

Eletromagnetismo Aplicado aos Sistemas Elétricos de Potência

Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro

NSA Consultoria e Informática Ltda.
Prof. licenciado da PUCMinas



Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro

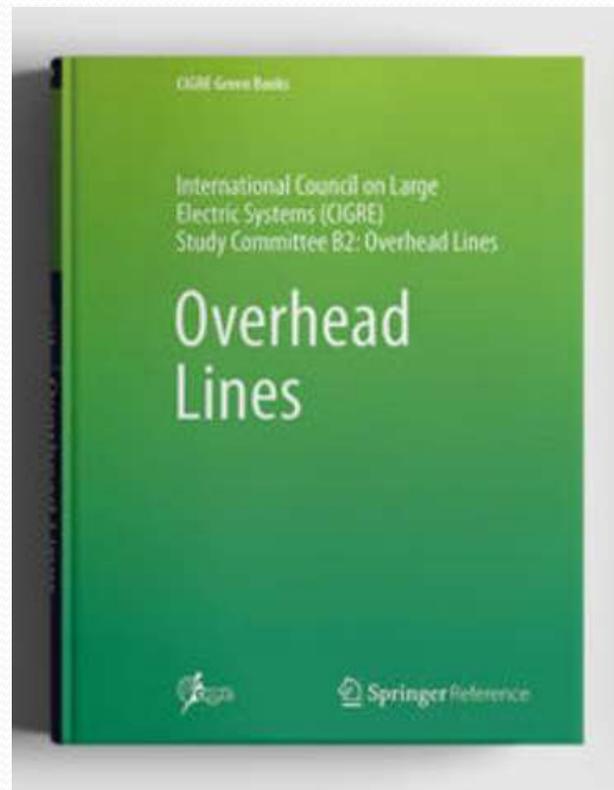
- Graduado em Eng. Elétrica/UFMG em 1984
- Mestrado em Eng. Elétrica/UFMG - 1987
- Professor licenciado da PUC Minas
- Atua principalmente nas seguintes áreas :
 - Eletromagnetismo aplicado
 - Interferências eletromagnéticas de LTs
 - Análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência



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

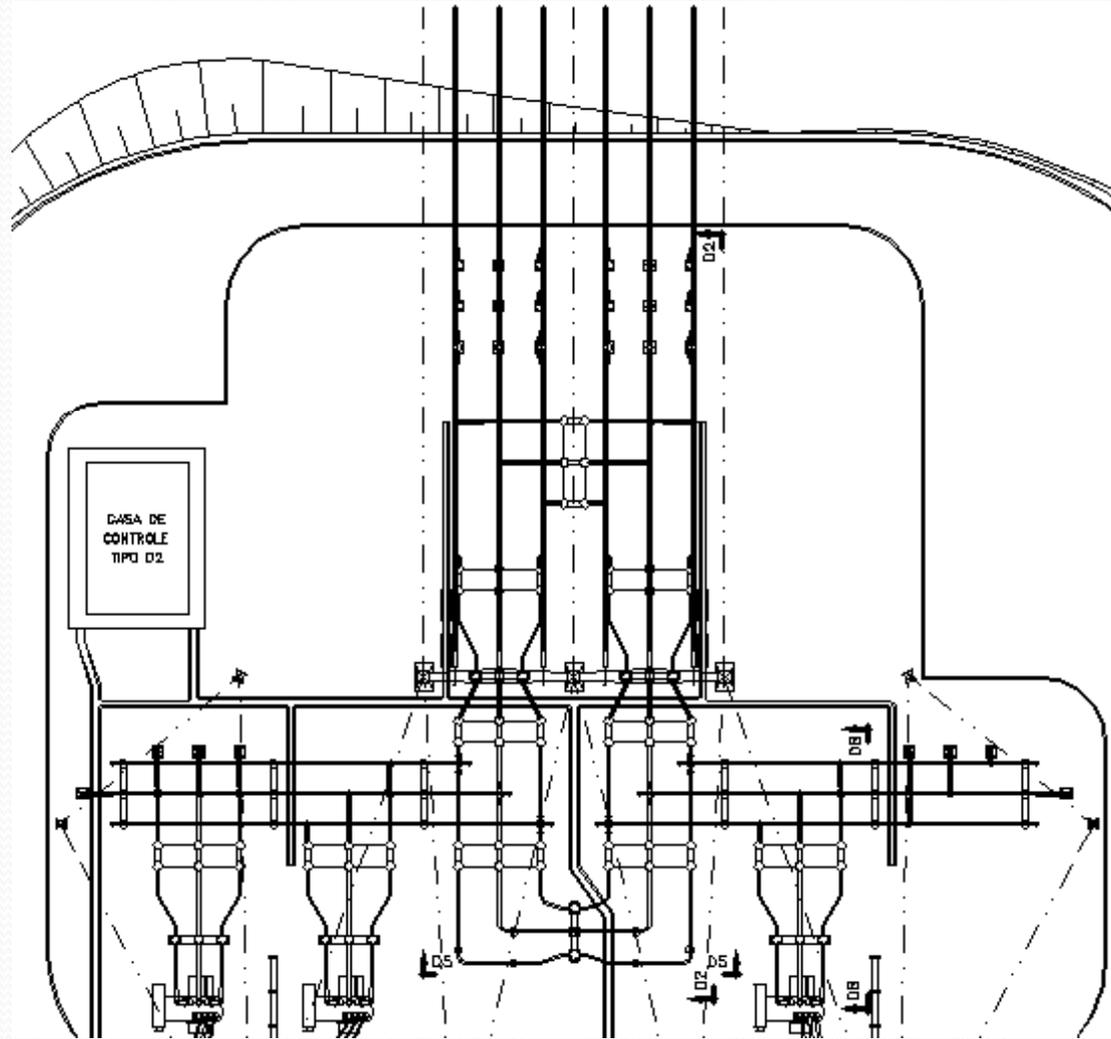


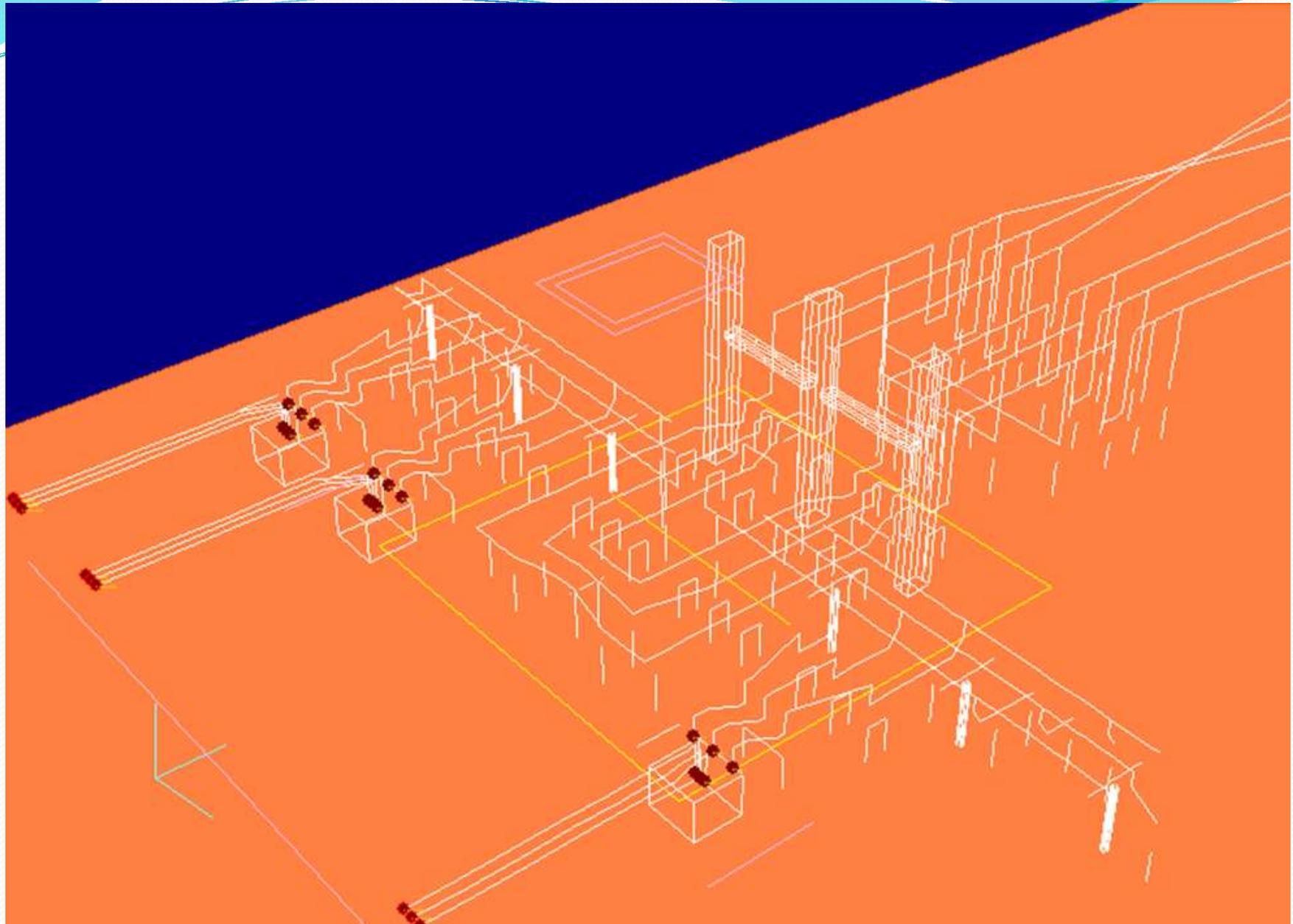
SE Betim 5

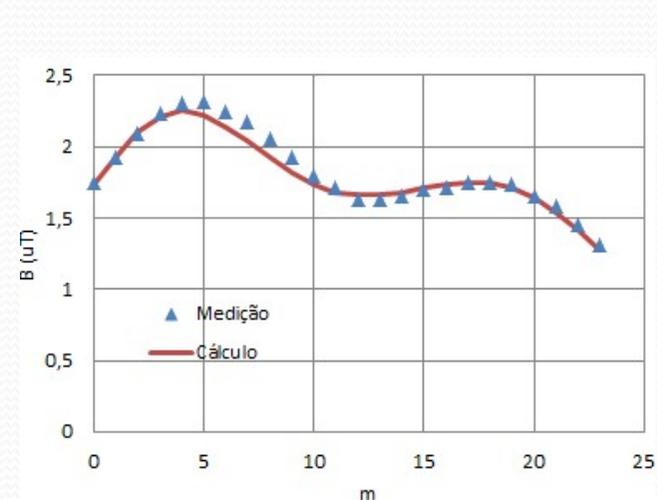
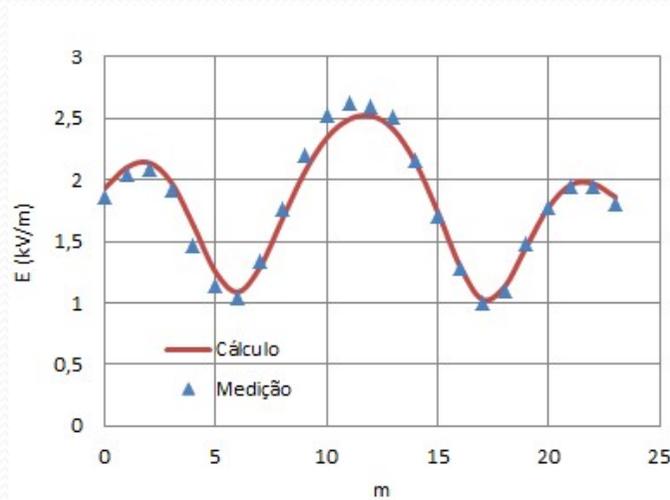
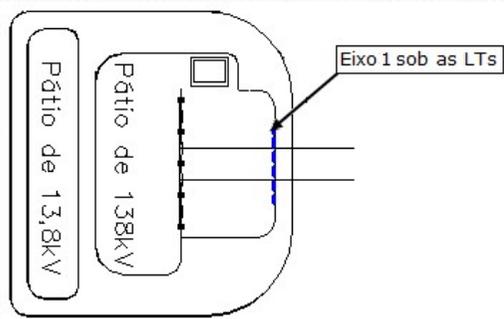


SE Betim 5

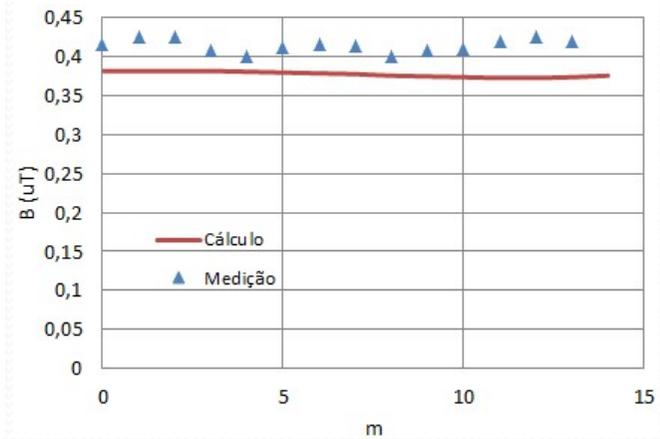
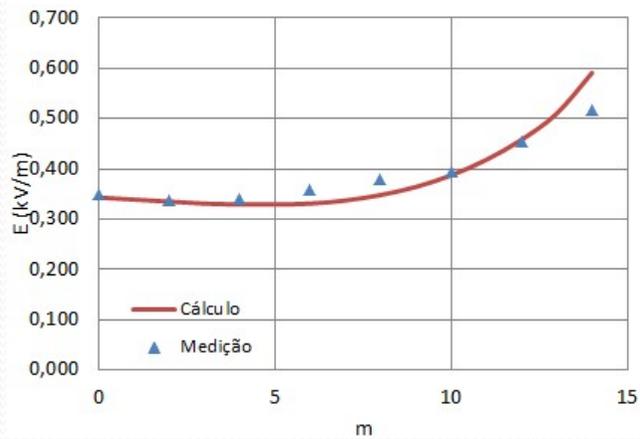
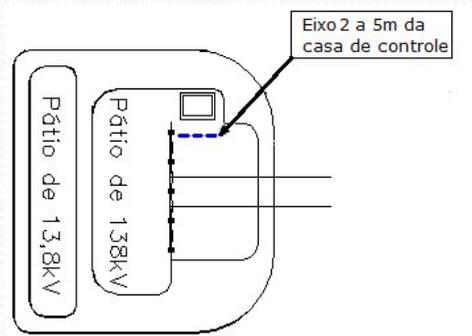




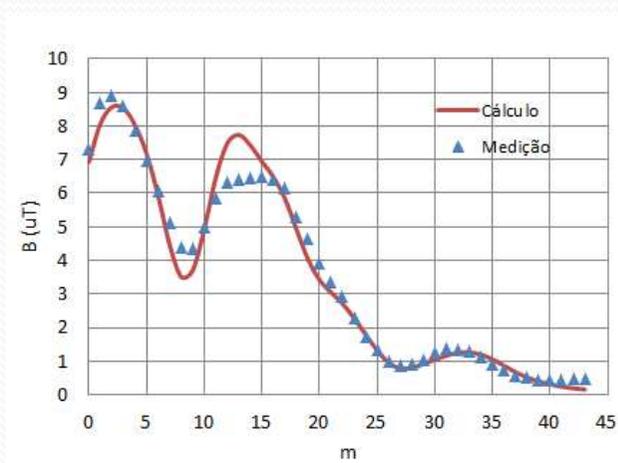
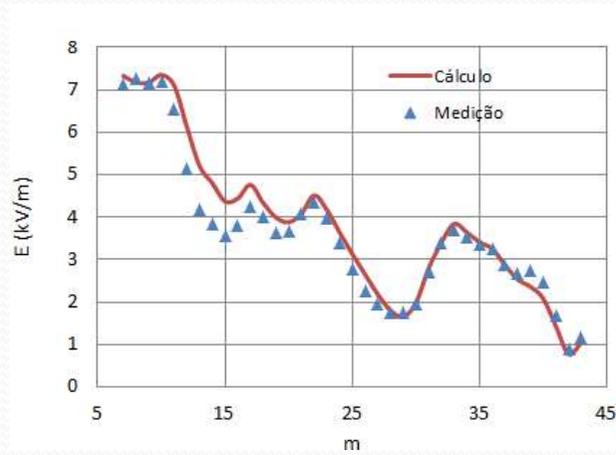
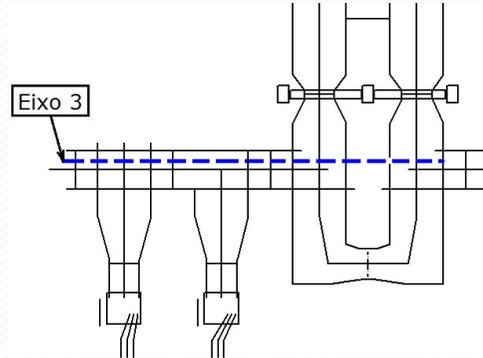




