WILLIAM GERLACH DIETZ

**ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA ENTRE
CONDUTORES COM A UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR SPICE**

São Paulo
2007

WILLIAM GERLACH DIETZ

**ANÁLISE DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA ENTRE
CONDUTORES COM A UTILIZAÇÃO DO SIMULADOR SPICE**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.**

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio F. Sartori

São Paulo
2007

RESUMO

O fenômeno “crosstalk” constitui-se de acoplamentos eletromagnéticos não intencionais entre condutores. Motivado pela importância deste fenômeno para a área de Compatibilidade Eletromagnética, este trabalho apresenta uma metodologia de análise do fenômeno através do aplicativo SPICE considerando-se configurações compostas por condutores múltiplos. A proposta de desenvolvimento de uma ferramenta computacional de simulação do fenômeno utilizando uma versão estudantil, com livre acesso, possibilita, entre outras coisas, a disseminação de um modelo alternativo, simples e eficaz, e a inclusão do estudo do “crosstalk” no conteúdo programático de cursos de Graduação ou Pós-graduação. Para este fim, adotou-se um modelo de simulação de acoplamento eletromagnético com base em modelos de linha de transmissão. Tal modelo é complementado com geradores vinculados controlados por tensão e corrente, que representam fontes de interferência eletromagnética. Em face de limitações dos blocos funcionais que representam essas fontes no aplicativo, foi utilizado em um primeiro instante um método de representação do modelo através de arquivos-texto, ao invés da utilização da interface gráfica existente no software. Posteriormente, novos blocos foram desenvolvidos e acrescentados à biblioteca, tornando possível a aplicação dessa interface diretamente nas simulações. A validação do modelo foi feita, inicialmente, comparando-se os resultados simulados àqueles disponíveis na literatura internacional. Além disto, foi desenvolvida uma bancada experimental para comprovação dos resultados e validação do modelo implementado no aplicativo SPICE através de casos simples do fenômeno. Esses resultados mostram a viabilidade da utilização dos componentes desenvolvidos para o aplicativo, tornando possível e confiável o uso dessa ferramenta na simulação do fenômeno “crosstalk”. Passou-se então a aplicação da ferramenta desenvolvida a sistemas mais complexos com um número superior de condutores.

ABSTRACT

This work presents an approach, in which the well-known SPICE simulator is used as a tool to simulate the phenomenon crosstalk. Basically, it is based on transmission line model, where the electromagnetic interferences are simulated by controlled voltage and current sources. Due to the limitations of the available Spice models concerning multiconductors configurations, additional models were developed and implemented as part of the SPICE library. Theoretical and experimental results were obtained. They were used as part of the validation process of the proposed methodology. The developing of specific models allowed the use of this modeling in SPICE student versions. This turns possible the introduction of crosstalk simulations in undergraduate and graduate courses. Besides, the methodology was applied to complex systems in order to present its versatility.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO DA ARTE	3
3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	7
3.1 Introdução	7
3.2 Aplicativo SPICE	7
3.3 Aspectos Teóricos	8
3.4 Implementação no SPICE	15
3.5 Exemplo Prático	17
4. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	20
4.1 Introdução	20
4.2 Comparação de Resultados com os disponíveis na Literatura	20
4.3 Resultados Experimentais	23
4.3.1 Descrição dos Equipamentos	23
4.3.2 Cálculo dos Parâmetros de Simulação	25
4.3.3 Resultados Experimentais	25
4.4 “Crosstalk” gerado por Descarga Atmosférica	26
4.4.1 Descrição do Experimento	26
4.4.2 Implementação do Caso	27
4.4.3 Resultados	27
4.5 Discussão dos Resultados	29
5. ESTUDO SOBRE INFLUÊNCIA DAS PERDAS NAS SIMULAÇÕES DA FERRAMENTA	32
5.1 Introdução	32
5.2 Estudos Comparativos	32
5.2.1 Comparação entre Modelos para Linhas Simples	32
5.2.2 Modelos a serem comparados para Linhas Acopladas	33
5.2.3 Resultado Comparativo das Simulações	35
5.2.3.1 Descarga Atmosférica	35
5.2.3.2 Dois Fios Paralelos Suspensos	36
6. CONCLUSÃO	38

ANEXO A. SIMULAÇÕES DE CROSSTALK EM SPICE COM AUXÍLIO DO “NETLIST”	39
A.1 Introdução	39
A.2 Aspectos relevantes do SPICE	39
A.3 Metodologia Geral	40
A.4 Exemplo Didático	41
A.5 Discussão	42
ANEXO B. DESENVOLVIMENTO DE BLOCOS FUNCIONAIS PARA A BIBLIOTECA DO SPICE	45
B.1 Introdução	45
B.2 Metodologia Geral	45
B.3 Exemplo Didático	46
B.4 Discussão	49
ANEXO C. IMPLEMENTAÇÃO DE FORMAS DE ONDA REAIS EM SIMULAÇÕES NO SPICE	50
C.1 Introdução	50
C.2 Metodologia Geral	50
C.3 Discussão	52
REFERÊNCIAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Modelo de linha de transmissão de Branin	8
Figura 3.2 - Configuração Simples de “Crosstalk”	12
Figura 3.3 - Menu de opções do SPICE	16
Figura 3.4 - Tela do modelo de “crosstalk” implementado em SPICE	17
Figura 4.1 - Modelo π do caso discutido	22
Figura 4.2 - Pulso injetado no condutor gerador das IEM	22
Figura 4.3 - Tensão induzida no condutor receptor das IEM	23
Figura 4.4 - Função de Transferência do fenômeno “crosstalk” (“near-end”)	23
Figura 4.5 - Tensão induzida obtida por modelo a parâmetros concentrados	24
Figura 4.6 - Configuração utilizada no experimento	25
Figura 4.7 - Gaiola de Faraday utilizada no experimento	25
Figura 4.8 - Equipamento de Aquisição de Dados	26
Figura 4.9 - Comparação entre resultado experimental e simulado	27
Figura 4.10 - Configuração do Experimento com Descarga Atmosférica	28
Figura 4.11 - Descarga Atmosférica Implementada pelo Gerador de Pulsos	29
Figura 4.12 - Resultado comparativo: tensão induzida no condutor receptor.	29
Figura 4.13 - Detalhe no Valor de Pico da Tensão	30
Figura 5.1 - Simulação de linhas simples com perdas e sem perdas	33
Figura 5.2 - Modelo π com perdas e uma seção	34
Figura 5.3 - Modelo com linhas desacopladas simples	34
Figura 5.4 - Modelo com linhas desacopladas e perdas em 3 pontos	35
Figura 5.5 - Comparação entre modelos para o caso de Descarga Atmosférica ...	36

Figura 5.6 - Comparação entre modelos para o caso de Fios Paralelos e
Suspensos 37

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno “crosstalk” constitui-se de acoplamentos eletromagnéticos não intencionais entre condutores. Pode-se mencionar, como exemplos de análise de “crosstalk”, o acoplamento eletromagnético entre as linhas de transmissão e os cabos de telefonia, entre trilhas de placas de circuito impresso etc, cujos valores de tensões e correntes resultantes poderão originar eventuais interferências eletromagnéticas (IEM).

A importância da análise deste fenômeno está relacionada à crescente utilização de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos atuais, que apresentam elevada emissão e baixa imunidade eletromagnética, e à necessidade de se poder prever e controlar esses níveis de emissão e de imunidade visando garantir o funcionamento destes, de forma concomitante, nos diversos ambientes eletromagnéticos. Assim, a importância da análise de IEM entre condutores deve ser destacada, pois a avaliação preliminar dos sinais por eles conduzidos poderá auxiliar na prevenção de IEM, ou seja, garantir os níveis previstos pelas normas, visando proporcionar a compatibilidade eletromagnética (CEM) dos diversos sistemas e equipamentos.

Observa-se que, através da adoção prévia de uma metodologia de análise de IEM, a busca de soluções para eventuais problemas resultantes dos diversos fenômenos característicos do ambiente eletromagnético considerado poderá ser facilitada. Ressalta-se, como sendo de notório saber, que a solução de problemas de IEM, tanto no que se refere aos recursos técnicos quanto aos recursos econômicos, resultarão em maiores restrições e ônus, quanto mais distante das fases de projetos iniciais estas medidas forem consideradas. Pode-se mencionar que, dependendo da complexidade do sistema elétrico, a adoção de soluções visando atingir a CEM, poderá resultar em severas restrições técnicas ou mesmo na adoção de uma nova concepção de projeto.

Motivado pela importância do fenômeno descrito anteriormente, este trabalho tem por objetivo descrever uma metodologia de análise de “crosstalk” e desenvolver uma ferramenta computacional adequada para a simulação do fenômeno considerando-se configurações compostas por condutores múltiplos. Para este fim,

utilizou-se como parte central deste sistema computacional alguns modelos disponíveis no simulador de circuitos SPICE, como, por exemplo, os modelos de linha de transmissão já existentes. Para implementar o acoplamento eletromagnético entre os condutores, é necessária a utilização de fontes controladas por tensão e corrente, representando, assim, as fontes de IEM presentes. Devido a não conformidade dos modelos que representam estas fontes com a necessidade do modelo de “crosstalk” utilizado, novos modelos foram desenvolvidos, e estes foram adicionados à biblioteca do aplicativo, tornando possível a utilização da interface gráfica do SPICE.

2. ESTADO DA ARTE

Os estudos em CEM iniciam-se, na década de 20, com os primeiros estudos relacionados com transmissões telegráficas e com a implementação das primeiras linhas de transmissão de energia [1].

Na década de 30, os estudos se voltam para a interferência de motores elétricos e estradas eletrificadas. Em 1933, a CISPR (Comite International Special des Perturbation Radiotechniques) estabelece as primeiras recomendações, com o objetivo de estabelecer níveis aceitáveis de IEM. Desde então, tais recomendações se tornam normas que vêm se estabelecendo, década após década, até os dias atuais [2].

Na década de 60, a consideração deste fenômeno ganha importância, pois se torna mais comum com o aparecimento dos transistores, circuitos integrados e computadores. Com relação aos métodos de modelagem e as ferramentas utilizadas, diversos modelos podem ser mencionados [3]-[6].

