

Implementação, análise e validação de modelo computacional para avaliação de suscetibilidade eletromagnética dos cabos de comunicação e controle aplicados em subestações de alta tensão

Antonio Carlos Passos Sartin, Rogério Thomazella, Fábio Romano Lofrano Dotto, Cezar José Sant'Anna e Paulo Roberto de Aguiar.

Resumo – Este trabalho consiste na implementação dos modelos eletromagnéticos para cabos de controle e comunicação de subestações, versando sobre a implementação de alguns modelos matemáticos desenvolvidos e pesquisados em literatura, os quais foram implementados por meio de uma poderosa ferramenta computacional a fim de, obter-se o comportamento eletromagnético dos diversos cabos utilizados em subestações da CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, submetido a várias fontes de interferência existentes neste meio inóspito, confrontando os resultados obtidos nas simulações computacionais, com ensaios laboratoriais realizados no Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Palavras-chave – Aterramento, Blindagem, Compatibilidade Eletromagnética, Interferências Eletromagnética.

I. INTRODUÇÃO

As interferências eletromagnéticas são alguns dos grandes problemas gerados nas subestações da Transmissão, da Distribuição, e também das Centrais Geradoras de Energia Elétrica, pois a utilização de condutores metálicos, isolados, para o sistema de comunicação e controle, continua sendo o meio mais econômico de se atender à área de supervisão e comando. Essa área que está presente e todas as concessionárias de serviços de energia elétrica, necessitando-se oferecer um serviço muito confiável à Operação do Sistema Elétrico, tanto da própria unidade como ao ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico.

Essas interferências comprometem o funcionamento dos equipamentos eletrônicos instalados nas subestações e centrais geradoras de energia elétrica, muitas vezes danificando

completamente esses equipamentos.

As interferências eletromagnéticas aparecem devido às descargas atmosféricas que ocorrem nas LT Linhas de Transmissão, chaveamentos de seccionadoras e disjuntores das subestações e centrais geradoras, efeitos corona, correntes de fuga e indução eletromagnética.

Este trabalho pretende mostrar como o grupo de pesquisas da FUNDEB Fundação para o Desenvolvimento de Bauru da UNESP, contratado pela CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, vem desenvolvendo uma pesquisa sobre os condutores metálicos de comunicação e controle tanto referente à bibliográfica existente, bem como sobre os ensaios em laboratórios e em campo, utilizando alguns cabos de comunicação e controle.

A correta blindagem dos condutores de comando e comunicação, condutores esses metálicos, é ainda o meio mais econômico onde se pode atuar, com o intuito de se evitar as interferências eletromagnéticas.

Nesse contexto, insere-se o projeto de pesquisa, que procura buscar metodologias adequadas para a utilização desses condutores, sem que eles estejam vulneráveis às interferências. Também se quer conhecer quais tipos de blindagens que aliadas aos condutores, oferecem mais vantagens com menor custo benefício.

A pesquisa aprofundou-se em uma investigação científica nas bibliografias existentes. Houve desenvolvimento de modelos eletromagnéticos para cabos de controle e comunicação e também se desenvolveu modelos matemáticos e computacionais visando a facilidade de se aplicar os condutores. Os ensaios laboratoriais e em campo, foram as etapas mais importantes e que puderam validar os modelos matemáticos e computacionais desenvolvidos. Como não existem normas de ensaios de condutores, foram adaptadas as normas para equipamentos com um grande sucesso.

Este artigo foi obtido como resultado do projeto “0068-010/2006 - Avaliação da Susceptibilidade Eletromagnética dos Cabos de Comunicação e Controle de Subestações de Alta Tensão” – ciclo 2005/2006, desenvolvido pela FUNDEB/UNESP e financiado pela CTEEP desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Agradecimento ao apoio financeiro dado pela transmissora ‘CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista’.

Antonio Carlos Passos Sartin trabalha na ‘CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista’ (e-mail: asartin@ctEEP.com.br).

Rogério Thomazella, Cezar José Sant'Anna, Fábio Romano Lofrano Dotto e Paulo Roberto de Aguiar trabalham na ‘UNESP Universidade Paulista Campus Bauru’ (e-mails: rothoma@ladaps.feb.unesp.br, cezarjose@hotmail.com, fabio@feb.unesp.br, aguiarpr@feb.unesp.br).

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Modelo para Cabo Paralelo

Para a implementação do modelo matemático a qual aborda este artigo, é necessário revisar alguns conceitos teóricos que fazem parte da formulação matemática deste.

Considere um condutor singular de raio r_{11} e comprimento l , mostrado na Figura 1. Para esta configuração, o fluxo magnético consiste de uma série de círculos concêntricos com o eixo do condutor. No ponto $P(r,z)$, a intensidade do campo magnético, H , é definida por [3] e dada pela equação (1).

