

Aterramentos Elétricos: Aspectos de Segurança em SEs

Eng. Elilson Eustáquio Ribeiro

NSA Consultoria e Informática Ltda.
Prof. licenciado da PUC Minas

Aterramentos Elétricos: Aspectos de Segurança em SEs

➤ Tópicos a serem abordados :

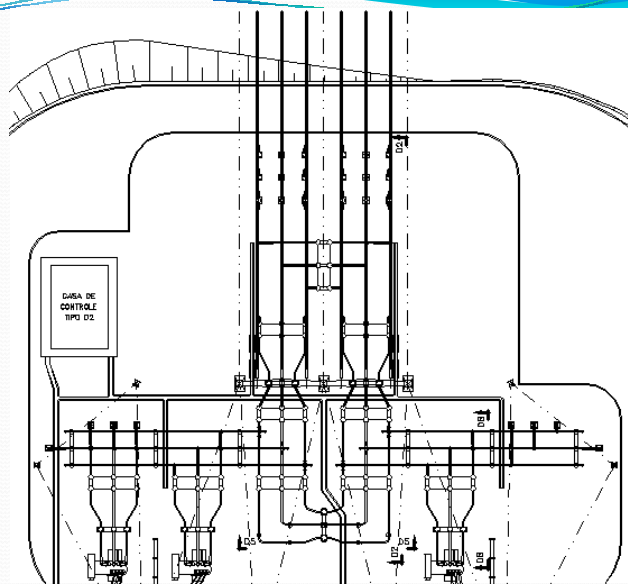
- Pátio de equipamentos de SEs
- Elevação de potencial do solo
- Efeito das correntes elétricas no corpo humano
- Correntes máximas admissíveis pelo ser humano

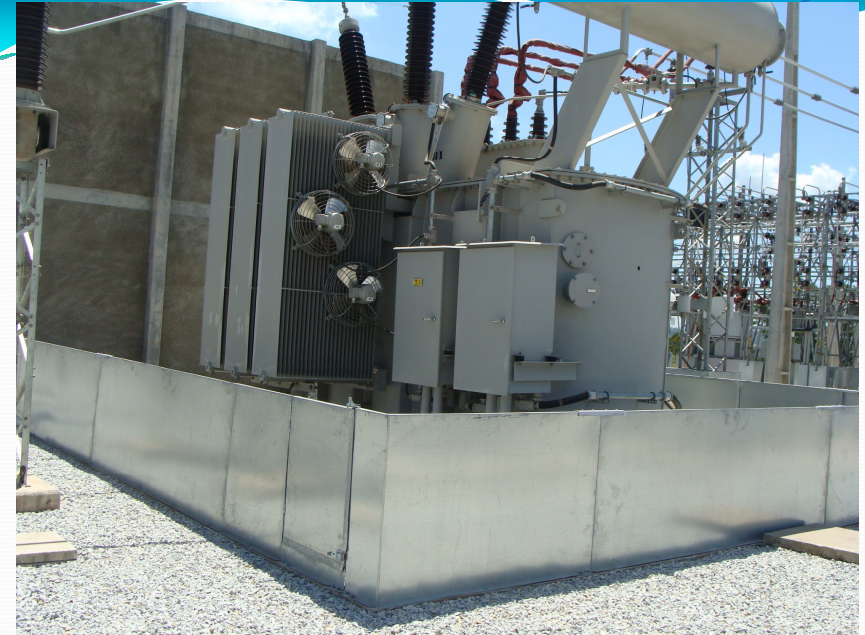
Aterramentos Elétricos: Aspectos de Segurança em SEs

➤ Tópicos a serem abordados :

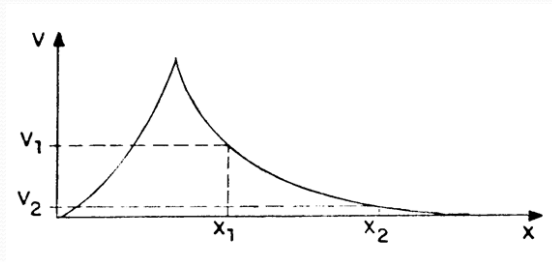
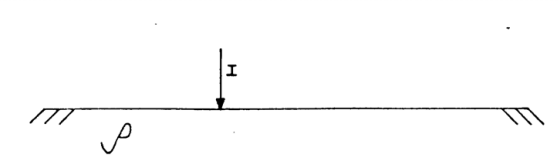
- Dimensionamento de malhas de aterramento de SEs
- Tensões de passo e toque máximas admissíveis
- Medição da resistividade do solo e estratificação do solo em camadas
- Correntes de curto-circuito e corrente injetada no solo via malha de aterramento
- Bitola do cabo da malha
- Simulação de sistemas de aterramento
- Outras aspectos a serem analisados