Alguns métodos gráficos para solução de problemas de ondas eletromagnéticas são extremamente confiáveis, para linhas sem perdas e desacopladas [7]. Menciona-se, por exemplo, o método das treliças, confiável em análises no domínio do tempo; e a Carta de Smith, aplicada em análises no domínio da frequência.

O método descrito por Branin apresenta uma solução exata de equação de linha de transmissão sem perdas [8]. Além disso, essa solução possibilitou a implementação de modelos de linha através de métodos computacionais [9].

Como ferramenta para implementação destes métodos computacionais, tem-se o Spice. Este simulador de circuitos contém, em sua biblioteca, um componente de linha de transmissão que utiliza o modelo de Branin [8], possibilitando a análise de circuitos com confiança segundo [9].

No final da década de 70, com a intensificação de aplicações de métodos numéricos, o estudo do fenômeno de IEM entre condutores teve um grande salto em termos de capacidade de predição [10]-[12]. Nesta mesma época, o termo “crosstalk” é amplamente utilizado para denominar tal fenômeno dentro do estudo de CEM e métodos numéricos vêm sendo, cada vez mais, utilizados para a análise de

“crosstalk” [13]-[16]. As inovações dentro do tema dizem respeito à possibilidade de modelamento de novas configurações de condutores, como por exemplo, cabos de par trançado, cabos blindados, trilhas em placas de circuito impresso etc [9].

Paul compila uma série de artigos técnicos sobre a descrição, implementação e verificação de resultados do modelo de desacoplamento de linhas através do Spice [9]. O trabalho de estudo do fenômeno crosstalk demonstrado nesta dissertação teve sua motivação inicial na repetição dos resultados demonstrados por Paul. A maior dificuldade na implementação do modelo está na falta de publicações que realmente demonstram detalhes específicos da ferramenta utilizada. Esta dificuldade gerou a necessidade de pesquisar em [17] a possibilidade da criação de modelos para a biblioteca do Spice. A superação deste obstáculo proporcionou, então, uma flexibilidade, facilidade e a divulgação de trabalhos científicos [18]-[21]. As simulações apresentadas em [9], por não terem estes recursos aplicados, utilizam o método de análise através da descrição dos circuitos por arquivos-texto, de difícil interpretação e utilização.

O trabalho de implementação do modelo matemático de simulação do fenômeno *crosstalk* no Spice foi apresentada como artigo técnico ao MOMAG 2004 (Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 2004). O artigo foi aprovado e foi encaminhado para apresentação oral na sessão de Compatibilidade Eletromagnética [19].

Em 2005, o trabalho de verificação da ferramenta desenvolvida no Spice através de comparações com os resultados da bibliografia internacional e, principalmente, com os resultados experimentais realizados nos laboratórios do Centro Tecnológico da Marinha foi avaliado pela comissão do ISEF 2005 (Internacional Symposion on Eletromagnetic Fields) após submissão de artigo técnico [20]. O artigo foi aprovado e apresentado no Simpósio na Espanha. Após apresentação, o artigo foi aprovado para publicação na COMPEL (The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering) [21].

A ferramenta computacional de simulação do fenômeno *crosstalk* foi, também, utilizada em um estudo de interferência eletromagnética gerada através de

descarga atmosférica. Esta aplicação resulta no artigo técnico submetido e aprovado para apresentação no MOMAG 2006 [13].

Depois de superada a fase de implementação do fenômeno de acoplamento eletromagnético entre condutores múltiplos e os resultados de simulação terem sido comparados com os resultados de simulação e experimentais de [9], passou-se à tentativa de incorporação de perdas ao modelo.

Inicialmente, propôs-se um estudo comparativo da influência das perdas em diversos casos. Este estudo foi realizado simulando-se, paralelamente, o modelo sem perdas e modelos a parâmetros distribuídos. O modelo a parâmetros distribuídos apresenta uma facilidade na incorporação das perdas. Observou-se, no entanto, que modelos que utilizam parâmetros distribuídos têm uma limitação computacional gerada pela relação entre frequência da excitação ou do comprimento de onda da excitação em relação ao comprimento das linhas em consideração.

Artigos relacionados a isso foram publicados e buscam ferramentas poderosas que atendem casos extremos de implementação, ou seja, altas frequências e comprimentos de linha curtos [22], [23]. A implementação em Spice tenta aumentar o poder de simulação para casos nos quais modelos a parâmetros distribuídos não apresentam resultados satisfatórios. Ao mesmo tempo, a ferramenta procura não atingir casos extremos que necessitam grande capacidade computacional ou métodos de grande complexidade de implementação comparados ao Spice. Tais métodos são descritos na literatura, mas são de difícil implementação em nível didático [24].

Métodos como o método dos elementos finitos, vector fitting, método dos momentos e o método das diferenças finitas no domínio do tempo apresentam resultados satisfatórios em relação à inclusão de perdas, altas frequências e comprimentos curtos de linha.

Não se propôs, neste trabalho, substituir tais ferramentas, mas tornar o acesso ao estudo do fenômeno de crosstalk muito mais fácil, não restringindo este importante e novo ramo da compatibilidade eletromagnética fora do alcance de uma massa de estudantes de Graduação e Pós-graduação. Ao mesmo tempo, não se pode perder em fidelidade em relação ao fenômeno real. Ou seja, simulações a partir desta ferramenta devem apresentar correspondência com o fenômeno real, possibilitando,

assim, a inclusão de estudos mais avançados e, até mesmo, aplicações industriais simples.

Este trabalho de mestrado tem uma abordagem bastante prática quanto à aplicação dos modelos discutidos por Paul [25]. Um desenvolvimento teórico de toda formulação pode ser encontrado na dissertação de Tosin [26]. As duas dissertações, a apresentada neste documento e [26], se complementam mutuamente, formando a união entre teórico e prático.

3. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

3.1 Introdução

O modelo de “crosstalk” utilizado para o desenvolvimento da ferramenta computacional de simulação do fenômeno tem características peculiares que se destacam dos modelos tradicionais. Por isso, neste capítulo, serão descritos alguns aspectos importantes deste simulador. Inicialmente, será justificada a escolha do aplicativo SPICE. Em seguida, apresentam-se os aspectos teóricos do modelo, suas características, vantagens e restrições. Por fim, descrevem-se os dois métodos de implementação desenvolvidos para o aplicativo, bem como, com um exemplo didático para um melhor entendimento deste processo.

3.2 Aplicativo SPICE

Para a implementação do modelo proposto, necessita-se um aplicativo de simulação de circuitos. Adotou-se o aplicativo SPICE devido às suas características, entre as quais se destacam:

- Sua disponibilidade, pois possui diversas versões, entre estas as estudantis que apresentam bibliotecas relativamente extensas;
- Ferramenta computacional de ampla utilização em projetos de engenharia elétrica;
- Possibilita diversos tipos de análises, no domínio do tempo e no domínio da frequência, e a utilização de recursos matemáticos;
- Permite a incorporação de modelos na sua Biblioteca existente, e
- Em particular, apresenta a solução exata para as equações de linha de transmissão.

Apesar de suas vantagens, existem blocos funcionais, essenciais para a implementação do modelo, porém, contendo limitações. Desta forma, considera-se fundamental o desenvolvimento de métodos alternativos, para contornar estas

limitações e possibilitar a utilização do SPICE na simulação do fenômeno aqui abordado. Os métodos serão apresentados no item 3.4 e mais bem detalhados nos anexos A e B.

3.3 Aspectos Teóricos

O desenvolvimento da ferramenta de simulação do fenômeno “crosstalk” baseia-se no modelo descrito em [9]. Esse modelo tem como parte central o modelo de linha de transmissão (LT) desenvolvido por Branin [8]. A Fig. 3.1 apresenta o circuito equivalente correspondente ao modelo de LT considerado. Ressalta-se, que a solução deste circuito é uma solução exata para as equações de LT sem perdas e uniforme [8]. Apresenta-se a seguir, os detalhes relativos ao desenvolvimento do modelo de Branin:

Fig. 3.1 Modelo de linha de transmissão de Branin.

O modelo de LT, sem perdas, atende às equações apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial z} V(z, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} I(z, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} V(z, t) \quad (3.2)$$

Observa-se que, como ponto de partida para obtenção do modelo computacional a ser implementado, define-se as soluções das equações de LT, sem perdas, (3.3) e (3.4):

$$V(z, t) = V^+ \left(t - \frac{z}{v} \right) + V^- \left(t + \frac{z}{v} \right) \quad (3.3)$$

$$Z_C I(z, t) = V^+ \left(t - \frac{z}{v} \right) - V^- \left(t + \frac{z}{v} \right) \quad (3.4)$$

Nestas equações, Z_C é a impedância característica da LT, e v a velocidade de propagação da onda no condutor.

Substituindo-se os valores de z para o início ($z = 0$) e o fim ($z = \ell$) da linha, têm-se:

$$V(0, t) = V^+(t) + V^-(t) \quad (3.5)$$

$$Z_C I(0, t) = V^+(t) - V^-(t) \quad (3.6)$$

E,

$$V(\ell, t) = V^+(t - T) + V^-(t + T) \quad (3.7)$$

$$Z_C I(\ell, t) = V^+(t - T) - V^-(t + T) \quad (3.8)$$

Onde o tempo de trânsito da linha é:

$$T = \frac{\ell}{v} \quad (3.9)$$

Adicionando e subtraindo (3.5) e (3.6), obtêm-se, respectivamente, as equações (3.10) e (3.11). Analogamente, de (3.7) e (3.8), obtêm-se (3.12) e (3.13).

$$V(0,t) + Z_C I(0,t) = 2V^+(t) \quad (3.10)$$

$$V(0,t) - Z_C I(0,t) = 2V^-(t) \quad (3.11)$$

$$V(\ell,t) + Z_C I(\ell,t) = 2V^+(t-T) \quad (3.12)$$

$$V(\ell,t) - Z_C I(\ell,t) = 2V^-(t+T) \quad (3.13)$$

Impondo um deslocamento no tempo nas equações (3.10) e (3.13), subtraindo T de t , obtêm-se, respectivamente, (3.16) e (3.17). Rearranjando as equações (3.11) e (3.12), obtêm-se (3.14) e (3.15).

$$V(0,t) = Z_C I(\ell,t-T) + 2V^-(t) \quad (3.14)$$

$$V(\ell,t) = -Z_C I(\ell,t) + 2V^+(t-T) \quad (3.15)$$

$$V(0,t-T) + Z_C I(0,t-T) = 2V^+(t-T) \quad (3.16)$$

$$V(\ell,t-T) - Z_C I(\ell,t-T) = 2V^-(t) \quad (3.17)$$

Substituindo (3.17) em (3.14), resulta em (3.18):

$$V(0,t) = Z_C I(0,t) + E_r(\ell,t-T) \quad (3.18)$$

Onde:

$$E_r(\ell,t-T) = V(\ell,t-T) - Z_C I(\ell,t-T) = 2V^-(t) \quad (3.19)$$

Substituindo (3.16) em (3.15), resulta em (3.20):

$$V(\ell,t) = -Z_C I(\ell,t) + E_i(0,t-T) \quad (3.20)$$

Onde:

$$E_i(0,t-T) = V(0,t-T) + Z_C I(0,t-T) = 2V^+(t-T) \quad (3.21)$$

Destaca-se que o aplicativo SPICE disponibiliza, em sua biblioteca, este modelo, implementando as equações (3.18) e (3.20). O modelo é chamado de “T” e

o usuário o caracteriza através dos parâmetros ZC (impedância característica) e TD (tempo de trânsito da linha).

