

# Eletromagnetismo Aplicado aos Sistemas Elétricos de Potência

Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro

NSA Consultoria e Informática Ltda.  
Prof. licenciado da PUCMinas

## Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro

- Graduado em Eng. Elétrica/UFMG em 1984
- Mestrado em Eng. Elétrica/UFMG - 1987
- Professor licenciado da PUC Minas
- Atua principalmente nas seguintes áreas :
  - Eletromagnetismo aplicado
  - Interferências eletromagnéticas de LTs
  - Análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência



## Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro/NSA

- Atua principalmente nas seguintes áreas :
  - Cálculo e análise de sistemas de aterramento
  - Estudos especiais
  - Desenvolvimento de software científico



# Green Book do Cigré Internacional



# CÁLCULO E MEDIÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS EM SEs E LTs

Roberto Márcio Coutinho  
Sandro de Castro Assis

CEMIG DISTRIBUIÇÃO



Elilson Eustáquio Ribeiro  
Letícia M. de Souza

NSA CONSULTORIA





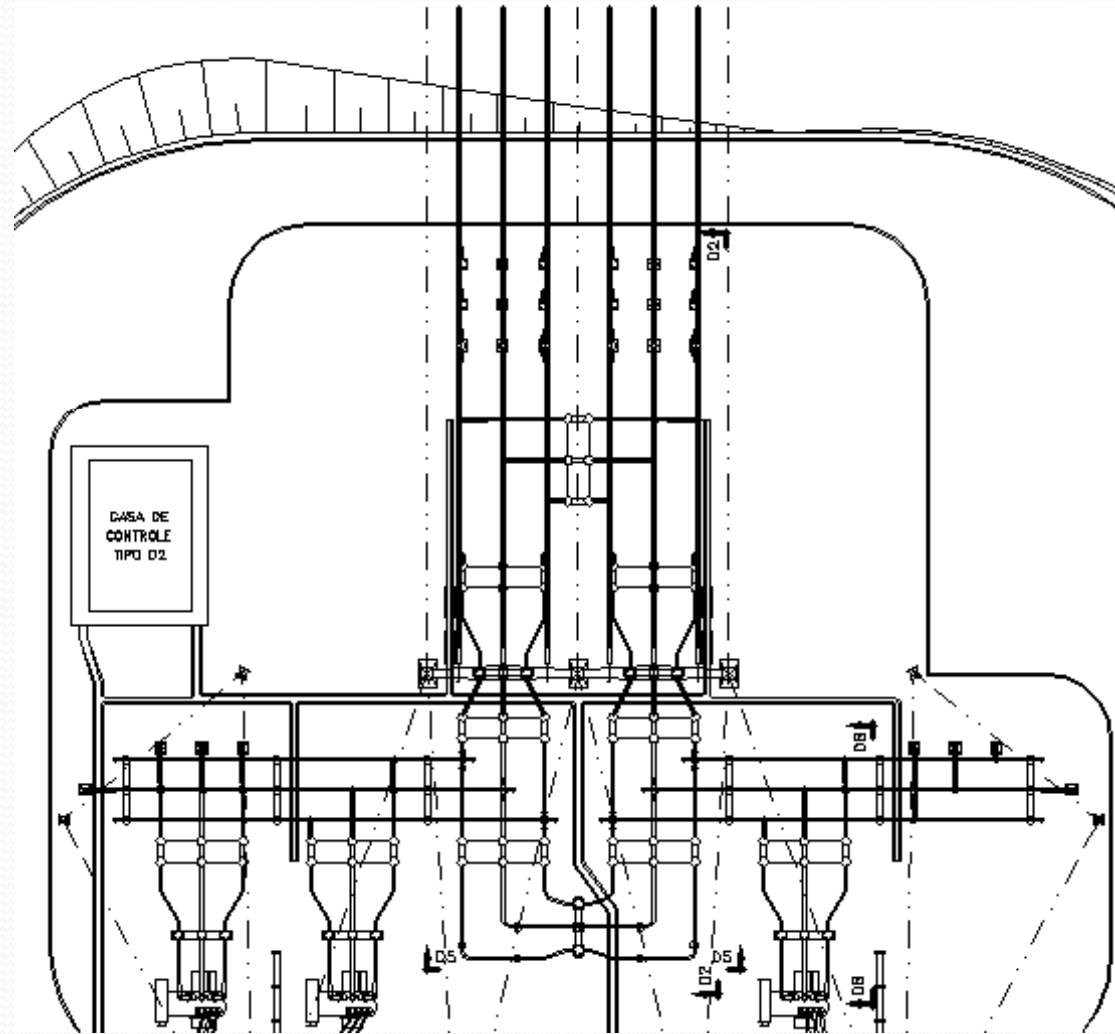
# SE Betim 5



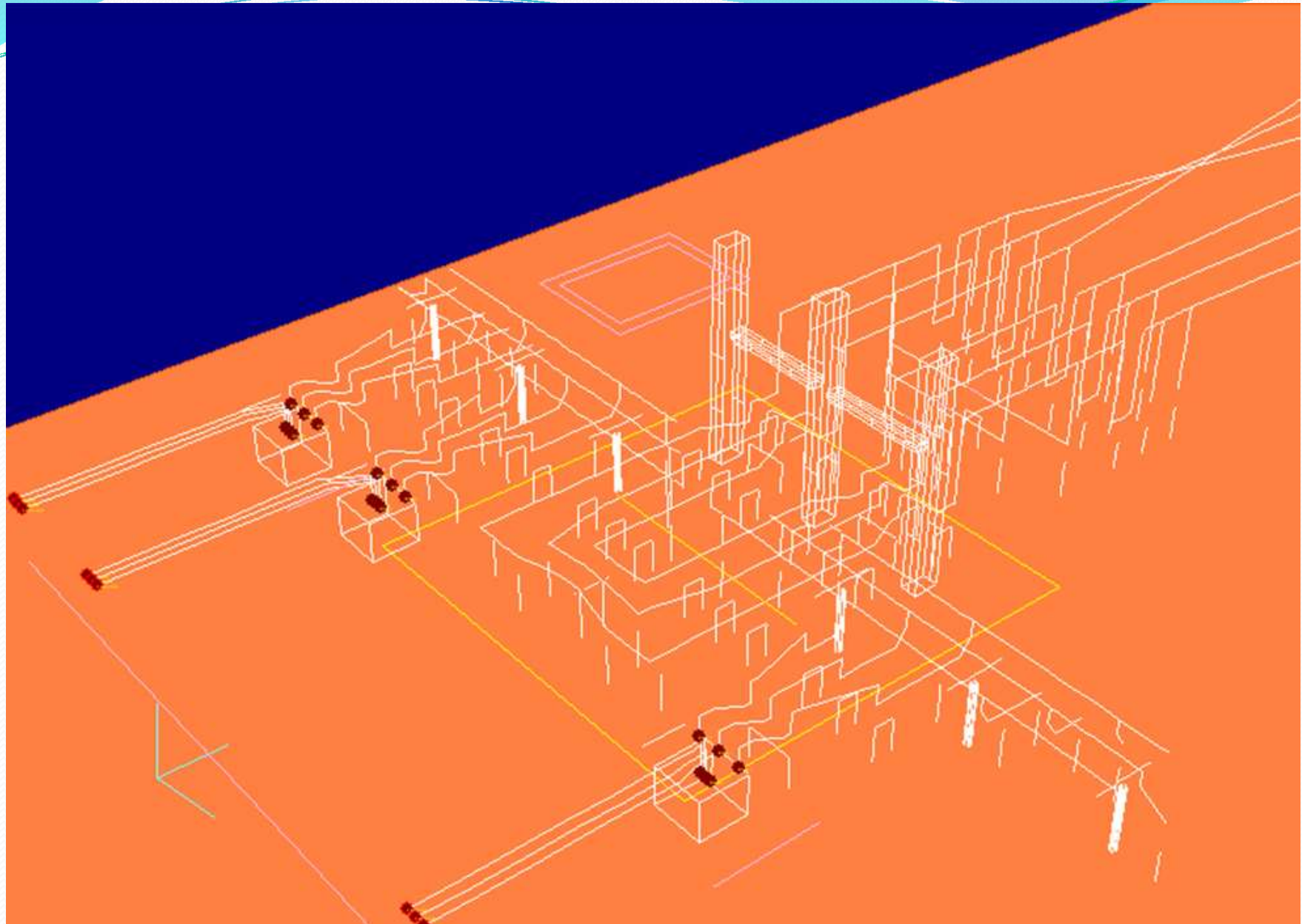


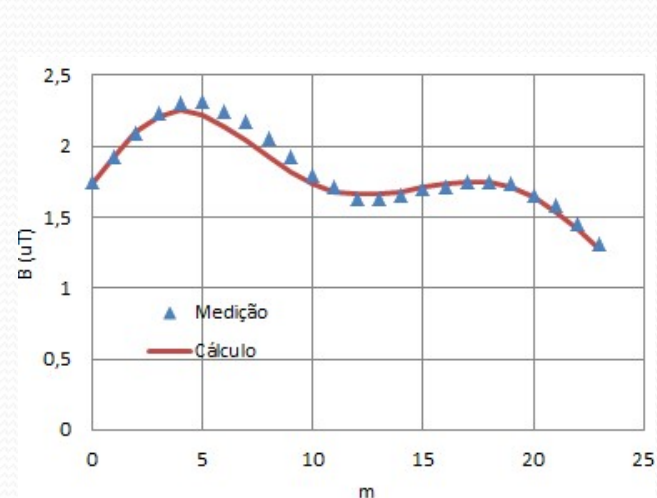
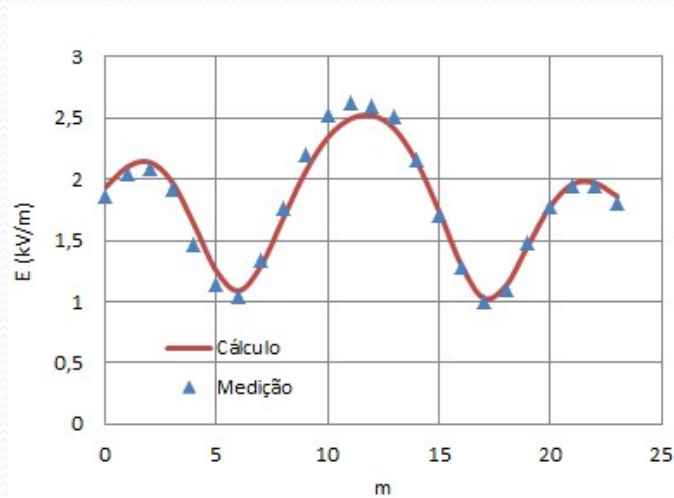
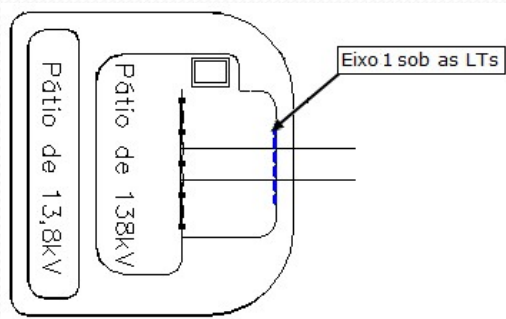
# SE Betim 5





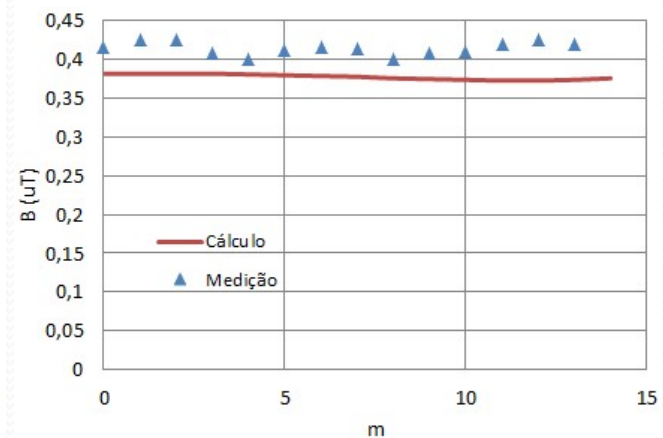
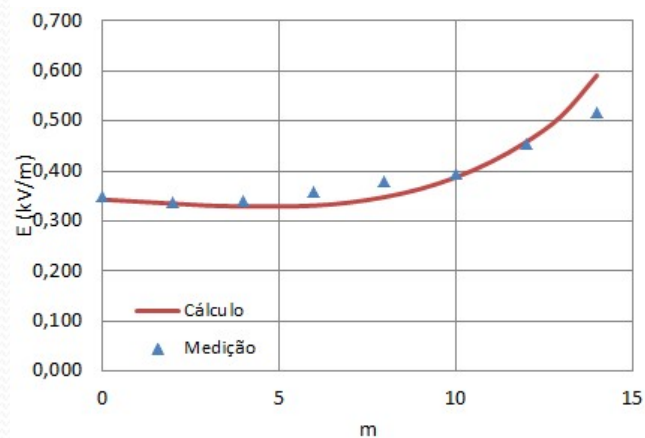
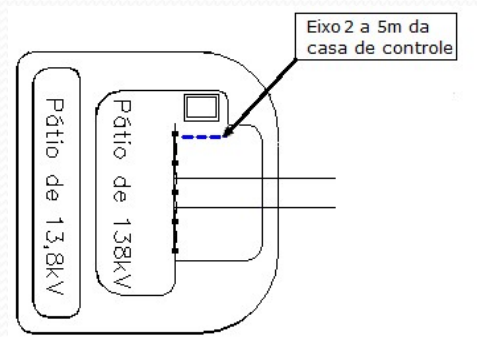




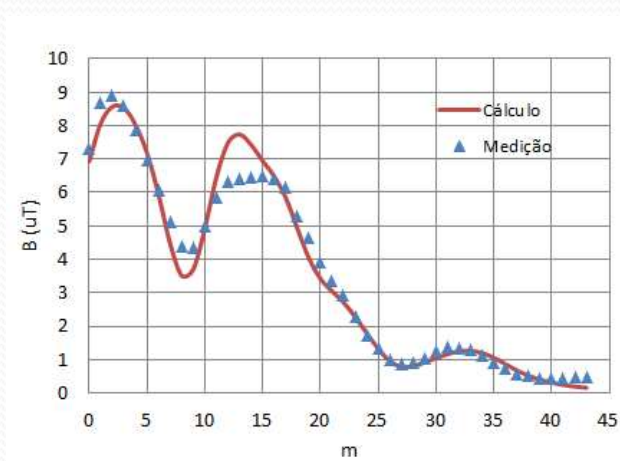
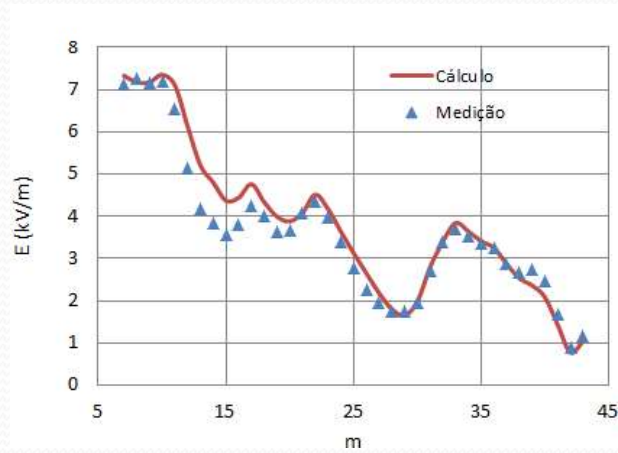
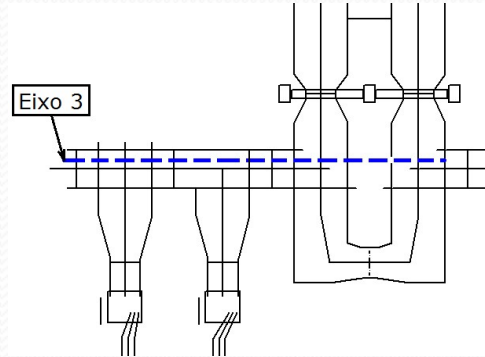


