



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

GCQ-22  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

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

**EM QUE CONDIÇÕES PODE EXISTIR EQUIPOTENCIALIDADE APROXIMADA DURANTE DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS NAS FERRAGENS DE PRÉDIOS QUE ABRIGAM INSTALAÇÕES DIGITALIZADAS**

**Sérgio T.Sobral \***  
**Sérgio C. Sobral**  
**T&SC Servicos Tecnicos Ltda**

**J.R.Dellacqua**  
**ESCELSA**

**A.P.Ribeiro**  
**ENERSUL**

**David. S. Rezende**  
**COPEL**

**RESUMO**

O IT analisa em que condições as ferragens de uma edificação que abriga dispositivos digitais pode ser considerada aproximadamente como equipotencial, durante descargas atmosféricas.

Para criar um embasamento teórico para a análise em apreço, o IT mostra porque durante um curto-circuito (ou durante algumas perturbações harmônicas), a interligação de dois objetos metálicos por meio de um condutor de cobre com diâmetro adequado, garante geralmente que os dois objetos fiquem aproximadamente em um mesmo potencial.

Em contrapartida, o IT mostra que se uma descarga impulsiva for aplicada em um dos objetos mencionados, ou no condutor de interligação, pode surgir uma grande diferença de potencial entre os objetos, e entre qualquer par de pontos do condutor de interligação mencionado.

Comenta-se no IT que devido aos fatos acima mencionados, é fundamental ter claro em mente que uma interligação metálica entre dois objetos metálicos pode produzir uma quase equipotencialidade durante curto-circuitos (e em outras perturbações periódicas), mas pode aumentar a diferença de potencial entre os objetos metálicos interligados, durante descargas atmosféricas e outras perturbações aperiódicas.

O IT mostra ainda que uma parte considerável da literatura técnica, inclusive diversas normas nacionais e internacionais que tratam de proteção contra descargas atmosféricas, aparentemente tomam um conceito pelo outro e fazem recomendações que podem ser perigosas para a vida humana e para a segurança de equipamentos e dispositivos digitais.

O IT descreve ainda um teste realizado no laboratório de alta tensão do LACTEC em Curitiba. Em uma etapa deste teste foi aplicada uma onda de corrente impulsiva de 5 kA (7,8/22  $\mu$ s) diretamente nas ferragens de uma canaleta de concreto armado, com 9 m de extensão, o que permitiu verificar a distribuição de potencial impulsivo ao longo das ferragens da mesma.

Em seguida, as extremidades da canaleta foram interligadas por um condutor externo de aço, o que permitiu verificar se são ou não eficazes os "condutores de equipotencialização" recomendados por algumas normas.

O teste deveria verificar também a efetividade de um "condutor de equipotencialização" de cobre interligando os terminais da canaleta.

Entretanto, após cerca de uma dezena de descargas, que foram utilizadas para fazer as primeiras medições, um trecho do concreto da canaleta "explodiu", em um de seus segmentos centrais, danificando permanentemente a canaleta e impedindo a continuação daquela fase dos testes.

**PALAVRAS-CHAVE**

Equipotencialidade, equipotencialização, canaletas, concreto armado, blindagem impulsiva.

**1.0-INTRODUÇÃO**

A Referência (1) apresenta uma análise detalhada do ponto de vista teórico, sobre as condições em que uma quase equipotencialidade pode ser obtida durante perturbações periódicas e aperiódicas.

\* 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@parqueaivotas.com.br

O presente IT apresenta um sumário dessas condições e reporta testes feitos no laboratório de alta tensão do LACTEC que confirmam essas previsões teóricas.

## 2.0-CONDIÇÕES DE EQUIPOTENCIALIDADE DURANTE PERTURBAÇÕES PERIÓDICAS

Durante a ocorrência de um curto-circuito, ou de circulação de harmônicas, ou outras perturbações periódicas, a interligação de dois objetos metálicos por meio de um condutor de cobre que tenha um diâmetro adequado, geralmente garante que os objetos mencionados permaneçam aproximadamente no mesmo potencial durante a perturbação.

O principal motivo para que isso ocorra é que a impedância longitudinal do condutor de interligação é geralmente da ordem de décimos ou de milésimos de ohm.

