SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GCQ 13
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XIII

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

A IMPORTÂNCIA DAS JUNÇÕES DE CONDUTORES METÁLICOS E DOS ELETRODOS DE AMORTECIMENTO NO CONTROLE DE PERTURBAÇÕES APERIÓDICAS- APLICACÕES EM PROJETOS

*** Sérgio Toledo Sobral** **Jorge Amon Filho** **David S. Rezende** **Ricardo Prada**
Sérgio C. Sobral

ST&SC-Serviços Técnicos Ltda **FURNAS** **COPEL** **PUC.RJ**

SUMÁRIO

Apresenta-se inicialmente o conceito segundo o qual a junção de condutores funciona como um "operador" que introduz modificações drásticas no valor instantâneo das ondas de tensão e de corrente, na medida que elas trafegam pelos condutores e chegam até a junção. Apresenta-se em seguida o conceito de eletrodo de amortecimento, que é capaz de acelerar a conversão da energia do raio em calor. Em seguida apresenta-se as principais conclusões praticas sobre o assunto. Comenta-se que a resistência de aterramento não é uma figura de mérito adequada para indicar se uma instalação elétrica é ou não segura.

PALAVRAS-CHAVE
Resistência; junções; amortecimento; interferência; ruídos; ondas trafegantes; descargas.

1.0 -INTRODUÇÃO

O artigo relembra que as junções metálicas e os eletrodos de amortecimento tem grande importância no controle de ruídos e outras perturbações causadas por fenômenos aperiódicas, tais como raios, operação de chaves seccionadoras e disjuntores, manobras de circuitos etc.

Embora essa tecnologia já esteja em uso, com muito sucesso, há mais de 25 anos, em importantes usinas, subestações e instalações de telecomunicação de FURNAS, da COPEL, da ESCELSA, da ENERSUL, etc, e mais recentemente em 142 instalações de telefonia celular da CLARO, uma grande parte da comunidade técnica nacional não tomou ainda conhecimento de seu modo de atuação e de sua importância. Além disso, as normas técnicas não dedicam ao assunto uma única linha.

Assim sendo, o IT reapresenta de uma maneira mais condensada, a descrição das principais idéias e diretrizes de utilzação das junções metálicas e dos eletrodos de amortecimento. Esses assuntos já foram apresentadas por partes, em diversos artigos anteriores e também em artigos recentes. Da-se enfase no presente IT aos testes feitos no laboratório de alta tensão do LACTEC.

O artigo relembra também que quando ocorre uma perturbação tal como um raio, uma manobra ou um chaveamento, o circuito reaje por suas impedâncias de surto, próprias e mútuas. Mostra-se que o valor dessas impedâncias varia relativamente pouco com a freqüência e em alguns caso chega a não variar com a mesma. O IT mostra que por este motivo devem ser chamadas de "perturbações aperiódicas" e não "perturbações de alta frequencia". Faz-se tambem comentários sobre o uso inadequado da expressão e= L (di / dt).

(*) ST&SC -Rua Vice Governador Rubens Berardo 175 B1 grupo 1002 - Gávea - Rio de Janeiro - RJ
CEP 22 451-070 – Tel/Fax 21-2294-6456 email: stsobral@terra.com.br

2.0 – A IMPORTÂNCIA DE JUNÇÃO DE CONDUTORES

Devido a importância do assunto, reapresenta-se a seguir alguma explicações e alguma Figuras que constam de artigos recentes:

Segundo a Teoria das Ondas Trafegantes [10], as junções de condutores, tais como as mostradas na Figura 1, são como "operadores", que reduzem o valor instantâneo das ondas de tensão e de algumas ondas de corrente, que trafegam nos condutores da junção.
As Figuras 2 e 3 ilustram o caso de uma junção de 1condutor com 3 condutores. Os fatores de refração (F") e de reflexão (F'), para ondas de tensão, podem ser determinados como segue:

$Z_F = Z_A / 3$ (paralelo das 3 impedâncias de surto de saída, todas iguais a Z_A

$F'' = 2.Z_F/(Z_A+Z_F) = 2.(Z_A/3) / (Z_A/3+Z_A)) = 0.5$

$F' = (Z_F-Z_A)/(Z_F+Z_A) = (Z_A/3-Z_A) / (Z_A/3+Z_A)) = -0.5$

A Figura 4 mostra o resultado final da aplicação dos "operadores" à junção, como é detalhado na Ref [13]: *O valor instantâneo das ondas de tensão caiu pela metade em todos os 4 condutores ligados à junção. O mesmo acontece com o valor instantâneo de corrente nos 3 condutores de saída da junção mencionada. O valor da corrente aumenta apenas no condutor de entrada da junção*. Alem disso 75% da potência que chega à junção é refratada para os 3 condutores de saída da mesma e 25 % é refletido pelo condutor de entrada.