Pátio de Equipamentos de uma Subestação Energia Elétrica de 138 kV

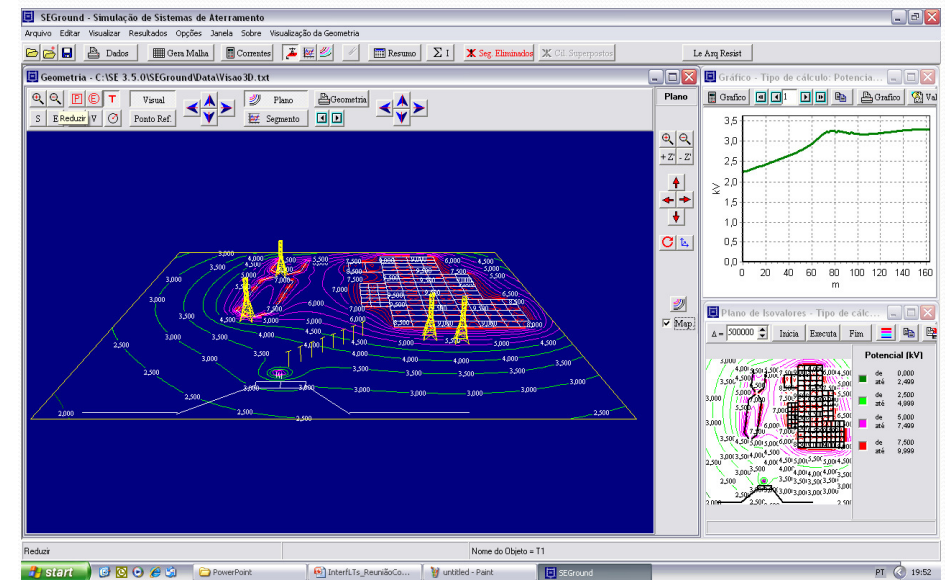


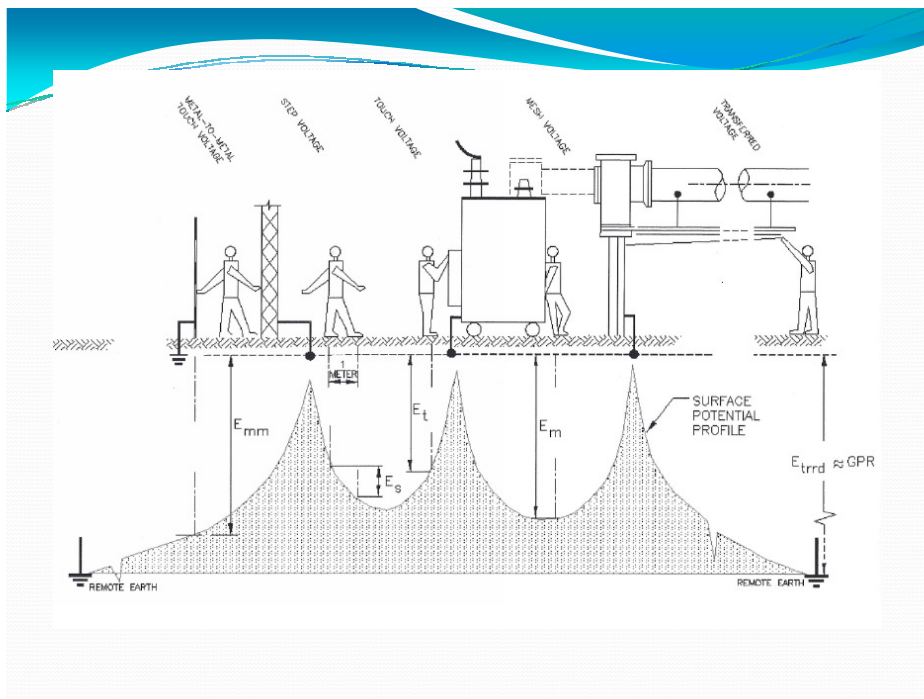


Elevação de Potencial do Solo ao se Injetar uma Corrente no Mesmo



Elevação de Potencial do Solo





Efeito das correntes elétricas no corpo humano

➤ Efeitos e ordem de grandeza de correntes de 60 Hz de regime permanente :

- 1 mA → limiar de percepção de corrente pelo ser humano
- 1 mA a 6 mA → correntes que são percebidas mas ainda permitem o controle muscular
- 6mA → limite de corrente, para mulheres, para a qual o controle muscular ainda é mantido
- 9mA → limite de corrente, para homens, para a qual controle muscular ainda é mantido
- 9 mA a 25 mA → perda de controle muscular
- > 25 mA → dificuldade de respiração
- 60 mA a 100 mA → fibrilação ventricular, parada cardíaca ou respiratória