Assim sendo, mesmo quando o condutor de interligação é percorrido por uma corrente periódica de valor relativamente elevado, a diferença de potencial entre os objetos interligados pode ser da ordem de frações de volt. É o que ocorre com a diferença de potencial aplicada entre as patas de um pássaro pousado nos condutores de uma LT, durante um curto-circuito. Isto ocorre também na malha de terra de cobre de uma SE.

Entretanto, a Referência (1) mostra que no caso da malha de terra de uma SE, a equipotencialidade deve-se não somente a baixa impedância longitudinal dos condutores da malha, mas em grande parte ao efeito do acoplamento magnético que existe entre os barramentos da SE e os condutores de cobre da malha que são paralelos ao barramento.

O acoplamento mencionado permite que uma grande porcentagem da corrente de defeito (cerca de 70-90%) circule pela malha como corrente "auto-neutralizada".

A parcela "auto-neutralizada" da corrente de defeito que circula na malha, causa uma queda de tensão ao longo da mesma. Entretanto, esta queda de tensão neutraliza a tensão longitudinal que é induzida nos condutores da malha pela circulação da corrente de defeito nos barramentos da SE (ver desenho ilustrativo na Ref (1)). Portanto, só uma pequena parcela da corrente de defeito que circula pela malha produz uma queda de tensão efetiva ao longo da mesma.

É por este motivo que todos os pontos da malha de terra de uma SE permanecem aproximadamente no mesmo potencial durante curtos circuitos, mesmo quando uma corrente elevada circula pelos condutores da malha.

## 3.0-PORQUE A INTERLIGAÇÃO METÁLICA ENTRE OBJETOS METÁlicos NÃO GARANTE EQUIPOTENCIALIDADE PARA PERTURBAÇÕES APERIÓDICAS.

De acordo com a teoria das ondas trafegantes, durante uma descarga atmosférica, ou outra perturbação aperiódica, cada trecho elementar do condutor que interliga dois objetos metálicos será representado por uma impedância de surto.

A impedância de surto de condutores tem valores típicos de 100 a 600 ohms, dependendo da distância à superfície de referência, de seu diâmetro, do material e do meio em que estiver situado (ver Referências (1-2)).

A onda de corrente do raio, que tem intensidade típica de alguns kA, trafega pelo condutor de interligação, e causa uma diferença de potencial de milhares de volts, mesmo entre dois pontos muito próximos do condutor de interligação, dependendo da forma da onda de corrente.

Assim sendo, o fato de interligar dois objetos metálicos por meio de um condutor com diâmetro adequado, não garante a equipotencialidade entre os objetos interligados. Pelo contrário, pode provocar uma grande diferença de potencial entre os mesmos, dependendo das formas de onda que podem trafegar no condutor de interligação.

## 4.0-SÃO MESMO EFICAZES OS "CONDUTORES DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO" RECOMENDADOS PARA AS EDIFICAÇÕES ?

Os fatos comentados no item anterior permitem levantar importantes questões sobre a efetividade e a conveniência de utilizar os chamados "condutores de equipotencialização" em edificações, conforme recomendado por algumas normas nacionais e internacionais. Esse assunto será analisado mais a frente, com base em testes realizados no laboratório de alta tensão do LACTEC.

## 5.0-O EFEITO DAS JUNÇÕES DAS FERRAGENS DAS EDIFICAÇÕES SOBRE AS ONDAS TRAFEGANTES.

Suponha-se que uma onda proveniente de uma descarga atmosférica (ou de outra perturbação aperiódica) trafega em um condutor da ferragem de uma edificação. Ao aproximar-se de uma junção das ferragens, os seguintes fenômenos acontecem(ver (2)):

- As ondas de tensão refratadas, que passam a trafegar nos trechos de ferragens que partem da junção (derivações), tem intensidade menor que a da onda incidente. Em todas estas derivações, são iguais os valores instantâneos das ondas de tensão refratadas.
- A intensidade instantânea das ondas de corrente refratadas, que trafegam nas derivações que saem da junção, são iguais à intensidade instantânea da onda de tensão refratada (igual em todos as derivações) dividida pelo valor da impedância de surto de cada braço.
- Na junção, forma-se uma onda refletida de tensão que tem polaridade contrária à da onda de tensão incidente. A soma do valor instantâneo da onda de tensão refletida com o valor instantâneo da onda de tensão incidente é igual ao valor instantâneo da onda de tensão refratada.
- Aumenta o valor instantâneo da onda de corrente no trecho da ferragem que chega a junção, por onde trafega a onda incidente.