**Valor eficaz dos campos elétrico e magnético ao longo do Eixo 1**





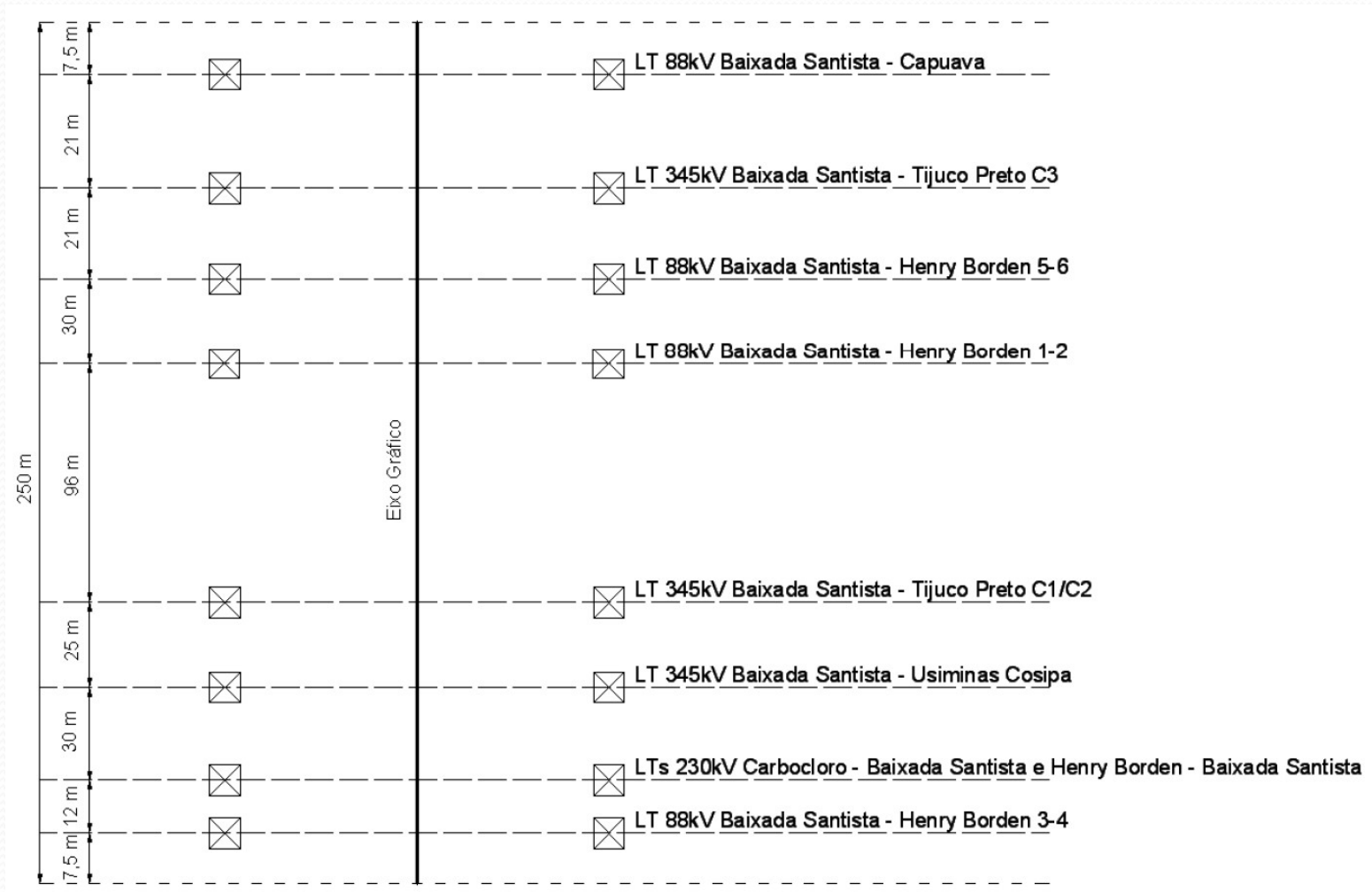
**Valor eficaz dos campos elétrico e magnético ao longo do Eixo 2**



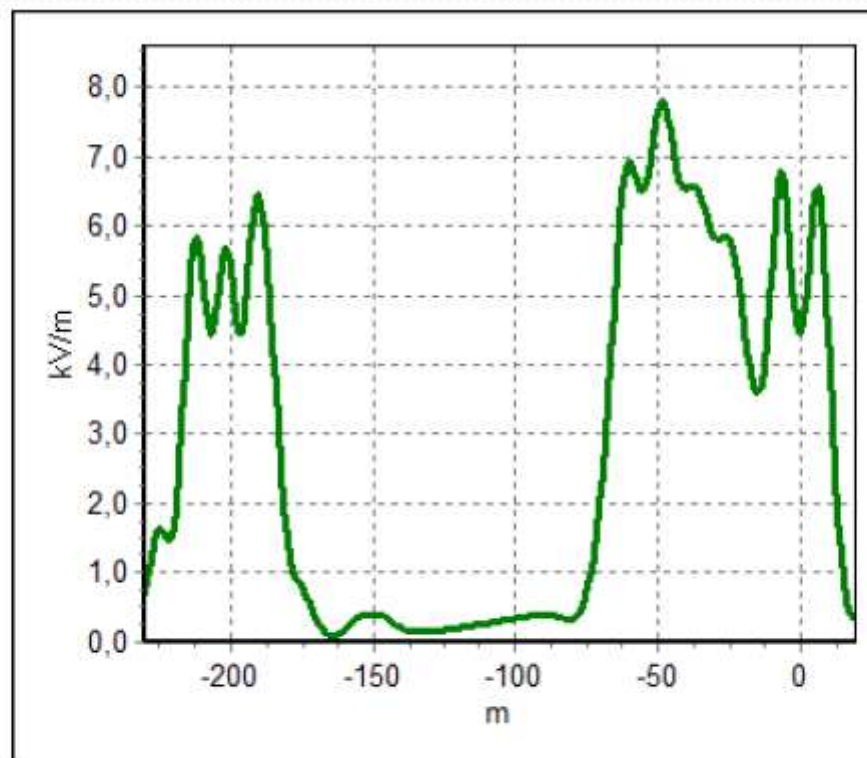
**Valor eficaz dos campos elétrico e magnético ao longo do Eixo 3**



# Faixa de Passagem de 8 LTs



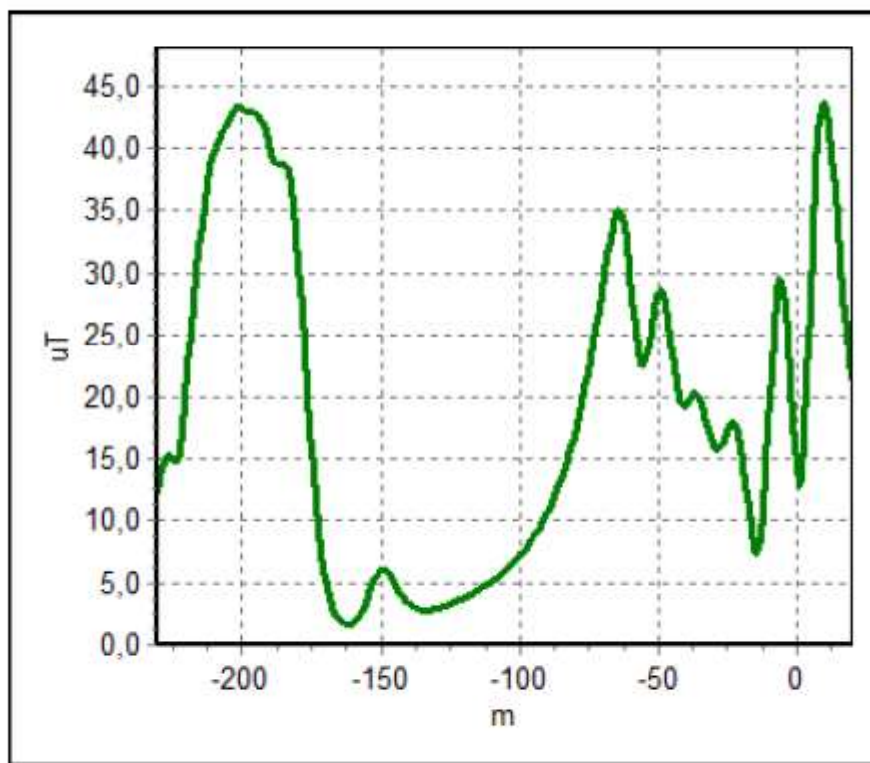
# Faixa de Passagem de 8 LTs



**Figura 2.4-2** – Eixo 1 – Eixo de um limite ao outro da faixa de segurança. PO/PG. Campo elétrico, valor eficaz. (Condição de Operação Normal)



# Faixa de Passagem de 8 LTs



**Figura 2.4-4** – Eixo 1 – Eixo de um limite ao outro da faixa de segurança. PO/PG. Campo magnético B (densidade de fluxo magnético, para ser mais preciso). (Condição de Operação Normal)



**Cabo Óptico Auto - Sustentado (ADSS)  
Utilizado em LT de Extra Alta Tensão  
Experiência de FURNAS**

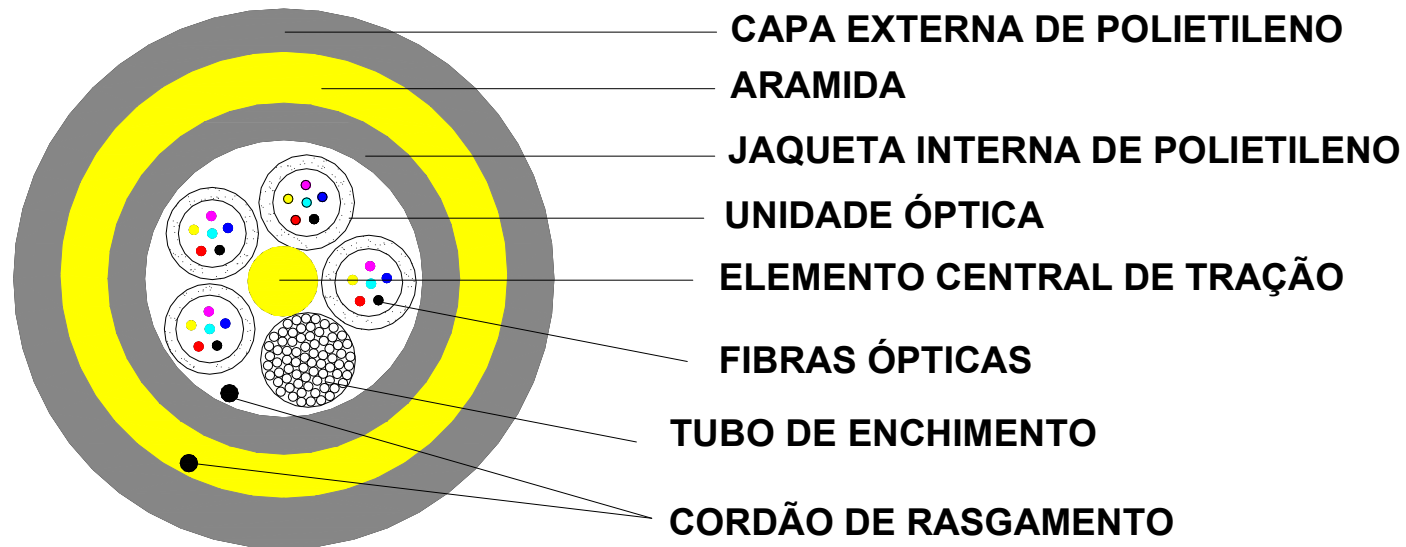
- Elilson Eustáquio Ribeiro
- Maria das Graças Alvim



# CABOS ADSS

Cabos ópticos dielétricos auto-sustentados para longos vãos

**ADSS - All Dielectric Self Supporting**



## Montagem Final (BPA)





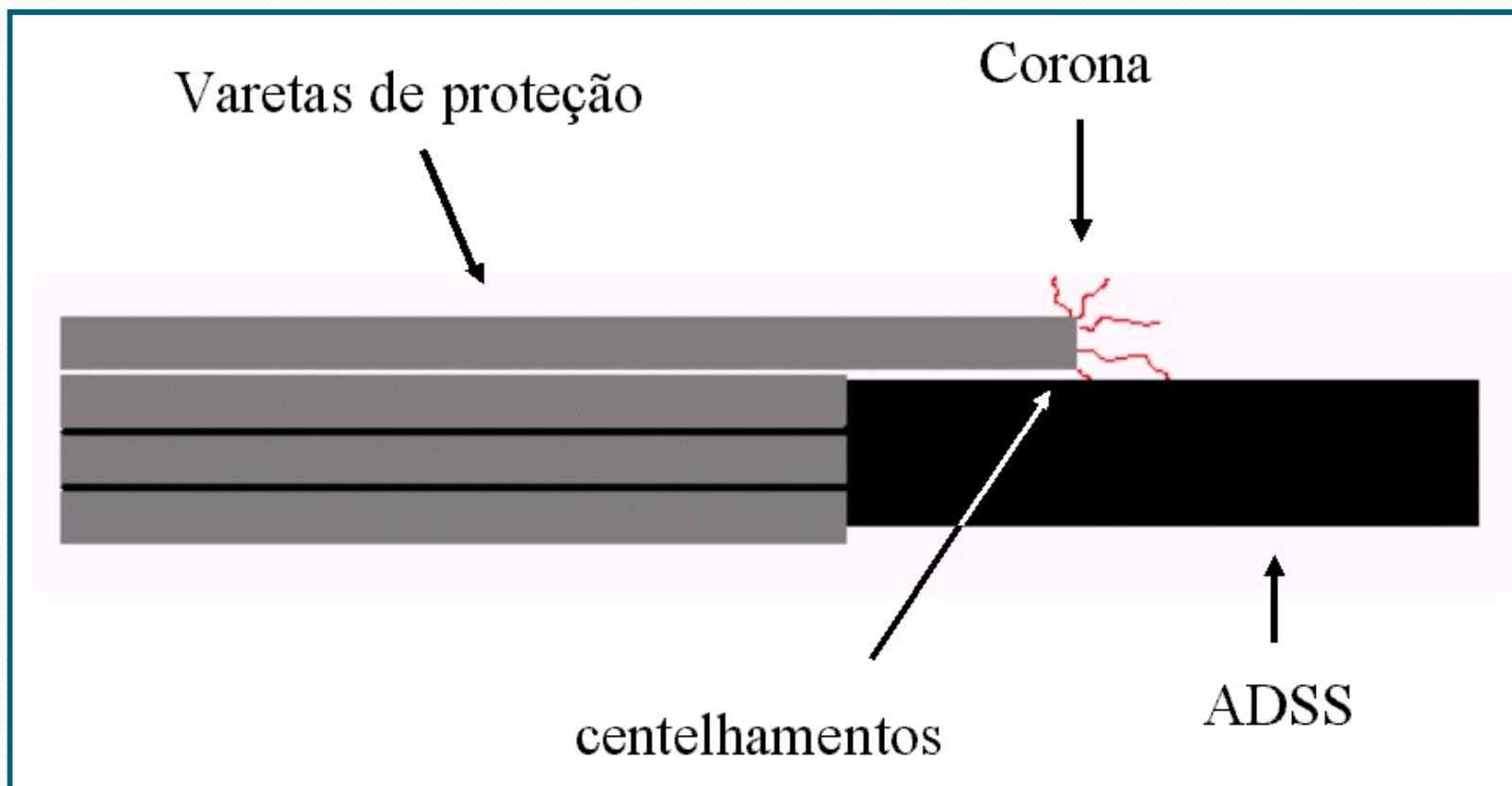
# CORONA COIL



**Corona Coil**



## CORONA E MICROCENTELHAMENTOS



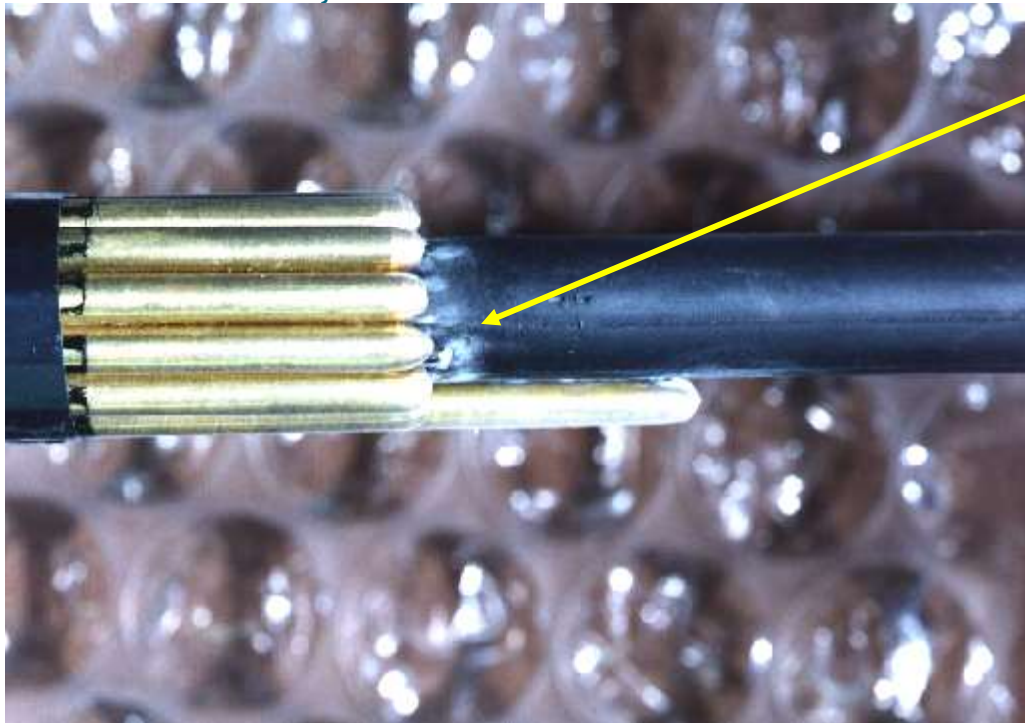
**CAMPO ELÉTRICO  $>20\text{kV/cm}$**



## CORONA

- O que ocorre se o corona está presente nas pontas das armaduras?
- Erosão da capa externa do cabo, permitindo a penetração de H<sub>2</sub>O.
- Possíveis falhas em menos de dois anos( BPA).

