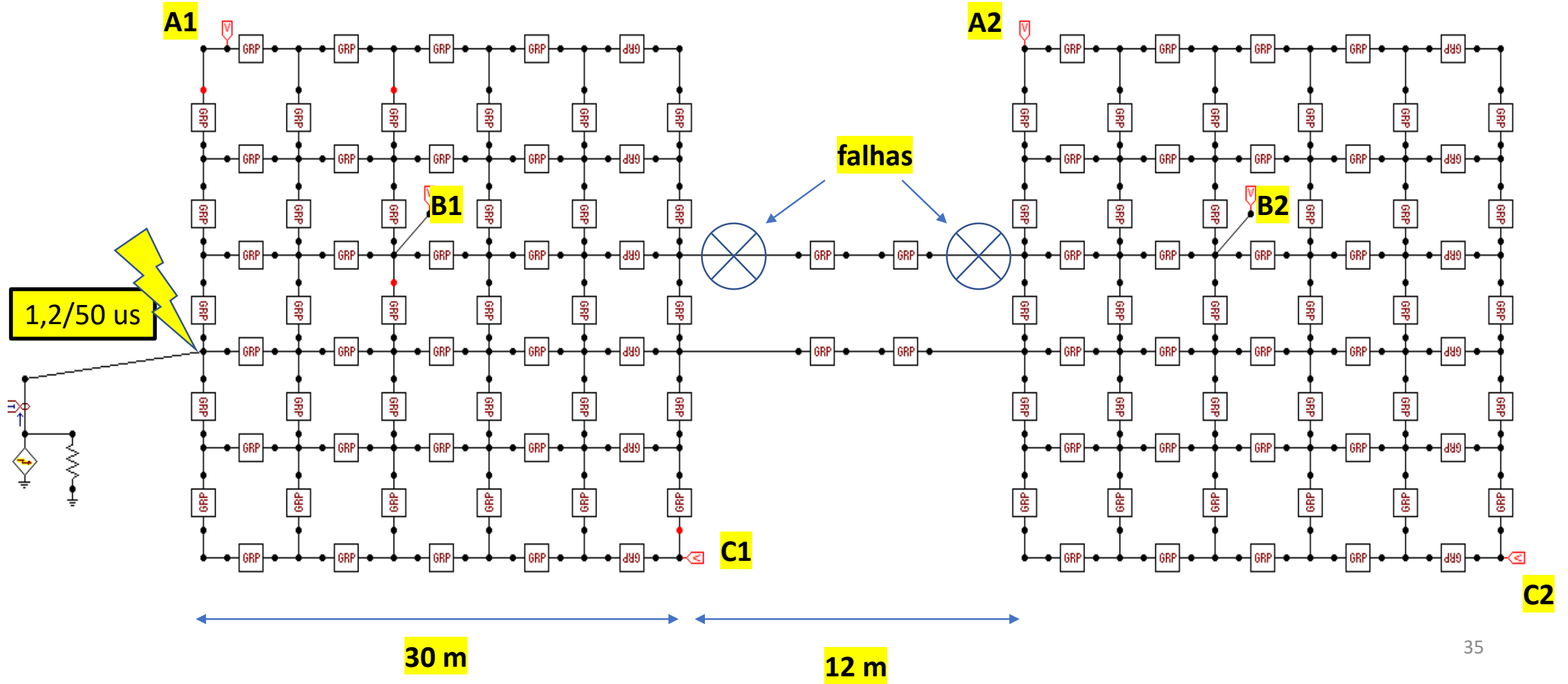
4.34

1.898

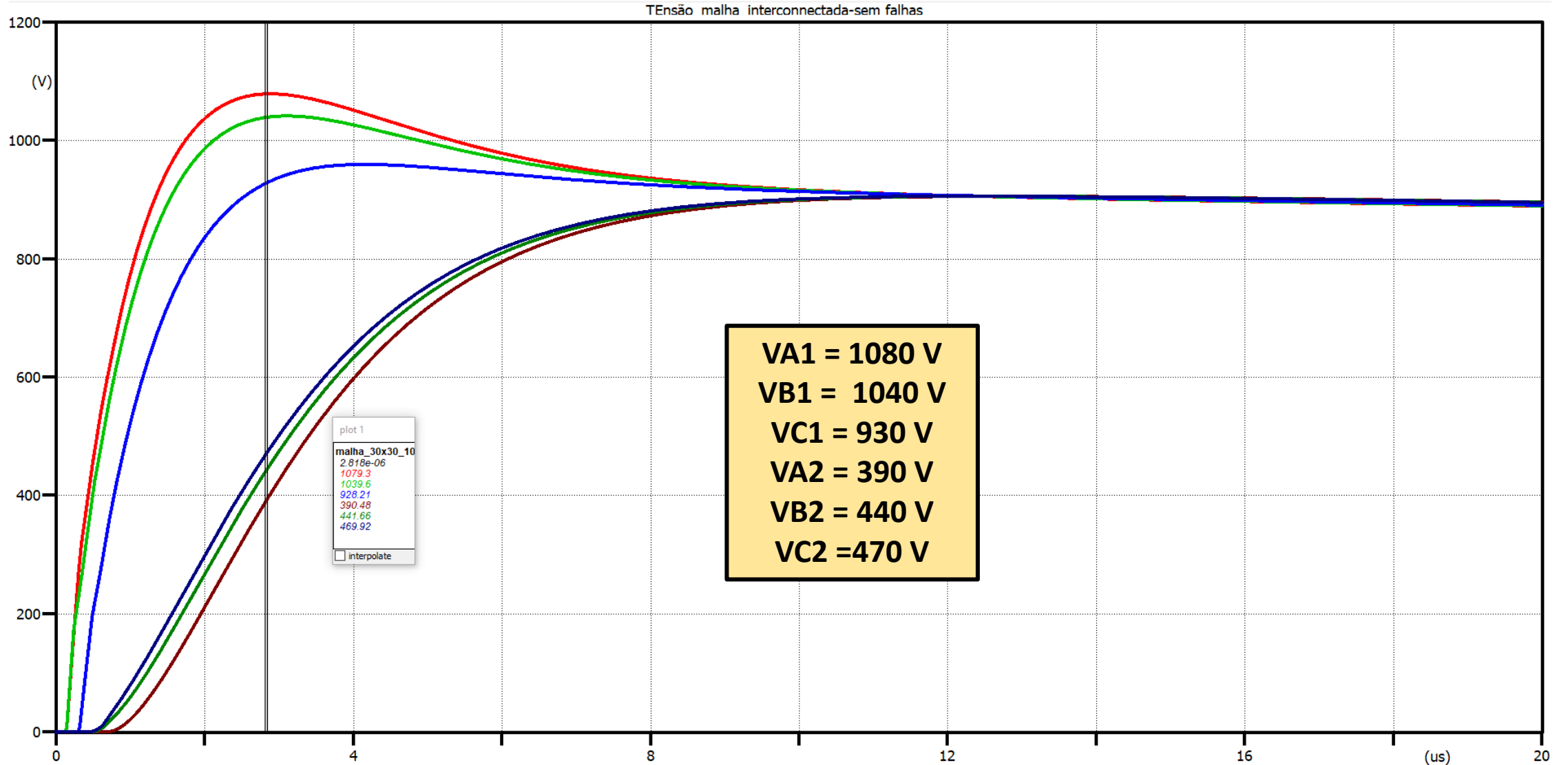
# Magnitude Impedância com Hastes



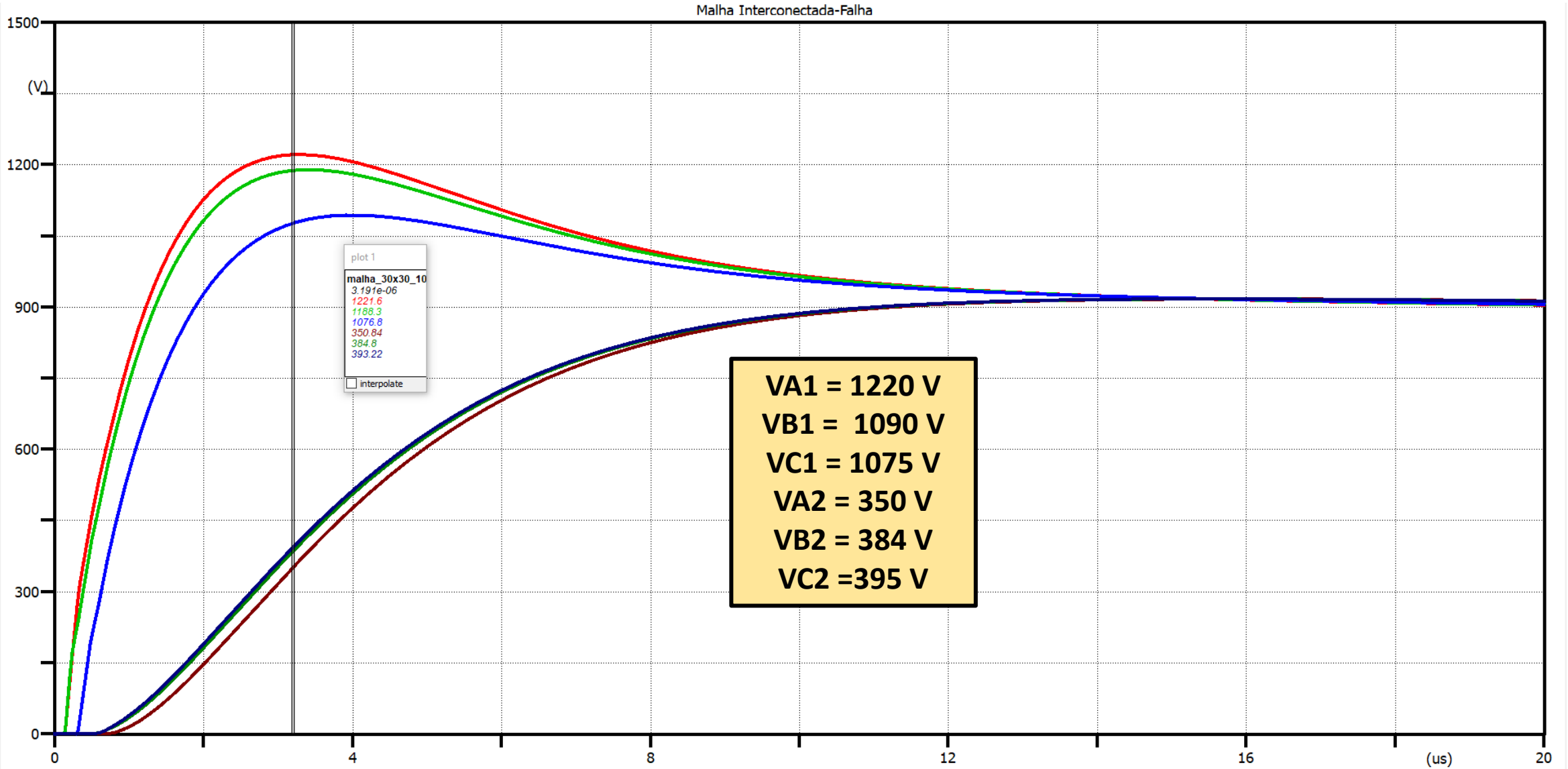
# Malhas Interconectadas



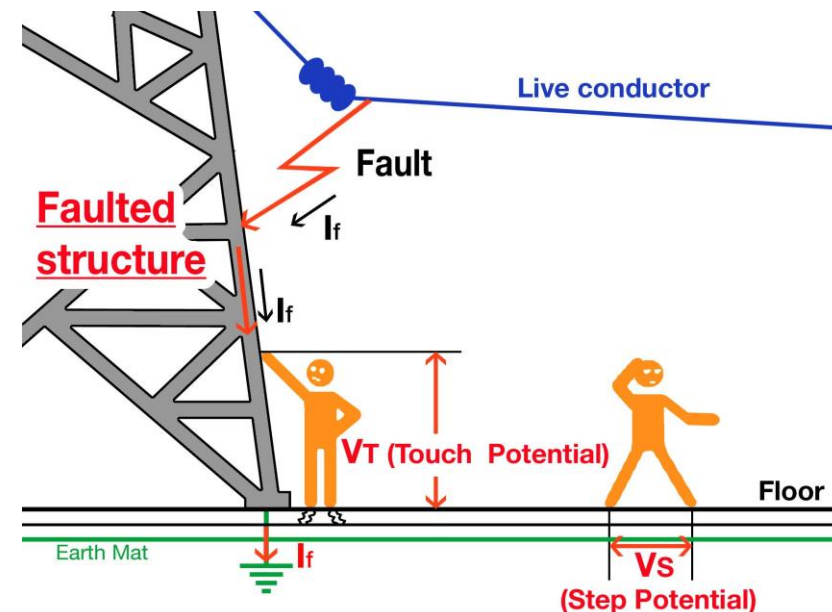
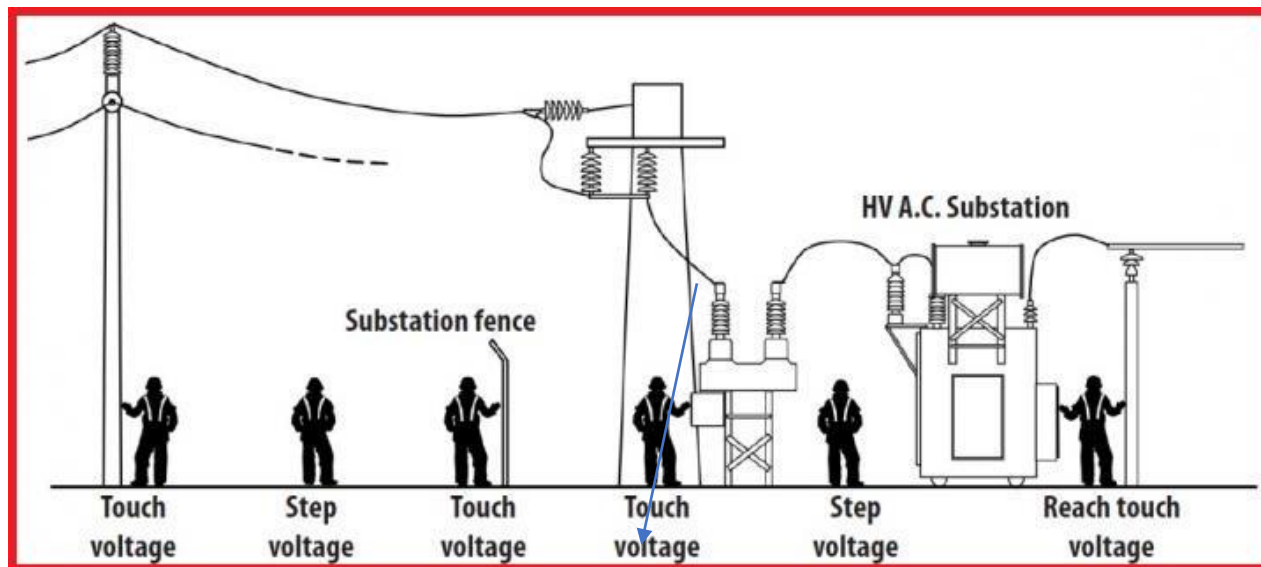
# Tensões na MA sem falha



# Tensões na MA com falha



# Tensão de passo e toque



**Tensão de passo:** Máxima diferença de potencial entre os pés (adotando uma distância de 1 m) a que uma pessoa está submetida quando se encontra na região do aterramento durante a passagem de uma corrente elétrica.

