

TESE DE DOUTORADO Nº 021

**CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGA  
ATMOSFÉRICA EM LINHAS AÉREAS DE  
ENERGIA E CABOS TELEFÔNICOS: UMA  
ABORDAGEM PELA TEORIA DE CIRCUITOS**

*Tarcísio Antônio Santos de Oliveira*

DATA DA DEFESA: 14.12.2001

Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGA  
ATMOSFÉRICA EM LINHAS AÉREAS DE ENERGIA E CABOS  
TELEFÔNICOS: UMA ABORDAGEM PELA TEORIA DE  
CIRCUITOS

Autor:

Tarcísio Antônio Santos de Oliveira

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Dezembro – 2001

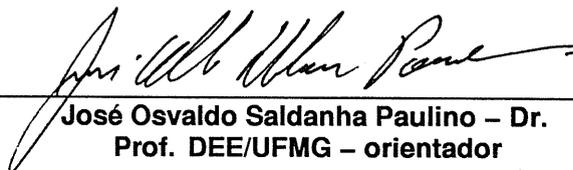
**"Cálculo de tensão induzida por descarga atmosférica  
em linhas aéreas de energia e cabos telefônicos:  
uma abordagem pela teoria de circuitos"**

***Tarcísio Antônio Santos de Oliveira***

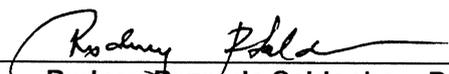
Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

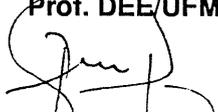
Aprovada em 14 de dezembro de 2001.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
José Osvaldo Saldanha Paulino – Dr.  
Prof. DEE/UFMG – orientador

  
\_\_\_\_\_  
Antônio Emílio Angueth de Araújo – Ph.D.  
Prof. DEE/UFMG

  
\_\_\_\_\_  
Rodney Rezende Saldanha – Dr.  
Prof. DEE/UFMG

  
\_\_\_\_\_  
José Pissolato Filho – Dr.  
Prof. UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Antônio França Sartori – Dr.  
Prof. EP/USP

## Agradecimentos

Ao Professor e amigo José Osvaldo Saldanha Paulino, não só pela sugestão do tema e orientação do trabalho, mas principalmente pela sua sensibilidade em perceber e lidar com as diferenças de cada ser humano.

Aos colegas do PPGEE, pelas discussões valiosas e pelos bons e prazerosos momentos vividos, dentro e fora da academia.

Ao CEFET-MG pelo apoio dado.

À minha família, pela compreensão e pela privação de muitos momentos de convívio que foram dedicados ao trabalho.

---

Este trabalho é dedicado à minha esposa,  
Maria do Carmo Costa, e ao meu filho,  
Vinícius Loures de Oliveira.

---

De tudo ficaram três coisas:

a certeza de que estava sempre começando,

a certeza de que era preciso continuar,

a certeza de que seria interrompido antes de terminar

e fazer da interrupção um caminho novo,

fazer da queda um passo de dança,

do medo, uma escada,

do sonho, uma ponte,

da procura, um encontro.

(Fernando Pessoa)

---

## Sumário

Este trabalho propõe a implementação do cálculo de tensões induzidas em redes aéreas de energia elétrica e cabos telefônicos, utilizando um simulador comercial de circuitos elétricos, de forma a evitar a utilização de códigos numéricos complexos e especificamente orientados para o problema.

O programa desenvolvido permite, até o presente estágio, sua aplicação em linhas aéreas multifilares e com aterramentos múltiplos, bem como em linhas telefônicas. Estudos analisando a incorporação de pára-raios ou de protetores contra surtos podem ser realizados, o que permite ao programa ser utilizado em estudos de proteção de linhas contra sobretensão, proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis contra sobretensão e estudos de compatibilidade eletromagnética.

Diversos casos teóricos são analisados, visando compreender a influência dos parâmetros da descarga atmosférica na tensão induzida em linhas aéreas e cabos telefônicos, que, por sua vez, são apresentados em diversas configurações. Os resultados obtidos são comparados com similares disponíveis na literatura. Algumas simulações são também comparadas com resultados experimentais obtidos na África do Sul e nos Estados Unidos.

---

## Abstract

This work proposes the calculation of induced voltages on overhead power lines and telephone cables by means of a commercial electric circuits simulator, aiming at avoiding the utilization of complex numerical codes specifically oriented to the problem.

Up to this stage, the program developed allows its application to multiconductor and multiple grounding overhead lines, as well as to telephone lines. Studies that analyze the incorporation of lightning arresters and surge protection devices may be carried out, thus enabling the program to be used in studies on overvoltage protection for lines and sensitive electronic equipment, and studies on electromagnetic compatibility.

Several theoretical cases are analysed aiming at understanding the influence of lightning discharge parameters in induced voltage in aerial lines and telephone cables that, in turn, are presented in several configurations. The results obtained are compared with similar results available in pertinent literature. Some simulations are also compared with experimental results obtained in the United States and in South Africa .

---

## Índice Analítico

AGRADECIMENTOS .....	II
SUMÁRIO.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE ANALÍTICO.....	VII
<b><u>CAPÍTULO 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.2 RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	1
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.4 ESTRUTURA DO TEXTO.....	6
<b><u>CAPÍTULO 2 CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. 8</u></b>	
2.1 CONCEITOS GERAIS RELATIVOS A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA .....	8
2.1.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA .....	9
2.1.2 O CANAL DE DESCARGA .....	12
2.2 A TEORIA DE RUSCK .....	13
2.2.1 O CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS.....	14
2.2.2 ANÁLISE CRÍTICA DA TEORIA DE RUSCK.....	17
2.3 CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS EM CABOS TELEFÔNICOS .....	18
2.3.1 IMPEDÂNCIA E ADMITÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA.....	19
2.3.2 CÁLCULO APROXIMADO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA.....	21
<b><u>CAPÍTULO 3 IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA NA PLATAFORMA SPICE.....</u></b>	<b><u>24</u></b>
3.1 A UTILIZAÇÃO DO SPICE.....	25
3.2 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS MODELOS UTILIZADOS PELO SPICE .....	29
3.2.1 LINHA MULTIFILAR SEM PERDAS COM FONTES DEPENDENTES DE TENSÃO E CORRENTE.....	29
3.2.2 LINHAS COM PERDAS .....	33
3.3 EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO DO SPICE EM SISTEMAS DE ENERGIA .....	35
3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS.....	37

---

3.4.1	FONTES DE CORRENTE ASSOCIADAS AO CAMPO NÃO CONSERVATIVO.....	38
3.4.2	CIRCUITO EQUIVALENTE PARA A MODELAGEM APRESENTADA .....	38
<b>3.5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA EM CABOS TELEFÔNICOS.....</b>	<b>39</b>

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS PARA LINHAS AÉREAS .....** 42

<b>4.1</b>	<b>VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA UMA LINHA MONOFÁSICA .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>LINHAS MULTIFILARES SEM PERDAS .....</b>	<b>45</b>
<b>4.3</b>	<b>SIMULAÇÕES PARA UMA LINHA BIFÁSICA .....</b>	<b>45</b>
4.3.1	INFLUÊNCIA DA PARTIÇÃO DA LINHA.....	46
4.3.2	APROXIMAÇÃO DA CORRENTE DE RETORNO POR DEGRAUS DEFASADOS NO TEMPO .....	47
4.3.3	INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA LINHA.....	48
4.3.4	INFLUÊNCIA DO PONTO DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA E DO VALOR DE PICO DE CORRENTE .	48
4.3.5	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE FRENTE E DA VELOCIDADE DA CORRENTE DE RETORNO.....	49
4.3.6	VARIAÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA AO LONGO DA LINHA E INFLUÊNCIA DO COMPONENTE NÃO CONSERVATIVO DO CAMPO ELÉTRICO .....	50
<b>4.4</b>	<b>SIMULAÇÕES PARA UMA LINHA TRIFÁSICA .....</b>	<b>50</b>
<b>4.5</b>	<b>COMPARAÇÃO COM MEDIÇÃO REALIZADA NA ÁFRICA DO SUL.....</b>	<b>52</b>
<b>4.6</b>	<b>COMPARAÇÃO COM TENSÕES MEDIDAS NA LINHA EXPERIMENTAL DO EPRI .....</b>	<b>53</b>
<b>4.7</b>	<b>COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES DE CAMPOS NA LINHA EXPERIMENTAL DO EPRI .....</b>	<b>59</b>

## **CAPÍTULO 5 RESULTADOS PARA CABOS TELEFÔNICOS .....** 60

<b>5.1</b>	<b>SIMULAÇÕES PARA UM CABO TELEFÔNICO AÉREO .....</b>	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>INCIDÊNCIA DE UMA DESCARGA DIRETA NO CABO .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3</b>	<b>INCIDÊNCIA DE DESCARGAS LATERAIS .....</b>	<b>64</b>
5.3.1	INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE ATERRAMENTO DA BLINDAGEM .....	65
5.3.2	INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE ATERRAMENTOS.....	68
5.3.3	UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS.....	69

## **CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....** 71

<b>6.1</b>	<b>A UTILIZAÇÃO DO SPICE.....</b>	<b>71</b>
<b>6.2</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>6.3</b>	<b>O EMPREGO DA TEORIA DE RUSCK.....</b>	<b>72</b>
<b>6.4</b>	<b>PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....</b>	<b>72</b>
6.4.1	LINHA EXPERIMENTAL INSTALADA NO CIPDA.....	73
6.4.2	EDIFICAÇÃO MONTADA NO CIPDA.....	74

6.4.3	ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE UMA EDIFICAÇÃO.....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	78
	NOMENCLATURA.....	82
	ANEXO A - LISTAGENS DE ALGUNS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS .....	84
	ANEXO B – CENTRO INTERNACIONAL DE PESQUISAS EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	94

---

# Capítulo 1

## Considerações Gerais

### 1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é a implementação do cálculo de tensões induzidas em redes aéreas de energia elétrica e cabos telefônicos, utilizando um simulador comercial de circuitos elétricos, de forma a evitar a utilização de códigos numéricos complexos e especificamente orientados para o problema. O programa desenvolvido permite, até o presente estágio, sua aplicação em linhas aéreas multifilares e com aterramentos múltiplos, bem como em linhas telefônicas. Estudos analisando a incorporação de pára-raios ou protetores contra surtos podem ser realizados, o que permite ao programa ser utilizado em estudos de proteção de linhas contra sobretensão, proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis contra sobretensão e estudos de compatibilidade eletromagnética.

### 1.2 Relevância do trabalho

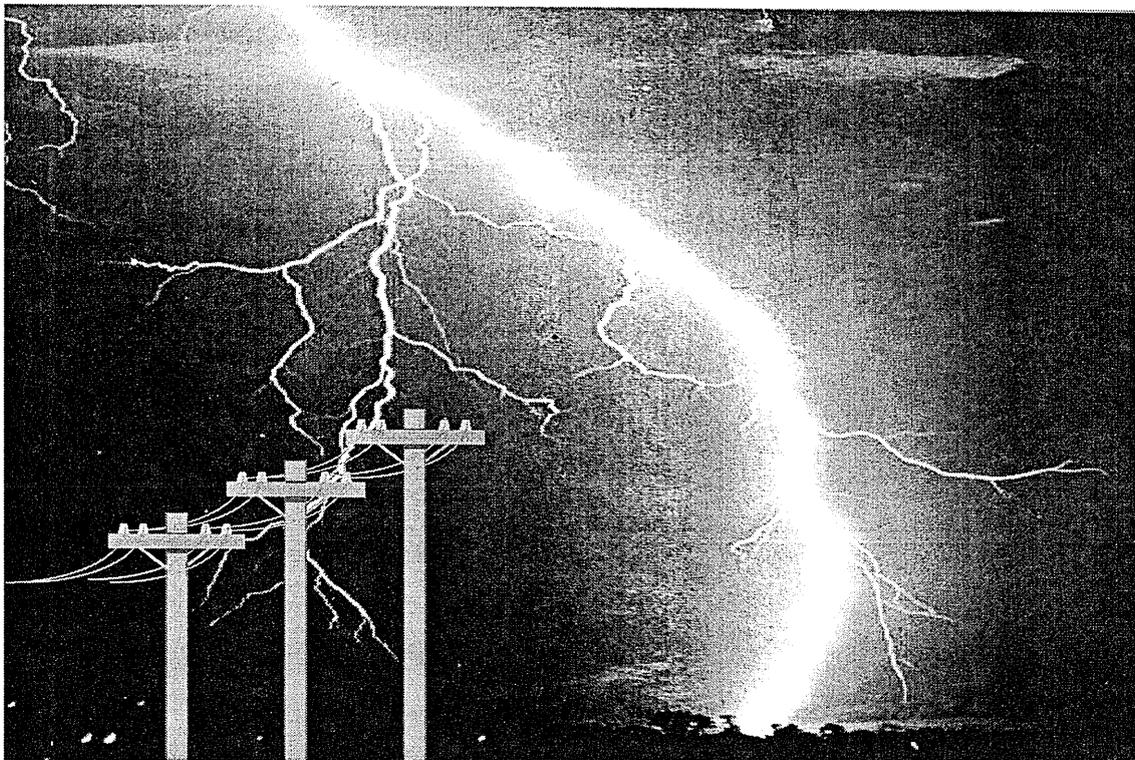


Figura 1.1 - Descarga atmosférica próxima a uma rede de energia elétrica [65]

O efeito das descargas atmosféricas em linhas aéreas vem sendo estudado ao longo do tempo. Não só o efeito das descargas que atingem diretamente a linha, mas particularmente o efeito das descargas indiretas. As descargas indiretas, devido ao efeito da indução eletromagnética, podem provocar danos em sistemas de baixa tensão e de comunicação, bem como em estruturas possuindo alto nível de utilização de dispositivos eletrônicos. De fato, nos últimos anos, a introdução em grande quantidade de equipamentos eletrônicos de última geração em todos os setores da sociedade incrementou os estudos relativos à compatibilidade eletromagnética, ou seja, o estudo da interação dos equipamentos com os campos eletromagnéticos naturais e com os campos criados pelos próprios equipamentos.

Os atuais equipamentos eletrônicos utilizam em larga escala circuitos integrados, e os mesmos são extremamente susceptíveis a sobretensões, o que tem provocado um aumento significativo no número de danos aos mesmos, principalmente durante o período de chuvas. Estudos e pesquisas sobre proteção desses equipamentos estão sendo feitos em todo o mundo, podendo-se destacar os trabalhos desenvolvidos na Itália, França, Japão, Alemanha, Estados Unidos, Canadá e Brasil [2], [6],[11], [14], [17], [22], [41], [42], [50],[51].

Portanto, um trabalho de doutorado se justifica, na medida em o conhecimento das tensões induzidas é a base no estabelecimento de critérios de proteção para tais sistemas, que levem a uma minimização dos transtornos decorrentes das descargas atmosféricas.

Um estudo de tensões induzidas pode passa pelas seguintes etapas:

- *Caracterização e modelagem do fenômeno da descarga atmosférica;*
- *Cálculo da resposta transitória de uma linha aérea frente ao campo eletromagnético produzido pela descarga;*
- *Computação dos transitórios eletromagnéticos para se obter a tensão induzida em um sistema genérico;*
- *Simulação dos arranjos de proteção selecionados, para se estabelecer o mais eficaz no sentido de se limitar a tensão induzida em um dado sistema*

As duas primeiras etapas constituem a base teórica de nosso trabalho e podem ser vistas de forma ampla nas referências [20] e [49], que tratam da teoria de Rusck para o cálculo de tensões induzidas. Nossa ação precípua concentra-se nas duas últimas etapas. Para isto, de forma a evitar a utilização de códigos numéricos complexos, caros, as vezes inacessíveis, especificamente orientados para o problema, optamos por concentrar os efeitos de campos eletromagnéticos incidentes em fontes de corrente adequadamente dimensionadas e distribuídas ao longo da linha, conforme a própria teoria de Rusck, de forma não explícita, deixava antever e conforme caminho trilhado por diversos outros pesquisadores [2], [3], [5], [38], [55], [56]. Posto isto, chegamos a um problema de circuitos elétricos, para o qual duas opções principais são oferecidas:

- A utilização do EMTP (***E**letr**o**magn**e**t**i**c **I**nter**s**ient **P**rogram*), o programa mais empregado em nível mundial na área de sistemas de energia elétrica, que desde a sua criação na década de 60, cresceu de forma semelhante a uma bola de neve, recebendo contribuições de diversos pesquisadores [21];
- A utilização do SPICE (***S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis*), programa que, na área de eletrônica, possui o mesmo prestígio que o EMTP em sistemas de energia.

