

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

**Análise de Interferência Eletromagnética
entre Condutores Múltiplos com a
Aplicação do Simulador “Spice”**

William Gerlach Dietz

PROJETO DE FORMATURA/2003

**ESCOLA POLITÉCNICA
DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



PROJETO DE FORMATURA / 2003

**Análise de Interferência Eletromagnética entre Condutores
Múltiplos com a Aplicação do Simulador “Spice”**

ALUNO: William Gerlach Dietz

ORIENTADORES: José Roberto Cardoso e Carlos A. F. Sartori

COORDENADOR: Carlos Márcio Vieira Tahan

Ouse, ouse, ouse tudo! Não tenha necessidade de nada! Não tente adequar sua vida a modelos, nem queira você mesmo ser um modelo para ninguém. Acredite: a vida lhe dará poucos presentes. Se você quer uma vida, aprenda a roubá-la! Ouse, ouse tudo!

Lou Andreas-Salomé

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Doutor Carlos Antonio França Sartori e Professor Doutor José Roberto Cardoso, pelas diretrizes precisas e pelo constante incentivo e motivação.

À Professora Doutora Denise Consoni, ao Professor Doutor Carlos Márcio Vieira Tahan e, aos amigos, André Tosin e Yuri Sanches Provase pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

À Nara Yumi Hashimoto e minha família pela compreensão e apoio.

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. Para este fim, adotou-se um modelo de simulação de acoplamento eletromagnético com base em modelos de linha de transmissão. Tais modelos são complementados com geradores controlados por tensão e corrente, que representam fontes de interferência eletromagnética. Face à limitações dos blocos funcionais que representam essas fontes no aplicativo, foi utilizado um método de representação do modelo através de arquivos-texto, ao invés da utilização da interface gráfica existente no software. Posteriormente, novos blocos foram, computacionalmente, 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. Esses resultados mostram a viabilidade da utilização dos componentes desenvolvidos para o aplicativo “Spice”, tornando possível e confiável a utilização dessa ferramenta na simulação do fenômeno “crosstalk”.

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 interference are simulated by controlled voltage and current sources. Due to the limitations of the available Spice models concerning multi-conductor configurations, additional models were developed and implemented as part of the Spice library. Theoretical and experimental results were obtained, and they were used as part of the validation process of the proposed methodology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
3. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR	5
3.1 Introdução	5
3.2 Aplicativo “Spice”	5
3.3 Aspectos Teóricos do Modelo	6
3.4 Implementação do Modelo em “Spice”	13
3.5 Exemplo Didático	15
4. TESTES E COMENTÁRIOS	18
4.1 Introdução	18
4.2 Resultados Teóricos	18
4.3 Parte Experimental	22
4.3.1 Descrição dos Equipamentos	22
4.3.2 Cálculo dos Parâmetros de Simulação	23
4.3.3 Resultados Experimentais	23
4.4 Análise do fenômeno “crosstalk” para uma Descarga Atmosférica	24
4.4.1 Descrição do Experimento	24
4.4.2 Implementação do Caso	24
4.4.3 Resultados	25
4.5 Discussão	25
5. CONCLUSÃO	29
ANEXO A - Descrição detalhada da simulação de modelos de crosstalk em Spice com o uso do “Netlist”	30
A.1 Introdução	30
A.2 Aspectos relevantes do Spice	30
A.3 Metodologia Geral	31
A.4 Exemplo Didático	32
A.5 Conclusão	35

ANEXO B - Descrição detalhada para o desenvolvimento de componentes para a biblioteca do Spice	36
B.1 Introdução	36
B.2 Metodologia Geral	36
B.3 Exemplo Didático	37
B.4 Conclusão	40
ANEXO C - Implementação de formas de onda reais em simulações do Spice	41
C.1 Introdução	41
C.2 Metodologia Geral	41
C.3 Conclusão	43
REFERÊNCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Modelo de linha de transmissão de Branin	6
Figura 3.2 - Configuração Simples de “Crosstalk”	10
Figura 3.3 - Tela do modelo de “crosstalk” implementado em “Spice”	12
Figura 3.4 - Menu de opções do “Spice”	14
Figura 4.1 - Modelo π do caso discutido	19
Figura 4.2 - Pulso injetado no condutor gerador das IEM	19
Figura 4.3 - Tensão induzida no condutor receptor das IEM	20
Figura 4.4 - Função de Transferência do fenômeno “crosstalk”	20
Figura 4.5 - Tensão induzida obtida por modelo a parâmetros concentrados	21
Figura 4.6 - Configuração utilizada no experimento	22
Figura 4.7 - Gaiola de Faraday utilizada no experimento	22
Figura 4.8 - Equipamento de Aquisição de Dados	23
Figura 4.9 - Comparação entre resultado experimental e simulado	24
Figura 4.10 - Configuração do Experimento com Descarga Atmosférica	25
Figura 4.11 - Descarga Eletromagnética Implementada no Experimento	26
Figura 4.12 - Resultado comparativo entre a simulação e o experimento	26
Figura 4.13 - “Zoom” no pico de tensão do resultado comparativo	27

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno “crosstalk” constitui-se de acoplamentos eletromagnéticos não intencionais entre condutores. Pode-se mencionar, como exemplo 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 de 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 perfeito funcionamento dos equipamentos elétricos e eletrônicos, 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 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,

pretende-se utilizar como parte central deste sistema computacional os modelos de acoplamentos eletromagnéticos disponíveis no simulador de circuitos “Spice”. De uma maneira geral, pode-se mencionar que estes modelos são aqueles relacionados aos modelos de parâmetros concentrados e de linha de transmissão que serão vinculados às fontes de tensão e corrente que representarão as fontes de IEM presentes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Os estudos em CEM iniciaram-se na década de 20 com os primeiros estudos relacionados com transmissões de telegramas e com a implementação das primeiras linhas de transmissão de energia.

Na década de 30, os estudos se voltaram para a interferência de motores elétricos e estradas eletrificadas. Em 1933, a CISPR (Comite International Special des Perturbation Radiotecniques) estabeleceu as primeiras recomendações, com o objetivo de estabelecer níveis aceitáveis de IEM.

Com o início da II Guerra Mundial (década de 40) e a utilização de radares, equipamentos de rádio-navegação e equipamentos militares de comunicação, os investimentos na área tornaram-se mais comuns e foi estabelecida uma série de recomendações destinadas à utilização de equipamentos e técnicas padronizadas de medições de interferências.

O fenômeno crosstalk é um ramo importante do estudo em CEM. Na década de 60, esse fenômeno ganhou importância, pois se tornou mais comum com o aparecimento dos transistores, circuitos integrados e computadores. A seguir será discutido o avanço dos métodos de modelagem de tal fenômeno e as ferramentas utilizadas nesses métodos.

Segundo [2], métodos gráficos para solução de problemas de ondas eletromagnéticas são extremamente confiáveis para linhas sem perdas e desacopladas. Um dos métodos, o método das treliças, é confiável em análises no domínio do tempo; o outro, através do auxílio da Carta de Smith, é aplicado em análises no domínio da frequência.

O método descrito por Branin em [3] descreve uma solução exata de equação de linha de transmissão sem perdas. Além disso, essa solução possibilitou a implementação de modelos de linha através de métodos computacionais.

O simulador Spice contém, em sua biblioteca, um componente de linha de transmissão que utiliza o modelo de Branin, possibilitando a utilização desse simulador de análise de circuitos com plena confiança.

No final da década de 70, devido ao inicio da aplicação de métodos numéricos, o estudo do fenômeno de IEM entre condutores teve um grande salto em

termos de capacidade de predição [4, 5, 6]. Nessa mesma época, o termo “crosstalk” surgiu para denominar tal fenômeno dentro do estudo de CEM.

Desde então, métodos numéricos vêm sendo, cada vez mais, utilizados para a análise de “crosstalk”. 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 [1].

3. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR

3.1 Introdução

O modelo de "crosstalk" utilizado para o desenvolvimento da ferramenta computacional de simulação do fenômeno tem características peculiares que destacam-se 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, junto com um exemplo didático para um melhor entendimento do 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 destacam-se:

- Sua disponibilidade, pois possui diversas versões, entre estas as estudantis com 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 freqüência, 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, contendo limitações. Então, foi fundamental o desenvolvimento de métodos alternativos para contornar estas limitações,

possibilitando a utilização do “Spice” e o prosseguimento do trabalho. Os métodos serão apresentados em 3.4 e mais bem detalhados nos anexos A e B.

3.3 Aspectos Teóricos do Modelo

O desenvolvimento da ferramenta de simulação do fenômeno “crosstalk”, baseia-se no modelo descrito em [1]. Esse modelo, tem como parte central o modelo computacional de linha de transmissão (LT) desenvolvido por Branin [2]. 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 (3.1) e (3.2), conforme se demonstra a seguir.