A principal motivação para a adoção de um modelo exato de LT é possibilitar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional isenta de limitações quanto ao comprimento dos condutores. Então, desde que o sistema a ser analisado possua apenas o modo de propagação eletromagnético transversal (TEM), pode-se utilizar apenas um elemento para representar qualquer comprimento de linha para qualquer frequência ou comprimento de onda. Neste ponto, pode-se apresentar a primeira vantagem deste modelo em relação aos modelos a parâmetros concentrados. Na maioria dos casos em CEM, o comprimento dos condutores não possibilita o atendimento das equações (3.22), que relaciona tempos de subida τ_r e de descida τ_f com o tempo de trânsito T da linha, ou (3.23), que relaciona o comprimento elétrico λ da onda trafegante com o comprimento ℓ da linha. Por isso, para estes casos, a abordagem tradicional recomenda a utilização de parâmetros distribuídos. A utilização de parâmetros distribuídos gera a necessidade de subdividir-se a linha em vários sub-circuitos, melhor conhecidos como *lumped-circuits*. Considerando-se que, para aplicações didáticas, temos limitação de recursos computacionais e das próprias ferramentas computacionais, a abordagem tradicional não é viável.

$$\tau_r, \tau_f > 10T \quad (3.22)$$

$$\lambda = 2\pi f > 10\ell \quad (3.23)$$

Versões estudantis do SPICE, devido a limitações no número de blocos funcionais disponíveis para cada simulação, possibilitam a utilização de, no máximo, duas subdivisões a parâmetros distribuídos. Portanto, o modelo a ser implementado é mais versátil e didático, pois se configura um modelo a parâmetros distribuídos. Além disso, a diminuição do número de blocos funcionais utilizados, decorrentes da simulação de cada linha por apenas um elemento, com conseqüente diminuição do número de nós do circuito, aumenta, sensivelmente, a velocidade de processamento das simulações, possibilitando a utilização de uma precisão maior nos resultados.

O modelo de LT, descrito acima, é utilizado na ferramenta computacional de simulação do fenômeno “crosstalk”, considerando-se o acoplamento eletromagnético entre os condutores, através de fontes controladas de corrente e tensão adicionais. Evitando-se, assim, a utilização de modelos com a representação de mútuas, relacionadas aos parâmetros elétricos.

Para um melhor entendimento da metodologia proposta, descreve-se, a seguir, resumidamente, a formulação do modelo de “crosstalk” [9].

As equações (3.1) e (3.2) representam a solução exata para uma LT homogênea e sem perdas. Nestas equações, os parâmetros elétricos são representados por L e C , onde L e C são matrizes quadradas de ordem $n-1$ e n é o número de condutores do sistema a ser analisado. V e I são vetores também de ordem $n-1$. A fim de facilitar o entendimento, descreve-se, a formulação correspondente à configuração mais simples possível, isto é, aquela correspondente a três condutores [10]. Esta configuração está apresentada na Fig. 3.2, onde se considera o terceiro condutor como sendo o plano de terra.

Fig. 3.2 Configuração Simples de “Crosstalk”.

Os índices *FE* e *NE* correspondem, respectivamente, às terminações, denominadas em Inglês por “far-end” (terminação distante) e “near-end” (terminação próxima). Tal notação é amplamente utilizada na literatura especializada na área de CEM, e por esta razão será mantida neste trabalho. Assim, para o caso de três condutores, têm-se:

$$V(z,t) = \begin{bmatrix} V_G(z,t) \\ V_R(z,t) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$I(z,t) = \begin{bmatrix} I_G(z,t) \\ I_R(z,t) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_G & l_m \\ l_m & l_R \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_G + c_m & -c_m \\ -c_m & c_R + c_m \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Os índices *G* e *R* representam, respectivamente, o condutor gerador e receptor das IEM. Os parâmetros com índice *m* representam os fenômenos mútuos entre os dois condutores.

Observa-se que, a partir das matrizes de parâmetros elétricos, pode-se determinar uma matriz “*T*”, denominada Matriz de Transformação, cuja aplicação resulta na diagonalização da matriz de parâmetros, “desacoplando-se”, assim, as equações de LT (3.1) e (3.2) [9]. Portanto, tem-se:

$$T^{-1}LT = l_d = \begin{bmatrix} l_{dG} & 0 \\ 0 & l_{dR} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$T^{-1}CT = c_d = \begin{bmatrix} c_{dG} & 0 \\ 0 & c_{dR} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Os parâmetros elétricos indicados com o índice *d* representam os parâmetros dos circuitos desacoplados. Assim, aplicando-se a formulação descrita acima, obtém-se um circuito formado por duas LT’s desacopladas. Suas impedâncias

características, definidas em (3.30) e (3.31), são implementadas, diretamente, no aplicativo [9].

$$Z_{CdG} = \sqrt{\frac{l_{dG}}{c_{dG}}} \quad (3.30)$$

$$Z_{CdR} = \sqrt{\frac{l_{dR}}{c_{dR}}} \quad (3.31)$$

Com relação à representação do acoplamento entre as LT's, conforme descrito anteriormente, utilizam-se, então, fontes controladas por tensão e corrente. Este procedimento possibilita a representação das tensões e correntes resultantes nos terminais das LT's, isto é, passa-se a considerar, também, os valores decorrentes do acoplamento entre estas linhas. Ressalta-se que esta formulação possibilitou a utilização do modelo de LT do aplicativo SPICE, permitindo-se a representação do acoplamento eletromagnético entre os condutores múltiplos. O modelo para a análise de condutores múltiplos é detalhado em [11], [12], [26].

Assim, as equações que descrevem a implementação das fontes controladas, a partir da matriz T , para cada terminação das LT's, são:

$$V_G = T_{GG}V_1 + T_{GR}V_2 \quad (3.32)$$

$$V_R = T_{RG}V_1 + T_{RR}V_2 \quad (3.33)$$

A Fig. 3.3, referente à implementação do modelo no aplicativo SPICE, detalha esta parte do desenvolvimento proposto. Os blocos funcionais Wpoly recebem as duas tensões V_1 e V_2 ou V_3 e V_4 . Multiplicam-se estas tensões pelos coeficientes determinados pela matriz " T_{ij} " e, finalmente, somam-se estas parcelas, resultando em V_R e V_G , como nas equações (3.32) e (3.33).

Analogamente, para as correntes, temos os blocos funcionais Ypoly, que recebem duas correntes I_1 e I_2 ou I_3 e I_4 . Multiplicam-se estas correntes pelos coeficientes determinados pela matriz " T " e, finalmente, somam-se estas parcelas, resultando em I_R e I_G .

Obtém-se, enfim, o modelo completo de acoplamento eletromagnético entre condutores, com o bloco funcional de LT, desenvolvido por Branin, e as fontes controladas de tensão e corrente W_{poly} e Y_{poly} .

3.4 Implementação no SPICE

Ressalta-se que, inicialmente, uma análise de sensibilidade dos componentes a serem utilizados, através da utilização de arquivos-texto, foi realizada. Esse procedimento envolve a utilização de arquivos-texto, para representar os circuitos, ao invés da utilização da interface gráfica existente atualmente, e encontra-se, detalhadamente, explicada no anexo A. Este estudo de sensibilidade tem por objetivo contornar as limitações existentes em componentes da Biblioteca do aplicativo Spice.

Realizaram-se, então, os primeiros testes da ferramenta computacional, compararam-se os resultados obtidos com os disponíveis na literatura internacional [9]. Devido importância deste tópico, dedicou-se um capítulo para esta fase do projeto, cujos detalhes podem ser obtidos adiante.

Posteriormente, novos blocos funcionais foram desenvolvidos e acrescentados na biblioteca do aplicativo, possibilitando a utilização da interface gráfica existente no simulador. Esta etapa do trabalho tornou a implementação de novas simulações mais simples, prática e didática. Nota-se que, esta atividade foi de extrema valia, pois diminuiu sensivelmente o tempo gasto na implementação das simulações. O desenvolvimento de uma metodologia específica, para a edição de novos blocos funcionais em SPICE, não é de fácil acesso na literatura, e pode ser observada no anexo B. Através desse anexo, pode-se entender a metodologia geral de desenvolvimento de blocos funcionais, onde se apresenta, também, a resolução de um exemplo didático. Neste exemplo, gera-se um dos blocos funcionais desenvolvidos no projeto da ferramenta computacional de simulação do fenômeno “crosstalk”.

Depois de todos os blocos funcionais, necessários para a realização da ferramenta computacional, terem sido desenvolvidos, realizaram-se, então, as

mesmas comparações realizadas anteriormente e disponíveis na literatura internacional. Obtiveram-se, também, resultados experimentais que foram comparados com os obtidos via simulação. Estes resultados são apresentados no capítulo 4.

A seguir, a metodologia específica de implementação no aplicativo SPICE é apresentada:

Através do ícone, mais à esquerda da Fig. 3.3, podemos selecionar blocos funcionais dentro de uma lista. Os blocos principais utilizados serão: T, modelo de linha de transmissão; R, para os resistores; VPULSE, para o gerador de pulsos; GND_ANALOG, para as referências de tensão do sistema computacional; e Wpoly e Ypoly, as fontes controladas de tensão e corrente, desenvolvidas para a ferramenta de simulação [Anexo B].