**Tensão de toque:** Máxima diferença de potencial entre a mão e os pés a que uma pessoa está submetida caso esteja em contato com uma parte metálica ligado aos eletrodos durante a passagem de uma corrente elétrica (Considera-se ambos os pés afastados a 1 m da estrutura tocada).

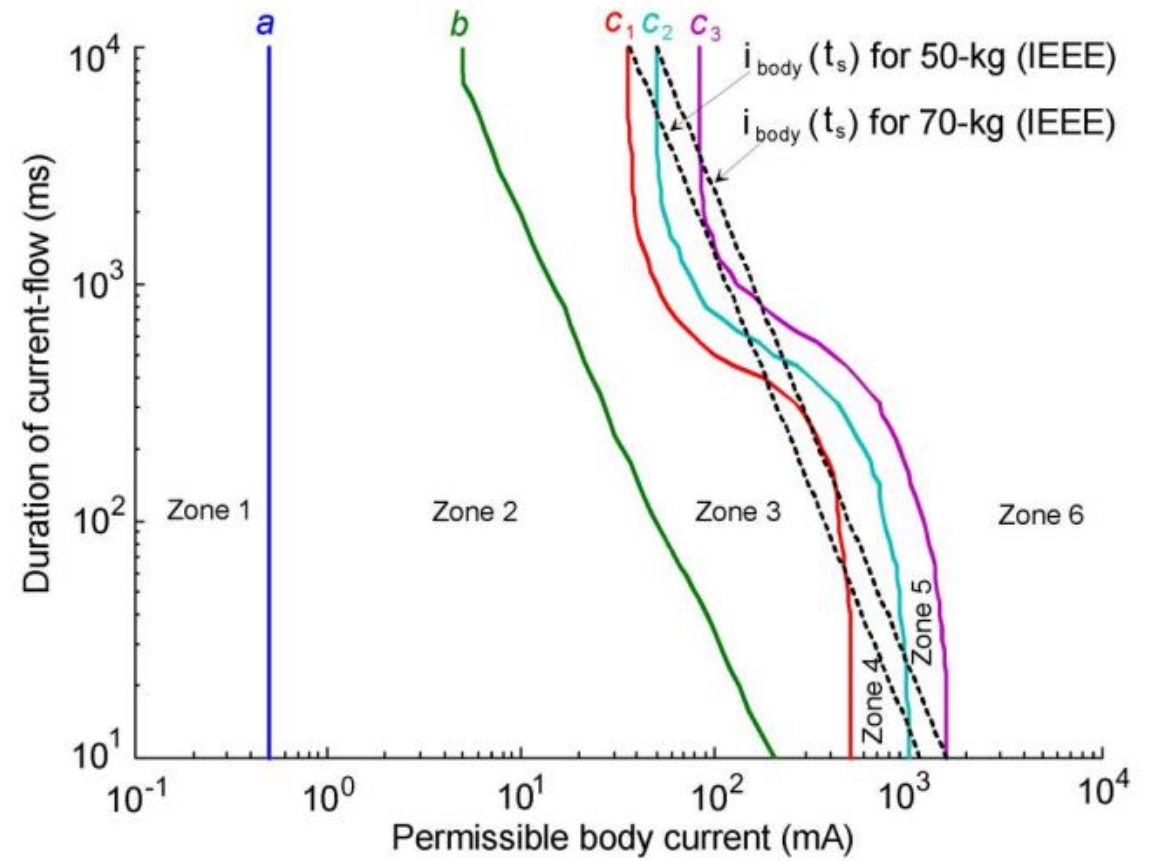
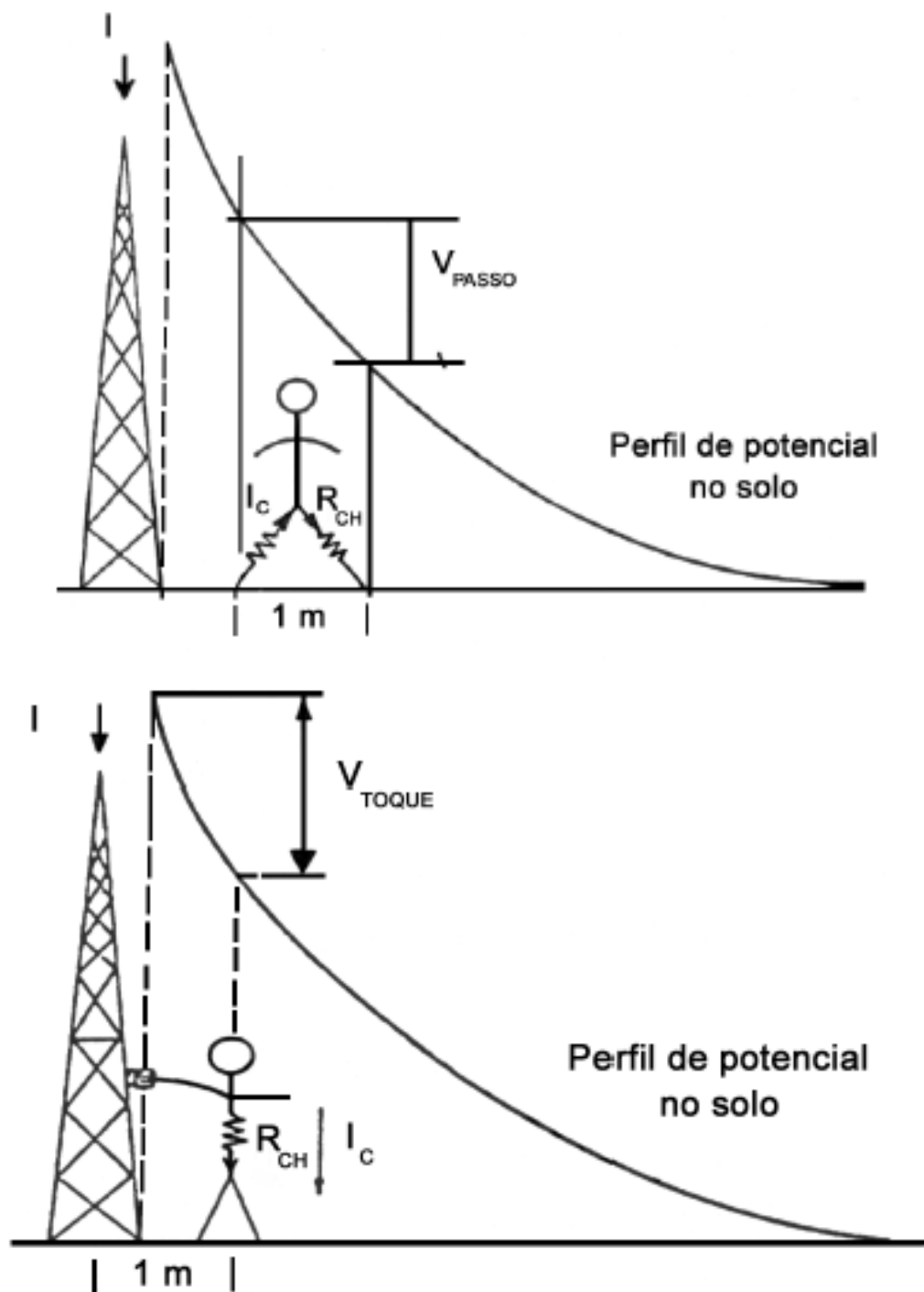


Fig. 4. Allowable body current per IEC 60479-1 and IEEE Std. 80 (data from IEC 60479-1 and IEEE Std. 80, 2000 edition). Zone 1 is normally no perception, Zone 2 is normally no dangerous pathological effect, Zone 3 is normally no organic trouble, Zone 4 is fibrillation probability less than 5%, Zone 5 is fibrillation probability between 5% and 50%, and Zone 6 is fibrillation probability higher than 50%.