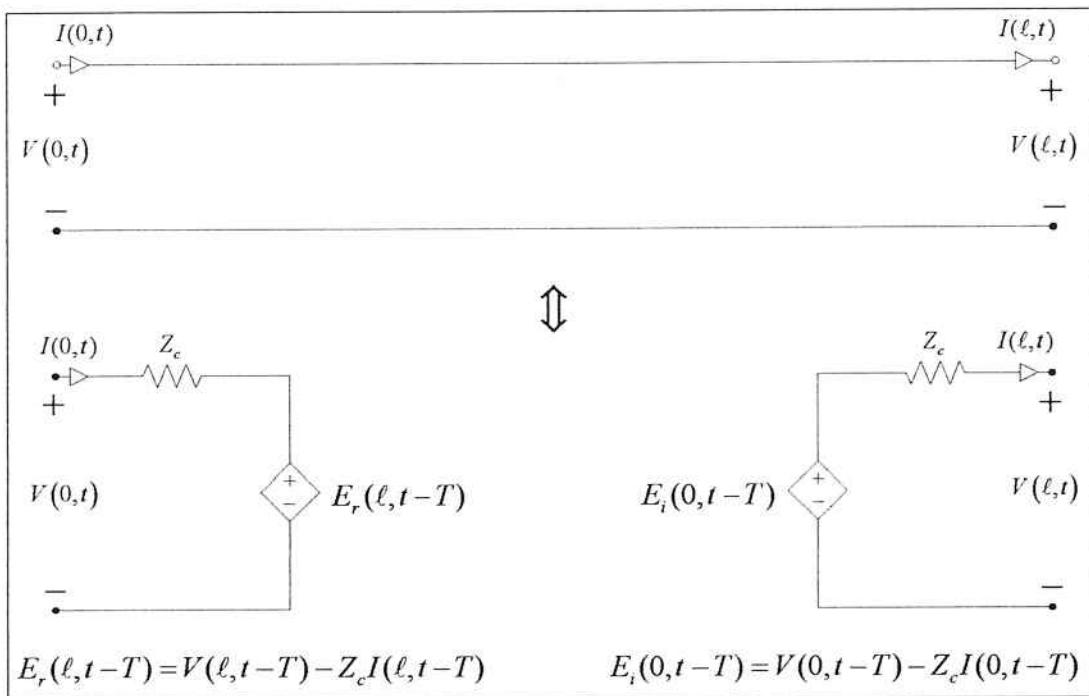


Fig. 3.1 Modelo de linha de transmissão de Branin.

Um modelo de LT precisa resolver as equações abaixo:

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

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

Para obtenção deste modelo computacional, é preciso manipular as soluções das equações de LT sem perdas (3.3) e (3.4).

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

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

Onde 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), obtém-se, respectivamente, as equações (3.10) e (3.11). Analogamente, de (3.7) e (3.8), obtém-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 , obtém-se, respectivamente, (3.16) e (3.17). Rearranjando as equações (3.11) e (3.12), obtém-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, desde que o sistema a ser

analizado possua apenas o modo de propagação eletromagnético transversal (TEM). Neste ponto, pode-se apresentar a primeira vantagem do modelo de “crosstalk” 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.

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

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

Versões estudantis do “Spice”, devido a limitações no número de blocos funcionais disponíveis para cada simulação, possibilita a utilização de, no máximo, duas subdivisões a parâmetros concentrados. Portanto, o modelo de “crosstalk” é mais versátil e didático, pois se configura um modelo a parâmetros distribuídos. Além disso, a diminuição do número de blocos funcionais utilizados, com consequente 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”, para a consideração do acoplamento eletromagnético entre os condutores, implementam-se 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” [1].

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 $n-I$ e n é o número de condutores do sistema a ser analisado. V e I são vetores também de ordem $n-I$. A fim de facilitar o entendimento, descreve-se, a formulação correspondente à configuração mais simples possível, isto é, aquela correspondente a três condutores[4]. Esta

configuração está apresentada na Fig. 3.2, onde se considera o terceiro condutor como sendo o plano de terra.

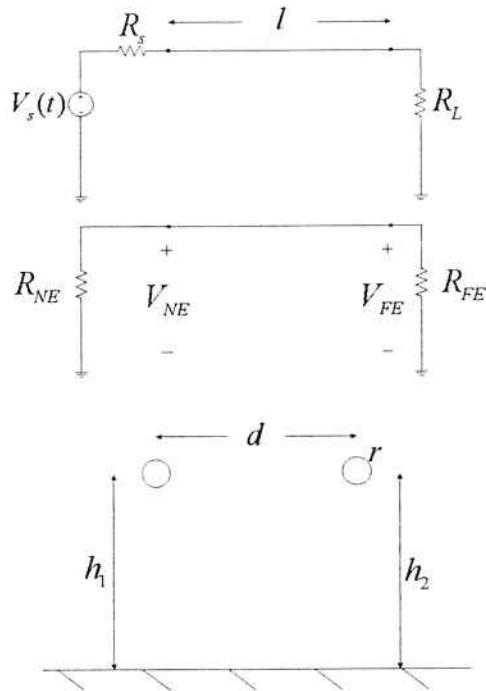


Fig. 3.2 Configuração Simples de “Crosstalk”.

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. 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). Portanto, tem-se:

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

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

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.

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

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

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 de “crosstalk” para a análise de condutores múltiplos é apresentado em [5] e [6].

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 ” e, finalmente, somam-se estas parcelas, resultando em V_R e V_G , como nas equações (3.32) e (3.33).

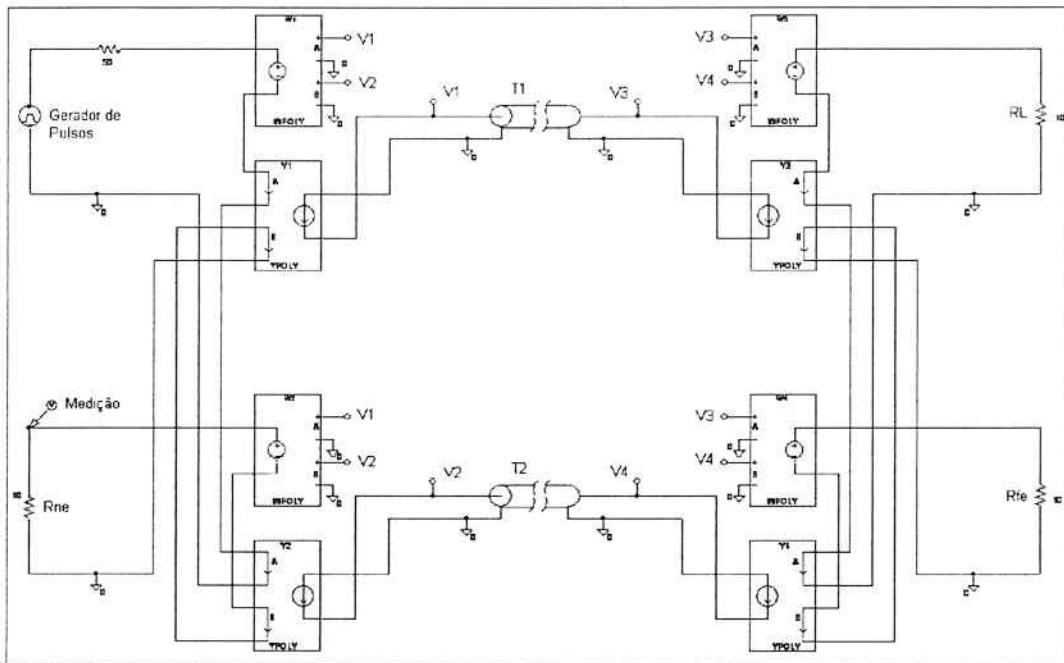


Fig. 3.3 Tela do modelo de crosstalk implementado em “Spice”.

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 Wpoly e Ypoly.

3.4 Implementação do Modelo em “Spice”

Na tarefa de implementação do modelo de “crosstalk” no simulador “Spice”, foi feita, inicialmente, uma análise de sensibilidade dos componentes a serem utilizados através de um método de simulação alternativo, pois encontramos limitações em alguns componentes da biblioteca do simulador, esse método envolve a utilização de arquivos-texto para representar os circuitos ao invés da utilização da interface gráfica existente atualmente, tal metodologia pode ser mais facilmente entendida através do anexo A. Em seguida, após esta metodologia estar sedimentada, realizaram-se os primeiros testes da ferramenta computacional. Compararam-se simulações da ferramenta, com simulações e experimentos retirados da literatura internacional especializada. Devido sua importância, dedicou-se um capítulo para esta fase do projeto, portanto, detalhes podem ser obtidos adiante.