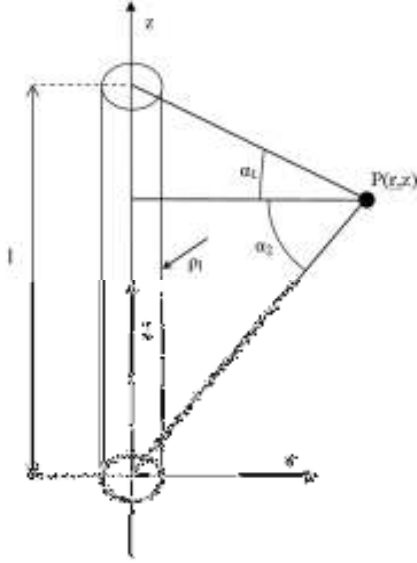


Figura 1- Ponto em que os campos E e H são calculados.

$$H = \frac{I}{4\pi r} [\text{sen}(\alpha_1) + \text{sen}(\alpha_2)] \quad (1)$$

Definindo-se a indutância primitiva como a relação deste fluxo e a corrente, e simplificando a expressão com a hipótese de que $r_{11} \ll l$, resulta na Equação (2):

$$L_{p11} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l}{r_{11}}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade do espaço livre e μ_r é a permeabilidade relativa do material.

Se um segundo condutor estiver do lado ao longo do primeiro condutor a uma distância axial de separação r_{12} , então a indutância primitiva do condutor 2 devido a corrente no condutor 1 é expressa pela Equação (3):

$$L_{p12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l}{r_{12}}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

O método utilizado para formular a capacitância primitiva é um pouco diferente, sendo que o mesmo envolve o campo elétrico, [4]. A componente radial de campo elétrico no ponto $P(r,z)$ é:

$$E = \frac{\rho_l}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r} [\sin(\alpha_1) + \sin(\alpha_2)] \quad (4)$$

Fazendo $\alpha_1 = \alpha_2$ e integrando esta função em relação a r na faixa de r_{11} até infinito resulta no trabalho máximo para mover a carga unitária até a superfície do condutor (potencial). A capacitância é a razão de carga na superfície para este potencial. Lembrando-se que $r_{11} \ll l$, tem-se a capacitância primitiva do condutor 1:

$$C_{p11} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{l}{r_{11}}\right)} \quad (5)$$

A capacitância primitiva de um segundo condutor devido a carga no condutor 1 é definida pela Equação (6):

$$C_{p12} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln\left(\frac{l}{r_{12}}\right)} \quad (6)$$

Qualquer sistema elétrico em funcionamento é formado por um conjunto de malhas completas como ilustrado na Figura 2. As relações existentes entre correntes de malha e correntes primitivas podem ser determinadas por inspeção, [3]. Tensões de malha são derivadas a partir do cálculo da diferença entre linhas adjacentes nas equações primitivas. Substituindo as correntes primitivas das equações das correntes de malha, e calculando as tensões de malha resulta nas seguintes equações de malha:

$$V_{L1} = Z_{L11}i_{L1} + Z_{L12}i_{L2} \quad (7)$$

$$0 = Z_{L21}i_{L1} + Z_{L22}i_{L2} \quad (8)$$

Onde:

$$Z_{L11} = Z_{p11} - Z_{p12} - Z_{p21} + Z_{p22} \quad (9)$$

$$Z_{L12} = Z_{p12} - Z_{p13} - Z_{p22} + Z_{p23} \quad (10)$$

$$Z_{L21} = Z_{p21} - Z_{p22} - Z_{p31} + Z_{p32} \quad (11)$$

$$Z_{L22} = Z_{p22} - Z_{p13} - Z_{p32} + Z_{p33} \quad (12)$$

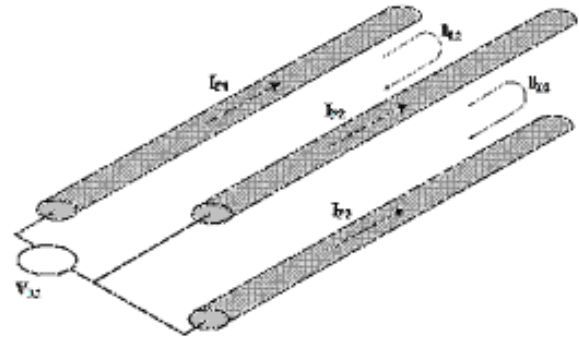


Figura 2 - Tensões e correntes de malha.

Para a configuração de duas malhas mostrada na Figura 2, a solução é encontrada conforme mostrada na Figura 3. A análise desta figura produz as seguintes equações:

$$V_{L1} = (Z_{C11} + Z_{C22})i_{L1} - Z_{C12}i_{L2} \quad (13)$$

$$0 = -Z_{C12}i_{L1} + (Z_{C12} + Z_{C22})i_{L2} \quad (14)$$

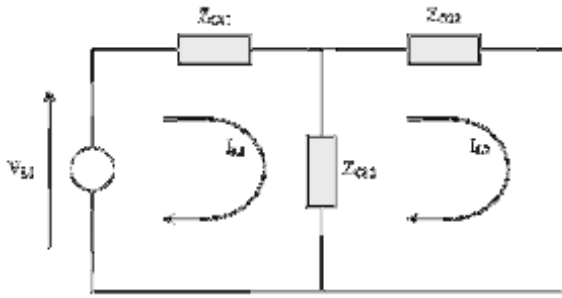


Figura 3 - Impedâncias do Circuito.