*Arizona State University*



Danificação  
por  
corona  
na capa  
do cabo

*Fonte : BPA/Eletronet*

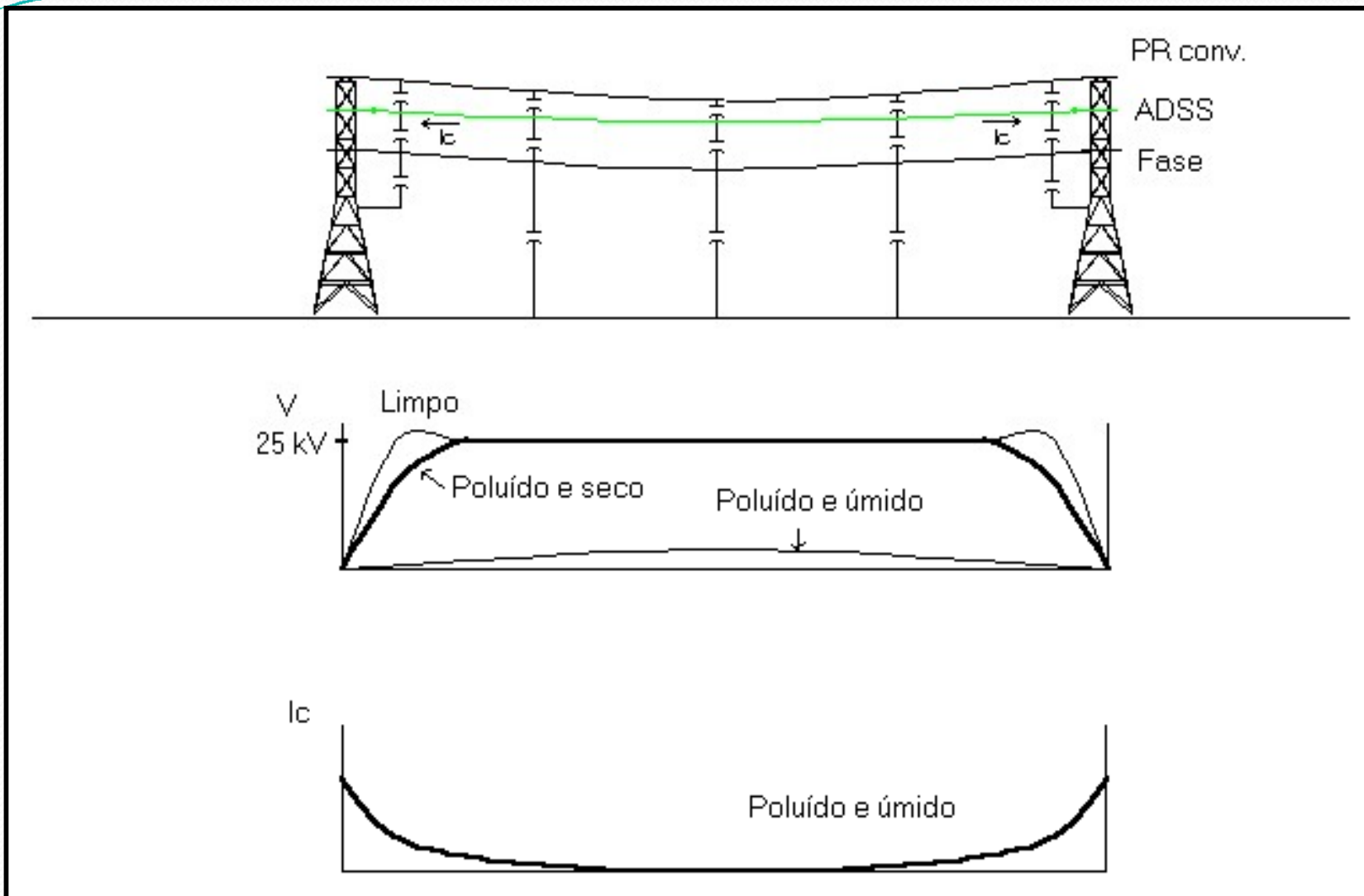
# DANIFICAÇÃO DEVIDO AO CENTELHAMENTO EM BANDA SECA



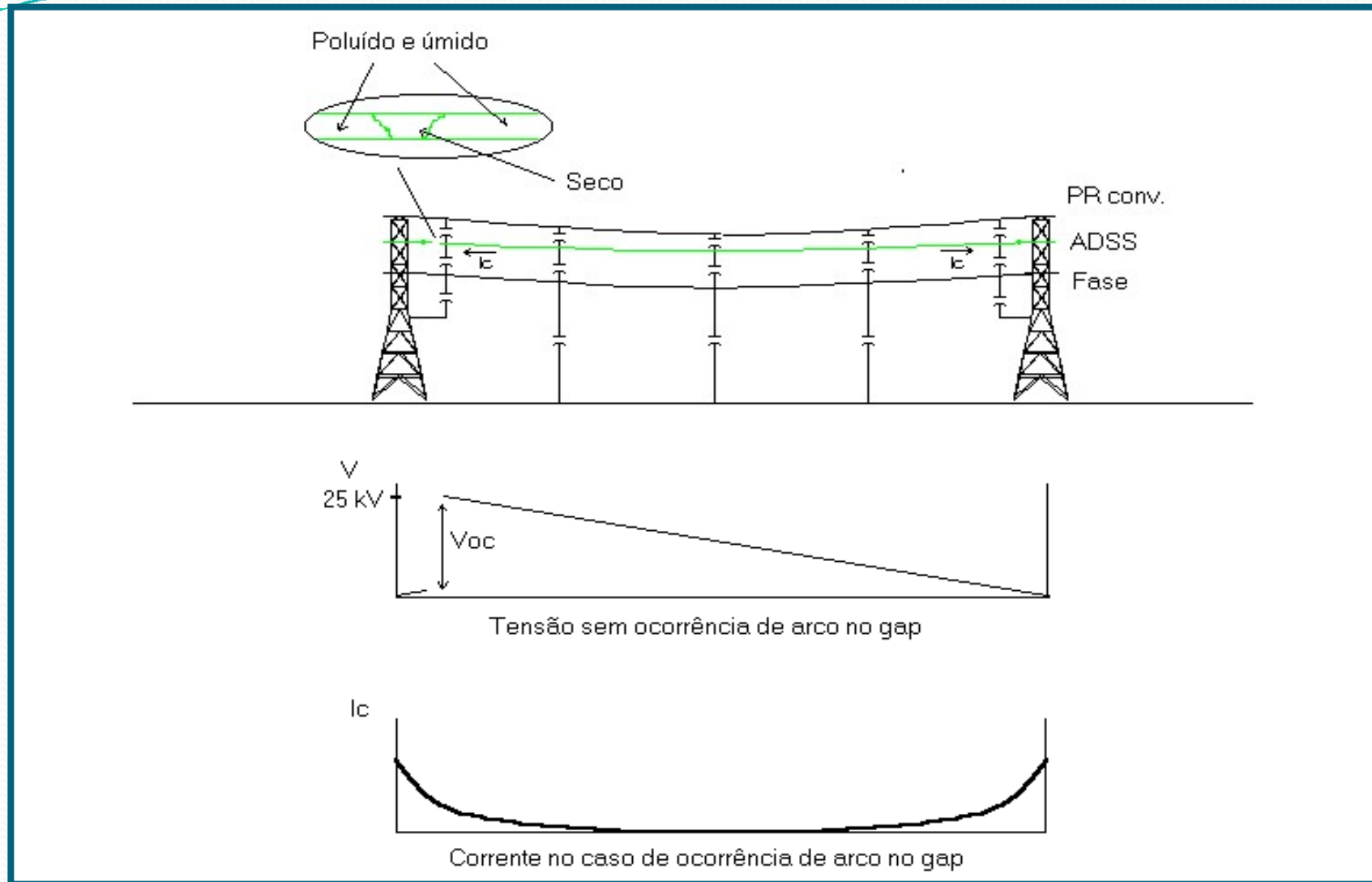
*Fonte : BPA/Eletronet*



# TENSÃO E CORRENTE AO LONGO DO CABO ADSS

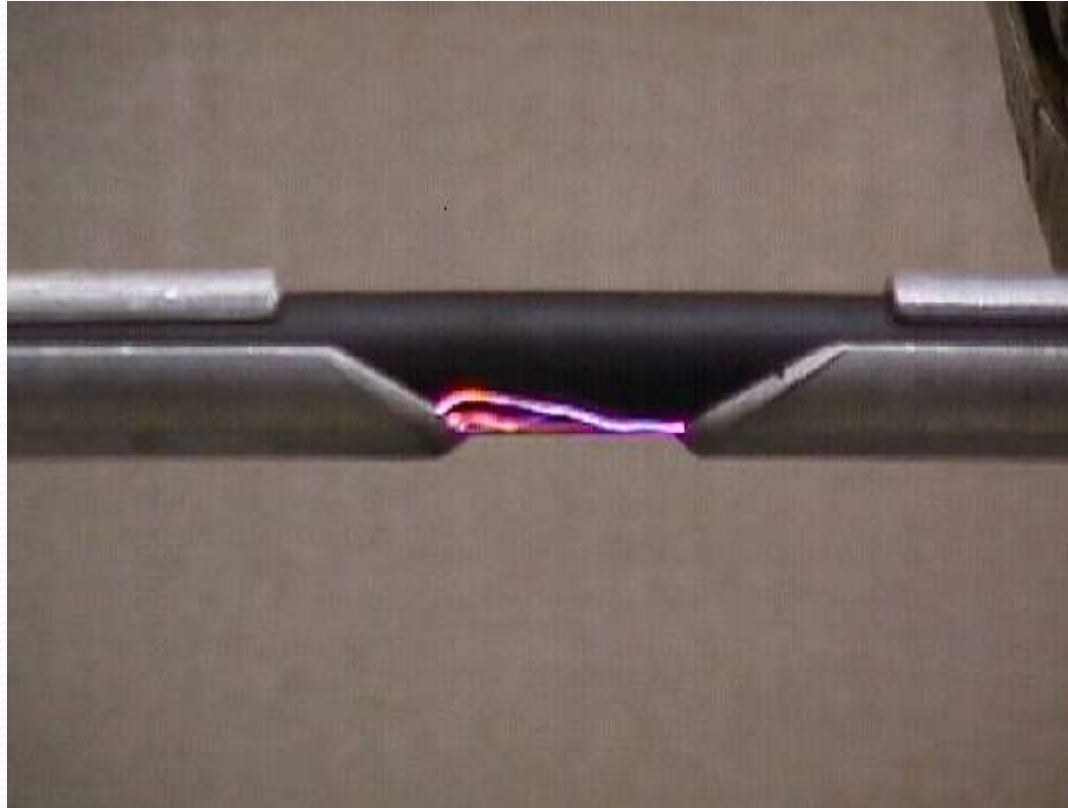


# FORMAÇÃO DA BANDA SECA



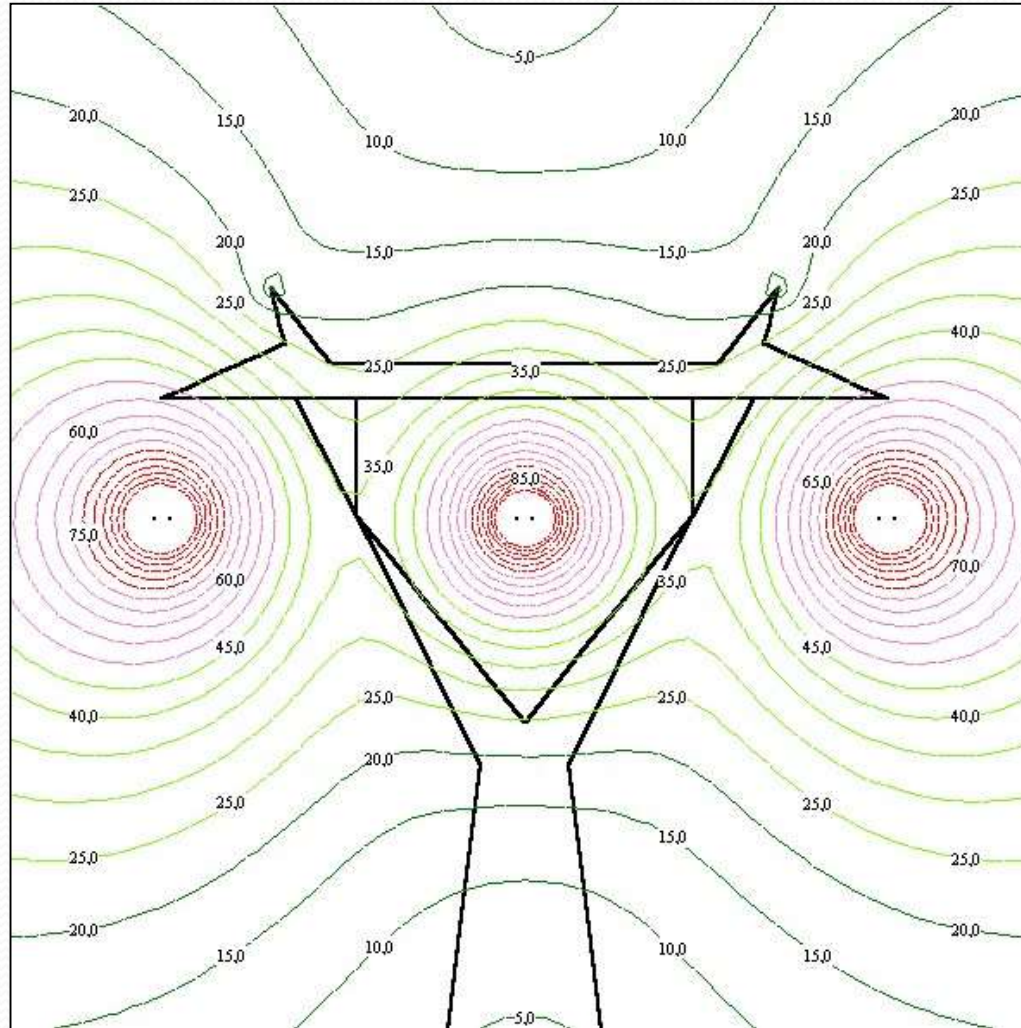


## ARCO EM GAP (TESTE EM LABORATÓRIO)



*Fonte : BPA/Eletronet*

# UTILIZAÇÃO DO POTENCIAL NÃO PERTURBADO







Interferências Eletromagnéticas  
Devido às  
Linhas Aéreas de Transmissão de Energia



# Interferências Eletromagnéticas

## ■ Interferências Na Frequência Industrial

Importância maior sob o ponto de vista da segurança dos seres vivos e da integridade dos equipamentos e/ou componentes do sistema interferido.

## ■ Interferências em Altas Frequências

Importante sob o ponto de vista de qualidade do serviço prestado pelo sistema interferido.