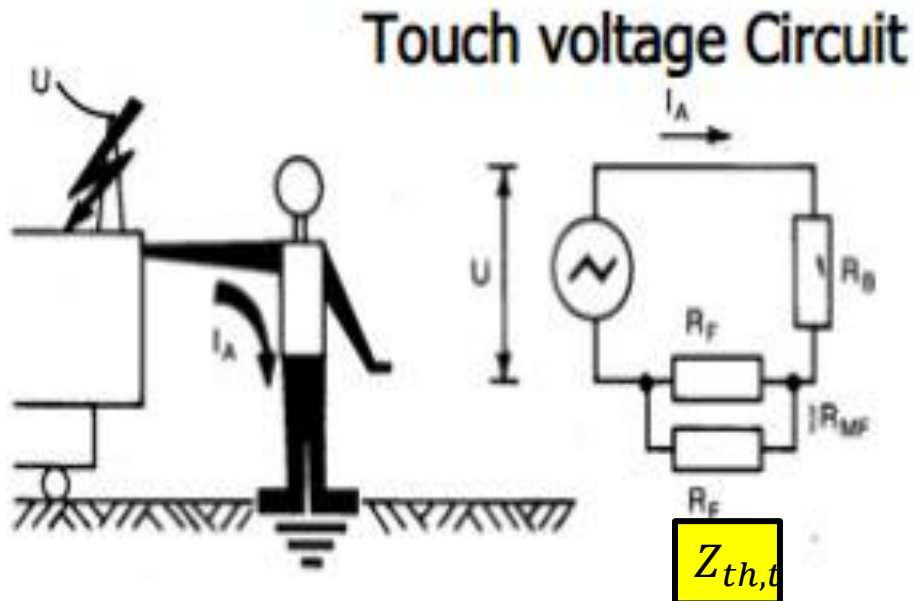
$$I_{b,50kg} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$I_{b,70kg} = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}}$$

# Tensão de Toque

Resistência de um pé:  
Pé é modelado como um disco de raio  $b$  ( $b=8\text{ cm}$ )

$$R_f = \frac{\rho}{4b} = \frac{\rho}{4 \times 0.08\text{ m}} \approx 3\rho$$



$$Z_{th,t} = R_f/2$$

$$Z_{th,t} = 0,5R_f \\ = 0,5 \times 3\rho = 1,50\rho$$

$$V_{touch} = I_b(R_b + Z_{th,t}) \\ = I_b(R_b + 1,50\rho)$$

$$I_{b,50kg} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$I_{b,70kg} = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}}$$

$R_f$ =resistência do pé  
 $\rho$ = resistividade do solo;  
 $R_b$ = resistência do corpo humano  
 $=1,000\text{ Ohm}$ ;  
 $I_b$ = corrente que atravessa o corpo;

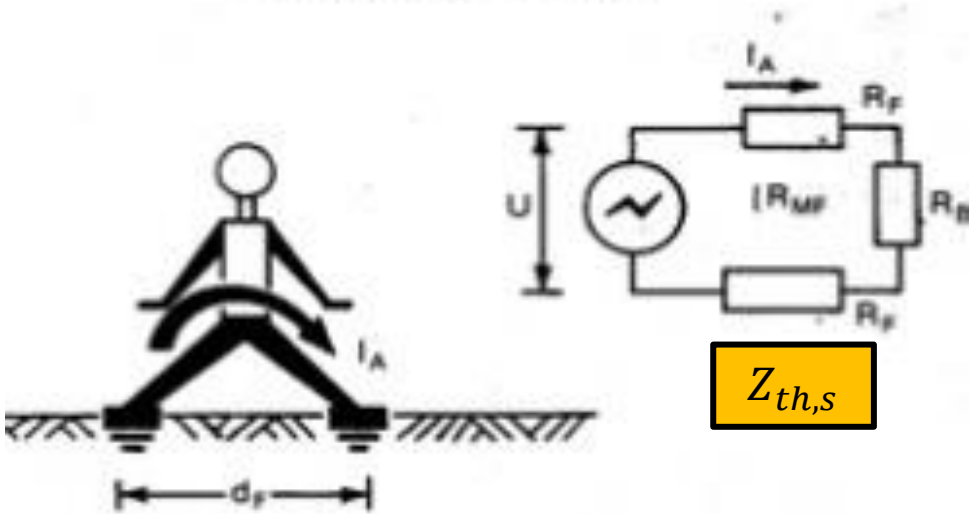
$$V_{touch,50} = I_b(R_b + 1,50\rho) = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 1,50\rho)$$

$$V_{touch,70} = I_b(R_b + 1,50\rho) = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 1,50\rho)$$



# Tensão de Passo

Step Voltage Circuit



$d_f = 1 \text{ m}$   
 $R_A = R_B + 2R_f - 2R_{Mf}$   
 $I_A = U/R_A$   
 $R_B = 1000 \Omega$

$$R_f = \frac{\rho}{4b} = \frac{\rho}{4 \times 0.08 \text{ m}} \approx 3\rho$$

$$Z_{th,s} = 2R_f$$

$$Z_{th,s} = 2R_f = 2 \times 3\rho = 6\rho$$

$$V_{step} = I_b(R_b + Z_{th,s}) = I_b(R_b + 6\rho)$$

$$I_{b,50kg} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}}$$

$$I_{b,70kg} = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}}$$

$$V_{step,50} = I_b(R_b + Z_{th,s}) = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 6\rho)$$

$$V_{step,70} = I_b(R_b + Z_{th,s}) = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 6\rho)$$

$R_f$ =resistência do pé  
 $\rho$ = resistividade do solo;  
 $R_b$ = resistência do corpo humano  
 $=1,000 \text{ Ohm}$ ;  
 $I_b$ = corrente que atravessa o corpo;

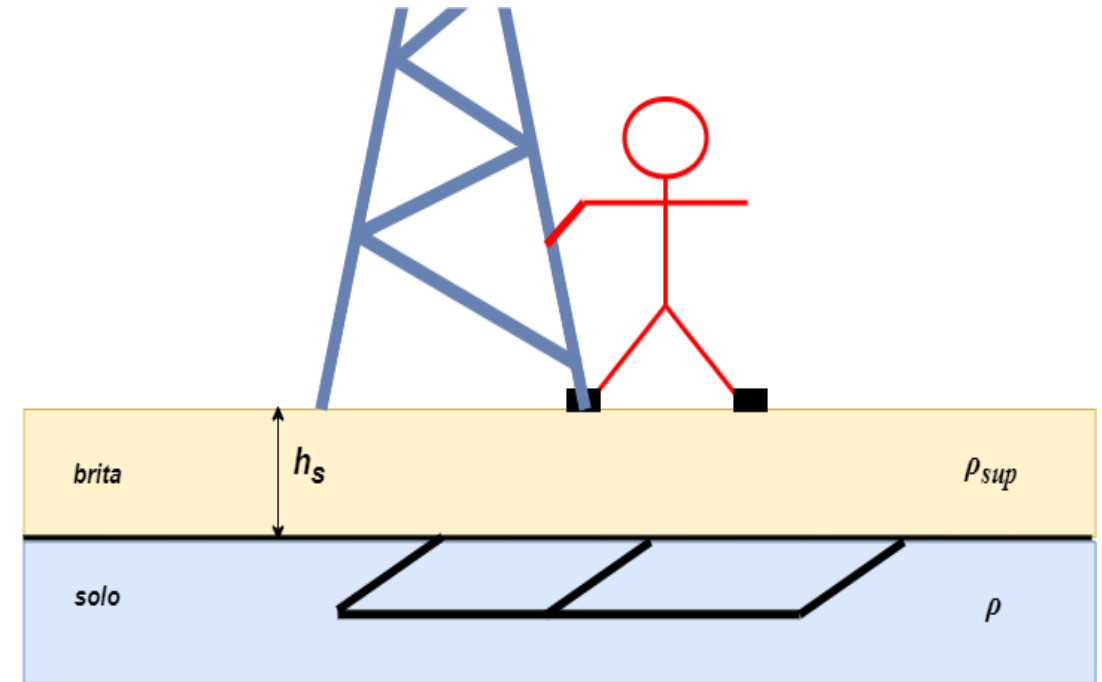
# Tensão de passo e toque-fator de Correção (Cs)

$$V_{touch,50} = I_b(R_b + 1,50\rho) = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 1,50\rho C_s)$$

$$V_{step,50} = I_b(R_b + Z_{th,s}) = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 6\rho C_s)$$

$$V_{touch,70} = I_b(R_b + 1,50\rho) = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 1,50\rho C_s)$$

$$V_{step,70} = I_b(R_b + Z_{th,s}) = \frac{0,156}{\sqrt{t_s}} (1,000 + 6\rho C_s)$$



$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$C_s$  - Fator de correção de potenciais devido à adição da camada de brita;

$h_s$  - Espessura da camada de brita;

$\rho_s$  - resistividade aparente do solo;

$\rho_b$  - resistividade da camada de brita (ou do material adicionado à superfície do solo).

