



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-23  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE  
ENERGIA - GCQ**

**CASOS EM QUE UMA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM VALOR MUITO REDUZIDO  
PODE PREJUDICAR O DESEMPENHO DE INSTALAÇÕES DIGITALIZADAS**

**Sérgio T. Sobral \* Sérgio C. Sobral**  
ST&SC Serviços Técnicos Ltda

**David S. Rezende**  
COPEL

**RESUMO**

O IT mostra porque um valor reduzido ou elevado da resistência de aterramento de uma instalação elétrica nada indica, por si só, sobre a segurança ou o desempenho da mesma, durante perturbações periódicas, tais como curto-circuitos, perturbações harmônicas, etc.

Mostra ainda que durante perturbações aperiódicas (tais como descargas atmosféricas, manobras de disjuntores, chaves etc), um valor reduzido da resistência de aterramento da instalação pode ajudar a reduzir as sobretensões que ocorrem no circuito que recebe a perturbação. Entretanto, pode aumentar simultaneamente o efeito indutivo produzido pelas ondas de impulso em circuitos sensíveis próximos, ou situados no interior das instalações.

Alem disso, um valor reduzido de resistência de aterramento de uma instalação, tende a aumentar o tempo necessário para converter a energia da perturbação aperiódica em calor, no seu sistema de aterramento local. Como consequência, pode tornar maior o tempo de exposição dos circuitos sensíveis às ondas de corrente que trafegam no circuito que recebeu a perturbação.

O IT mostra como a utilização de um "anel de amortecimento", circunscrevendo a edificação que abriga circuitos sensíveis pode ajudar a reduzir sobretensões no circuito que recebe a perturbação e controlar o efeito indutivo nos circuitos sensíveis internos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Malhas de terra; resistência de terra; anel de amortecimento; impedância de surto; interferências.

**1.0-INTRODUÇÃO**

A maioria das normas técnicas que tratam de descargas atmosféricas e controle de interferências, concorda hoje, oficialmente ou extra-oficialmente, que não existe um limite rígido para o valor da resistência da aterramento. Muitas delas continuam mencionando, entretanto, que quanto mais baixo o valor da resistência de terra, melhor o desempenho da instalação para qualquer situação.

O IT mostra que há situações em que um valor baixo da resistência de terra pode ser prejudicial ao desempenho de dispositivos digitais, se não for utilizado um "anel de amortecimento" circunscrevendo a instalação. Para exemplificar, cita-se que na Usina de 500 kV de Serra da Mesa, do sistema de Furnas consegue-se um adequado desempenho de suas instalações altamente digitalizadas durante perturbações periódicas e aperiódicas, mesmo com uma resistência de terra de 46,7  $\Omega$ .

**2.0- INFLUÊNCIA DO VALOR DA RESISTÊNCIA DE TERRA DURANTE PERTURBAÇÕES PERIÓDICAS.**

As Figuras 1 e 2 mostram como a corrente de curto-circuito pode ser em grande parte drenada para fora da malha de terra, pelos circuitos de terra externos, interligados na mesma. As Referências (1, 2, 3) esclarecem o assunto em detalhe. Assim sendo, o valor da corrente de malha (IM) pode ser pequeno, mesmo quando o valor da corrente de defeito (I) é elevado. Isto pode ocorrer quer o valor da resistência de aterramento (R) seja elevado ou reduzido, na dependência dos parâmetros dos circuitos de terra externos interligados com a malha de terra local.

\* R.Vice Gov. Rubens Berardo 175 conj 1002 Bloco 1-Gávea- CEP 22451-0700 – Rio de Janeiro  
TEL/FAX (0xx)(21) 2294-6456 e-mail: stsobral@parquegaivotas.com.br

### 2.1–Porque os potenciais de passo, de toque e de malha independem do valor de (R).

Deve ser observado que as expressões que permitem o cálculo do potencial de passo, de toque e de malha, que surgem na malha de terra de uma instalação durante um curto-circuito (4) , mostram que esses valores não tem qualquer relação direta com o valor da resistência da malha de terra (R).

Os valores dos potenciais de terra mencionados dependem da distribuição de potencial na superfície do solo, que por sua vez depende do espaçamento entre os condutores da malha, do valor da resistividade do solo e do valor da corrente de malha (IM).

### 2.2- Porque a elevação de potencial de terra em relação a terra remota da malha (GPR) pode ser pequena, mesmo com o valor de (R) elevado.

