



**XXI SNPTee
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS DO DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GDS)

MEDIÇÃO E CÁLCULOS DO EFEITO CORRETIVO DE BLINDAGENS MONO-ATERRADAS E BI-ATERRADAS EM INSTALAÇÕES DE POTÊNCIA E DE TELECOMUNICAÇÕES

S.T.Sobral *
ST&SC

C.A.O.Peixoto
Consultor

J. Amon.F
FURNAS

M.J.Izycki
FURNAS

G.M. Tavares.
U.F.F

S.C.Sobral
ST&SC

RESUMO

O artigo reporta as medições executadas no Laboratório de Alta Tensão do Lactec, em Curitiba. Mostra como o uso da Teoria de Circuitos de Steinmetz permitiu obter resultados calculados praticamente iguais aos medidos. O artigo comenta ainda como é difícil obter os mesmos resultados utilizando a Teoria da Impedância de Transferência, de Schelkunoff, baseada na Teoria de Campos. O artigo relembra ainda os princípios básicos da técnica de blindagem e de controle de ruídos de modo comum e diferencial.

PALAVRAS-CHAVE

Circuito- Steinmetz- Maxwell - Impedância de Transferência- Ruídos- Modos

1.0 - INTRODUÇÃO

As seções 2.0 até 13.0 resumem os principais resultados das medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão do Lactec, em Curitiba. Chama-se atenção para o fato de que utilizando-se a Teoria de Circuito de Steinmetz, é muito simples calcular os valores das tensões induzidas em pares de condutores no interior de blindagens, estando as mesmas não aterradas, mono-aterradas, bi-aterradas ou multiaterradas. Os valores calculados foram praticamente iguais aos medidos. Essas medições foram reportadas também no artigo [4] do IEEE. O resultado de uma das medições realizadas demonstra que a Teoria da Impedância de Transferência de Schelkunoff, não corresponde a realidade. Comenta-se que quando se utiliza a Teoria de Campos é difícil conseguir-se resultados calculados semelhantes aos medidos, principalmente no caso de tensões induzidas em condutores situados no interior de blindagens bi-aterradas ou multiaterradas. As seções 14.0 até 21.0 relembrem conceitos básicos da técnica de blindagem e procedimentos de projeto para controle de interferências eletromagnéticas.

2.0 - MAXWELL, STEINMETZ E SCHELKUNOFF

Como foi detalhadamente examinado no artigo [4] do IEEE, as chamadas equações de Maxwell foram apresentadas em um capítulo quase final e independente do merecidamente famoso "A Treatise on Electricity & Magnetism" [1], publicado em 1873 (Capítulo XX da Parte IV).

O título do Capítulo mencionado é Electromagnetic Theory of Light, e seu objetivo é descrever transmissão sem condutores metálicos. Essas equações deram origem à Indústria de Telecomunicações sem fio, que modificou profundamente o mundo atual. Entretanto, a aplicação das Equações de Maxwell para resolver circuitos metálicos não foi prevista nem autorizada por Maxwell.

A transmissão de Corrente Alternada começou por volta de 1883, utilizando basicamente a Teoria de Circuitos de Steinmetz, publicada em 1887 [2], pelo alemão-americano Karl August Rudolf Steinmetz, também chamado Charles Proteus Steinmetz, que é considerado o pai da Indústria Elétrica de corrente alternada. O trabalho de Steinmetz utiliza intensamente a Lei Circuital de Ampere, que obviamente está também incluída no corpo do

tratado de Maxwell.

Em 1934, portanto 63 anos depois da publicação do Tratado de Maxwell, o russo-americano Sergei A. Schelkunoff propôs [3] a aplicação das Equações de Maxwell para calcular a tensão induzida ao longo de um condutor situado no interior de uma blindagem metálica mono-aterrada, criando a chamada Teoria da Impedância de Transferência. Cumpre lembrar que o mesmo cálculo já era feito com grande facilidade utilizando a Lei Circuital de Ampere como mostrado em [4]. É problemático utilizar Equações de Maxwell para calcular o efeito de blindagens bi-aterradas e multiaterradas, devido as dificuldades de representar de maneira adequada as correntes auto-neutralizadas que surgem nesses tipos de blindagem, como analisado em [4].

3.0 - CORRENTE "AUTO-NEUTRALIZADA" QUE CIRCULA AO LONGO DE UM CONDUTOR EQUIPOTENCIAL SUBMETIDO À TENSÃO INDUZIDA

Esse tipo de circulação de corrente tem ampla comprovação bibliográfica ([5] até [12]) e foi verificada também durante os testes do Lactec, reportados no artigo [4]. Ela é uma consequência direta da Teoria de Circuitos de Steinmetz. Na realidade pode ser verificado por meio de uma simples medição de bancada, como ilustrado na Figura 1. Mas a mais taxativa prova de sua existência é apresentada em uma medição feita em 1954, reportada nos artigos [16] do IEEE e [17].

Causa estranheza portanto que alguns adeptos dos métodos de cálculo usando Teorias de Campo não aceitem a existência de uma corrente que pode ser medida com tanta facilidade.