Efeito das correntes elétricas no corpo humano

➤ Correntes de 60 Hz de curta duração

→ Critério de projeto (máximas correntes admissíveis):

- Pessoas de 50 kg: $I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \text{ A}$
- Pessoas de 70 kg: $I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \text{ A}$ (utilizada apenas em condições excepcionais)
- Onde t_s é o tempo de exposição à corrente (em segundos)

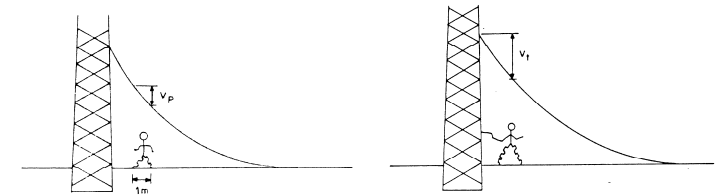
Dimensionamento de Malhas de Aterramento de SEs

- Principais objetivos de se instalar uma malha de aterramento em uma SE:
 - Garantir a segurança de pessoal, na condição de regime normal de operação e durante a ocorrência de curtos-circuitos no sistema elétrico;
 - Proporcionar um caminho preferencial para correntes de fuga para terra em estruturas e equipamentos;
 - Proporcionar um caminho de baixa resistência para as correntes de falta fase-terra no sistema elétrico, possibilitando a identificação das mesmas por relés de sobrecorrentes e eliminação da falta pela abertura dos disjuntores.

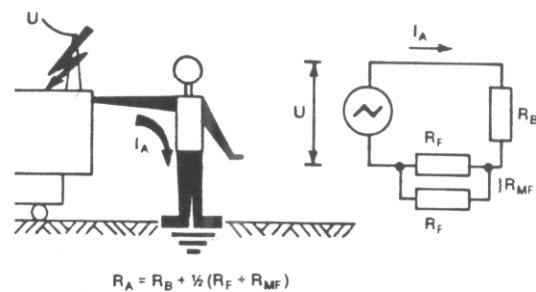
Dimensionamento de Malhas de Aterramento de SEs

- 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.

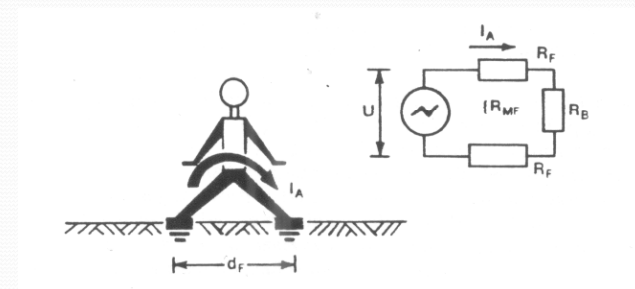
Tensões de Passo e Toque



Circuito Equivalente Utilizado na Avaliação de Vtoque Máxima Admissível



Circuito Equivalente Utilizado na Avaliação de Vpasso Máxima Admissível



Avaliação das Tensões Máximas Admissíveis

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$\rho_s \rightarrow$ resistividade elétrica da camada superficial do solo (Ohms.m)

$C_s \rightarrow$ fator que depende de ρ_s e da resistividade da 1ª camada do solo (ρ_1)

Tensões de Passo e Toque Máximas Admissíveis – Curta Duração

➤ Área não britada (terreno natural)

$\rho_s = \rho_1 \rightarrow$ 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

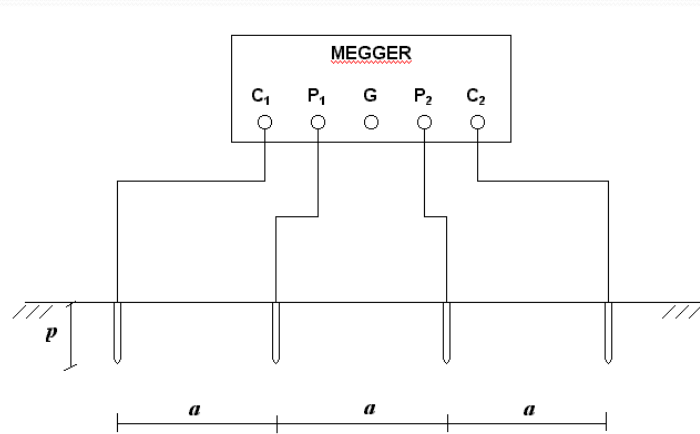
ρ_1 ($\Omega.m$)	NBR 15751-2009	
	V_{toque} (V)	V_{passo} (V)
100	678	2220
500	718	2382
1000	763	2561
1500	803	2721
2000	839	2865