Posteriormente, novos blocos funcionais foram desenvolvidos, computacionalmente, 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. Além disso, essa 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”, tem uma extrema importância, pois não se encontra acessível em nenhum tipo de referência e pode ser mais bem compreendida através do anexo B. Neste anexo, pode-se entender a metodologia geral de desenvolvimento de blocos funcionais, através da 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 as mesmas comparações com a literatura internacional. Além disso, foram obtidos resultados

experimentais que, também, foram comparados com as simulações. Estes resultados são apresentados no capítulo 4.

A seguir, a metodologia específica de implementação no aplicativo “Spice” é apresentada. A relação entre esta metodologia e os aspectos teóricos da ferramenta pode ser melhor entendido no item 3.5, um exemplo didático de implementação completa.

Através do ícone mais a 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].

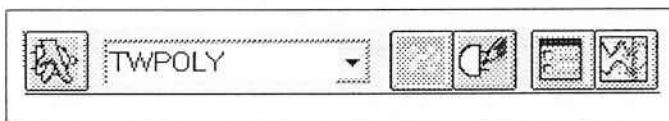


Fig. 3.4 Menu de opções do “Spice”.

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. 3.3), deve-se inserir as informações de suas respectivas impedâncias características (Z_c) e o tempo de trânsito da onda no condutor.

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”

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 freqüência)
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	(tempo em que a tensão se mantém no máximo)
PER	(período do pulso)

Finalmente, determinam-se os valores das resistências e 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. 3.4. 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 freqüência, devemos selecionar a opção “AC Sweep...”, variando os limites de freqüência máximos e mínimos da simulação.

3.5 Exemplo Didático

Neste item, desenvolve-se um exemplo didático com o intuito de sedimentar e conectar os dois itens anteriores: Aspectos Teóricos do Modelo e Implementação do Modelo em “Spice”.

Consideraremos o caso da fig. 3.2, onde os dois condutores são AWG 20 ($raio = 16mm$) a 2cm do solo e 2cm entre eles. O terceiro condutor, que será a referência dos dois primeiros, será o próprio plano de terra. Os parâmetros de linha desse problema foram calculados e resultaram em $I_g = I_r = 0,918\mu H/m$; $I_m = 0,161\mu H/m$; $c_g = c_r = 10,3pF/m$ e $c_m = 2,19 pF/m$.

Portanto, temos:

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

Sabemos que, a matriz T da eq. (3.35), constituída por uma base linearmente independente, diagonaliza matrizes 2x2 simétricas, portanto, aplicando (3.35) para diagonalizar (3.34):

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

A partir do desenvolvimento descrito em [1], obtém-se a eq. (3.36), que simplifica o resultado obtido em (3.37) e (3.38).

$$\tan 2\theta = \frac{2I_m}{I_G - I_R} \quad (3.36)$$

São, então, determinadas as matrizes T e I_d :

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

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

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

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

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

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

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. 3.3).

Em seguida, alteram-se os blocos funcionais Wpoly e Ypoly, conforme descrito a seguir. Os parâmetros são determinados 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. TESTES E COMENTÁRIOS

4.1 Introdução

Neste capítulo, descreve-se a metodologia de comprovação da confiabilidade da ferramenta computacional de simulação do fenômeno “crosstalk”. Esta comprovação foi feita através da comparação de resultados obtidos na ferramenta de simulação, com resultados obtidos na literatura internacional e experimentalmente. A comparação com os resultados teóricos, através da literatura internacional, mostra, também, algumas informações que podem ser obtidas dos resultados de simulação.

A realização dos experimentos foi fundamental para a garantia de confiabilidade da ferramenta computacional. Além disso, nesta fase do projeto, pode-se desenvolver uma metodologia de comparação de resultados no aplicativo “Spice”, com a possibilidade de implementarmos formas de onda obtidas, experimentalmente, em simulações [Anexo C]. Assim, podem-se utilizar as mesmas formas de onda do gerador de pulso do experimento, nas simulações.

Por fim, foram disponibilizados, pelo IEE (Instituto de Eletrotécnica e Energia), resultados de um experimento que avaliou o efeito do fenômeno “crosstalk” com a ocorrência de uma descarga atmosférica. Estes resultados, também, foram comparados com resultados de simulação com a ferramenta computacional.

4.2 Resultados Teóricos

Os resultados foram comparados com aqueles fornecidos pela referência [1], onde se podem encontrar resultados experimentais e de simulação.

Será simulado o exemplo didático do capítulo anterior, ou seja, representando 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.

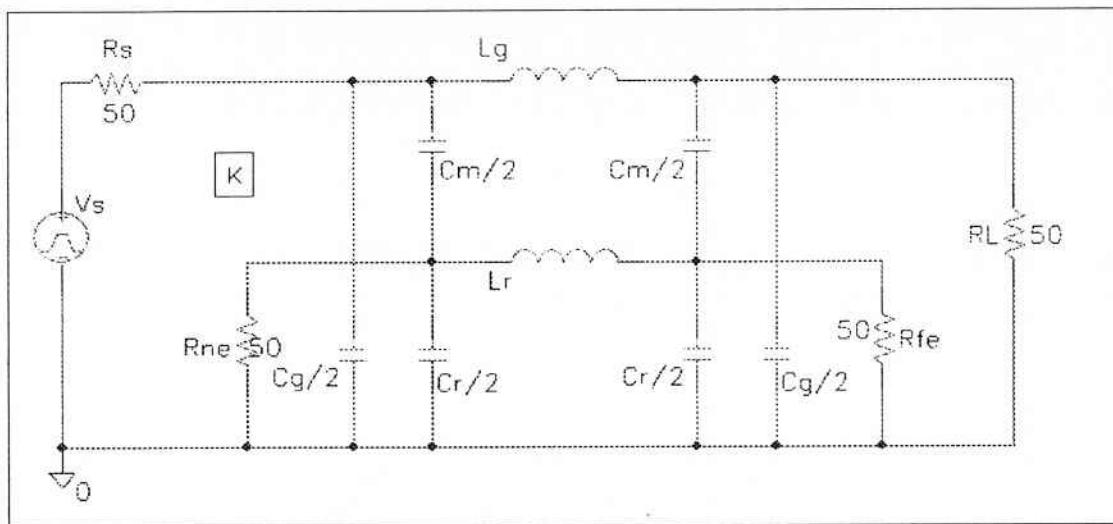


Fig. 4.1 Modelo π do caso discutido.

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 da tensão na resistência R_{NE} .

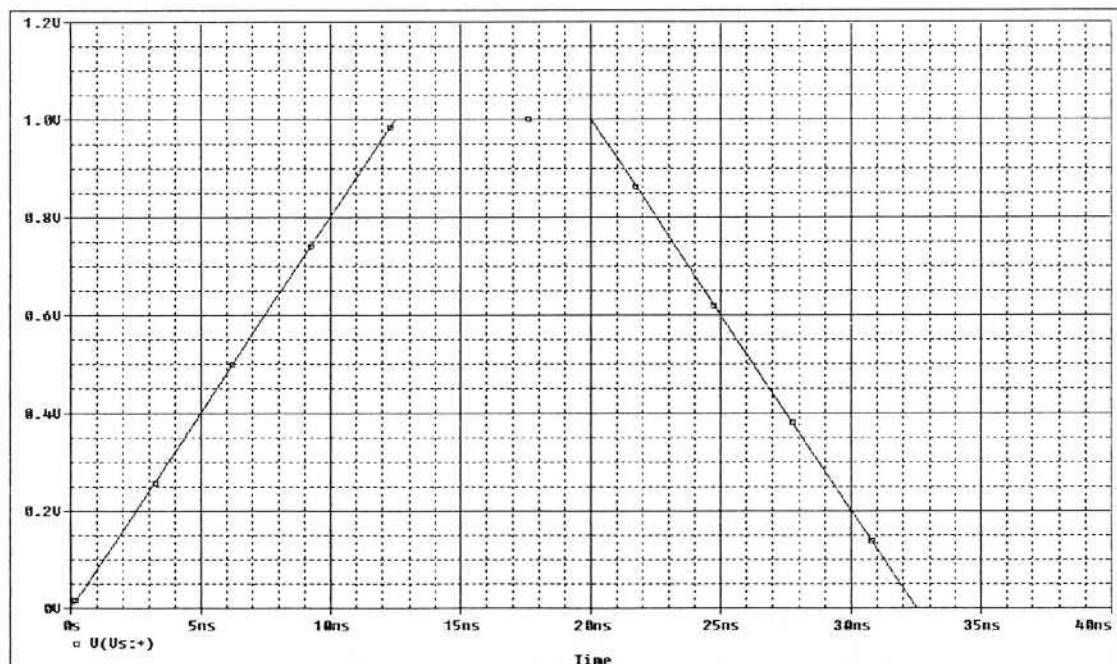


Fig. 4.2 Pulso injetado no condutor gerador das IEM.