No teste mostrado na Figura 1 um condutor é aterrado em ambos os terminais e é submetido a uma tensão induzida longitudinal causada pela circulação da corrente (I) em um condutor indutor paralelo. Pode ser verificado que existe uma diferença de potencial nula entre cada par de pontos ao longo do condutor biaterrado. Este fato vem de uma simples aplicação da Teoria de Circuito de Steinmetz, como segue:

$$I \cdot Z_M = -I_R \cdot Z \quad \text{ou} \quad I_R = - (Z_M/Z) \cdot I, \text{ em A.}$$

A queda de tensão ao longo de cada trecho elementar do condutor é equilibrada exatamente pela tensão induzida aplicada ao longo do mesmo trecho elementar. Na realidade, a circulação de corrente ao longo de um condutor equipotencial (chamada corrente "auto-neutralizada") é muito comum na Indústria Elétrica e ocorre sempre que um condutor bi-aterrado ou multi-aterrado é submetido a uma tensão longitudinal induzida por um condutor indutor próximo. Isso ocorre por exemplo em praticamente todos os sistemas de aterramento.

4.0 - A INCOMPATIBILIDADE DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL PARA REPRESENTAR CORRENTES AUTO-NEUTRALIZADAS

As Equações de Maxwell consideram que os campos elétricos e magnéticos se anulam simultaneamente, como ocorre na transmissão sem condutor, ilustrada na Figura 2. Na transmissão com condutores metálicos essa condição só ocorre para circuitos resistivos puros, não submetidos a tensão induzida. Mas a incompatibilidade é total para representar uma corrente auto-neutralizada, onde o campo elétrico permanece nulo e o campo magnético tem uma variação senoidal.

5.0 - A LEI CIRCUITAL DE AMPERE – COMPROVAÇÃO POR TESTES REALIZADOS NO LACTEC

A Lei Circuital de Ampere diz que a tensão aplicada ao longo de um condutor induzido, devido a corrente que circula em um indutor próximo, depende do montante dos *envolvimentos de fluxo que existem no espaço* entre o indutor até os condutores onde a corrente retorna ao gerador, não importa se houver uma blindagem ou tubo metálico interposta entre o indutor e o induzido.

Os testes realizados no Lactec e reportados em [4] ilustram perfeitamente a aplicação da Lei, tal como enunciada acima.

A Figura 3, até a Figura 7, mostram que o valor da impedância mútua (Z_{14}) entre o indutor e o par de condutores, manteve-se constante nas 5 configurações medidas. Isso ocorre porque os envoltórios de fluxo que envolvem o indutor e vão até o condutor de retorno, (situado na malha de terra do laboratório) são os mesmos, para as 5 configurações.

A presença do tubo metálico não modifica o montante de envoltórios de fluxo a ser considerado. Deve ser observado que utilizando a Lei Circuital de Ampere a tensão induzida num condutor qualquer pode ser calculada sem ser necessário calcular o valor dos campos elétricos e magnéticos presentes, o que simplifica enormemente o problema.

6.0 - A CIRCULAÇÃO DA CORRENTE AUTO-NEUTRALIZADA EM UMA BLINDAGEM BI-ATERRADA

A Figura 6 mostra que, quando o tubo é aterrado nos 2 terminais, surge uma corrente auto-neutralizada (I_R) que circula ao longo do tubo, em direção contrária a corrente indutora (I).

A corrente (I_R) cria outros envoltórios de fluxo que se espalham no espaço entre o tubo e o condutor de retorno, correspondente a malha de terra do Laboratório.

O montante desses envoltórios de fluxo determina o valor da parte reativa ($j(X_3 + X_{int})$) da impedância longitudinal do tubo, como mostrado em [4].

A reatância ($j X_3$) é devida aos envoltórios de fluxo externos da superfície do tubo ao condutor de retorno.

A parcela ($j X_{int}$) é devida aos envoltórios parciais de fluxo no interior do metal do tubo, causadas pela subdivisão da corrente (I_R) em camadas concêntricas no metal do tubo, devido ao efeito pelicular.

O valor da impedância longitudinal do tubo é $Z_3 = (r + R) + j(X_3 + X_{int})$, em ohms.

Onde: r = resistência longitudinal do tubo, em ohms

R = resistência concentrada de uma luva rosqueada existente na porção media do tubo, em ohms.