A Figura 5 mostra o circuito de teste utilizado para injetar uma descarga nas ferragens de uma canaleta de concreto armado, com 9 metros de extensão instalada no interior do laboratório do LACTEC. O valor de pico das ondas de tensão foram medidos a 1, 6 e 9 m do ponto de injeção. Evidentemente, devido à proximidade das junções nas ferragens da canaleta, o efeito de redução do valor das ondas de tensão causadas por, por exemplo, 15 junções em série, é muito menor que $(0,50)^{15}$. Mesmo assim foi medido uma queda do valor de pico das onsdas de tensão de várias dezenas de kV, ao longo de apenas 6m.

A Figura 6 é similar a Figura 5, porém os terminais da canaleta foram interligados externamente para simular um "condutor de equipotencialização". *As medições mostraram que o valor do pico das ondas de tensão aumentaram um pouco ao invés de diminuir, nas proximidades do ponto de interligação do "condutor de equalização" (os oscilogramas correspondentes constam da Ref [5]).*

A Figura 7 mostra o caso da junção de uma torre que suporta uma antena, ligada a uma pequena malha de terra, com resistência de terra de 2Ω. Supõe-se que a impedância de surto equivalente da torre seja 150 Ω. Os cálculos dos valores das ondas de corrente, de tensão e os valores de potência correspondentes, são mostrados na Figura 8.
Vê-se que devido ao pequeno valor da resistência da malha, o valor da corrente refletida, que retorna pelo poste, após a reflexão, é quase o dobro do valor da onda de corrente incidente. Isto pode causar perturbação nos circuitos eletrônicos da instalação e de seus vizinhos.

Apenas 5.2% da potência instantânea é refratada para a resistência de 2Ω, sendo transformada em calor por i^2R. Inicialmente 94,8% da potência incidente é refletida, percorre o poste para cima, reflete-se na sua extremidade e volta à malha, onde perde outros 5,2 %. O processo se repete até que toda a energia seja transformada em calor. Isto expõe os circuitos eletrônicos locais e vizinhos a longos ciclos de indução com corrente elevada.

3.0 –ELETRODOS DE AMORTECIMENTO

O eletrodo de amortecimento é um eletrodo vertical usual, de pequenas dimensões, com valor ôhmico de cerca de 150 Ω (ver Figura 9). Este valor é da mesma ordem de grandeza da impedância de surto dos condutores subterrâneos. Este casamento de impedâncias maximiza a conversão em calor da energia das ondas que chegam até o eletrodo de amortecimento. A Figura 10 mostra que 3 eletrodos de amortecimento ligados em cascata, (com um espaçamento adequado entre eles) conseguem reduzir a potência aplicada de 100% para apenas 8,8% (os cálculos são semelhantes aos mostrados na Figura 8).

4.0- SUMARIO SOBRE A AÇÃO DAS JUNÇÕES E DOS ELETRODOS DE AMORTECIMENTO

a) Cada junção de condutores (como as que existem nas malhas de terra, nas treliças das torres e pórticos, nas ferragens de concreto armado, nas escadas metálicas, nos esteiramentos de cabos,etc.) é semelhante a um "operador" que causa importantes reduções nas intensidades das ondas de tensão e de corrente, que trafegam até à junção, produzidas por perturbações aperiódicas (raios, operação de disjuntores e chaves, manobras de circuitos, etc)
b) Eletrodos verticais, inclinados ou horizontais curtos, com 150 ohms cada, ligados a algumas junções de malha de terra são chamados eletrodos de amortecimento. Esses eletrodos maximizam a transformação da energia da perturbação aperiódica em calor

c) Nos “pontos quentes” da malha são aterrados os dispositivos e componentes que injetam perturbações aperiódicas, tais como: condutores e hastes captoras de raios em uma SE; captores de raios de edificações e edículas; pára-raios de potência; pórticos e estruturas metálicas; torres e postes de sustentação de antenas; postes de iluminação externa; cercas e alambrados.