Isto introduz um terceiro tipo de parâmetro, a impedância do circuito, com seu próprio subscrito. Uma vez que o objetivo é fazer os termos das equações do circuito idênticos aos termos das equações de malha, o identificador “L” permanece nos subscritos das correntes e tensões. Uma comparação termo a termo entre as equações de malha e do circuito permite que cada impedância de malha seja definida em termos de uma impedância do circuito, [3]. Agora é possível formular as impedâncias em termos das impedâncias de malha, e então em termos das impedâncias primitivas, conforme as equações seguintes:

$$Z_{C11} = Z_{L11} + Z_{L12} = Z_{P11} - Z_{P12} - Z_{P13} + Z_{P23} \quad (15)$$

$$Z_{C12} = -Z_{L12} = Z_{P22} - Z_{P23} - Z_{P12} + Z_{P13} \quad (16)$$

$$Z_{C22} = Z_{L22} + Z_{L12} = Z_{P33} - Z_{P23} - Z_{P13} + Z_{P12} \quad (17)$$

Considerando cada impedância primitiva como uma combinação em série de componentes R, L e C, as componentes de circuito da Figura 4 podem agora ser encontradas usando a forma geral mostrada nas equações (18) a (20) para as indutâncias, equações (21) a (23) para as capacitâncias e equações (24) a (26) para as resistências.

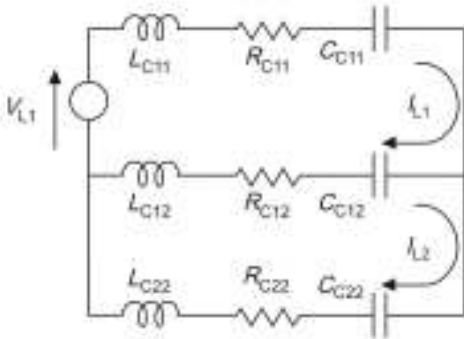


Figura 4 - Modelo inicial do circuito.

$$L_{c11} = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{12} r_{13}}{r_{11} r_{23}} \right) \quad (18)$$

$$L_{c12} = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{12} r_{23}}{r_{22} r_{13}} \right) \quad (19)$$

$$L_{c22} = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \ln \left(\frac{r_{13} r_{23}}{r_{33} r_{12}} \right) \quad (20)$$

$$C_{c11} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left(\frac{r_{12} r_{13}}{r_{11} r_{23}} \right)} \quad (21)$$

$$C_{c12} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left(\frac{r_{12} r_{23}}{r_{22} r_{13}} \right)} \quad (22)$$

$$C_{c22} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left(\frac{r_{13} r_{23}}{r_{33} r_{12}} \right)} \quad (23)$$

$$R_{C11} = R_{P11} \quad (24)$$

$$R_{C12} = R_{P22} \quad (25)$$

$$R_{C22} = R_{P33} \quad (26)$$

A utilização de parâmetros concentrados resultará em um erro entre as frequências de ressonância reais e as frequências preditas. Este erro pode ser reduzido utilizando o modelo de rede T usado para representar as linhas de transmissão, [4].

Representando cada parâmetro de impedância como uma rede T, e então fazendo a transformação estrela-delta nos capacitores, obtém-se o modelo do circuito de uma linha de transmissão de três condutores. A Figura 5 e a Figura 6 ilustram os dois estágios do processo de conversão e a Figura 7 mostra o resultado final do circuito para o cabo paralelo.

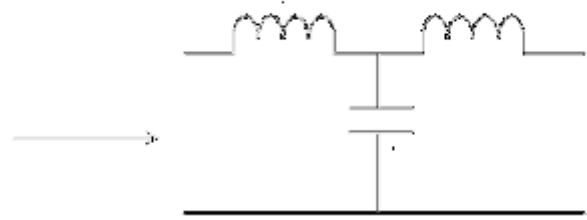


Figura 5 - Modelo T para linha de transmissão de 2 condutores.

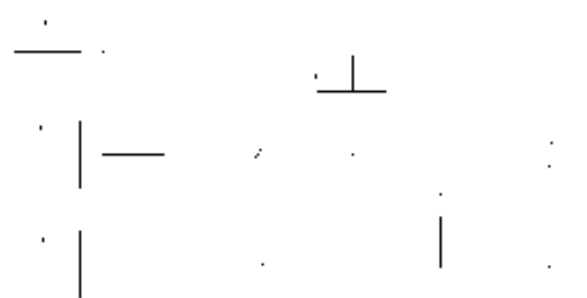


Figura 6 - Conversão estrela-delta.

As equações para transformação estrela-delta dos capaci-

tores são:

$$C_{D12} = \frac{C_{c11}C_{c12} + C_{c12}C_{c22} + C_{c11}C_{c22}}{C_{c22}} \quad (27)$$

$$C_{D23} = \frac{C_{c11}C_{c12} + C_{c12}C_{c22} + C_{c11}C_{c22}}{C_{c11}} \quad (28)$$

$$C_{D13} = \frac{C_{c11}C_{c12} + C_{c12}C_{c22} + C_{c11}C_{c22}}{C_{c12}} \quad (29)$$

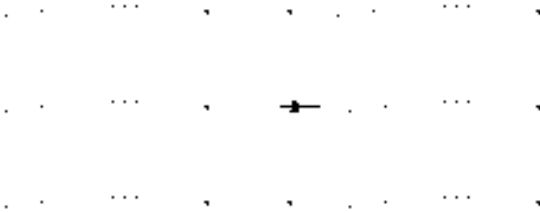


Figura 7 - Modelo final do circuito para cabo paralelo.