No PPGE/UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica), a implementação do cálculo de tensões induzidas no EMTP foi investigada por Silva, em seu trabalho de doutorado [56], tendo sido levada a bom termo, com vários resultados já publicados [5], [55]. Sendo o escopo principal desenvolver uma ferramenta computacional e aplicá-la tanto em sistemas elétricos como em sistemas eletrônicos, de telecomunicações e em estudos de compatibilidade eletromagnética, avaliamos ser o SPICE um simulador com as características desejadas.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Existem vários trabalhos computacionais e experimentais na bibliografia a respeito da avaliação das grandezas eletromagnéticas resultantes de descargas atmosféricas em linhas e estruturas (edificações), como pode ser visto na bibliografia apresentada. Na ciência, muitas teorias ou modelos surgem e tendem, ao longo do tempo, a ser corroboradas (ou descartadas) de acordo com resultados experimentais obtidos. Em nossa área de atuação, descargas atmosféricas, a realização de medições é bastante complexa, e por isso, muitas polêmicas existem, o que é salutar para o aprimoramento das hipóteses. Para ilustrar, vemos que em [28], a técnica já tradicional de equipotencialização, que busca minimizar diferenças de potenciais entre pontos separados em uma estrutura, pela interligação de cabos e malhas, pode resultar em uma distribuição adversa de correntes, afetando a melhoria esperada. Em [58], conclui-se que o cabo pára-raios de uma linha de transmissão não tem nenhuma influência sobre as tensões induzidas nos condutores das fases, o que demonstra a complexidade do problema, tornando mais evidentes as divergências entre as teorias.

No âmbito do PPGE/UFMG diversas pesquisas têm sido feitas. Lopes, em sua dissertação de mestrado [26], desenvolveu um consistente trabalho de cálculo de tensão induzida baseado na teoria de Rusck. O programa resultante e de uso dedicado, aplicável a linhas aéreas monofásicas, foi implementado a partir das expressões analíticas deduzidas por Rusck. Seus resultados foram confirmados experimentalmente através de medições efetuadas em modelo reduzido por Boaventura [9]. Grossi [22], em recente tese de doutorado, deu continuidade aos trabalhos iniciados por Boaventura, estabelecendo um modelo reduzido para estudos de indução em edificações causada por descargas diretas, e propondo uma metodologia de testes para avaliação da eficiência de um SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas). Ainda como resultado da pesquisa, apresentou

um conjunto de quatro arranjos de resistores capazes de simular a presença do canal de descarga atmosférica. Silva [56] desenvolveu um trabalho, em que a teoria de Rusck foi incorporada ao EMTP para o caso de linhas aéreas. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade da metodologia.

Sartori em um abrangente trabalho de doutorado [51], consolida e amplia resultados anteriormente obtidos, ao apresentar uma metodologia de cálculo da distribuição de correntes, campos eletromagnéticos e tensões induzidas em estruturas atingidas diretamente por descargas atmosféricas. A determinação do ambiente eletromagnético interno à estrutura possibilita a realização de estudos que envolvam diversas combinações de parâmetros no desempenho geral dos SPDA.

Sartori e Cardoso [52], [53], [54] apresentam resultados computacionais associados a descargas atmosféricas diretas em um edifício, como distribuição de correntes nos condutores da estrutura, campo magnético dentro da estrutura e tensão induzida em laços no interior da edificação. Não são levados em consideração os efeitos do canal de descarga. Em [52] são avaliadas as tensões induzidas em laços localizados em pontos distintos dentro do SPDA, o qual é modelado por uma estrutura metálica, sendo que o valor da resistência de aterramento foi considerado constante e igual a  $10 \Omega$ . Já na referência [54] é feita uma análise da influência da altura do prédio na performance do SPDA quando este é diretamente atingido por uma descarga atmosférica. Para este propósito duas configurações de SPDA são consideradas: uma alta (36 m) e uma baixa (6 m). Os resultados relacionados à densidade de fluxo magnético e efeitos induzidos são comparados.

Destacam-se também os trabalhos de Caixeta e Pissolato [10], com simulações do sistema estrutura - descarga atmosférica, onde os campos eletromagnéticos gerados pela descarga e pelo SPDA são levados em consideração. A corrente de retorno da descarga atmosférica e do sistema de proteção contra descargas foram simuladas utilizando o modelo TLM - Modelo de Linha de Transmissão. O SPDA foi considerado como uma interconexão de linhas de transmissão. No artigo, juntamente com a simulação da corrente de retorno da descarga, parâmetros não lineares como corona e efeito pelicular foram considerados. Com o objetivo de encontrar uma melhor proteção para o prédio, é feita uma análise de diferentes configurações do SPDA no cálculo dos campos eletromagnéticos gerados em seu interior e na simulação do campo elétrico induzido em um circuito localizado no interior deste.

Caixeta [11], em seu trabalho de doutorado, aprofunda pesquisas anteriores e apresenta um estudo do campo eletromagnético gerado por descargas atmosféricas diretas em um SPDA.

Piantini, em um amplo trabalho de doutorado [42], utilizou a teoria de Rusck, com modificações, para análise das relações custo/benefício das diferentes técnicas de proteção de linhas aéreas. Em sua pesquisa, foi analisado o comportamento das tensões induzidas em linhas com e sem proteção, considerando-se os efeitos da presença do cabo guarda, dos transformadores, dos pára-raios e as influências de parâmetros como a resistência de aterramento, o intervalo entre pára-raios, a altura do cabo guarda, etc. A representação de

transformadores de forma a permitir avaliação das tensões transferidas ao secundário foi considerada. No caso de redes urbanas foi também investigada a influência dos ramais e da presença de edificações próximas à linha. Em função das enormes dificuldades em se levar em conta o efeito das presenças dos diversos ramais e, principalmente, das edificações próximas à linha, e considerando ainda as inúmeras possibilidades de combinação entre geometria da rede e forma das edificações, a pesquisa de tais efeitos foi realizada experimentalmente, através da técnica de modelo reduzido.

Nos trabalhos de Cristina e Orlandi são apresentados métodos computacionais para se avaliar tanto a distribuição de corrente ao longo dos vários condutores do sistema de proteção de um prédio quando atingido por uma descarga atmosférica direta [13], [19], quanto os campos eletromagnéticos gerados dentro do prédio [16], [19]. Entretanto, nesses trabalhos, a influência da presença do canal de descarga nos campos eletromagnéticos não foi considerada. Já na referência [14] os autores apresentam um estudo computacional para caracterizar, no domínio da frequência, a influência exercida pelo canal de descarga atmosférica na distribuição de correntes nos condutores do sistema de proteção, e, então, nos campos eletromagnéticos gerados dentro da estrutura. Essa influência é analisada considerando-se como modelo para representar o canal de descargas uma antena retilínea vertical de comprimento finito (4000 m), onde flui uma corrente. O solo é considerado um condutor perfeito. Esse modelo foi testado comparando-se os valores da componente vertical do campo elétrico gerado no nível do solo, com valores existentes na bibliografia. Os resultados dessa análise mostram que a influência exercida pelo canal de descargas é significativa.

Na referência [36] Orlandi e Schietroma consideram as tensões transitórias induzidas em circuitos elétricos dentro de uma edificação protegida, devido a descargas atmosféricas diretas. Avalia-se os níveis máximos e a atenuação das tensões induzidas em condutores internos para configurações diferentes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

Em [19] faz-se uma investigação analítica e experimental das correntes e tensões induzidas em laços localizados dentro de um SPDA devido a descargas atmosféricas diretas. São avaliadas dimensões e posições diferentes do laço, assim como a influência do número de elementos condutores do SPDA. O canal de descargas foi simulado por um condutor vertical, tendo uma corrente impulsiva de forma  $1/5 \mu\text{s}$  fluindo ao longo do condutor. Dois casos são analisados: a) descarga próxima à estrutura; b) descarga direta na quina superior do SPDA.

Em trabalho recente [4], Antonini, Cristina e Orlandi utilizam a técnica PEEC (sigla em inglês para circuito equivalente de elementos parciais), que consiste na interpretação por circuitos de uma equação integral de campo elétrico. A técnica é empregada para a análise do acoplamento de campos eletromagnéticos no interior de um SPDA com cabos coaxiais. O fenômeno do acoplamento é descrito por meio dos conceitos de impedância e admitância de transferência. As equações matriciais de todo o conjunto de elementos que descreve o circuito equivalente global é resolvido no domínio da frequência. A resposta do cabo, em termos de

tensões induzidas na carga e corrente na blindagem, é calculada nos domínios do tempo e da frequência.

Na Alemanha, Matthias Smolke e Eberhard Engelmann [57], tendo como objetivo blindar os sistemas e dispositivos eletrônicos localizados dentro de estruturas (prédios), fizeram um estudo computacional da intensidade do campo magnético e de sua distribuição em estruturas que conduzem a corrente da descarga atmosférica, a partir da qual desenvolveram um arranjo experimental para simular o campo magnético nessas estruturas.

Laan e Deursen [25] apresentam um estudo de proteção de equipamento eletrônicos sensíveis contra descargas atmosféricas utilizando o conceito de impedância de transferência global, ou seja, aquela que fornece a tensão interferente nos terminais de um equipamento por unidade de corrente da descarga. É analisado um percurso metálico alternativo para a corrente de descarga de forma a minimizar a impedância de transferência, considerando-se também a forma e a rota do cabo.

#### 1.4 Estrutura do texto

Esta tese é dividida em 6 capítulos, descritos a seguir de forma sucinta:

- *O primeiro capítulo, Considerações Gerais, apresenta o objetivo a ser alcançado, a relevância do tema sob investigação, a filosofia de trabalho e uma pequena revisão bibliográfica;*
- *O segundo capítulo, Cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas, apresenta uma descrição do fenômeno, um resumo da teoria de Rusck para cálculo de tensões induzidas e uma discussão sobre vários pontos polêmicos suscitados por essa teoria. Discorre ainda sobre o cálculo de tensões induzidas em cabos telefônicos utilizando o conceito de impedância de transferência;*
- *O terceiro capítulo, Implementação do cálculo de tensão induzida na plataforma SPICE, apresenta as características básicas do SPICE e como ele pode ser utilizado no cálculo de tensões induzidas. Mostra ainda a modelagem do campo incidente em termos de fontes conservativas e não conservativas, conforme representem elas a ação do campo originado no potencial eletrostático ou no potencial vetor magnético;*
- *O quarto capítulo, Resultados para Linhas Aéreas, apresenta inicialmente resultados para uma linha monofásica, comparando a metodologia proposta com a metodologia das fontes de compensação. Com isto, pretendemos validar o programa desenvolvido, comparando-o com outros já estabelecidos. Em seguida, realiza um estudo de uma linha bifásica, onde a influência de diversas características da descarga atmosférica e da linha são analisadas (tempo de frente da corrente de retorno, velocidade da corrente, etc), bem como de parâmetros intrínsecos ao programa (partição da linha e modelagem da corrente). O estudo de uma linha trifásica é também contemplado, no qual uma análise preliminar sobre a utilização de cabos pára-raios e dispositivos pára-raios é feita*

---

*Finalmente várias simulações são comparadas com resultados obtidos em experimentos realizados na África do Sul e nos Estados Unidos;*

- *O quinto capítulo, Resultados para Cabos Telefônicos, apresenta uma seqüência de resultados contemplando o cálculo da tensão induzida em cabos telefônicos. São analisados a influência do nível de aterramento da blindagem do cabo, a distância entre aterramentos e a utilização de dispositivos de proteção contra surtos;*
  - *O sexto capítulo apresenta as conclusões e uma proposta de continuidade para o trabalho.*
-

## Capítulo 2

# Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas

Um dos efeitos mais importantes causados pelas descargas atmosféricas é o aparecimento de tensões induzidas pela corrente que flui pelo canal ionizado constituído entre a nuvem e o solo durante o estabelecimento da descarga. Os sistemas elétricos sofrem freqüentes distúrbios provocados por esse fenômeno, percebidos sob a forma de sobretensões. Esses distúrbios ocasionam desligamentos das redes elétricas, queima de equipamentos, paralisação de processos industriais, etc. Esse quadro justifica a necessidade de um conhecimento mais profundo sobre o fenômeno e suas conseqüências, para tornar possível a adoção de procedimentos de engenharia, capazes de mitigar os efeitos deletérios associados. Não constitui objetivo de nosso trabalho um estudo exaustivo do fenômeno físico nem das modelagens existentes para o cálculo dos campos associados com as descargas e sua interação (acoplamento) com condutores elétricos, mas julgamos oportuno uma síntese dos conceitos mais importantes, utilizados ao longo dessa tese.

### 2.1 Conceitos gerais relativos a uma descarga atmosférica

As fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as nuvens de tempestade ou nuvens do tipo cúmulo-nimbo, embora outros tipos de nuvem também possam produzir descargas atmosféricas [62]. A estrutura típica de uma nuvem está apresentada na Figura 2.1, onde se pode observar a presença de cargas positivas na base da nuvem, de cargas negativas no interior da nuvem e a presença de uma concentração de cargas positivas no topo da nuvem [62].

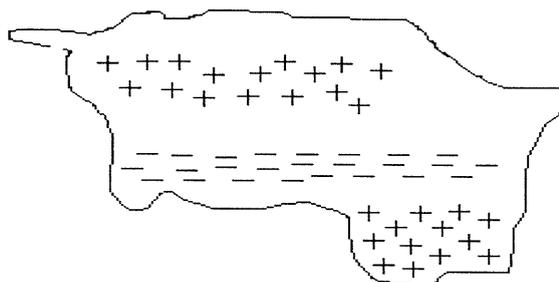


Figura 2.1 - Estrutura típica das cargas elétricas de uma nuvem cúmulo-nimbo

Essas nuvens são polarizadas segundo um processo ainda não explicado satisfatoriamente, gerando campos elétricos de valores suficientes para romper a suportabilidade do meio.

São quatro os tipos de descargas que podem ocorrer [62]:

- *descargas dentro da própria nuvem;*
- *descargas entre nuvens;*
- *descargas entre a nuvem e a atmosfera;*
- *descargas entre nuvem e terra .*

Mais da metade das descargas atmosféricas ocorre dentro da própria nuvem, mas nem sempre essa descarga é detectável, dificultando o estudo através de estações de observação localizadas em terra. Além disso, a maioria dos estudos que analisam a interação dos campos eletromagnéticos das descargas atmosféricas com instalações elétricas, consideram que essas descargas podem ser desprezadas quando da análise das tensões induzidas, sendo que apenas as descargas entre nuvem e terra são de interesse. Neste trabalho, são apresentadas apenas as descargas entre nuvem e terra.

### **2.1.1 Origem e Formação da Descarga Atmosférica**

Embora não se conheça precisamente como as nuvens se tornam carregadas, de maneira geral, pode-se dizer que o aparecimento de cargas no interior das nuvens tem sua origem nas colisões de partículas de diferentes tamanhos, sendo que as correntes ascendentes de ar tendem a transportar as partículas positivas e as pequenas gotas d'água para a parte superior da nuvem, enquanto as grandes gotas d'água levam as partículas negativas para a base da nuvem, formando-se um grande centro de cargas negativas na região inferior da nuvem e um centro de cargas positivas induzido na terra.

As descargas atmosféricas podem ter polaridade positiva ou negativa, dependendo da polaridade das cargas depositadas no canal durante a sua formação e podem ser ascendentes ou descendentes, de acordo com a direção de propagação das cargas.

No caso de descargas positivas, estas ocorrem com uma frequência bem menor que as negativas, e são caracterizadas por uma onda de corrente de retorno de taxa de subida baixa e valor de amplitude elevado. Com relação à direção de propagação, as descargas cuja direção de propagação ocorre da nuvem para a terra, são as que normalmente ocorrem, sendo que, em estruturas muito altas, pode ocorrer a formação de canais a partir da terra em direção à nuvem [15].

As descargas atmosféricas descendentes de polaridade negativa representam 90% dos casos registrados conforme [8], [59], [62], e os 10% restantes são representados pelos demais tipos. Desta forma, será apresentado, a seguir, a seqüência de uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente de polaridade negativa.

Quando o gradiente elétrico da concentração de cargas na nuvem excede a rigidez dielétrica do ar, dá-se a descarga atmosférica, a qual é caracterizada pelo movimento de cargas em direção à terra por um caminho tortuoso e em passos (etapa do líder passo a passo). De acordo com a referência [62], os passos do líder têm uma duração típica de 1  $\mu$ s e dezenas de metros de comprimento. Para Berger [8], o comprimento do líder passo a passo varia entre 10 e 50 m, buscando o caminho mais fácil para a formação de um canal para a propagação de cargas para o solo. Entre cada passo existe uma pausa entre 20 e 50  $\mu$ s de acordo com Uman [62] e entre 30 e 50  $\mu$ s de acordo com Berger [8]. A carga transferida por todo o fenômeno de propagação do líder passo a passo fica em torno de 5 coulombs de cargas negativas no sentido do solo, em um tempo médio de dezenas de ms. A velocidade média do fenômeno é em torno de 200 km/s, sendo que a corrente média do líder situa-se entre 100 e 1000 A com pulsos de corrente em torno de 1 kA.

A Figura 2.2 mostra o processo mais comum de desenvolvimento de uma descarga atmosférica - formação de uma descarga piloto a partir de um centro de cargas negativas na nuvem, seguido por uma corrente de retorno.

Antes da descarga piloto atingir o solo, ocorre um movimento ascendente de cargas de polaridade oposta à da descarga piloto, devido ao alto campo elétrico existente entre a ponta da descarga e o solo. Então, essas cargas ascendentes encontram-se com a descarga piloto em algum ponto acima do solo, iniciando, a partir deste ponto, a corrente de retorno.