O valor de GPR (ground potential rise) da instalação é dado pela expressão:

$$GPR = IM \cdot R$$

O valor de (GPR) pode ser reduzido, mesmo quando o valor de (R) é elevado, pois o valor da corrente de malha (IM), não depende basicamente do valor de (R), e sim dos circuitos de terra externos aterrados na malha. As Figuras 1 e 2 ilustram o assunto.

### 2.3- Conseqüências

Em conseqüência do exposto nos itens anteriores, o valor de (R) não serve isoladamente como figura de mérito para julgar a segurança ou o desempenho de uma instalação durante perturbações periódicas. Um valor de (R) reduzido não significa segurança e um bom desempenho da instalação. Por outro lado, um valor elevado de (R) não significa insegurança ou desempenho inadequado.

## 3.0 – CIRCUITOS DE SURTO

Caracteriza-se a seguir os elementos básicos de um circuito de surto, percorrido por uma perturbação aperiódica:

### 3.1- Impedância de surto de um condutor

Quando uma onda de impulso proveniente de uma perturbação aperiódica trafega em um condutor, vê cada extensão elementar do mesmo como uma impedância de surto (5,6,7,8). A impedância de surto de cada ponto do circuito tem valores típicos de 100-600  $\Omega$ , na dependência da distância do condutor ao plano de referência, do diâmetro do condutor e dos parâmetros ( $\epsilon$ ) e ( $\mu$ ) do meio. O valor típico para a impedância de surto de cada ponto de condutores subterrâneos é de 150  $\Omega$ .

### 3.2- Velocidade de propagação.

A velocidade típica de propagação em condutores aéreos é de 300 m/ $\mu$ s e de 100m/ $\mu$ s para condutores subterrâneos

### 3.2- Impedância dinâmica de surto (Xs) do sistema de aterramento

A Figura 3 mostra que o valor da impedância dinâmica de surto (Xs), vista do ponto A onde o surto é injetado no sistema de terra, varia muito rapidamente em um período de microsegundos, como segue:

- seu valor inicial corresponde ao paralelo das impedâncias de surto que chegam ao ponto de aterramento. Se o condutor aéreo por onde trafega o surto esta ligado a 4 condutores subterrâneos, o valor inicial será aproximadamente:  $150/4 = 37,5 \Omega$ .
- O valor final corresponde ao valor da resistência de 60 Hz do sistema de terra que pode ser medido com um terrômetro (Megger).
- O tempo (t1) no qual ocorre a transição do valor inicial de Xs para o valor final corresponde aproximadamente a  $t1 = 2 \cdot L / 100$ , sendo (L) a distância do ponto de aterramento do surto até o limite da malha. Para uma malha extensa de uma SE onde tenha-se  $L = 100m$ , resulta  $t1 = 2 \mu s$ , como mostrado na Figura 3.
- No caso de uma edícula de dispositivos eletrônicos ao lado de uma antena de telecomunicações, tem-se por exemplo  $L = 10 m$  e  $t1 = 0,2 \mu s$ . Neste caso, após  $0,2 \mu s$ , o valor de (Xs) do sistema de terra visto do ponto de injeção do surto permanece aproximadamente constante com o valor ohmico que pode ser medido à 60 Hz. por meio de um terrômetro
- Como uma elevada porcentagem das descargas atmosféricas tem tempo para o pico da ordem de 0,5 a 1,5  $\mu s$ , é neste intervalo que ficam os valores da curva de (Xs) que são capazes de influenciar mais significativamente as sobre-tensões causadas pelas perturbações mencionadas.

## 4.0- REFLEXÕES E REFRAÇÕES DOS SURTOS NO PONTO DE ATERRAMENTO

A Figura 4 mostra um condutor de aterramento do pára-raios de uma torre, com impedância de surto equivalente de 150  $\Omega$ , interligado no ponto A ao sistema de aterramento da instalação, que tem  $Xs = 15 \Omega$ .

Para esta relação de 10:1 a Figura mostra o cálculo dos fatores de reflexão e refração na junção A, e os valores de tensão, corrente e potência que são refratados e entregues ao sistema de aterramento. Note-se que neste primeiro contato com a junção A, apenas um montante de 33,1% da corrente é drenado para o sistema de terra e tem oportunidade de transformar-se em calor nos componentes resistivos dos condutores subterrâneos.