Fig. 3.3 Menu de opções do SPICE.

Os atributos dos blocos funcionais podem ser modificados através de uma tela que surge ao clicarmos duas vezes sobre o bloco.

Nos componentes T1 e T2 (Fig. 3.4), deve-se inserir as informações de suas respectivas impedâncias características (Z_c), e o tempo de trânsito da onda no condutor.

Fig. 3.4 Tela do modelo de crosstalk implementado em “Spice”.

Nos componentes Wpoly, precisam ser alteradas as constantes multiplicativas do atributo TEMPLATE. Deve-se proceder da mesma maneira para os componentes Ypoly. Estes coeficientes são determinados pela Matriz de Transformação “T”, que é obtida aplicando-se as equações (3.28) e (3.29) em aplicativos como MATLAB, por exemplo.

As características do gerador de pulsos são determinadas pelos parâmetros a seguir:

DC = 0 ou 1	(habilita análise de componente contínua)
AC = 0 ou 1	(habilita análise no domínio da frequência)
V1	(valor mínimo da tensão do pulso)
V2	(valor máximo da tensão do pulso)
TD	(“time delay” ou tempo de atraso)
TR	(rise-time, tempo de subida)
TF	(fall-time, tempo de descida)
PW	(comprimento do pulso)
PER	(período do pulso)

Finalmente, com valores das resistências pré-conhecidos, inserem-se as referências, através do bloco GND_ANALOG. Interligam-se os blocos funcionais com o comando *Draw*.

O tipo de análise é definido através do penúltimo ícone indicado na Fig. 3.3. Para uma análise transitória, deve-se escolher a opção “Transient...”, definindo-se o passo de impressão “Print Step” e o janelamento da simulação “Final Time”. Para uma análise de resposta em frequência, devemos selecionar a opção “AC Sweep...”, variando os limites de frequência máximos e mínimos da simulação.

3.5 Exemplo Prático

Neste item, desenvolve-se um exemplo didático com o intuito de facilitar e consolidar o entendimento dos itens anteriores: Aspectos Teóricos do Modelo e Implementação do Modelo em SPICE.

Considerando-se o caso da Fig. 3.2, onde os dois condutores são AWG 20 ($raio = 16mm$) situados a $2cm$ do solo e espaçados a $2cm$. Neste caso, o terceiro condutor, que é a referência dos dois primeiros, será o próprio plano de terra. Os parâmetros de linha desse problema foram calculados, através do MATLAB, e resultaram em $l_g=l_r=0,918\mu H/m$; $l_m=0,161\mu H/m$; $c_g=c_r=10,3pF/m$ e $c_m=2,19 pF/m$ [9].

Portanto, temos:

$$L = \begin{pmatrix} 0,918 \times 10^{-6} & 0,161 \times 10^{-6} \\ 0,161 \times 10^{-6} & 0,918 \times 10^{-6} \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Sabe-se que, a matriz T , representada pela eq. (3.35), diagonaliza matrizes 2×2 simétricas. Esta será aplicada visando diagonalizar a matriz dada por (3.34):

$$T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

A partir do desenvolvimento descrito em [9], obtém-se a eq. (3.36), que simplifica o resultado obtido em (3.37) e (3.38).

$$\tan 2\theta = \frac{2l_m}{l_G - l_R} \quad (3.36)$$

São, então, determinadas as matrizes T e l_d :

$$T = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (3.37)$$

$$l_d = \begin{pmatrix} 1,079 \times 10^{-6} & 0 \\ 0 & 7,569 \times 10^{-7} \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

Adotando a velocidade da luz ($v_0 = 3 \times 10^8 m/s$) como velocidade de propagação da onda nas LT's, pode-se calcular os parâmetros que são, diretamente, implementados no SPICE. Portanto, obtêm-se T_G e T_R (tempos de trânsito nas linhas) e Z_{CG} e Z_{CR} :

$$T_G = T_R = \ell / v_0 = 15,58 ns \quad (3.39)$$

$$Z_{CG} = v_0 \cdot \ell_G = 323,70 \Omega \quad (3.40)$$

$$Z_{CR} = v_0 \cdot \ell_R = 227,07 \Omega \quad (3.41)$$

No aplicativo SPICE, a partir das equações (3.39), (3.40) e (3.41), definem-se as características das LT's T1 e T2 (Fig. 3.4).

Em seguida, alteram-se os blocos funcionais Wpoly e Ypoly, conforme descrito a seguir. Os parâmetros são definidos pela Matriz de Transformação T :

Wpoly1	POLY(2) V1 0 V2 0 0 0.707 -0.707
Wpoly2	POLY(2) V1 0 V2 0 0 .707 .707
Wpoly3	POLY(2) V3 0 V4 0 0 .707 -.707
Wpoly4	POLY(2) V3 0 V4 0 0 .707 .707

Tabela 3.1 Adequação do bloco funcional Wpoly.

Ypoly1	POLY(2) VF^1 VF^2 0 .707 .707\nVF^1 %1 %2 DC 0V \nVF^2 %5 %6 DC 0V
Ypoly2	POLY(2) VF^3 VF^4 0 -.707 .707\nVF^3 %1 %2 DC 0V \nVF^4 %5 %6 DC 0V
Ypoly3	POLY(2) VF^5 VF^6 0 .707 .707\nVF^5 %1 %2 DC 0V \nVF^6 %5 %6 DC 0V
Ypoly4	POLY(2) VF^7 VF^8 0 -.707 .707\nVF^7 %1 %2 DC 0V \nVF^8 %5 %6 DC 0V

Tabela 3.2 Adequação do bloco funcional Ypoly.

Implementou-se, enfim, um caso de simulação do fenômeno “crosstalk”. Esta metodologia pode ser estendida para qualquer outro caso, desde que seja possível determinarem-se os parâmetros elétricos do sistema em questão. Os resultados destas simulações são descritos no próximo capítulo.

4. VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a validação da ferramenta computacional de simulação do fenômeno “crosstalk” desenvolvida. Esta validação foi feita através da comparação de resultados obtidos, com resultados obtidos na literatura internacional, bem como, através de resultados experimentais.

Observa-se que a realização dos experimentos foi fundamental para a validação da metodologia implementada. Menciona-se, também, que a metodologia de comparação de resultados adotada, utiliza as formas de onda implementadas, experimentalmente, [Anexo C]. Isto é, foram utilizadas as mesmas formas de onda do gerador de pulso do experimento nas simulações.

Menciona-se que, entre os diversos resultados experimentais, ressaltam-se aqueles disponibilizados pelo IEE (Instituto de Eletrotécnica e Energia), referentes à avaliação de “crosstalk” resultante de descargas atmosféricas. Estes resultados contemplam aqueles comparados com as simulações obtidas via *software* “CDEGS”, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com o aplicativo Spice com os resultados experimentais e por simulação via outros *softwares* comerciais.

4.2 Comparação de Resultados com os disponíveis na Literatura

Os resultados foram comparados com aqueles fornecidos pela referência [9], onde se podem encontrar resultados experimentais e de simulação.

Será simulado o exemplo didático do capítulo anterior, ou seja, aquele que representa o caso da Fig. 3.2.

Além disso, utilizam-se os parâmetros elétricos calculados em 3.5, para a simulação a partir de um modelo a parâmetros concentrados. Este modelo é descrito na Fig. 4.1.

Fig. 4.1 Modelo π do caso discutido.

Nas figuras 4.2 e 4.3, observa-se o pulso de tensão injetado no condutor gerador das IEM, e a tensão induzida no condutor receptor através da visualização desta na resistência R_{NE} .

Fig. 4.2 Pulso injetado no condutor gerador das IEM.

Fig. 4.3 Tensão induzida no condutor receptor das IEM.

Na Fig. 4.4, observa-se a função de transferência, em dB, entre a tensão de “near-end” (induzida) e a tensão do gerador de pulso.

Fig. 4.4 Função de Transferência do fenômeno “crosstalk” (“near-end”).

A partir da Fig. 4.4, podem-se extrair algumas considerações sobre a ferramenta computacional. Apesar de não terem sido consideradas as perdas no modelo de LT da ferramenta computacional, uma avaliação interessante pode ser feita ao se considerar a frequência do sinal. Esta avaliação pode ser feita em função do número de subdivisões dos modelos a parâmetros concentrados necessários para obtenção desejada nas simulações. Assim, podem-se dispensar regras gerais para esta avaliação, como em (3.22) e (3.23). Observa-se como característica do modelo a parâmetros concentrados, a possibilidade de se considerar as perdas nos condutores.

Fig. 4.5 Tensão induzida obtida por modelo a parâmetros concentrados.

Comparando-se os resultados da figura 4.3 com [9], nota-se a versatilidade da ferramenta computacional, já que, estes, diferentes dos obtidos com apenas uma subdivisão do modelo π na Fig. 4.5, apresentam uma boa concordância.

4.3 Resultados Experimentais

4.3.1 Descrição dos Equipamentos

Fig. 4.6 Configuração utilizada no experimento.

A configuração experimental, dada pela Fig. 4.6, utiliza um cabo “flat” composto por três condutores 28 AWG (raio igual a 16mm), com $1,5\text{m}$ de comprimento. As cargas utilizadas foram de 10Ω e $1\text{k}\Omega$, para que fosse possível observar o comportamento do fenômeno face à variação das cargas. O gerador de pulsos utilizado, um Philips 5786B, permite variar o tempo de subida e descida entre 2ns a 1s , a frequência até 100MHz e tem uma potência de 6kW . Foram utilizadas ondas quadradas, com amplitudes variando entre 4 e 10V . Os valores das tensões induzidas foram medidos através de um osciloscópio. Observa-se, também, que visando diminuir o efeito de campos eletromagnéticos externos, uma Gaiola de Faraday foi utilizada (Fig. 4.7).

Fig. 4.7 Gaiola de Faraday utilizada no experimento.

4.3.2 Cálculo dos Parâmetros de Simulação

Os parâmetros elétricos considerados foram calculados utilizando-se a metodologia descrita em [9], os resultados são: $l_g=l_r=0,772\mu H/m$; $l_m=0,247\mu H/m$; $c_g=c_r=10,9pF/m$ e $c_m=5,13pF/m$.