# Interferências Eletromagnéticas de LTs

## ■ Interferências na Frequência Industrial

- Exposição dos seres humanos aos campos elétrico e magnético
- Geração de potenciais de passo e toque em torres
- Dutos
- Telefonia
- Equipamentos de irrigação
- Postos de gasolina
- Depósitos de explosivos e espoletas
- Instalações a gás
- Linhas férreas
- Cercas
- Outras LTs, LDs ou alimentadores da baixa tensão
- Construções metálicas

# Interferências Eletromagnéticas de LTs

## ■ Interferências em Altas Frequências

- RI – Rádio interferência
- TVI – Interferência na faixa de TV
- Ruído audível
- Radar
- Rádio - farol



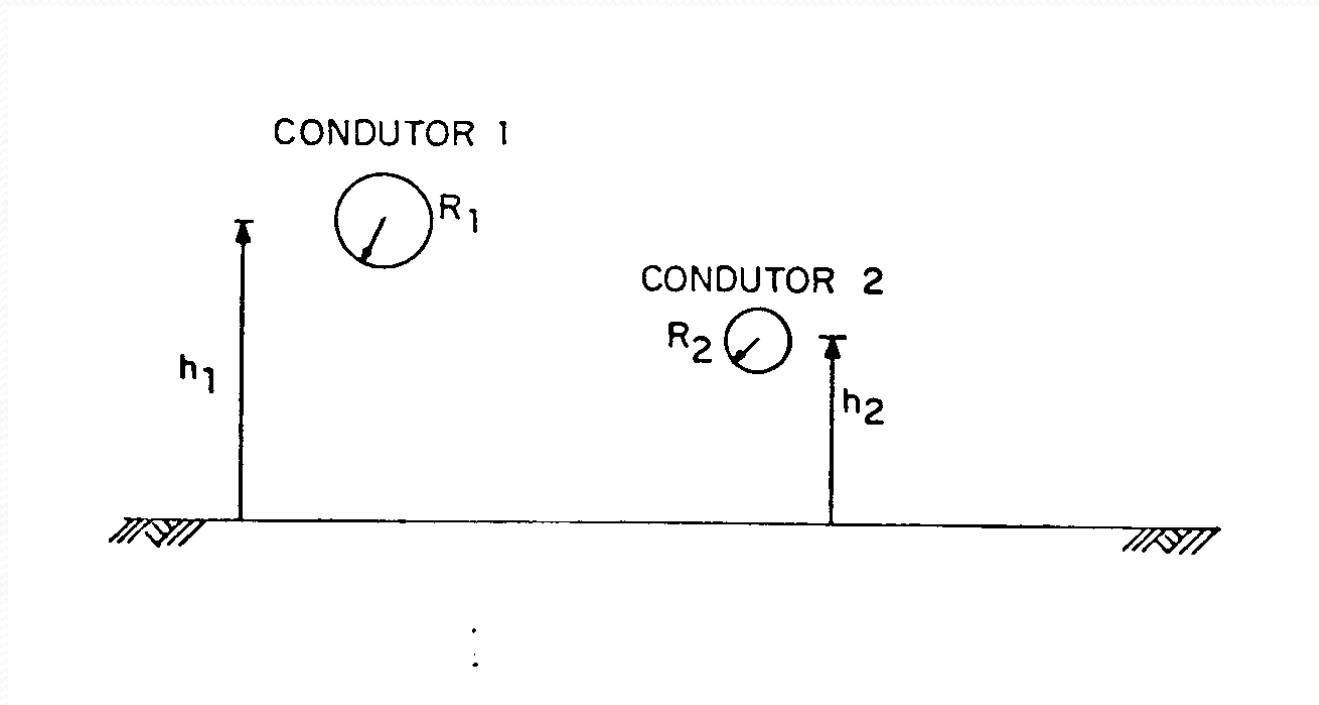
## Interferências em 60 Hz

- Acoplamento magnético (indutivo) (\*)
- Acoplamento resistivo (\*)
- Acoplamento eletrostático (capacitivo)

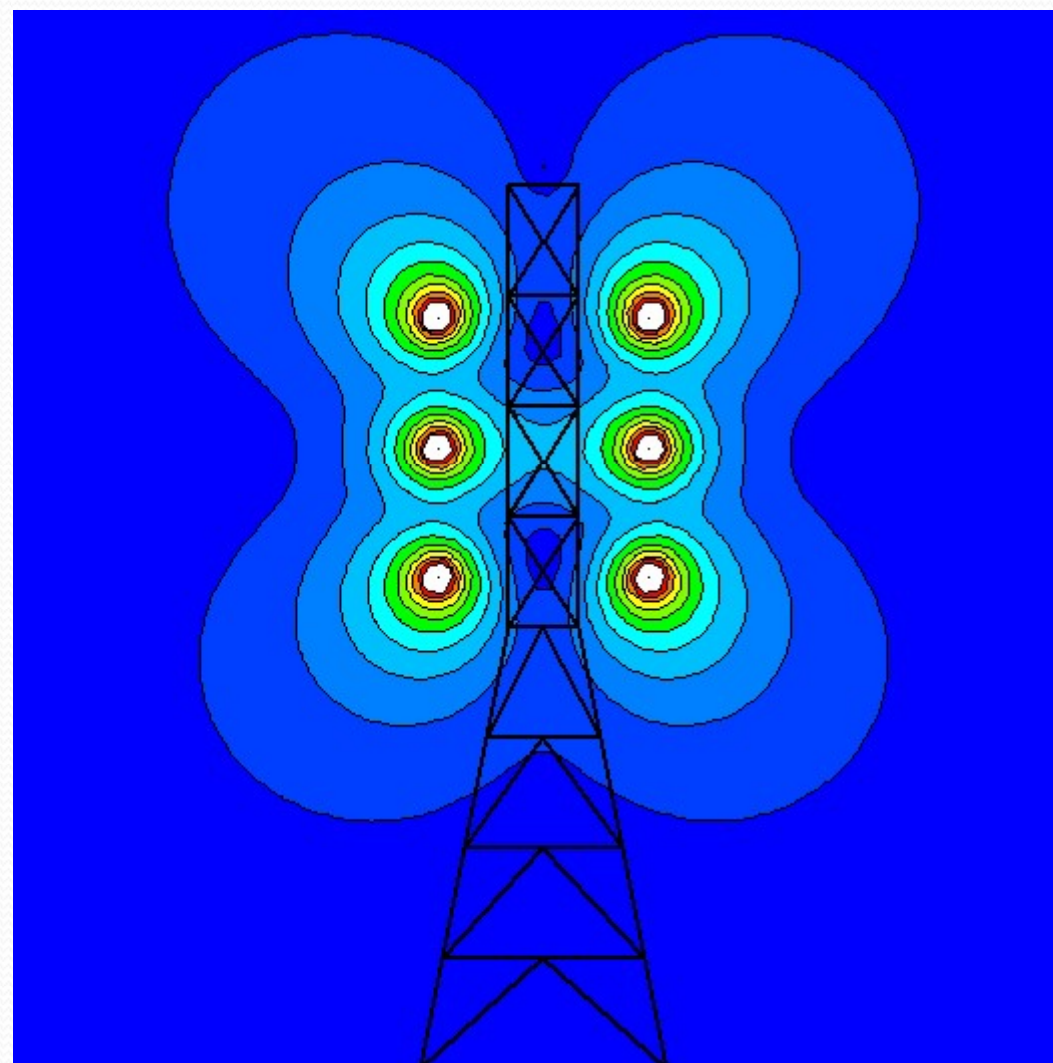
(\*) Normalmente predominantes sob condições de curto-circuito.



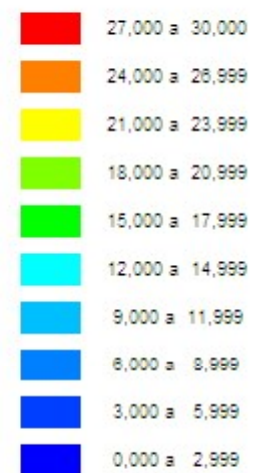
## Acoplamento Capacitivo ou Eletrostático

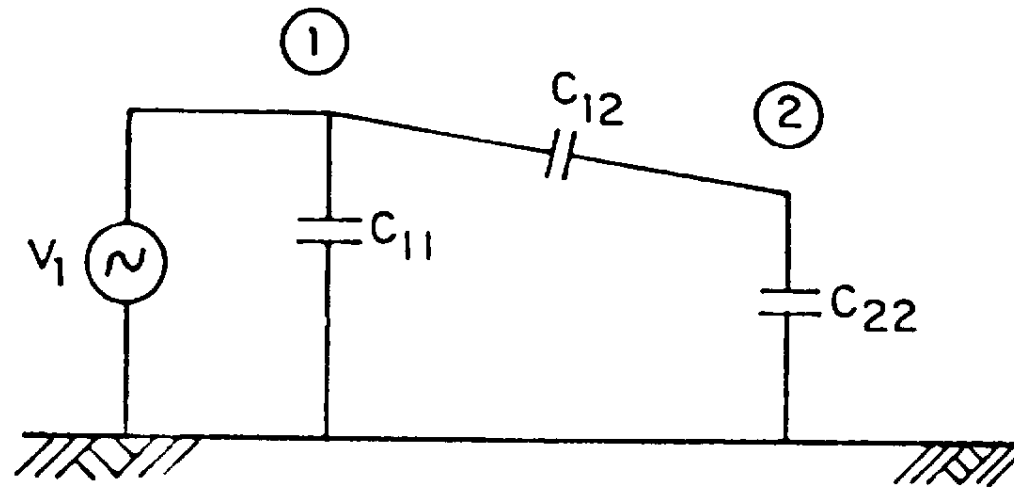


Geometria exemplo : dois condutores paralelos



### Potencial (kV)





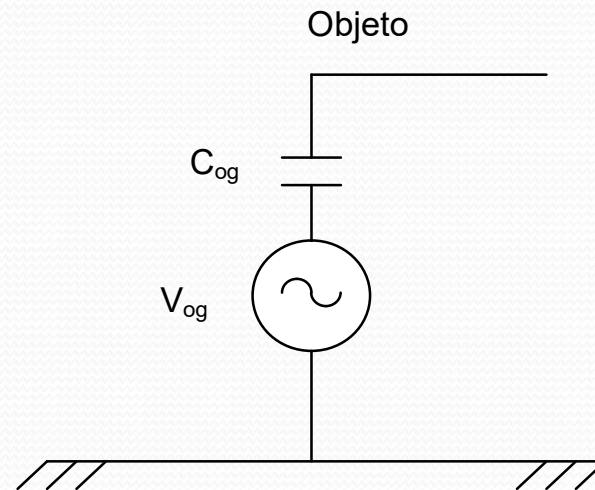
Circuito equivalente para análise eletrostática.

$$V_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} V_1$$

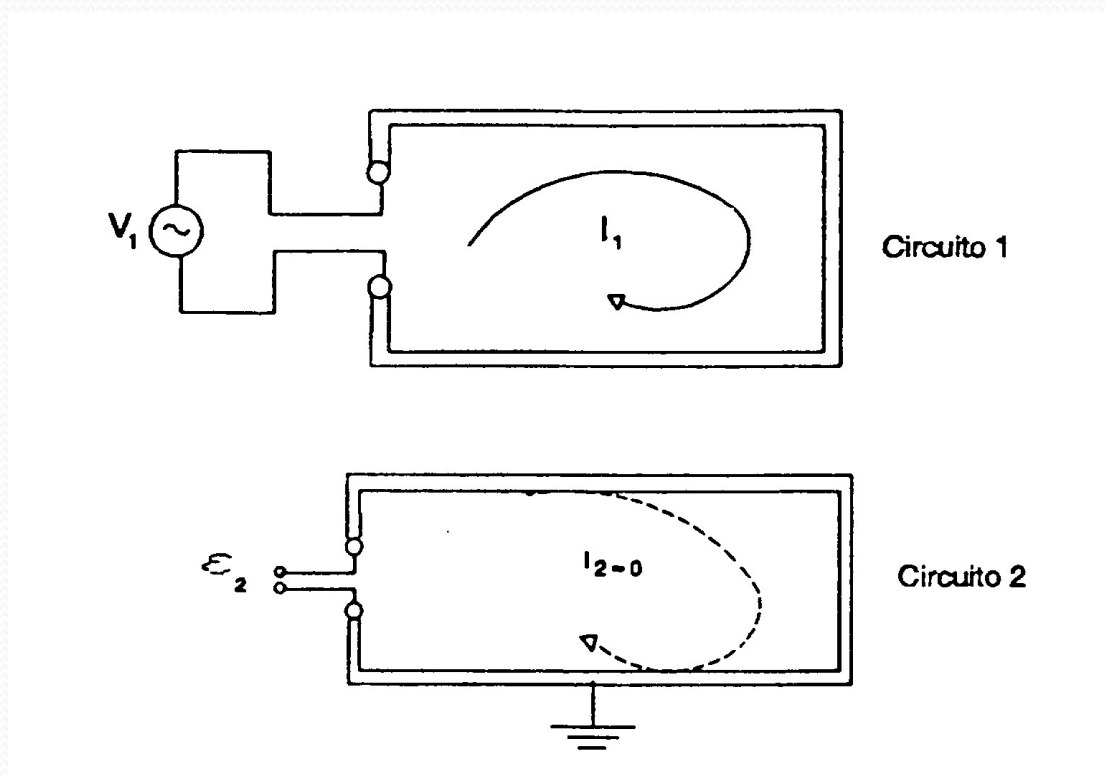


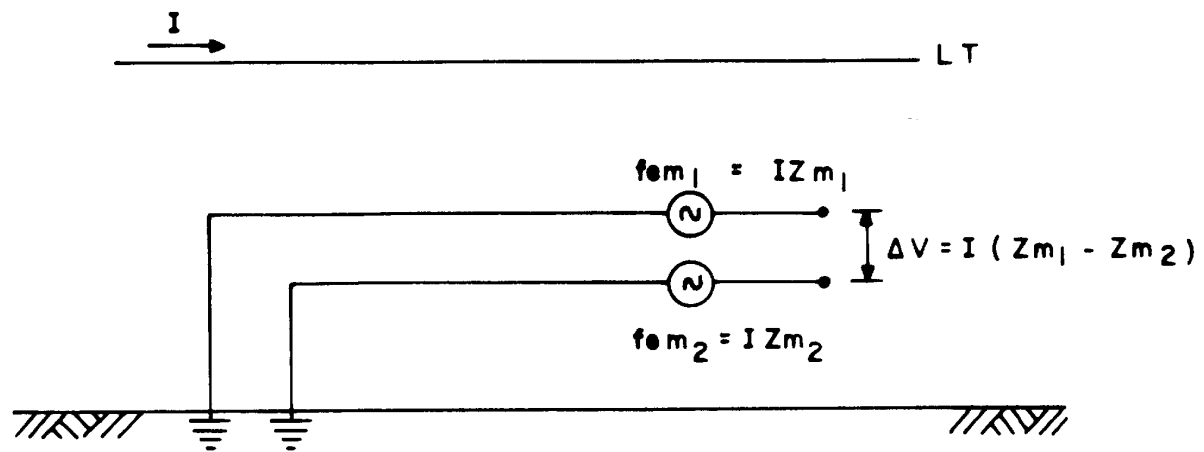
## Correntes Induzidas por Acoplamento Eletrostático (Capacitivo)

$$V_{og} = P_a q_a + P_b q_b + P_c q_c$$



# Acoplamento Magnético

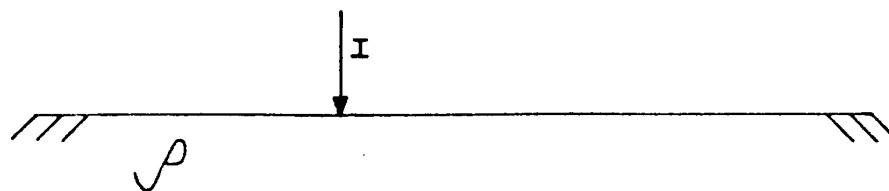




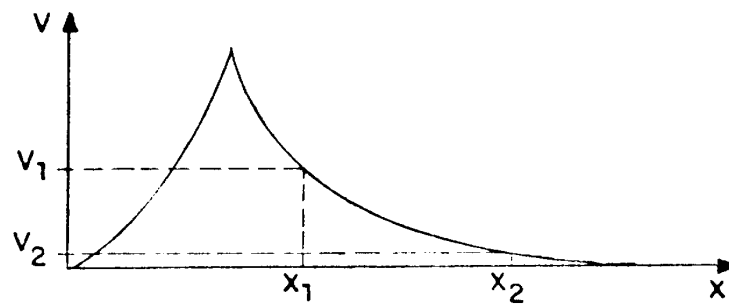
Tensão transversal induzida devido ao efeito de loop.



# Acoplamento Resistivo

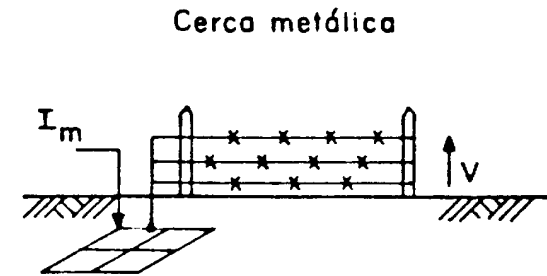
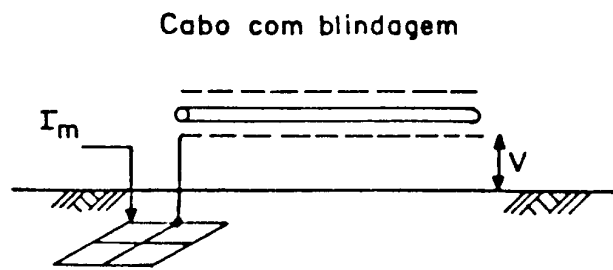


a) Injeção de corrente em um ponto do solo

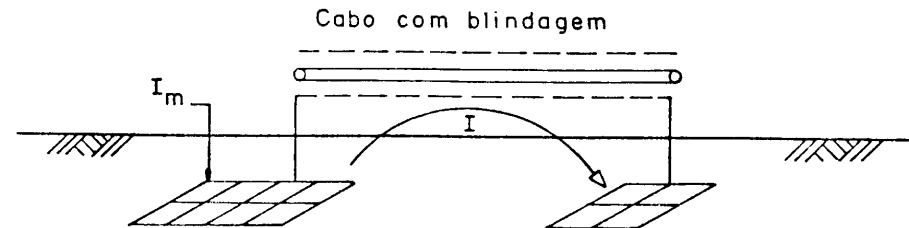


a) Potencial no solo

# Transferência de Potencial



Transferência de potencial do solo via elemento metálico (cabo ou cerca)



Circulação de altas correntes em um cabo devido à elevação de potencial em um dos pontos de aterramento.