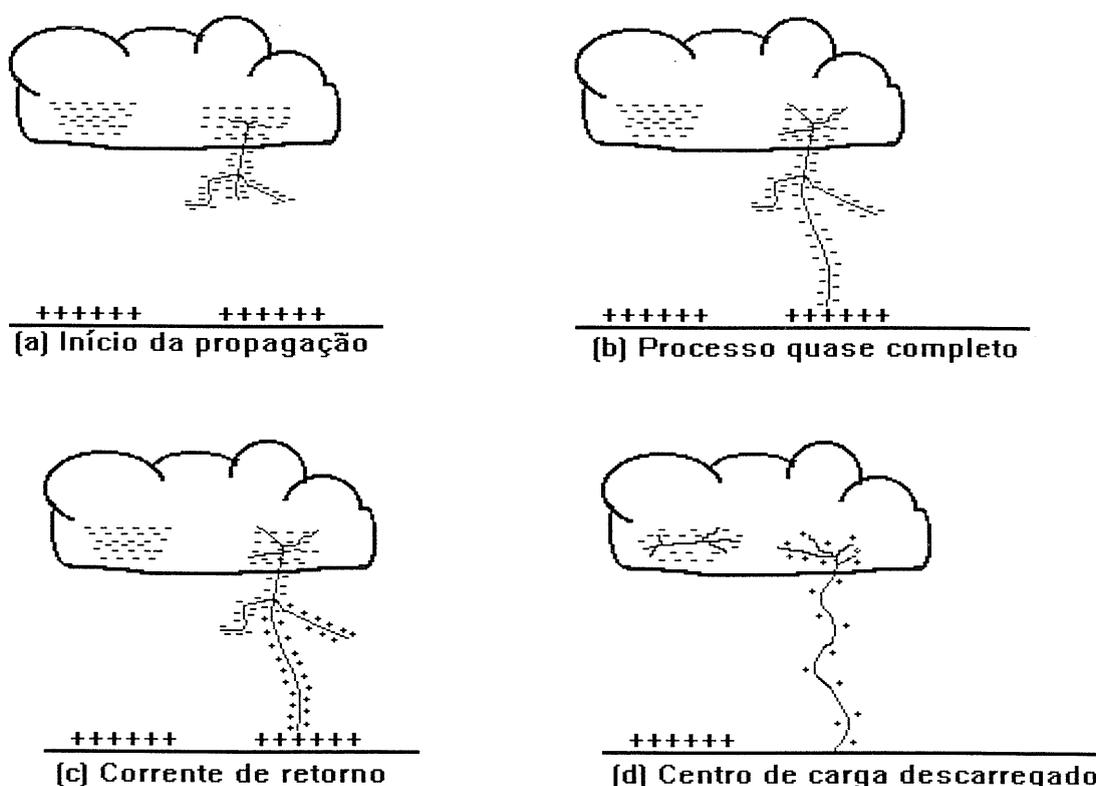


Figura 2.2 - Processo de formação de uma descarga atmosférica

Nesse momento, tem-se o seguinte sistema: uma nuvem carregada ligada à terra por meio de um condutor não linear, com perdas e eletricamente carregado, condutor esse que é o canal de descarga. A corrente de retorno, então, propagar-se-á pelo canal, anulando, primeiramente, as cargas do canal e, posteriormente, as cargas da nuvem.

A tabela 1 apresenta dados relativos às descargas atmosféricas negativas descendentes, os quais foram reunidos por Uman [61] a partir de publicações de vários autores.

	Mínimo	Médio	Máximo
<b>1 Formação do Canal de Descargas:</b>			
<b>1.1 Propagação passo a passo:</b>			
Comprimento do passo, m	3	50	200
Intervalo de tempo entre passos, $\mu\text{s}$	30	50	125
Velocidade média de propagação, m/s	$1 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	$2,6 \times 10^6$
Carga depositada no canal, C	3	5	20
<b>1.2 Propagação contínua:</b>			
Velocidade de propagação, m/s	$1 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$2,1 \times 10^7$
Carga depositada no canal, C	0,2	1	6
<b>2 Corrente de Retorno:</b>			
Velocidade de propagação, m/s	$2 \times 10^7$	$8 \times 10^7$	$1,6 \times 10^8$
Taxa de subida da corrente, kA/ $\mu\text{s}$	<1	10	>80
Tempo de pico da corrente, $\mu\text{s}$	<1	2	30
Valor de pico da corrente, kA		10 - 20	110
Tempo de semi-cauda da corrente, $\mu\text{s}$	10	40	250
Carga transferida excluindo a corrente contínua, C	0,2	2,5	20
Comprimento do canal, km	2	5	14
Diâmetro do canal, cm	1,5	5	200
<b>3 Descarga Atmosférica:</b>			
Número de descargas (inicial mais subsequentes)	1	3 - 4	26
Intervalo de tempo entre inicial e subsequente, ou entre estas na ausência de corrente contínua, ms	3	40	100
Duração da descarga, s	$10^{-2}$	0,2	2
Carga transferida incluindo a corrente contínua, C	3	25	90

**Tabela 2.1 - Parâmetros Gerais das Descargas Negativas Descendentes [61]**

O tempo de frente da onda de corrente de retorno é, tipicamente, de 1 a 10  $\mu\text{s}$  e o tempo de semicauda está na faixa de 20 a 60  $\mu\text{s}$ , sendo que sua amplitude se encontra na

faixa de 10 a 100 kA. A velocidade de propagação da corrente de retorno varia na faixa de 6% a 50% da velocidade da luz no vácuo [61],[62]. Próximo do solo, a velocidade é mais alta e, na medida em que se aproxima das nuvens, diminui. O tempo de trânsito típico da propagação desta corrente ao longo do canal é de 100  $\mu$ s [62]. Por suas características - elevada amplitude e alta taxa de subida -, a corrente de retorno pode ser identificada como a principal etapa da descarga atmosférica para o fenômeno da tensão induzida [61].

No momento em que a corrente de retorno completa a descarga do centro de cargas da nuvem que iniciou o processo, o potencial desse centro de cargas fica bastante reduzido, desenvolvendo-se uma elevada diferença de potencial entre este e um outro centro qualquer dentro da nuvem. Desta forma, são criados canais que ligam essas regiões e o caminho ainda ionizado da primeira descarga, podendo se iniciar um novo processo, só que, agora o raio segue um caminho sem ramificações e com uma velocidade bem maior que a da descarga piloto. Esse processo pode repetir-se várias vezes; são as descargas subseqüentes. Estima-se que a carga depositada no canal pela propagação contínua é menor que no caso anterior, o que está de acordo com as baixas amplitudes das ondas de correntes de retorno medidas em descargas subseqüentes [15].

Estudos sobre descargas atmosféricas são realizados em diversas partes do mundo e sabe-se que as peculiaridades do ambiente interferem diretamente sobre as características das descargas atmosféricas. Por essa razão, a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG vem realizando um extenso trabalho desde o início dos anos 70 [59]. Conforme a referência, a densidade de descargas atmosféricas por quilômetro quadrado por ano no Estado de Minas Gerais varia de 1 a 9, sendo a densidade média de 5 descargas/km<sup>2</sup>/ano.

### 2.1.2 O canal de descarga

O canal de descarga é o caminho pelo qual flui a corrente de retorno e sua modelagem é de fundamental importância para o cálculo de tensões induzidas. As teorias, em geral, adotam dois tipos de modelo para representar o canal da descarga e a corrente de retorno [40], [46]:

- *Linha de transmissão uniforme e ideal;*
- *Linha de transmissão não uniforme e com perdas.*

O primeiro modelo considera o canal de descarga como uma linha de transmissão vertical na qual circula uma corrente. Apesar de sua simplicidade, ele é adotado por grande parte dos pesquisadores. Nesse modelo é suposta uma linha de transmissão ideal, com impedância de surto  $Z_c$  e velocidade de propagação  $v$ .

O segundo modelo pressupõe uma linha de transmissão vertical na qual a corrente de descarga se propaga com uma velocidade variável, função do tempo e da posição, e, além disso, a corrente é atenuada à medida que se propaga pela linha.

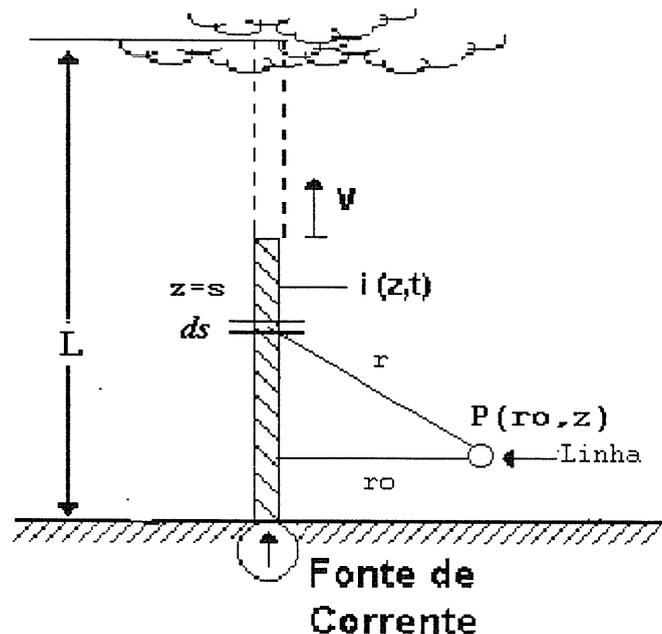


Figura 2.3- Geometria para cálculo de campo de um canal

Esse último parece ser mais coerente com o fenômeno que se quer modelar e um dos mais aprimorados já propostos é o modelo MTL (sigla em inglês para *Linha de Transmissão Modificada*) [33],[41]. A referência [41] mostra que os resultados obtidos com o modelo MTL, quando comparados com os resultados obtidos com outros mais simples, levam a resultados muito semelhantes. A Figura 2.3 apresenta a geometria do canal e as variáveis de interesse são definidas abaixo.

Parâmetros (canal na direção z):

- $z$  – coordenada do ponto de observação do campo;
- $s$  – posição do elemento  $ds$  da fonte, a qual coincide com o eixo  $z$ ;
- $P(r_0, z)$  – Ponto genérico da linha onde se deseja calcular o campo;
- $r_0$  – menor distância entre o canal e o ponto  $P$ ;
- $r$  – distância de um ponto genérico do canal ao ponto  $P$  ( $r = [(s - z)^2 + r_0^2]^{1/2}$ );
- $L$  - comprimento do canal de descarga;
- $q(s, t)$  - carga por unidade de comprimento distribuída ao longo do canal de descarga;
- $i(s, t)$  – corrente que viaja pelo canal e que se estabelece como função do processo de anulação de  $q(s, t)$ ;
- $v$  – velocidade de propagação da corrente no canal

## 2.2 A teoria de Rusck

Sune Rusck, em sua tese de doutorado, publicada em 1957, apresentou uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas. Os resultados obtidos por Rusck ficaram limitados ao estudo de casos relativamente simples, pois as soluções eram obtidas analiticamente.

As principais hipóteses feitas por Rusck para o estabelecimento de sua teoria são [20], [49]:

- *Distribuição uniforme de cargas no canal ionizado (canal que existe entre a nuvem e o solo no instante anterior à ocorrência da corrente de retorno);*
- *Consideração apenas da corrente de retorno, que corresponde à alta corrente que circula entre nuvem e terra nos instantes finais do fenômeno;*
- *Corrente de retorno em forma de degrau e viajando sem distorções ao longo do canal;*
- *Incidência da descarga segundo a direção vertical;*
- *Solo com resistividade nula;*
- *Utilização do método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético.*

### 2.2.1 O cálculo da tensão induzida em linhas aéreas

A tensão induzida em uma linha aérea pode ser calculada partir da aplicação de fontes de corrente distribuídas ao longo da linha [20]. Os valores dessas fontes dependem dos valores dos campos incidentes. Pela teoria eletromagnética, esses campos podem ser obtidos através da expressão (2.1):

$$\vec{E}_i = -\vec{\nabla} V_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2.1)$$

Portanto, o campo elétrico é obtido pela soma de dois componentes:

- $\vec{\nabla} V_i$  – *Componente originado no potencial escalar (campo elétrico conservativo);*
- $\partial \vec{A}_i / \partial t$  – *componente originado no potencial vetor magnético (campo elétrico não conservativo).*

O campo magnético é obtido a partir do potencial vetor pela equação (2.2)

$$\vec{H}_i = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A}_i \quad (2.2)$$

Adotando-se o modelo mencionado para o canal de descarga e a geometria da Figura 2.3, Rusck calcula os valores de  $V_i$  e  $\vec{A}_i$  como nas equações (2.3) e (2.4) mostradas a seguir.

$$V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q(s, t - \frac{r}{v_0})}{r} ds \quad (2.3)$$

$$\vec{A}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I(s, t - \frac{r}{v_0})}{r} ds \right) \hat{z} \quad (2.4)$$

As variáveis associadas são:

- $v_0$ : velocidade da luz no vácuo;
- $\mu_0$ : permeabilidade do espaço livre;
- $\epsilon_0$ : permissividade do espaço livre;
- $t$ : tempo, tomando-se como valor 0 o instante em que tem início a corrente de retorno;
- demais parâmetros como na Figura 2.3

Para  $z = 0$ , calculando  $\bar{\nabla}V_i$  e  $\partial\bar{A}_i/\partial t$ , considerando  $\bar{E}_v = -\bar{\nabla}V_i$  e  $\bar{E}_A = -\partial\bar{A}_i/\partial t$ , pode-se chegar às equações (2.5) e (2.6):

$$\bar{E}_v = 2Z_0I_0 \frac{v_0}{v} \left( \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 [(v_0t)^2 - r_0^2]}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + r_0^2}} \right) \hat{z} \quad (2.5)$$

$$\bar{E}_A = 2Z_0I_0 \frac{v_0}{v} \frac{1}{\sqrt{r_0^2 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 [(v_0t)^2 - r_0^2]}} \hat{z} \quad (2.6)$$

onde  $Z_0$  é a impedância intrínseca do canal de descarga

Os dois componentes do campo elétrico são perpendiculares ao solo (verticais) e, no entanto, interagem com a linha de forma diferente. O componente originado no potencial escalar (campo elétrico conservativo) provoca a circulação de corrente na linha; o componente originado no potencial vetor (campo elétrico não conservativo) não provoca a circulação de corrente em uma linha sem descontinuidades. O componente não conservativo só provocará a circulação de correntes na linha nos casos onde existem descontinuidades da linha para a terra (por exemplo, um ponto de aterramento).

A Figura 2.4 esclarece o assunto. Em (a), supõe-se que um campo elétrico conservativo incidente criou um potencial escalar em 2 diferente de 3. Nesta condição, um componente de campo na direção da linha está implícito, o qual é associado à variação desse potencial escalar, produzindo uma resposta da linha no sentido de equalizar esse potencial.

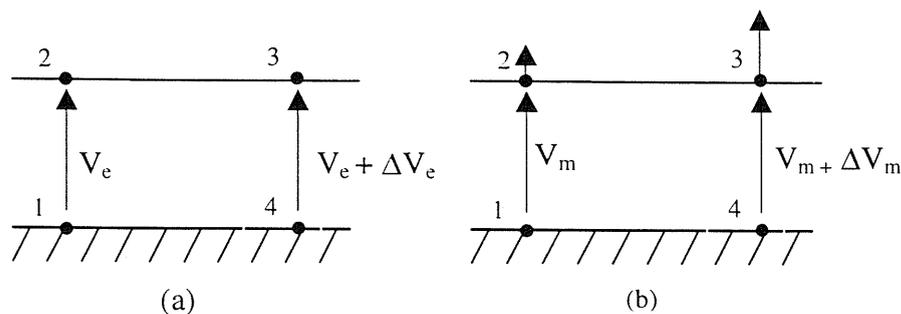


Figura 2.4 – Reação da linha frente a um campo vertical incidente

Em (b) supõe-se que um campo elétrico não conservativo incidente na linha criou um potencial em (2) diferente de (3). Uma vez que ao potencial vetor está associada uma direção, (perpendicular à linha no caso de descargas atmosféricas), e embora exista uma diferença de potencial de (2) para (3), a tensão que surge é uma tensão em circuito aberto, não implicando uma reação da linha.

A referência [26] utiliza as expressões  $\vec{E}_A$  e  $\vec{E}_V$  dadas em (2.5) e (2.6), como ponto de partida para um desenvolvimento analítico que leva à obtenção de fórmulas para a tensão induzida num ponto qualquer de uma linha unifilar infinita sem descontinuidades. Aplicando a metodologia das fontes de compensação, desenvolve um programa aplicável à configurações simples de linhas.