De forma a satisfazer as condições representadas em (3.28) e (3.29), calcula-se a matriz de transformação T . Assim, de (3.30) e (3.31), obtém-se $Z_{CdG}=305,7\ \Omega$ e $Z_{CdR}=157,5\ \Omega$. Estes valores são aplicados, diretamente, na simulação dos resultados, conforme descrito no item 3.5 do capítulo anterior.

4.3.3 Resultados Experimentais

Alguns resultados são apresentados neste item, entre os diversos obtidos experimentalmente. A escolha destes foi determinada por constituírem, dentre os casos ensaiados, a situação na qual é exigida a maior precisão da ferramenta. No exemplo apresentado, observa-se que se adotou um tempo de subida menor que 10 vezes o tempo de trânsito dos condutores, correspondendo a um caso em que a linha utilizada não pode ser considerada eletricamente curta. Assim, utilizou-se tempo de subida e descida iguais a $10ns$, correspondendo apenas a duas vezes o tempo de trânsito, e uma carga de $1k\Omega$ (Fig.4.9).

Fig. 4.8 Equipamento de Aquisição de Dados.

Fig. 4.9 Comparação entre resultado experimental e simulado.

4.4 “Crosstalk” gerado por Descarga Atmosférica

4.4.1 Descrição do Experimento

Este experimento foi realizado no laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE-USP). Realizou-se o ensaio de interferência eletromagnética com a configuração indicada na Fig. 4.10. Na configuração adotada, os condutores são de cobre e isolados, apresentando as seguintes características: 6mm^2 de seção, $4,8\text{mm}$ de diâmetro externo, $3,02\text{mm}$ de diâmetro do condutor, $0,8\text{mm}$ de espessura de isolamento, 10m de comprimento e com resistência característica de $3,6853\text{ Ohm/km}$.

Um dos condutores estava diretamente conectado a um gerador de impulso RFT Blitz Generator, modelo SIP 010, que pode gerar até 10kV de pico em pulso $1,2 \times 50\mu\text{s}$, na extremidade do condutor foi aplicado um pulso de tensão de aproximadamente $1,2\text{kV}$ e a outra extremidade ficou em aberto; no segundo condutor, deixaram-se as duas extremidades em aberto.

A medição foi realizada com um osciloscópio Tectronix 2212, seu canal 1 foi ligado diretamente ao condutor que seria aplicado o pulso do gerador e o canal 2 foi conectado, diretamente, ao condutor receptor das interferências eletromagnéticas.

Fig. 4.10 Configuração do Experimento com Descarga Atmosférica.

4.4.2 Implementação do Caso

Os parâmetros elétricos considerados foram calculados, utilizando-se a metodologia descrita em [1]: $l_g=l_r=1,561\mu H/m$; $l_m=0,278\mu H/m$. Estes resultados foram aplicados na metodologia descrita no capítulo 3, determinando-se a Matriz de Transformação T , e as impedâncias características $Z_{CdG}=551,73\ \Omega$ e $Z_{CdR}=384,75\ \Omega$. Estes valores foram, então, aplicados na simulação.

4.4.3 Resultados

A seguir, apresentam-se os resultados comparativos entre aqueles obtidos experimentalmente e por simulação. Na Fig. 4.11, observa-se a forma de onda medida no condutor gerador da IEM. Esta forma foi aplicada, diretamente, nas simulações em SPICE, através da metodologia descrita no Apêndice B.

Na Fig. 4.12, observam-se os resultados comparativos, entre as formas de onda induzidas, obtidas experimentalmente (MEDIDO) e via simulação (SPICE). Na Fig. 4.13, pode-se observar o mesmo resultado, mas com um detalhe maior nos picos de tensão obtidos.

Fig. 4.11 Descarga Atmosférica implementada pelo Gerador de Pulsos.

Fig. 4.12 Resultado comparativo: tensão induzida no condutor receptor.

Fig. 4.13 Detalhe do Valor de Pico de Tensão.

4.5 Discussão dos Resultados

Os resultados teóricos se mostraram adequados. Observa-se, quando se compara os resultados apresentados na Fig. 4.3 e 4.4, uma melhoria em relação à precisão das simulações da referência bibliográfica [9]. Este fato pode ser justificado devido à existência de computadores pessoais com processamento superior aos utilizados na época, aumentando-se, assim, a resolução das simulações.

Os resultados comparativos, com a parte experimental, mostram uma concordância nos valores de pico, observando-se, porém, um deslocamento entre estes, em alguns trechos da curva apresentada. Este deslocamento se deve ao fato do modelo, implementado na ferramenta, não incluir a existência de perdas na linha. Assim, esta aproximação não leva em consideração a alteração dos tempos de trânsito da onda trafegante nos condutores.

Inicialmente, traçamos alguns comentários a respeito da aquisição dos dados: ressalta-se que, ao se aferir o modelo, tomou-se o cuidado de se implementar os mesmos trens de pulsos utilizados no experimento [Anexo C]. Para isso, armazenaram-se as formas de onda do gerador de pulsos, convertendo-as em arquivos de texto. Estes arquivos, em conjunto com o bloco funcional VPWL_FILE

do aplicativo SPICE, reproduzem a forma de onda nas simulações, tornando a comparação mais confiável.

Nota-se que, nessa fase, é necessário que se utilizem algumas ferramentas e técnicas para que não haja falhas no processo. O modelo desenvolvido é muito susceptível a variações rápidas nos trens de pulso. Acredita-se que na etapa de obtenção das formas de onda do gerador de pulsos, através do osciloscópio e, principalmente, na transferência destes para arquivo em forma de texto, informações adicionais às relacionadas ao experimento possam aparecer. Para solução deste problema, recomenda-se o uso da função “Average” do osciloscópio, na obtenção da função de excitação. Assim, considera-se a média de um determinado número de pontos observado no osciloscópio, diminuindo-se o efeito de ruídos do sistema, na leitura. Além disto, sugere-se que se armazene apenas um período de trem de pulso, aumentando-se a precisão na conversão de imagem para texto. Esta conversão utiliza um número fixo de pontos, para representar a forma de onda, portanto, quanto menor for o “janelamento” desta forma de onda, uma maior precisão será obtida.

É recomendável, também, que experimentos desse tipo sejam efetuados em uma câmara blindada (Gaiola de Faraday) devido à pequena magnitude do valor resultante decorrente do fenômeno “crosstalk”. Verificou-se, que a existência de campos eletromagnéticos externos influencia, fortemente, as medidas.

No experimento com a descarga atmosférica, os resultados mostram, novamente, uma concordância em seus valores, principalmente, os valores de pico. As discrepâncias podem ser justificadas pela ausência da consideração das perdas dos condutores e eventuais falhas das medidas efetuadas.

5. ESTUDO SOBRE INFLUÊNCIA DAS PERDAS NAS SIMULAÇÕES DA FERRAMENTA

5.1 Introdução

Uma das vantagens do modelo de simulação discutido neste trabalho é a diminuição das restrições de simulação de linhas eletricamente longas. Em contraponto, não consideramos perdas dos condutores. Neste capítulo, será discutido, a partir de resultados simulados no aplicativo Spice, a importância e relevância da inclusão destas perdas e apresentação de alternativas para contornar eventuais obstáculos encontrados, onde as perdas precisam ser consideradas.

De forma complementar, será discutido, também, o resultado comparativo entre o modelo proposto e modelos a parâmetros concentrados. Suas características principais e resultados de algumas simulações serão apresentados.

Basicamente, foram comparados dois tipos de modelos a parâmetros concentrados, onde as perdas foram incluídas em cada uma das seções; dois modelos baseados na metodologia apresentada, porém, como proposto por Dommel, com a inclusão das perdas concentradas no início, no meio e no final das linhas [6]; e o modelo discutido neste trabalho.

5.2 Estudos Comparativos

5.2.1 Comparação entre Modelos para Linhas Simples

Para as análises realizadas a seguir, foi utilizada uma versão profissional do Spice. Isto se fez necessário devido à simulação de um número elevado de componentes nas simulações dos modelos a parâmetros concentrados, ultrapassando, assim, o limite de elementos e nós da versão estudantil.

Inicialmente, para ilustração da influência de um caso de condutor simples, sem influência de IEM. Um condutor de $l=0,2576\mu H/m$, $c=99,2 pF/m$, $r=0,332 \Omega/m$ e $5m$ de comprimento. A mesma forma de onda foi aplicada nos seguintes modelos: um modelo π sem perdas, chamado, por isso, de (Ideal); um modelo com perdas

incorporadas, chamado de (LOSSY), que utiliza um número de elementos π suficiente para tornar o modelo representativo da linha; e modelos π com perdas incorporadas e limites conhecidos de seções. Foram utilizados modelos com 2, 4, 8, 32, 64 e 128 seções, representados como (Lumped_2) para o modelo com duas seções, por exemplo. A onda geradora dos pulsos nas linhas está representada no início do gráfico com o índice V(FONTE) e foi injetada no início das linhas. Os gráficos seguintes são a medida da tensão no final das linhas para cada caso citado acima (Fig. 5.1).

Fig. 5.1 Simulação de linhas simples com perdas e sem perdas.

Na Fig. 5.1, nota-se que a influência da consideração ou não das perdas é mínima, como era de se esperar, devido ao comprimento reduzido da linha, visto que os resultados de V(Ideal) e V(LOSSY) foram bastante similares. Porém, a influência da utilização de um número reduzido de seções nos modelos π foi significativa e cada vez menos satisfatória enquanto se diminui o número de seções.

5.2.2 Modelos a serem comparados para Linhas Acopladas

Em seguida, os modelos que se seguem foram utilizados nas simulações que veremos adiante.

O primeiro deles é o modelo π com perdas e apenas uma seção (Fig. 5.2). Nota-se a presença das resistências próprias e as condutâncias entre os cabos e para a

terra. Este modelo, nos gráficos, é representado pelo nome MODELO PI 1 ELEMENTO.

Fig. 5.2 Modelo π com perdas e uma seção.

O segundo modelo apresentado é o modelo apresentado e desenvolvido neste trabalho. Utilizando o método de desacoplamento das linhas, por isso, foi chamado de modelo com linhas desacopladas e é representado pelo nome SISTEMA DESACOPLADO (Fig. 5.3).