Valor eficaz dos campos elétrico e magnético ao longo do Eixo 1

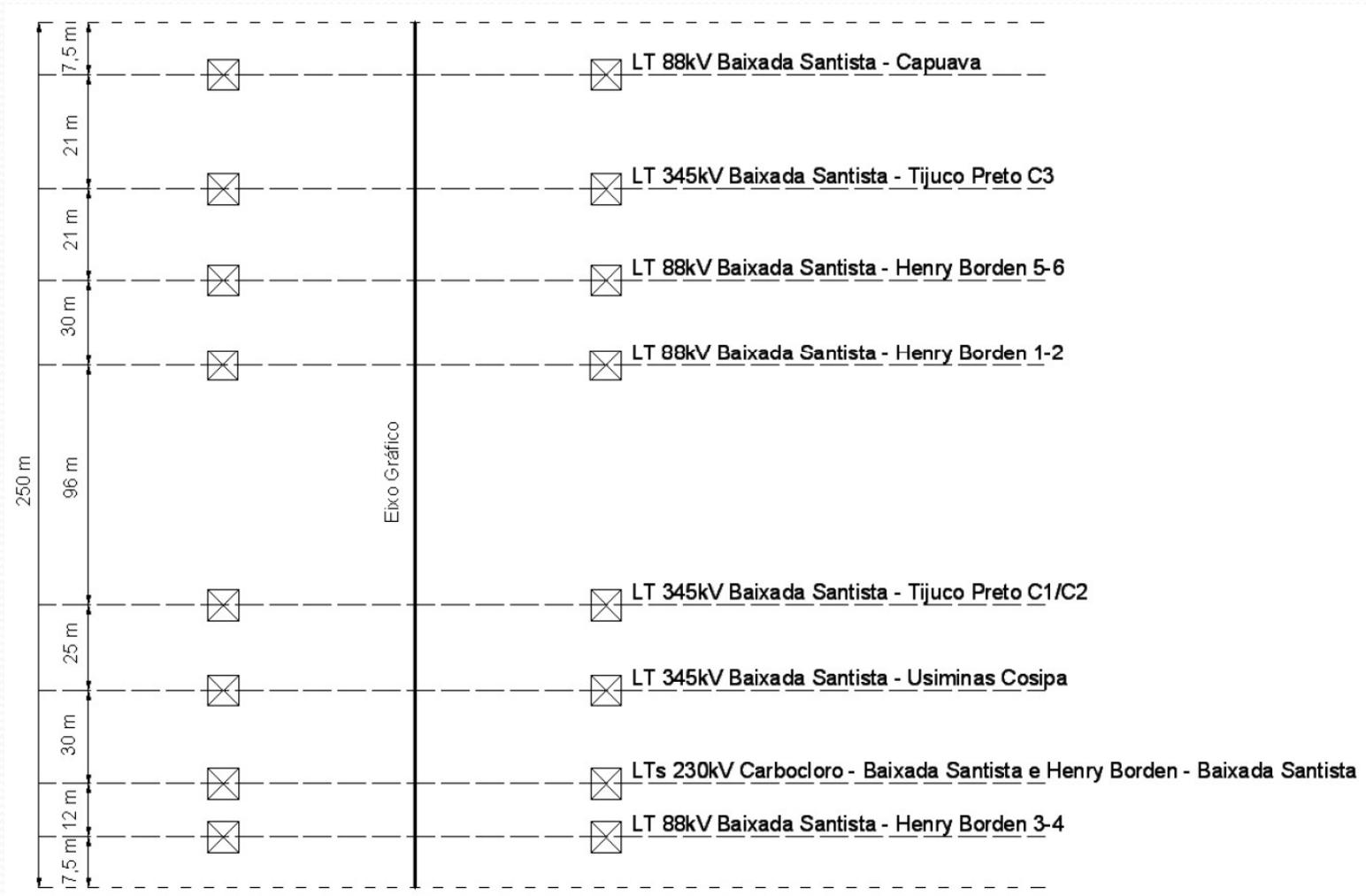


Valor eficaz dos campos elétrico e magnético ao longo do Eixo 2



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

Faixa de Passagem de 8 LTs



Faixa de Passagem de 8 LTs

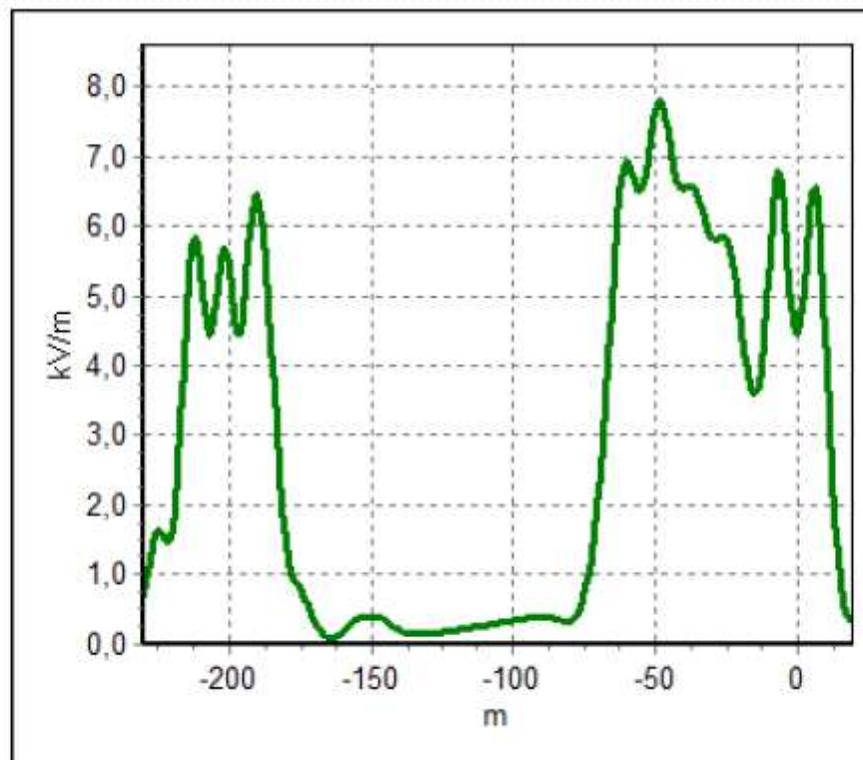


Figura 2.4-2 – Eixo 1 – Eixo de um limite ao outro da faixa de segurança. PO/PG. Campo elétrico, valor eficaz. (Condição de Operação Normal)

Faixa de Passagem de 8 LTs

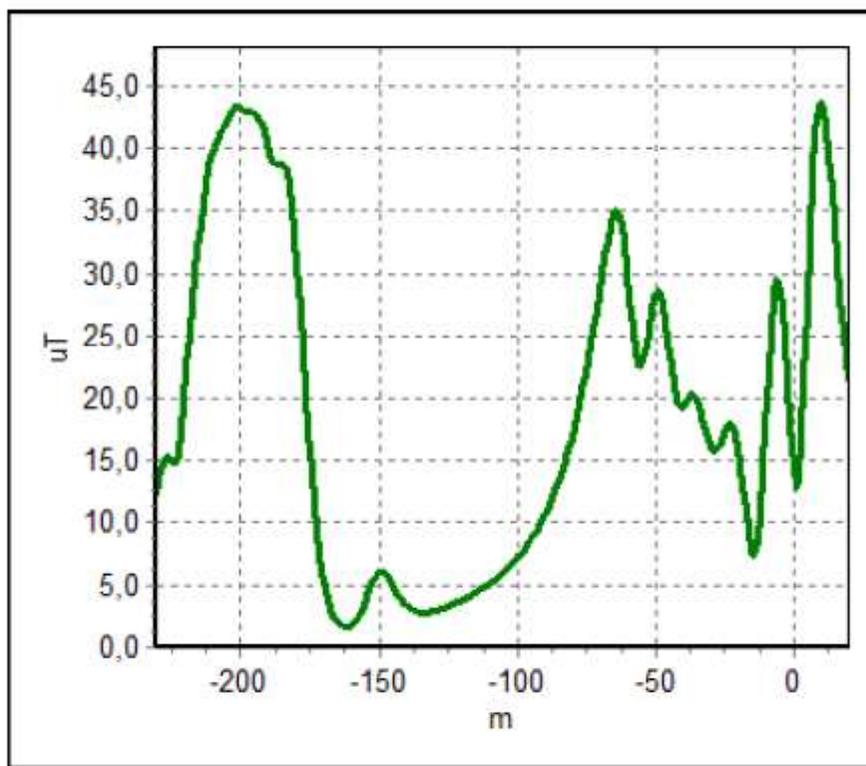
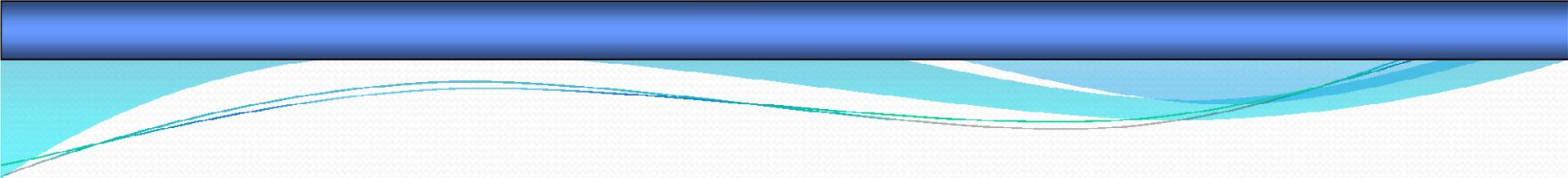


Figura 2.4-4 – Eixo 1 – Eixo de um limite ao outro da faixa de segurança. PO/PG. Campo magnético B (densidade de fluxo magnético, para ser mais preciso). (Condição de Operação Normal)



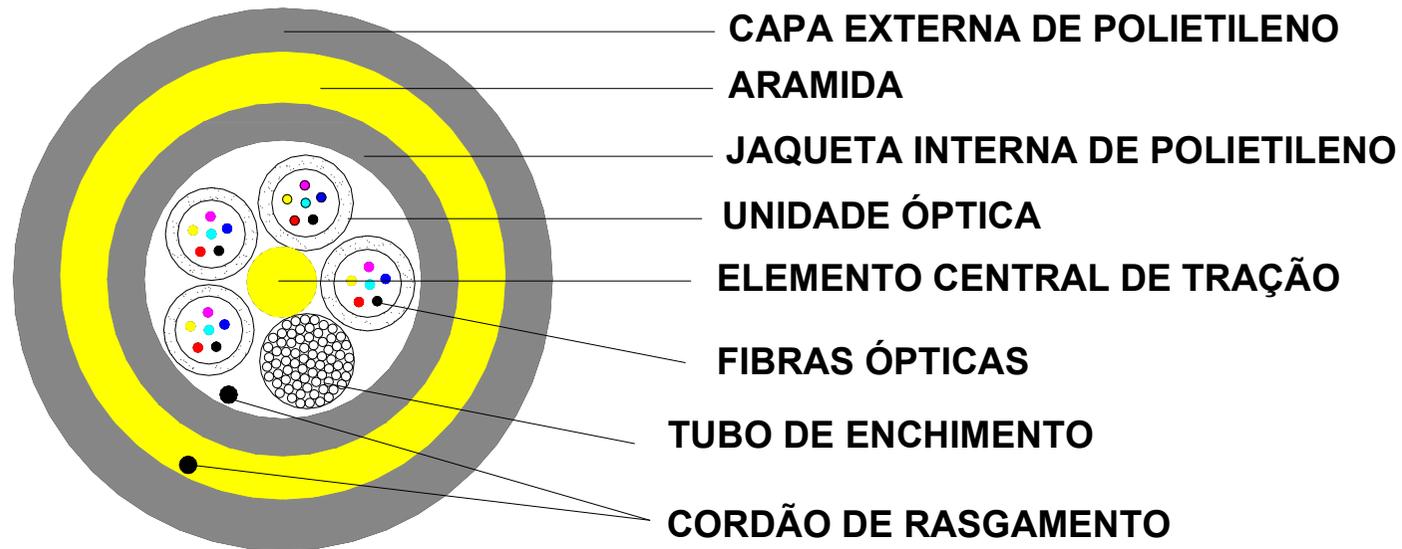
**Cabo Óptico Auto - Sustentado (ADSS)
Utilizado em LT de Extra Alta Tensão
Experiência de FURNAS**

- 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)



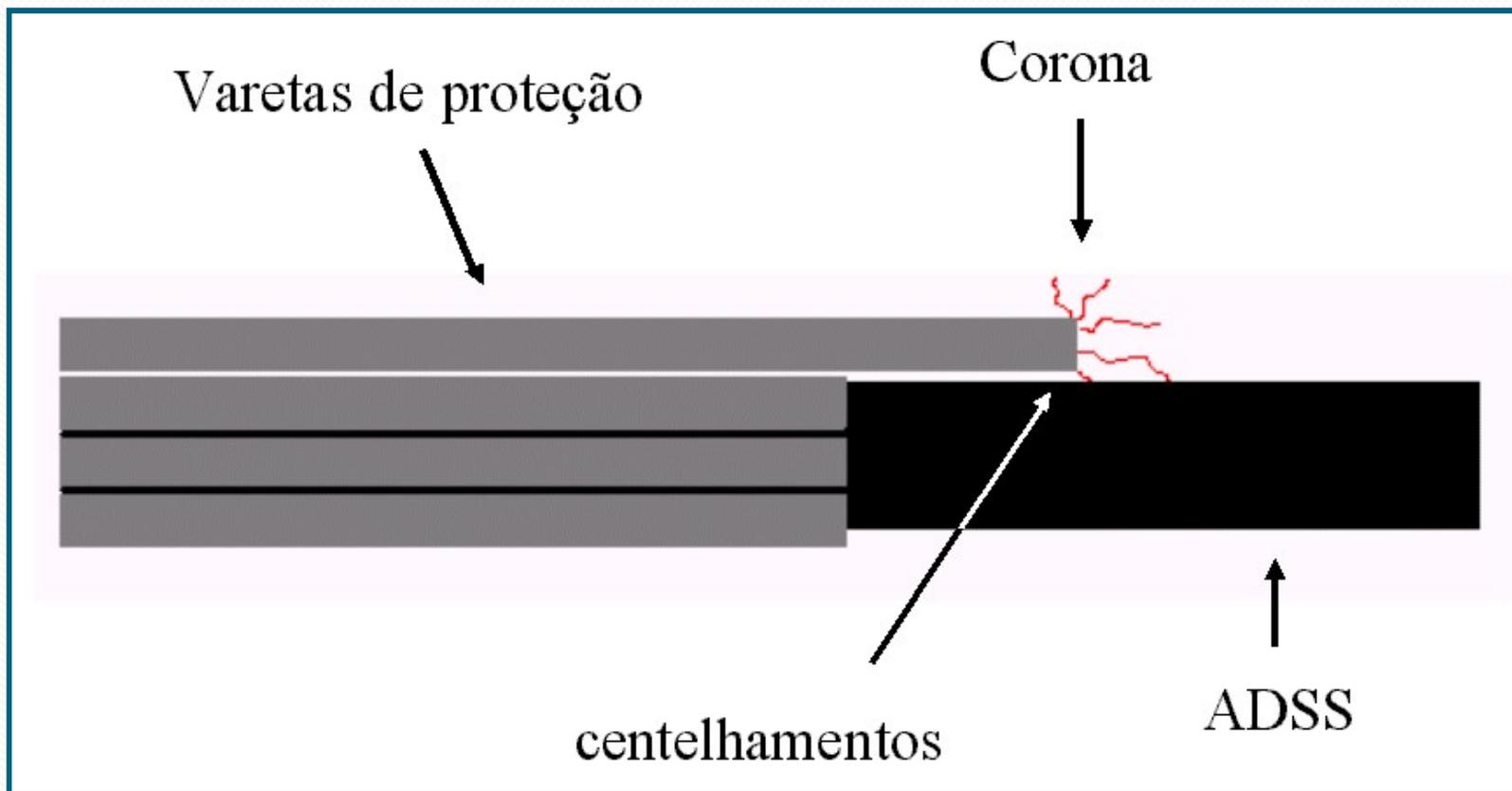
CORONA COIL



Corona Coil



CORONA E MICROCENTELHAMENTOS

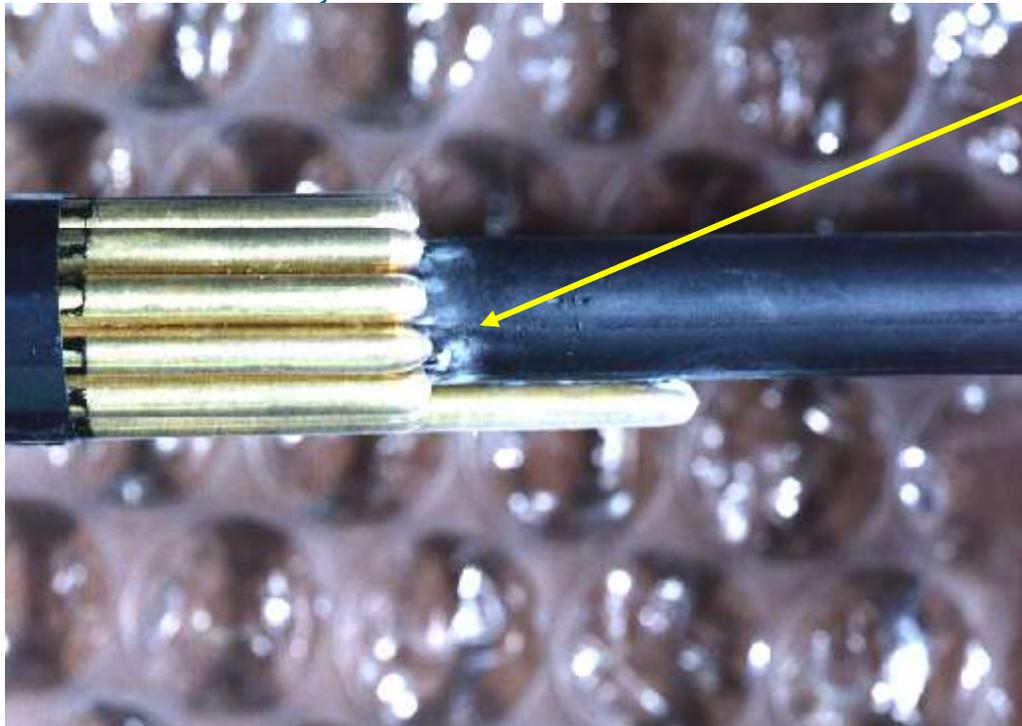


CAMPO ELÉTRICO $>20\text{kV/cm}$

CORONA

- O que ocorre se o corona está presente nas pontas das armaduras?
- Erosão da capa externa do cabo, permitindo a penetração de H₂O.
- Possíveis falhas em menos de dois anos(BPA).