O campo magnético em  $z = 0$  só possui o componente  $H_o$ , já que o potencial vetor só possui o componente  $A_z$  e é dado por

$$\vec{H} = \frac{I_0}{2\pi} \left[ \frac{1}{r_0} - \frac{\left(1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right) r_0}{vtk + k^2} \right] \hat{\phi} \quad (2.7)$$

onde

$$k = \sqrt{(vt)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right) r_0^2}$$

A teoria de Rusck, como lançada em 1957, só abordava casos mais simples, onde era possível obter uma solução analítica. Com a utilização de recursos computacionais é possível sua aplicação em cálculo de tensões induzidas em redes complexas que se aproximam mais das redes reais. Para isto, uma análise da teoria de Rusck mostra que ele, na solução analítica das equações de ondas viajantes, utiliza o artifício de injetar correntes em trechos elementares da linha, cujos valores são dados pelas equações (2.8) e (2.9):

$$dI(x,t) = \frac{1}{v_0 Z} \cdot \frac{\partial V_i(x,t)}{\partial t} dx \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial V_i(x,t)}{\partial t} = 60I_0 h v v_0 \frac{t}{\left\{ (vt)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right] r_0^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.9)$$

onde:

- $dI$  - fonte elementar de corrente associada a um comprimento  $dx$  da linha;

- $I_0$  - valor de pico da corrente de retorno;
- $h$  - altura da linha, m;
- $Z$  - impedância de surto da linha;
- $v$  - velocidade da corrente de retorno da descarga atmosférica;
- $v_0$  - velocidade da luz no vácuo;
- $r_0$  - distância do ponto de incidência da descarga atmosférica a um ponto genérico da linha.

### 2.2.2 Análise crítica da teoria de Rusck

A principal vantagem da teoria de Rusck pode ser considerada como o fato dela fornecer uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida [20],[41]. A maioria dos métodos propostos por outros autores [8], [31], [32], [34] calcula a tensão induzida a partir do cálculo do campo elétrico que a descarga provoca. Conhecido o valor do campo incidente na linha, os programas fazem a interação desse campo com a linha e calculam a tensão induzida. Esses métodos exigem uma discretização muito grande da linha e grandes tempos de processamento.

Uman [27] desenvolveu uma teoria para o cálculo do campo eletromagnético e da tensão induzida em linhas, em que contestava o trabalho de Rusck no que se refere ao efeito da condutividade finita do solo. Questionava também o cálculo do campo eletromagnético por julgá-lo incorreto uma vez que, segundo ele, não obedecia à condição de Lorentz. Esse último questionamento foi levantado porque o cálculo do campo eletromagnético realizado por ele levava a resultados diferentes dos apresentados por Rusck. Uma análise feita em [20] mostra que a condição de Lorentz foi considerada no trabalho de Rusck

Chowdhuri [12] desenvolveu uma teoria similar a de Rusck e Uman, em que contesta Rusck no que se refere à fonte de corrente induzida em uma linha aérea.

A teoria de Rusck, desenvolvida em 1957, foi questionada posteriormente com base portanto nos seguintes argumentos:

- *A técnica de cálculo do campo eletromagnético estaria errada;*
- *As equações utilizadas para o cálculo da tensão induzida em linhas aéreas estaria incompleta, não levando em consideração todas as fontes de corrente induzida;*
- *Não era levada em consideração a condutividade finita do solo, a qual seria decisiva para a tensão induzida.*

Este último questionamento talvez seja o mais importante apresentado. Vários pesquisadores já tentaram modelar o efeito da resistividade do solo [44], [64], mas os resultados até agora apresentados não são muito conclusivos. Os campos eletromagnéticos criados pelas descargas atmosféricas sofrem o efeito da resistividade do solo em três momentos diferentes:

- *Na formação da descarga e, conseqüentemente, na determinação do valor de pico e forma de onda da corrente de descarga;*
- *Ao se propagar sobre um solo com resistividade finita, a mesma altera o valor, orientação e forma de onda dos campos eletromagnéticos gerados pela descarga;*
- *Os campos, ao incidirem nas linhas, criam ondas de tensão e corrente que viajam pelo sistema. Essas ondas são atenuadas e distorcidas devido às perdas nas linhas. A maior parcela das perdas das linhas é devido à resistividade finita do solo.*

Em nossa escolha pela teoria de Rusck, pesou, além da vantagem já citada anteriormente, a experiência de mais de 15 anos do grupo de pesquisa do PPGEE. Dentre alguns resultados de trabalhos desenvolvidos por este grupo, realçamos:

- *Uma profunda análise teórica da teoria de Rusck efetuada por Fonseca [20], mostrando a correção conceitual da teoria proposta;*
- *Medições anteriores em modelo reduzido, realizadas por Paulino [40], já indicavam a validade da teoria de Rusck para a tensão induzida em linhas aéreas sobre um solo de resistividade nula;*
- *Medições em modelo reduzido realizadas por Boaventura [9], sobre um solo de alta resistividade, indicaram que o efeito da mesma seria pouco significativo para a tensão induzida em linhas aéreas quando o ponto de incidência da descarga é próximo da linha.*

Uma ampla discussão dos pontos polêmicos e detalhes da teoria de Rusck, bem como de resultados produzidos por ela e comparados com outros autores, pode ser vista nas referências [20], [41].

### **2.3 Cálculo de tensões induzidas em cabos telefônicos**

Um cabo telefônico possui uma estrutura complexa, constituindo-se de vários condutores isolados entre si, envolvidos por uma blindagem metálica, feita normalmente de alumínio ou de liga de chumbo com antimônio. Os condutores internos não possuem uma posição fixa ao longo do cabo e são dispostos de forma tal a minimizar o acoplamento eletromagnético entre eles. Se, ao calcular a tensão induzida entre um condutor interno e a blindagem, o acoplamento entre ele e os demais condutores for considerado, esse cálculo torna-se complexo. Com a finalidade de simplificar o processo de cálculo, o circuito formado por cada condutor interno e a blindagem é modelado como um cabo coaxial. Essa simplificação é encontrada também em outros trabalhos [17], [63].

O cálculo da tensão induzida será baseado no conceito de impedância de transferência e feito em duas etapas. Na primeira, o circuito formado pela blindagem terra é modelado como uma linha de transmissão unifilar, na qual uma descarga atmosférica induz tensões e correntes como descrito em 2.2.1. A partir do conhecimento da impedância de transferência e da distribuição de corrente na blindagem do cabo, podemos calcular a tensão induzida entre o condutor interno e a blindagem.

Pelo fato da blindagem possuir uma condutividade finita, a circulação de uma corrente elétrica por ela provoca o aparecimento de uma tensão longitudinal. Essa tensão faz com que um campo elétrico apareça no interior do cabo, o qual, por sua vez, ao interagir com o condutor interno, dá origem a uma tensão induzida entre ele e a blindagem. Em blindagens que contêm aberturas, a tensão é induzida não apenas pelo campo elétrico longitudinal, mas também pelo campo eletromagnético que penetra através dessas aberturas. Com o objetivo de facilitar o cálculo do campo elétrico longitudinal e do acoplamento eletromagnético através das aberturas da blindagem, dois parâmetros são usualmente definidos [63]: a impedância de transferência e a admitância de transferência. Esses parâmetros são usados também para medir a efetividade da blindagem.

### 2.3.1 Impedância e admitância de transferência

Um cabo coaxial orientado segundo a direção  $x$  é mostrado na Figura 2.5, para a qual as seguintes grandezas podem ser definidas:

- $I_0$  - corrente total fluindo no cabo;
- $I$  - corrente que circula no condutor interno;
- $I_b$  - corrente que circula pela blindagem;
- $dV/dx$  - tensão por unidade de comprimento gerada por  $I_0$  ao longo da linha de transmissão formada pelo condutor interno e pela blindagem.

Campos externos penetram em blindagens não ideais via difusão da corrente que é induzida pelo campo externo na superfície externa da blindagem [39]. Essa corrente  $I_b$  difunde-se pela parede da blindagem e origina uma queda de tensão na superfície interior da blindagem dada por

$$dV = Z_T I_0(x) dx \quad (2.10)$$

que pode ser vista como uma fonte de tensão distribuída em série com a linha.

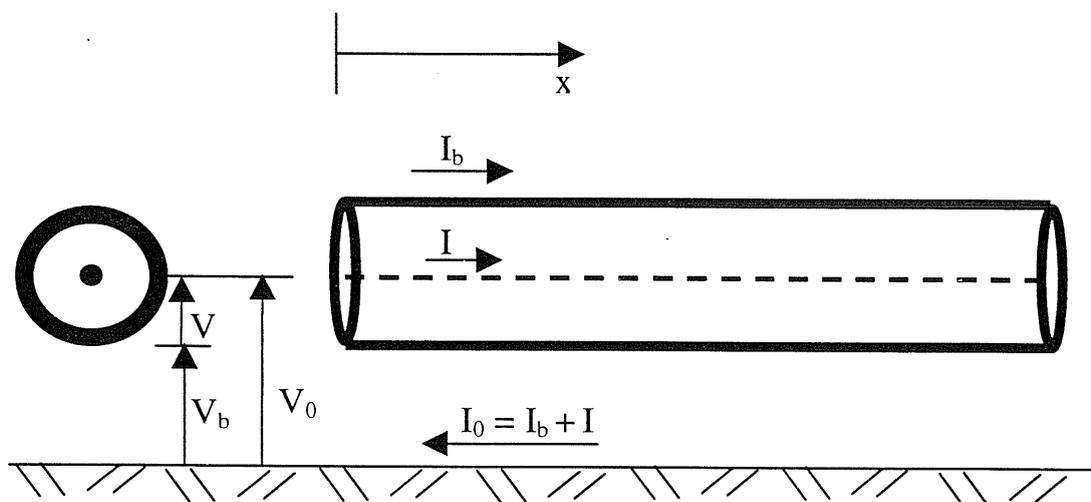


Figura 2.5 - Tensões e correntes em um cabo blindado

Se a blindagem contiver aberturas, haverá também uma fonte de corrente distribuída em derivação dada por

$$dI = -Y_T V_0(x) dx \quad (2.11)$$

Nas equações (2.10) e (2.11),  $Z_T$  e  $Y_T$  são respectivamente a impedância e a admitância de transferência, parâmetros definidos de forma a incorporar as propriedades da blindagem e da estrutura externa.

A impedância de transferência é definida, de uma maneira mais geral, através da seguinte expressão [63]:

$$Z_T = \frac{1}{I_o} \cdot \left. \frac{dV}{dx} \right|_{I=0} \quad (\Omega/m) \quad (2.12)$$

Desta forma, a impedância de transferência fornece a tensão de circuito aberto, a qual aparece entre o condutor interno e a blindagem, para 1 Ampere de corrente circulando na blindagem em um cabo de comprimento unitário e bem menor que o comprimento de onda considerado. Como a impedância de transferência depende do campo elétrico longitudinal na superfície da blindagem, cujo valor depende da profundidade de penetração da corrente que circula pela blindagem, que, por sua vez, varia com a frequência, a impedância de transferência também irá variar com a frequência.

A admitância de transferência é definida através da seguinte expressão:

$$Y_T = -\frac{1}{V_o} \cdot \left. \frac{dI}{dx} \right|_{V=0} \quad (S/m) \quad (2.13)$$

onde  $V_o$  é a tensão entre o condutor interno e a estrutura de retorno, e  $dI/dx$  é a corrente por unidade de comprimento fluindo do condutor interno para a estrutura de retorno. A admitância de transferência dá a corrente de curto-circuito induzida no condutor interno pela aplicação de uma tensão de 1 Volt entre a blindagem e a estrutura de retorno em um cabo de 1 metro de comprimento. O valor da admitância de transferência está relacionado apenas com o acoplamento capacitivo entre o condutor interno e a estrutura externa, que serve como caminho de retorno da corrente que circula na blindagem. Seu valor também varia com a frequência.

O condutor interno de um cabo telefônico pode ser aproximado por um cabo coaxial de blindagem tubular. Assim, não há nenhum acoplamento eletromagnético entre o condutor interno e a blindagem. Conseqüentemente, a impedância de transferência possui apenas o termo relacionado com o campo elétrico longitudinal e a admitância de transferência pode ser considerada desprezível [63].

Para cabos coaxiais com blindagens tubulares, a equação (2.12) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Z_T = \frac{E_l}{I_b} \quad (\Omega/m) \quad (2.14)$$

onde  $E_l$  é o campo elétrico longitudinal e  $I_b$  é a corrente que circula na blindagem do cabo.

A admitância de transferência, mesmo em cabos que possuem aberturas na blindagem, tem sido desprezada no cálculo da tensão induzida entre o condutor interno e a blindagem, levando a valores muito próximos dos valores medidos [17], [63].

### 2.3.2 Cálculo aproximado da impedância de transferência

O valor da impedância de transferência de um cabo coaxial com blindagem tubular, cuja espessura é pequena se comparada com seu diâmetro, foi deduzida por Schelkunoff [63] e é dada pela equação:

$$Z_T = \frac{i}{2\pi a \sigma T} \cdot \frac{\frac{(1+j)T}{\delta}}{\sinh\left(\frac{(1+j)T}{\delta}\right)} \quad (\Omega/m) \quad (2.15)$$

onde  $a$  é o raio interno da blindagem e  $T$  é a sua espessura (Figura 2.6),  $\sigma$  é a condutividade do material da blindagem,  $\mu$  é a permeabilidade magnética e  $\delta$  é a profundidade de penetração dada por

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.16)$$

onde  $f$  é a frequência.

A equação (2.15), além de assumir que a espessura  $T$  da parede da blindagem é fina em relação ao raio interno do cabo, assume também ser o raio interno muito pequeno, se comparado ao menor comprimento de onda da corrente que circula na blindagem, e que a blindagem é feita de material bom condutor, de maneira que a corrente de deslocamento possa ser desprezada.

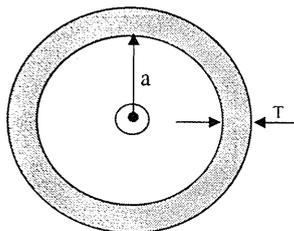
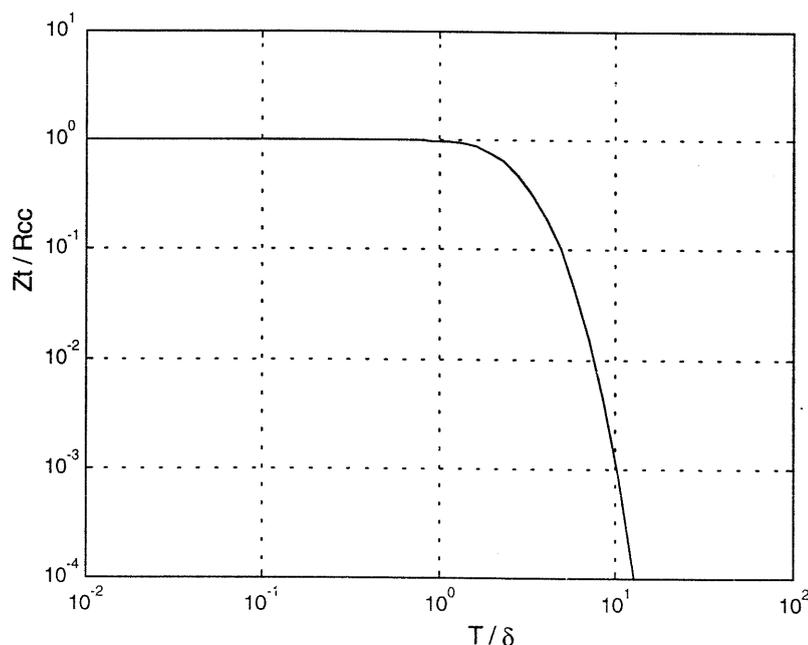


Figura 2.6 – Parâmetros geométricos da blindagem do cabo



**Figura 2.7 – Impedância de transferência normalizada para cabos com blindagem tubular**

Em baixas freqüências, isto é, em freqüências onde  $\delta \gg T$ , o valor da impedância de transferência pode ser aproximada por

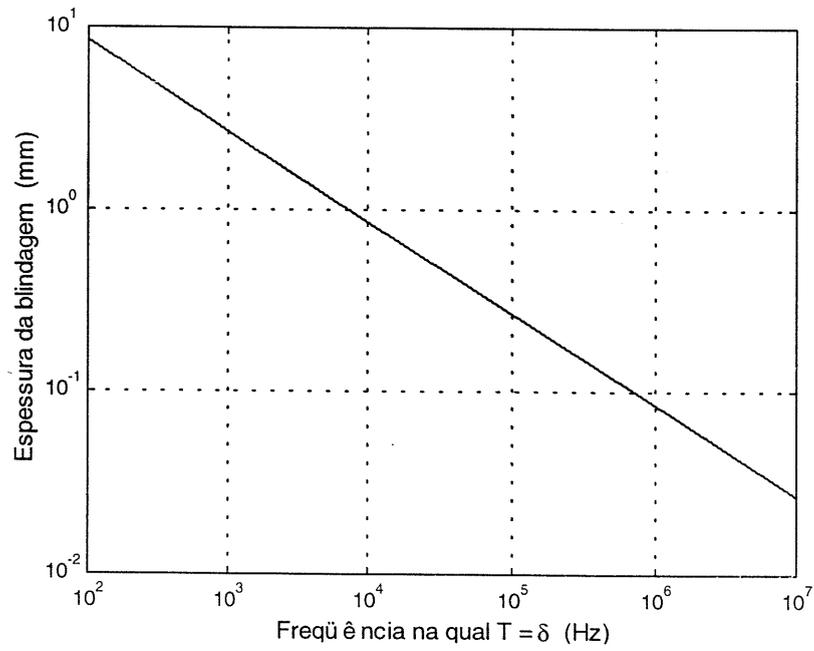
$$Z_T = \frac{1}{2\pi a \sigma T} = R_{cc} \quad (\Omega/m) \quad (2.17)$$

onde  $R_{cc}$  é a resistência em corrente contínua da blindagem por unidade de comprimento.