B. Modelo para Cabo Coaxial

Os cabos coaxiais são um caso especial, pois o segundo condutor está distribuído ao redor do condutor 1, conforme mostra a Figura 8. A separação entre qualquer ponto no condutor 2 e o eixo do condutor 1 é r_{12} . Portanto, $r_{22}=r_{12}$, $L_{p12}=L_{p22}$ e $C_{p12}=C_{p22}$.

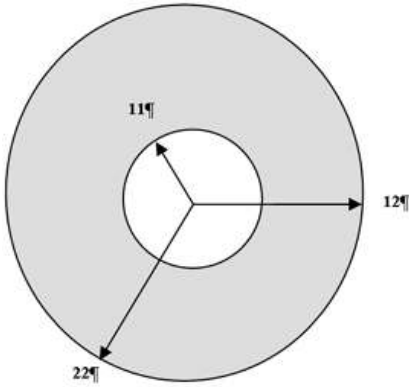


Figura 8 - Condutores coaxiais.

A formulação do modelo para o cabo coaxial segue um desenvolvimento semelhante aquele obtido para o modelo do cabo paralelo. Em [5], considera-se as impedâncias primitivas dos cabos e a influência das correntes dos outros cabos no cabo em análise.

Para um único condutor, a energia elétrica armazenada no condutor é função da corrente e dos três fatores: resistência, indutância e capacitância. Uma vez que a energia é definida em termos de tensão, então em qualquer instante tem-se:

$$V(t) = L_{p11} \frac{di_{p1}}{dt} + R_{p11} i_{p1} + \frac{1}{C_{p11}} \int i_{p1} dt \quad (30)$$

Se a corrente é descrita como uma função senoidal no tempo, com frequência angular ω , então a impedância pri-

mitiva deste condutor isolado pode ser definida como:

$$Z_{p11} = j\omega L_{p11} + R_{p11} + \frac{1}{j\omega C_{p11}} \quad (31)$$

As impedâncias primitivas dos outros condutores, e dos pares condutores, podem ser definidas de forma semelhante.

Para análise no domínio do tempo $j\omega$ pode ser substituído por s , o operador Laplaciano.

Para a secção de um conjunto de três condutores como ilustrado na Figura 9, a tensão em qualquer condutor é função da corrente em todos os três conforme as equações (32) a (34).

$$V_{p1} = Z_{p11}i_{p1} + Z_{p12}i_{p2} + Z_{p13}i_{p3} \quad (32)$$

$$V_{p2} = Z_{p21}i_{p1} + Z_{p22}i_{p2} + Z_{p23}i_{p3} \quad (33)$$

$$V_{p3} = Z_{p31}i_{p1} + Z_{p32}i_{p2} + Z_{p33}i_{p3} \quad (34)$$

Este conjunto de equações primitivas descreve as características de uma matriz de condutores paralelos. O número de equações é igual ao número de condutores.

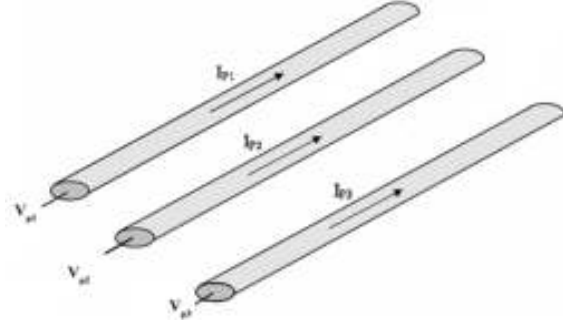


Figura 9 - Tensões e correntes primitivas.

No caso do cabo coaxial, os três condutores da Figura 9 representam o condutor central, a blindagem e o condutor cujo sinal pode interferir no condutor central, [5].

A Figura 10 representa um conjunto de malhas completas para o estudo da interferência eletromagnética de cabos coaxiais onde o condutor 1 representa o condutor interferente, o condutor 2 representa a blindagem e o condutor 3 o condutor central. As variáveis I_{p1} , I_{p2} e I_{p3} representam as correntes primitivas nos condutores, e I_{L1} , I_{L2} e I_{L3} representam as correntes nas três malhas.

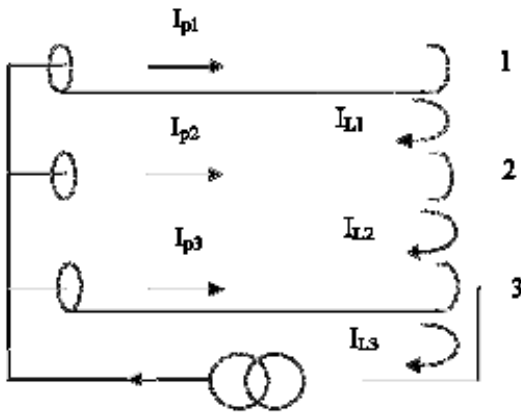


Figura 10 - Tensões e correntes de malhas.