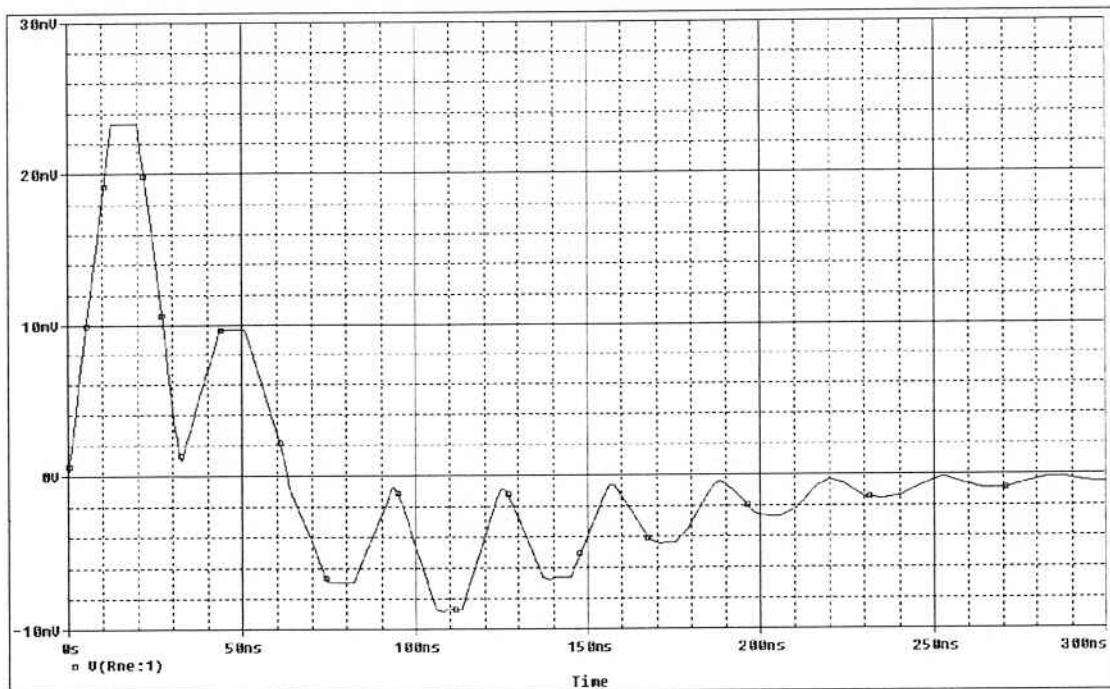


Fig. 4.3 Tensão induzida no condutor receptor das IEM.

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.

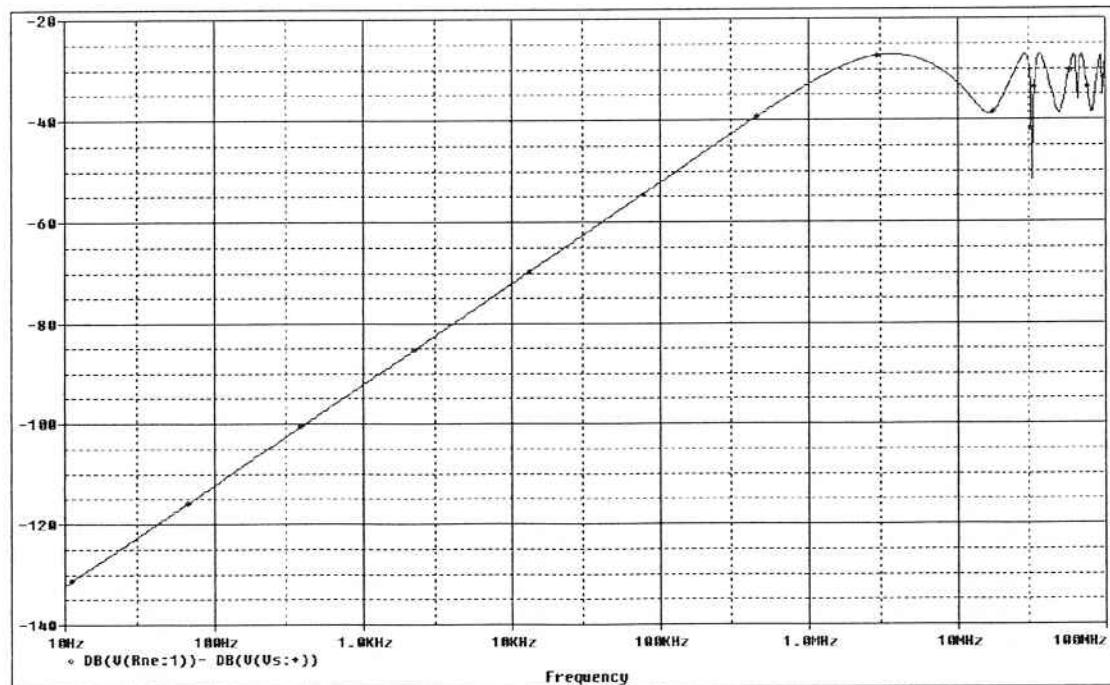


Fig. 4.4 Função de Transferência do fenômeno “crosstalk”.

A partir da fig. 4.4, podem-se extrair algumas considerações sobre a ferramenta computacional. Apesar de não se poderem implementar perdas no modelo de LT da ferramenta computacional, pode-se fazer uma avaliação, em função da freqüência, para quantas subdivisões dos modelos a parâmetros concentrados são necessários para uma boa aproximação nas simulações. Assim, podem-se dispensar fórmulas empíricas para esta avaliação, como em (3.22) e (3.23), garantindo a confiabilidade dos resultados. Modelos a parâmetros concentrados terão resultados confiáveis, enquanto a curva acima se mantiver com inclinação de 20dB/década. No modelo a parâmetros concentrados, podem ser incluídas as perdas nos condutores.

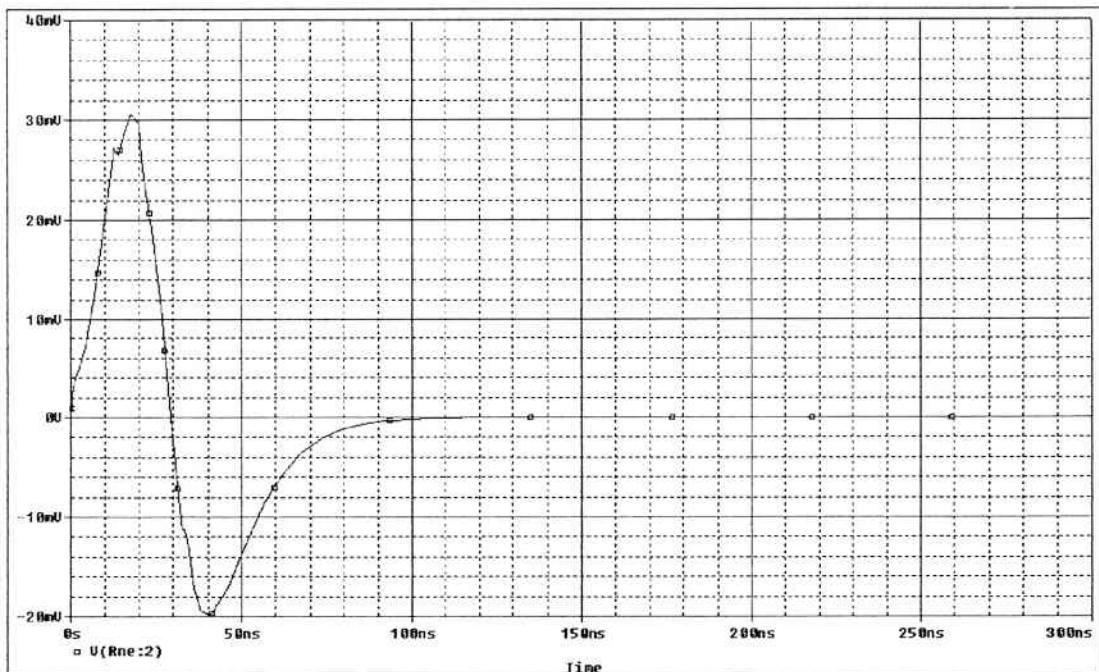


Fig. 4.5 Tensão induzida obtida por modelo a parâmetros concentrados.