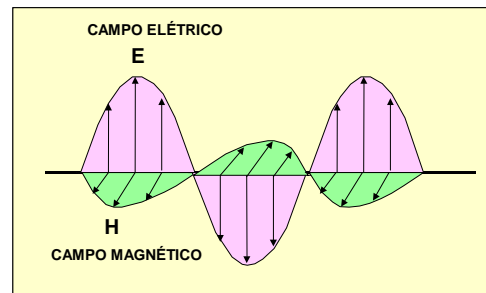
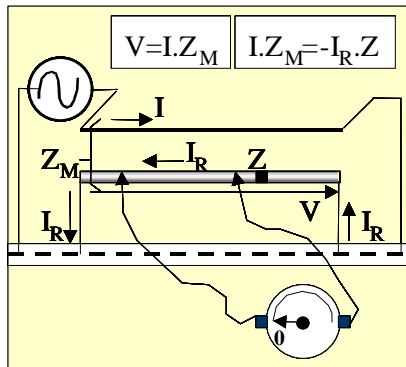


FIGURA 1 Circulação da corrente (I_R) em condutor equipotencial bi-aterrado

FIGURA 2 Campos elétrico e magnético- transmissão sem condutor metálico

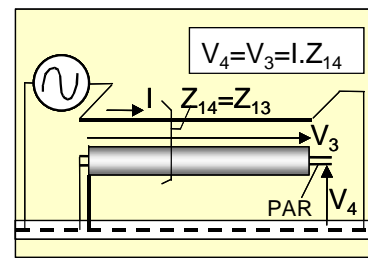
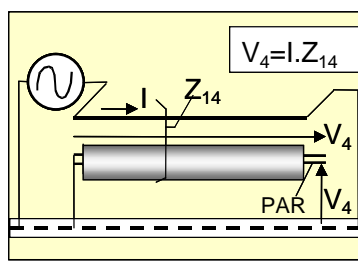
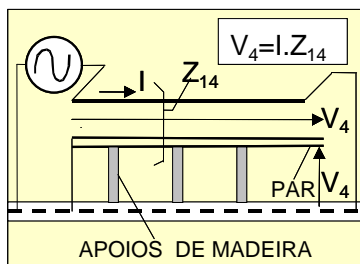


FIGURA 3 Par somente apoiado

FIGURA 4 Tubo sem aterramento

FIGURA 5 Tubo mono-aterrado

7.0 - IMPEDÂNCIA MÚTUA ENTRE O TUBO E O CONDUTOR INTERNO

Como os envoltórios de fluxo que envolvem o tubo até o condutor de retorno são os mesmos que envolvem simultaneamente o tubo e seu condutor interno, resulta que a reatância mútua entre o tubo e seu condutor interno é igual a reatância indutiva própria do tubo $j(X_3 + X_{int})$:

Tem-se então :

- $Z_3 = (r + R) + j(X_3 + X_{int})$ impedância própria do tubo
- $Z_{34} = (0,0) + j(X_3 + X_{int})$ impedância mútua entre o tubo e o condutor interno

8.0 - REDUÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR INTERNO DEVIDA A CIRCULAÇÃO DE CORRENTE AUTO-NEUTRALIZADA AO LONGO DO TUBO

Como a corrente (I_R) tem direção oposta a corrente indutora (I), a primeira induz uma tensão negativa ao longo do par de condutores, situados dentro do tubo. Logo, (ver Figura 6) a tensão induzida total ao longo do par de condutores, no interior do tubo, é $V'_4 = I \cdot (Z_{14}) - I_R \cdot (Z_{34})$. A Tabela III de [4] mostra a passagem de $0,186/90$ V para $0,083/26,68$ V.

9.0 – COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS E CALCULADOS NO TESTE DO LACTEC

O teste do Lactec comprovou que pode-se calcular com muito boa precisão a tensão induzida num par de condutores situados no interior de um tubo metálico ou de uma blindagem, utilizando-se exclusivamente a Lei Circuital de Ampere, para todas as condições de aterramento do tubo ou da blindagem (não aterrado, mono-aterrado ou bi-aterrado).

10.0- REDUÇÃO ADICIONAL DA TENSÃO INDUZIDA NO PAR INTERNO

Essa redução adicional ocorreu quando uma luva atarraxada existente na parte central do tubo foi by-passada externamente (ver Figura 7). As medições reportadas na Tabela IV de [4] mostraram que esse by-pass externo causou uma redução de $0,083/26,68$ V para $0,0639/19,63$ V no valor da tensão induzida ao longo do par de condutores situados no interior do tubo.

A Figura 7 mostra que utilizando a Teoria de Circuito, a explicação para essa redução torna-se óbvia, como

segue:

O by-pass reduz o valor da impedância longitudinal do tubo ($Z_3 + R$), e em consequência aumenta o valor de (I_R') . Portanto reduz-se o valor da tensão induzida ao longo do par interno: $(V_4') = (I).(Z_{14}) - (I_R').(Z_{34})$.

11.0 - A PROVA EXPERIMENTAL DO ENGANO DE SCHELKUNOFF

Schelkunoff aparentemente ignorava que a Lei Circuital de Ampere aplicava-se também para um condutor no interior do tubo, como demonstrado experimentalmente no teste do Lactec, como mostrado nas Figuras 3, 4 e 5. Resolveu aplicar as Equações de Maxwell a um circuito como o da Figura 5 e viu que como não havia corrente no condutor interno, o campo magnético tinha que ser nulo. Logo segundo as equações mencionadas, o campo elétrico tinha que ser igualmente nulo. Mas havia uma tensão longitudinal (V_4), que podia ser medida no par de condutores internos. Schelkunoff postulou então que a diferença de potencial que aparece ao longo do condutor, no interior do tubo, era causada pela propagação do campo elétrico ao longo da superfície interna do tubo, de acordo com um processo que denominou de Teoria da Impedância de Transferência. O teste realizado no Lactec ilustrado na Figura 7 demonstrou que a teoria em apreço não tem uma base real, pois o by-pass externo de uma rosca não poderia modificar a propagação do campo elétrico ao longo da superfície interna do tubo [4]. Além disso há o engano inicial de Schelkunoff supondo que a Lei Circuital de Ampere não se aplicava aos condutores dentro do tubo.