Arizona State University



Danificação
por
corona
na capa
do cabo

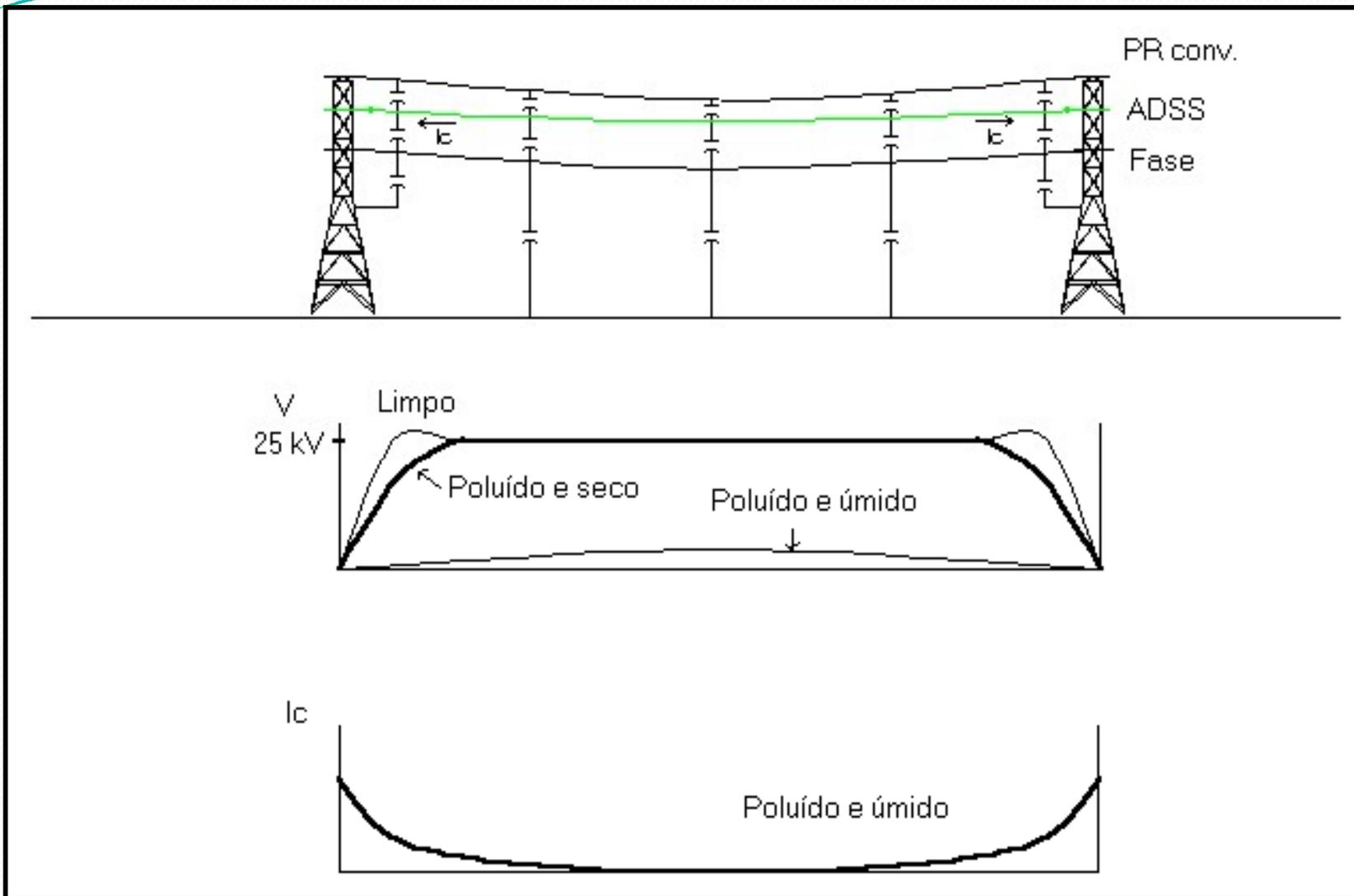
Fonte : BPA/Eletronet

DANIFICAÇÃO DEVIDO AO CENTELHAMENTO EM BANDA SECA

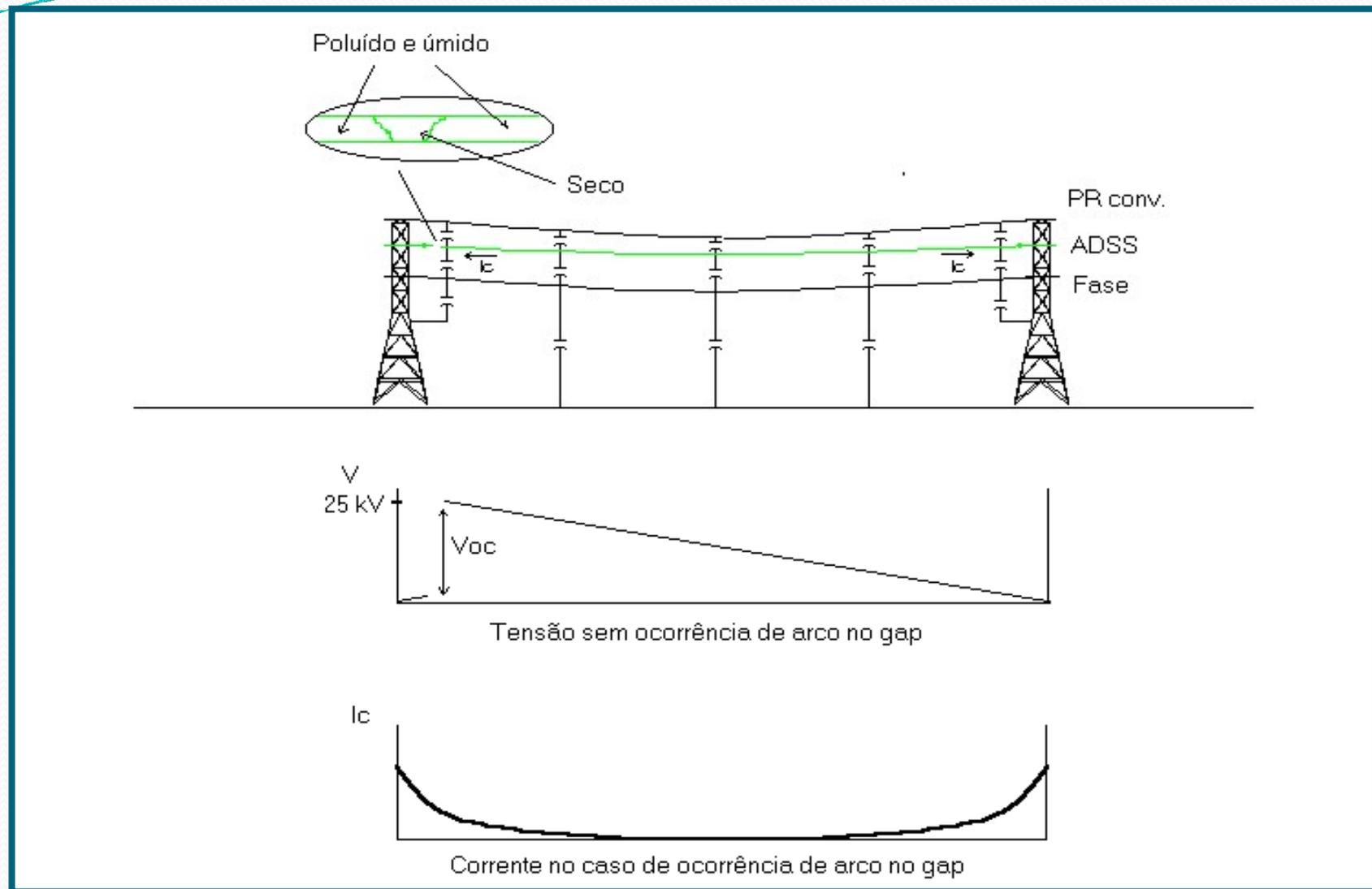


Fonte : BPA/Eletronet

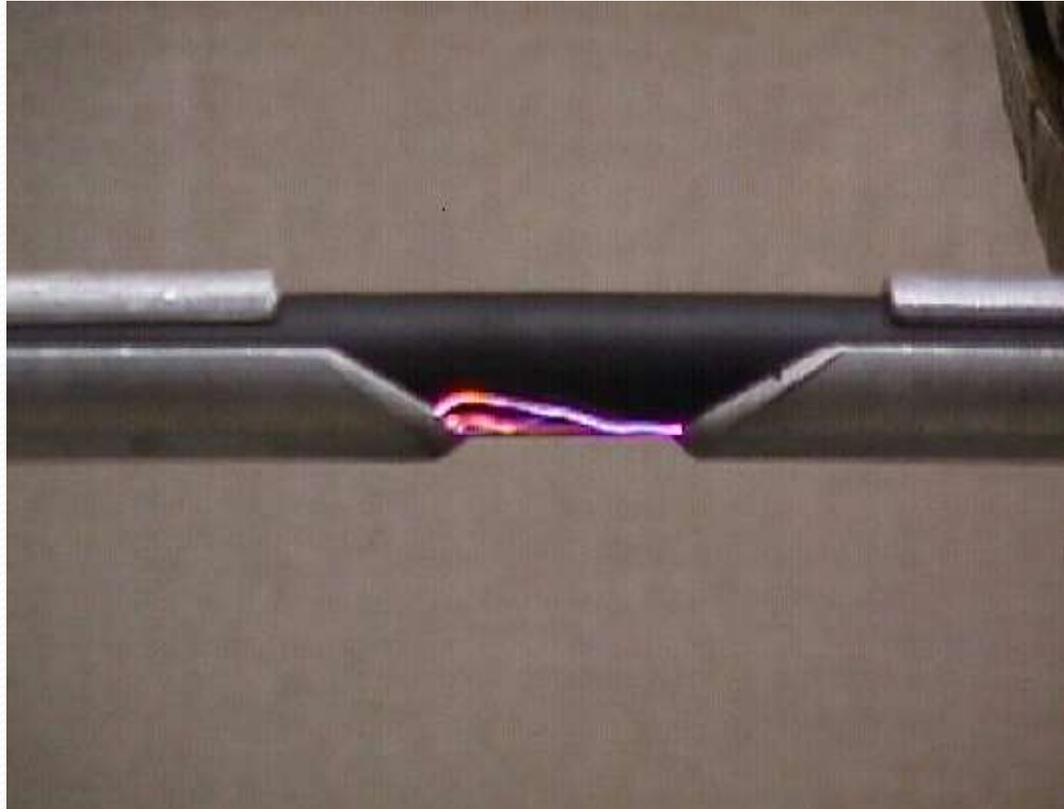
TENSÃO E CORRENTE AO LONGO DO CABO ADSS



FORMAÇÃO DA BANDA SECA

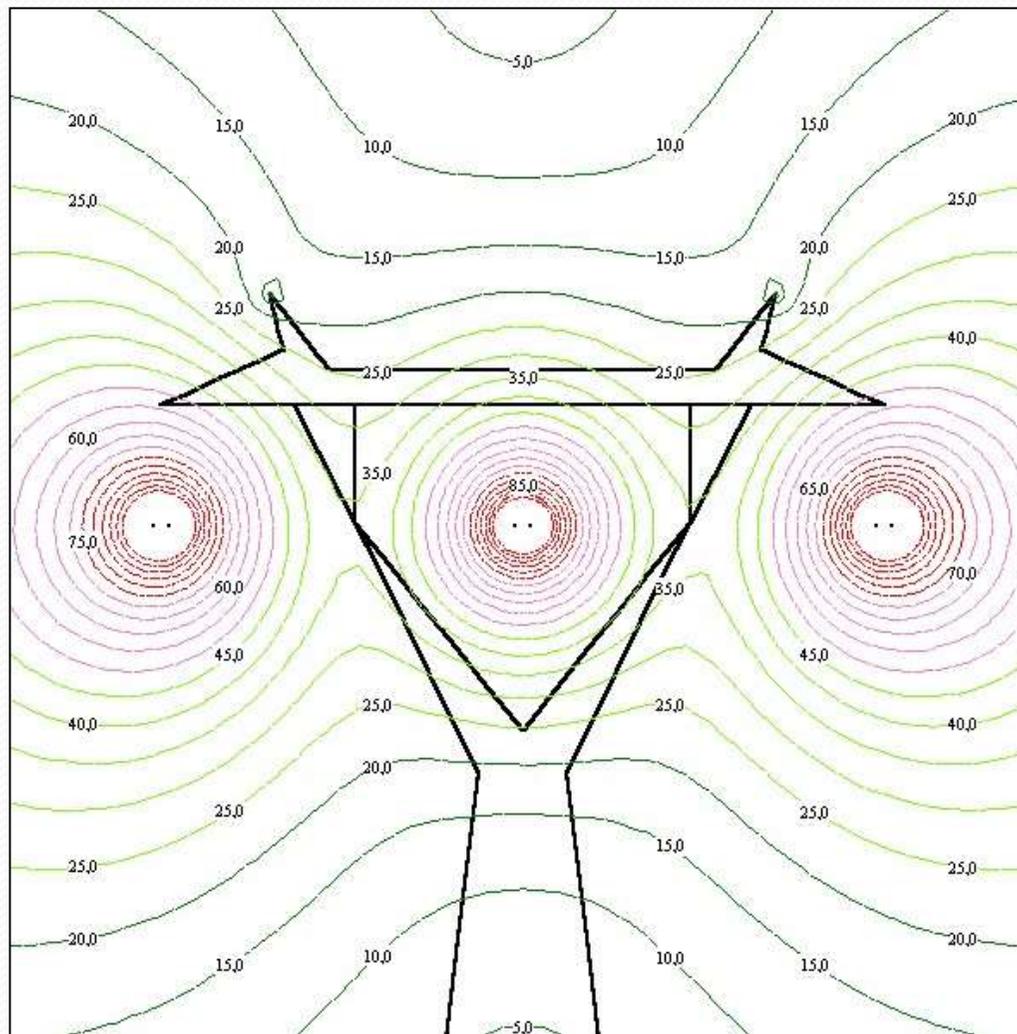


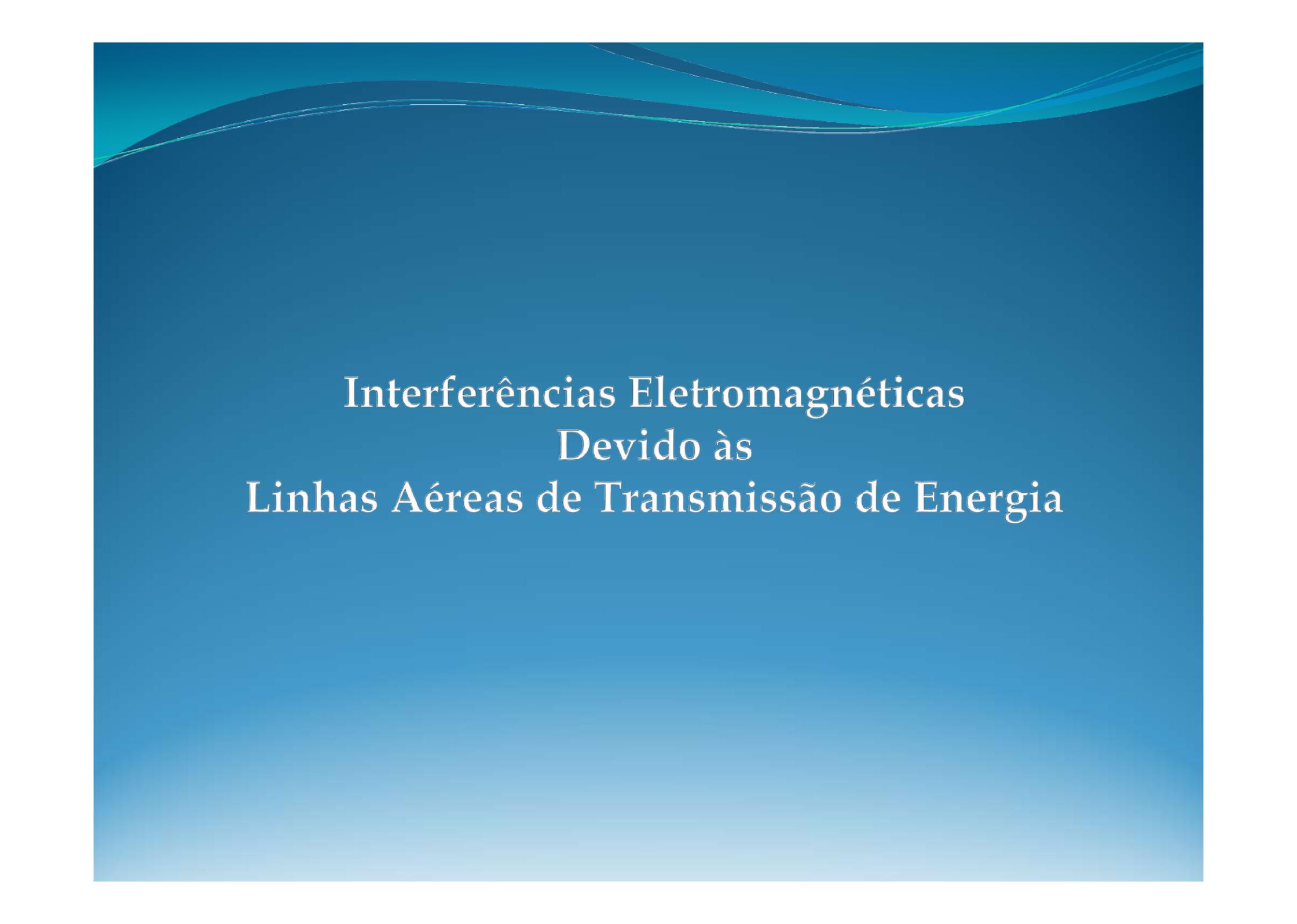
ARCO EM GAP (TESTE EM LABORATÓRIO)



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

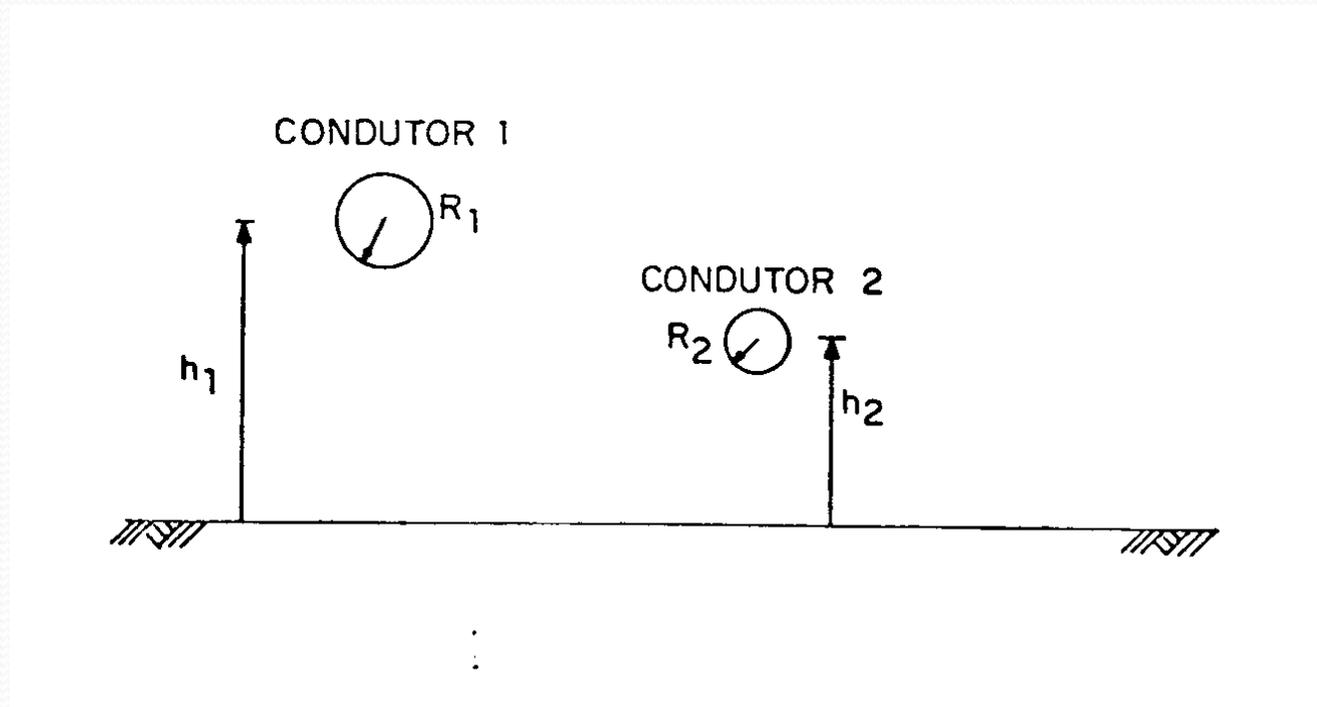
- RI – Rádio interferência
- TVI – Interferência na faixa de TV
- Ruído audível
- Radar
- Rádio - farol

Interferências em 60 Hz

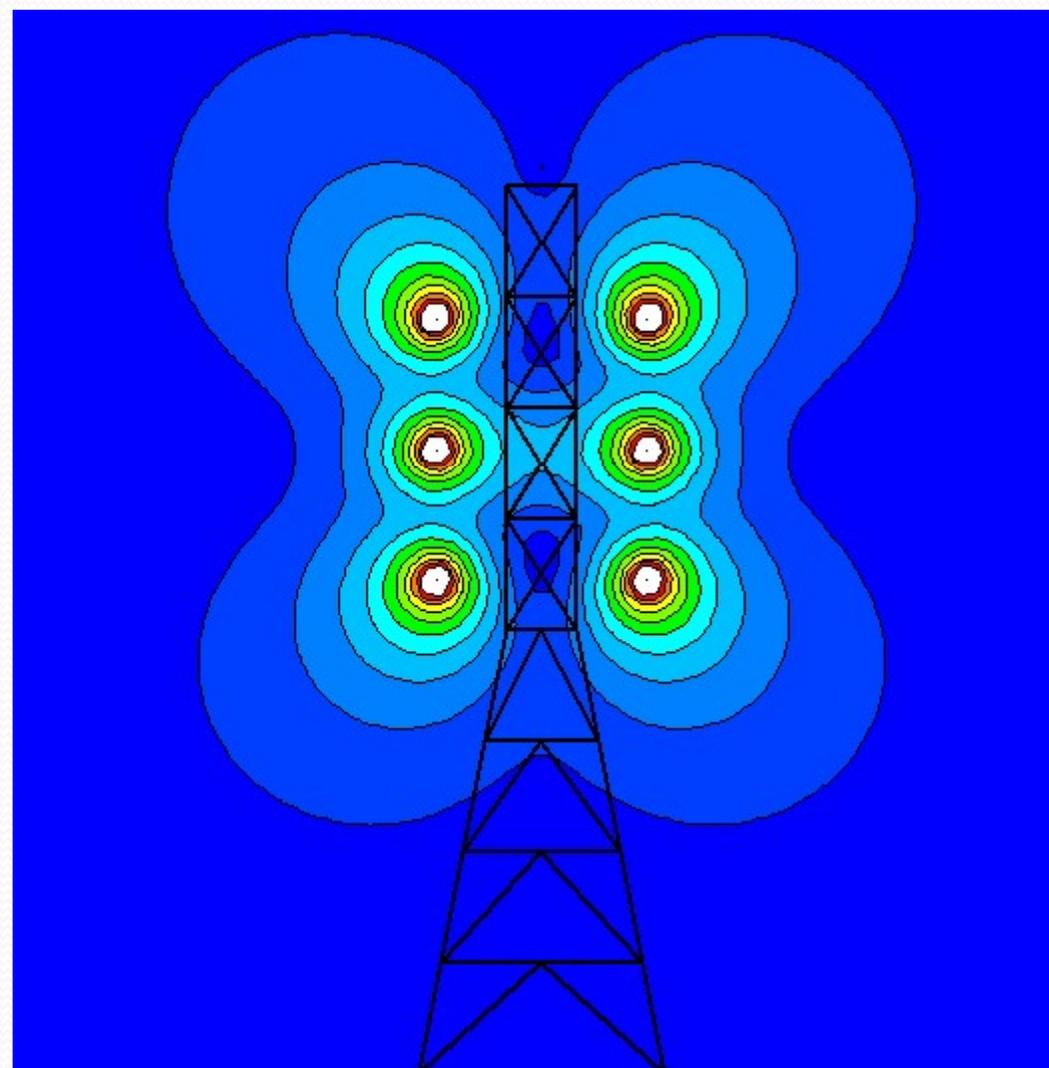
- Acoplamento magnético (indutivo) (*)
- Acoplamento resistivo (*)