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

Resistividade do solo

- Os solos não apresentam uma resistividade uniforme ao longo dos mesmos.
- Formação geológica dos solos $\rightarrow$ normalmente em camadas horizontais
- Por isto, utiliza-se uma modelagem para representar a variação de resistividade nos solos também em camadas horizontais.
- Em tais camadas, que são paralelas à superfície do solo e de espessura finita (exceto a mais profunda, que é considerada infinita) assumisse-se que a resistividade elétrica é uniforme.
- O método utilizado para a medição dos valores de resistividade é o Método de Wenner.
- A partir dos resultados das medições é que se pode obter a estratificação do solo em camadas.

Método de Wenner

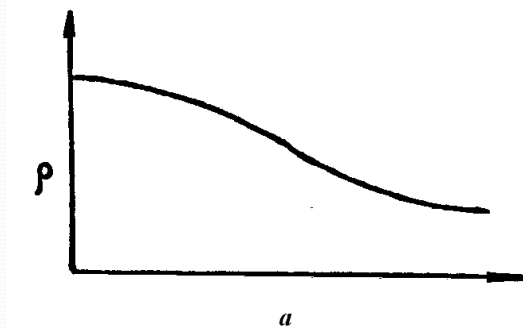


- Eletrodos → aproximadamente 30 cm de comprimento, com diâmetro entre 10 a 15 mm.
- Devem ser feitas diversas leituras, para vários espaçamentos, com os eletrodos sempre alinhados.
- Para um solo uniforme de resistividade ρ , a resistência R (a ser lida no Megger), pode ser avaliada analiticamente como :

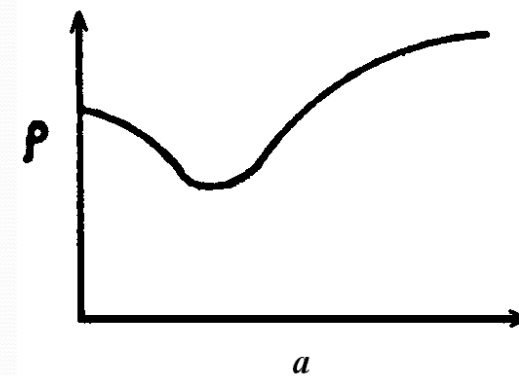
$$R = \frac{\rho}{4\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right]$$

- Assim :

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$



Resistividade aparente obtida em solo formado por duas camadas horizontais de resistividades diferentes e onde a camada inferior possui resistividade menor que a primeira camada.

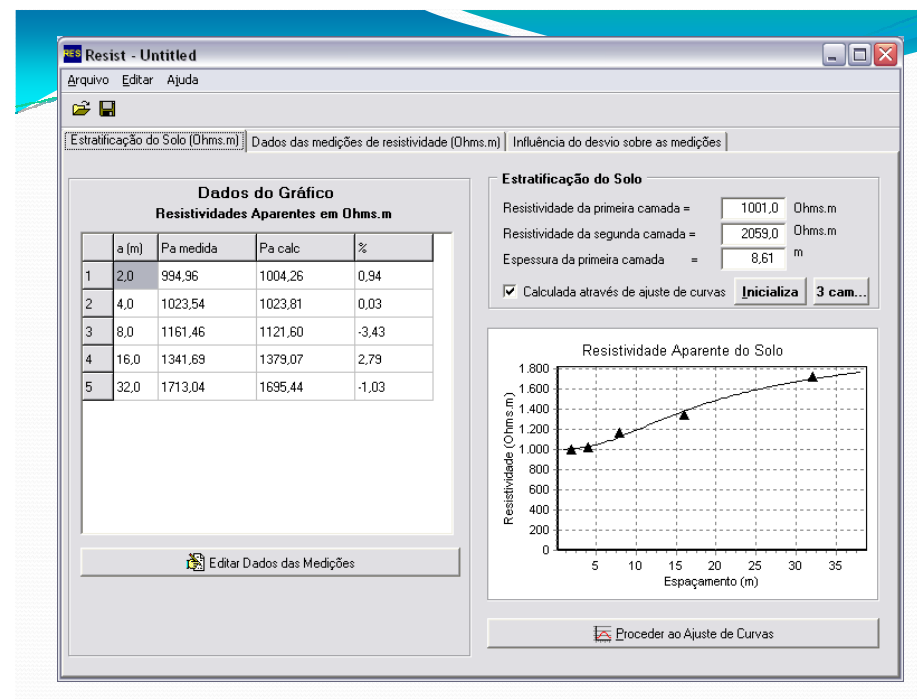
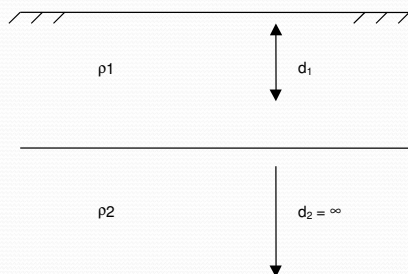


Resistividade aparente obtida em solo formado por três camadas horizontais de resistividades diferentes. A resistividade da segunda camada é menor que a da primeira. A resistividade da terceira camada é a maior de todas.