- Diminuir a impedância à terra;
- Adicionar uma camada de alta resistividade acima da malha;
- Arranjo adequado da malha;

# Exemplos

Um homem toca uma torre energizada por 0,3s e seu peso é de 70 kg. A resistividade da superfície e a altura da camada são respectivamente de 70 Ohmm e 0,3m. A resistividade do solo é de 50 Ohmm. Determine o fator de correção e as tensões de passo e toque nessas condições.

The surface layer derating factor can be determined as,

$$C_S = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{50}{70}\right)}{2 \times 0.3 + 0.09} = 0.96$$

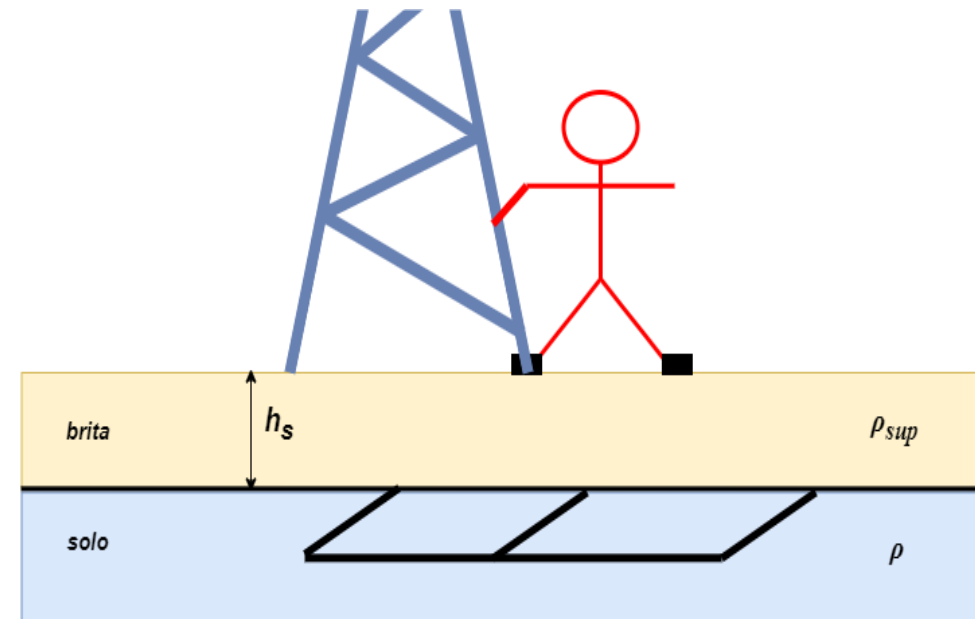
The value of the touch potential can be calculated as,

$$V_{touch70kg} = (1000 + 1.5\rho C_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 1.5 \times 50 \times 0.96) \frac{0.157}{\sqrt{0.3}} = 307.28 \text{ V}$$

The value of the step potential is,

$$V_{step70kg} = (1000 + 6\rho C_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 6 \times 50 \times 0.96) \frac{0.157}{\sqrt{0.3}} = 369.19 \text{ V}$$

**Exercício**-Um homem toca uma torre energizada por 0,5s e seu peso é de 50 kg. O fator de correção e a altura da camada são respectivamente de 0,75 e 0,05 m. A resistividade do solo é de 30 Ohmm. Determine a resistividade da superfície e as tensões de passo e toque nessas condições.



# Alternativas para ↓ da tensão de passo e toque

**Ground potential rise of faulty substations having equal and unequal spacing grounding grids conductors**

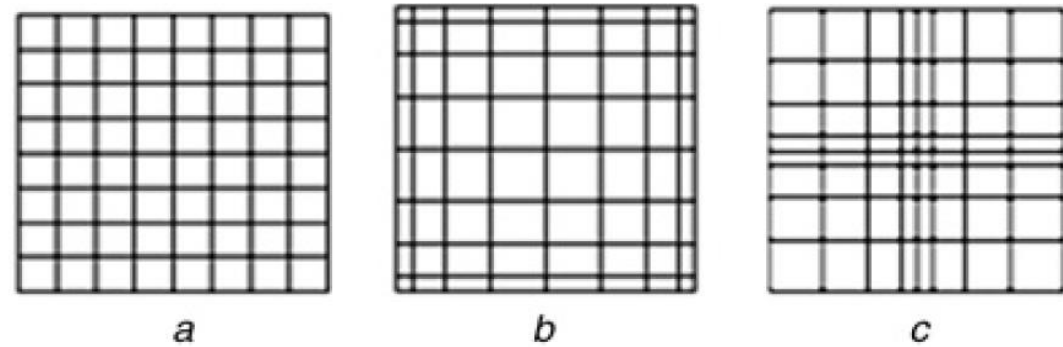
Osama E. Gouda<sup>1</sup> ✉, Adel Z. El Dein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Cairo University, Giza, Egypt