A análise da Figura 2.7, em que se mostra a variação do valor absoluto de  $Z_T / R_{cc}$  em função de  $T / \delta$ , permite ver, que para fins práticos, esse critério pode ser relaxado. De fato, valores de  $T / \delta$  próximos da unidade já permitem uma boa aproximação de  $Z_T$  pela resistência em corrente contínua da blindagem.

Um cabo telefônico normalmente utilizado em linhas aéreas é do tipo CTP-APL, possuindo uma capa de polietileno que fornece proteção mecânica e isolamento elétrico aos condutores. A blindagem dos pares telefônicos é constituída por uma fita de alumínio politenada em ambas as faces, com uma espessura da ordem de 2 a 3 décimos de milímetro. Para essa faixa de valores, a freqüência na qual  $T = \delta$  é aproximadamente 200 kHz, como pode ser visto na Figura 2.8

Para os casos em que a variação da impedância de transferência com a freqüência não puder ser desprezada, é necessário obter o seu valor no domínio do tempo e fazer a convolução de  $Z_T(t)$  com  $I_b(x, t)$  para se obter o campo elétrico longitudinal no domínio do tempo.



**Figura 2.8 – Frequência na qual a espessura  $T$  da blindagem de alumínio é uma profundidade de penetração**

## Capítulo 3

# Implementação do Cálculo de Tensão Induzida na Plataforma SPICE

O escopo deste trabalho é o cálculo de tensões induzidas originadas por descargas atmosféricas para aplicação, em uma etapa seguinte, em estudos de proteção de equipamentos, estruturas e estudos de compatibilidade eletromagnética. Campos eletromagnéticos, como aqueles gerados por uma descarga, são, na realidade, continuamente distribuídos pelo espaço. Se uma estrutura é eletricamente pequena, isto é, muito menor que um comprimento de onda característico do campo, podemos estudar os efeitos deste, de forma aproximada, pela utilização adequada de elementos de circuito, como fontes de corrente ou tensão e impedâncias concentradas. Variáveis alternativas de interesse, como tensão ou corrente, podem então ser definidas em substituição às variáveis campo elétrico e campo magnético. Linhas de transmissão são normalmente modeladas em termos de parâmetros distribuídos ao longo de seu eixo. Portanto, é possível estender a técnica de análise de circuitos para estruturas que sejam eletricamente grandes nessa direção. Devemos também ter uma seção transversal de linha com pequenas dimensões elétricas, isto é, pequenas separações entre condutores, de forma a validar os resultados. Uma suposição fundamental na formulação de linhas de transmissão é que a estrutura de campo que envolve os condutores seja do tipo TEM (modo transversal eletromagnético) [24], [37], [38].

Tendo em mente as considerações acima, podemos escolher um programa simulador de circuitos do tipo SPICE ou EMTP. Neste trabalho, é adotada a plataforma SPICE. Em recente trabalho desenvolvido no PPGEE, é utilizada a plataforma EMTP. É importante ressaltar que ambos os programas poderão ser utilizados de forma complementar em algumas aplicações.

O SPICE foi criado nos anos 70 como simulador de circuitos elétricos e eletrônicos, com ênfase especial em aplicações na área eletrônica [43]. Com o passar do tempo e o lançamento de diversas versões, incorporou técnicas e componentes típicos de sistemas de potência (linhas de transmissão, por exemplo). No âmbito do PPGEE/UFMG, pesquisas na área de eletrônica de potência e acionamentos utilizam quase que exclusivamente o SPICE no

---

estudo e projeto de inversores e retificadores, com circuitos envolvendo centenas de componentes (componentes eletrônicos, circuitos integrados, transformadores, etc). Como pode ser visto em [47], o SPICE tornou-se um padrão altamente difundido, tanto no meio acadêmico, como no meio industrial.

O SPICE oferece uma grande gama de componentes embutidos (resistores, capacitores, indutores, componentes eletrônicos, circuitos integrados, linhas de transmissão, transformadores, fontes diversas, etc), que constituem as chamadas bibliotecas e que espelham as características dos respectivos itens disponíveis comercialmente. Além do mais, oferece a possibilidade de modelagem de novos componentes pelo próprio usuário, o que engrandece sobremaneira o seu campo de aplicação, como mostram alguns exemplos apresentados no item 3.3.

Os seguintes tipos de análise são permitidos pelo SPICE:

- *Análise CC;*
- *Análise CA;*
- *Análise transitória;*
- *Análise em freqüência;*
- *Análise de Fourier;*
- *Análise de Monte Carlo;*
- *Análise de sensibilidade;*
- *Cálculo de funções de transferência.*

Em nosso trabalho utilizaremos basicamente a análise transitória.

### 3.1 A utilização do SPICE

Usuários tradicionais do SPICE, como aqueles envolvidos em projetos de circuitos de eletrônica de potência, filtros, placas de circuitos integrados, etc, trabalham apenas em um ambiente integrado, onde diversas interfaces gráficas (janelas) são disponibilizadas, permitindo a execução de tarefas que vão desde o desenho do circuito a ser simulado até as mais diversas análises disponíveis, incluindo facilidades para ampla exploração gráfica dos resultados obtidos.

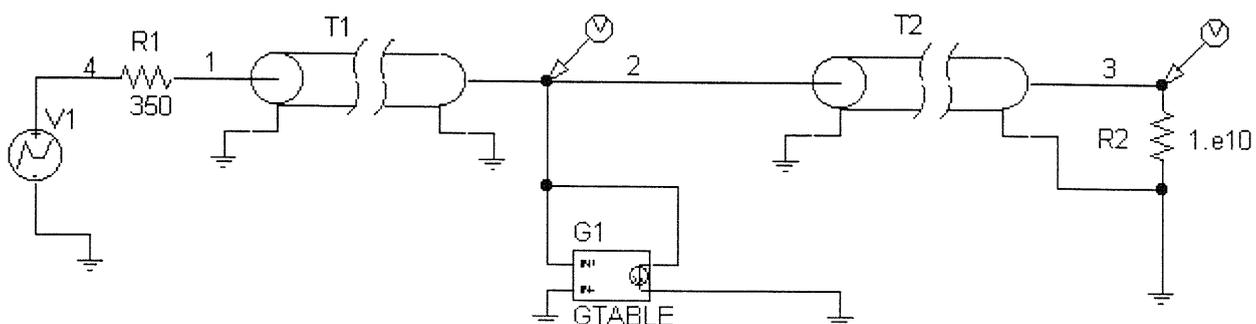


Figura 3.1– Exemplo de circuito simples criado pelo SPICE

A Figura 3.1 mostra um circuito simples, constituído por uma fonte de tensão linear por partes, resistores, linhas de transmissão e uma fonte de corrente controlada por tensão (G1), com entrada em forma de tabela, que procura reproduzir um dispositivo pára-raios. No diagrama são mostrados 2 pontos arbitrários escolhidos pelo usuário para observação da tensão.

Ao se fazer as simulações desejadas para o circuito esquemático mostrado, o SPICE cria arquivos que traduzem as operações realizadas via ambiente integrado, mas cujo acesso é ignorado pelo usuário tradicional. Exemplo de um arquivo (referente à Figura 3.1) é mostrado abaixo:

```
****      CIRCUIT DESCRIPTION
* Schematics Version 8.0 - July 1997
* Mon Nov 12 11:57:35 2001
** Analysis setup **
.tran 40e-2u 40u
.OP
* From [SCHEMATICS NETLIST] section of msim.ini:
.lib "C:\usuarios\tarcisio\trabalho\simulaps\Bibliotecas\tasolib.lib"
.lib 'nom.lib'
.INC "teste.net"
**** INCLUDING teste.net ****
* Schematics Netlist *
R_R1      4 1 350
R_R2      0 3 1.e10
T_T2      2 0 3 0 Z0=75 TD=.56u
T_T1      1 0 2 0 Z0=350 TD=.83u
V_V1      4 0 DC 0 AC 0 PWL 0 0 3u 3k 50u 1.5k
G_G1      2 0 TABLE { V(2, 0) } ( (-0,0) (2.3kv,0.1) (2.31k,1000) )
.probe
.END
```

Em nosso caso, antes de efetuar uma análise com o SPICE, faz-se necessário primeiro gerar o conjunto de instruções, representativo do modelo adotado, constituindo um subcircuito, que é a estrutura semelhante a uma sub-rotina em linguagem tipo C ou Fortran. Esse subcircuito, na forma de um arquivo ASCII, possui, para cada componente utilizado, uma linha de comando de acordo com a sintaxe própria do SPICE, a exemplo do que se pode ver no trecho de circuito acima mostrado. Observa-se, então, que, para uma linha de transmissão com vários condutores, subdividida em vários segmentos elementares (de forma a permitir a alocação das fontes de corrente como será descrito no item 3.4), pode-se chegar a um arquivo de várias centenas de linhas. Isso certamente constituiria uma tarefa penosa, demandando tempo excessivo na sua execução, sendo uma provável fonte de erros, aqui evitada pela utilização do MATLAB.

O MATLAB é neste trabalho utilizado com as seguintes funções:

- Geração automática do texto do subcircuito, já que, no SPICE, estruturas de repetição e condicionais têm aplicações bastante limitadas;
- Cálculo dos parâmetros da linha a serem incorporados no subcircuito SPICE;
- Cálculos de matrizes de transformação modais, no caso da utilização de modelo de linhas multifilares diferente daquele embutido no SPICE;
- Quaisquer outros cálculos acessórios que se façam necessários.

Em nosso trabalho, esse programa MATLAB recebeu o nome de TINDLT e pode ser visto no anexo A. De forma a padronizar e facilitar a entrada de dados, adotamos um arquivo neutro, de nome TINDLT.AND, que define a geometria da linha, dos condutores e do meio. A partir dessa geometria, calcula-se as matrizes de capacitância e indutância que permitem o acoplamento dos condutores. Esses cálculos exigem técnicas numéricas específicas (inversão de matrizes, por exemplo), não contempladas pelo SPICE. Dados relativos ao condutor e blindagem de cabos telefônicos também são passados ao programa por esse arquivo. Um exemplo para esse arquivo neutro, relativo à linha descrita no item 4.6 é apresentado a seguir.

## ARQUIVO COM DADOS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA TINDLT.M

```
*TITULO
Calculo.de.Tensao.Induzida

*DESCRICAO.DO.CASO
Arquivo.de.entrada.para.as.diversas.descargas.do.artigo.do.Baker

*UNIDADES.UTILIZADAS
Todas.unidades.utilizadas.no.sistema.SI

*ARQUIVO.DE.DADOS.DE.ENTRADA
tindlt

*AUTOR
Tarcisio

*DATA
09/07/2001

*COMPRIMENTO.DA.LINHA
682.0

*NUMERO.DE.CONDUTORES.DA.LT
2

*COORDENADAS.YZR
1  0.  7.5  6e-3
2  0.  5.68  6e-3

*NUMERO.DE.SEGMENTOS.POR.CONDUTOR
14

*NUMERO.DE.RESISTORES.INTERMEDIARIOS.DE.ATERRAMENTO
1

*CONDUTOR/COORDENADA.X/VALOR.DO.RESISTOR
2 292.3 50.

*NUMERO.DE.RESISTORES.CONECTADOS.ENTRE.CONDUTORES
2

*CONDUTOR#1/CONDUTOR#2/COORDENADA.X/VALOR.DO.RESISTOR
1 2 0 455
1 2 682 455
```

Outros dispositivos desejados, como pára-raios e protetores de surto, também são passados via arquivo neutro de dados. Para se determinar a tensão induzida, toda a seqüência de cálculos necessários é sintetizada, através da execução de TINDLT, em um subcircuito SPICE, ao qual associamos um símbolo gráfico (TI1C, TI2C, ... TInC, componente para cálculo de tensão induzida em linha constituída por 1, 2, ... n condutores), mostrado na Figura 3.2 para o caso de uma linha bifásica, que passa a fazer parte de uma biblioteca de símbolos do SPICE.

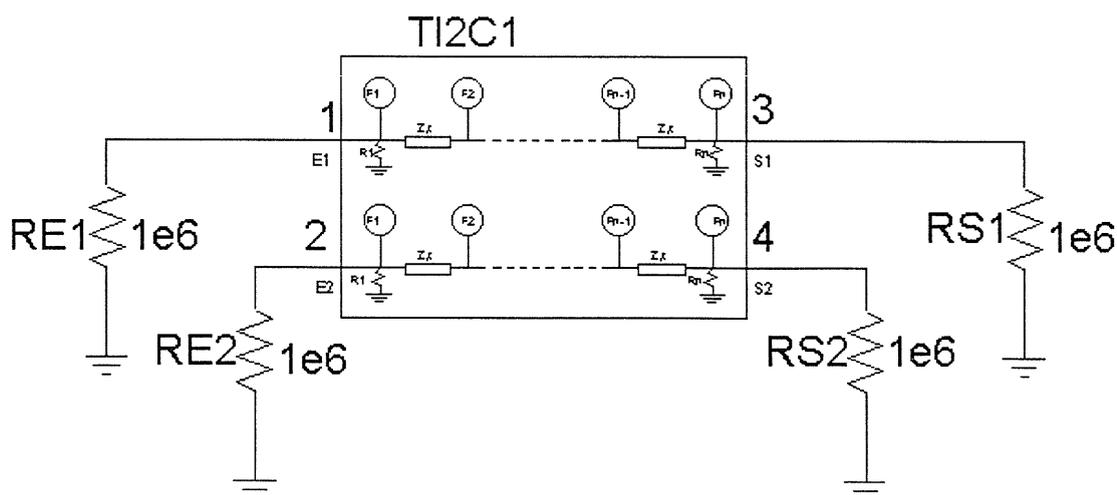


Figura 3.2 – Componente criado no SPICE para cálculo de tensão induzida

A partir dessa biblioteca, de nome TASOLIB (ver anexo A), o símbolo pode ser chamado ao se construir um circuito qualquer. O componente possui terminais de entrada E1 e E2 e terminais de saída S1 e S2, que possibilitam sua conexão com quaisquer outros componentes do SPICE dentro do ambiente gráfico integrado.

Ao se acionar o componente, é aberta uma janela para a modificação dos atributos pertinentes a uma determinada configuração (no caso, valores de pico e de cauda da corrente de retorno, tempos de frente e de cauda da corrente de retorno, velocidade da corrente de retorno, distância do canal à linha, coordenadas x e y do canal e resistores de aterramento das extremidades), como mostra a Figura 3.3. A descrição das variáveis mostradas na janela pode ser vista no anexo A2.

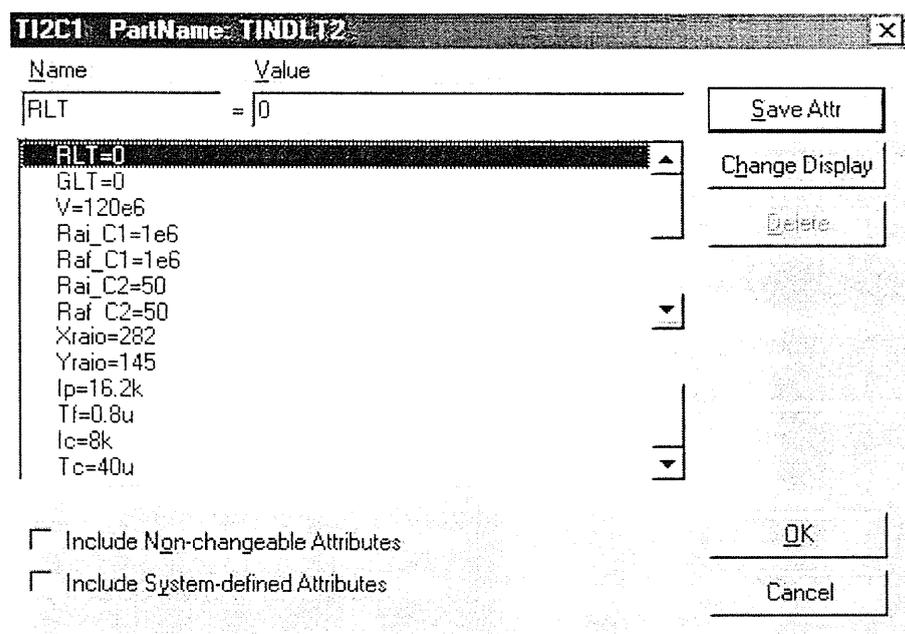


Figura 3.3 – Janela para modificação dos atributos do componente calculador de tensão induzida.

### 3.2 Características de alguns modelos utilizados pelo SPICE

Problemas de interação do tipo campo eletromagnético/linha de transmissão (a exemplo do problema tratado na teoria de Rusck) são complexos, podendo ser abordados pela teoria de antenas, o que pode trazer um grau de complexidade ainda maior. As variáveis de interesse no caso são aquelas de campo  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{B}$ . Em nosso trabalho, o objetivo é fazer uma abordagem utilizando a teoria de circuitos, na qual as principais variáveis de interesse são tensão e corrente e os principais componentes são aqueles usuais em circuitos, mais a linha de transmissão, que é um dos elementos mais difíceis de serem modelados.