- Acoplamento eletrostático (capacitivo)

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

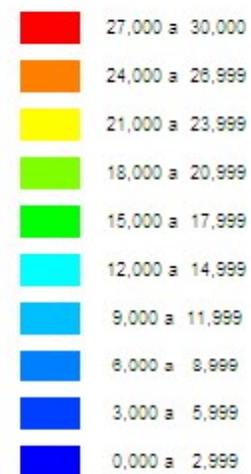
Acoplamento Capacitivo ou Eletrostático

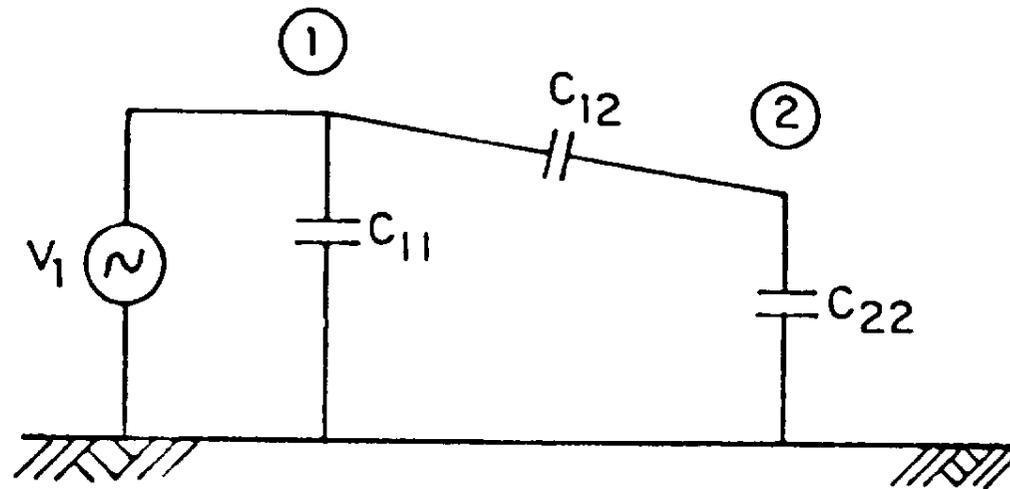


Geometria exemplo : dois condutores paralelos



Potencial (kV)



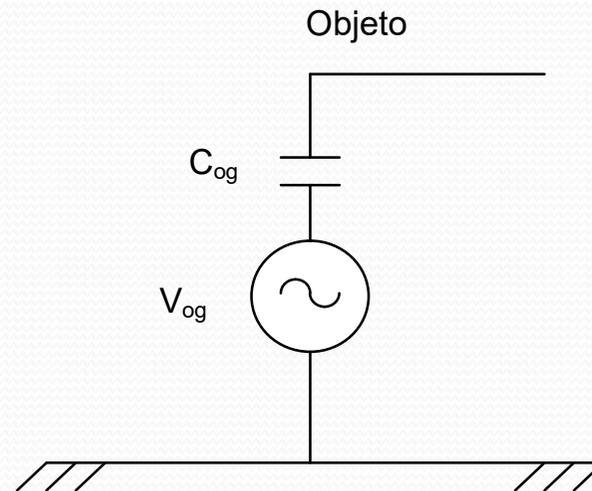


Circuito equivalente para análise eletrostática.

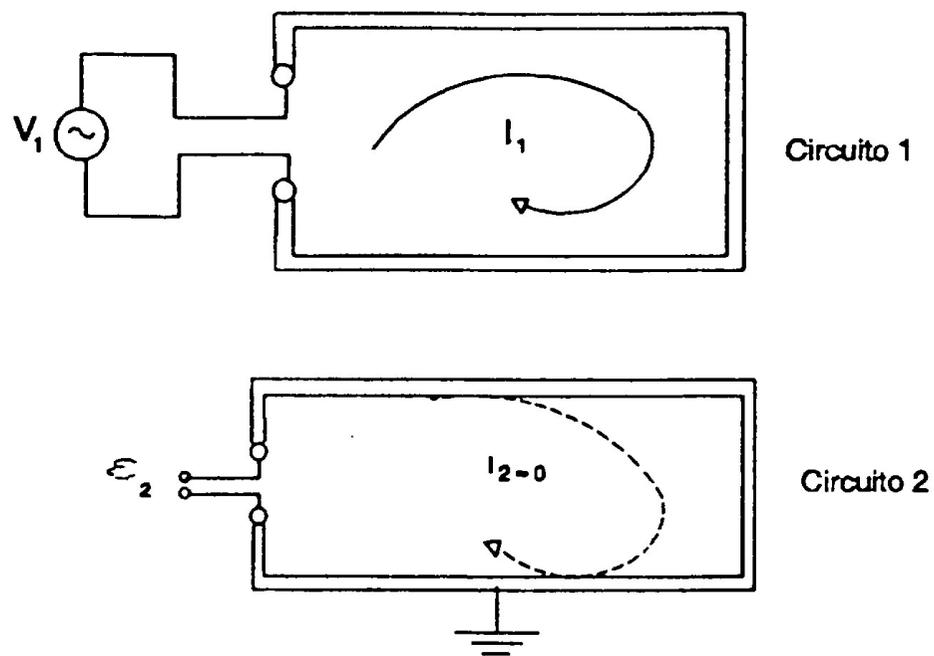
$$V_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} V_1$$

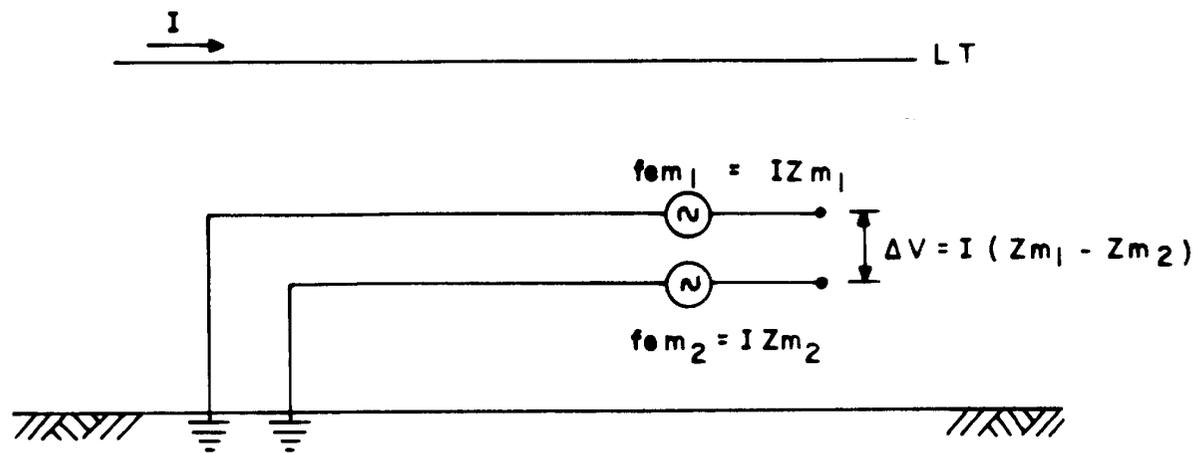
Correntes Induzidas por Acoplamento Eletrostático (Capacitivo)

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



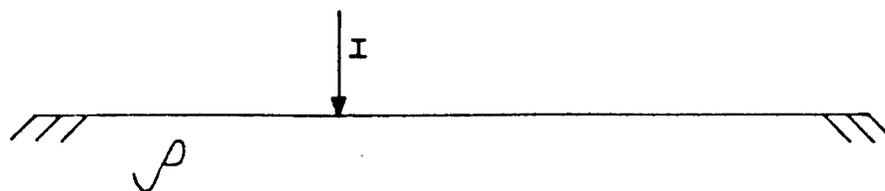
Acoplamento Magnético



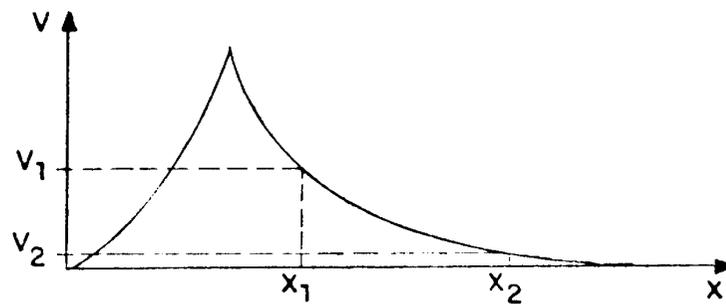


Tensão transversal induzida devido ao efeito de loop.