<sup>2</sup>Faculty of Energy Engineering, Aswan University, Aswan, Egypt

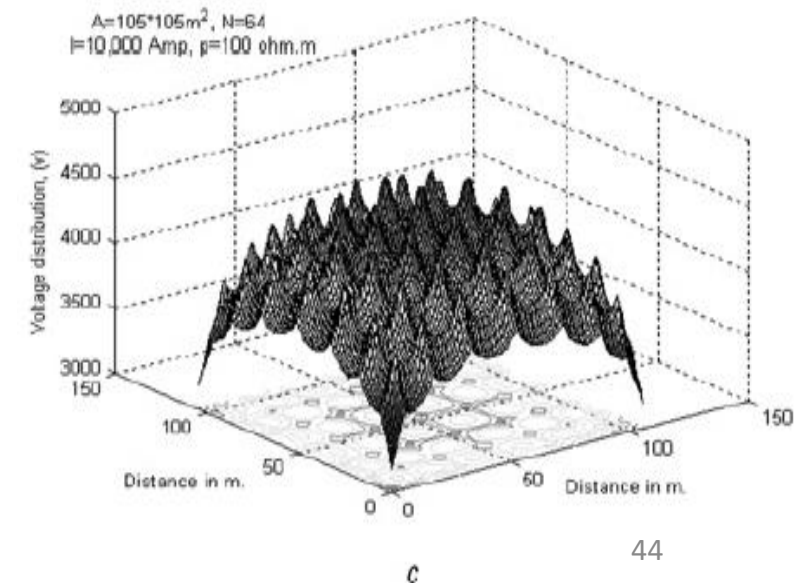
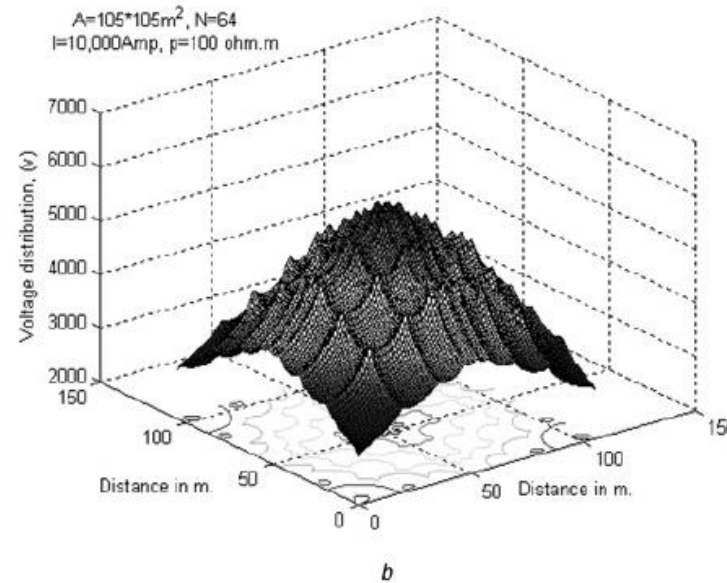
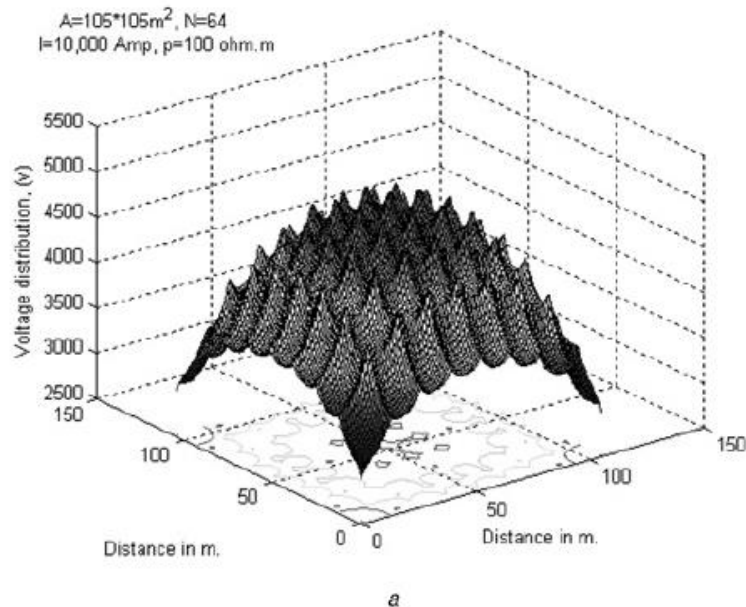
✉ E-mail: prof\_ossama11@yahoo.com

ISSN 1751-8687  
Received on 24th February  
Revised on 11th July 2016  
Accepted on 31st August 2016  
doi:10.1049/iet-gtd.2016.02  
www.ietdl.org



**Fig. 1** Examples for grid module of  $N = 64$  with equally, unequally spaced having denser conductors at the edges and at the middle, (A), (B) and (C), respectively

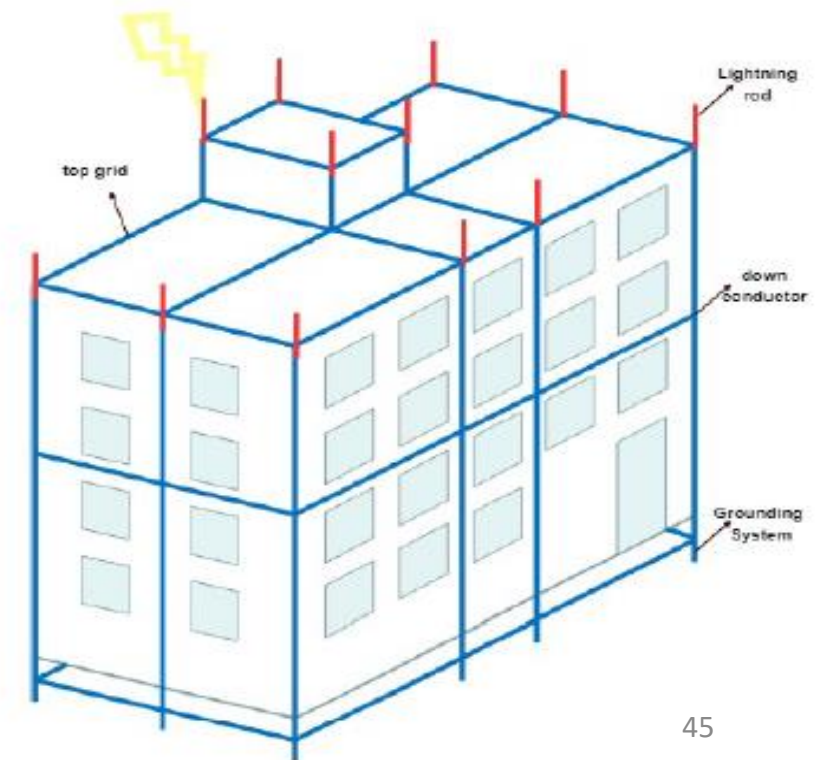
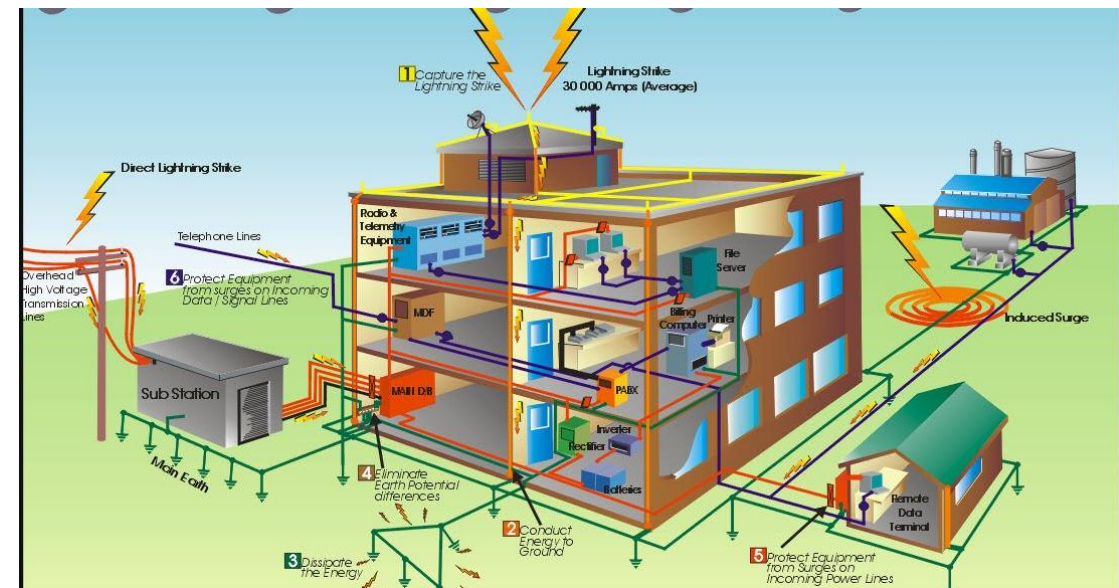
Métodos de Otimização para descobrir a melhor topologia de malhas