d) Nos “pontos frios” da malha, a intensidade das ondas de tensão e de corrente já foi bastante reduzida, devido às junções de condutores e eletrodos de aterramento encontrados no percurso. Nestes “pontos frios”, podem ser aterradas as partes mais sensíveis dos circuitos: barramento de terra (“single point”) das Salas Eletrônicas: “single point” das instalações de telecomunicação; partes metálicas dos “conteiners” de telecomunicação e telefonia celular; parte das esteiras de cabos próximos aos “conteiners”.

e) Entre qualquer “ponto quente” e qualquer “ponto frio” devem existir pelo menos 3 eletrodos de amortecimento, em qualquer percurso sobre a malha de terra.

A metodologia de “aterramento seletivo” caracterizada pelos subitens (c), (d) e (e) do item 4.0, esta descrita em detalhes nas seguntes referências [3,4,6,12,14]. Essas referências relacionam algumas usinas, SE’s, instalações de telecomunicação e de telefonia celular que utilizam esta metodologia.

f) Não existe equipotencialidade em um sistema de aterramento submetido a perturbações aperiódicas. Entretanto depois de encontrar diversas junções e eletrodos de amortecimento, a intensidade das ondas de corrente e de tensão estarão bastante reduzidas (equipotencialidade grosseira).

g) Novos condutores que interliguem pontos remotos da malha, by-passando junções e eletrodos de amortecimento, podem aumentar, ao invés de diminuir, a intensidade das ondas de tensão e de corrente. Isto foi verificado tambem no teste do Lactec, utilizando o mesmo circuito mostrado na Figura 6, porem interligando os extremos da canaleta de concreto armado (ver Ref [5], a Figura 6 e sexto parágrafo do item 2.0 anterior).

h) A reorganização dos cabos sob a forma de “chicotes” (“bundles”), cada um deles destinado a um painel específico (com um condutor terra em cada ‘’chicote”), minimiza os ruídos de modo comum e diferencial que chegam aos painéis. A minimização ocorre mesmo que uma onda de corrente consiga trafegar até o interior da Sala Eletrônica. A reorganização mencionada é feita na entrada da Sala Eletrônica, nas imediações do “single point” (ver Figura 11, comentada em mais detalhe mais a frente).

i) O valor da resistência de aterramento, quer seja alto, quer seja baixo, nada indica “á priori” sobre a segurança da instalação elétrica, tanto para perturbações periódicas como *aperiódicas*

j) *Um valor baixo de resistência de aterramento (por exemplo menor que 3 ohms), pode aumentar o valor das tensões induzidas nos circuitos eletrônicos das instalações e de seus vizinhos. O problema pode ser resolvido com eletrodos de amortecimento.*

5.0 – TÉCNICAS DE PROJETO DAS INSTALAÇÕES PARA MINIMIZAR PERTURBAÇÕES

Um sumário gráfico desses procedimentos é apresentado na Figura 11, que inclui também os procedimentos mencionados no item 4.0 anterior.Estes procedimentos foram aplicados com sucesso há mais de 25 anos, em usinas, subestações, instalações de telecomunicação e telefonia celular de diversas Concessionárias de energia (ver Referências [3,4,6,12,14]) .

Nos percursos externos, os cabos são segregados pela sua importância e possibilidade de causar perturbações, em até 5 vias de cabos distintas (ver Figura 12). Na entrada da Sala Eletrônica os cabos são rearrumados em “chicotes” cada um destinado a um painel específico. Existe um condutor terra em cada “chicote”’. Foi testado no LACTEC que os chicotes minimizam os ruídos de modo comum e diferencial que chegam nos painéis (ver referências [3,4,5,6,7,8,12,14]).

A Figura 13 ilustra a aplicação da técnica de aterramento seletivo em uma instalação de telefonia celular.

6.0 – RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO E INTERAÇÕES COM INSTALAÇÕES VIZINHAS

O item (4.0. i) está de acordo com o fato de existirem usinas e SE’s operando há mais de 25 com valores de resistência de terra acima de 40 ohms [1,2, 3,4, 6, 11, 12, 14]. Há tambem diversas de instalações de telefonia celular da CLARO operando há varios anos com valores de resistência da ordem de grandeza mencionada.