Fig. 5.3 Modelo com linhas desacopladas simples.

Em seguida (Fig 5.4), tem-se o modelo de linhas desacopladas, porém, com a implementação das perdas no início, no meio e no final das linhas com o valor de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ da resistência total respectivamente, como proposto por Dommel [6]. Este modelo é descrito nos gráficos, que serão apresentados no próximo item, como SISTEMA_DESACOPLADO/PERDAS_EM_3_PONTOS.

Fig. 5.5 Comparação entre modelos para o caso de Descarga Atmosférica.

Pode-se notar, neste caso, que os modelos de linhas desacopladas, em verde e laranja, apresentaram uma performance muito semelhante, quase impossível de distinguir inclusive. Em amarelo, temos o resultado do CEDGS novamente. Os modelos a parâmetros concentrados, em azul e verde claro, também, apresentaram grande aproximação, se distanciando do valor medido, em vermelho, ou seja, a referência de comparação. Por isso, como os resultados dos modelos com linhas desacopladas foram muito semelhantes entre si e os modelos a parâmetros concentrados, também, as perdas não constituem um fator que influencia o resultado das simulações. Por outro lado, a diferença encontrada entre os modelos de linhas desacopladas e os modelos a parâmetros concentrados, indica que o fenômeno necessita de um número muito superior de seções para ser representado. Uma alternativa é justamente o modelo desenvolvido neste trabalho, ou seja, o modelo de linhas desacopladas proposto por Paul [9].

5.2.3.2 Dois Fios Paralelos Suspensos

Como no item anterior, será apresentado mais um exemplo já detalhado anteriormente, item 3.5. Um caso de dois fios paralelos suspensos a 2 cm, e a 2 cm entre si.

Fig. 5.6 Comparação entre modelos para o caso de fios paralelos e suspensos.

Observa-se que, neste caso, o modelo com apenas uma seção a parâmetros concentrados, em rosa, apresentou uma resposta instável em relação aos demais modelos, indicando que temos uma linha eletricamente longa para este modelo.

O modelo baseado em desacoplamento de linhas sem perdas, em verde, e o modelo a parâmetros concentrados com 30 seções e com perdas, em amarelo, apresentaram uma semelhança muito grande, provando que as perdas, neste caso, são desprezíveis.

Os modelos baseados no desacoplamento de linhas, porém, com as perdas distribuídas em 3 ou 5 pontos se igualaram. Fato já esperado, pois, se as perdas são desprezíveis, é irrelevante se as mesmas estão distribuídas em mais ou menos pontos. As alterações dos valores de pico em relação aos modelos anteriores podem ser explicados devido à alteração do valor do coeficiente de transmissão no início e finais da linha, causada pela inserção das perdas das linhas nestes pontos.

6. CONCLUSÃO

Observa-se que, através da adoção prévia de uma metodologia de análise de IEM, a busca de soluções para eventuais problemas resultantes dos diversos fenômenos característicos do ambiente eletromagnético considerado poderá ser facilitada. Menciona-se que, dependendo da complexidade do sistema elétrico, a adoção de soluções visando atingir a CEM, poderá resultar em severas restrições técnicas ou mesmo na adoção de uma nova concepção de projeto. Assim, o desenvolvimento desta ferramenta de predição do fenômeno “crosstalk” se mostra bastante conveniente e adequada. Observa-se, porém, que a utilização dessa ferramenta não omite os conhecimentos na área de Eletromagnetismo Aplicado, com ênfase em cálculo de parâmetros elétricos de condutores. A realização dos experimentos teve fundamental importância para se aferir os blocos funcionais criados, bem como, o modelo de simulação de “crosstalk”, garantindo mais segurança e confiabilidade na utilização da ferramenta computacional. A ferramenta, portanto, se mostra útil na resolução de problemas em CEM e, pode se tornar um instrumento didático eficaz e eficiente, promovendo a disseminação do conceito de interferência eletromagnética entre condutores múltiplos, ou seja, “crosstalk”.

ANEXO A - DESCRIÇÃO DETALHADA DA SIMULAÇÃO DE MODELOS DE CROSSTALK EM SPICE COM O USO DO “NETLIST”

A.1 Introdução

O simulador SPICE, a partir do modelo descrito em [9], pode simular o fenômeno “crosstalk”. A metodologia, que será descrita a seguir, serve como referência básica para o entendimento do processo de simulação com a descrição dos modelos e circuitos a serem simulados feita através de um “netlist” (listagem), ou seja, na forma de texto. Esse processo pode ser útil quando são encontradas dificuldades nas interfaces gráficas dos blocos funcionais ou para geração de simulações automatizadas, facilitando a comunicação entre os “softwares” envolvidos.

A.2 Aspectos relevantes do SPICE

Este simulador de circuitos vem sendo atualizado constantemente, uma das suas principais modificações, feita a cerca de uma década, foi a inclusão do programa “Schematics”, que é uma interface gráfica para facilitar a entrada de dados e descrição dos diagramas elétricos. Anteriormente, a simulação era feita a partir de uma listagem de blocos funcionais, ou seja, na forma de texto. O SPICE possui um aglomerado de sub-rotinas e o processo completo de simulação constitui-se das seguintes etapas: após se desenhar o circuito na tela, o “Schematics” gera um arquivo de texto. Este arquivo é uma listagem que representa o circuito, ou seja, a localização (nós) e características dos blocos funcionais e o tipo de análise requerida. A sub-rotina “Pspice” utiliza estes arquivos de texto para fazer a análise do circuito, gerando um outro arquivo: Este arquivo contém os resultados da simulação do circuito e será utilizado pela sub-rotina “Probe” para plotar os gráficos resultantes da análise. O aspecto importante dessa hierarquia é que ela não precisa necessariamente ser seguida nesta ordem, ou seja, pode-se evitar etapas, caso já exista o arquivo texto ou o resultado da simulação. Portanto, se houver alguma

limitação na interface gráfica, pode-se executar a simulação do circuito a partir de um arquivo-texto.

A.3 Metodologia Geral

Menciona-se que para a implementação dos modelos de crosstalk descritos em [9], precisam-se utilizar geradores de tensão e corrente vinculados para simular os acoplamentos eletromagnéticos entre os condutores. Nota-se, no entanto, que não se pode utilizar os geradores vinculados do SPICE, pois se precisa gerar uma tensão ou corrente vinculadas a duas ou mais variáveis. Ressalta-se que, os blocos funcionais que deveriam proporcionar essa possibilidade, o “Gpoly” e “Fpoly”, apresentam uma dificuldade de implementação: estes não possuem uma pinagem adequada para o seu controle a partir de duas ou mais variáveis.

Assim, podem-se utilizar os blocos funcionais “Gpoly” e “Fpoly” para gerar o arquivo-texto, mesmo que de forma parcial. Em seguida, alterações podem ser feitas no arquivo, implementando-se as adequações necessárias. Portanto, impõem-se as demais variáveis, diretamente, no arquivo-texto e utilizando a sub-rotina SPICE, pode-se, então, obter as simulações desejadas.

Desta forma, o processo inicia-se a partir da utilização do “Schematics”, evitando a necessidade de se descrever o circuito, totalmente, através do arquivo-texto. Pode-se obter nesta etapa, o circuito o mais próximo do desejado, sendo a listagem gerada e modificada de forma a torná-la representativa do circuito requerido pelo modelo. Esta fase evita que o usuário precise desenvolver, completamente, o arquivo-texto, fazendo-se, apenas, algumas alterações na listagem de blocos funcionais.

Após as alterações terem sido feitas, devemos descartar o arquivo que contém o desenho do circuito e é gerado pela sub-rotina “Schematics”. Observa-se que o SPICE não atualiza a interface gráfica a partir das modificações feitas no arquivo-texto. Deve-se mencionar que, se o arquivo do desenho for utilizado na simulação, o arquivo-texto será atualizado, novamente, com os erros dos componentes “Gpoly” e “Fpoly”, sendo preciso modificá-lo mais uma vez.

Finalmente, utiliza-se a sub-rotina “Pspice” para executar o arquivo-texto, podendo-se, assim, simular o modelo e fazer todas as análises requeridas.

A.4 Exemplo Didático

Para um melhor entendimento, será realizado um exemplo de forma a descrever, passo a passo, o método em questão. A seguir são descritos estes procedimentos: no “Schematics”, selecionam-se os blocos funcionais em “Get New Part”.

As características dos blocos funcionais são determinadas, clicando-se duas vezes sobre eles. Para as unidades de medida, a relação entre as ordens de grandeza e seus respectivos índices está na Tabela A.1.

Índice	n	u	M	K	Meg
Ordem	n ou 10^{-9}	μ ou 10^{-6}	m ou 10^{-3}	k ou 10^3	M ou 10^6

Tabela A.1 Relação entre grandezas e índices utilizados pelo Spice

A fonte utilizada na referência é chamada “VPULSE”, com essa fonte implementam-se pulsos de tensão. Suas características são determinadas pelas variáveis a seguir:

DC = 1	(habilita a análise DC do circuito)
AC = 0	(habilita a análise em frequência)
V1 = 0	(tensão em que se inicia o pulso)
V2 = 1	(tensão em que o pulso atinge seu valor máximo)
TD = 0	(time delay)
TR = 12.5n	(rise-time, tempo de subida)
TF = 12.5n	(fall-time, tempo de descida)
PW = 7.5n	(comprimento de pulso)
PER = 1000n	(período do pulso)

Os condutores são simulados pelo modelo de linha de transmissão do SPICE, o bloco funcional “T”. Este bloco é determinado pelas seguintes características:

$Z_0 = 323.7 \, \Omega$ (impedância característica das linhas)
 $TD = 15.58 \, \text{ns}$ (tempo de trânsito no condutor)

O SPICE precisa de um nó de referência de tensão do circuito, essa referência é determinada pelo bloco funcional “GND_ANALOG”, que impõe tensão nula no nó em que esta localizado.

As cargas são representadas pelos componentes R (resistências), L (indutores) e C (capacitores). A Fig. A.1 representa a implementação inicial no Spice. Nota-se que não foi, ainda, implementado acoplamento entre as linhas. Pode-se observar os componentes “GPOLY” e “FPOLY” representados por “Vc” e “Imc” respectivamente. Finalizando o diagrama do circuito, conectamos um componente ao outro através do comando “Wire” do menu “Draw”.