12.0 - O TESTE DO LACTEC PARA CORRENTE DE DESCARGA

Quando uma onda de corrente de descarga de 5 kA (8/20 microssegundos) foi aplicada no indutor externo ao tubo, chegou-se as seguintes conclusões:

O valor da tensão induzida no par de condutores interno manteve-se praticamente constante para as condições mostradas nas Figuras 3, 4 e 5. Com o bi-aterramento da blindagem como mostrado na Figura 6 o valor da tensão induzida reduziu-se bastante. Reduziu-se ainda mais quando se "by-passou" uma luva rosqueada, confirmando também para descargas a inadequação da Teoria da Impedância de Transferência de Schelkunoff.

Embora ainda não esteja inteiramente demonstrado, parece que quando se utiliza ondas de corrente de descarga, as Figuras 3 até 7 continuam válidas, desde que se troque impedâncias próprias e mutuas por impedâncias próprias e mútuas de surto. Os valores de corrente e d.d.p passam a representar valores instantâneos das ondas de corrente e de tensão. A corrente auto-neutralizada funciona pelo mesmo princípio, como ilustrado na Figura 8.

13.0 – ENGANOS CONCEITUAIS DE ALGUNS USUÁRIOS DA TEORIA DE CAMPO

Apesar das medições disponíveis, alguns Usuários da Teoria de Campo ainda insistem nos seguintes enganos:

- Declaram que a corrente autoneutralizada não existe.
- Pensam que a Lei Circuital de Ampere não se aplica para um condutor no interior de um tubo metálico.
- Aplicam Equações de Maxwell para resolver circuitos com condutores metálicos.
- Tentam calcular a tensão induzida em um condutor interno a um tubo utilizando a Teoria da Impedância de Transferência, até quando o tubo está bi-aterrado.
- Negam que a corrente que circula num tubo produz tensão induzida ao longo de um condutor no interior do tubo.
- Negam que a corrente injetada em um condutor no interior de um tubo metálico cria tensão induzida ao longo do tubo.

14.0- NECESSIDADE DE MULTI-ATERRAMENTO PARA BLINDAR TENSÕES INDUZIDAS POR CORRENTES DE DESCARGA

A Figura 8 é baseada em [18] e mostra que para correntes indutoras de descarga, a blindagem deveria ser multi-aterrada. O multi-aterramento direto da blindagem não é recomendável pois reduz muito sua vida útil. Assim sendo, faz-se o multi-aterramento das bandejas e eletrocalhas metálicas que conduzem as cablagens e funcionam como uma blindagem auxiliar.

A Figura 9 mostra uma bandeja metálica aterrada em diversos pontos (digamos a cada 5 m) em um condutor de terra próximo. A Figura 9 mostra ainda que todos os componentes metálicos longitudinais da bandeja devem ser interligados, de modo que o conjunto possa operar como um "condutor auxiliar de blindagem", e possa ser multiaterrado em toda a sua extensão. Esse "condutor auxiliar de blindagem" deve seguir o cabo sem interrupção desde os equipamentos principais (no pátio da Subestação ou na Usina), até aos painéis a que os cabos se destinam, situados na Sala Eletrônica (Casa de Comando, Casa de Relés, etc.)

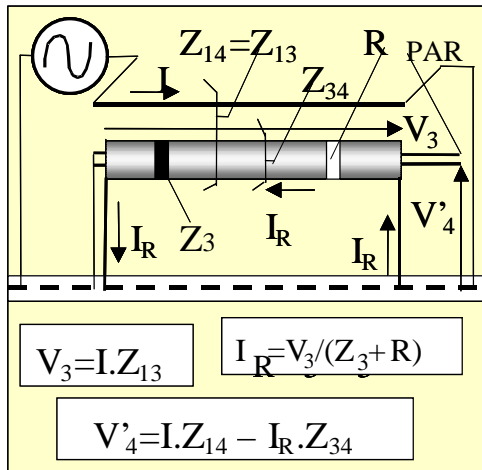
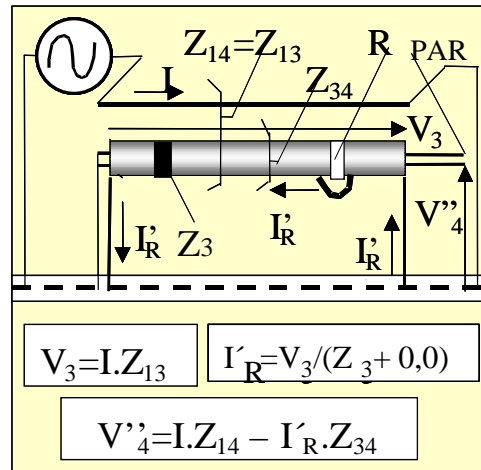
FIGURA 6. Tubo bi-aterrado e circulação de (I_R)