A segurança de uma instalação e de seus vizinhos depende dos seguintes itens: das junções, dos eletrodos e anéis de amortecimento; do aterramento seletivo em pontos “frios” e “quentes”; da técnica de condução de cablagens utilizada; das blindagem e seus aterramentos; do uso adequado de “chicotes”. Mas a segurança da instalação e de seus vizinhos não depende de um valor baixo da resistência de aterramento da instalação, muito pelo contrário.

A experiência mostra que danos em instalações vizinhas ocorrem por indução à distância (devido a resistências baixas da malha local), ou devido ao aterramento do sistema de suprimento externo em um ponto quente da malha. A perturbação chega ao vizinho via suprimento externo. Há uma preocupação injustificada com a possibilidade da elevação de potencial de terra impulsiva da malha local atingir instalações próximas. Não há evidências reais sobre esse tipo de perturbação. Se existisse, seria problemática a proximidade com qualquer prédio onde o SPDA é aterrado em simples eletrodos de aterramento concentrados e frequentemente de elevado valor. Esse risco não existe na realidade. O assunto merece medições cuidadosas para servir de calibração de modelos de simulação digital.

7.0 - PERTURBAÇÕES “APERIÓDICAS” E NÃO “PERTURBAÇÕES DE ALTA FREQÜÊNCIA”

O que caracteriza as perturbações tais como: descargas atmosféricas; operação de disjuntores e chaves seccionadora; manobra de circuitos, é o fato da fonte perturbadora ser aplicada no circuíto e não repetir periodicamente a mesma excitação.

Neste caso, o circuito responde por suas impedâncias próprias e mútuas de surto, segundo as expressões a seguir, que são válidas para cada valor instantâneo das ondas de tensão e corrente (e) e (i):
$(e_1) = (Z_1).(i_1)$ $(e_2) = (Z_{12}).(i_1)$
Tem-se que (Z_1) é a impedância de surto própria de um trecho elementar do condutor 1. Tem-se também que (Z_{12}) é a impedância de surto mútua entre um trecho elementar do condutor 1 e um trecho elementar do condutor 2.
O cálculo do parâmetro (Z_1) leva em conta todos os parâmetros L, C, R, G referentes a um trecho elementar do condutor 1. O mesmo vale para (Z_{12}) com referência a trechos elementares dos condutores 1 e 2.

Assim sendo, é mais correto reservar o nome de perturbações de alta freqüência para as perturbações periódicas causadas por harmônicos de alta freqüência, pois os valores de (Z_1) e de (Z_{12}) variam pouco com a freqüência. Esses parâmetros são praticamente invariantes se R e G forem pequenos, ou cumprirem certas relações. Portanto, para um trecho elementar de um condutor horizontal, vertical ou inclinado, vale a expressão $(e_1) = (Z_1).(i_1)$ para todos os pontos das ondas de corrente e de tensão.

8.0- UTILIZAÇÃO INDEVIDA DA EXPRESSÃO e= L (di / dt)

Deve ser lembrado que não é correto utilizar a expressão $e_1 = L\,(d\,i_1 / dt)$ para a frente de onda aperiódica ao invés de $(e_1) = (Z_1).(i_1)$, pois os conteúdos informacionais das duas expressões são diferentes.
Na verdade $e_1 = L\,(d\,i_1 / dt)$ vale apenas para uma bobina, onde a geometria da mesma desabilitou os parâmetros C, R e G deixando apenas L.

9.0– CONCLUSÕES

Acredita-se que tendo em vista a vasta experiência operacional e aos testes laboratoriais preparados e publicados, já é tempo das normas técnicas incluírem recomendações sobre a utilização sistematica das junções, dos resistores de amortecimento e sobre a técnica de aterramento seletivo nos pontos “quentes” e “frios”.

10.0- REFERÊNCIAS

[1] - S.T. Sobral (IESA), J. O. Barbosa, J.V.C. Nunes, E. Chinelli, A. Ferreira Netto (LIGHT), D. Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). “Ground Potential Rise Characteristics Of Urban Step - Down Substations Fed By Power Cables- A Practical Example”
IEEE Summer Meeting, 1987, San Francisco
IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, $N^0$4, OCT 1988 pp 1564-1572ry, Vol.PWRD-3, $N^0$4, OCT 1988 pp 1545-1552

[2]- S.T. Sobral (IESA), W.G. Castinheiras, M. Nielsen (PETROBRAS),V. S. Costa (ELETROBRAS), D. Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL)
“Interferences Between Faulted Power Circuits and Communication Circuits or Pipelines- Simplification Using the Decoupled Method”
IEEE paper 91 WM 107-3 PWRD, Winter Meeting, 1991, New York