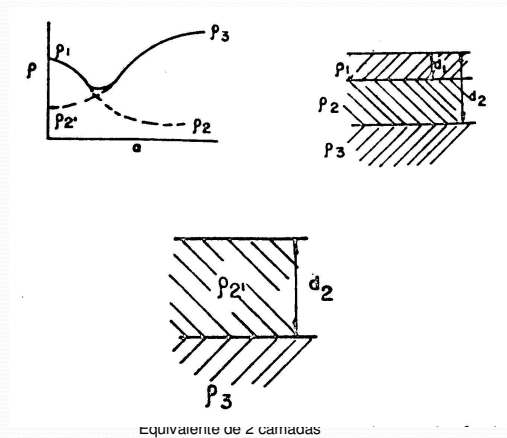
Estratificação do solo em camadas

Solo estratificado em duas camadas

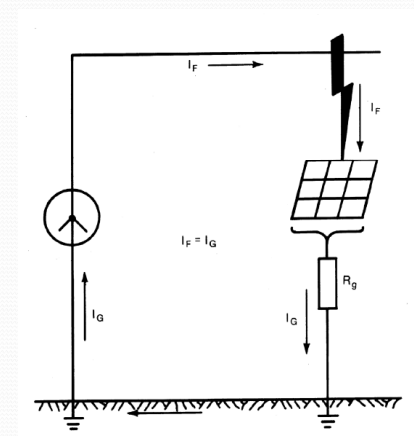
- Aproximação mais utilizada → solo equivalente estratificado em duas camadas horizontais de resistividades diferentes.



Solos com estrutura de três ou mais camadas



Correntes de Curtos-Circuitos Injetadas no Solo Via Malha de Aterramento



Correntes de Curtos-Circuitos Injetadas no Solo Via Malha de Aterramento

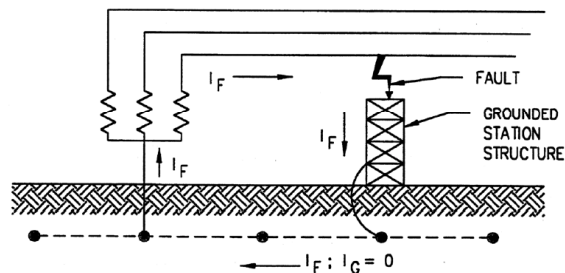


Figure 27—Fault within local substation; local neutral grounded

Correntes de Curtos-Circuitos Injetadas no Solo Via Malha de Aterramento

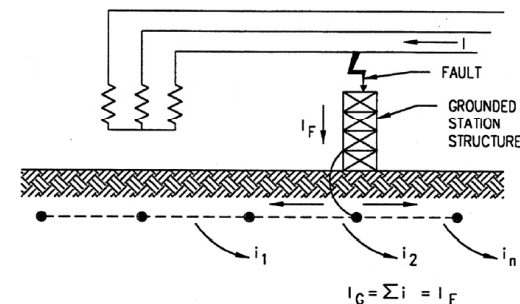


Figure 28—Fault within local substation; neutral grounded at remote location

Correntes de Curtos-Circuitos Injetadas no Solo Via Malha de Aterramento

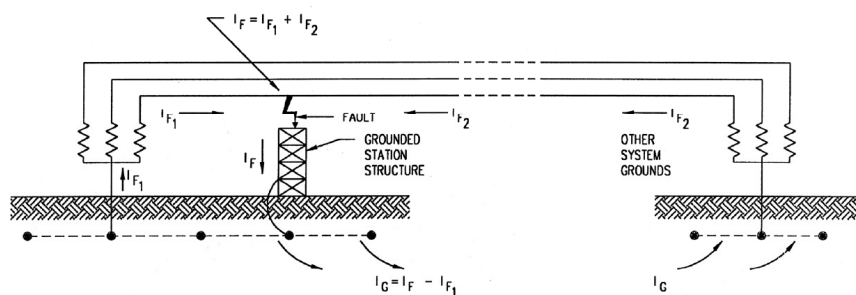


Figure 29—Fault in substation; system grounded at local substation and also at other points