FIGURA 7. Redução adicional da tensão induzida devido ao by-pass externo da luva rosqueada

15.0 - CONDUTORES DE BLINDAGEM AUXILIARES NO INTERIOR DE CANALETAS DE CONCRETO

A Figura 10 mostra que as canaletas de concreto devem ter 2 condutores de cobre 2/0, correndo dentro dela, nos suas laterais. Esses condutores devem ser ligados entre si a pequenos intervalos (digamos a cada 5 m) com o objetivo de formar "loops" de blindagem. Os dois cabos são interligados a malha de terra local a cada 20 m. Os testes mencionados em [12]-[13] mostraram que os condutores de blindagem de cobre são mais eficazes que os de aço cobreado quanto ao efeito de blindagem conseguido.

As medições também mostraram que o uso de canaletas de concreto armado e de tampas de canaleta de concreto armado deve ser limitado a pequenos trechos, (como as travessias de caminhos dentro de uma Subestação), pois os mesmos aumentam o ruído de modo diferencial, como consequência dos acoplamentos capacitivos entre os cabos e a armadura de aço do concreto [12]-[13].

16.0 - BLINDAGEM DE CABOS ATERRADA NOS DOIS TERMINAIS

Uma blindagem aterrada nas duas extremidades é chamada de "blindagem eletromagnética". Esse tipo de blindagem é percorrido por uma corrente de blindagem, que reduz o ruído de "modo comum" (V_1), capaz de danificar o dispositivo terminal (ver Figura 11). Por outro lado a "blindagem eletromagnética" aumenta o ruído de "modo diferencial", que distorce os dados transmitidos pelo par, principalmente se as informações são analógicas. Isso ocorre porque o duplo aterramento permite o aumento do valor das correntes capacitivas espúrias responsáveis pela tensão de ruído (V_2), como mostrado na Figura 11. O ruído de modo diferencial é menos significativo quando as informações transmitidas pelo par são digitais, pois "uns" e "zeros" são mais difíceis de alterar que informações analógicas. A blindagem própria bi-aterrada de um cabo é geralmente eficaz para perturbações periódicas, tais como curto-circuitos e harmônicas. Para perturbações aperiódicas, a blindagem própria do cabo aterrada apenas nas extremidades, é pouco eficaz, pois os pontos de aterramento estão muito afastados entre si e a onda de corrente de blindagem custa a se estabelecer.

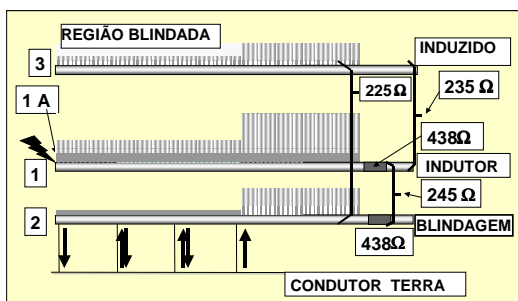


FIGURA 8. Efeito da blindagem multiterrada

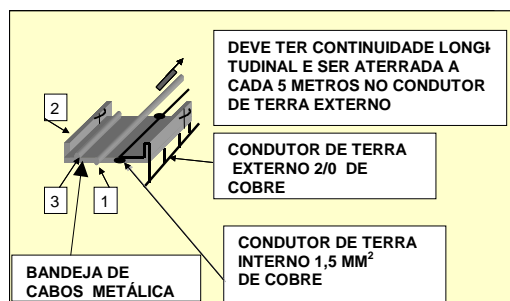


FIGURA 9. Bandeja metálica como blindagem auxiliar

Por esse motivo é importante conduzir o cabo no interior de vias de cabo metálicas multiterradas, que operam como blindagens auxiliares.

17.0 - BLINDAGEM DO CABO ATERRADA SOMENTE EM UM TERMINAL

Esse tipo de blindagem é denominado “blindagem eletrostática” (ver Figura 12). A mesma reduz o ruído de “modo diferencial” (V_2), mas aumenta o ruído de “modo comum” (V_1). Ele é utilizado no caso de cabos de pequena extensão que transmitem informações analógicas. A pequena extensão do cabo garante que o valor (V_1) será reduzido e não queimará portanto os terminais do dispositivo.