Acoplamento Resistivo

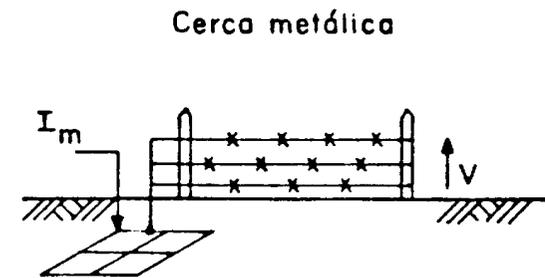
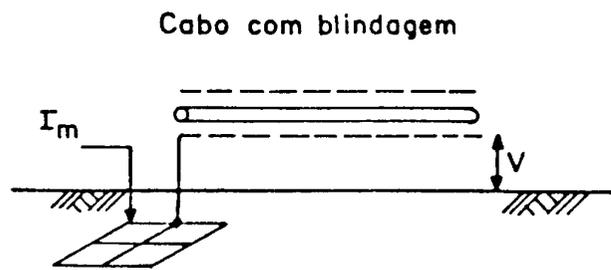


a) Injeção de corrente em um ponto do solo

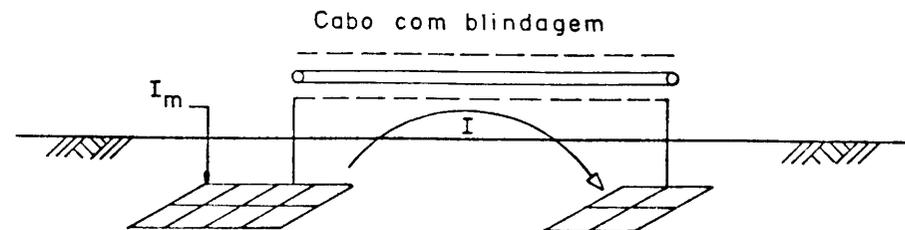


a) Potencial no solo

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

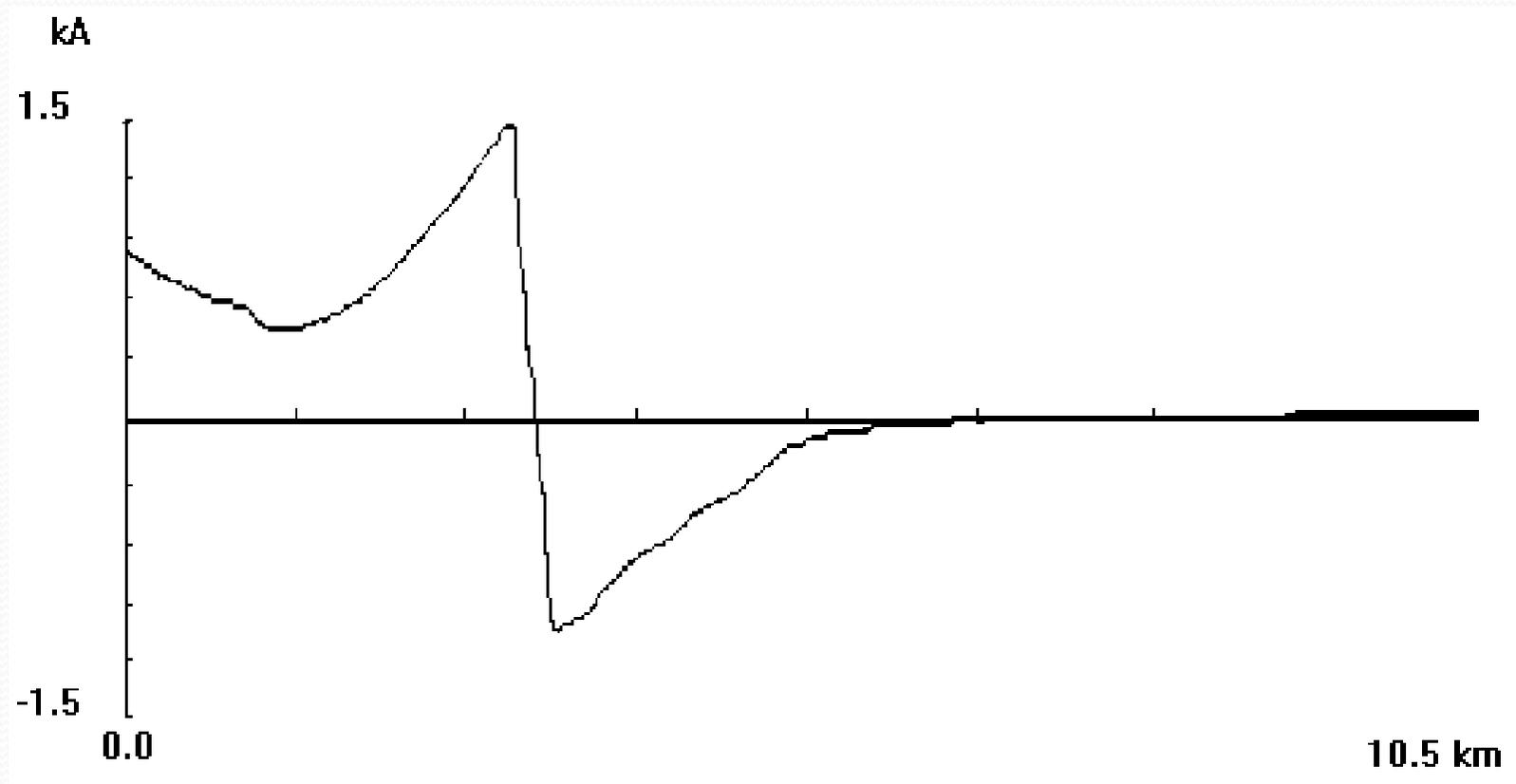
➤ Características desejáveis :

- 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 multiterrados (neutros de alimentadores, cabos para-raios, cabo mensageiro de linhas telefônicas ou dutos representados por circuitos π 's conectados em série)

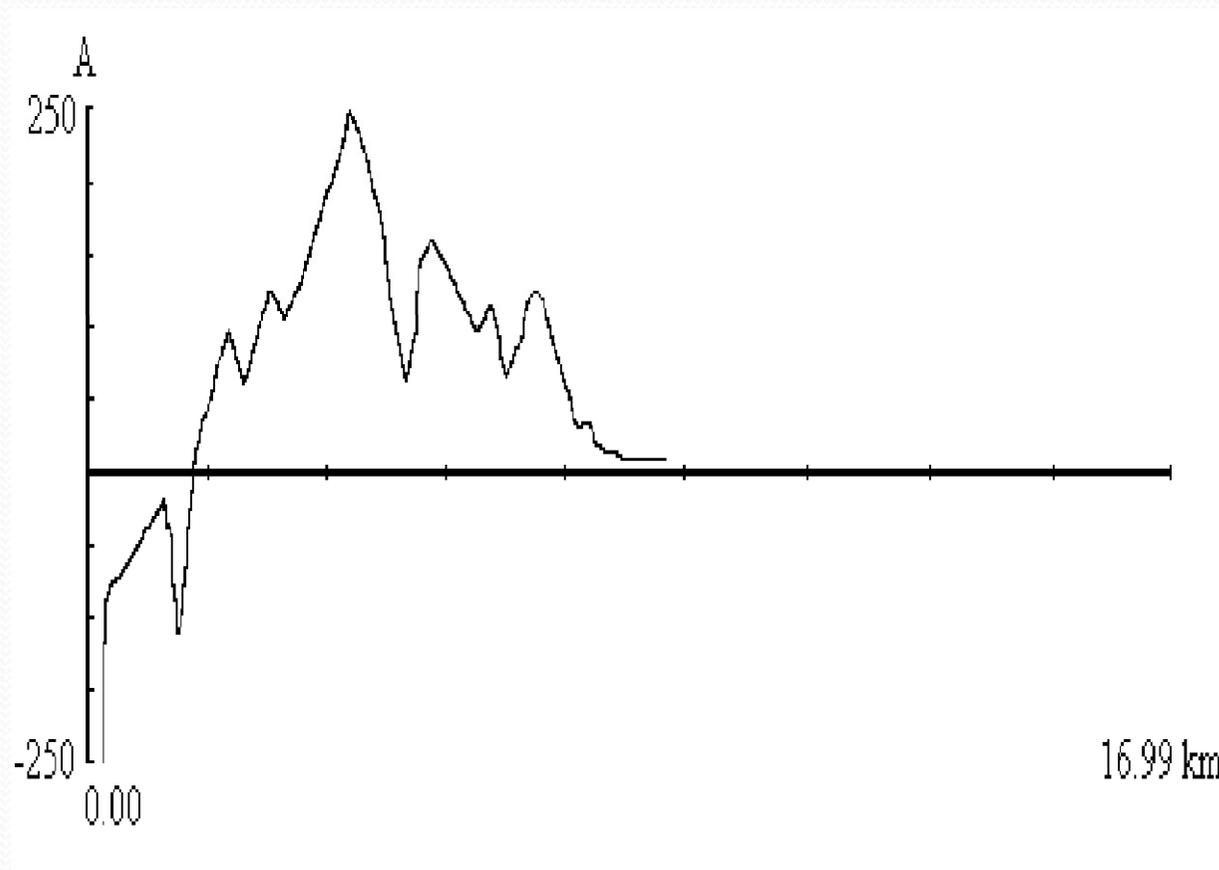
Interferências entre LTs e Dutos e Tubulações

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

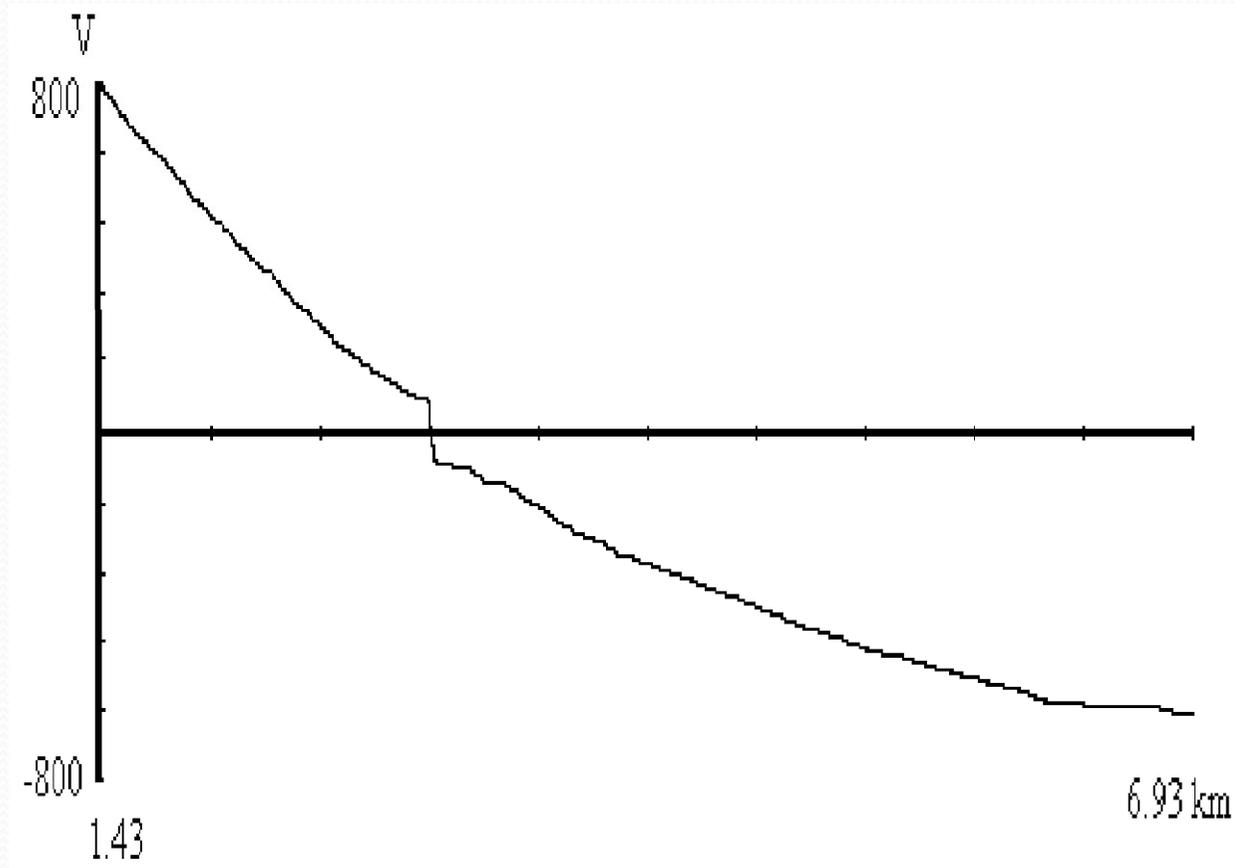
Corrente no Cabo Pára-Raios da LT



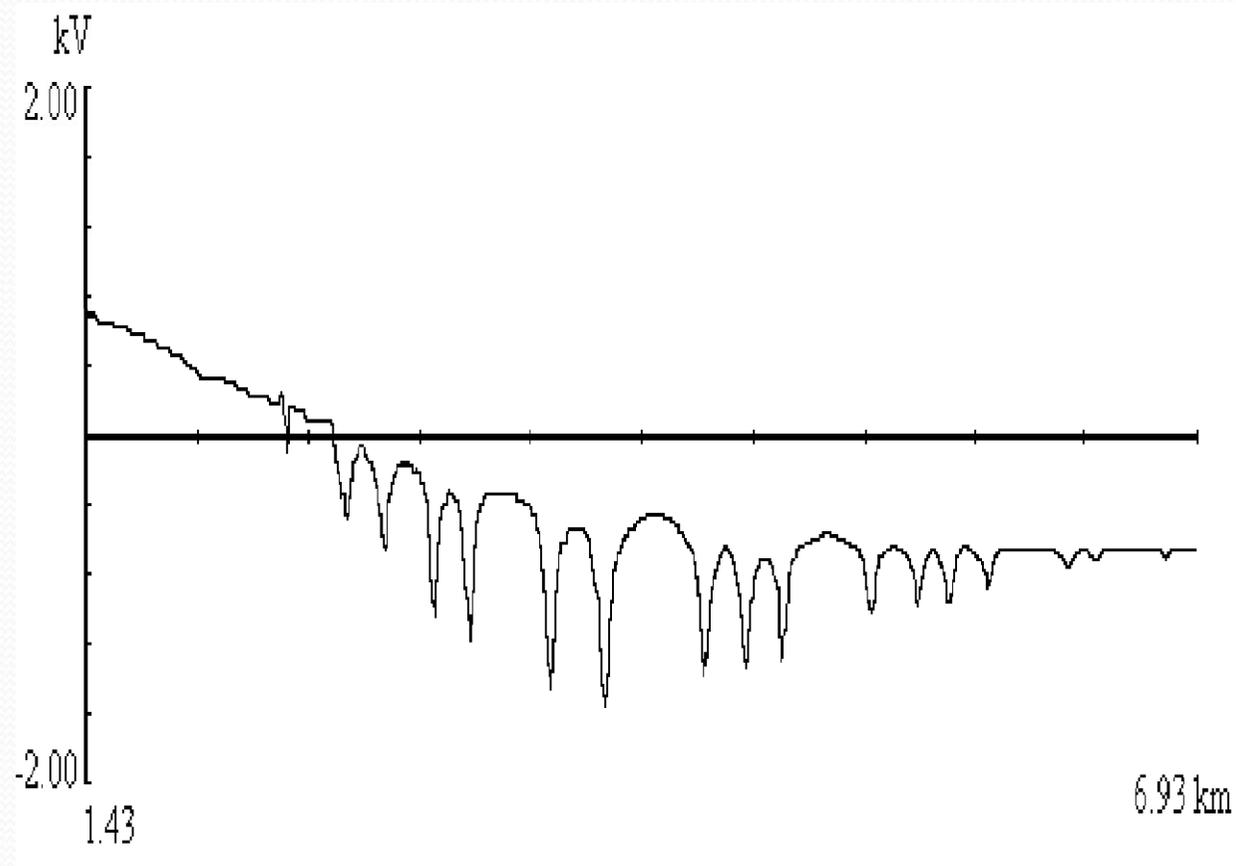
Corrente nos Pés-de-Torre da LT



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 ΣI Seg. Eliminados Cil. Superpostos Le Arq Resist