## Metodologia de Cálculo

### ➤ Características desejáveis :

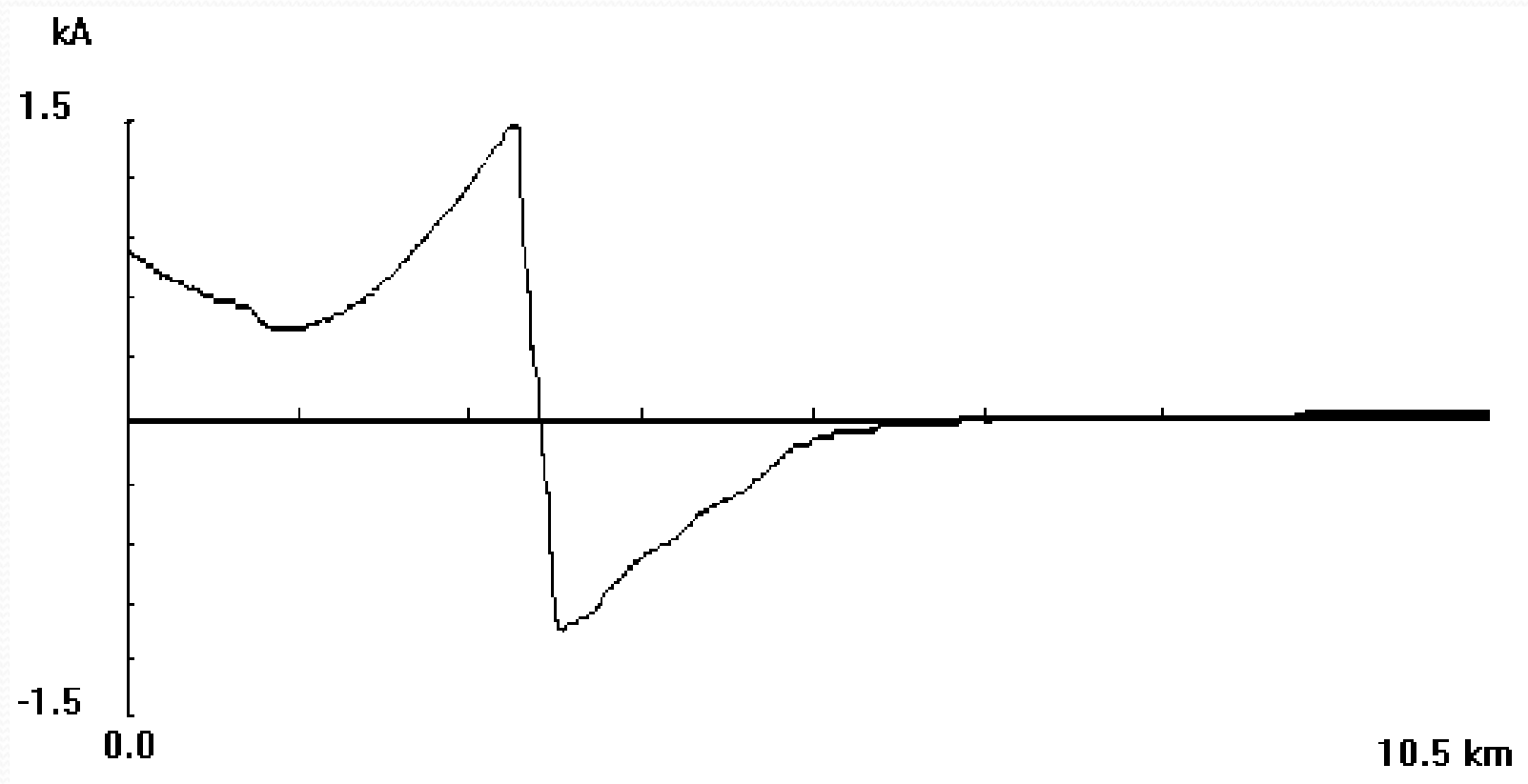
- Considerar vários circuitos indutores/induzidos
- Considerar os diversos acoplamentos
- Considerar a variação de parâmetros ao longo dos circuitos induzidos/indutores
- Possibilitar o cálculo da distribuição de corrente e tensão em linhas e elementos multitermados (neutros de alimentadores, cabos para-raios, cabo mensageiro de linhas telefônicas ou dutos representados por circuitos  $\pi$ 's conectados em série)



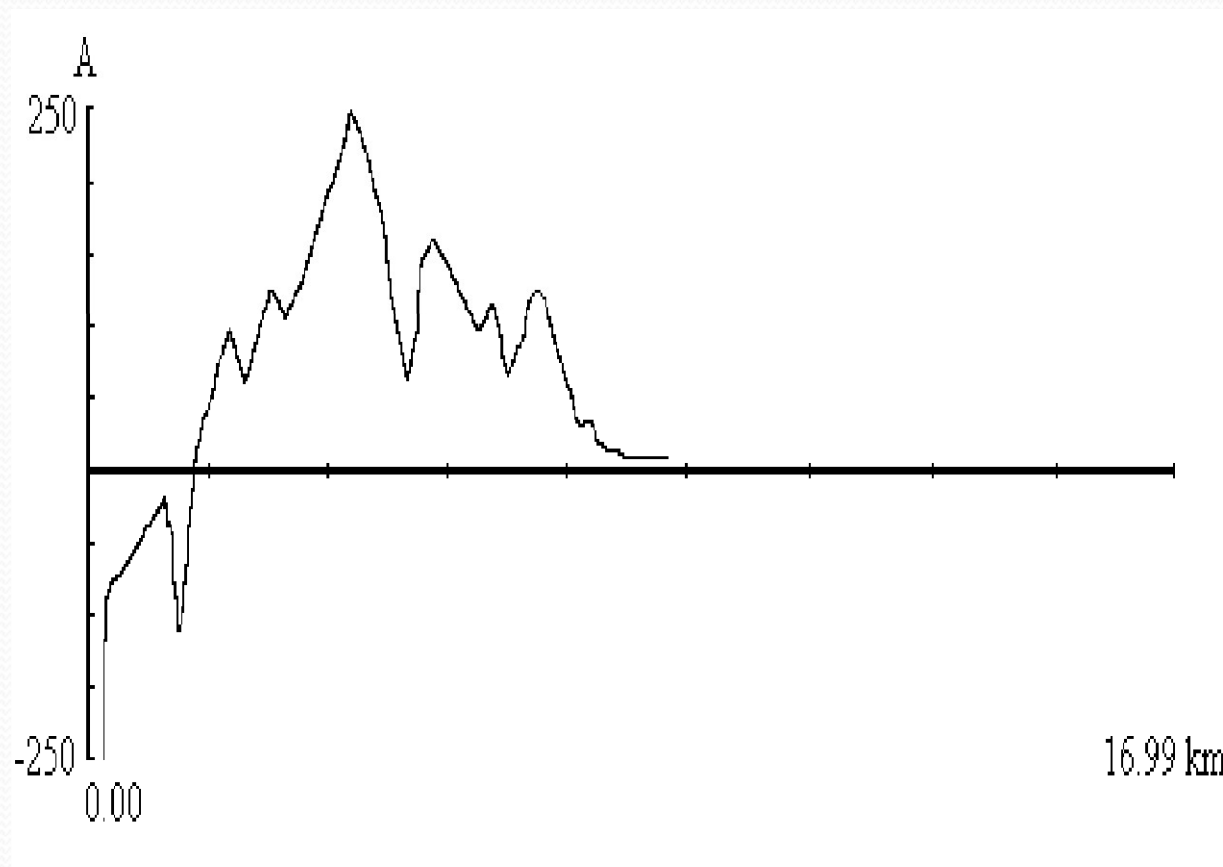
# Interferências entre LTs e Dutos e Tubulações

- Tensões e correntes induzidas nos dutos e tubulações
  - ◆ Acoplamento Eletrostático (Capacitivo)
  - ◆ Acoplamento Magnético
  - ◆ Acoplamento Resistivo

## Corrente no Cabo Pára-Raios da LT

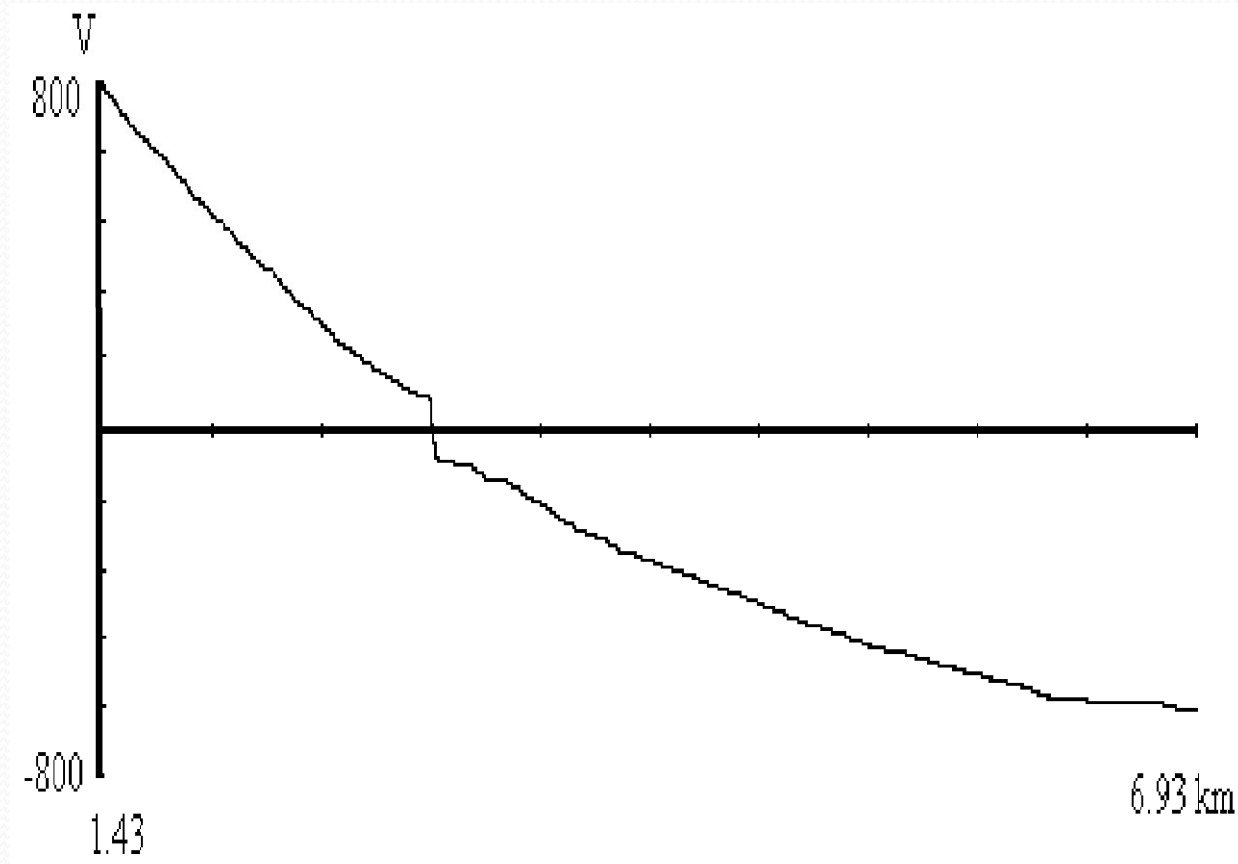


## Corrente nos Pés-de-Torre da LT

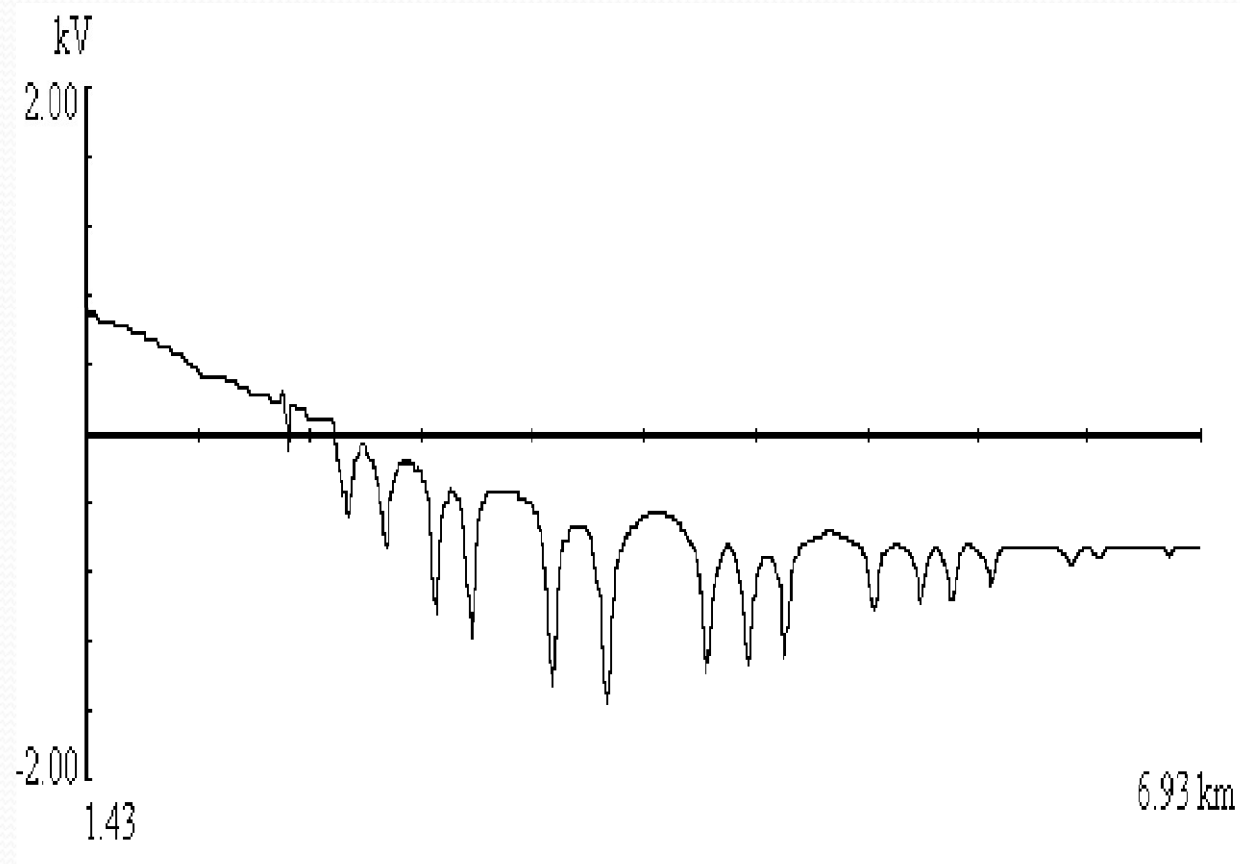




## Tensão na Parte Metálica da Tubulação



## Tensão no Revestimento da Tubulação





# Interferências de LTs em Parreirais





# Interferências de LTs em Parreirais





# Interferências de LTs em Parreirais





# Interferências de LTs em Parreirais





# Interferências de LTs em Plantação de Maracujá





# Interferências de LTs em Plantação de Maracujá



# Sistemas de Aterramento

SEGround - Simulação de Sistemas de Aterramento

Arquivo Editar Visualizar Resultados Opções Janela Sobre Visualização da Geometria

Dados Gera Malha Correntes Resumo  $\Sigma$  I Seg. Eliminados Cil. Superpostos Le Arq Resist