Um montante de 66,9% da potência do raio é refletido na junção A, e trafega de volta subindo o condutor, até encontrar a junção com a impedância de surto do canal do raio. Ai sofre outras reflexões e refrações.

As ondas refletidas na junção com o canal do raio descem o condutor mencionado até encontrarem novamente o sistema de terra no ponto A. Um montante de 33.1% da potência que chega à junção é drenada para o sistema de terra e 66,9% é refletido

subindo novamente o condutor. O processo continua até que toda a energia tenha se transformado em calor.

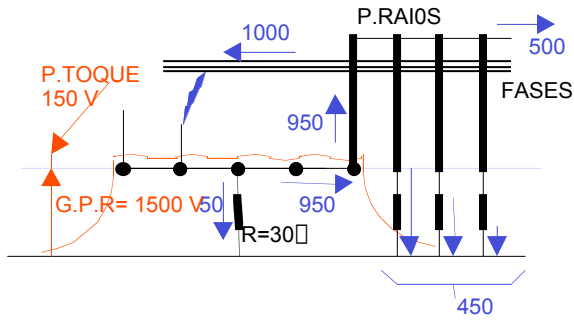


FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE C.C. NO SISTEMA DE TERRA - LT COM CABOS PARA-RAIOS CAA (SIMILAR AO CASO DA USINA DE SERRA DA MESA DO SISTEMA FURNAS)

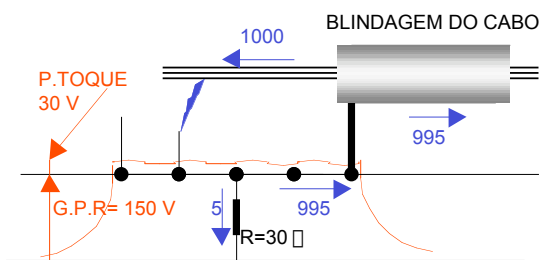


FIGURA 2 – DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE C.C. NO SISTEMA DE TERRA DE UMA SE ALIMENTADA EXCLUSIVAMENTE POR CABOS DE POTENCIA COM BLINDAGEM DO CABO ATERRADA NAS MALHAS TERMINAIS

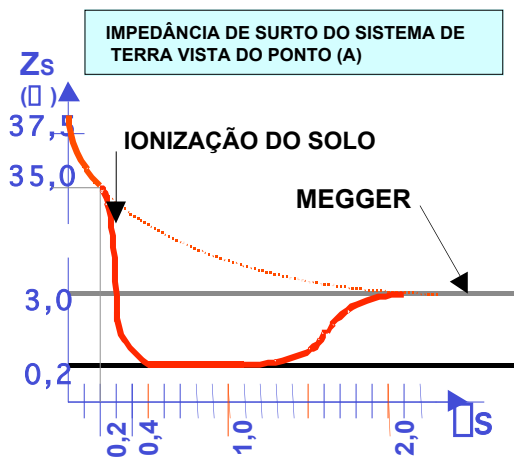


FIGURA 3 – CURVA DE VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DINÂMICA DE SURTO Zs COM O TEMPO