Fig. A.1 Circuito implementado no Schematics.

Ainda no “Schematics”, utilizaremos o menu “Analysis” e a opção “Create Netlist”, então, será gerado o arquivo-texto que deverá ser alterado nas linhas que dizem respeito aos geradores vinculados:

```
F_F1      $N_0005 0 POLY(1) VF_F1 VF_F2 0 1 1
F_F2      $N_0013 0 POLY(1) VF_F1 VF_F2 0 1 1
```

```

F_F3      $N_0007 0 POLY(1) VF_F3 VF_F4 0 1 1
F_F4      $N_0011 0 POLY(1) VF_F3 VF_F4 0 1 1

```

Depois das alterações, obtém-se:

```

F_F1      0 $N_0005 POLY(2) VF_F1 VF_F2 0 .707 .707
F_F2      0 $N_0013 POLY(2) VF_F1 VF_F2 0 -.707 .707
F_F3      0 $N_0007 POLY(2) VF_F3 VF_F4 0 .707 .707
F_F4      0 $N_0011 POLY(2) VF_F3 VF_F4 0 -.707 .707

```

Nestas linhas, invertem-se os nós iniciais para que se injete a corrente no sentido correto. Altera-se POLY(1) para POLY(2), acrescentando, assim, mais uma variável de entrada. Mudam-se os coeficientes de proporcionalidade, o índice 0 depois das variáveis se refere a um nível DC que será somado na saída do gerador.

Então, as seguintes linhas devem ser alteradas:

```

E_E1      $N_0001 $N_0004 POLY(1) $N_0005 0 $N_0013 0 0 1 1
E_E2      $N_0008 $N_0012 POLY(1) $N_0005 0 $N_0013 0 0 1 1
E_E3      $N_0003 $N_0006 POLY(1) $N_0007 0 $N_0011 0 0 1 1
E_E4      $N_0009 $N_0010 POLY(1) $N_0007 0 $N_0011 0 0 1 1

```

Depois das alterações, obtém-se:

```

E_E1      $N_0001 $N_0004 POLY(2) $N_0005 0 $N_0013 0 0 .707 -.707
E_E2      $N_0008 $N_0012 POLY(2) $N_0005 0 $N_0013 0 0 .707 .707
E_E3      $N_0003 $N_0006 POLY(2) $N_0007 0 $N_0011 0 0 .707 -.707
E_E4      $N_0009 $N_0010 POLY(2) $N_0007 0 $N_0011 0 0 .707 .707

```

Nestas linhas foram feitas alterações similares às anteriores. Os nós são nomeados, aleatoriamente, quando seleccionasse a opção “*Create Netlist*” e indicados por \$N_x. Portanto, não é necessário que estejam com os nomes idênticos aos que estão acima.

Agora podemos acrescentar as linhas que indicam o tipo de análise a ser feita:

```

.tran 0.1ns 200ns (análise transitória, com os pontos plotados a cada 0,1 ns até
200 ns)

```

`.probe` (gera o arquivo de dados utilizado pelo “Probe”)
`.END` (finaliza a simulação)

O arquivo-texto deve ser executado pela sub-rotina Pspice e os resultados são obtidos, plotando o gráfico com o comando “Run Probe”.

Para se fazer a análise em frequência do circuito, altera-se a fonte de tensão utilizada e a análise requisitada como é descrito a seguir:

`V_V1        $N_0002 0 ac 1` (fonte para análise em frequência)
`.ac dec 50 1k 100meg` (fonte varia de 1 kHz a 100 MHz de década em década)

A.5 Conclusão

O processo acima é complexo e pode resultar em um grande número de erros em potencial, para utilizá-lo de maneira ótima, é preciso ter uma boa prática e estar bastante familiarizado com a metodologia descrita acima.

ANEXO B - DESCRIÇÃO DETALHADA PARA O DESENVOLVIMENTO DE COMPONENTES PARA A BIBLIOTECA DO SPICE

B.1 Introdução

Através do desenvolvimento de novos componentes no simulador SPICE, pode-se tornar mais simples a implementação do modelo de simulação do fenômeno “crosstalk”, possibilitando a utilização da interface gráfica do SPICE. Desta forma, apresenta-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento de blocos funcionais para o SPICE, bem como, a apresentação de um exemplo.

B.2 Metodologia Geral

Para facilitar o entendimento do leitor, apresenta-se, inicialmente, a composição básica de um bloco funcional do SPICE. De maneira geral, um bloco funcional tem sua interface gráfica que, além de tornar sua visualização e reconhecimento mais fácil dentro do circuito, também, ilustra seus pinos, que constituem suas entradas e saídas. Além disso, possui quatro atributos que definem suas características. São eles: PART, nome do componente na biblioteca; REFDES, referência descritiva do componente no circuito (vem sempre acompanhado com um algarismo designando cada um dos componentes, por exemplo, R1 e R5); MODEL, modelo matemático que relaciona as variáveis de entrada e saída; e, finalmente, TEMPLATE, que estipula quais pinos constituem entradas ou saídas, além de trazer outras informações que modificam a característica do componente. Esses componentes são armazenados em pacotes dentro de uma pasta que constitui a biblioteca do simulador SPICE.

A edição desses componentes é feita na opção “*Edit Library*” no menu “*File*”. Inicialmente, precisa-se criar um arquivo de extensão *slb*. Esse arquivo será o pacote no qual armazenam-se os novos blocos. Em seguida, seleciona-se a opção “*Wizard*” do menu “*Part*” e, seguindo passo a passo às instruções do editor, cria-se uma interface gráfica provisória. Então, são feitas as alterações necessárias, na opção

“Attributes” do menu “Part”, estas alterações devem levar em consideração os atributos citados inicialmente.

Elementos gráficos adicionais podem ser feitos através das próprias ferramentas do editor e devem tornar mais simples o entendimento, a visualização e a utilização do componente que está sendo criado.

Finalmente, deve-se salvar o arquivo. Logo após tê-lo feito, surgirá automaticamente a opção para adicionar o componente à lista de blocos funcionais do simulador de circuitos. É importante dizer que, para que este processo tenha êxito, o usuário precisa estar ambientado com os termos utilizados e ciente da aplicação e, conseqüentemente, do objetivo final da criação de novos componentes, pois, assim, evitará problemas na utilização dos mesmos em simulações de circuitos.

B.3 Exemplo Didático

Neste exemplo, será desenvolvido o bloco funcional “WPOLY”, utilizado no modelo de “crosstalk” para três condutores. Este componente é um gerador de tensão vinculado a duas outras tensões; a tensão de saída é uma função polinomial de qualquer ordem a duas variáveis, essas variáveis são as tensões de referência do bloco.

Fig. B.1 Componente WPOLY.

Através da metodologia descrita acima, ou seja, na opção “Wizard” do menu “Part”, chegamos à interface gráfica vista na Fig. B.1. O detalhamento da obtenção específica dessa interface não será discutido por ser relativamente simples, e não apresentar relevância para a função prática do componente e conter uma parcela

substancialmente subjetiva, já que cada usuário pode considerar diferentes alternativas para essa fase do desenvolvimento.

Em seguida, serão editados os seus atributos. Essa fase do método constitui o núcleo da metodologia descrita anteriormente e é de vital importância para o bom desempenho dos blocos funcionais. Os atributos devem ser configurados através da opção “Attributes” do menu “Part” e conforme está demonstrado na Fig. B.2.

Fig. B.2 Atributos do componente WPOLY.

No atributo REFDES está a indicação W?, ou seja, quando o componente for utilizado no circuito a ser simulado, ele estará indicado por W e um número; se forem utilizados mais componentes do mesmo tipo, eles serão numerados seqüencialmente e essa numeração pode ser modificada pelo usuário.

No atributo PART está indicado o nome do componente, esse nome é dado na etapa inicial do processo e não pode ser alterado.

As informações da estrutura matemática do componente estão localizadas no atributo MODEL. Essas informações definem como as entradas do componente devem ser utilizadas para obtermos as saídas desejadas. No caso, configurou-se o MODEL=EPOLY, pois esse outro componente (Fig. B.3) possui o modelo adequado

entre as entradas e saídas, mas, por outro lado, não possui a quantidade adequada de pinos necessários para as duas tensões que servem como variáveis da função polinomial de saída, já que um dos pinos deve ser conectado no nó requerido e o outro deve ser utilizado como referência e precisamos de duas tensões de entrada.

Fig. B.3 Componente EPOLY.

Finalmente, temos o atributo TEMPLATE, ele deve estar configurado da seguinte forma:

$$\text{TEMPLATE} = \text{E}^{\wedge}@\text{REFDES \%3 \%4 POLY(2) \%1 \%2 \%5 \%6 0 1 1} \quad (\text{B.1})$$

Essa configuração determina que a tensão de saída ($V_{\text{saída}}$) do componente está entre os pinos 3 e 4 e as tensões que representam as variáveis A e B estão entre os pinos 1 e 2 (V_a), 5 e 6 (V_b) respectivamente. A pinagem do componente pode ser visualizada durante o processo de desenvolvimento do mesmo. Além disso, tem-se a função polinomial caracterizada pelo termo POLY(2), que define, então, uma função polinomial a duas variáveis. Os algarismos 0 1 1 no final da configuração indicada por (B.1) determinam os coeficientes multiplicativos da função (B.2).

$$V_{\text{saída}} = 0 + 1.V_a + 1.V_b \quad (\text{B.2})$$

Um fator importante que deve ser salientado é que, ao configurar o TEMPLATE, precisa-se deixá-lo disponível para possíveis alterações fora do editor de blocos, pois, para cada caso de “crosstalk”, teremos diferentes coeficientes multiplicativos. Para isso, precisamos deixar a opção “Changeable in schematic” selecionada.

B.4 Conclusão

Com a metodologia desenvolvida anteriormente e o auxílio da referência [17], podemos desenvolver outros blocos funcionais. Como pode ser visto no corpo do trabalho, foram criados os componentes WPOLY (fonte de tensão vinculada por duas outras tensões), YPOLY (fonte de corrente vinculada por duas outras correntes), TWPOLY (fonte de tensão vinculada por três outras tensões) e TYPOLY (fonte de corrente vinculada por duas outras correntes). Os dois últimos componentes podem ser vistos a seguir (Fig. B.4).