[3]- S. T. Sobral (IESA) , Murilo V. Serra (FURNAS), Abelardo Milanez (IESA).
"Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na Subestação de Serra da Mesa".
XIV SNPTEE, Belém, 1997. Grupo XI (Sobretensões), artigo GSI/10

[4]- S.T. Sobral (ST&SC), Alceni J. Sério, Osmar Tessmer, Ronni M. Campaner (INTERTECHNE/LEME-/ENGEVIX/ESTEIO) João A. Oliveira (COPEL). “Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caxias, da Copel” XIV SNPTEE, Belém- 1997, Grupo VIII, IT GSU/23

[5]- S. T. Sobral (ST&SC) , S. C. Sobral (NOS) , M. M. Nogueira, F. L. A. Souza E A. R. M. Souza (LIGHT). "Condições Onde Pode Existir Equipotencialidade em um Sistema de Aterramento Submetido a Perturbações Periódicas e Aperiódicas".
XV SNPTEE, Foz do Iguaçu - Brasil, 1999. Grupo X (Sobretensões), artigo GSI/24

[6]- David S. Rezende (COPEL), José E.D. Olesko (COPEL), Sérgio T. Sobral (ST&SC) .“Controle de Interferências Eletromagnéticas nas Subestações da Copel” VII ERLAC- Encontro Regional Latino - Americano da CIGRE

[7]- Sérgio T. Sobral (ST&SC), Flávio Luciano A. Souza, Murilo M.Nogueira, Georges Azzam (LIGHT)
“A Técnica de Blindagem Adaptada Para Instalações Digitalizadas que Alimentam Cargas Metropolitanas”
XVI -SNPTEE - São Paulo- 2001 - STE I- Seção Técnica Especial

[8]- Sérgio T.Sobral (ST&SC), David S.Rezende, José Eduardo D.Olesko (COPEL)
“A Técnica de Disposição da Cablagem em “Chicotes” para Reduzir os Ruídos de Modo Comum e Diferencial- Resultado das Medições” XVI -SNPTEE - São Paulo- 2001 - STE I- Seção Técnica Especial

[9]- S.T.Sobral (ST&SC), S.C.Sobral (ONS), J.R. Dellacqua (ESCELSA), A.P.Ribeiro (ENERSUL), David S.Rezende

(COPEL) "Em que condições pode existir equipotencialidade aproximada durante descargas atmosféricas em ferragens de prédios que abrigam instalações digitalizadas" XVII SNPTEE- GCQ 22

[10] - C.F.Wagner , G.D.McCann "Wave propagation in transmission lines" Westinghouse T&D Reference Book

[11]- S.T.Sobral (ST&SC), S.C.Sobral (ONS), J.R. Dellacqua (ESCELSA), A.P.Ribeiro (ENERSUL), David S.Rezende (COPEL) "Casos em que uma resistência de aterramento com valor muito reduzido pode prejudicar o desempenho de instalaações digitalizadas" XVII SNPTEE- GCQ 22

[12] - Sergio T. Sobral (ST&SC), Ariceu Martineli (ESCELSA), Antonio Luiz de Assis (ESCELSA), José Romeu Dellacqua (ESCELSA), Aroldo Cozer Boynard (ENERSUL), Antonio Pádua Ribeiro (ESCELSA) "Interference Control- Power Plants, Substations, Telecommunication Installations" IEEE Transmission & Distribution Latin America 2004

[13] - Sérgio T.Sobral (ST&SC), David S. Resende(COPEL), Sérgio C. Sobral (ONS) "Como As Resistências De Aterramento Controlam Perturbações Periódicas E Aperiódicas: Verdades E Mitos" XVIII SNPTEE- Curitiba- 2005 Artigo GCQ-05

[14] - Sérgio T. Sobral (ST&SC), Ariceu Martineli (ESCELSA), Antonio Luiz de Assis (ESCELSA), José Romeu Dellacqua (ESCELSA), Aroldo Cozer Boynard (ENERSUL), Antonio Pádua Ribeiro (ESCELSA). "Design Procedures Used By Two Brazilian Utilities To Control Electromagnetic Interferences in Power Substations, Power Plants and Telecommunication Installations" International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2005