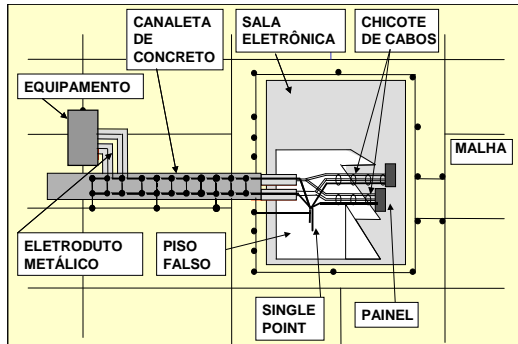


FIGURA10. Blindagem das canaletas de concreto

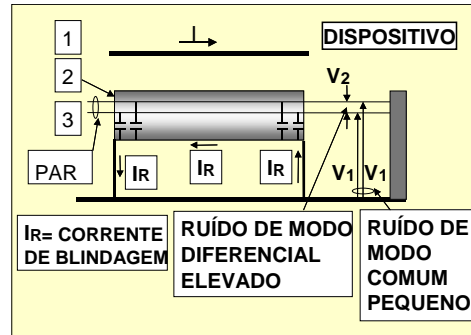


FIGURA 11 Efeitos da blindagem eletromagnética

18.0 - BLINDAGEM DE DUAS CAMADAS

Esse tipo de blindagem, ilustrado na Figura 13, é utilizado quando o cabo é longo e transmite informações analógicas. As blindagens dos pares de cabos é aterrada somente no terminal do dispositivo terminal, para reduzir as correntes capacitivas distribuídas, que causam (V_2). Entretanto, a camada de blindagem externa é aterrada nas duas extremidades, para reduzir (V_1)

19.0 CABOS ORGANIZADOS EM CHICOTES, PRODUZINDO EQUIPOTENCIALIDADE DINÂMICA

A Figura 10 mostra que no interior do piso falso, na entrada da Sala Eletrônica, no local denominado “ponto único” (Single Point), o conjunto de cabos que vai para um painel específico é unido e mantido adjacente por meio de fitas plásticas, formando um chicote de cabos (cable bundle), que tem um condutor de terra interno próprio. Esse condutor de terra interno é ligado a barra de terra existente no Single Point e ao ponto de terra do painel terminal do chicote. Se uma perturbação aperiódica é injetada ou induzida em um dos condutores de um cabo do chicote, ou no condutor terra interno do mesmo, serão induzidas ondas de tensão quase idênticas, nos outros condutores do chicote.

Portanto, em cada seção reta do chicote, serão muito pequenas as diferenças das ondas de tensão entre os condutores que caracterizam os ruídos de modos diferencial. Serão também muito reduzidas as diferenças das ondas de tensão entre os condutores e o condutor terra interno, que caracterizam os ruídos de modo comum. O fato dos ruídos de modo comum e diferencial serem muito pequenos em cada seção reta do chicote, é denominado Equipotencialidade Dinâmica. A Ref. [13] reporta as medições correspondentes, executadas no Laboratório de Alta Tensão do Lactec.

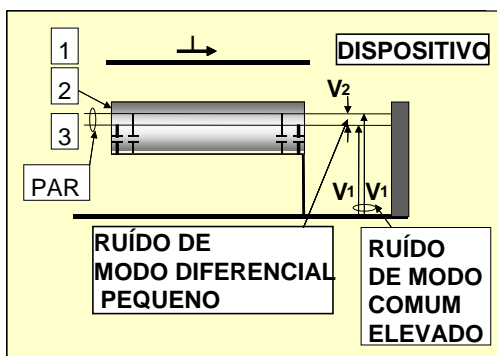


FIGURA 12. Efeitos da blindagem eletrostática

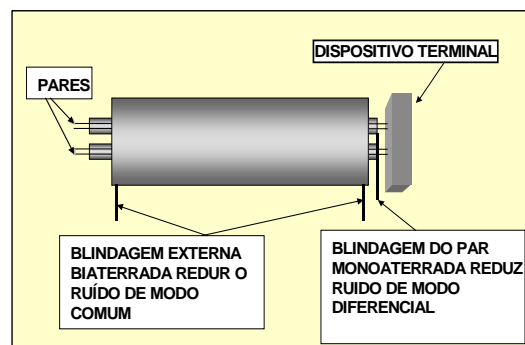


FIGURA 13. A blindagem de dupla camada

20.0 O EFEITO CORRETIVO DO BARRAMENTO DO “SINGLE POINT”

O barramento do Single Point, mostrado na Figura 10, reflete as ondas de ruído que chegam ao barramento mencionado, trafegando pelos diversos condutores de aterramento que chegam ao mesmo. Portanto, é pequeno a intensidade das ondas de ruído refratadas para o interior da Sala Eletrônica [18]. A onda de ruído refratada sofre então o efeito corretivo dos chicotes. O elevado fator de reflexão do barramento do Single Point ocorre porque nele a impedância de surto (Z) do condutor de terra por onde trafega a onda de perturbação, passa para uma impedância de surto equivalente ($Z/(n-1)$), onde (n) é o número de condutores de terra ligados ao barramento mencionado. A passagem de uma impedância de surto de um certo valor para um valor muito menor causa um elevado fator de reflexão no barramento.