Correntes de Curtos-Circuitos Injetadas no Solo Via Malha de Aterramento

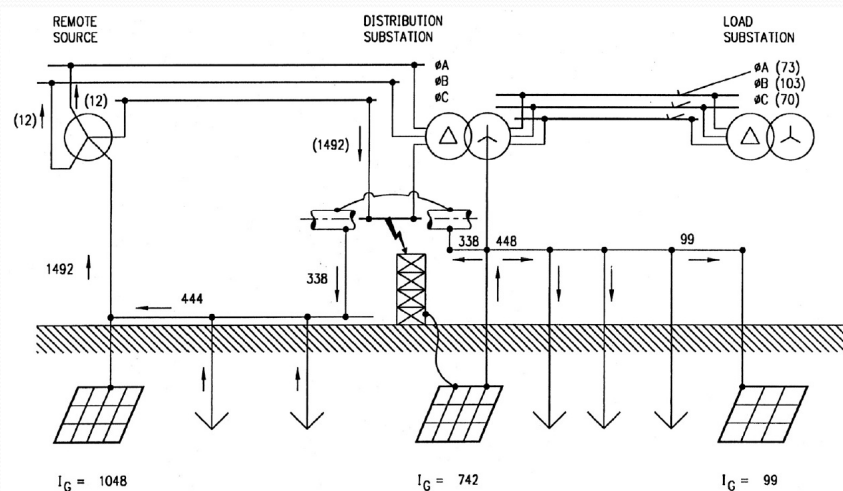


Figure 30—Typical current division for a fault on high side of distribution substation

Bitola do Condutor da Malha

- Parâmetros a considerar na especificação da bitola do cabo da malha:
 - Máxima corrente de curto-circuito
 - Tempo de eliminação da falta
 - Temperatura máxima de aquecimento (limitada pelo tipo de conexões a serem feitas)
 - Suportabilidade mecânica mínima
 - Ver NBR 15.751-2013

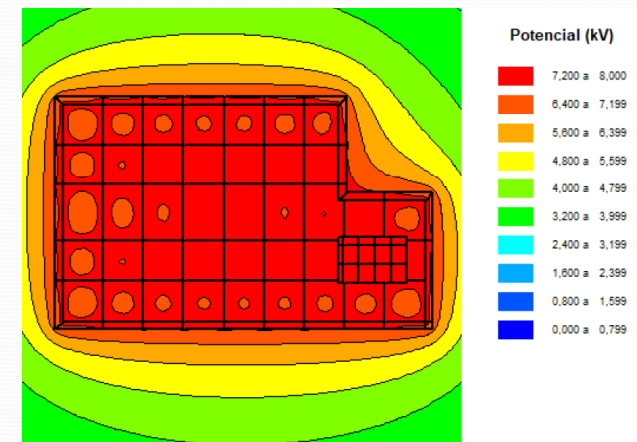
SEGround – Simulação de Malhas de Aterramento

- Simulação de sistemas de aterramento de geometrias complexas
- Utiliza o Método das Resistências :
 $[R] [I] = [V]$
- Considera a distribuição não uniforme de corrente nos elementos que compõem o aterramento
- Permite o cálculo da resistência do sistema de aterramento
- Permite o cálculo de distribuição dos potenciais no solo e das tensões de passo e toque geradas

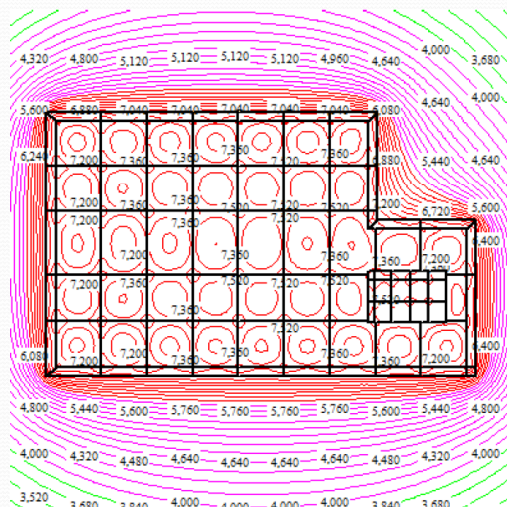
Simulação da Malha de Aterramento

- Processo básico de simulação
 - a) Obter a estratificação do solo em camadas a partir de medições de resistividade do solo;
 - b) Especificar a geometria do sistema de aterramento;
 - c) Impor as tensões e correntes nos elementos do aterramento;
 - d) Calcular as correntes injetadas no solo;
 - e) Obter os resultados (potenciais e tensões de passo e toque).