Em conseqüência, em cada junção das ferragens, o valor da energia que chega à junção, subdivide-se pelos trechos de ferragens que saem da junção. O valor instantâneo da tensão reduz-se em todos os trechos de ferragens que chegam à junção. Pode-se dizer de uma maneira simplificada que as junções "espalham" a energia da descarga pelos condutores das ferragens. Reduzem também o valor instantâneo das ondas de tensão que trafegam em todos os condutores ligados diretamente à uma junção.

A onda proveniente da descarga continuará trafegando pelas ferragens, provocando interferências no interior e no exterior do prédio, até que toda sua energia se transforme em calor.

A transformação de energia em calor é máxima quando a onda trafegante encontra elementos resistivos distribuídos ou concentrados, com valor semelhante a impedância de surto do condutor por onde o surto trafega (100 – 600 ohms). Isto só ocorre efetivamente quando a descarga atinge o sistema de aterramento da edificação. Ao longo das ferragens há uma transformação em calor menos significativa.

#### 6.0-CONDIÇÃO DE EQUIPOTENCIALIDADE PARA PERTURBAÇÕES APERIÓDICAS

Após encontrar um número suficiente de junções, ao trafegar ao longo das ferragens do prédio, o valor instantâneo das ondas de tensão terá sido fortemente reduzido.

Assim sendo, em termos práticos, pode-se dizer que uma região genérica (A) de uma edificação, é aproximadamente equipotencial com relação a uma descarga que atinja um determinado ponto (B) das ferragens, desde que todos os caminhos sobre as ferragens, partindo de (B) e chegando a (A), tenham um número elevado de junções de ferragens.

#### 7.0-PORQUE OS “CONDUTORES DE EQUALIZAÇÃO” PODEM SER PREJUDICIAIS

Pelo exposto, pode-se concluir que é inadequado o uso de “condutores de equipotencialização”, com baixa impedância de surto, que interliguem a cobertura do edifício, onde é grande a probabilidade de descarga de raios, com os andares inferiores. Esses condutores criam “vias expressas” que permitem que parte da descarga atinja os andares inferiores sem serem adequadamente amortecidas pelas junções de ferragens.

#### 8.0-EFETIVIDADE DOS CONDUTORES DE DESCIDA EXTERNOS

Os condutores de descida externos, são uma das únicas “vias expressas” benéficas, principalmente quando são aterrados em anéis de amortecimento subterrâneos, ligados a eletrodos verticais com valor ôhmico adequado a uma rápida transformação da energia da descarga em calor. Essa transformação evita que as ondas de impulso permaneçam trafegando por um tempo relativamente longo nas ferragens da edificação, causando interferências no interior e no exterior do prédio. Deve ser lembrado que a presença do concreto envolvendo as ferragens, reduz ainda mais a velocidade de propagação da ondas de impulso nas mesmas.

#### 9.0 – COMPROVAÇÕES DE LABORATÓRIO

Foram feitos testes no laboratório de alta tensão do LACTEC, em Curitiba, como parte de um trabalho de pesquisa e desenvolvimento (P&D), desenvolvido em conjunto pela ESCELSA, ENERSUL e ST&SC Serviços Técnicos e Sistemas.

- A Figura 1 mostra o circuito utilizado na primeira fase do teste, na qual o par de condutores preto e

azul foi submetido a uma descarga de 5kA (forma de onda 8/20  $\mu$ s). Foram então medidos os ruídos de modo comum e diferencial nos terminais do par. As medições foram repetidas acrescentando condutores de blindagem adjacentes ao par.