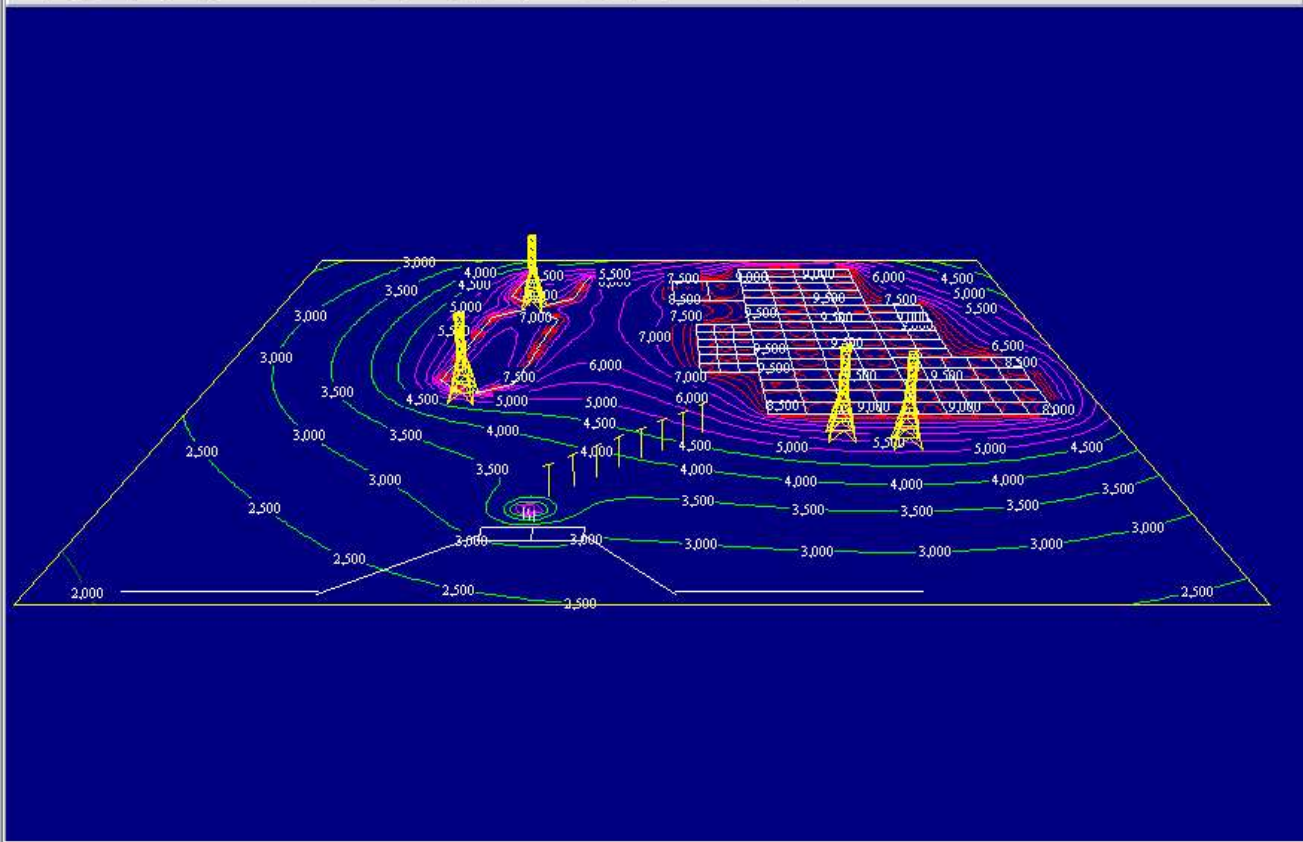
Geometria - C:\SE 3.5.0\SEGground\Data\Visao3D.txt

Visual Plano Geometria

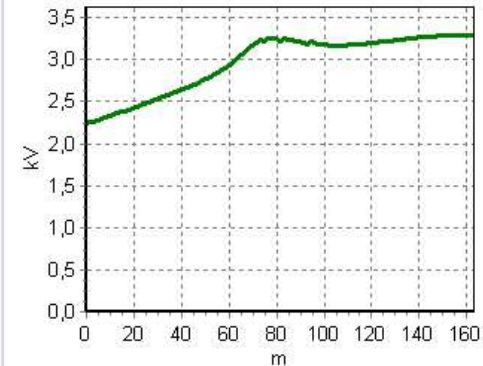
S E Reduzir V Ponto Ref. Segmento

Gráfico - Tipo de cálculo: Potencia...

Gráfico



Gráfico



Gráfico

Plano de Isovalores - Tipo de cál...

$\Delta = 500000$  Inicia Executa Fim

Potencial (kV)

de	até
0,000	2,499
2,500	4,999
5,000	7,499
7,500	9,999

Nome do Objeto = T1

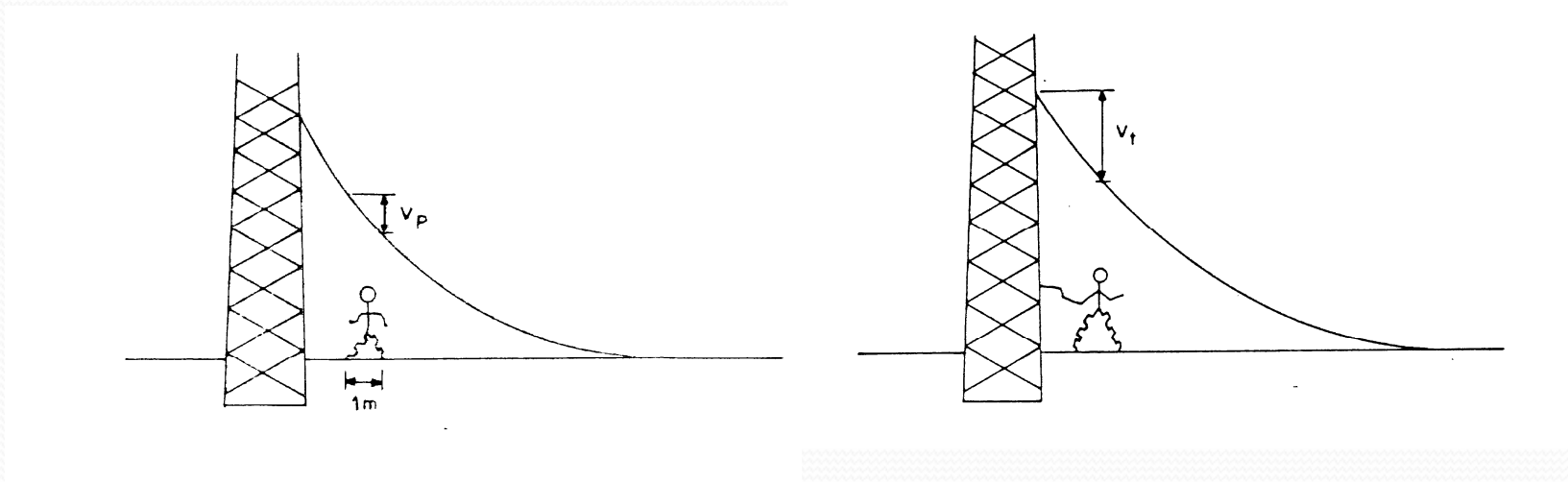
start PowerPoint InterfLTs\_ReuniãoCo... untitled - Paint SEGround PT 19:52



## Dimensionamento de Malhas de Aterramento de SEs

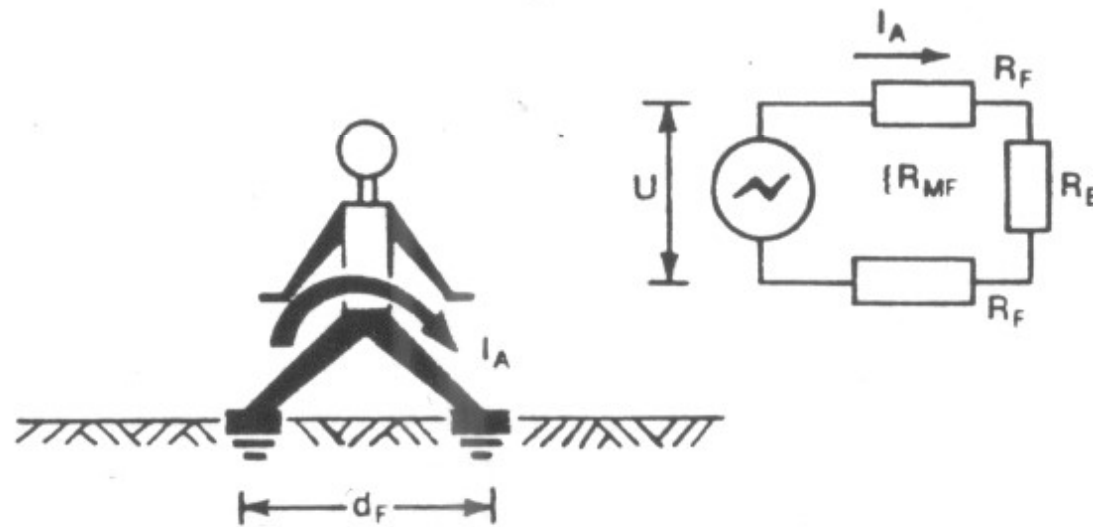
- A geometria da malha de aterramento de uma SE é composta, em geral, por cabos e hastes de aterramento instalados no solo.
- A geometria da malha é estabelecida de forma a controlar as tensões de passo e toque geradas, na área em que a mesma é instalada, em regime permanente e durante a ocorrência de curtos-circuitos na SE.

# Tensões de Passo e Toque

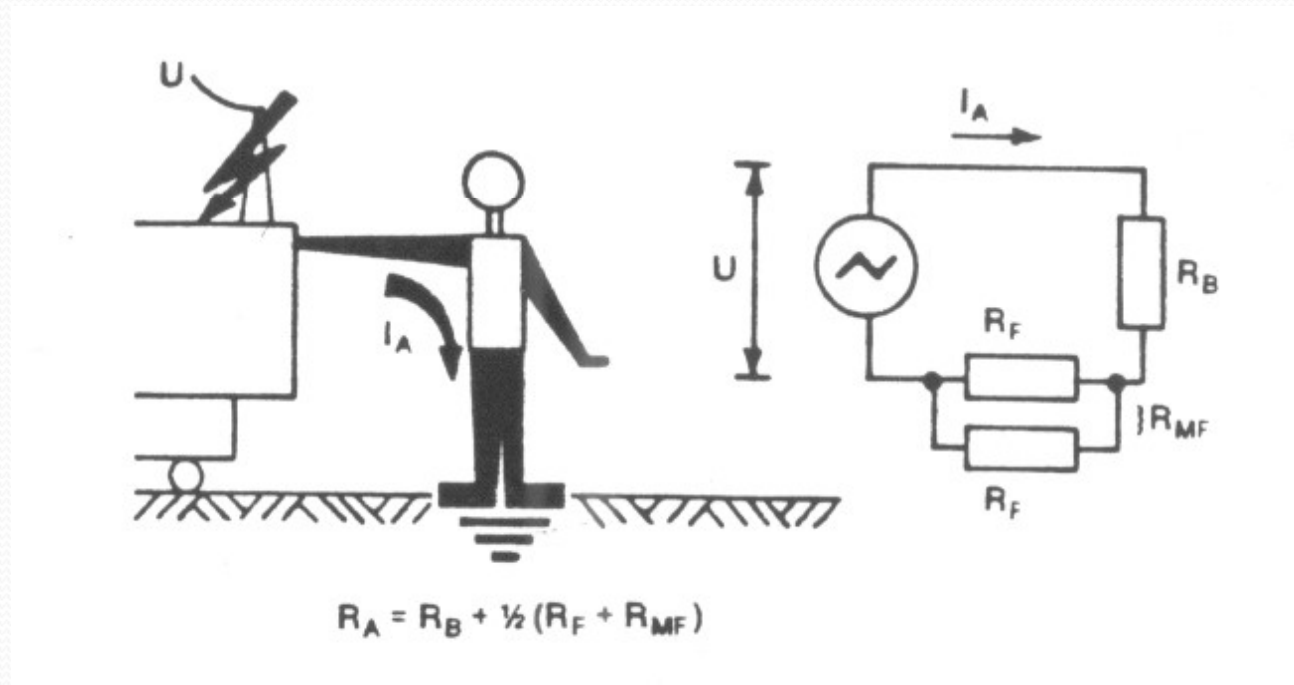




# Circuito Equivalente Utilizado na Avaliação de V<sub>passo</sub> Máxima Admissível



## Circuito Equivalente Utilizado na Avaliação de Vtoque Máxima Admissível





# Tensões de Passo e Toque Máximas Admissíveis – Curta Duração

- Área não britada (terreno natural)

$\rho_s = \rho_1$  ➔ em geral, menores tensões máximas admissíveis

$\rho_1$ ( $\Omega.m$ )	NBR 15751-2009	
	$V_{toque}$ (V)	$V_{passo}$ (V)
100	189	262
500	287	656
1000	410	1148
1500	533	1640
2000	656	2133

- Tempo de atuação da proteção : 0,5 s
- Curta duração e para pessoas de 50 kg

# Tensões de Passo e Toque Máximas Admissíveis – Curta Duração

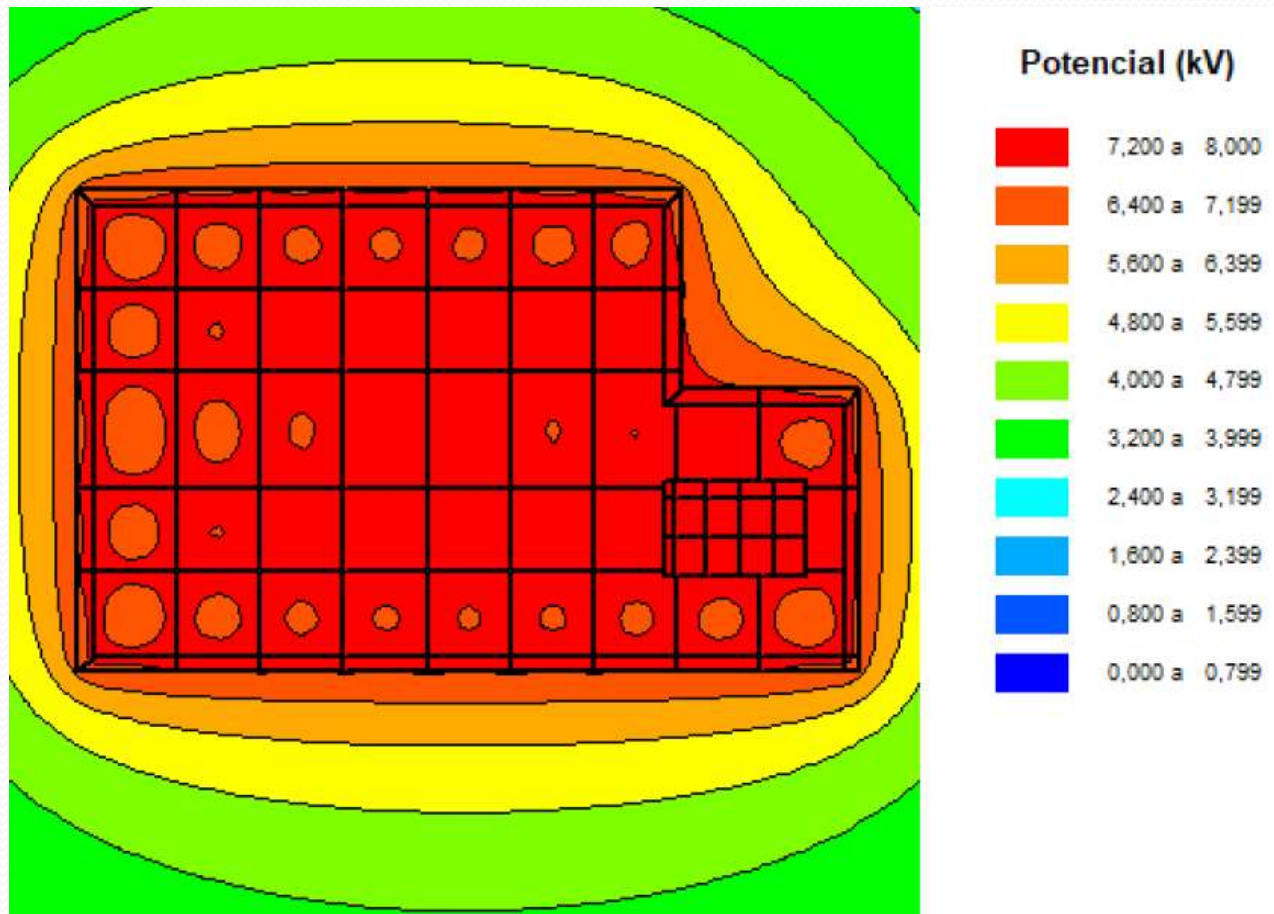
## ➤ Área britada

$\rho_1$ ( $\Omega.m$ )	NBR 15751-2009	
	$V_{toque}$ (V)	$V_{passo}$ (V)
100	678	2220
500	718	2382
1000	763	2561
1500	803	2721
2000	839	2865

- Camada de brita : 3000 Ohms.m (úmida) e 10 cm de espessura
- Tempo de eliminação de falta : 0,5 s