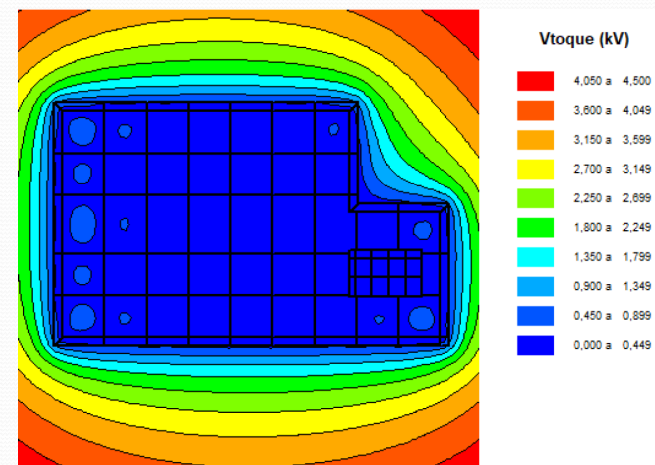
Mapeamento de Potenciais no Solo Gerados Durante um Curto-Circuito Fase-Terra



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

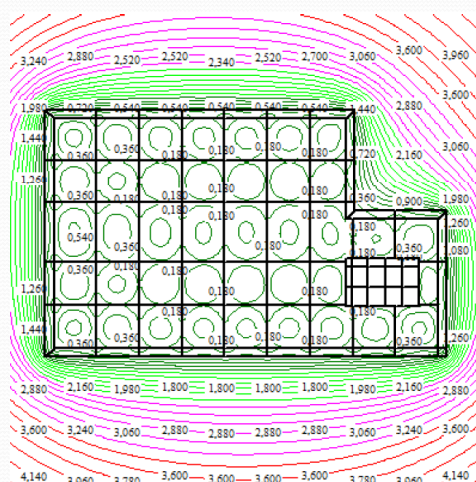
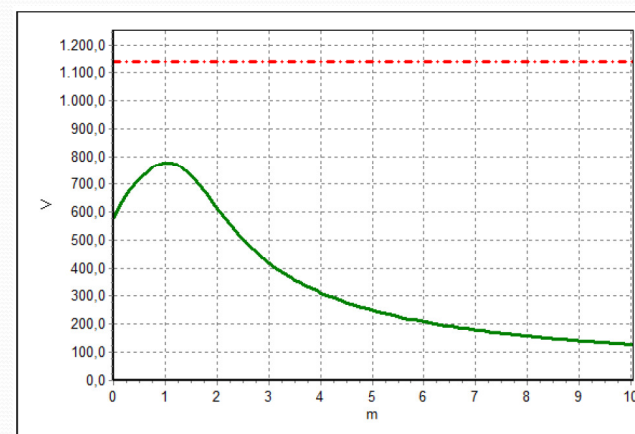
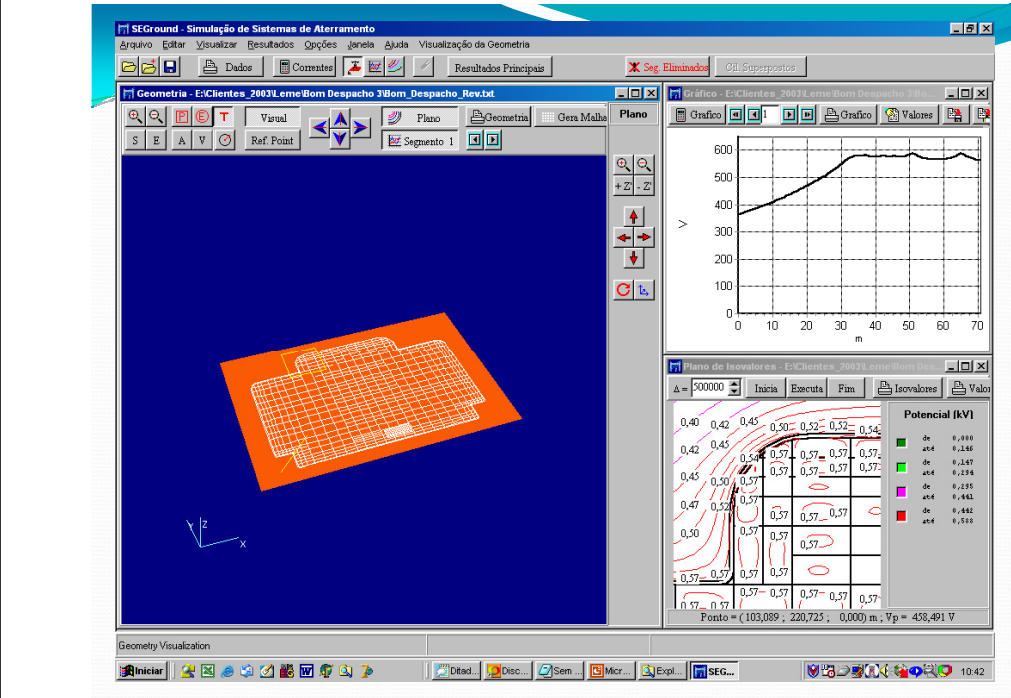
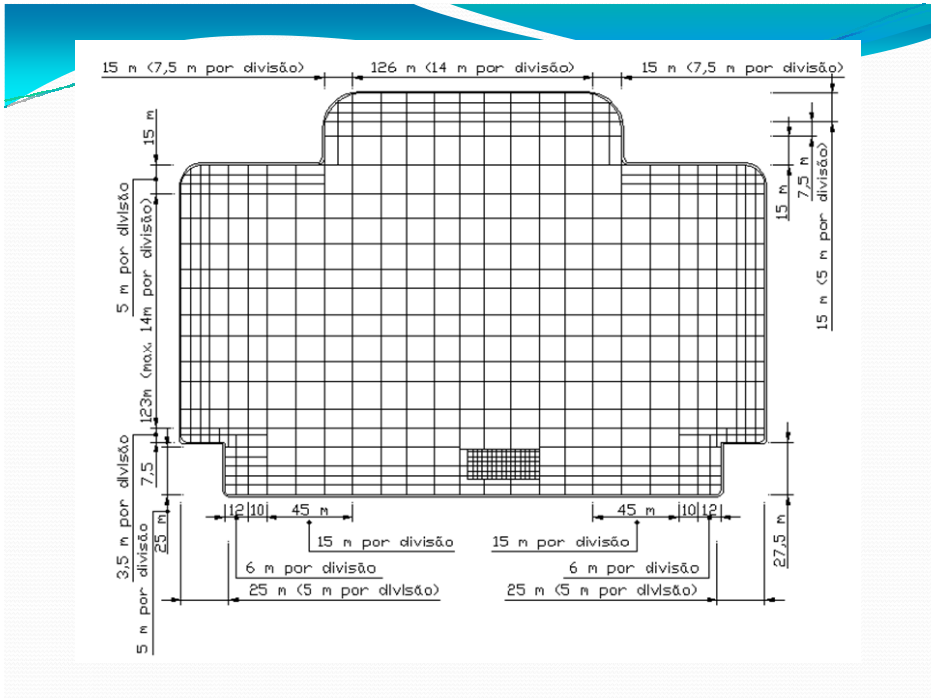