- A segunda fase do teste foi semelhante a primeira, porém o par de condutores azul e preto e as blindagens que foram sendo acrescentadas, foram conduzidas no interior de eletrodutos de aço galvanizado. Os testes foram então repetidos para eletrodutos de PVC, para criar um padrão de comparação.
- Na terceira fase do teste (ver Figura 2) o par e as blindagens adicionais foram ensaiados no interior de uma canaleta de concreto armado, com 9 m de extensão, formada por cinco segmentos cujas ferragens podiam ser interligadas ou não. Foram estudadas alternativas de tampas de concreto armado, de alumínio e de simples alvenaria.
- Na quarta fase do teste (ver Figura 3) o objetivo foi estudar a propagação das descargas de 5 kA (7,8/22 $\mu$ s) ao longo das ferragens de uma canaleta de concreto armado, e determinar o valor das ondas de tensão a uma distância de 1, 6 e 9 m do terminal da canaleta na qual a onda de corrente foi injetada. Para isso as ferragens dos segmentos do corpo da canaleta foram interligadas. As ferragens das tampas foram também interligadas. Finalmente as ferragens do corpo e da tampa da canaleta foram interligadas pelas duas extremidades.
- Na quinta fase do teste (ver Figuras 4 e 5), foram mantidas as ligações descritas para a quarta fase. Além disto, os terminais da canaleta foram interligados por meio de um “condutor equipotencialização” de aço (“condutor expresso”). As medições de potencial foram refeitas nos pontos das ferragens situados a 1, 6 e 9 metros do terminal da canaleta no qual a onda de corrente é injetada.
- Na sexta fase do teste pretendia-se substituir o “condutor de equipotencialização” de aço por um de cobre. Entretanto um trecho do concreto da canaleta “explodiu”, na parte inferior de um segmento intermediário da mesma, conforme mostrado na Figura 6. A canaleta havia sido construída havia 6 dias.

#### 10.0-TENSÕES IMPULSIVAS MEDIDAS NAS CANALETAS

A Figura 7 mostra os valores de tensão medidos em relação à terra, nos pontos a 1, 6 e 9 metros, na fase 5 dos testes. No oscilograma mostrado na Figura 7 a tensão do ponto 9 é chamada “tensão residual” devido a sua proximidade com o pára raios utilizado no processo de criação da forma de onda requerida. A Figura 8 é semelhante à Figura 7, mas refere-se a valores após a ligação do “condutor de equipotencialização” de aço, interligando os terminais da canaleta.