A partir da formulação das tensões e correntes de malha, impedâncias primitivas e impedâncias de circuito, chegamos ao modelo de circuito da Figura 11 para o cabo coaxial, [4,5].

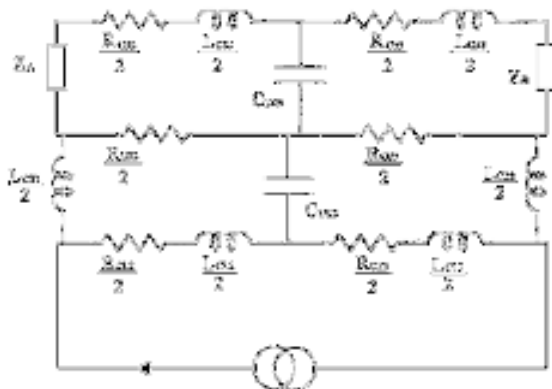


Figura 11 - Modelo de circuito para a configuração da figura 10.

Onde

R_{C12} é a resistência do condutor interferente ou de uma estrutura sob interferência

L_{C12} é a indutância de transferência – condutor interferente/blindagem

$L_{C22} + L_{C12}$ é a indutância de malha blindagem/condutor interferente

R_{C23} é a resistência da blindagem

L_{C33} é a indutância da malha condutor central/blindagem

R_{C33} é a resistência do condutor central

C_{D12} é a capacitância blindagem/condutor interferente

C_{D23} é a capacitância condutor central/blindagem

Z_A e Z_B são as impedâncias de entrada do equipamento A e B respectivamente

III. METODOLOGIA DE TRABALHO

Inicialmente, como suporte a implementação dos modelos computacionais fez-se necessária a obtenção de parâmetros primitivos do cabo e blindagem, tais como: resistência, capacitância e indutância. Para permitir uma maior precisão das simulações e uma melhor comparação com os ensaios em laboratório (validação), aumentou-se a faixa da freqüên-

cia na qual foram calculados os parâmetros primitivos. Para isso, utilizou-se algoritmos de regressão linear de terceira ordem. Os valores de resistência, capacitância e indutância foram determinados a partir da equação resultante desta regressão polinomial.

As Figuras de 12 e 13 ilustram o comportamento de alguns destes parâmetros medidos em um ensaio preliminar.

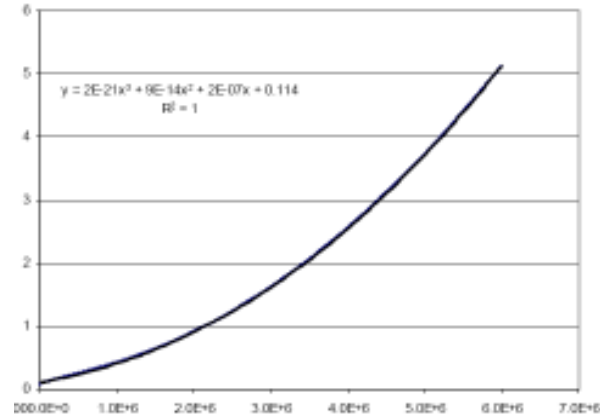


Figura 12 - Resistência do condutor em função da frequência.

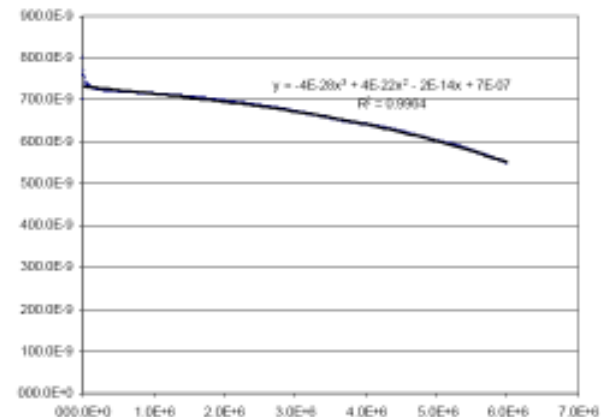


Figura 13 - Indutância da blindagem em função da frequência.

A partir dos dados primitivos obtidos na fase preliminar, foram implementados no programa Matlab, versão 2006a os modelos computacionais para cabos paralelos e coaxiais mostrados respectivamente nas Figuras 14 e 15.



Figure 14 – Cabo paralelo utilizado para modelagem



Figure 15 – Cabo coaxial utilizado para modelagem

Para esse desenvolvimento, foi desenvolvido um programa que calcula todos os valores de impedâncias do circuito a ser simulado, com base nos valores primitivos determinados nos testes dos cabos, sendo estes dados transferidos automaticamente ao Matlab-Simulink (aplicativo gráfico de simulações), o qual obteve a resposta em frequência do comportamento do cabo frente às diversas perturbações, [6].

A Figura 16 mostra o diagrama do circuito para cabos paralelos na janela do Simulink.