Comparando-se as figuras 4.3 e 4.5, com a referência bibliográfica, nota-se a versatilidade da ferramenta computacional, já que, os resultados obtidos através de apenas uma subdivisão do modelo π , apresentam uma solução inadequada.

4.3 Parte Experimental

4.3.1 Descrição dos Equipamentos

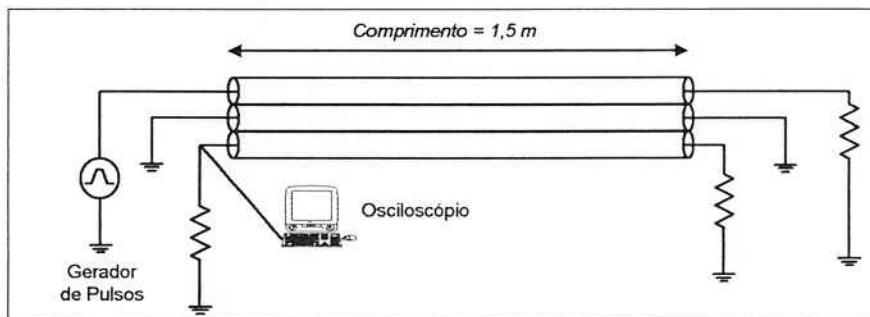


Fig. 4.6 Configuração utilizada no experimento.

A configuração experimental, dada pela Fig. 4.6, utiliza um cabo “flat” composto por três condutores 28 AWG (raio igual a 16mm), com $1,5m$ de comprimento. As cargas utilizadas foram de 10Ω e $1k\Omega$, 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 freqüência até 100MHz e tem uma potencia 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).

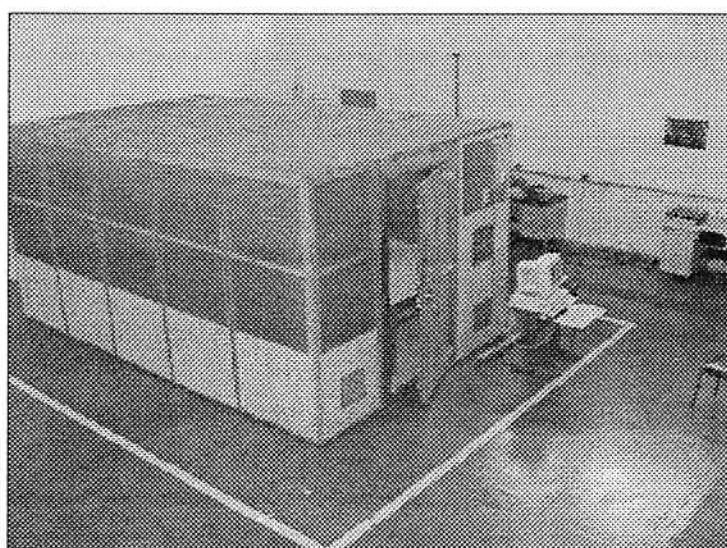


Fig. 4.7 Gaiola de Faraday utilizada no experimento.

4.3.2 Cálculo dos Parâmetros de Simulação

Os parâmetros elétricos considerados foram calculados utilizando-se a metodologia descrita em [1], os resultados são: $I_g = I_r = 0,772 \mu H/m$; $I_m = 0,247 \mu H/m$; $c_g = c_r = 10,9 pF/m$ e $c_m = 5,13 pF/m$.

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

Embora diversos resultados tenham sido obtidos, devido ao fato de todos eles terem demonstrado apresenta-se a seguir um dos casos testados. Sua escolha foi determinada por constituir, dentre os casos ensaiados, a situação na qual é exigida a maior precisão da ferramenta. Pois, 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).

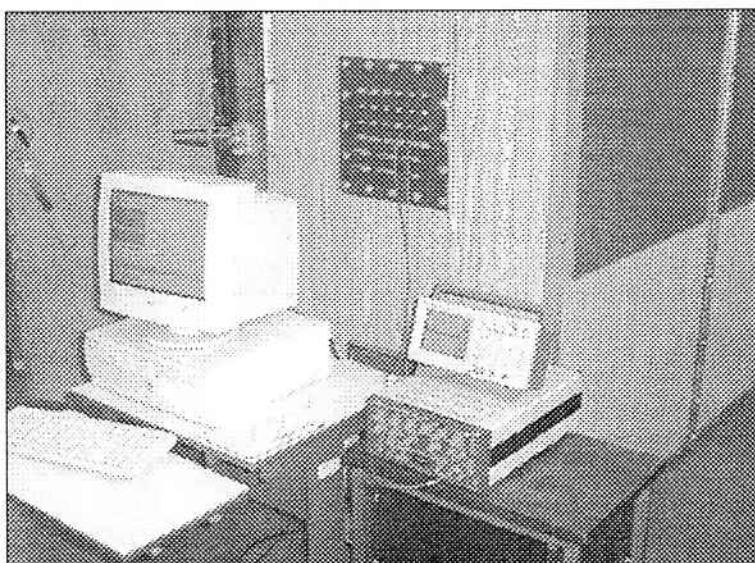


Fig. 4.8 Equipamento de Aquisição de Dados.

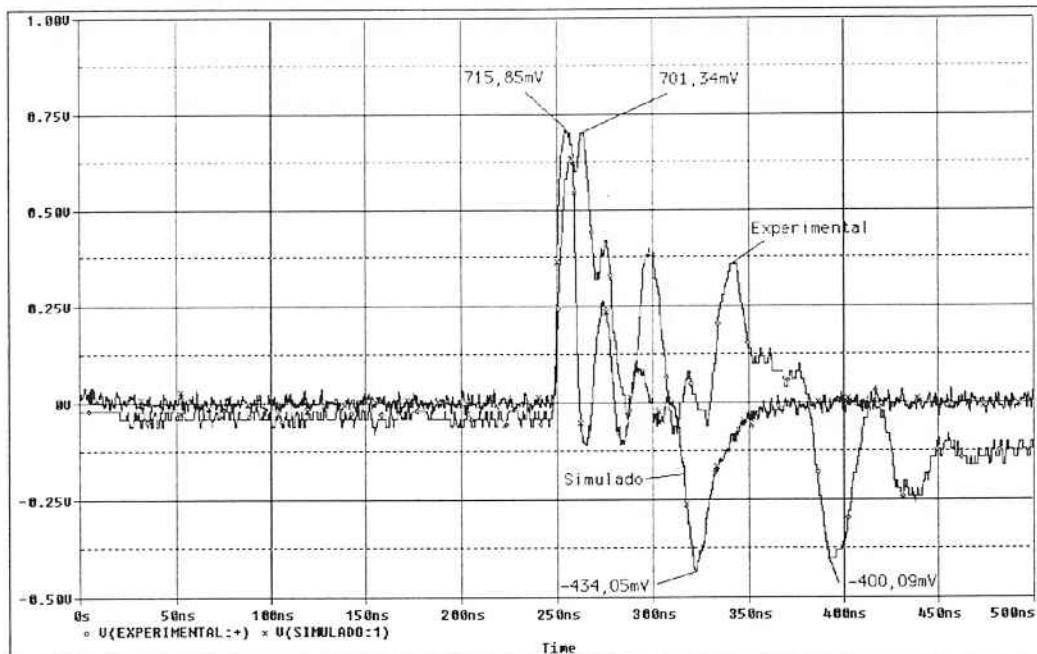


Fig. 4.9 Comparação entre resultado experimental e simulado.

4.4 Análise do fenômeno “crosstalk” para uma 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, sendo que os condutores utilizados são de cobre e encapados, têm 6mm^2 de seção, 4,8mm de diâmetro externo, 3,02mm de diâmetro do condutor, 0,8mm de espessura de isolamento, 10m de comprimento e com resistência característica de 3,6853 Ohms/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 1,2x50us, na extremidade do condutor foi aplicado um pulso de tensão de aproximadamente 1,2kV e a outra extremidade ficou em aberto; no segundo condutor, deixou-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 induzido.