2.0 - CONCLUSÃO

O artigo reporta as medições executadas no Laboratório de Alta Tensão do Lactec, em Curitiba. Mostra como o uso da Teoria de Circuitos de Steinmetz permitiu obter resultados calculados praticamente iguais aos medidos. O artigo comenta ainda como é difícil obter os mesmos resultados utilizando a Teoria da Impedância de Transferência, de Schelkunoff, baseada na Teoria de Campos. O artigo mostra que a Teoria de Circuitos é a expressão natural da Indústria Elétrica, assim como as Equações de Maxwell são a expressão natural da Indústria de Telecomunicações Sem Fio. Essa era a situação natural que havia até 1934, quando Schelkunoff propôs a utilização das Equações de Maxwell para resolver circuitos com condutores metálicos, utilização não prevista e não autorizada por Maxwell. O artigo mostra que o engano de Schelkunoff deveu-se basicamente a uma interpretação limitada da Lei Circuital de Ampere. O artigo relembra ainda os princípios básicos da técnica de blindagem e de controle de ruídos de modo comum e diferencial.

3.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Maxwell, "A Treatise on electricity & magnetism", in two volumes, 1026 pages- 1954 *Inside Volume II, Part IV, Chap.XX, pp 431-450 "Electromagnetic theory of tight"*
- [2] C. P. Steinmetz, "Theory and calculation of alternating current phenomena, W.J. Johnston Co.NY, 1898
- [3] Sergei. A. Schelkunoff, "The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields", Bell System Technical Journal, vol. 13, 1934, Pg. 532-579.
- [4] Sobral,Sérgio Toledo (ST&SC), Peixoto,Carlos A.O, Amon, Jorge F,Tavares (FURNAS), Geraldo Martins (UFF), Izyski, Marcos José (FURNAS), Rigueira, Alexandre (UFF). "Advantages of Steinmetz Circuit Theory Over Schelkunoff Transfer Impedance Theory". IEEE Transactions on Power Delivery, October 2009, Volume 24, Number 4, ITPDE5 (ISSN 0885-8977) pp-1876-1882
- [5] S. T. Sobral, M. S .Campos, B. Goldman (Iesa), V. S .Costa (Eletrobras), D. Mukhedkar (Ecole Polytechnique de Montreal, "Dimensioning of nearby substations interconnected ground system". IEEE Trans. On Power Delivery, vol. PWRD-3, N°4, OCT 1988 pp. 1605-1614
- [6] S. T. Sobral (Iesa), G. P. Fleury, J. R. Villalba (Itaipu), Dinkar Mukhedkar (Ecole Polytechnique de Montreal), "Decoupled method for studying large interconnected ground systems using microcomputers part I – fundamentals" IEEE Trans. On Power Delivery, vol.PWRD-3, N°4, OCT 1988 pp. 1536-1544
- [7] S. T. Sobral (Iesa), C. A. O.Peixoto (Furnas), D. Fernandes (Furnas), Dinkar Mukhedkar (Ecole Polytechnique de Montreal), "Grounding measurements at itaipu generation complex using the extended Eleck Method". IEEE Trans. On Power Delivery, vol. WRD-3, N°4, OCT 1988 pp. 1553-1563.Included as a reference in Standard IEEE-81
- [8] 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 Trans. On Power Delivery, vol.PWRD-3, N°4, OCT 1988 pp. 1564-1572
- [9] S. T. Sobral, J.J.H.Santos (IESA), D. Mukhedkar (Ecole Polytechnique de Montreal) "A proposal for ground measurement techniques in substations fed exclusively by power cables" IEEE Trans. On Power Delivery, vol.PWRD-3, N°4, OCT 1988 pp. 1403-1409. [10] 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), "Interference control- power plants, substations, telecommunication installations" IEEE Transmission & Distribution Latin America 2004
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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

- [14] 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 SNPTTEE- GCQ 22
- [15] C.F.Wagner , G.D.McCann "Wave propagation in transmission lines" Westinghouse T&D Reference Book .
- [16] Kaufmann R.H. "Some fundamentals of equipment grounding circuit design" AIEE Trans. Appl.& Industry NOV1954 pp 227-232
- [17] Celso Luiz P. Mendes (Klockner- Moeller) "Malhas de aterramento vs. condutores de proteção em redes de BT." Revista Eletricidade Moderna abril/1993 pp 42-45
- [18] S.T.Sobral (ST&SC), Jorge Amon F (FURNAS), David.S.Rezende (COPEL), S.C.Sobral (ST&SC), J.R.Dellacqua (EDPBR) "Basic design procedures to control electromagnetic interferences at power and telecommunication installations " IEEE T&D 2010.