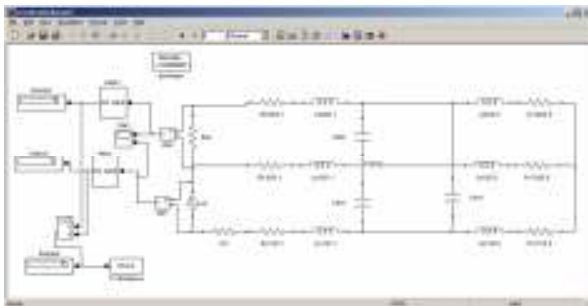


Figure 16 - Circuito para cabos paralelos no simulink

Os blocos representantes dos resistores, indutores e capacitores possuem uma representação gráfica idêntica a adotada, sendo que seus valores nominais foram calculados para cada frequência obedecendo aos parâmetros primitivos explicitados anteriormente.

Para a simulação de cabos coaxiais, utilizou-se seu respectivo modelo o qual também foi implementado no Simulink.

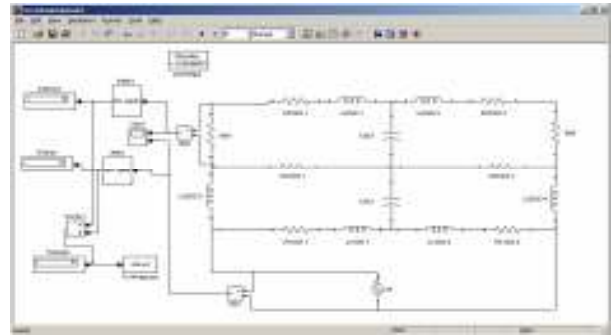


Figure 17 - Circuito para cabos coaxiais no simulink

Para a validação do modelo computacional desenvolvido, fez-se necessário a realização de ensaios laboratoriais semelhantes aos simulados computacionalmente, a fim de realizar a comparação dos dados e validar os modelos.

Para a realização dos ensaios, foi construída uma bancada específica, composta de cinco mesas de suporte, cada uma medindo 2,4 metros de comprimento, 20 cm de largura e 100 cm de altura em relação ao solo. As mesas foram construídas totalmente em madeira, sem nenhum tipo de objeto metálico de grandes dimensões de modo a se evitar qualquer tipo de interferência na área dos ensaios, bem como para proporcionar repetibilidade em todas as medições realizadas.

As mesas foram colocadas sobre um plano metálico composto de chapas de aço galvanizado, medindo 15 metros de comprimento e 1,5 metros de largura. Este plano oferece uma baixa impedância de retorno aos transitórios eletromagnéticos aplicados nos ensaios, assim como características físicas passíveis de reprodução.

O arranjo permite a realização de ensaios de indução por meio da colocação de cabos geradores de distúrbios em paralelo com cabos ensaiados, de modo a se avaliar o acoplamento entre estes dois tipos de cabos para cada um dos diferentes tipos de transitórios eletromagnéticos aplicados. A Figura 18 mostra a bancada de testes construída no Lactec – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.



Figure 18 - Experimental set-up.

Foram realizadas simulações de três tipos de eventos: surtos de origem atmosférica, transitórios elétricos rápidos e campo magnético de corrente em 60 Hz.

Para cada um dos eventos simulados, executou-se uma série de ensaios visando avaliar a blindagem do cabo nas diversas condições. O cabo em teste foi avaliado sob as seguintes condições:

- a-) Sem aterramento;
- b-) Aterrado na extremidade mais próxima do ponto de aplicação do sinal;
- c-) Aterrado na extremidade mais afastada do ponto de aplicação do sinal;
- d-) Aterrado nas duas extremidade;

Embora os ensaios laboratoriais realizados contemplem todos os métodos de instalação de cabos (item de *a* até *d*), neste trabalho discute-se somente a avaliação dos dois modelos computacionais quem tratam de cabos paralelos e coaxiais blindados e sem aterramento nas extremidades (item *a*).

A. Resultados

As simulações realizadas a partir implementação computacional descrita anteriormente, proporcionaram a geração das curvas de interferências eletromagnéticas dos cabos estudados. Os resultados das simulações de cada cabo são mostrados com os resultados dos ensaios laboratoriais para facilitar a análise. As Figuras de 19 a 26 mostram todos os resultados, sendo mostrada alternadamente figuras de ensaios computacionais e ensaios laboratoriais.

i) Cabo Coaxial

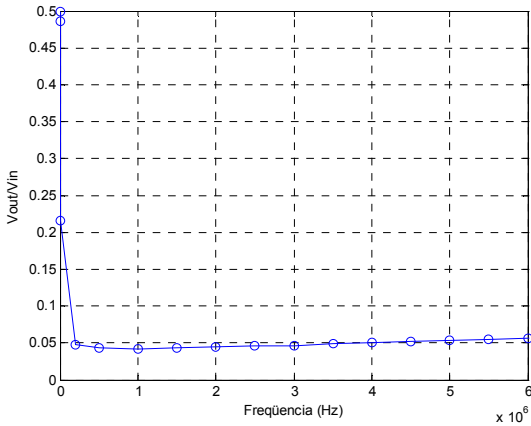


Figure 19 – Simulação computacional para o cabo coaxial.