O modelo de linha monofásica sem perdas adotado no SPICE é independente das terminações (modelo de 4 portas). Para linhas com vários condutores, a abordagem utilizada envolve o cálculo dos modos de propagação do sistema pela extração dos autovalores e autovetores do produto matricial  $[L][C]$ , onde  $[L]$  e  $[C]$  são as matrizes de indutâncias e capacitâncias mútuas por unidade de comprimento [43]. Na realidade, por ocasião do início desta tese, a versão do SPICE por nós utilizada era a de uso livre ou de avaliação, que impunha diversas limitações para linhas com vários condutores. Portanto, tornou-se imperativo implementar um programa próprio, baseado em [38], que utiliza o modelo de linha monofásica e a técnica usual de transformações modais. Mesmo após passarmos a utilizar a versão completa, permaneceram algumas dúvidas quanto à realização do modelo de linha multifilar, já que o manual SPICE é muito resumido a esse respeito e as referências nele citadas [48], [60], não puderam ser obtidas, a não ser após um tempo significativo, quando a CAPES disponibilizou a consulta a uma base de periódicos.

As transformações modais podem ser inseridas no SPICE com o emprego de fontes dependentes de tensão e corrente, como discutido em 3.2.1. O exemplo nesse item apresentado deixa claro que as diferenças são aceitáveis, o que nos convenceu da propriedade do modelo SPICE para linhas multifilares, que foi por isso adotado em todas as simulações. Como veremos mais à frente, nosso método para cálculo de tensão induzida impõe a divisão de uma linha em vários trechos, entre os quais inserimos fontes de corrente ou quaisquer outros dispositivos disponíveis no SPICE, tornando altamente vantajoso o modelo acima, por permitir explorar toda sua versatilidade.

#### 3.2.1 Linha multifilar sem perdas com fontes dependentes de tensão e corrente

Para linhas de transmissão polifásicas, as grandezas acopladas de fase (ou reais) são transformadas em grandezas desacopladas modais e cada modo é resolvido com as mesmas equações desenvolvidas para linhas monofásicas [30]. As equações no domínio do tempo que definem as transformações são:

$$\begin{bmatrix} V_1(x,t) \\ V_2(x,t) \\ \vdots \\ V_n(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{V11} & T_{V12} & \cdots & T_{V1n} \\ T_{V21} & T_{V22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ T_{Vn1} & \cdots & \cdots & T_{Vnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1}(x,t) \\ V_{m2}(x,t) \\ \vdots \\ V_{mn}(x,t) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} I_1(x,t) \\ I_2(x,t) \\ \vdots \\ I_n(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{I11} & T_{I12} & \cdots & T_{I1n} \\ T_{I21} & T_{I22} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ T_{In1} & \cdots & \cdots & T_{Inn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{m1}(x,t) \\ I_{m2}(x,t) \\ \vdots \\ I_{mn}(x,t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde

- $V_n(x,t)$ ,  $I_n(x,t)$  - tensões e correntes reais do  $n$ -ésimo condutor da linha em função da posição e do tempo;
- $T_V$ ,  $T_I$  - matrizes de transformações modais para tensões e correntes, com as respectivas entradas chamadas de  $T_{vij}$  e  $T_{lij}$ ;
- $V_{mn}$ ,  $I_{mn}$  - tensões e correntes modais do  $n$ -ésimo condutor.

As matrizes  $T_V$  e  $T_I$ , bem como suas inversas, podem ser calculadas pela função DIAGONAL (ver anexo A), programada em MATLAB a partir do método descrito em [38].

As transformações dadas em (3.1) e (3.2) podem ser implementadas no SPICE através de fontes dependentes ou controladas, conforme ilustra a Figura 3.4. Uma vez feito isso, podemos anexar os demais componentes do SPICE nos terminais do circuito mostrado.

Seguindo a nomenclatura habitual em circuitos, uma fonte do tipo  $E$  é uma fonte de tensão controlada por tensão, ao passo que uma fonte do tipo  $F$  é uma fonte de corrente controlada por corrente.  $E_i$  é dada por uma expressão polinomial, originada da  $i$ -ésima linha do produto  $[T_V][V_m]$  [38]. De forma similar,  $F_i$  é dada por uma expressão polinomial, originada da  $i$ -ésima linha do produto  $[T_I]^{-1}[I]$ . Pela sintaxe do SPICE, a corrente controladora de uma fonte  $F$  deve ser amostrada através de uma fonte independente de tensão, razão da inserção da fonte de 0 V sempre que uma fonte  $F$  for especificada.

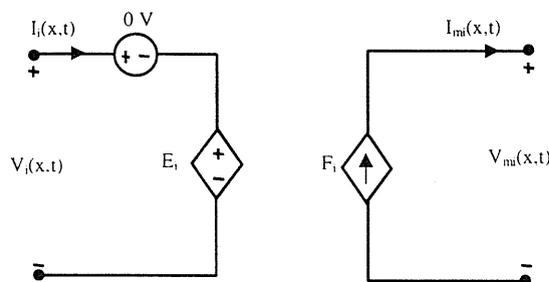


Figura 3.4 – Implementação de transformações modais utilizando fontes dependentes

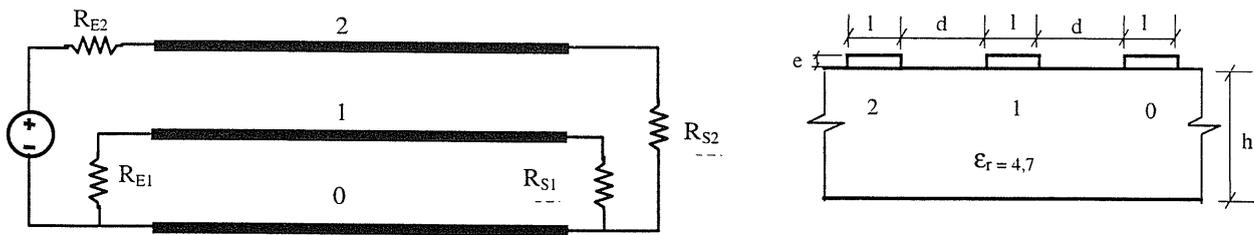


Figura 3.5 – Configuração de uma linha formada por 3 trilhas de uma placa de circuito impresso com a trilha 0 tomada como referência [38]

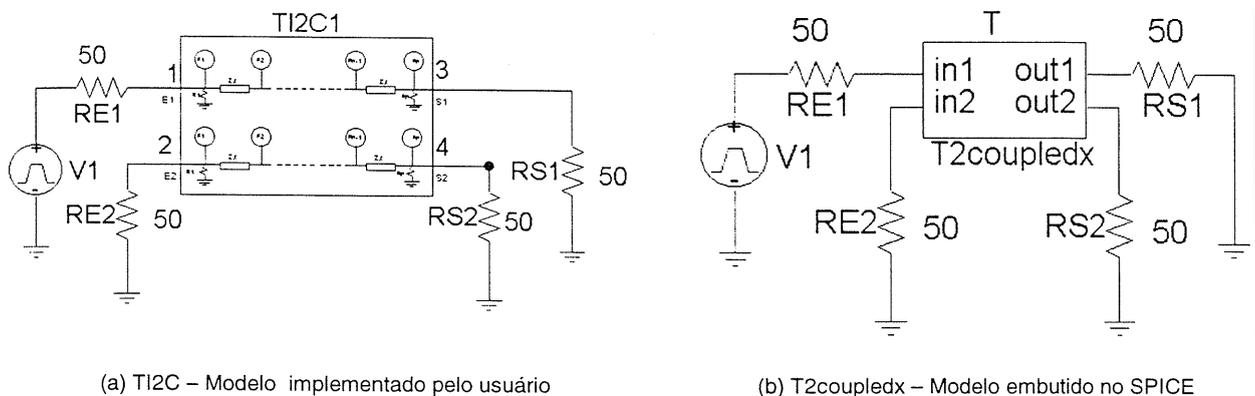
Para exemplificar, calcularemos a tensão interferente em uma trilha de placa de circuito impresso, para uma configuração de linha mostrada na Figura 3.5. O problema, resolvido em [38] através do modelo exposto neste item, é aqui também resolvido com o modelo de linha multifilar do SPICE. Isso ilustra também o potencial de aplicação do SPICE em uma área importante da CEM, ou seja, o cálculo de interferências em condutores vítimas.

A estrutura possui 0,254 m de comprimento, altura  $h$  da placa 1,194 mm, espessura  $e$  da trilha 0,0351mm, largura  $l$  da trilha 0,0381 mm e distância  $d$  entre trilhas 1,143 mm. As matrizes  $L$  e  $C$  associadas com a linha são dadas por

$$C = \begin{bmatrix} 40,628 & -20,314 \\ -20,314 & 29,763 \end{bmatrix} \text{ pF/m} \quad L = \begin{bmatrix} 1,104 & 0,690 \\ 0,690 & 1,380 \end{bmatrix} \text{ } \mu\text{H/m}$$

Um pulso trapezoidal com duração total de 56,25 ns, com início em  $t = 0$ , tempo de subida de 6,25 ns, tempo de patamar de 43,75 ns, tempo de queda 6,25 ns e amplitude de 1 V é aplicado pela fonte  $V_F$ . Foram realizadas 2 simulações distintas: a primeira, elaborada a partir do modelo de linha monofásica do SPICE e das transformações descritas e a segunda, utilizando um modelo próprio do SPICE, como pode ser visto na Figura 3.6

O modelo próprio apresentado para simulação da linha é construído a partir do circuito equivalente da Figura 3.7.



(a) TI2C – Modelo implementado pelo usuário

(b) T2coupledx – Modelo embutido no SPICE

Figura 3.6 – Modelos diferentes de linhas com vários condutores

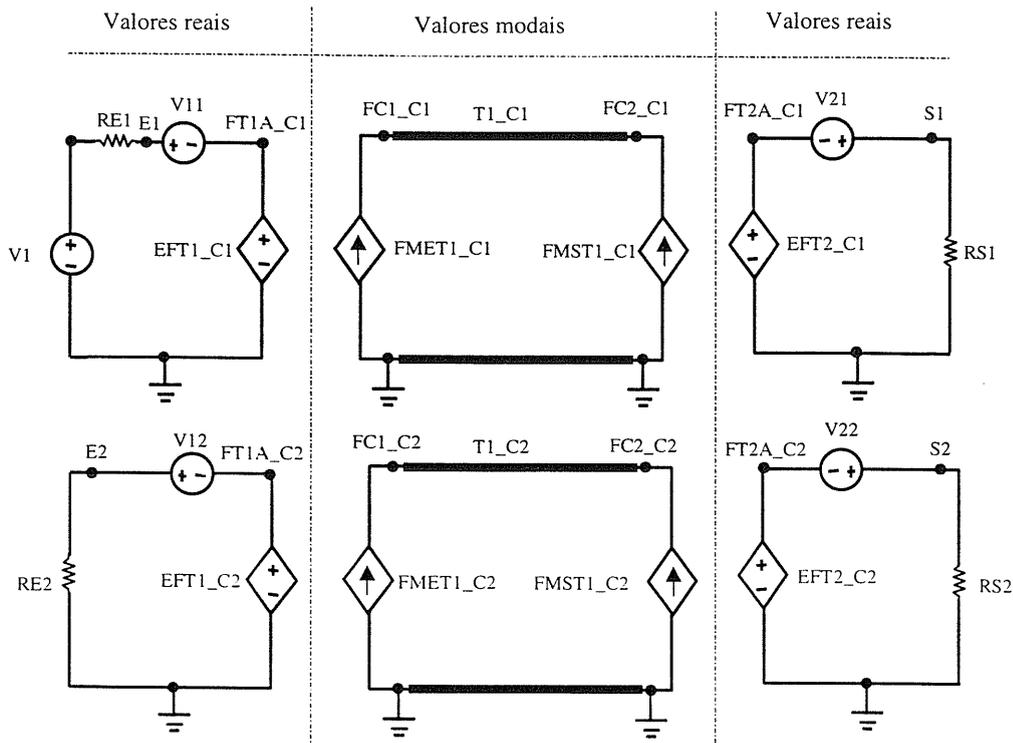


Figura 3.7 – Circuito equivalente para a linha da Figura 3.5

O subcircuito SPICE, associado com a Figura 3.7, é mostrado abaixo e é gerado pelo programa TINDLTMODAL, uma versão de TINDLT, sendo sua execução feita pelo uso do componente TI2C. Como não foi criado um componente específico para o cálculo da tensão interferente, ao abrirmos a janela para especificação dos atributos de TI2C, devemos anular as fontes associadas com a descarga atmosférica (item 3.4).

```

subckt TINDLT2 E1 S1 E2 S2
*
*Parâmetros auxiliares (L e C Modais)
*
.param l1      = {0.254000}          ; Comprimento da LT
.param ncond   = {2}                ; Número de condutores da LT
.param nseg    = {1}                ; Número de segmentos da LT
.param L1      = {6.073043e-007}
.param L2      = {1.380205e-006}
.param C1      = {5.078521e-011}
.param C2      = {1.960599e-011}
.param zcm1    = {109.353967}
.param zcm2    = {265.324521}
.param dx      = {l1/nseg}
*
* CONDUTOR #1 - Fontes de tensão dependentes para fases
*
EFT1_C1 FT1A_C1 0 POLY(2) FC1_C1 0 FC1_C2 0 0 1.118030 0.500002
EFT2_C1 FT2A_C1 0 POLY(2) FC2_C1 0 FC2_C2 0 0 1.118030 0.500002
*
* CONDUTOR #1 - Fontes de correntes dependentes modais (Entrada do segmento)
*
FMET1_C1 0 FC1_C1 POLY(2) V11 V12 0 1.118030 -0.000012
*
* CONDUTOR #1 - Fontes de correntes dependentes modais (Saida do segmento)
*
FMST1_C1 0 FC2_C1 POLY(2) V21 V22 0 1.118030 -0.000012
*
* CONDUTOR #1 - Fontes de tensão p/ amostragem de corrente)
*
V11 AV11 FT1A_C1 0
V21 BV21 FT2A_C1 0
*
    
```

```

* CONDUTOR #1 - Disposição dos segmentos de LT
*
T1_C1  FC1_C1  0 FC2_C1  0  LEN={dx}  R={RLT}  L={L1}  G={GLT}  C={C1}
*
* CONDUTOR #2 - Fontes de tensão dependentes para fases
*
EFT1_C2 FT1A_C2 0 POLY(2) FC1_C1 0  FC1_C2 0  0 -0.000012  0.999995
EFT2_C2 FT2A_C2 0 POLY(2) FC2_C1 0  FC2_C2 0  0 -0.000012  0.999995
*
* CONDUTOR #2 - Fontes de correntes dependentes modais (Entrada do segmento)
*
FMET1_C2 0 FC1_C2 POLY(2) V11  V12  0 0.500002  0.999995
*
* CONDUTOR #2 - Fontes de correntes dependentes modais (Saida do segmento)
*
FMST1_C2 0  FC2_C2 POLY(2) V21  V22  0 0.500002  0.999995
*
* CONDUTOR #2 - Fontes de tensão p/ amostragem de corrente)
*
V12 AV12 FT1A_C2 0
V22 BV22 FT2A_C2 0
*
* CONDUTOR #2 - Disposição dos segmentos de LT
*
T1_C2  FC1_C2  0 FC2_C2  0  LEN={dx}  R={RLT}  L={L2}  G={GLT}  C={C2}
*
.ends

```

A Figura 3.8 ilustra os resultados obtidos para os 2 casos. As tensões são obtidas no resistor RE2 da trilha 2 e não apresentam discrepâncias relevantes.

### 3.2.2 Linhas com perdas

Para o caso de linhas com perdas, o produto matricial a ser desacoplado é, na realidade,  $[R + sL][G + sC]$ , onde  $R$  e  $G$  são as matrizes de resistência da linha e condutância do meio por unidade de comprimento, e  $s$  é a variável de Laplace. Os modos obtidos de  $[L][C]$  representam uma assíntota em alta frequência para este sistema. Na análise transitória, é utilizado o método de convolução da resposta ao impulso, tornando o tempo de simulação bem superior ao de uma linha ideal. Resultados de simulação [43] mostram que isso é uma boa aproximação para linhas com baixas perdas.