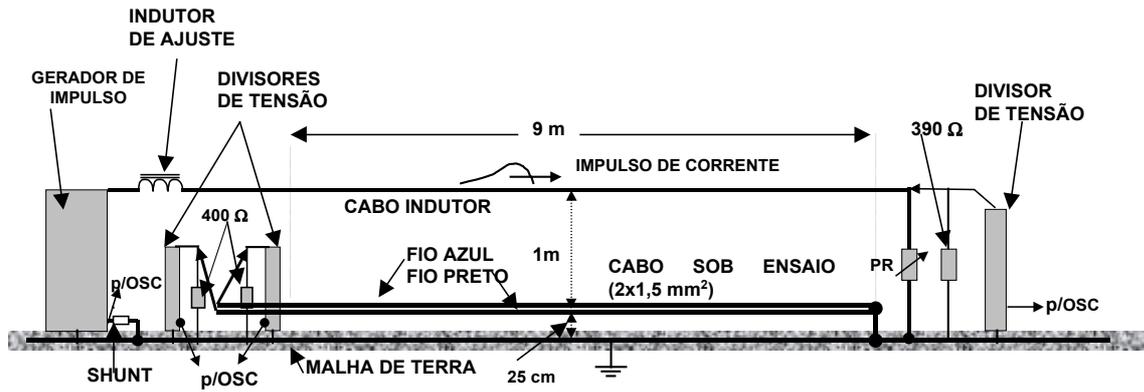


FIGURA 1- CIRCUITO UTILIZADO NA FASE 1 DO TESTE

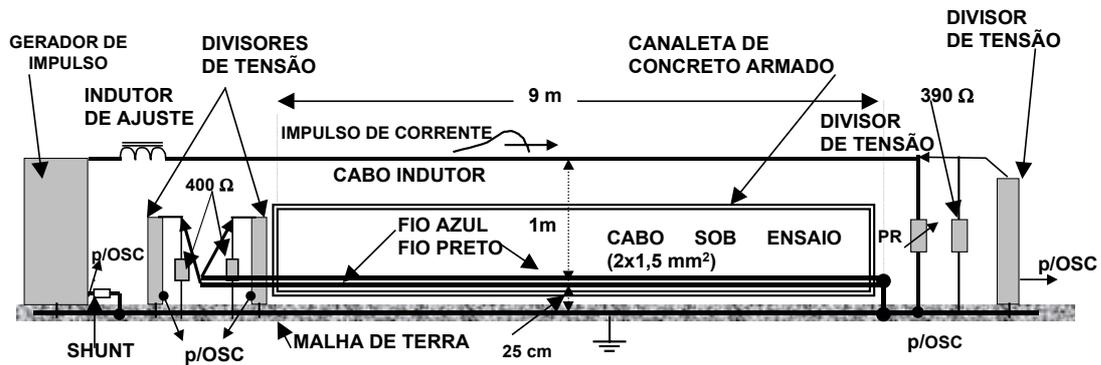


FIGURA 2 - CIRCUITO UTILIZADO NA FASE 3 DOS TESTES

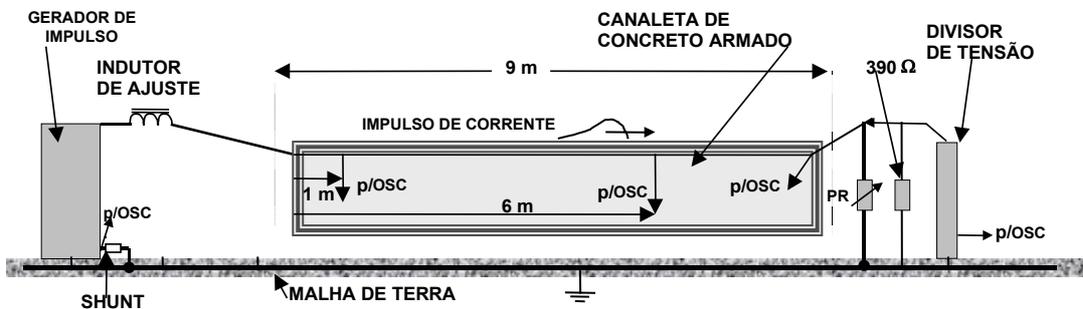


FIGURA 3- CIRCUITO UTILIZADO NA FASE 4 DOS TESTES

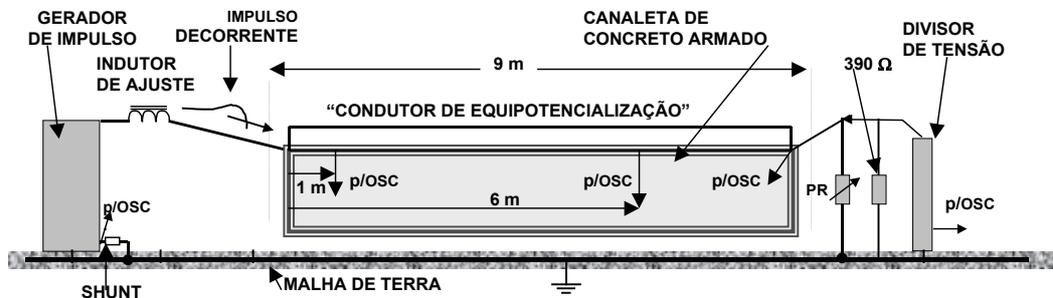


FIGURA 4- CIRCUITO UTILIZADO NA FASE 5 DOS TESTES

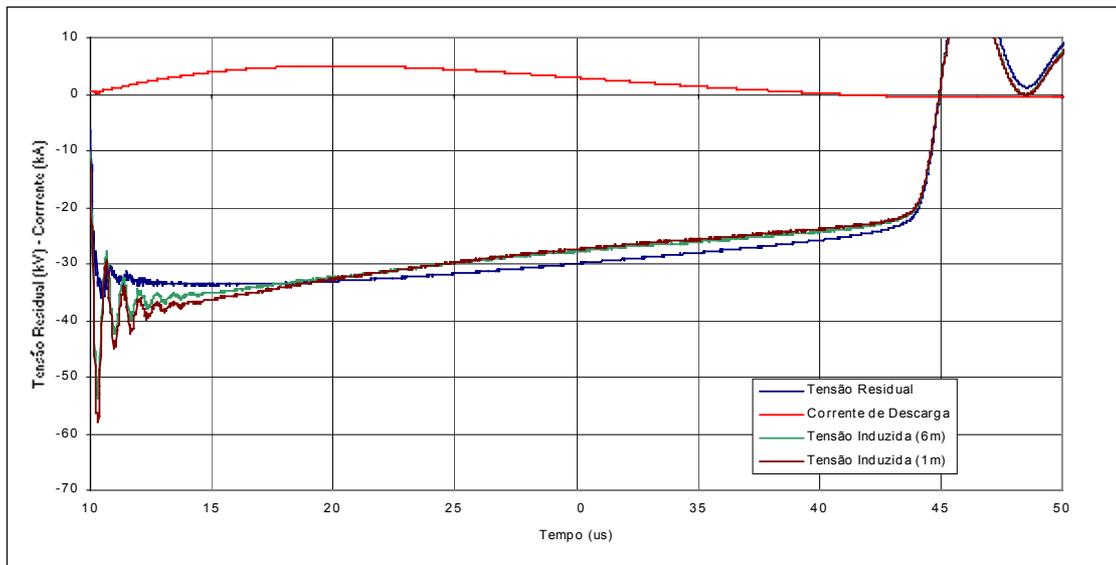


FIGURA 7 – TENSÕES IMPULSIVAS A 1, 6 E 9 M DO TERMINAL DA CANALETA ONDE FAZ-SE A INJEÇÃO DA ONDA DE IMPULSO – ANTES DA INTERLIGAÇÃO DOS TERMINAIS DA CANALETA PELO “CONDUTOR DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO”

#### 11.0-ANALISE DOS OSCIOGRAMAS

Comparando-se as 3 curvas de tensão mostradas na Figura 7, vê-se que apesar da rede de ferragens interligadas do corpo e da tampa da canaleta, ocorreu uma intensa variação de potencial ao longo da mesma, durante 43  $\mu$ s. A tensão a 9 m do ponto de injeção (tensão residual), teve uma variação menor no período, devido ao número de junções de ferragens encontradas pelo impulso, durante o percurso. A diferença de potencial entre o início e o fim da canaleta teve variações da ordem de 20 kV, mas o valor médio foi de cerca de 3 kV. Não existe portanto a equipotencialidade longitudinal prevista por algumas normas. Entretanto os pontos situados a 9 m do ponto de injeção começam a mostrar sintomas de uma quase equipotencialidade local para impulsos injetados na outra extremidade, devido ao número de junções encontradas no trajeto.

A Figura 8 mostra que o “condutor de equipotencialização” de aço praticamente não alterou a distribuição de potencial ao longo da canaleta. A utilização de um “condutor de equipotencialização” de cobre não pôde ser testada. Entretanto criaria uma “via expressa” para parte da descarga. De acordo com a teoria, deveria aumentar o invés de diminuir o valor das tensões a uma distância de 9 m do ponto de injeção.