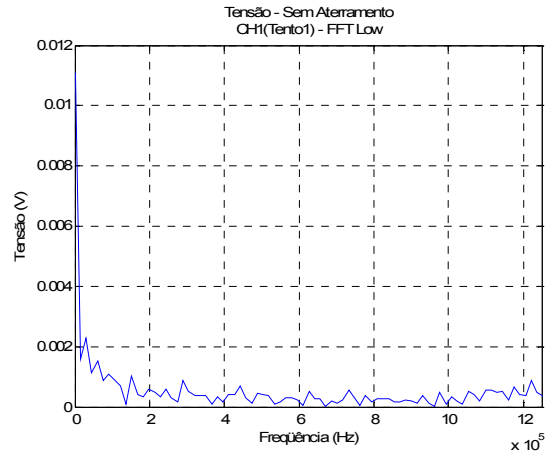


Figure 20 – Ensaio laboratorial para o cabo coaxial.

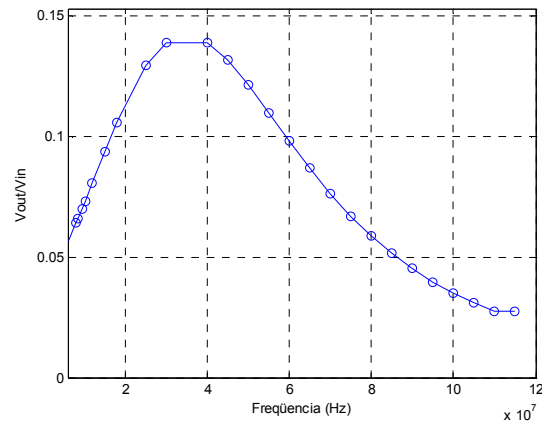


Figure 21 - Simulação computacional para o cabo coaxial.

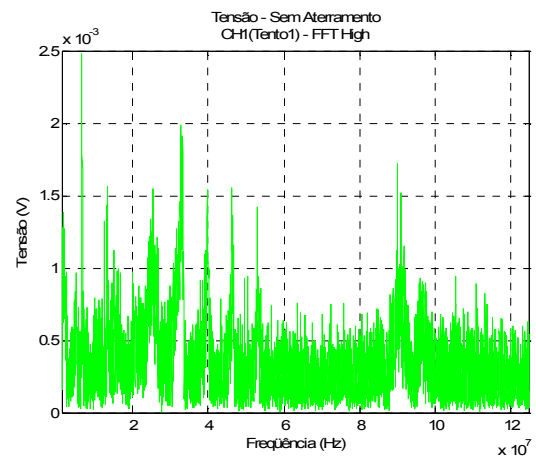


Figure 22 - Ensaio laboratorial para o cabo coaxial.

ii) Cabo Paralelo

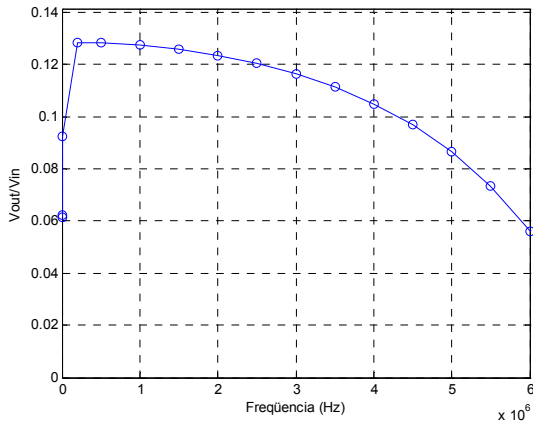


Figure 23 - Simulação computacional para o cabo paralelo.

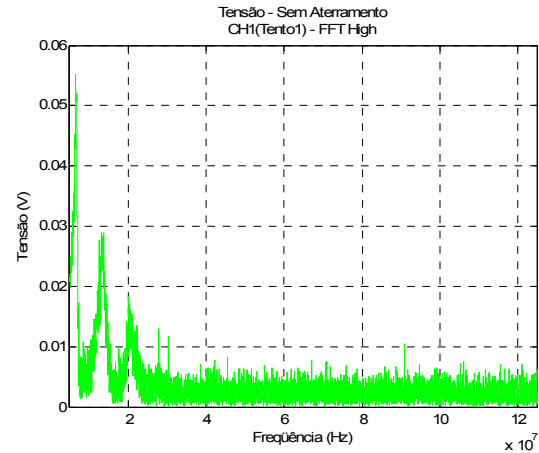


Figure 26 - Ensaio laboratorial para o cabo paralelo.

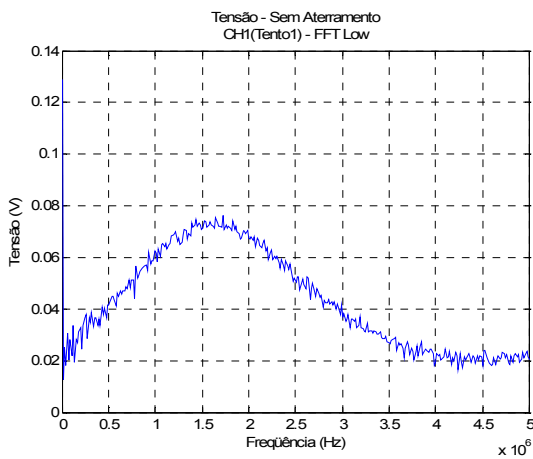


Figure 24 - Ensaio laboratorial para o cabo paralelo.