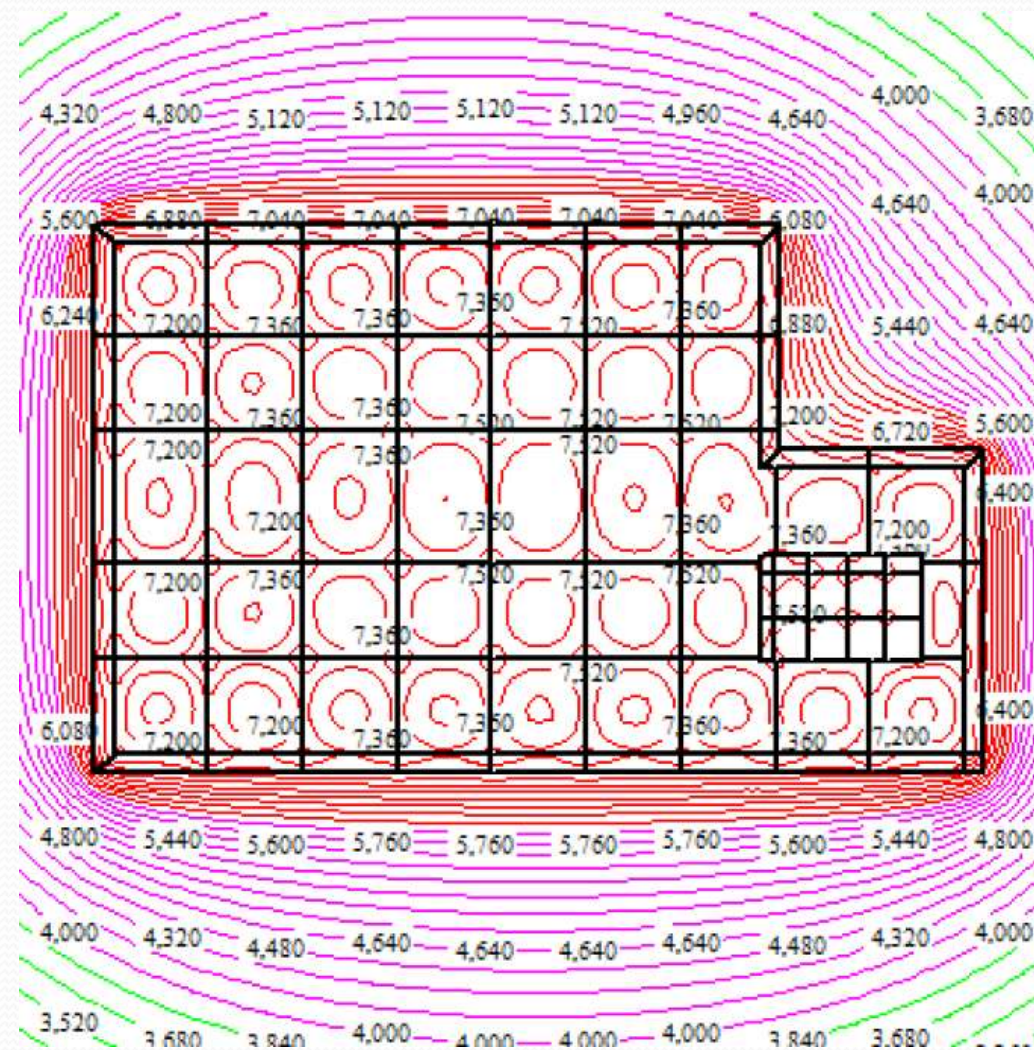


# Mapeamento de Potenciais no Solo Gerados Durante um Curto-Circuito Fase-Terra



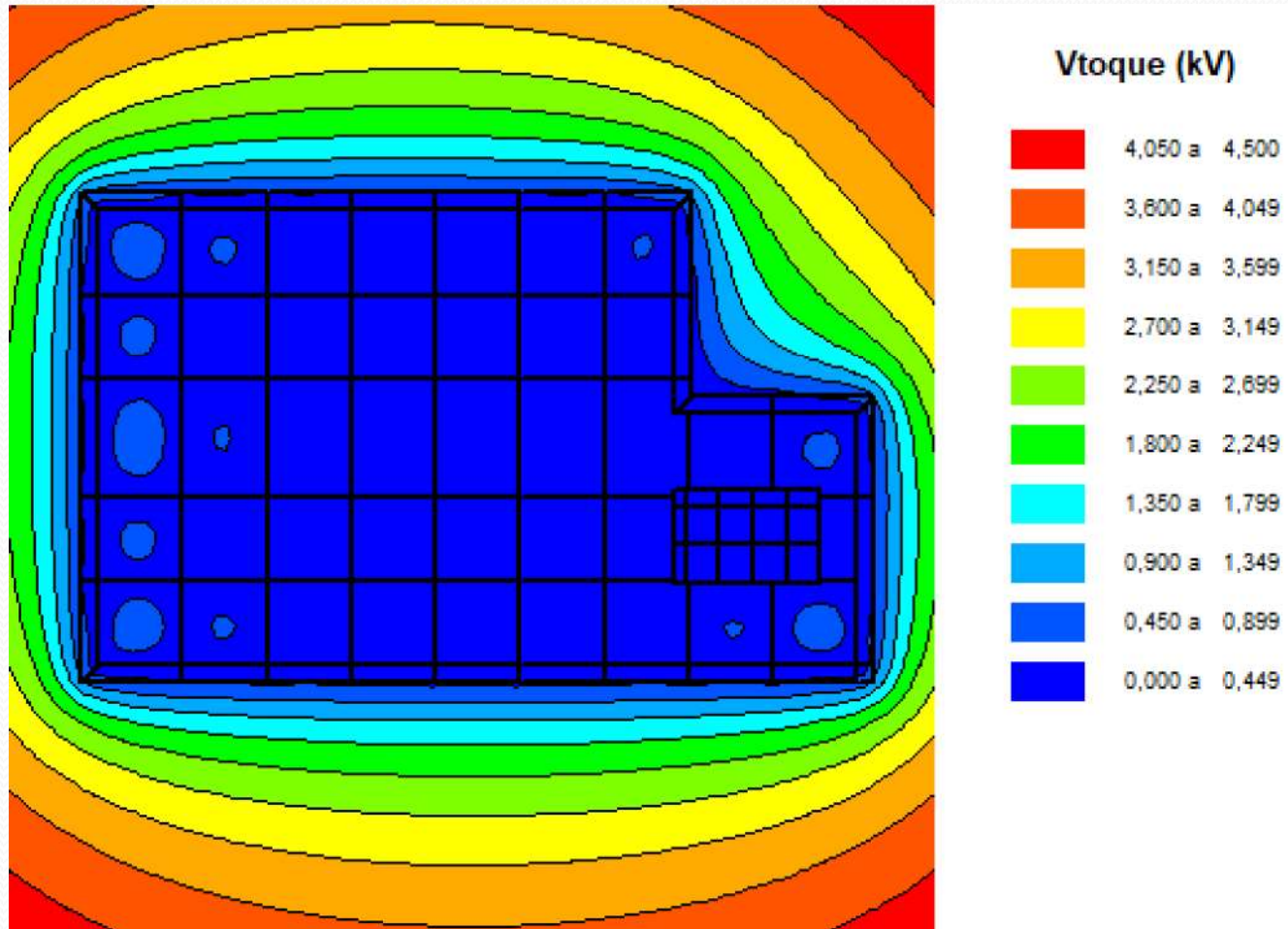


# Mapeamento de Potenciais no Solo Gerados Durante um Curto-Circuito Fase-Terra



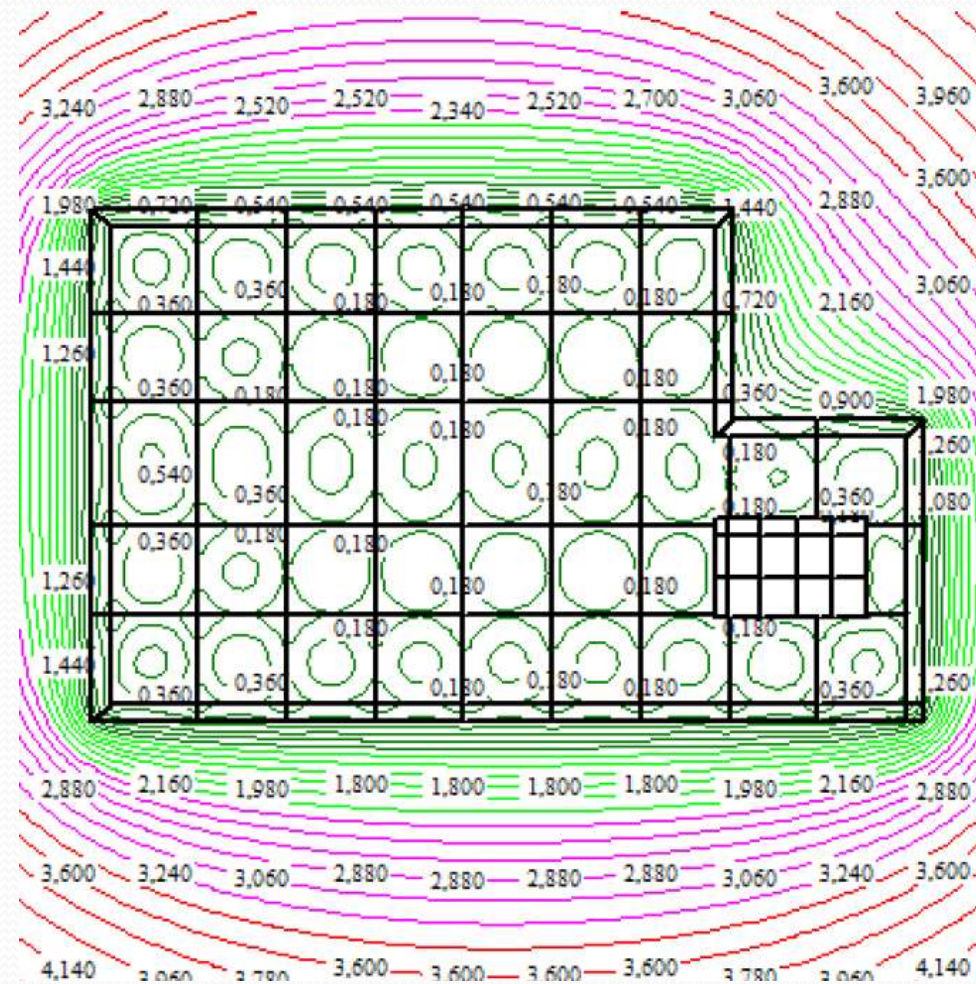


# Mapeamento de Curvas Isovalores de $V_{\text{toque}}$ Durante um Curto-Circuito Fase-Terra



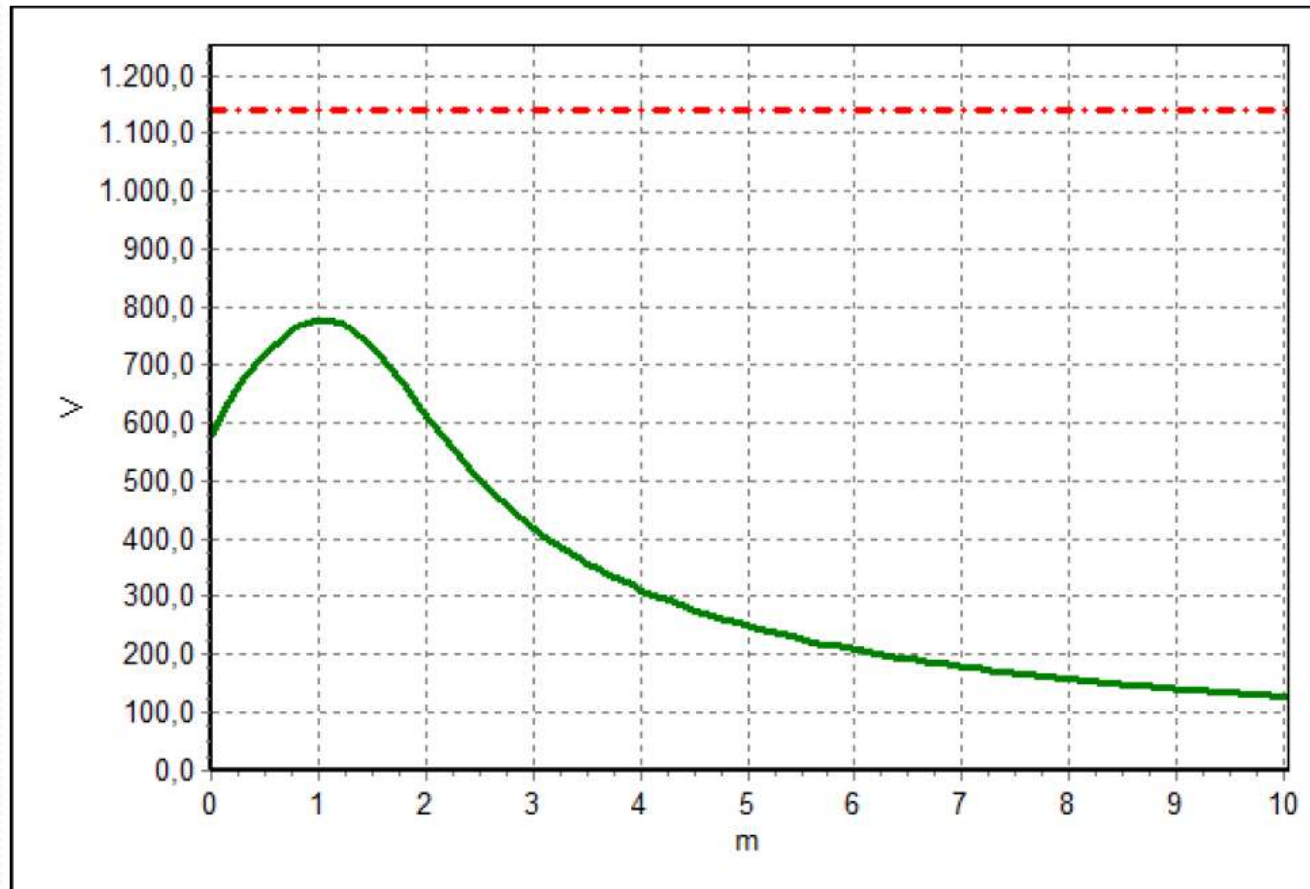


# Mapeamento de Curvas Isovalores de $V_{toque}$ Durante um Curto-Circuito Fase-Terra





## Gráfico de $V_{\text{passo}}$ em Quina da Malha



# Aquecimento de suporte de bucha de passagem





# Aquecimento de suporte de bucha de passagem



# Aquecimento de suporte de bucha de passagem





# Aquecimento de suporte de bucha de passagem

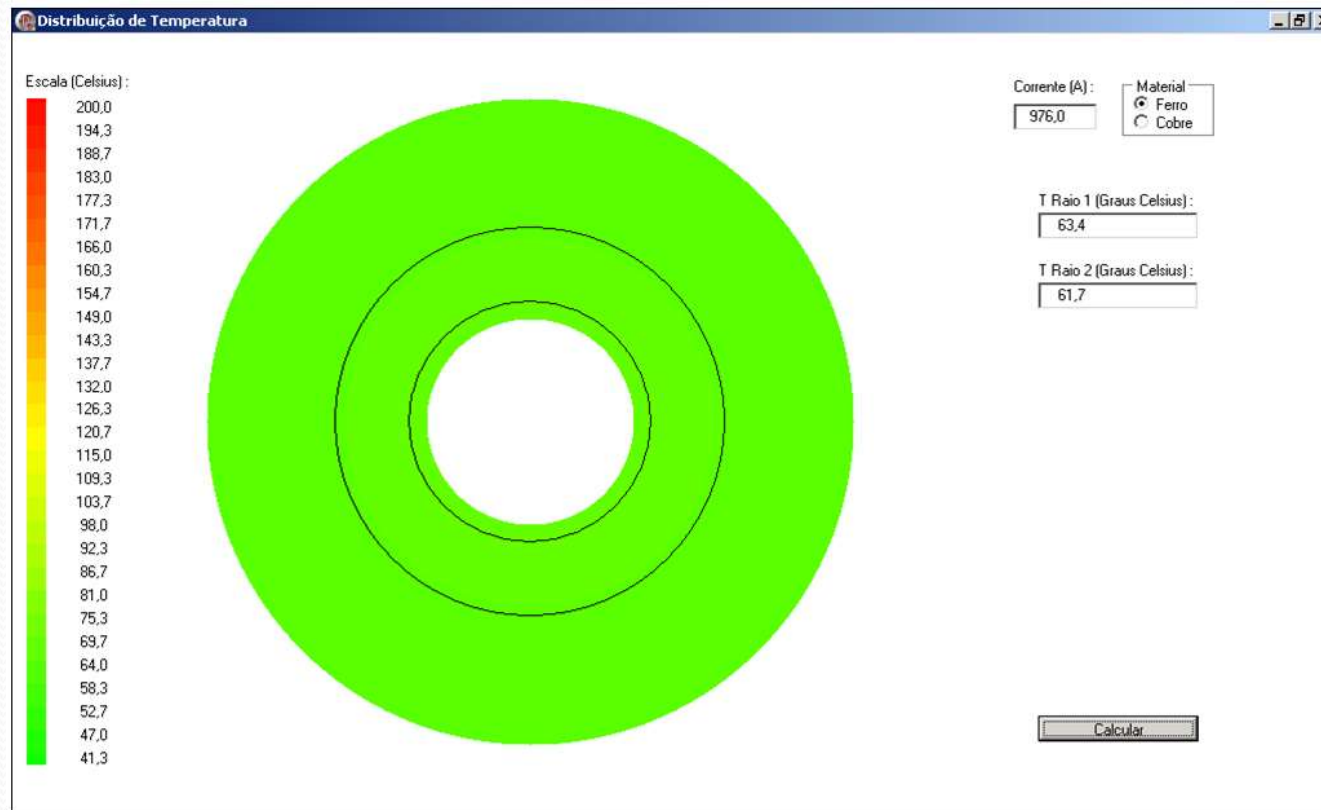


Figura 7 : Distribuição de temperatura ao longo da chapa de **ferro** para corrente de **976 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas (Ver Figura 5).