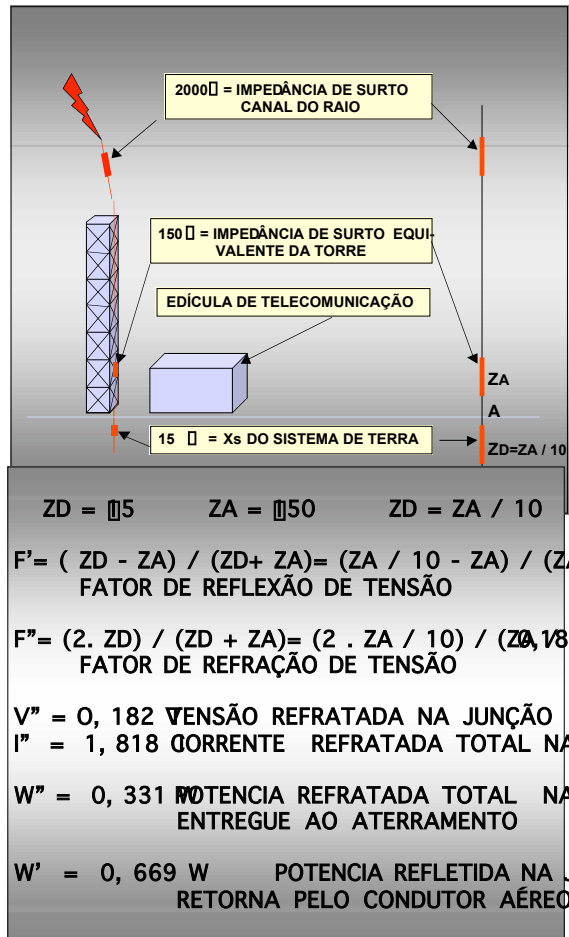


FIGURA 4- VALOR DA TENSÃO, DA CORRENTE E DA POTÊNCIA REFLETIDAS E REFRACTADAS EM UMA JUNÇÃO DE ZA E ZD COM A RELAÇÃO 10:1

Enquanto trafega para cima e para baixo ao longo do condutor, as ondas de impulso de corrente induzem tensões de surto nos circuitos sensíveis situados no interior da edícula.

O valor da corrente refletida na junção A corresponde a 181,8 % do valor da corrente que incide na junção mencionada, o que aumenta o efeito indutivo nos circuitos internos da edícula. Estes condutores são vulneráveis, pois geralmente não são blindados, nem são conduzidos no interior de bandejas metálicas fechadas.

Assim sendo, quanto maior for o valor da corrente refletida e o tempo de exposição dos circuitos internos ao efeito das correntes que descem e sobem pelo condutor, maior será o risco de dano aos dispositivos eletrônicos situados no interior da edícula.

5.0-AUMENTO DO RISCO DE DANOS CAUSADOS POR TENSÃO DE SURTO INDUZIDA, COMO CONSEQUÊNCIA DA REDUÇÃO DO VALOR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.

A Figura 5 ilustra o que acontece quando a relação de impedâncias de surto na junção é de 30:1. Isto ocorre por exemplo quando o valor da impedância de surto equivalente do condutor de descida do pára-raios da torre é de 150 Ω, e a impedância dinâmica de surto (Xs) do sistema de aterramento tem o valor de 5Ω.

A Figura 5 mostra que cada vez que um par de ondas de corrente e de tensão atinge o ponto de junção A, apenas 12,6 % da potência do par é drenada para o sistema de terra e 87,4% da potência mencionada é refletida e continua circulando no condutor aéreo. O condutor aéreo funciona portanto como indutor para os circuitos situados no interior da edícula. O valor da corrente refletida após encontrar a junção A chega a atingir 193,1 % do valor da corrente incidente, o que tende a aumentar o efeito indutivo mencionado.

$Z_D = 5$	$Z_A = 150$	$Z_D = Z_A / 30$
$F^v = (Z_D - Z_A) / (Z_D + Z_A) = (5 / 30 - 150) / (5 + 150)$ FATOR DE REFLEXÃO DE TENSÃO		
$F^i = (2 \cdot Z_D) / (Z_D + Z_A) = (2 \cdot 5 / 30) / (5 + 150)$ FATOR DE REFRAÇÃO DE TENSÃO		
$V^r = 0,065$ TENSÃO REFLETADA NA JUNÇÃO		
$I^r = 1,931$ CORRENTE REFLETADA TOTAL NA JUNÇÃO		
$W^r = 0,126$ POTENCIA REFLETADA TOTAL NA JUNÇÃO ENTREGUE AO ATERRAMENTO		
$W' = 0,874$ W POTENCIA REFLETADA NA JUNÇÃO E RETORNA PELO CONDUTOR		

FIGURA 5- VALOR DA TENSÃO, DA CORRENTE E DA POTÊNCIA REFLETIDAS E REFRATADAS EM UMA JUNÇÃO DE (Z<sub>A</sub>) E (Z<sub>D</sub>) COM A RELAÇÃO 30:1

Pode-se concluir portanto que a medida que diminui o valor da resistência do sistema de aterramento da edícula, os seguintes fenômenos ocorrem:

- Torna-se menor o valor da potência do surto que transforma-se em calor, cada vez que um par de ondas de corrente e de tensão chega à junção A. Em outras palavras, se o valor de (Z<sub>D</sub>=R) é pequeno, a perda (i<sup>2</sup>R) não pode ser grande.
- Torna-se maior o valor da corrente refletida que sobe novamente pelo condutor. Esse crescimento é assintótico e para Z<sub>D</sub>= R= 0 a corrente dobra de valor.
- O tempo total de transformação da energia do raio em calor aumenta.
- Aumenta portanto o tempo de exposição dos circuitos no interior da edícula aos efeitos indutivos causados pelas ondas de corrente que sobem e descem no condutor aéreo.