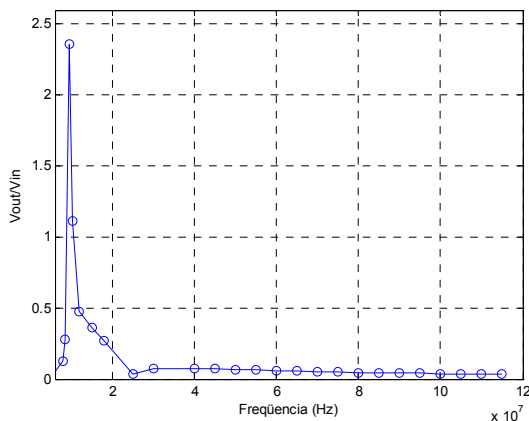


Figure 25 - Simulação computacional para o cabo paralelo.

B. Análises dos Resultados

No cabo coaxial com blindagem, cujas análises são mostradas nas Figuras 19 a 22, utilizou-se o modelo para cabos coaxiais descrito anteriormente, sendo possível observar que para valores de frequências menores que 1MHz, a simulação, da figura 19, apresenta características semelhantes ao ensaio realizado, observado na Figura 20. O decaimento acelerado do sinal e depois a regularidade do sinal são observados em ambos os casos. Para valores de frequência acima de 2MHz, os gráficos em ambos os itens têm também características semelhantes.

Para frequências maiores (até 12×10^7 Hz), nos ensaios com os cabos coaxiais (Figuras 21 e 22), observou-se que 90% a potência do sinal ficou compreendida no intervalo de frequências entre 500kHz e 6MHz. Por outro lado, é possível notar que os picos máximos ficaram muito próximos confirmando a relação entre o ensaio laboratorial e a simulação computacional. O pico de sinal presente na frequência de 9MHz (Figura 22) não foi representado na simulação computacional (Figura 21).

Para o cabo paralelo e sem blindagem, cujas análises são mostradas nas Figuras 23 a 26, utilizou-se o modelo de cabos paralelos descrito anteriormente, permitindo observar que para frequências abaixo de 0,6MHz a simulação (Figura 23) apresentou um comportamento próximo ao ensaio realizado, porém a distribuição apresenta decaimento a partir de 2,5MHz, mostrando certa relação entre os sinais.

Na simulação, para frequências mais altas (até 12×10^7), apresentada na Figura 25, observou-se um comportamento muito similar aos resultados obtidos em laboratório (Figura 26). Em ambos os casos, o pico do sinal ocorre em aproximadamente 0,5MHz, havendo um decrescimento gradual. Neste caso a similaridade atingiu cerca de 95%.

Os ajustes dos modelos necessários para a obtenção de uma relação confiável também foi realizado, pois nem sempre foi possível usar o modelo da forma em que foi inicialmente concebido [5].

IV. CONCLUSÕES

Embora os gráficos da simulação e do ensaio apresentaram uma pequena variação na escala, é possível notar que em todos há grande correlação entre o modelo computacional e o comportamento efetivo tomado em laboratório. Em todos os casos a simulação resultou em interferência eletromagnética relativamente elevada para frequências baixas, fenômeno também existente nos ensaios laboratoriais. Em frequências maiores (acima de 10MHz) notou-se que na maioria das vezes, houve nas simulações pelo menos um pico, que esteve em uma região próxima ao encontrado nos ensaios.

Realizando uma análise mais apurada, é possível notar matematicamente a correlação de ambos os ensaios (computacional e laboratorial), o qual resulta em média 83,75% de correlação entre ambos. Portanto, as simulações representam de forma simplificada o comportamento das interferências eletromagnéticas as quais foram submetidos os cabos avaliados em laboratório, compondo uma ferramenta valiosa na predeterminação e inferência de valores por meio de um modelo computacional.

Por meio destas simulações, torna-se possível prever o comportamento das interferências eletromagnéticas nos sistema da ISA - CTEEP antes que eles ocorram na prática, deixando o sistema elétrico mais confiável e seguro.

V. AGRADECIMENTOS

Agradecimento à FUNDEB – Fundação para o Desenvolvimento de Bauru cooperada com a Universidade Estadual Paulista – UNESP, concretizou a parceria com a financiadora do projeto de pesquisa e desenvolvimento CTEEP.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Greenwood, A., “Electrical transients in power systems”, John Wiley & Sons-Inc., New York, 1992.
- [2] Goedbloed, J., ‘Electromagnetic compatibility’. Section 4.3: Capacitive crosstalk; Section 4.4: Inductive crosstalk (Prentice Hall 1990)
- [3] Skitek, G. G.; Marshall, S. V., “Electromagnetic concepts and application”. Section 8.3: Magnetostatic field intensity from the Biot-Savart Law; Section 2.5: Electric field intensity from a line of charge (Prentice Hall, 1982)
- [4] Almada, F. Y. D., “Modelo de Cabos elétricos com Parâmetros Variáveis com a Frequência”, 2000.
- [5] Darney, I., “Circuit Modelling for Electromagnetic Compatibility”, Electronics & Communication Engineering Journal, Agosto, 1997
- [6] TransÉnergie Technologies Inc “SimPowerSystems For Use with Simulink: Users Guide”, 2004