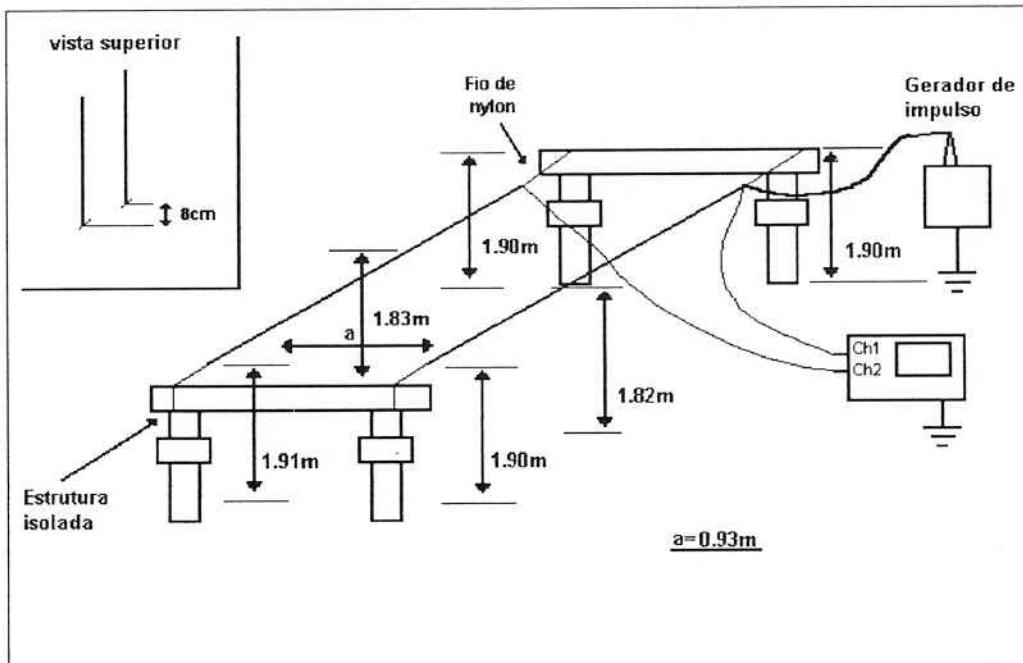


Fig. 4.10 Configuração do Experimento com Descarga Atmosférica.

4.4.2 Implementação do Caso

Os parâmetros elétricos considerados foram calculados, utilizando-se a metodologia descrita em [1]: $I_g = I_r = 1,561 \mu H/m$; $I_m = 0,278 \mu H/m$. Estes resultados foram aplicados na metodologia descrita no capítulo 3, determinando-se a Matriz de Transformação T . E, $Z_{CdG} = 551,73 \Omega$ 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 os resultados obtidos experimentalmente e por simulação. Na figura 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 figura 4.12, observam-se os resultados comparativos, entre as formas de onda induzidas, obtidas experimentalmente (MEDIDO) e via simulação (SPICE). Na

figura 4.13, pode-se observar o mesmo resultado, mas com um detalhe maior nos picos de tensão obtidos.

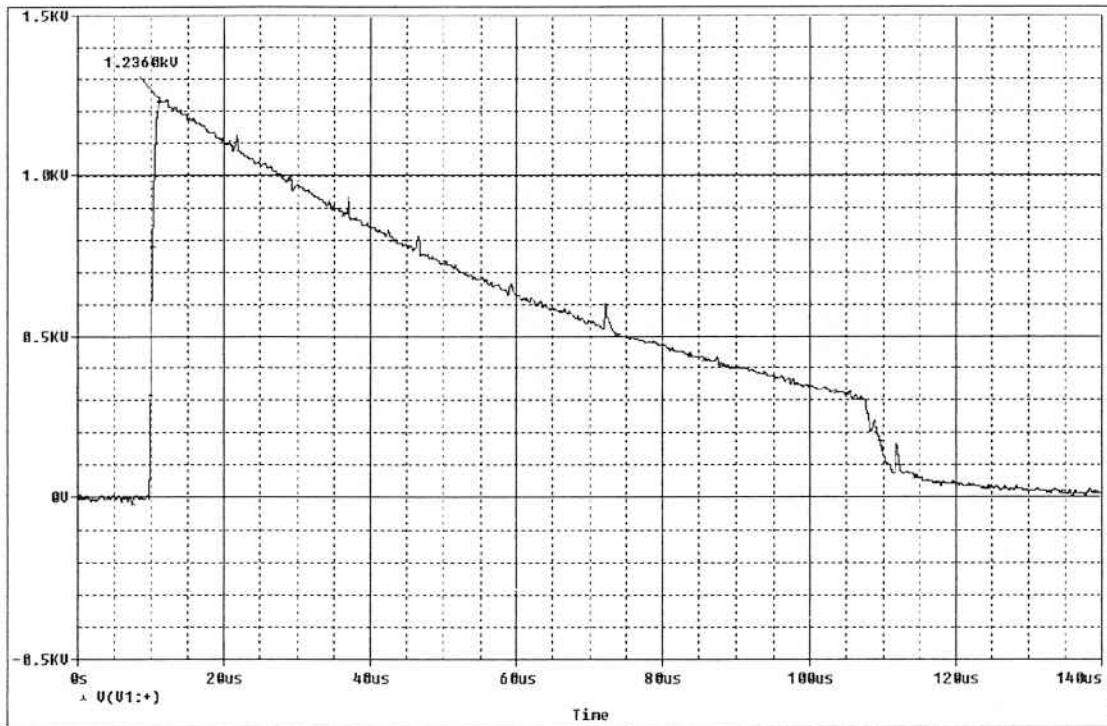


Fig. 4.11 Descarga Eletromagnética implementada no experimento.

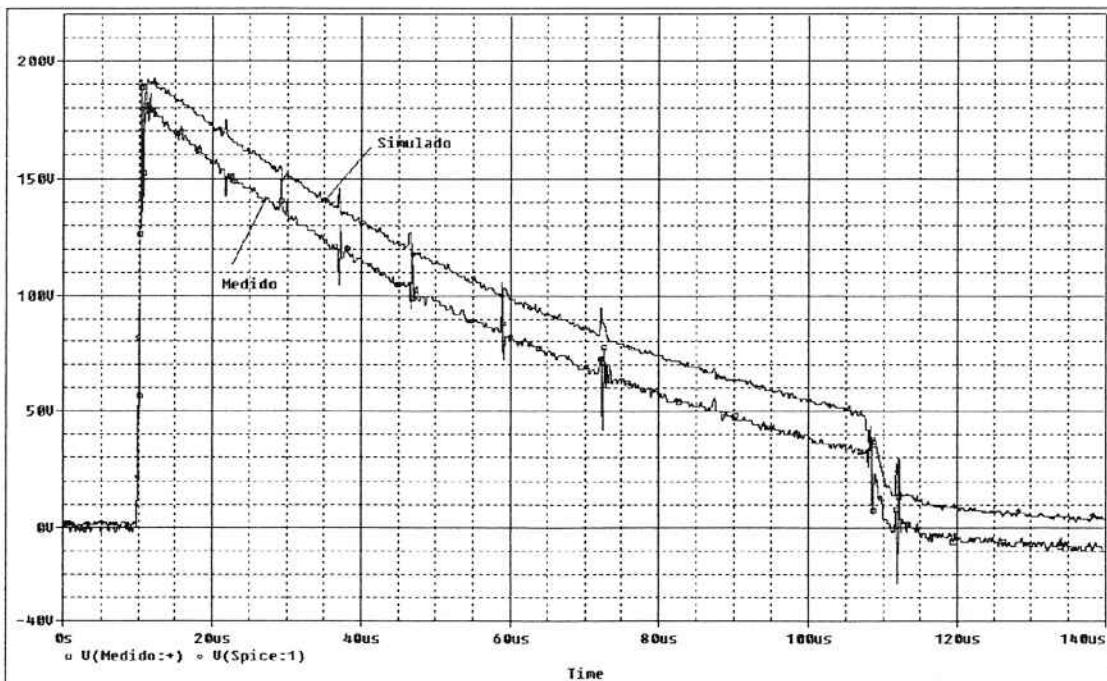


Fig. 4.12 Resultado comparativo entre a simulação e o experimento.