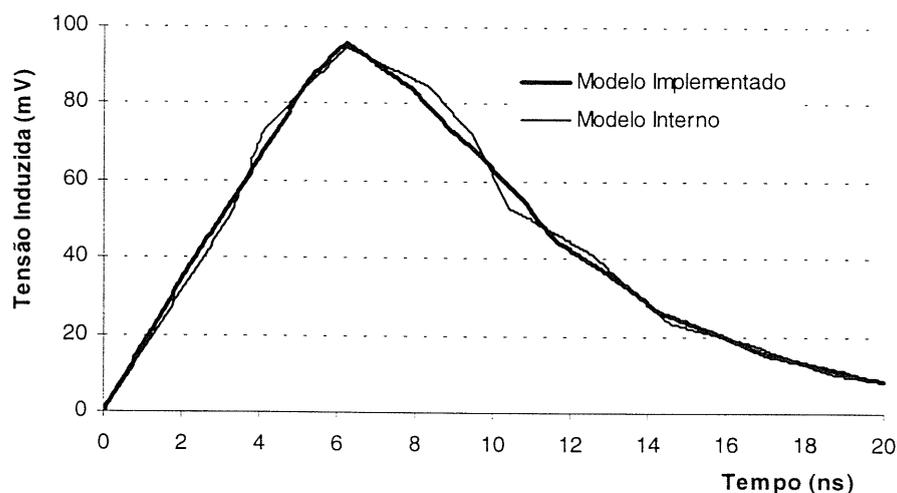


Figura 3.8 – Comparação de tensões interferentes em uma placa de circuito impresso, utilizando o modelo embutido no SPICE (T2coupledx) e um modelo próprio

O SPICE permite também o uso da transformada de Laplace. Assim,  $R$  e  $G$  podem ser expressões gerais da variável  $s$ , o que permite ao usuário modelar parâmetros dependentes da frequência, tais como, efeito pelicular e perdas dielétricas. Contudo, isso significa um aumento significativo no tempo de análise transitória, já que a saída é a convolução da forma de onda de entrada com a resposta ao impulso da transformada, sendo que a resposta ao impulso deve ser obtida por uma FFT inversa (transformada rápida de Fourier) em vez de ser obtida analiticamente.

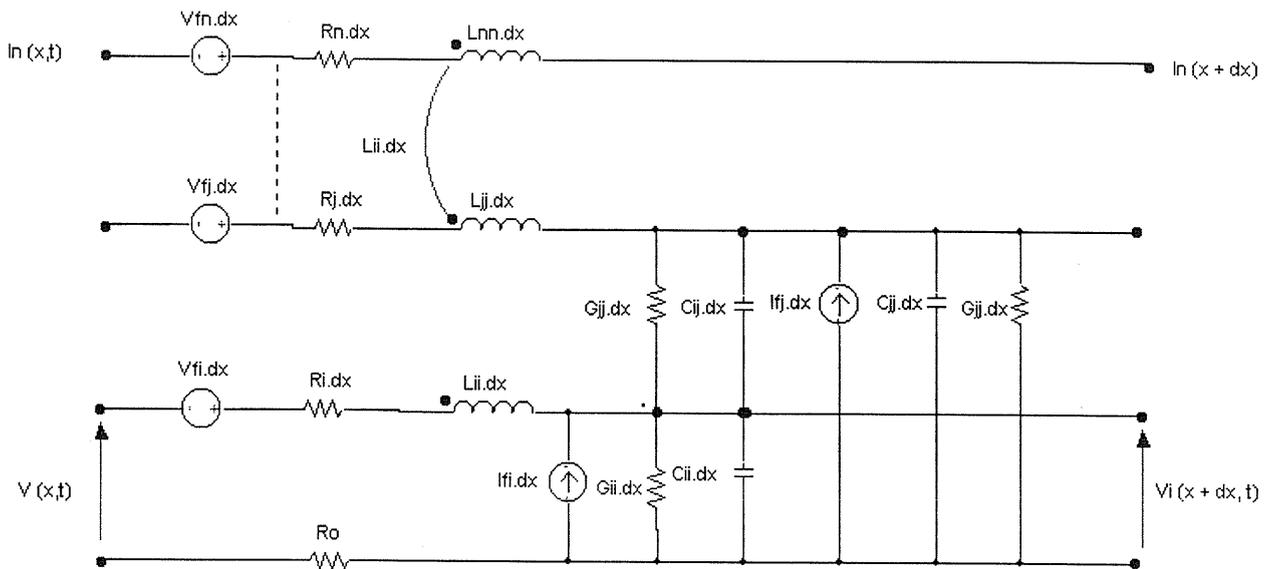
O trecho de circuito abaixo foi retirado da biblioteca SPICE para cabos coaxiais e ilustra a modelagem de  $R$  e  $G$  como funções da frequência para o cabo RG6A/U.

```

Library of transmission line models and subcircuits
*
* Coaxial cable transmission line model parameters
*
* The parameters in this model library were derived from Table 21-3 in
* "Handbook of Electronics Calculations for Engineers and Technicians",
* edited by Kaufman and Seidman, McGraw-Hill, 1988. The table provides
* the velocity of propagation (vp) in %, nominal impedance (z0) in Ohms,
* and a set of attenuations in dB/100 ft for frequencies between 10 MHz
* and 3 GHz. The values of r, l, g, & c given below are all in per meter
* units, and were obtained by the following means:
*
* Capacitance per meter: c = 1. / (z0 * Vp),
*   where Vp = vp * clight / 100 = 9.835e6 * vp
*
* Inductance per meter: l = z0 / Vp
*
* r and g are both functions of frequency, and are computed using the method
* described in "Transmission Lines" by Robert Chipman, McGraw-Hill, 1968,
* pp 65-66. r is assumed to increase in proportion to the square root
* of frequency, while g varies in direct proportion to frequency. A high
* frequency relationship for the attenuation factor is:
*
*   alpha = ((r / z0) + (g * z0)) / 2,
*
* and r and g can be found by selecting values of alpha at two frequencies
* (100 MHz and 1 GHz are used here) and solving two simultaneous equations:
*
*   alpha1 = (.5 / z0) * r1 + (.5 * z0) * g1
*   alpha2 = (.5 / z0) * sqrt(w2 / w1) * r1 + (.5 * z0) * (w2 / w1) * g1
*
* The alpha's are converted to units of nepers per meter, and the frequencies
* (w1 and w2) are in units of radians per second. Kramer's rule gives:
*
*   r1 = (alpha1 * w2/w1 - alpha2) * (z0 / 2)
*         / ((w2 / w1) - sqrt(w2 / w1)) / 4
*
*   g1 = (alpha2 - alpha1 * sqrt(w2/w1)) / (2 * z0)
*         / ((w2 / w1) - sqrt(w2 / w1)) / 4
*
* Then the frequency-dependent expressions for r and g are:
*
*   r = (r1 / sqrt(w1)) * sqrt(s)
*   g = (g1 / w1) * s
*
* Model parameter units are as follows:
*   len: meters
*   r: Ohms/meter
*   l: Henries/meter
*   g: Mhos/meter
*   c: Farads/meter
*
*$
*           Z0(Ohms)  vp(%)  F1(MHz) Loss1(dB/100Ft) F2(MHz)  Loss2(dB/100Ft)
* RG6A/U      75      66      100      2.9      1000      11
*.model RG6A/U  TRN (r={59.5022u*sqrt(2*s)} l=379.050n
+           g={0.0428900p*abs(s)}  c=67.3867p)
*$
* Subckt version uses fixed frequency, frq, to model simple lossy line

```





**Figura 3.9 - Circuito equivalente para uma linha polifásica iluminada por uma onda plana uniforme**

As grandezas mostradas são:

- $dx$  – comprimento de um trecho elementar da linha;
- $R_n, L_{ii}, C_{ii}$  – parâmetros do  $i$ -ésimo condutor da linha;
- $L_{ij}, C_{ij}, G_{ij}$  – parâmetros mútuos entre o  $i$ -ésimo e o  $j$ -ésimo condutores ;
- $V_{fi}, I_{fi}$  – Fontes de tensão e corrente atribuídas a um trecho  $dx$  da linha.

Cada fonte estabelecida é uma função da intensidade do campo, da polarização da onda incidente e da direção de propagação. Os resultados foram comparados com um programa específico e apresentaram pequena discordância.

• **Modelo para análise transitória de telas ferromagnéticas iluminadas por campos próximos** - A referência [3] realiza um estudo de telas ferromagnéticas utilizadas como blindagens em equipamentos de aviação, satélites e sistemas elétricos de potência. A geometria da rede é mostrada na Figura 3.10.

É apresentado um modelo para material homogêneo e anisotrópico, com as características não lineares e a histerese do material sendo consideradas. A fonte de campo é um dipolo magnético localizado nas proximidades da tela. Tanto o modelo da tela, quanto o da fonte, são dados na forma de equações de linhas de transmissão multifilares, que são resolvidas pela utilização do SPICE. É importante observar que, neste artigo, as principais etapas de um problema desse nível (acoplamento de campo com uma estrutura) são analisadas segundo uma metodologia por nós preconizada, qual seja: caracterização do problema e sua redução a um problema de circuito, com sua solução por um programa de uso geral, levando em conta características de não linearidade, linhas multifilares e variação de parâmetros com a frequência. A única desvantagem apontada está relacionada com o alto tempo de processamento.

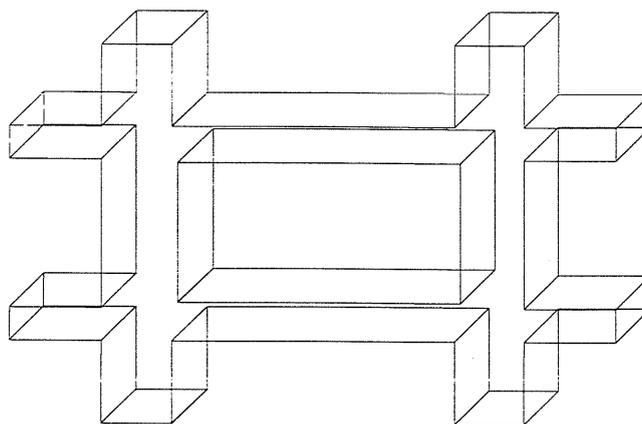


Figura 3.10– Geometria da tela ferromagnética

- **Outros exemplos** - Em [29], uma dissertação de mestrado desenvolvida no PPGEE, é realizada a modelagem completa de um motor de indução trifásico. Em [18], um trabalho também desenvolvido no PPGEE, é apresentada uma alternativa de abastecimento de água que contempla a utilização de painéis fotovoltaicos. Neste, a modelagem dos painéis e do bombeamento d'água é implementada no SPICE.

### 3.4 Implementação do cálculo de tensão induzida em linhas aéreas

A teoria de Rusck propõe a distribuição de fontes de correntes que irão representar os campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica incidente no solo nas proximidades da linha sob estudo. Para a aplicação destas fontes, a linha deve ser discretizada em trechos de comprimento  $dx$ , conforme Figura 3.11.

Como exposto no item 2.3.1, o campo elétrico total é dado por 2 componentes: um, originado no potencial escalar, de natureza conservativa, e o outro, originado no potencial vetor, de natureza não conservativa. Para manter a coerência de terminologia, classificaremos as fontes de corrente segundo os potenciais que as originam, ou seja, em fontes conservativas e não conservativas, pois, a interação dessas fontes com o sistema ocorre de formas diferentes.

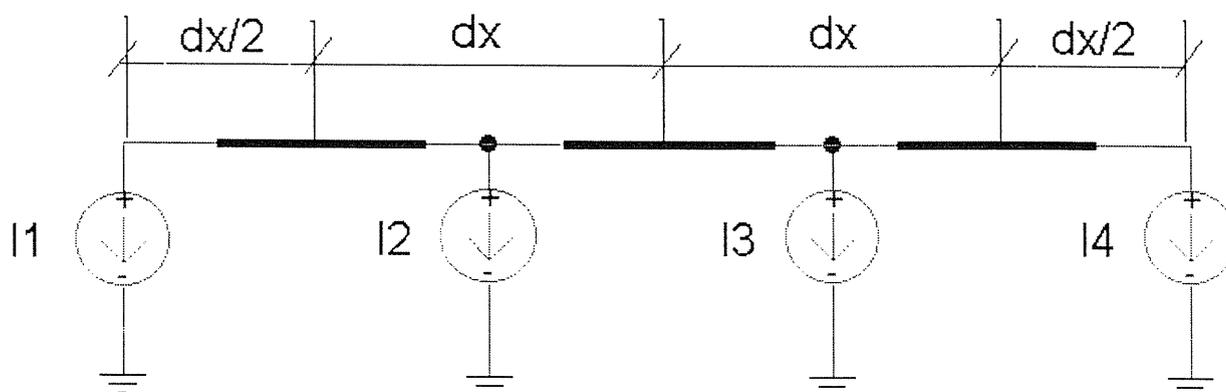


Figura 3.11– Distribuição de fontes de corrente ao longo de uma linha

### Fontes de corrente associadas ao campo conservativo

As expressões para as fontes de corrente, vistas no capítulo 2, são dadas pelas equações (3.3) e (3.4).

$$dI(x,t) = \frac{1}{v_0 Z} \cdot \frac{\partial V_i(x,t)}{\partial t} dx \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial V_i(x,t)}{\partial t} = 60 I_0 h v v_0 \frac{t}{\left\{ (vt)^2 + \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right] r_0^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (3.4)$$

#### 3.4.1 Fontes de corrente associadas ao campo não conservativo

No caso de uma linha sem descontinuidades, a parcela da tensão induzida no componente não conservativo do campo elétrico não causa circulação de correntes. É apenas adicionada ao valor da tensão induzida proveniente das fontes de corrente representativas do componente conservativo do campo elétrico, obtida após o cálculo do transitório, chegando-se assim à tensão total induzida na linha [40]. A tensão adicionada por esta parcela é dada pelas equações (3.5) e (3.6).

$$V_{nc} = h \left( \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \right)_z \quad (3.5)$$

$$h \left( \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \right)_z = 60 I_0 h \left( \frac{v}{v_0} \right) \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + \left( 1 - \left[ \frac{v}{v_0} \right]^2 \right) r_0^2}} \quad (3.6)$$

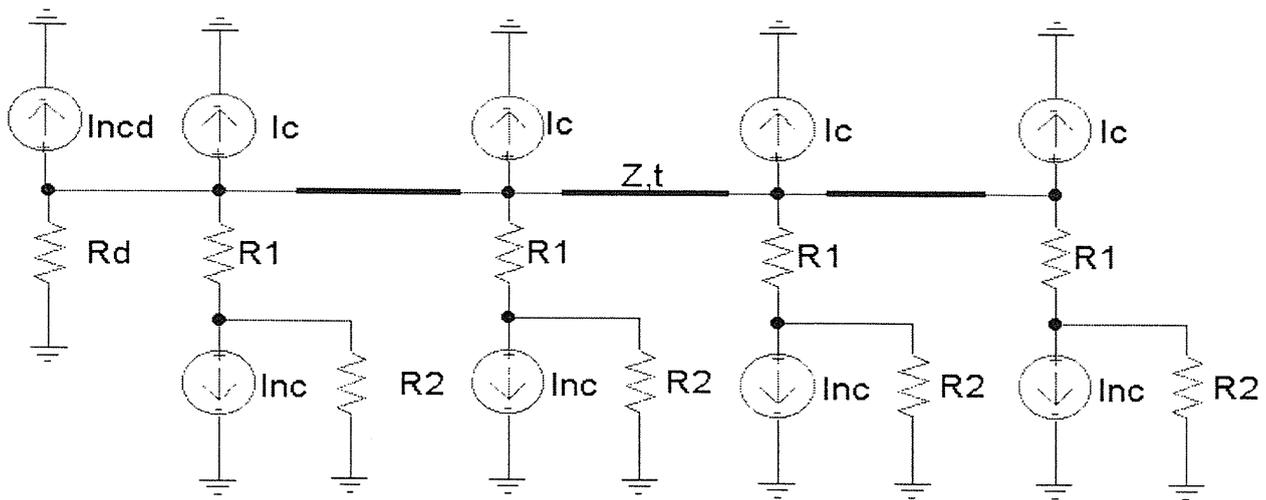
onde

- $V_{nc}$  - tensão induzida devido ao componente não conservativo do campo;
- $h$  - altura do condutor.

Quando houver uma descontinuidade (um aterramento, por exemplo) da linha para a terra, o componente não conservativo do campo elétrico provocará a circulação de corrente na linha, sendo necessário, neste caso, calcular o transitório provocado por esta corrente [40].

#### 3.4.2 Circuito equivalente para a modelagem apresentada

O circuito mostrado na Figura 3.12 mostra a implementação da modelagem apresentada no SPICE. Nele, pode-se observar a subdivisão da linha em trechos de impedância de surto  $Z$  e tempo de trânsito  $\tau$ . As demais grandezas mostradas significam:



**Figura 3.12 - Circuito equivalente para cálculo de tensão induzida através do uso de fontes de corrente**

- $I_c$  – fonte de corrente associada ao campo conservativo;
- $R_d$  – resistor em uma descontinuidade;
- $I_{ncd}$  – fonte de corrente associada ao campo não conservativo em pontos com descontinuidade.  $I_{ncd} = V_{nc}/R_d$ ;
- $I_{nc}$  – fonte de corrente associada ao campo não conservativo em pontos onde não há descontinuidade. Para que não haja injeção de corrente na linha, a fonte é desacoplada desta através de um resistor  $R_1$  de grande valor. A parcela de tensão a ser somada à tensão induzida gerada pela circulação das correntes  $I_c$  e  $I_{ncd}$  é obtida nos terminais de um resistor de valor unitário  $R_2$  em paralelo com a fonte  $I_{nc}$ .

### 3.5 Implementação do cálculo de tensão induzida em cabos telefônicos

Em um cabo telefônico, (onde cada condutor interno pode ser aproximado por um cabo coaxial, como mostrado na Figura 3.13), o campo elétrico longitudinal é o responsável pela indução de tensão entre o condutor interno e a cobertura metálica. Esse campo pode ser obtido através do conhecimento da impedância de transferência do cabo e da distribuição de corrente na sua blindagem. Neste modelo, o circuito formado pelo condutor interno e blindagem é considerado desacoplado do circuito formado pela blindagem e terra. Essa consideração é baseada no fato de que, quando uma corrente  $I_b$  circula pela blindagem, a corrente  $I$  induzida por ela no condutor interno é tão pequena que não afeta o valor da corrente indutora.