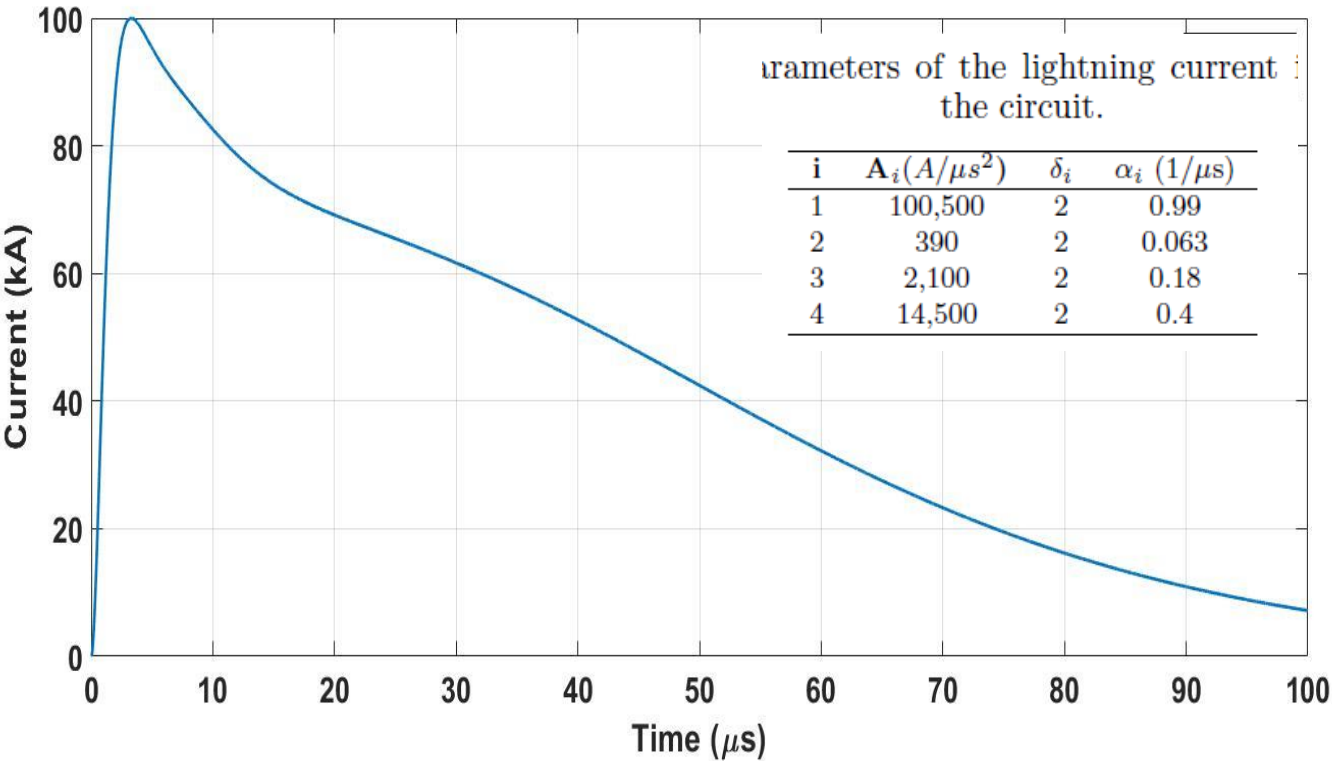


# SPDA-Sistema de proteção contra descargas atmosféricas

- ❖ Servem para proteção de prédios, instalações industriais, tanques, tubulações e pessoas contra as descargas atmosféricas e seus efeitos;
- ❖ Os SPDA são compostos por dispositivos instalados nos pontos mais altos das instalações e estruturas, proporcionando um caminho para terra de menor resistência elétrica possível. Assim, oferece um caminho para corrente criada pela descarga atmosférica fluir em direção a terra, sem danificar equipamentos ou estruturas, além de proteger as pessoas dentro da instalação.
- ❖ A instalação dos Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) é uma exigência do Corpo de Bombeiros, regulamentada pela ABNT segundo a Norma NBR 5419/2005.



# SPDA



$$i(t) = \sum_{i=1}^n t^{\delta_i} A_i e^{-\alpha_i t}$$

Eletrodos de descida  
Modelos de Linhas  
Aéreas

Eletrodos de aterramento- VF e Teoria  
Eletromagnética

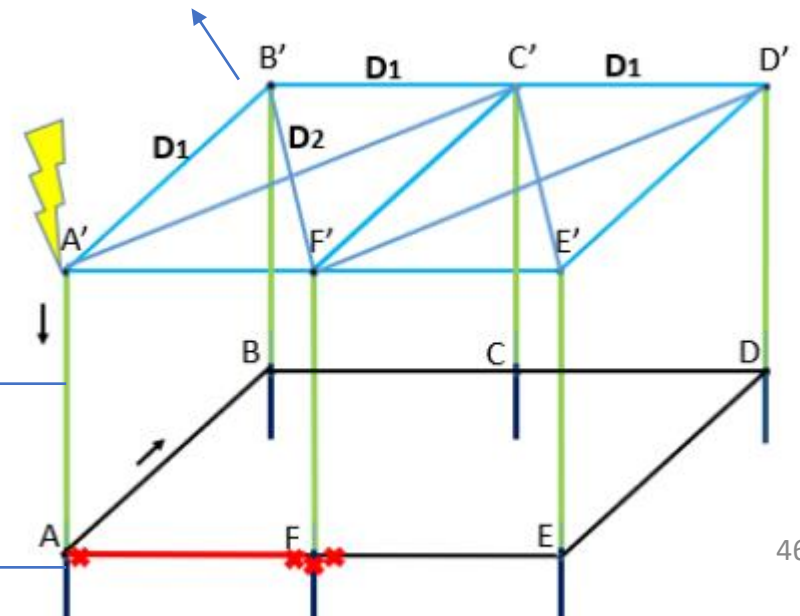
Table 2. Geometric parameters of the upper grid and down-conductors.

Upper grid		Down-conductor	
radius (mm)	3.34	radius (mm)	3.34
$D_1$ (m)	30	height (m)	8.80
$D_2$ (m)	40	resistivity( $\Omega m$ )	1,72e-8
		velocity(m/s)	3e8

Table 3. Parameters of the vertical and horizontal electrodes.

Vertical electrode		Horizontal electrode	
radius (mm)	15,87	radius (mm)	15,87
length (m)	3	length (m)	31.5
		depth (m)	0.70

## Eletrodos aéreos-Modelos de Linhas Aéreas



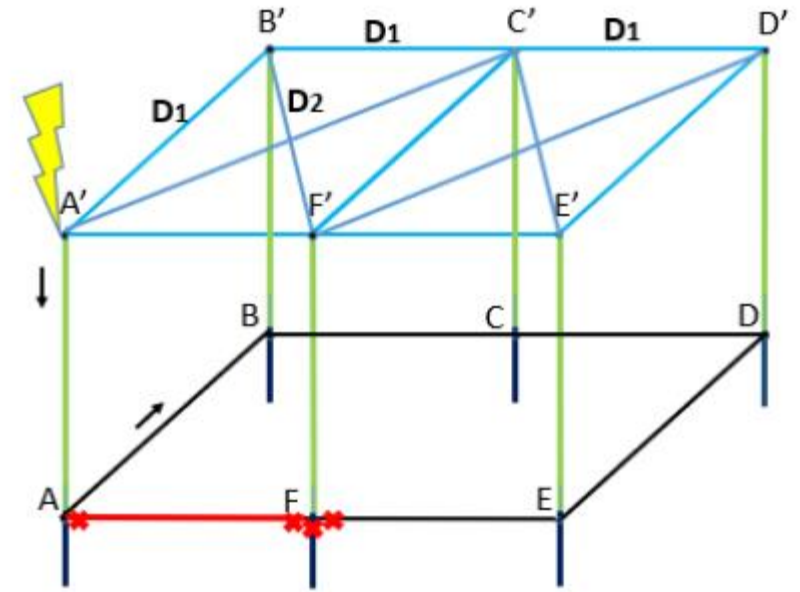
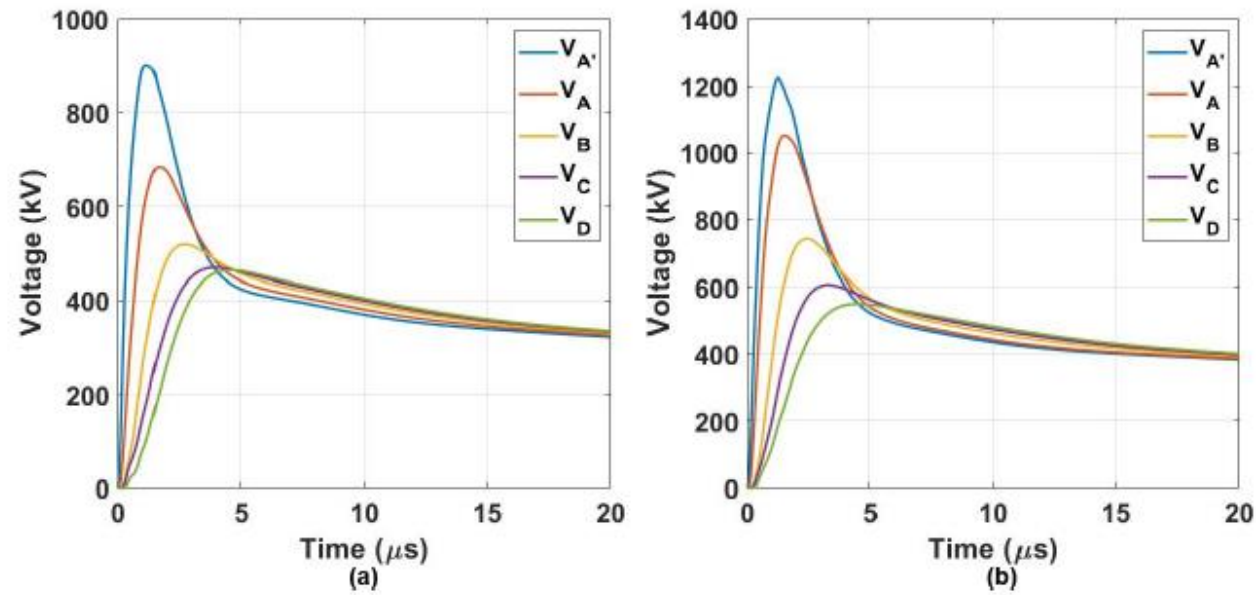