#### 12.0 – CONCLUSÕES

- A interligação de objetos metálico por meio de condutores não garante equipotencialidade durante perturbações aperiódicas. Na verdade pode aumentar a diferença de potencial impulsiva entre eles. Sugere-se mudanças de conceitos, nomenclatura, e recomendações em algumas normas técnicas que cuidam do assunto.

- Quando existe um número suficiente de junções de ferragens entre o ponto atingido pela descarga e uma certa região da edificação, pode-se considerar que exista uma quase equipotencialidade na região mencionada.
- Os “condutores de equipotencialização” são ineficazes ou desaconselháveis, quando criam “vias expressas”, sem as junções de ferragens que poderiam amortecer a intensidade dos impulsos.
- Os condutores de descida externos, quando podem ser utilizados, permitem que a energia da descarga transforme-se mais rapidamente em calor, no sistema de aterramento.

#### 13.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. T. Sobral, S. C. Sobral, M. M. Nogueira, F. L. A. Souza, A. R. M. Souza, "Condições Onde Pode Existir Equipotencialidade em um Sistema de Aterramento Submetido a Perturbações Periódicas e Aperiódicas", XV SNPTEE, GSI/24
- (2) C.F.Wagner, G.D.McCann, "Wave propagation on transmission lines", Westinghouse R.Book
- (3) S.T. Sobral, Sérgio L.Lamy, David S.Rezende, J.Eduardo D. Olesko, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética em Subestações da Copel". XIII SNPTEE, FL/GSU/12
- (4) S. T. Sobral, Murilo V.Serra, Abelardo Milanez, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na Subestação de Serra da Mesa", XIV SNPTEE, GSI/10
- (5) S.T.Sobral, Alcenil J.Sério, Osmar Tessmer, Ronni M.Campaner, João A. Oliveira, "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caxias, da Copel", XIV SNPTEE, GSU/23
- (6) Sérgio Toledo Sobral, Amauri Menezes Jr, Carlos Augusto O. Peixoto, David S. Rezende Adílio R. M. Souza, Sérgio C. Sobral, "Revisão da NBR 5419 – Considerações Sobre Pontos Críticos", Num 331 Da Eletricidade Moderna