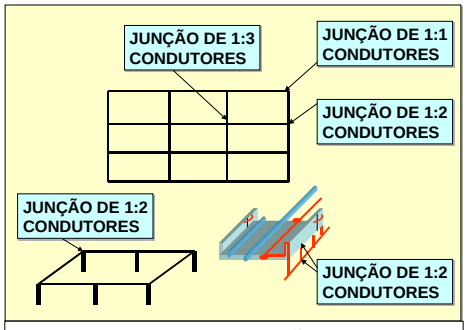

Figura 1 - Exemplos de Junções

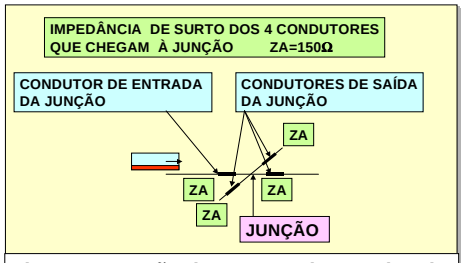

Figura 2- Junção de 1: 3 condutores iguais

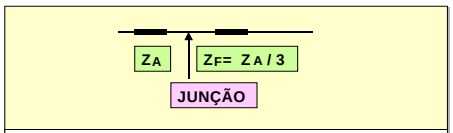

Figura 3-Impedância de surto equivalente (Z_F) dos condutores de saída da junção

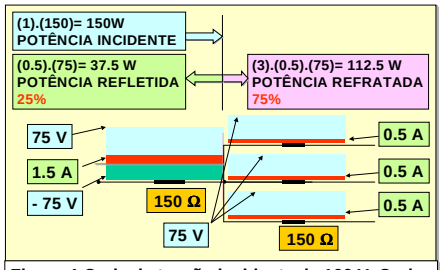

Figura 4-Onda de tensão incidente de 100 V. Ondas de corrente e de tensão modificadas pela junção. Potência instantânea antes e depois da junção

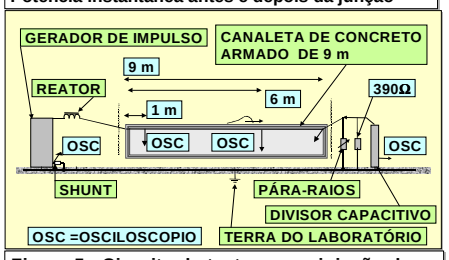

Figura 5 - Circuito de teste para a injeção de descargas na armação da canaleta

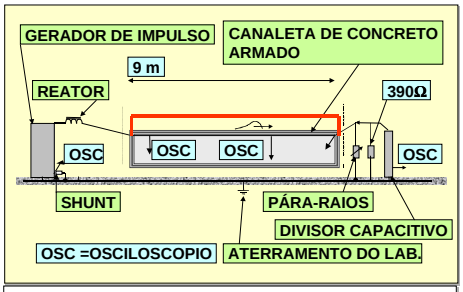

Fig 6- Interligação externa dos terminais da canaleta

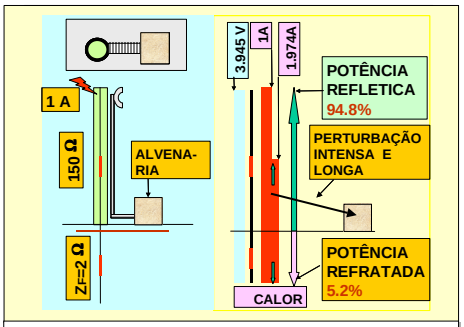

Figura 7- Junção de um poste (150 Ω) com uma malha pouco extensa com (2 Ω)

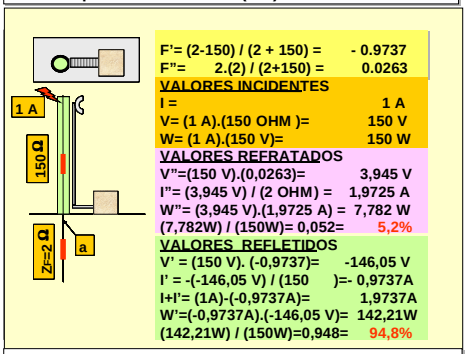

Figura 8-Cálculo dos valores refletidos e refratados em uma junção de 150 : 2 Ω

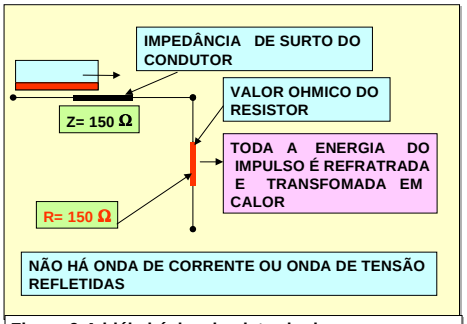

Figura 9-A idéia básica do eletrodo de amortecimento casamento de impedância para maximizar transformação da energia em calor