6.0-EM QUE CONDIÇÕES É MÁXIMA A TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA DO RAIO EM CALOR ?

A transformação em calor é máxima quando a extremidade de um condutor é ligada a uma resistência concentrada com valor ohmico numericamente igual à impedância de surto do condutor pelo qual trafega o surto. Na Figura 6 tem-se Z<sub>A</sub> = 150Ω.

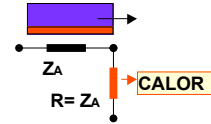


FIGURA 6 – TRANSFORMAÇÃO MÁXIMA EM CALOR

7.0- TRANSFORMAÇÃO EM CALOR ACELERADA PELO USO DE ELETRODOS VERTICAIS EM CASCATA

Quando um eletrodo vertical (com resistência concentrada igual a (Z<sub>A</sub>)) é interligado a um ponto intermediário de condutor subterrâneo com impedância de surto (Z<sub>A</sub>), tem-se a configuração mostrada na Figura 7:

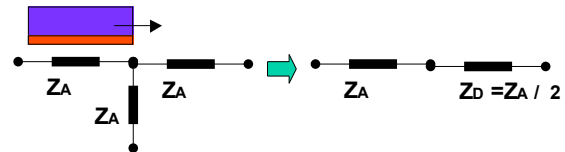


FIGURA 7 – ELETRODO VERTICAL COM (R= Z<sub>A</sub>), LIGADO A CONDUTOR SUBTERRÂNEO COM IMPEDÂNCIA DE SURTO (Z<sub>A</sub>)

Cálculos semelhantes aos mostrados na Figura 5, efetuados utilizando os dados da Figura 7, mostram que na junção do eletrodo vertical (resistência concentrada de 150 Ω) com o condutor subterrâneo, com impedância de surto também com 150 Ω, resulta que 44,4% da potência do surto que chega a junção transforma-se em calor no eletrodo vertical, e 44,4% da potência segue trafegando no braço horizontal ligado à junção. Apenas 11,1 % da potência é refletida na junção (ver Figura 8).

Esse resultado mostra que se diversos eletrodos com resistência concentrada de 150 Ω forem interligados a um condutor subterrâneo horizontal, cuja impedância de surto seja também de 150, consegue-se uma rápida transformação da potência do impulso em calor, como é mostrado na Figura 8

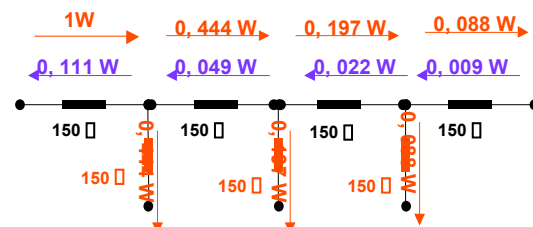


FIGURA 8 – TRES ELETRODOS VERTICAIS COM 150 Ω CAUSAM UMA RÁPIDA TRANSFORMAÇÃO DA ENERGIA DO IMPULSO EM CALOR

A Figura 8 mostra que depois de encontrar 3 eletrodos verticais de 150  $\Omega$ , cerca de 72,9 % da potência do impulso foi transformada em calor, e apenas cerca 11,1 % da potência foi refletida pela junção inicial.

## 8.0- UTILIZAÇÃO DO ANEL DE AMORTECIMENTO

A Figura 9 mostra a configuração típica do anel de amortecimento circunscrevendo a edícula e a torre. O anel é ligado por dois condutores ao restante da malha de terra. É ligado também por dois condutores às ferragens da edícula.

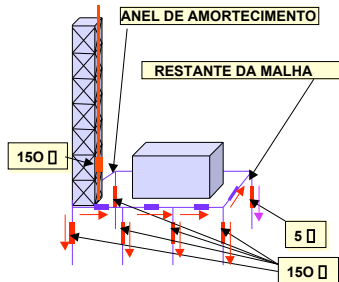


FIGURA 9 – ARRANJO TÍPICO DO ANEL DE AMORTECIMENTO

Em época de instalação do anel, um eletrodo vertical, ainda separado do mesmo, é cravado até uma profundidade para a qual o terrômetro indique o valor de cerca de 150  $\Omega$ . O eletrodo é então ligado ao anel. Para os demais eletrodos interligados ao anel, utiliza-se a mesma profundidade de cravação. Se necessário, os eletrodos podem ser cravados fora da vertical, desde que cada um deles apresente um valor ôhmico de cerca de 150  $\Omega$ , quando medido separado do restante do sistema de terra.