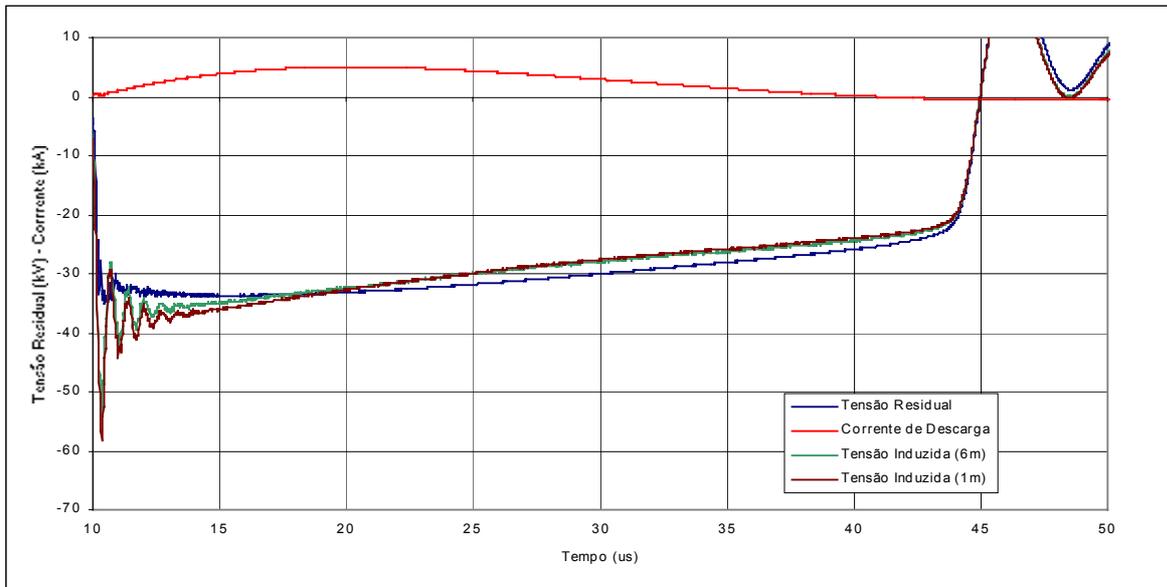


FIGURA 8 – TENSÕES IMPULSIVAS A 1, 6 E 9 M DO TERMINAL DA CANALETA ONDE FAZ-SE A INJEÇÃO DA ONDA DE IMPULSO – APÓS A INTERLIGAÇÃO DOS TERMINAIS DA CANALETA PELO “CONDUTOR DE EQUIPOTENCIALIZAÇÃO”

#### ANEXO- CONCLUSÕES SOBRE OS TESTES DAS FASES 1,2 E 3

Embora fora do escopo principal deste IT, foram as seguintes as conclusões dos testes mencionados:

- A utilização de uma cordoalha de cobre, mesmo que com apenas  $1,5 \text{ mm}^2$ , adjacente a um par de condutores, produz um efeito de blindagem significativo para impulsos e para 60 Hz. Isto resulta em uma redução considerável dos ruídos de modo comum e diferencial nos terminais do par. Adicionalmente a cordoalha mencionada serve de condutor terra de um “chicote” de cabos ao qual o par pertence, o que reduz ainda mais os ruídos de modo comum e diferencial nos terminais do par.
- A utilização de um cabo de cobre 2/0 AWG no interior das canaletas, bandejas etc, tem um importante efeito redutor nas perturbações impulsivas e de 60 Hz. Com o mesmo objetivo, um cabo de aço  $35 \text{ mm}^2$  não foi tão eficaz.
- Quando as roscas dos eletrodutos metálicos não estão curto-circuitadas externamente, o efeito de blindagem do eletroduto reduz-se sensivelmente, principalmente para perturbações impulsivas.
- As ferragens das canaletas mostraram pouca eficiência no controle de perturbações impulsivas e de 60 Hz. Quando as ferragens foram interligadas ao longo da canaleta inteira, notou-se algum aumento dos ruídos de modo diferencial. O motivo pode estar relacionado às capacitâncias distribuídas muito assimétricas que passaram a atuar entre os condutores do par e as ferragens.



FIGURA 5 – CANALETA NA FASE 5 DOS TESTES



FIGURA 6 – PEDAÇO DO CONCRETO QUE “EXPLODIU”, DANIFICANDO A CANALETA