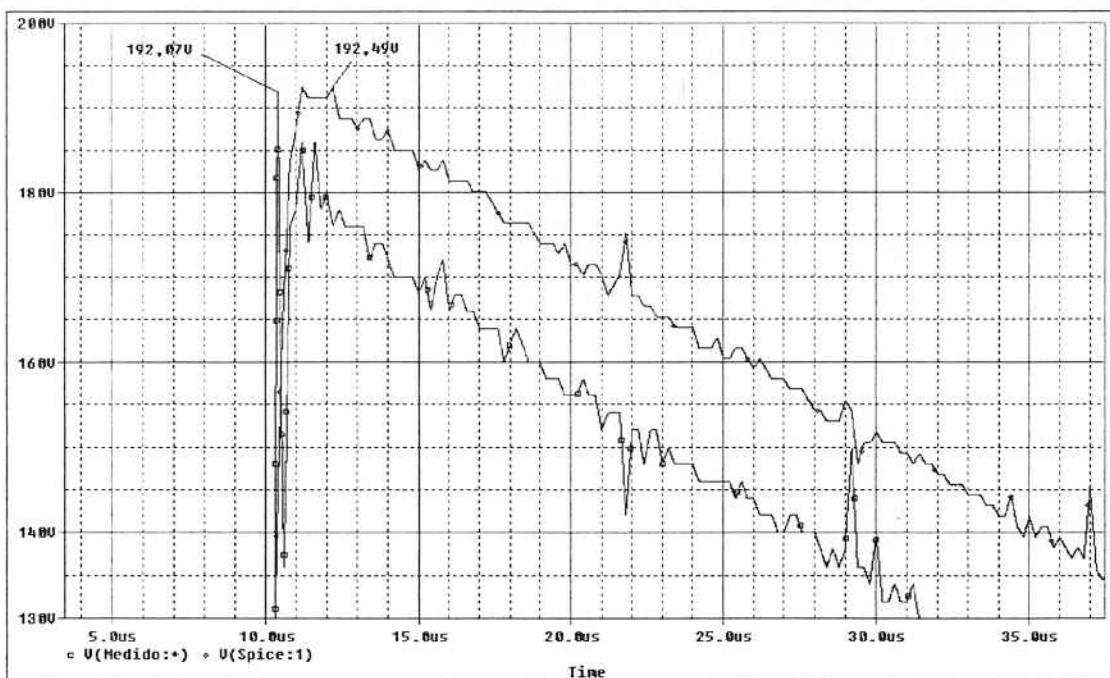


Fig. 4.13 “Zoom” no pico de tensão do resultado comparativo.

4.5 Discussão

Os resultados teóricos se mostraram adequados. Observa-se, inclusive, uma melhoria em relação às simulações da referência bibliográfica, pois se pode utilizar uma precisão maior no aplicativo “Spice”, devido a existência de computadores pessoais com processamento superior aos utilizados na época, aumentando 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. 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 ao valor da tensão induzida. Verificou-se, que a existência de campos eletromagnéticos externos influenciam, 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. 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.

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 [1], 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 tornar o aplicativo mais simples. 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, ou seja, podem-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

Para a implementação dos modelos de crosstalk descritos em [1], precisam-se utilizar geradores de tensão e corrente vinculados para simular os acoplamentos eletromagnéticos entre os condutores, mas não se pode utilizar os geradores vinculados do “Spice”, pois precisa-se gerar uma tensão ou corrente vinculadas a duas ou mais variáveis. Mas os blocos funcionais, que deveriam proporcionar essa possibilidade, o “Gpoly” e “Fpoly”, apresentam uma dificuldade de implementação, já que, graficamente, eles não possuem uma pinagem adequada para o seu controle a partir de duas ou mais variáveis.

Inicialmente, 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, corrigindo as falhas existentes. Portanto, impõem-se as demais variáveis, diretamente, no arquivo-texto e utilizando a sub-rotina “Spice” para simular os circuitos.

O processo inicia-se a partir da utilização do “Schematics”, evitando a necessidade de se descrever o circuito, totalmente, através do arquivo-texto, ou seja, desenha-se o circuito o mais próximo do desejado, a listagem é 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, tendo que fazer 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”. O “Spice” não atualiza a interface gráfica a partir das modificações feitas no arquivo-texto, ao contrário, 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 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. 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 freqüência)
- 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 (tempo em que o pulso se mantém no máximo de tensão)
- 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:

- Z0 = 323.7 Ω (impedância característica das linhas)
- TD = 15.58 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). Na figura A.1, podem ser observados 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”.

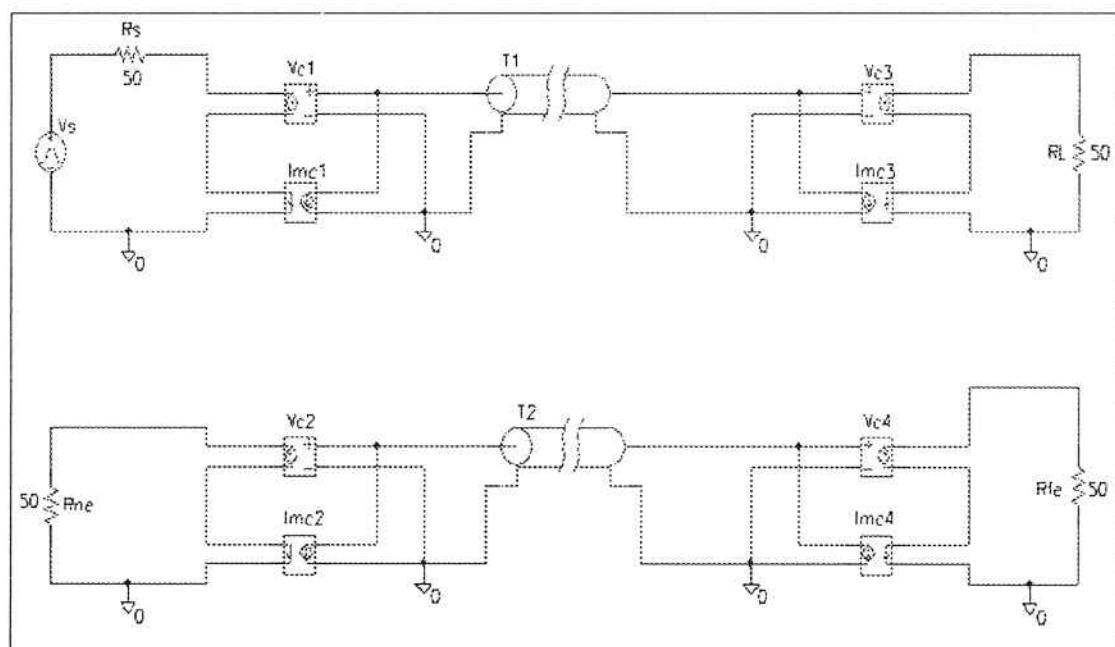


Fig. A.1 Circuito implementado no Schematics.

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 selecionasse 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 “Spice” e os resultados são obtidos, plotando o gráfico com o comando “Run Probe”.

Para se fazer a análise em freqüência 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 freqüência)
.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 envolve 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”. A seguir, será apresentada a metodologia de desenvolvimento de blocos funcionais para o “Spice” junto com 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 completamente ciente do intuito da criação do novo componente, pois, assim, evitara 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.

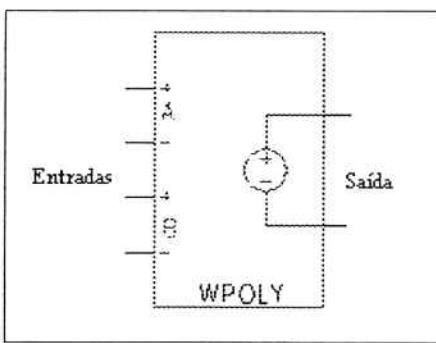


Fig. B.1 Componente WPOLY.

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, não ter considerável 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 figura B.2.

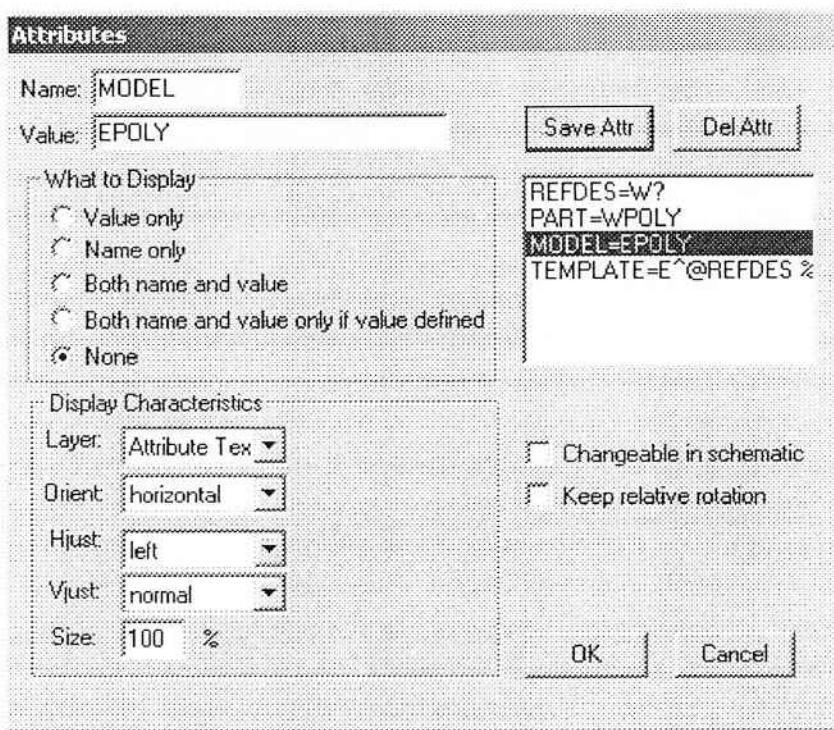


Fig. B.2 Atributos do componente WPOLY.