# Aquecimento de suporte de bucha de passagem

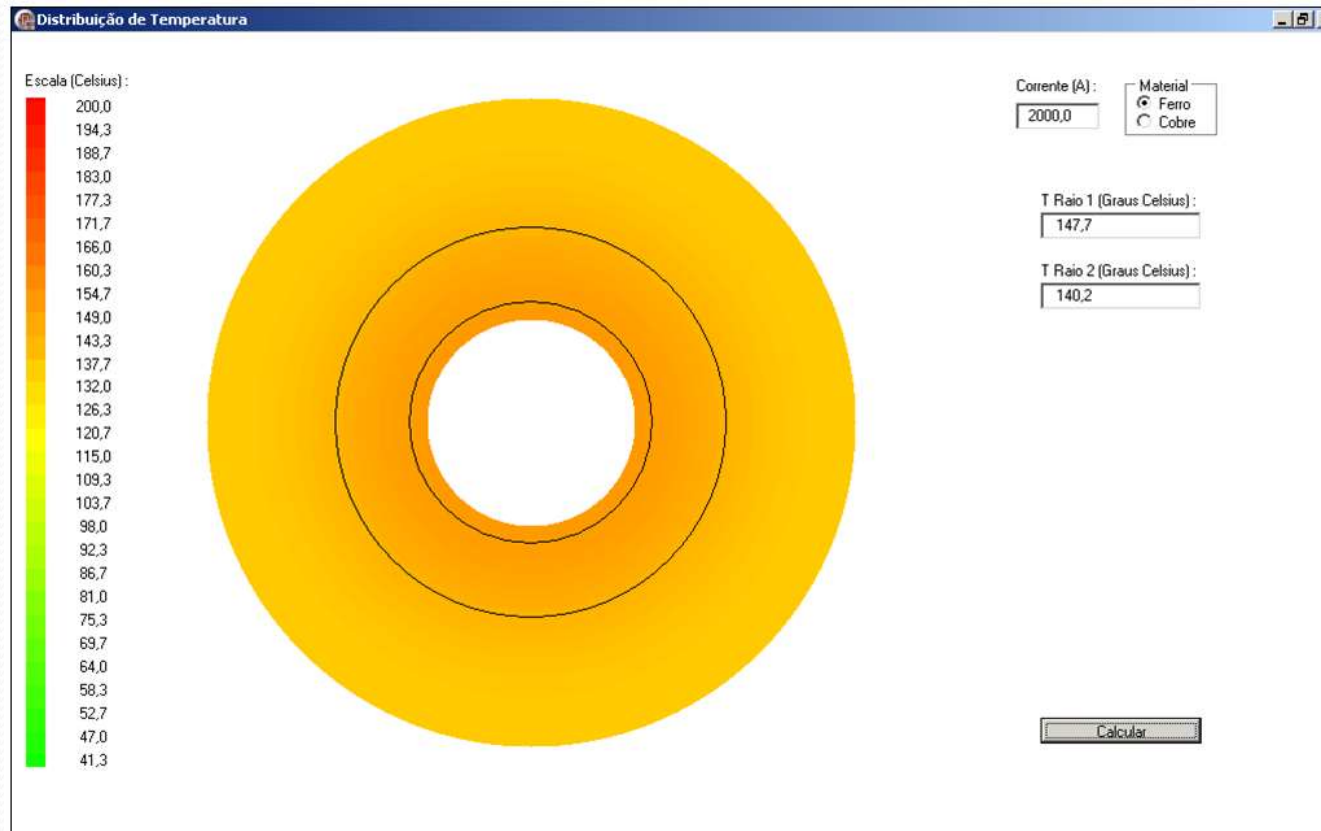


Figura 9 : Distribuição de temperatura ao longo da chapa de **ferro** para corrente de **2000 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas.



# Aquecimento de suporte de bucha de passagem

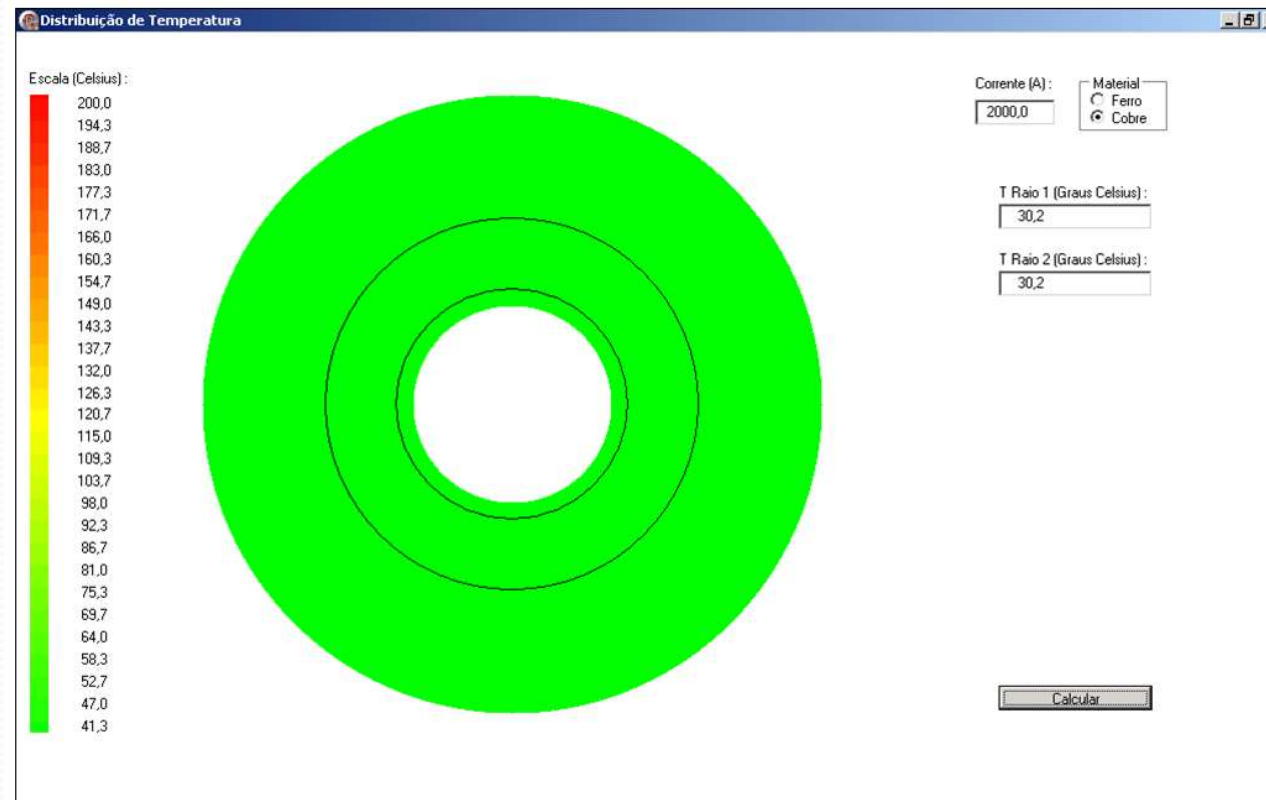


Figura 10 : Distribuição de temperatura ao longo de uma chapa de **cobre** para corrente de **2000 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas. *Ver discussão no texto a respeito da substituição da chapa de ferro por cobre.*

# Aquecimento de suporte de bucha de passagem

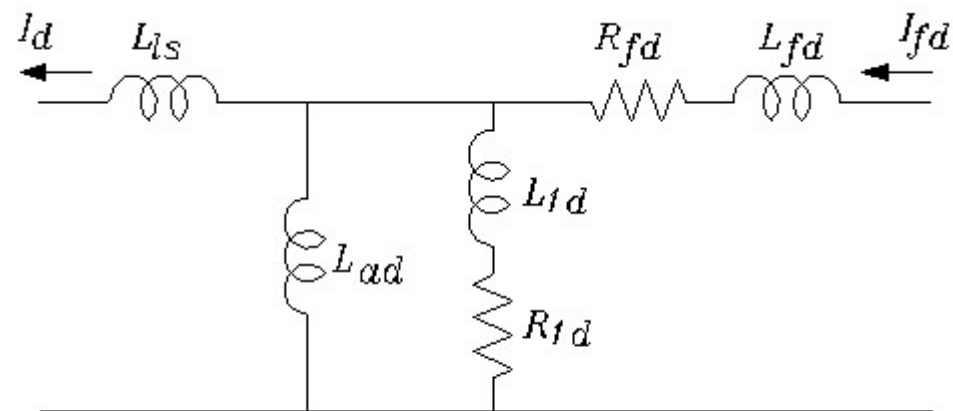
- Análises realizadas:
  - Campo magnético gerado
  - Correntes induzidas
  - Perdas por indução
  - Elevação de temperatura
  - Esforços mecânicos quando de curtos-circuitos
- Solução:
  - Instalação de placa de fibra de vidro próximo das buchas



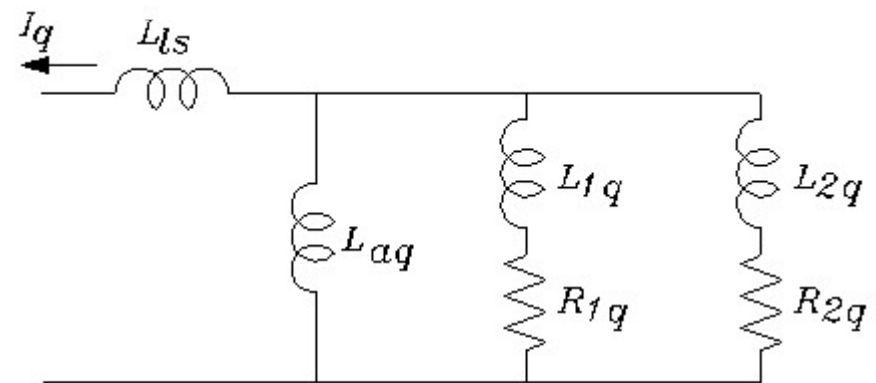


# **ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA DE HIDROGERADORES APLICAÇÃO AO GERADOR DA USINA DE EMBORCAÇÃO**

- Projeto MF Consultoria e CEMIG



a) Eixo Direto



b) Eixo de Quadratura

Circuito equivalente do ATP

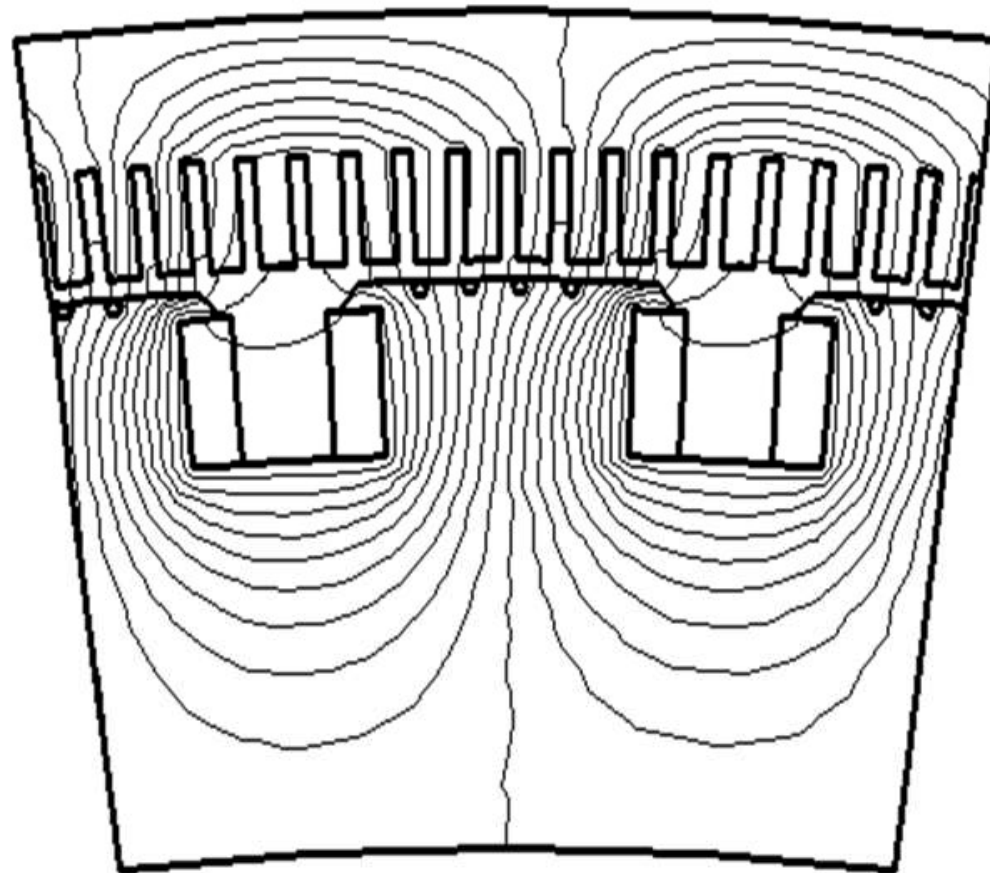


$$L_{ddo}(s) \triangleq \left[ \begin{array}{c} \Delta\psi_d(s) \\ -\Delta I_d(s) \end{array} \right]_{I_{fd}=0}$$

$$L_{fd}(s) \triangleq \left[ \begin{array}{c} \Delta\psi_{fd}(s) \\ \Delta I_d(s) \end{array} \right]_{I_{fd}=0}$$

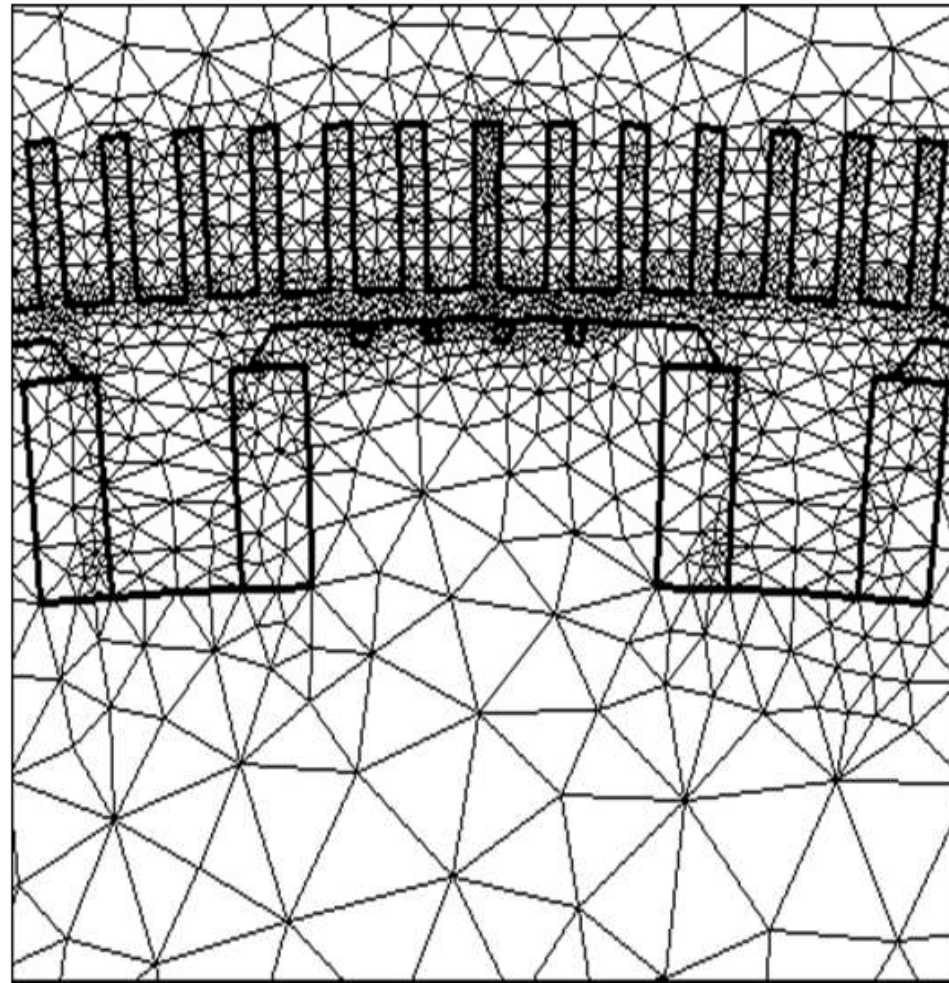
$$L_{ffo}(s) \triangleq \left[ \begin{array}{c} \Delta\psi_{fd}(s) \\ -\Delta I_{fd}(s) \end{array} \right]_{I_d=I_q=0}$$

$$L_{qq}(s) \triangleq \left[ \begin{array}{c} \Delta\psi_q(s) \\ -\Delta I_q(s) \end{array} \right]$$



Mapeamento de equipotenciais para o gerador de Emborcação operando nas condições nominais





Malha de elementos triangulares utilizada nos cálculos através do MEF (região próxima dos polos)



Muito Obrigado!