Fig. 12. Transient Voltages for the homogeneous soil:(a) whole grounding system; (b) grounding system with a rupture.

### Homogeneous Soil

Points	Whole	Rupture	Var.
A'	900	1.225	36.13%
A	683	1.051	53.89%
B	519	744	43.31%
C	470	606	28.97%
D	464	549	18.34%

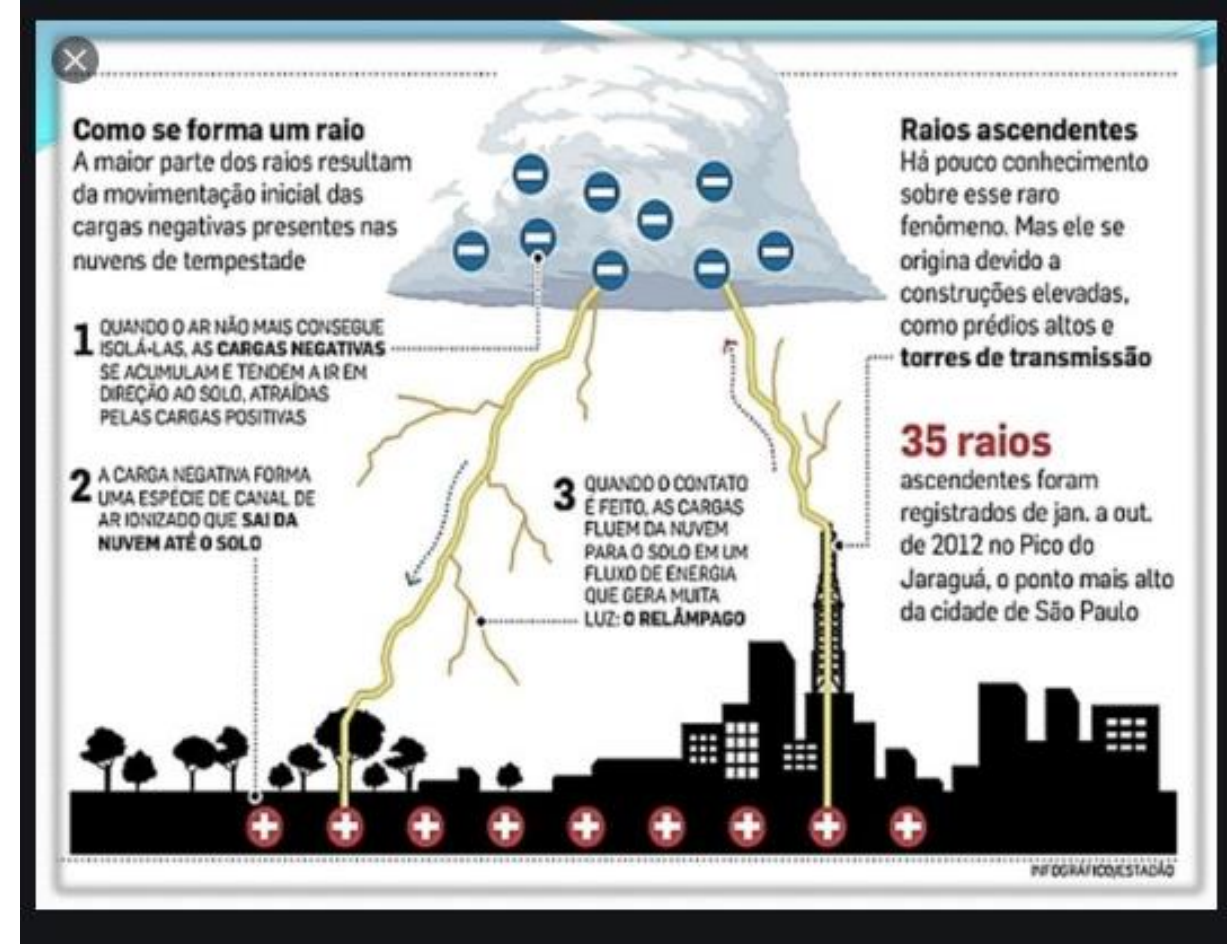
Condutores Aéreos e de descida-Modelagem por linhas de Transmissão-Jmarti.  
 Eletrodos verticais-TLM e Vector Fitting  
 Eletrodos Horizontais-Modelo a parâmetros concentrados.



# Descarga Atmosférica



Fonte: ELAT (2018)



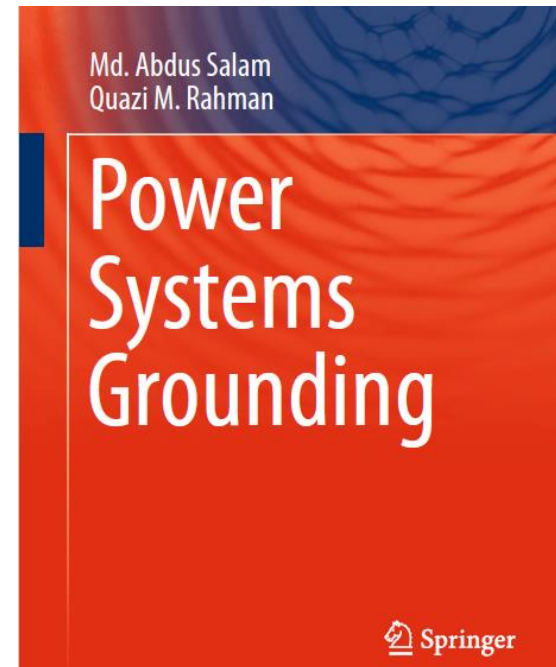


Redução da quantidade de raios com a quarentena ( ↓ poluição)

- <https://globoplay.globo.com/v/8645155/>

Formação de um raio

<https://www.youtube.com/watch?v=lwIOZo1UQ6M>



# Aula 05

- Backflashover;
- Modelagem de Torres;
- Análise de sobretensões atmosféricas;
- Impacto da modelagem do aterramento em torres