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.

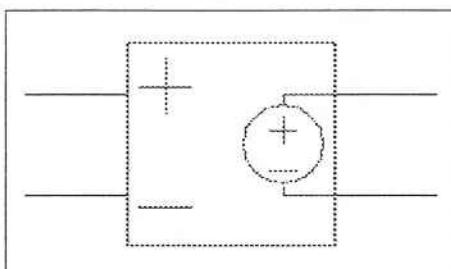


Fig. B.3 Componente EPOLY.

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

TEMPLATE = E^@REFDES %3 %4 POLY(2) %1 %2 %5 %6 0 1 1 (B.1)

Essa configuração determina que a tensão de saída ($V_{saída}$) 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).

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

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 [3], 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).

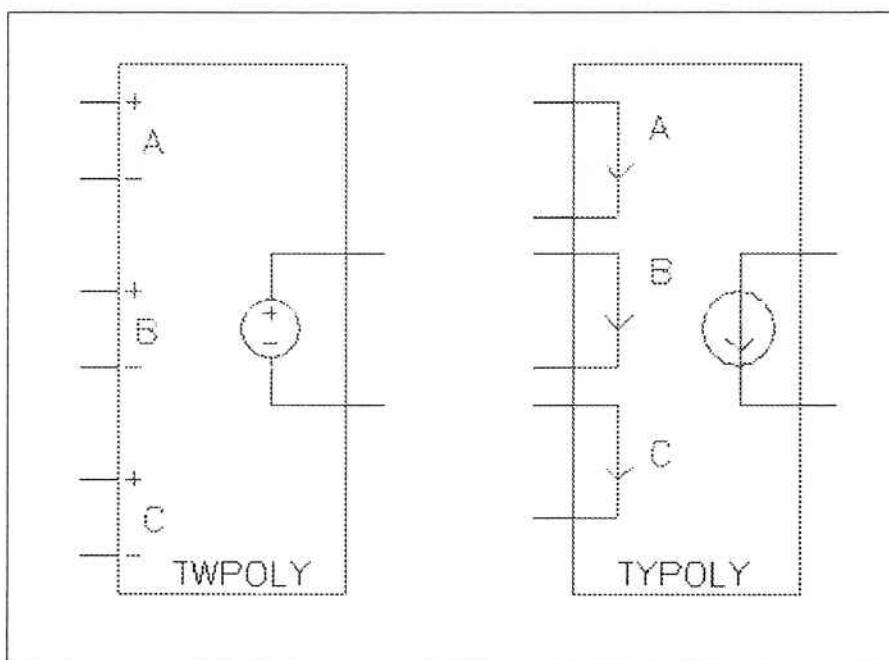


Fig. B.4 Componentes TWPOLY e TYPOLY.

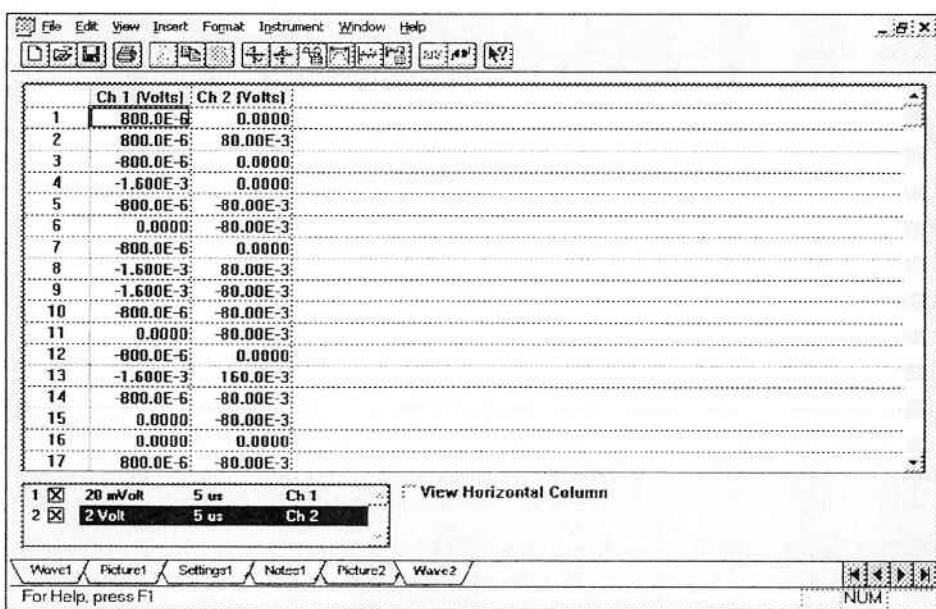
ANEXO C - IMPLEMENTAÇÃO DE FORMAS DE ONDA REAIS EM SIMULAÇÕES DO SPICE

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 with a menu bar (File, Edit, View, Insert, Format, Instrument, Window, Help) and a toolbar with various icons. The main area displays a table titled "Ch 1 [Volts] Ch 2 [Volts]" with 17 rows of data. Below the table is a section for "View Horizontal Column" with two entries: "1 20 mVolt 5 us Ch 1" and "2 2 Volt 5 us Ch 2". At the bottom, there is a navigation bar with tabs for Wave1, Picture1, Setting1, Notes1, Picture2, and Wave2, along with a "For Help, press F1" message and 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

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.

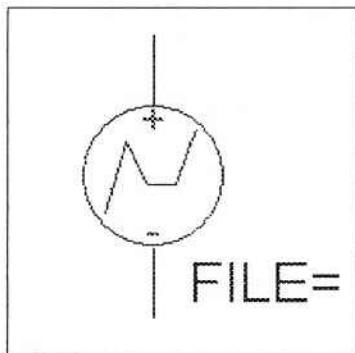


Fig. C.2 Componente VPWL_FILE.

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 pode-se 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 $200\text{ns} / 2000\text{ pontos} = 10^{-10}$, que deve ser escrito por extenso, ou seja, sem a utilização da notação científica (Fig. C.3).

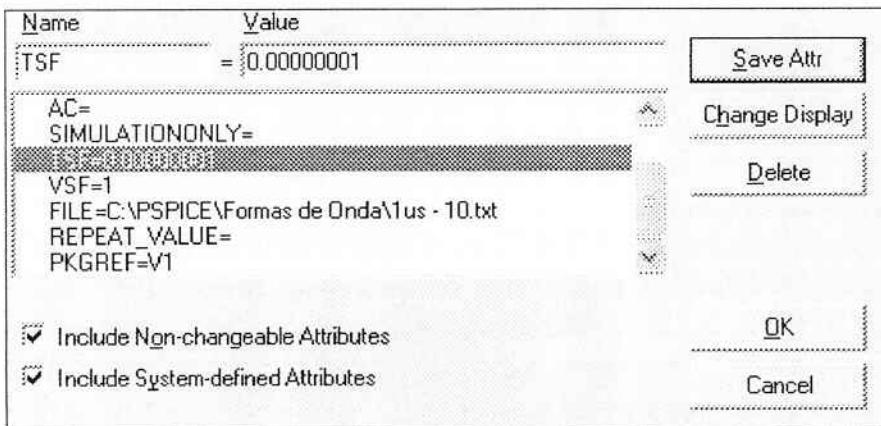


Fig C.3 Atributos do componente VWPL_FILE.

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] Paul, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility.** New York: Wiley, c1992. Cap.4., p.120-176: Transmission Lines; Cap.10., p.491-631: Crosstalk.
- [2] 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.
- [3] F.H. Branin, Jr. Transient Analysis of lossless transmission lines. Proc. IEEE, 55, 2012-2013, 1967.
- [4] 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.
- [5] Paul, C. R. Computation of Crosstalk in a Multiconductor Transmission Line. IEEE Trans. on Eletromagnetic Compatibility, Vol. EMC-23, 352-358, nov. 1981.
- [6] Paul, C. R. A simple SPICE model for coupled transmission lines. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, 1988.
- [7] Herniter, Marc E., **Schematic capture with PSpice.** New York: Merrill; Toronto: Maxwell Macmillan Canada; New York: Maxwell Macmillan International, c1994. 324p.
- [8] Paul, C. R. **Analysis Multiconductor Transmission Lines.** New York: John Wiley, 1994. 559p.
- [9] Stevenson, W. D. **Elements of Power System Analysis.** New York: McGraw-Hill, 1962. 388p.