ANEXO I VANTAGENS DA TEORIA DE CIRCUITOS DE STEINMETZ

Como detalhadamente examinado em [4], a Teoria de Circuitos de Steinmetz é mais simples, objetiva e precisa que a Teoria de Campo para representar circuitos da Indústria Elétrica, como segue:

- a) Os cálculos lidam diretamente com valores de tensão e corrente, que são geralmente o objetivo dos cálculos.
- b) Os valores dos campos elétrico e magnético são determinados somente e quando forem realmente necessários.
- c) Os valores das quedas de tensão e das correntes circulantes são correlacionados por meio das impedâncias próprias.
- e) O valor das tensões induzidas e das correntes indutoras são relacionados por meio de impedâncias mútuas.
- f) Todos os cálculos são feitos por meio da simples álgebra dos números complexos, com a ajuda de técnicas matriciais e dispondo de inúmeros Teoremas de Circuitos.
- g) O cálculo vetorial raramente é necessário.
- h) O valor das impedâncias próprias e mútuas é calculado de uma maneira simples e precisa, utilizando a Lei Circuitual de Ampere, conforme detalhado em [4].
- i) O cálculo das correntes auto-neutralizadas é imediato.
- j) O cálculo da tensão induzida ao longo de um par de condutores no interior de uma blindagem pode ser feito com facilidade e precisão, qualquer que seja a modalidade de aterramento da blindagem.
- k) O resultado dos cálculos não depende da escolha de caminhos de integração de valores de campo, que têm que ser arbitrado pelo executante do cálculo.

4.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Sérgio Toledo Sobral nasceu em Vitória, Espírito Santo, em 2.08.39. Recebeu seu B.Sc da PUC-Rio em 1964 como Engenheiro Eletricista. Foi Superintendente do Departamento de Estudos de Sistemas e depois Diretor de Projetos (subestações, linhas de transmissão e distribuição) da Internacional de Engenharia S.A Foi Consultor Especial no Projeto Itaipu. Desde 1990 está com sua própria Companhia, ST&SC Serviços Técnicos Ltda, especializada em estudos e projetos de aterramento e controle de interferências eletromagnéticas. Preparou 67 artigos técnicos apresentados no IEEE, CIGRE, ERLAC e SNPTTEE. Preparou e implantou com sucesso critérios de projeto relacionados com aterramento e controle de interferências para 4 importantes Concessionárias brasileiras: FURNAS, COPEL, ESCELSA, ENERSUL.

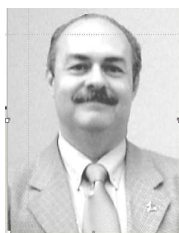


Carlos Augusto de Oliveira Peixoto

Engenheiro Eletricista – Escola Nacional de Engenharia – Rio de Janeiro - 1959

Cursos de Graduação em Power System AC e HVDC Engineering, Membro da Royal Swedish Academy of Engineering Science. Fellow do Institute of Electrical and Electronic Engineers – USA. Life Fellow of the Institute of Electrical and Electronic Engineers – USA .Member of the CIGRE – Paris. Award of IEEE UNO LAMM Medal – 1992. A sua experiência técnico-profissional é concentrada nos diferentes aspectos de planejamento, engineering e projeto de HV e EHV AC e HVDC. Essa experiência foi adquirida e aplicada no período de 1959-

1991, como engenheiro de FURNAS-Centrals Elétricas, S/A, quando exerceu diversas funções técnicas e gerenciais. Depois da aposentadoria por FURNAS, em 1991, começou suas atividades como Consultor.



Jorge Amon Filho nasceu no Rio de Janeiro, RJ-Brasil em 8 de Agosto de 1952. Recebeu seu B.Sc. (1975) e seu M.Sc. (1986) em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio de Janeiro, Brasil. Trabalha em FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976. Gerente da Divisão de Estudos para Equipamentos do Departamento de Planejamento da Transmissão desde 1998. Membro do CIGRÉ e Secretário do CE A3 do CIGRÉ Brasil. Membro do IEEE. Coordenador Comitê Brasileiro de Usuários do EMTP/ATP.



Marcos José Izycki nasceu em São Paulo, SP – Brasil em 8.12. 74. Recebeu seu B.Sc. em Engenharia Elétrica pela UNIP-São Paulo, Brasil (2002). Trabalha em FURNAS Centrais Elétricas, desde 2006. No momento é engenheiro da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento da Transmissão...



Geraldo Martins Tavares nasceu em São Sebastião do Alto, RJ – Brasil 10.05.47. Recebeu seu B.Sc. (1970) e seu M.Sc. (1975) em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Recebeu seu D.Sc. (1998) em Engenharia da Produção da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. É professor do Departamento Elétrico da Universidade Federal Fluminense, em Niterói, Rio de Janeiro, desde 1992. Trabalhou durante 22 anos em Concessionárias Federais brasileiras tais como a CHESF e ELETROSUL, e em consultoras brasileiras tais como a MILDOR KAISER, ENGEXIX e IESA.



Sérgio Cordeiro Sobral Engenheiro Eletricista – UERJ – Rio de Janeiro – 1993; Foi professor de Sistemas de Potência na PUC entre 1996 -1997; Recebeu seu M.Sc. em Power System – PUC – Rio de Janeiro – 1997; Trabalhou para o CEPEL entre 1997- 1999. Trabalhou para a Eletrobras entre 1999 - 2001; Trabalhou no ONS desde 2001; Graduado em MBA on Electric Engineering – Rio de Janeiro – 2006.