Fig. B.4 Componentes TWPOLY e TYPOLY.

ANEXO C - IMPLEMENTAÇÃO DE FORMAS DE ONDA REAIS EM SIMULAÇÕES DO SPICE

C.1 Introdução

O aplicativo Spice possibilita implementar formas de onda retiradas diretamente do osciloscópio em suas simulações. Tal fato torna possível a reprodução das formas de onda implementadas em experimentos e proporciona uma maior confiabilidade em análises de sensibilidade de modelos. A seguir, esse processo será descrito detalhadamente.

C.2 Metodologia

Inicialmente, deve-se obter a forma de onda que se deseja utilizar nas simulações, no formato adequado. Para isso, é necessário que o osciloscópio se comunique com um computador através de um aplicativo adequado, geralmente, fornecido pelo fabricante do osciloscópio. Tais aplicativos funcionam como osciloscópios virtuais e tornam possível o armazenamento das formas de onda obtidas em experimentos.

The screenshot shows a software window titled 'File Edit View Insert Format Instrument Window Help'. It contains a table with two columns: 'Ch 1 [Volts]' and 'Ch 2 [Volts]'. The table has 17 rows of data. Below the table, there are settings for two channels: '1' with '20 mVolt' and '5 us' for 'Ch 1', and '2' with '2 Volt' and '5 us' for 'Ch 2'. There is also a checkbox for 'View Horizontal Column'. At the bottom, there are tabs for 'Wave1', 'Picture1', 'Settings1', 'Notes1', 'Picture2', and 'Wave2'. A status bar at the bottom says 'For Help, press F1' and has a 'NUM' button.

	Ch 1 [Volts]	Ch 2 [Volts]
1	800.0E-6	0.0000
2	800.0E-6	80.00E-3
3	-800.0E-6	0.0000
4	-1.600E-3	0.0000
5	-800.0E-6	-80.00E-3
6	0.0000	-80.00E-3
7	-800.0E-6	0.0000
8	-1.600E-3	80.00E-3
9	-1.600E-3	-80.00E-3
10	-800.0E-6	-80.00E-3
11	0.0000	-80.00E-3
12	-800.0E-6	0.0000
13	-1.600E-3	160.0E-3
14	-800.0E-6	-80.00E-3
15	0.0000	-80.00E-3
16	0.0000	0.0000
17	800.0E-6	-80.00E-3

1 ☒ 20 mVolt 5 us Ch 1 ☐ View Horizontal Column
 2 ☒ 2 Volt 5 us Ch 2

Wave1 Picture1 Settings1 Notes1 Picture2 Wave2

For Help, press F1 NUM

Fig. C.1 Tabela fornecida pelo aplicativo.

Em seguida, é necessário se obter um arquivo de texto do tipo *txt* que represente essa forma de onda. Os aplicativos fornecem esses dados na forma de uma tabela (Fig. C.1) que pode ser editada e transformada para a extensão desejada.

O arquivo deve relacionar os dados de tempo e tensão através de duas colunas; na primeira, com os valores de tempo e, na segunda, os valores de tensão, esses valores podem ou não ter suas respectivas unidades descritas, mas elas devem ser as mesmas em toda a coluna.

Na tarefa de implementação do arquivo *txt*, utiliza-se o componente VPWL_FILE (Fig. C.2). Nesse componente da biblioteca, indica-se o local no qual o arquivo está localizado.

Fig. C.2 Componente VPWL_FILE.

Para alterar as características do componente, deve-se clicar duas vezes sobre ele e alterar seus atributos. No atributo FILE, deve-se colocar a localização do arquivo a ser utilizado, por exemplo, C:\PSPICE\pulso.txt. Não se pode utilizar nomes muito extensos ou com espaços e as sub-pastas devem estar próximas do diretório raiz C:\. Através dos atributos VSF (Voltage Scalar Factor) e TSF (Time Scalar Factor), são introduzidas as unidades de tensão e tempo observados no experimento. É preciso ter muito cuidado com o fator utilizado para o tempo, pois, em geral, os aplicativos disponíveis fornecem uma coluna com os valores de tensão corretos, mas a outra coluna é apenas uma numeração simples. Para resolver esse problema, deve-se relacionar o tempo de “janelamento” com o número de pontos existentes. Por exemplo, se tivermos 2000 pontos para uma janela de 200ns, devemos utilizar um TSF igual a $200ns / 2000\text{ pontos} = 10^{-10}$, que deve ser escrito por extenso, ou seja, sem a utilização da notação científica (Fig. C.3).

Fig C.3 Atributos do componente VWPL_FILE.

Pode-se, também, alterar o atributo REPEAT_VALUE para que se repita n vezes a forma de onda utilizada.

C.3 Conclusão

A metodologia descrita é uma importante ferramenta para a comprovação de modelos e simulações através da confrontação com experimentos, já que possibilita a implementação das mesmas formas de onda utilizadas em experimentos ou simulações.

REFERÊNCIAS

- [1] Mie, G., "Elektrische Wellen an zwei parallelen Drahten", Ann.Phys. vol 2, pp. 201-249, 1900.
- [2] Sartori, Carlos Antonio França "Normas de Compatibilidade Eletromagnética - Situação atual, abrangência e importância". Eletricidade Moderna, São Paulo, Jan. 97, pp. 125-131, 1997.
- [3] Stevenson, W. D. **Elements of Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill, 1962. 388p.
- [4] Mohr, R. J. "Coupling between Open and Shielded wire lines over a Ground Plane", IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-9, nº2, pp. 34-45, September 1967.
- [5] Schelkunoff, S. A.; Odarenko, T.M. "Crosstalk between coaxial transmission lines", Bell System Technology Journal, vol. 26, pp. 144-164 April 1937.
- [6] Dommel, H. W. **EMTP Theory Book**. Microtan Powersystem analysis Corporation, 1996, Cap.4, p.1-108.
- [7] Cardoso, J. R. **Apostila de Eletromagnetismo**. Material didático da disciplina de Teoria Eletromagnética do curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Não publicado.
- [8] F.H. Branin, Jr. Transient Analysis of lossless transmission lines. Proc. IEEE, 55, 2012-2013, 1967.
- [9] Paul, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. New York: Wiley, c1992. Cap.4, p.120-176: Transmission Lines; Cap.10, p.491-631: Crosstalk.
- [10] Paul, C. R. Solution of the Transmission-Line Equations for Three-Conductor Lines in Homogeneous Media. IEEE Trans. on Eletromagnetic Compatibility, Vol. EMC-20, 216-222, fev. 1978.
- [11] Paul, C. R. Computation of Crosstalk in a Multiconductor Transmission Line. IEEE Trans. on Eletromagnetic Compatibility, Vol. EMC-23, 352-358, nov. 1981.
- [12] Paul, C. R. A simple SPICE model for coupled transmission lines. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, 1988.

- [13] Dietz W. G, Tosin A., Sartori C.A.F., Cardoso J. R., "Análise de *Crosstalk* devido a Descargas Atmosféricas utilizando-se o Aplicativo SPICE" - MOMAG 2006 - Agosto de 2006.
- [14] Pignari, Sergio; Bellan, Diego; Rienzo, Luca Di "Statistical Estimates of Crosstalk in Three-Conductor Transmission Lines" - IEEE International Symposium on electromagnetic Compatibility, 2002 Volume: 2, 19-23 August 2002, pp. 877-882.
- [15] Maio, I.; Pignari, S.; Canavero, F. "Influence of the Line Characterization on the Transient Analysis of Nonlinearly Loaded Lossy Transmission Lines" - Circuits and Systems I: fundamental Theory and Applications, IEEE Transaction on Circuits and Systems, Volume: 41, Issue 3, March 1994, pp. 197-209.
- [16] Pignari, S.; Maio, I.; Canavero, F. G. "Efficient Computation of Transient Responses of Frequency-Dependent Nonlinearly Loaded Transmission Lines", ISCAS '93, 1993 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 3-6 May 1993, pp. 2283-2286.
- [17] Herniter, M. E., **Schematic capture with PSpice**. New York: Merrill; Toronto: Maxwell Macmillan Canada; New York: Maxwell Macmillan International, c1994. 324p.
- [18] Dietz, W. G., **Análise de Interferência Eletromagnética entre condutores múltiplos com Aplicação do Simulador Spice**. 2003. 45f. Monografia (Projeto de Formatura em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [19] Dietz W. G, Tosin A., Sartori C.A.F., Cardoso J. R., "Desenvolvimento de Modelos para Análise de Crosstalk utilizando-se o Aplicativo Spice" - MOMAG 2004 - Agosto de 2004.
- [20] Tosin, A.; Dietz, W. G.; Sartori, C. A. F.; Cardoso, J. R., "Application of Spice Simulator in the Evaluation of Crosstalk Computation Models". in: Isef 2005 - XII International Symposium On Electromagnetic Fields In Mechatronics, Electrical And Electronic Engineering, 2005, Baiona. ISEF'2005. 2005. v.I.
- [21] Tosin, A.; Dietz, W. G.; Sartori, C. A. F.; Cardoso, J. R., "Application of Spice Simulator in the Evaluation of Crosstlak Computation Models". COMPEL –

- The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Inglaterra, Vol. 25 Number 3, 2006, p.668-676.
- [22] Ciccolella, Antonio; Canavero, Flavio G. "Stochastic Prediction of Wire Coupling Interference". Symposium Record. 1995 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility 14-18 August 1995, pp. 51-56.
 - [23] Bellan, D.; Pignari, S. "A Probabilistic Model for the Response of an Electrically Short Two-Conductor Transmission Line Driven by a Random Plane Wave Field" IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Volume: 43, Issue: 2, May 2001, pp.130-139.
 - [24] Gustavsen B., Semlyen A., "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting" – IEEE – Transactions on Power Delivery, Volume 14, N°3, July 1999, pp.1052-1061.
 - [25] Paul, C. R. **Analysis Multiconductor Transmission Lines**. New York: John Wiley, 1994. 559p.
 - [26] Tosin, A. **Análise de Acoplamento entre Linhas de Transmissão (“Crosstalk”) para Configurações com Múltiplos Condutores**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.