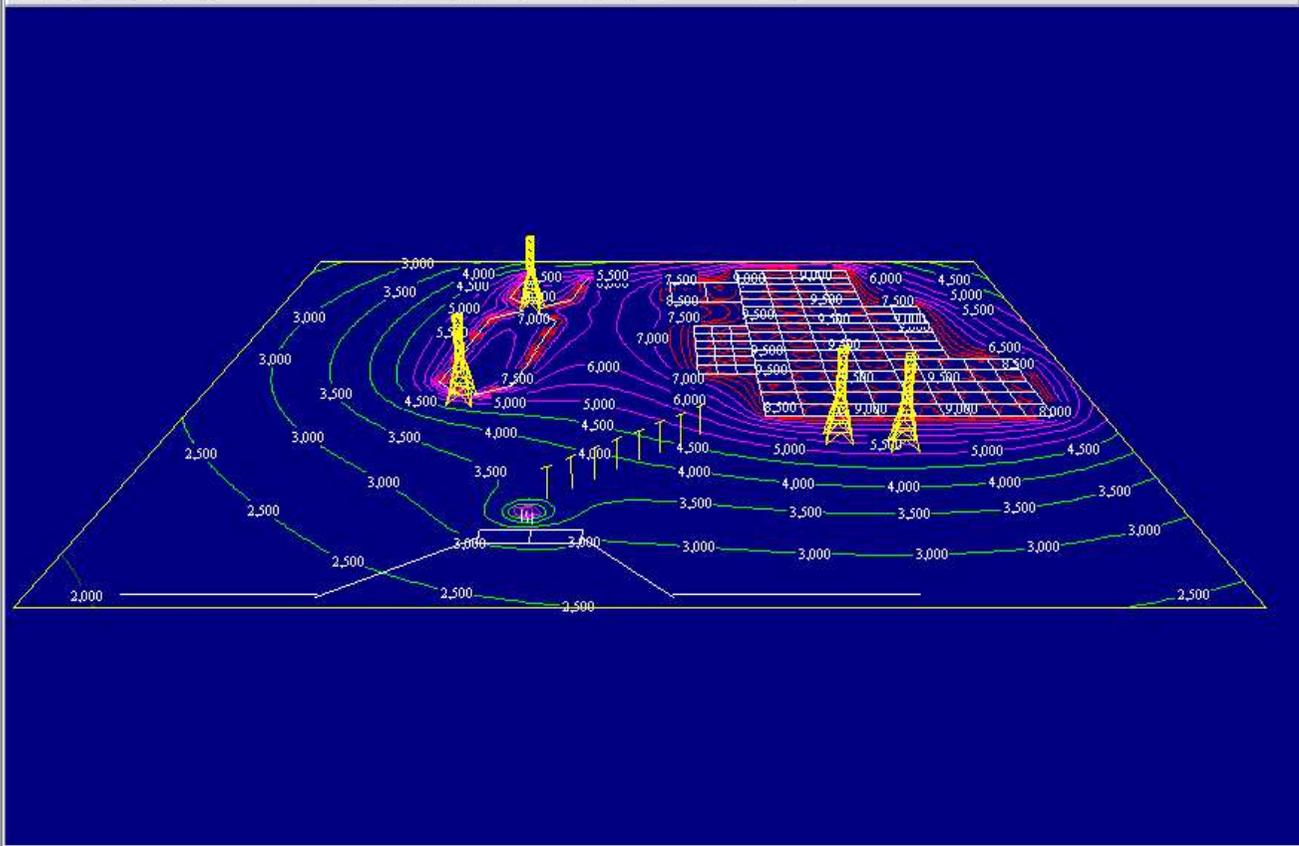
Geometria - C:\SE 3.5.0\SEGground\Data\Visao3D.txt

Visual Plano Geometria

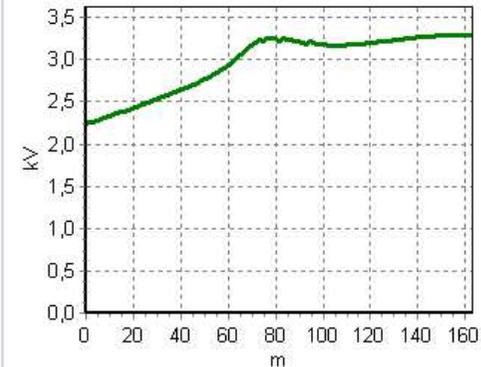
S E Reduzir V Ponto Ref. Segmento

Gráfico - Tipo de cálculo: Potencia...

Gráfico



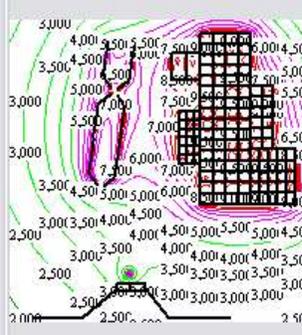
Gráfico



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

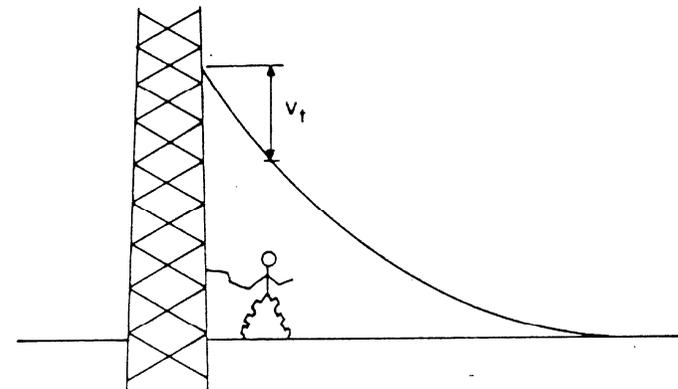
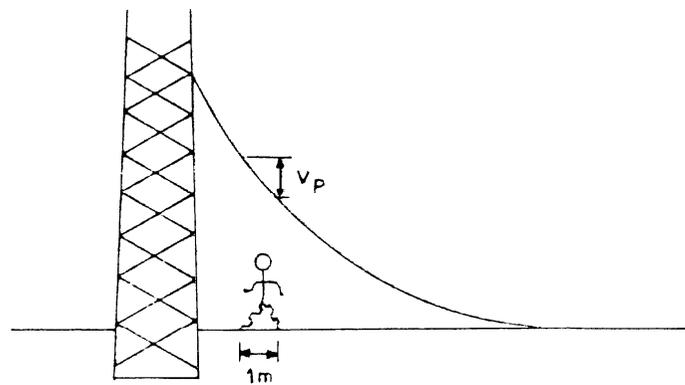
Nome do Objeto = T1

start PowerPoint InterfLTs_ReuniãoCo... untitled - Paint SEGround PT 19:52

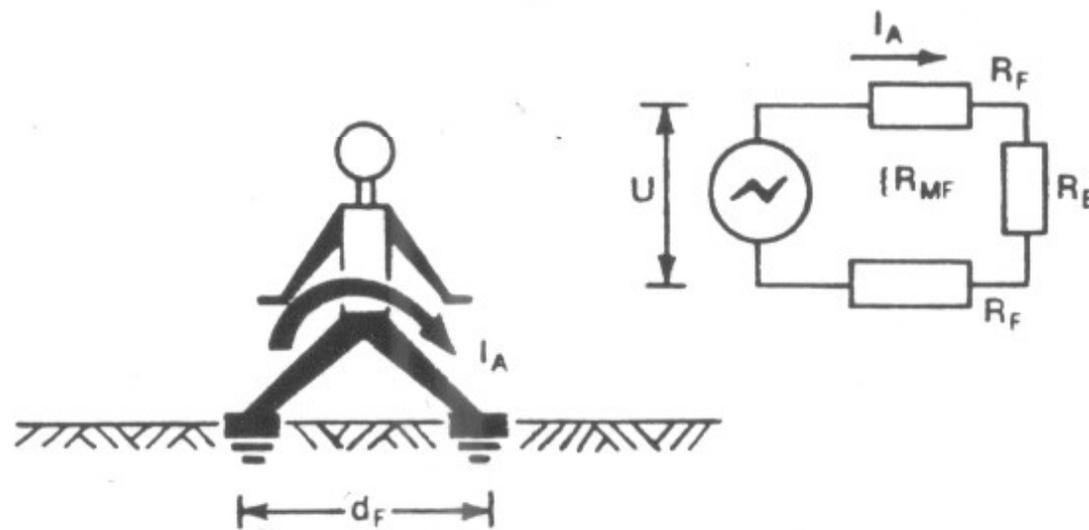
Dimensionamento de Malhas de Aterramento de SEs

- 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.

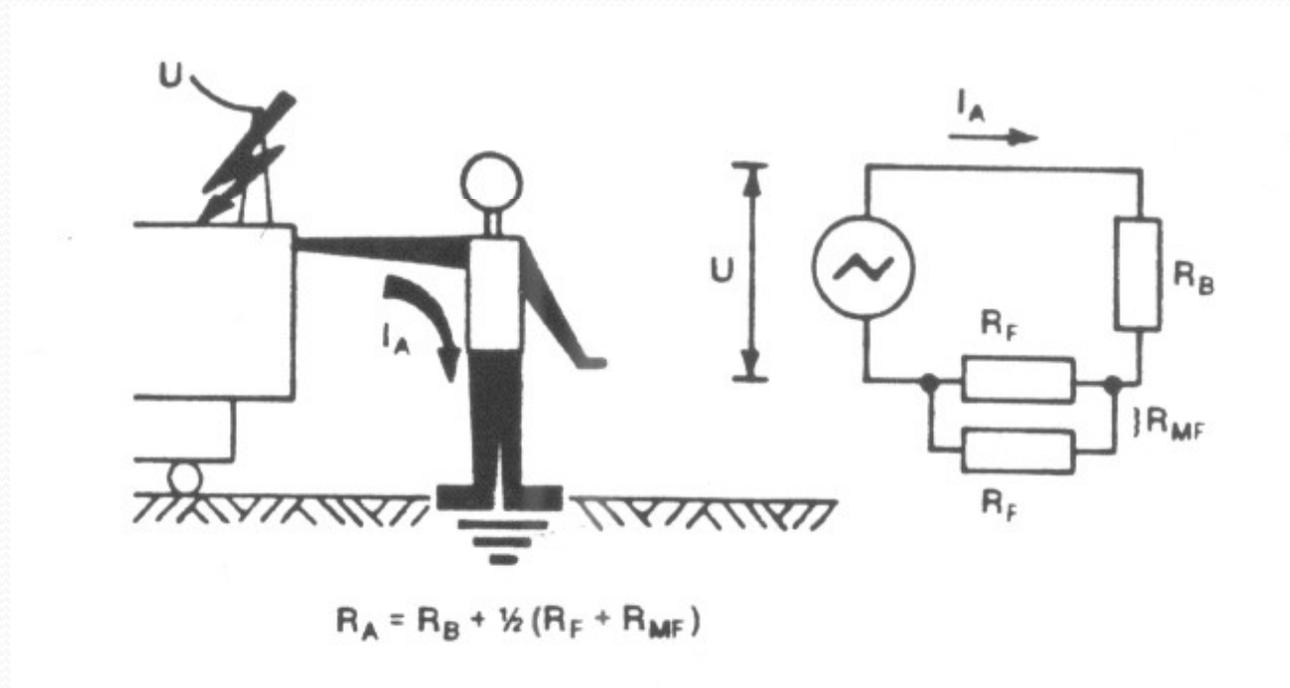
Tensões de Passo e Toque



Circuito Equivalente Utilizado na Avaliação de V_{passo} 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

ρ_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

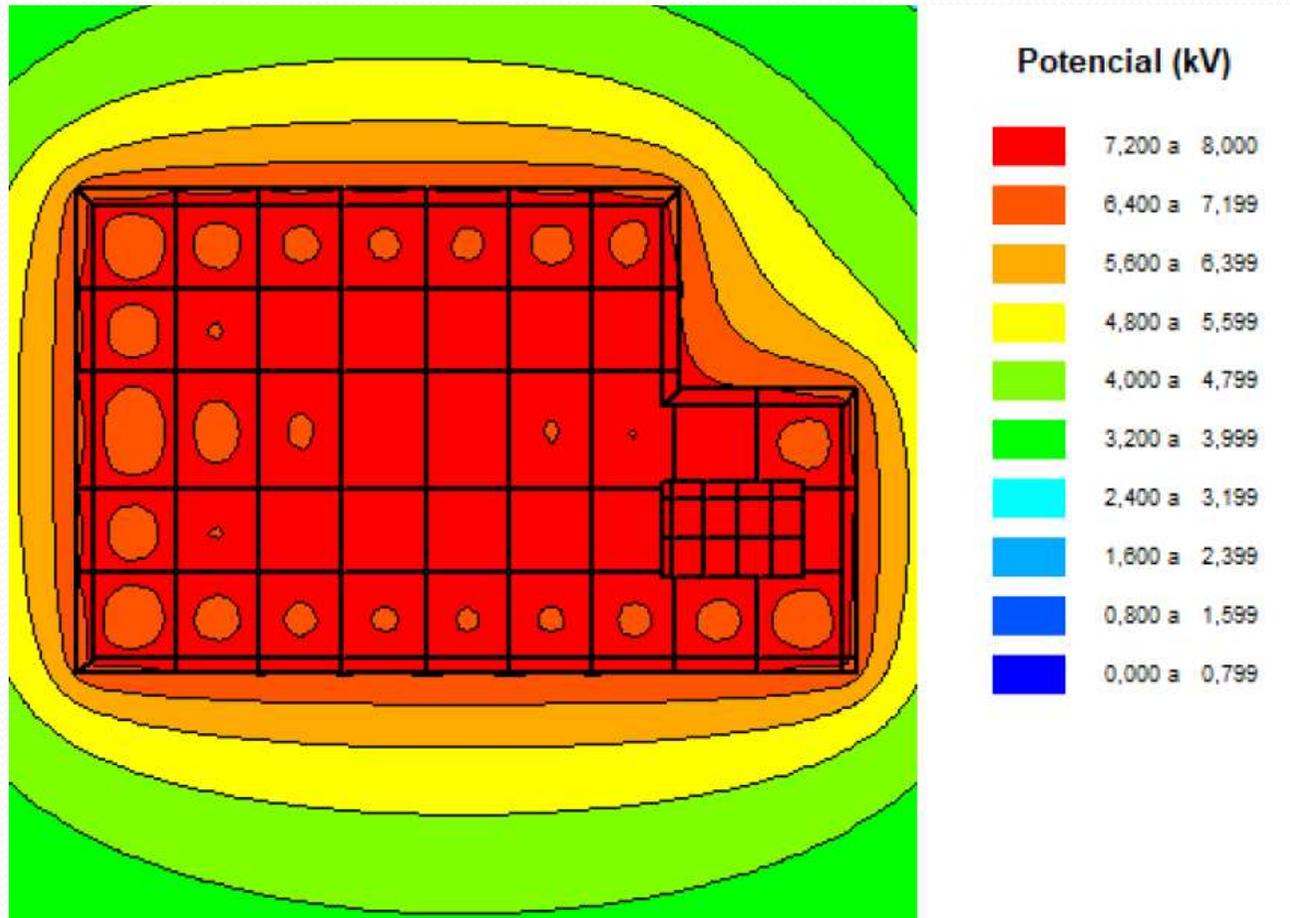
Tensões de Passo e Toque Máximas Admissíveis – Curta Duração