A utilização do anel de amortecimento reduz drasticamente o valor da tensão induzida nos circuitos internos da edícula. Isto é particularmente importante quando o valor da resistência do sistema de aterramento é de apenas alguns ohms. O uso do anel de amortecimento atrasa em frações de 1  $\mu$ s o controle de tensão ao longo da antena, permitido pelo baixo valor da resistência de aterramento da malha. Isto entretanto, não tem geralmente qualquer consequência prática para a antena.

A elevação de potencial de terra do anel é aproximadamente solidária com a elevação do potencial das ferragens da edícula e tem área de atuação de poucos metros contados a partir do condutor subterrâneo. Seu efeito é em tudo semelhante ao que ocorre quando um raio atinge um objeto aterrado na malha de terra de uma SE.

## 9.0- EXPERIÊNCIA PRÁTICA

O anel de amortecimento com eletrodos de 150  $\Omega$  vem sendo utilizado por diversas instalações de telefonia celular da ATL. A maioria das subestações da COPEL utiliza a técnica do anel com eletrodos verticais circunscrevendo a Casa de Comando ou Casa de Relés, sem entretanto especificar o valor individual de 150  $\Omega$  para os eletrodos verticais. O mesmo procedimento foi utilizado nas SE's de Serra da Mesa e Samambaia, do sistema de FURNAS.

## 10.0- CONCLUSÕES

A utilização de instalações com sistemas de terra que tenham resistência de aterramento com valor de poucos ohms, resulta em um aumento do valor das tensões induzidas nos circuitos eletrônicos internos e externos da instalação devido a perturbações aperiódicas, como descargas atmosféricas, manobras de disjuntores e chaves etc. Tende a aumentar também o tempo de exposição destes circuitos as perturbações mencionadas.

Para evitar este inconveniente, deve-se utilizar um anel de amortecimento circunscrevendo a edificação, interligado com eletrodos verticais com 150  $\Omega$  quando medidos individualmente. Este anel reduz drasticamente as tensões induzidas nos circuitos internos e externos e o tempo de exposição dos mesmos às perturbações.

A utilização do anel permite também que o reduzido valor da resistência de terra da malha local controle a sobretensão no condutor que recebe a descarga, após um pequeno atraso de atuação que corresponde a uma fração de 1  $\mu$ s.

O efeito de elevação de potencial de terra impulsivo, atinge apenas poucos metros a partir do condutor do anel. Como o anel é interligado com a ferragem da edificação, o valor do potencial externo é drasticamente reduzido nas junções das ferragens e chega muito amortecido ao interior da edificação.

Na realidade a elevação de potencial de impulso que ocorre nas imediações do anel é em tudo semelhante a elevação de potencial de terra que ocorre na malha de qualquer instalação, quando um raio atinge um condutor aterrado na mesma.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S.T.Sobral, C.A.O.Peixoto, D.Mukhedkar, "Ground Potential Distribution on the Neighbourhood of Itaipu Generation Complex" IEEE Vol.PWRD-1 JAN 1986 pp:85-90
- (2) S.T.Sobral, C.A.O.Peixoto, D.Fernandes, Dinkar Mukhedkar, "Grounding Measurements at Itaipu Generation Complex Using the Extended Eleck Method", IEEE- Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1553-1563
- (3) S.T.Sobral, J.J.H.Santos, D.Mukhedkar; "A Proposal For Ground Measurement Techniques in Substations Fed Exclusively by Power Cables" IEEE- Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1403-1409
- (4) IEEE Std 80-Guide for Safety in AC Substation Grounding
- (5) C.F.Wagner, G.D.McCann "Wave Propagation on Transmission Lines" – Westinghouse R.B.
- (6) S.T.Sobral, Sérgio L.Lamy, David S.Rezende, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnéticas em Subestações da Copel", XIII SNPTEE, 1995, FI/GSU/12
- (7) S.T.Sobral, Murilo V.Serra, A.Milanez, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Serra da Mesa", XIV SNPTEE, 1997, GSI/10
- (8)- S.T.Sobral, A.J.Sério, O.Tessmer, R.Campaner "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caxias, da Copel", XIV SNPTEE, 1997, GSU/23