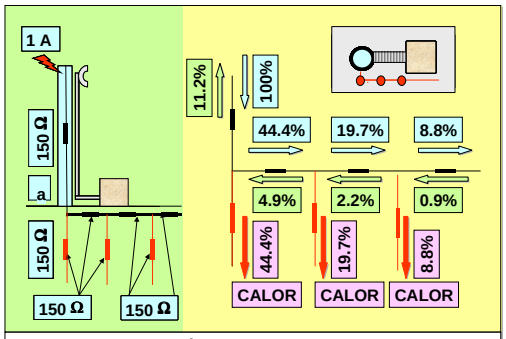

Figura 10- O efeito drástico de 3 eletrodos de amortecimento em cascata

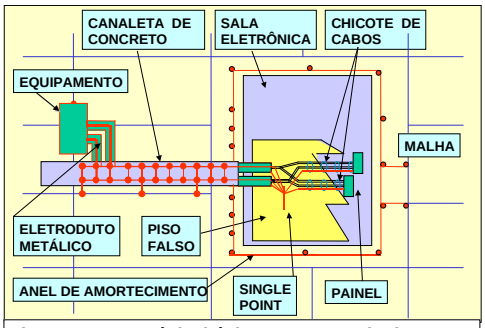

Figura 11- Estratégia básica para controle de perturbações eletromagnéticas

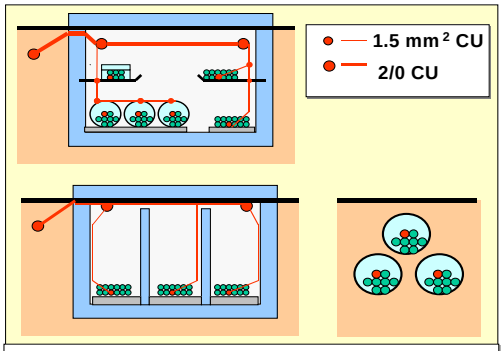

Figura 12 - Criação de "ambientes" segregados

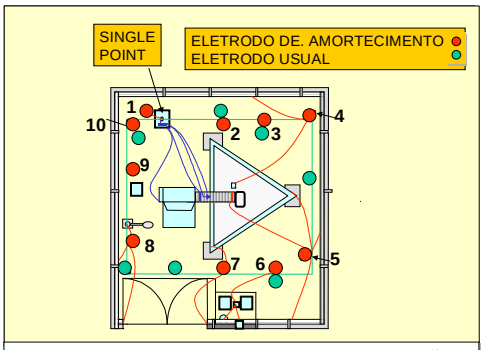

Figura 13-Eletrodos de amortecimento - instalações de telefonia celular

C12.0 – DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Sérgio Toledo Sobral
Graduado: PUC / RJ - Rio de Janeiro, 1964 – Engenheiro Eletricista
Companhia: ST & SC Serviços Técnicos Ltda.
Cargo: Diretor e proprietário

Sérgio Cordeiro Sobral
Graduado: UERJ (1994); Mestrado PUC (1997)
Companhia: ONS- Operador Nacional do Sistema Eletrico
Cargo: Engenheiro Senior

Jorge Amon Filho
Graduado: PUC-Rio de Janeiro, 1975, Engenheiro Eletricisa Mestrado PUC (1986)
Companhia: FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976
Cargo: Gerente da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento de Transmissão; Coordenador do Comitê de Estudos A3 do CIGRE

David S. Rezende
Graduado:UFMG (1970) Mestrado: EFEI (1976)
Companhia: COPEL-Companhia Paranaense de Energia
Cargo: Engenheiro Consultor

Ricardo Prada
Graduado: PUC-Rio, 1975, Engenheiro Eletricista; Mestrado: PUC-Rio, 1977; Doutorado: Imperial College, Univ. of London, 1980
Companhia: PUC-Rio
Cargo: Professor Associado