➤ Área britada

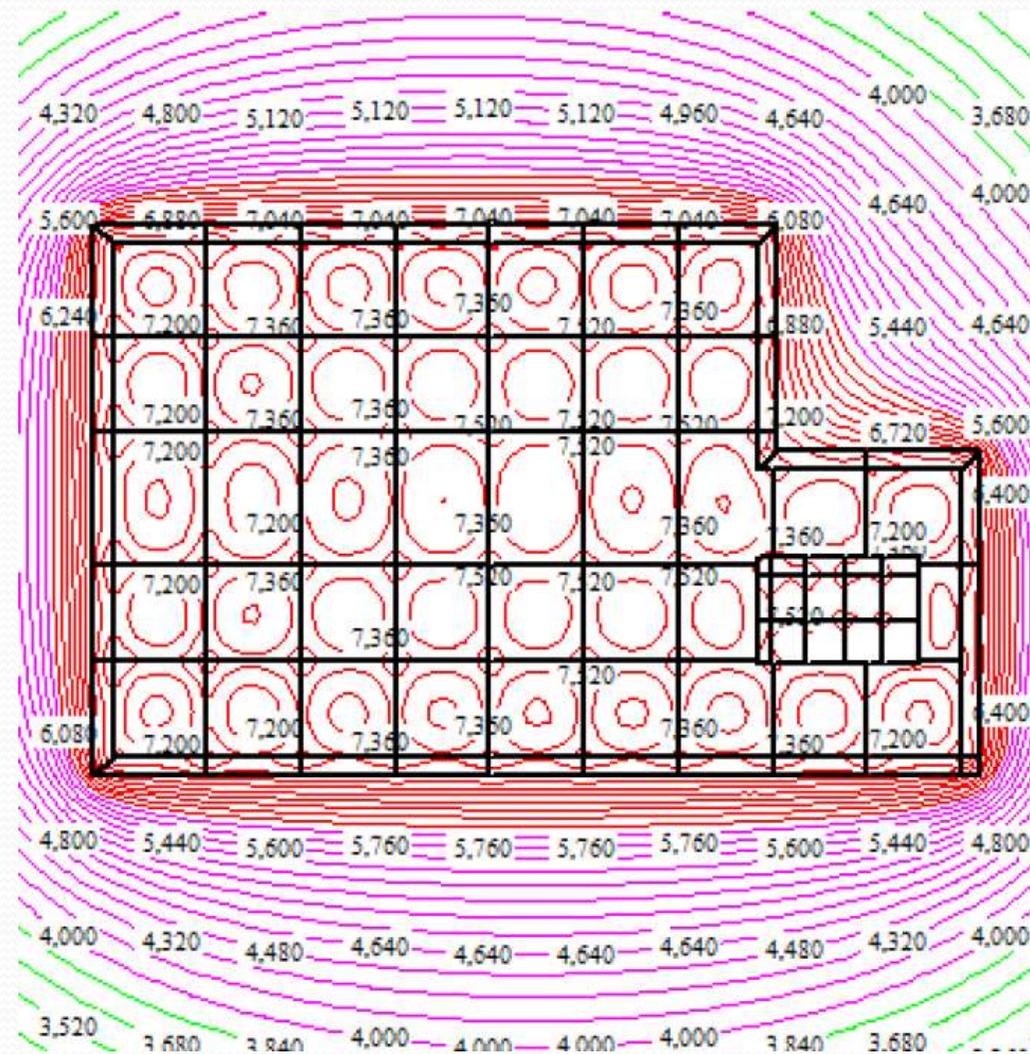
ρ_1 ($\Omega.m$)	NBR 15751-2009	
	V_{toque} (V)	V_{passo} (V)
100	678	2220
500	718	2382
1000	763	2561
1500	803	2721
2000	839	2865

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

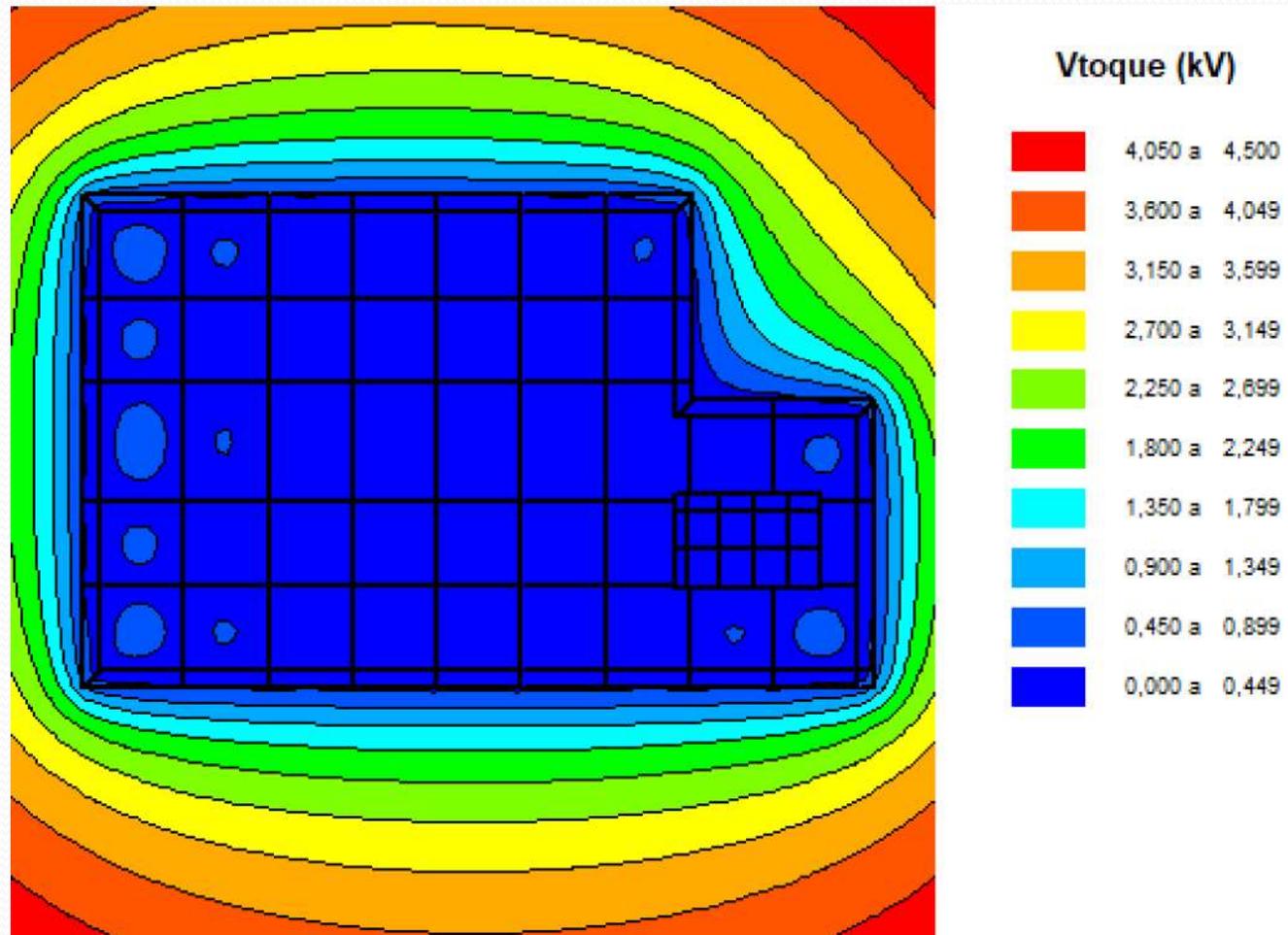
Mapeamento de Potenciais no Solo Gerados Durante um Curto-Circuito Fase-Terra



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



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



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

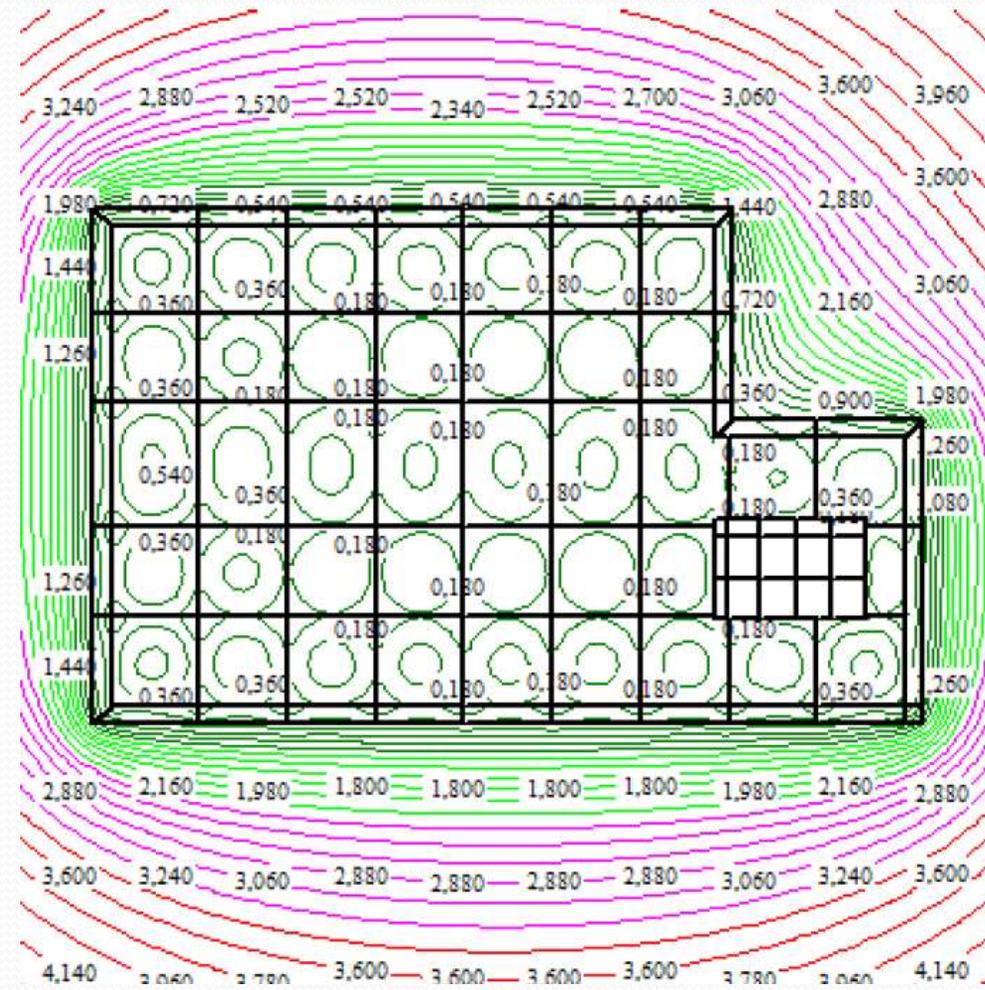
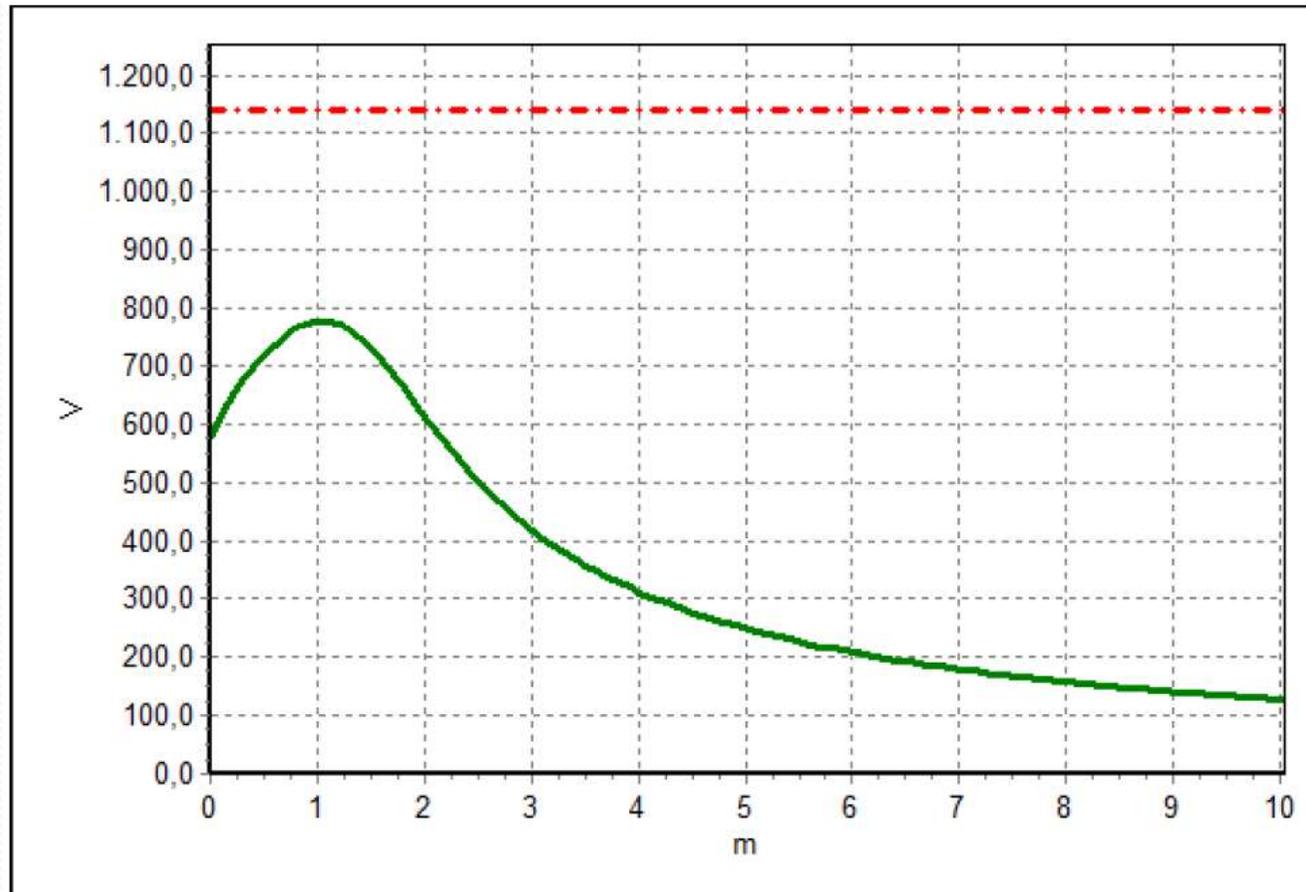


Gráfico de V_{passo} em Quina da Malha



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

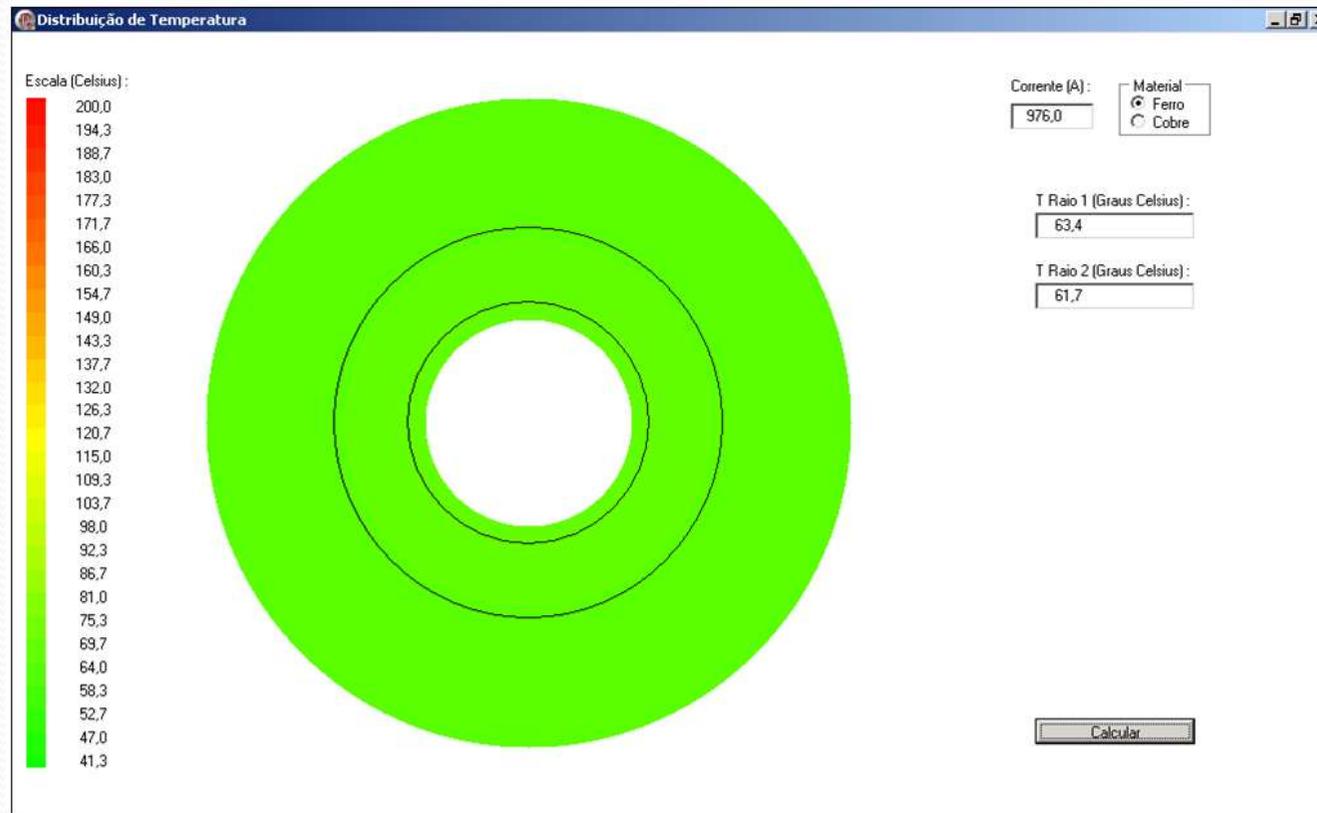


Figura 7 : Distribuição de temperatura ao longo da chapa de **ferro** para corrente de **976 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas (Ver Figura 5).