Gráfico de V_{passo} em uma Extremidade da Malha





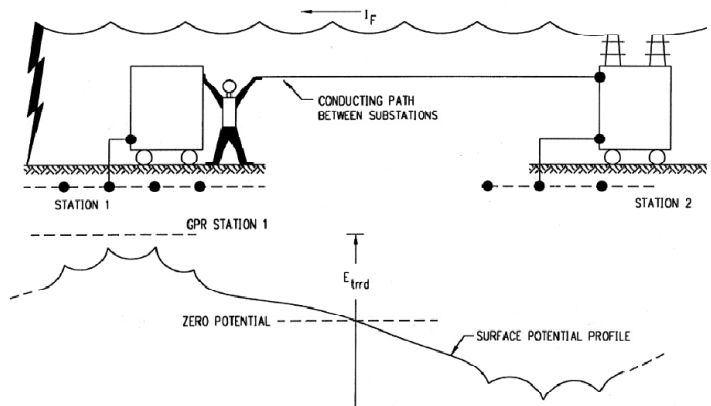
Outras aspectos a serem analisados

- Aterramento da cerca da SE e controle de tensão de toque nas mesmas
- Transferência de potencial da malha de aterramento

- Aterramento da cerca da SE e controle de tensão de toque nas mesmas
- Transferência de potencial da malha de aterramento

Aterramento da Cerca Metálica da SE

The diagram illustrates the grounding of a metal fence between two substations, labeled STATION 1 and STATION 2. A lightning bolt symbol is shown near STATION 1, indicating a source of high voltage. A person is shown standing on the ground near STATION 1, touching a metal structure. A horizontal line labeled "CONDUCTING PATH BETWEEN SUBSTATIONS" connects the metal structure at STATION 1 to the metal structure at STATION 2. A dashed line labeled "GPR STATION 1" is shown below the ground line. A dashed line labeled "ZERO POTENTIAL" is shown below the ground line. A graph shows the "SURFACE POTENTIAL PROFILE" with a vertical axis labeled E_{ttrd} . The profile shows a sharp peak at STATION 1, a gradual decline, and a sharp drop at STATION 2, crossing the zero potential line.





Fim!

Muito Obrigado!