Aquecimento de suporte de bucha de passagem

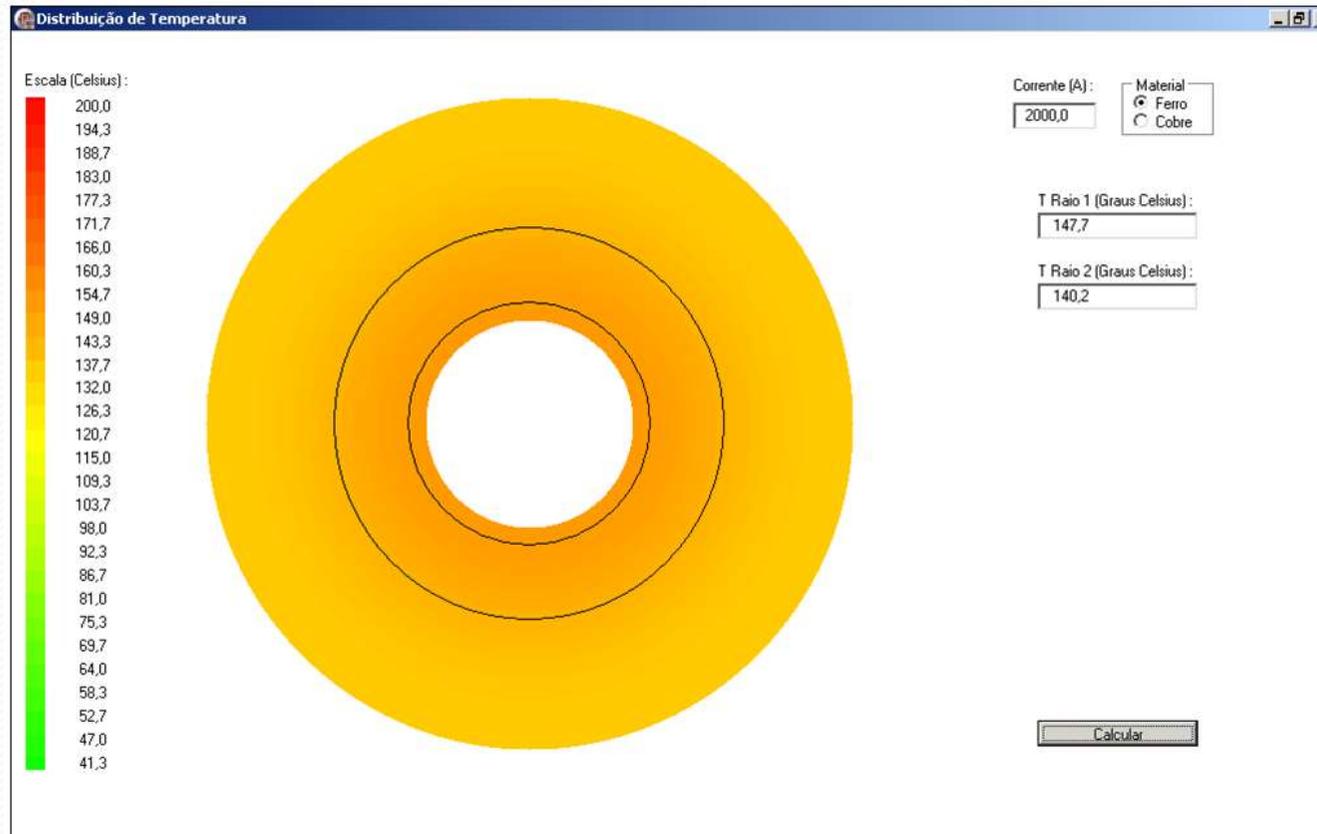


Figura 9 : Distribuição de temperatura ao longo da chapa de **ferro** para corrente de **2000 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas.

Aquecimento de suporte de bucha de passagem

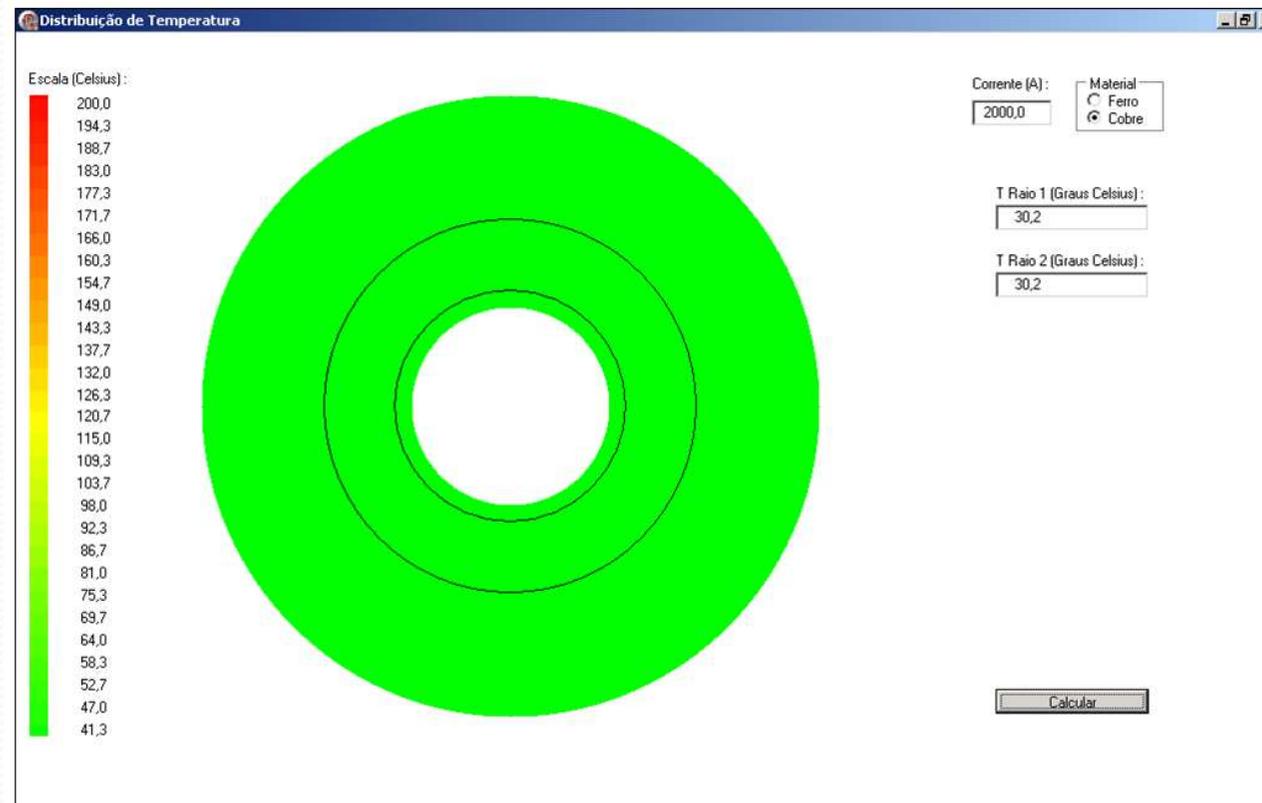


Figura 10 : Distribuição de temperatura ao longo de uma chapa de **cobre** para corrente de **2000 A** (a distribuição é apresentada até um raio de 18 cm). As circunferências em preto (de raios Raio 1, de 80 mm, e Raio 2, de 127 mm) correspondem ao perímetro externo do flange das buchas. *Ver discussão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

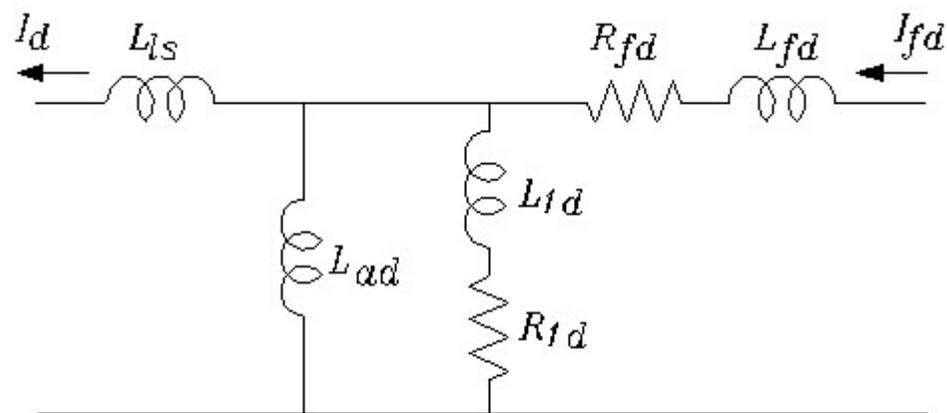
Aquecimento de suporte de bucha de passagem

- 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

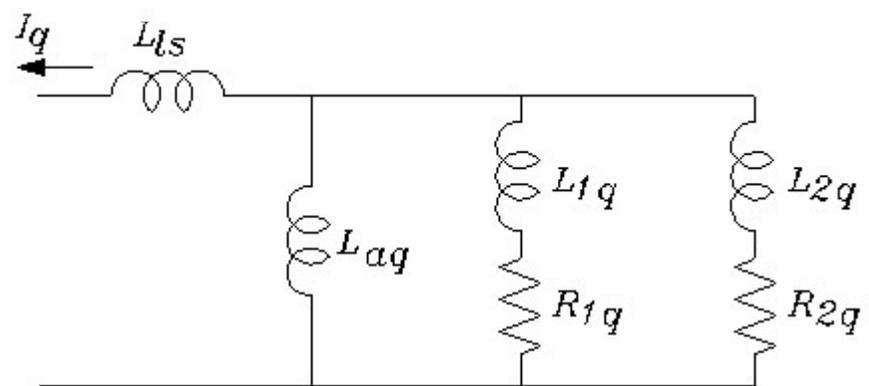


ANÁLISE ELETROMAGNÉTICA DE HIDROGERADORES APLICAÇÃO AO GERADOR DA USINA DE EMBORCAÇÃO

- Projeto MF Consultoria e CEMIG



a) Eixo Direto



b) Eixo de Quadratura

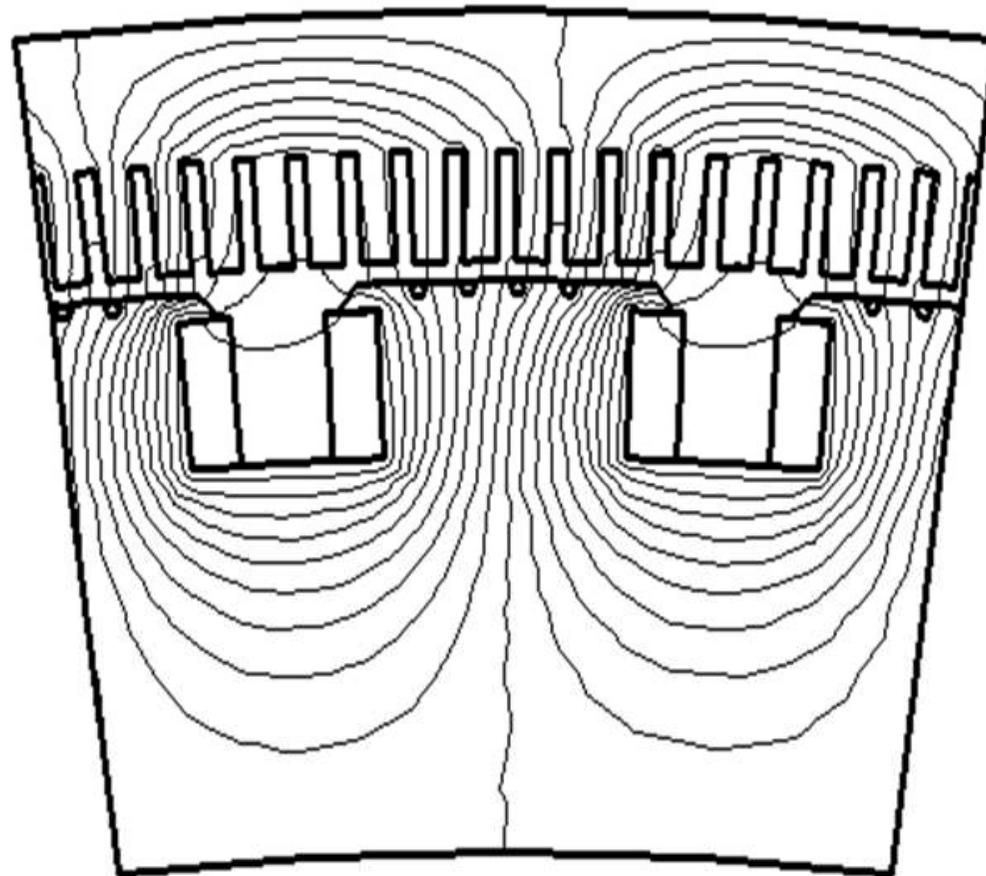
Circuito equivalente do ATP

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

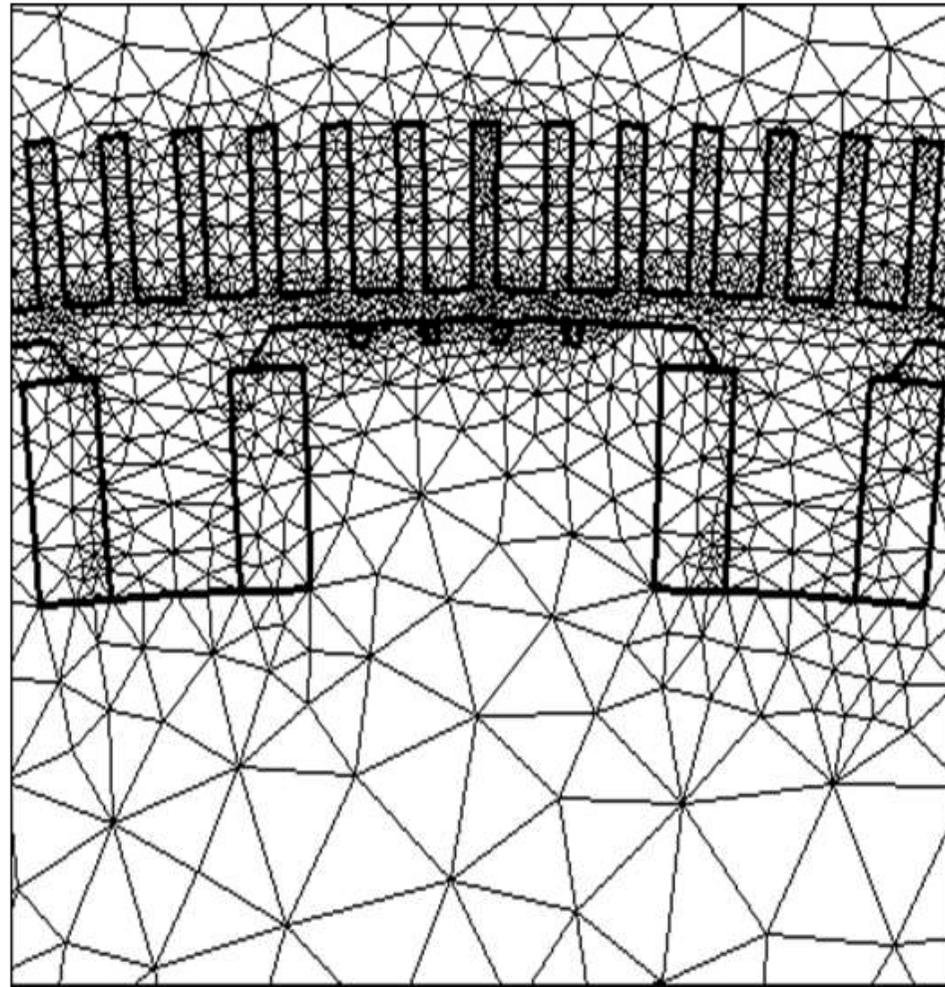
$$L_{fd}(s) \triangleq \left[\begin{array}{c} \Delta\psi_{fd}(s) \\ \Delta I_d(s) \end{array} \right]_{I_{fd}=0}$$

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

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



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!