A colocação do problema em termos de duas linhas de transmissão desacopladas permite a extensão da metodologia descrita nos itens anteriores. De fato, a formulação se reduz ao cálculo de transitórios em dois circuitos:

- O primeiro, constituído pela linha de transmissão formada pela blindagem e a estrutura de retorno;
- O segundo, constituído pela de transmissão formada pelo condutor interno, tendo a blindagem como retorno.

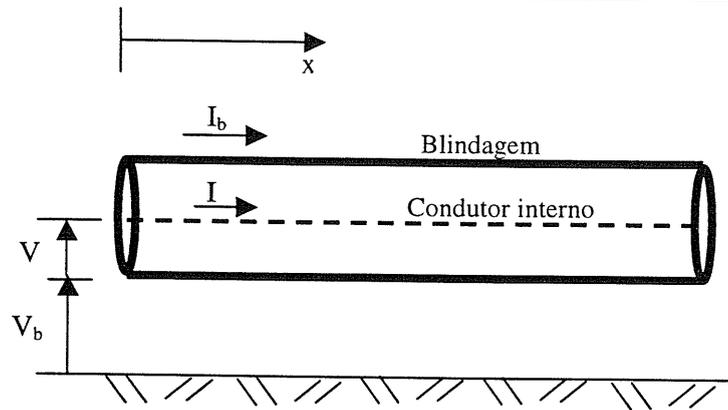


Figura 3.13 – Cabo coaxial com blindagem tubular

A distribuição de corrente  $I_b$  blindagem devido a uma descarga atmosférica indireta é calculada como no caso de uma linha aérea monofásica. Essas correntes transitórias circulantes em cada um dos  $n$  trechos em que a blindagem é segmentada podem ser amostradas no SPICE através de fontes de tensão de valores nulos. Por sua vez, o condutor interno é também tratado como uma linha de transmissão subdividida em outros  $n$  segmentos. Entre cada par de segmentos consecutivos do condutor podemos inserir uma fonte de tensão dependente da corrente amostrada no trecho correspondente da blindagem. Essa fonte de tensão  $H_n$  se constituirá na fonte da tensão induzida entre o condutor interno e a blindagem. A Figura 3.14 esclarece o processo.

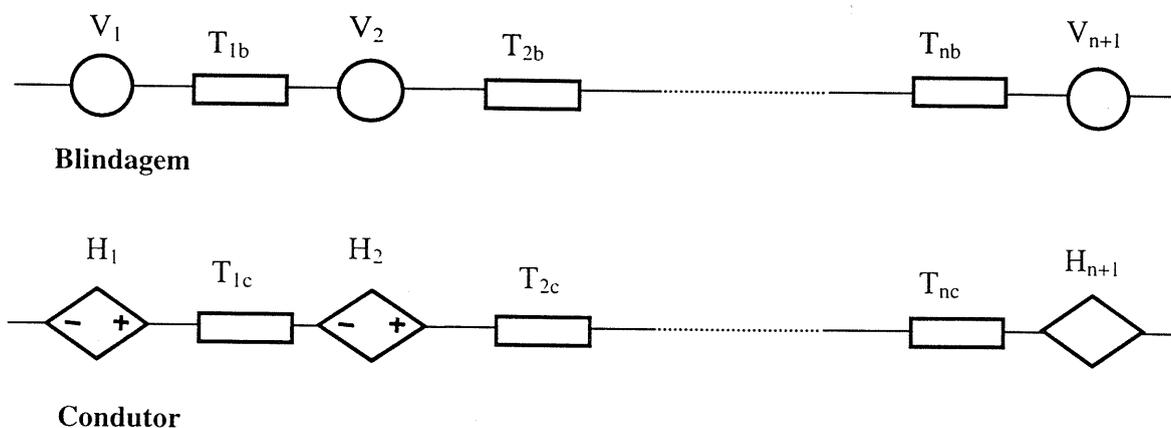


Figura 3.14 – Uso de fontes dependentes de tensão no cálculo da tensão induzida em cabos telefônicos.

Os termos apresentados significam:

- $T_{1b}, T_{2b}, \dots, T_{nb}$  - segmentos de linha de comprimento  $\Delta x$  da blindagem;
- $T_{1c}, T_{2c}, \dots, T_{nc}$  - segmentos de linha de comprimento  $\Delta x$  do condutor;
- $V_1, V_2, \dots, V_{n+1}$  - fontes de tensão que amostram as correntes da blindagem;
- $H_1, H_2, \dots, H_{n+1}$  - fontes dependentes de tensão do condutor.

A tensão nos terminais da  $n$ -ésima fonte  $H$  é dada por

$$v_{Hn} = Z_T i_{Vn} \Delta x \quad (3.7)$$

O cabo coaxial é suposto orientado segundo a direção  $x$ , com  $\Delta x$  sendo o comprimento da seção considerada. Novamente o programa TINDLT pode ser chamado para o cálculo do transitório e as tensões  $V$  desejadas são então obtidas. A implementação do método acima é feita pelo programa TINDLTCX, uma variante de TINDLT mostrado no anexo A, que calcula os dois transitórios simultaneamente, e no qual é eliminado o acoplamento das linhas e são inseridas as fontes adicionais de corrente e tensão descritas anteriormente. Os parâmetros específicos ( $R, L, G, C$ ) da blindagem e do condutor devem ser passados ao SPICE via um arquivo de dados de entrada, TINDLTCX.AND, uma variação daquele descrito no item 3.1.

# Capítulo 4

## Resultados para Linhas Aéreas

No presente capítulo, serão apresentados resultados baseados na metodologia descrita para linhas constituídas por 1, 2 e 3 condutores. O programa auxiliar empregado no cálculo dos parâmetros da linha é aplicável a qualquer número de condutores, possibilitando, portanto, a modelagem de linhas trifásicas com cabos pára-raios, se também considerarmos os cabos como condutores

Apresentaremos alguns resultados preliminares comparando a metodologia das fontes de corrente [40], utilizada neste trabalho, com a metodologia das fontes de compensação, proposta por Lopes [26] em sua dissertação de mestrado, válida, contudo, para linhas monofásicas apenas. O programa desenvolvido por Lopes tem sido amplamente utilizada no PPGEE/UFMG, com resultados estabelecidos e comprovados teórica e experimentalmente [9], [20], [22], [40], [41]. As comparações são importantes para dar confiabilidade ao programa e permitir a exploração de outros resultados com segurança.

Uma vez feita a validação do método, serão apresentados resultados para:

- *Estudo de caso teórico, referente a uma linha constituída por 2 condutores, em diferentes configurações;*
- *Alguns casos para uma linha trifásica com o intuito de mostrar a versatilidade do programa;*
- *Caso prático referente a uma linha experimental montada na África do Sul;*
- *Caso prático referente a uma linha experimental montada pelo EPRI (Electric Power Research Institute);*

### 4.1 Validação da metodologia proposta para uma linha monofásica

A metodologia das fontes de compensação baseia-se também na teoria de Rusck, tendo como ponto de partida a expressão analítica, deduzida por Rusck, para o cálculo das tensões induzidas. Pelo método da compensação [30], uma malha (a ser resolvida pelo método das equações nodais) é caracterizada pelo seguinte sistema de equações:

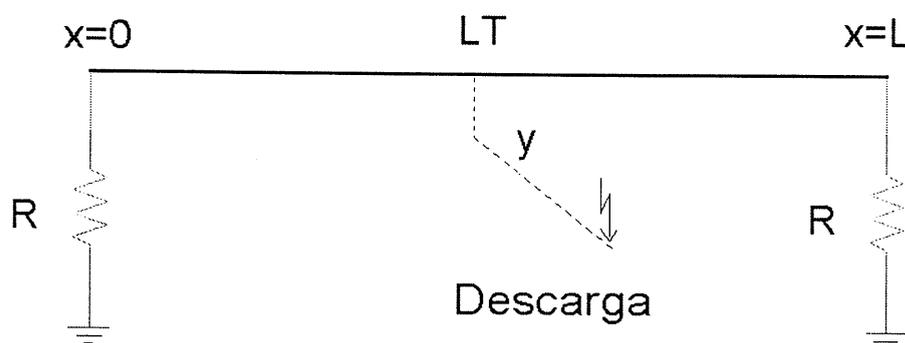
$$[Y_c] \cdot [e(t)] = [i(t)] - [I] \quad (4.1)$$

onde  $[Y_c]$  é a matriz de condutância nodal;  $[e(t)]$  é o vetor de tensões nodais no instante  $t$  (incógnitas da malha);  $[i(t)]$  é o vetor de correntes nodais injetadas entre qualquer nó e o nó de

referência e  $[I]$  é o vetor de correntes conhecidas (história passada da malha). Pelo teorema da compensação, uma malha com um ramo não linear entre os nós genéricos  $p$  e  $q$  pode ter esse ramo retirado da malha e, portanto, da matriz  $[Y_c]$ . O ramo pode, então, ser simulado por uma fonte de corrente  $i_{pq}(t)$  adequadamente calculada, denominada fonte de compensação.

O caso base utilizado para as comparações é uma linha monofásica, Figura 4.1, apresentando as seguintes características:

- *Altura em relação ao solo :  $h = 10$  m;*
- *Diâmetro do condutor: 8,15 mm;*
- *Comprimento:  $L=1000$  m;*
- *Terminações: casadas ( $R = Z = 500 \Omega$ )*

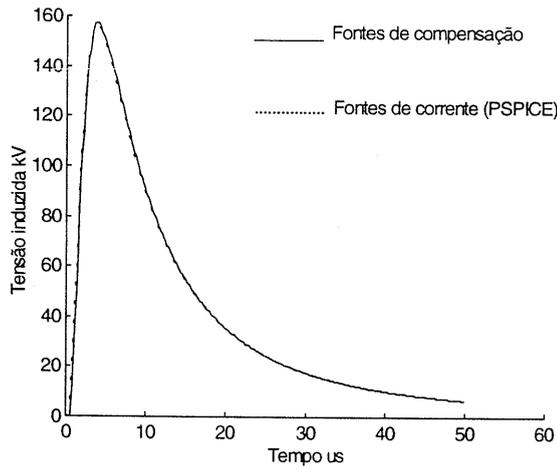


**Figura 4.1 – Linha monofásica utilizada para estudo de validação**

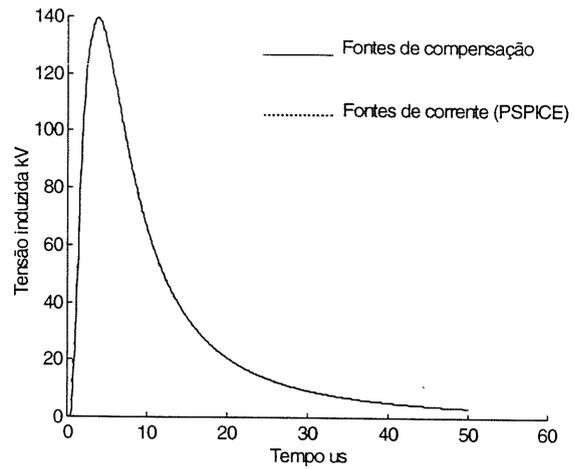
Parâmetros da descarga atmosférica para o caso base:

- *Valor de pico da corrente:  $I_p = 50$  kA;*
- *Velocidade da corrente no canal de descarga:  $30$  m/ $\mu$ s;*
- *Tempo de frente da corrente:  $1 \mu$ s;*
- *Coordenadas da descarga:  $x = 500$  m,  $y = 100$  m;*
- *Ponto de observação da tensão induzida:  $x = 500$  m;*
- *Resistividade do solo: nula.*

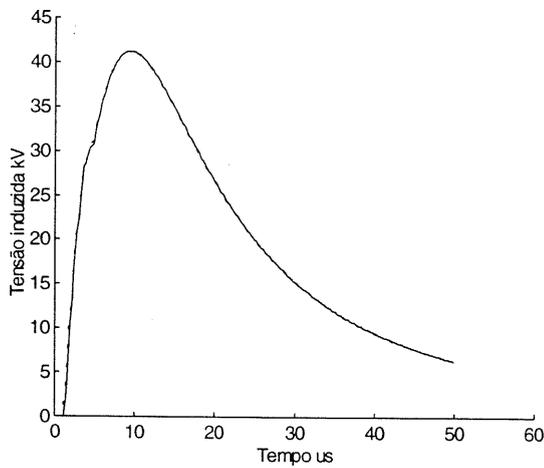
As figuras 4.2 a 4.7 apresentam diversas comparações entre as 2 metodologias. As variações efetuadas em relação ao caso base são indicadas nas próprias figuras. As simulações apresentadas demonstram que os dois métodos apresentam resultados praticamente iguais, o que era esperado, já que provêm da mesma teoria básica.



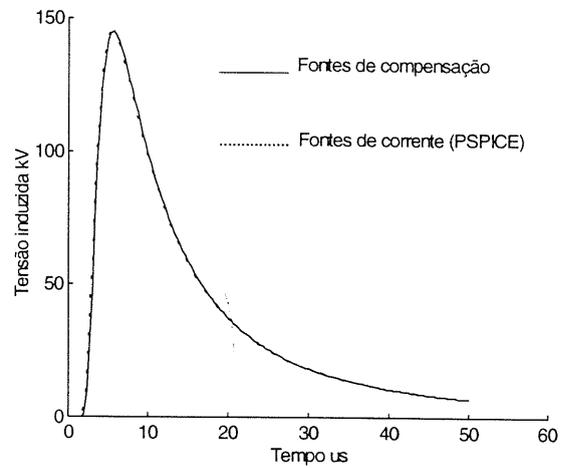
**Figura 4.2 – Caso base para comparação das metodologias**



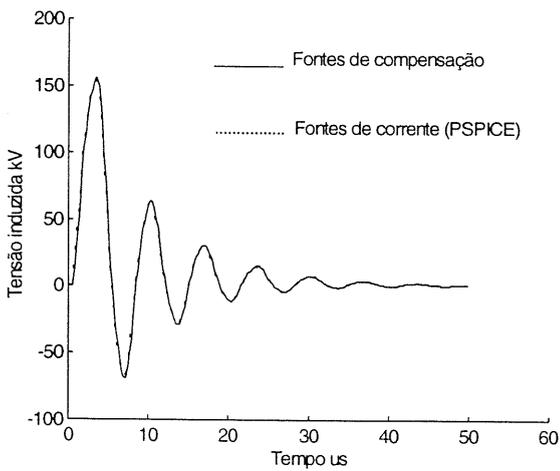
**Figura 4.3 – Influência do comprimento da linha: L = 500 m**



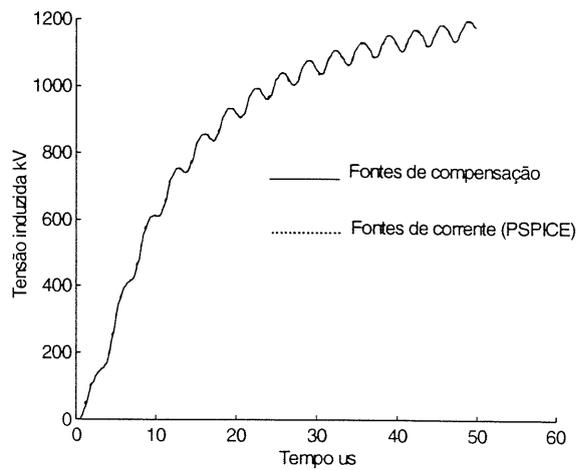
**Figura 4.4 – Influência da distância da descarga à linha: y = 200 m**



**Figura 4.5 – Ponto de observação da tensão induzida: x = 0 m**



**Figura 4.6 – Influência das terminações: linha aterrada com R = 100 Ω**



**Figura 4.7 – Influência das terminações: linha aberta nas extremidades.**

## 4.2 Linhas multifilares sem perdas

Linhas constituídas por 2 ou mais condutores apresentam um acoplamento eletromagnético entre eles, traduzido pelas matrizes de indutâncias e capacitâncias mútuas. Especificamente para uma linha bifásica (o que pode ser estendido para qualquer número de condutores), temos

$$L_m = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$C_m = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde as indutâncias próprias de cada condutor (termos de mesmo índice da diagonal) são iguais às indutâncias de cada condutor para a terra, e as capacitâncias  $C_{11}$  e  $C_{22}$  são calculadas como  $C_{11} = C_{1T} + C_{12}$  e  $C_{22} = C_{2T} + C_{12}$ , com o índice  $T$  designando a capacitância para a terra.

Pela teoria de Rusck, este acoplamento se manifesta apenas a partir do momento em que as correntes originadas pelas tensões induzidas em cada ponto começam a se propagar pela linha. A tensão induzida em si não sofre influência do acoplamento. Estas matrizes de acoplamento são geradas por um programa específico de cálculo de parâmetros de linha e, via MATLAB, incorporadas ao subcircuito SPICE.

## 4.3 Simulações para uma linha bifásica

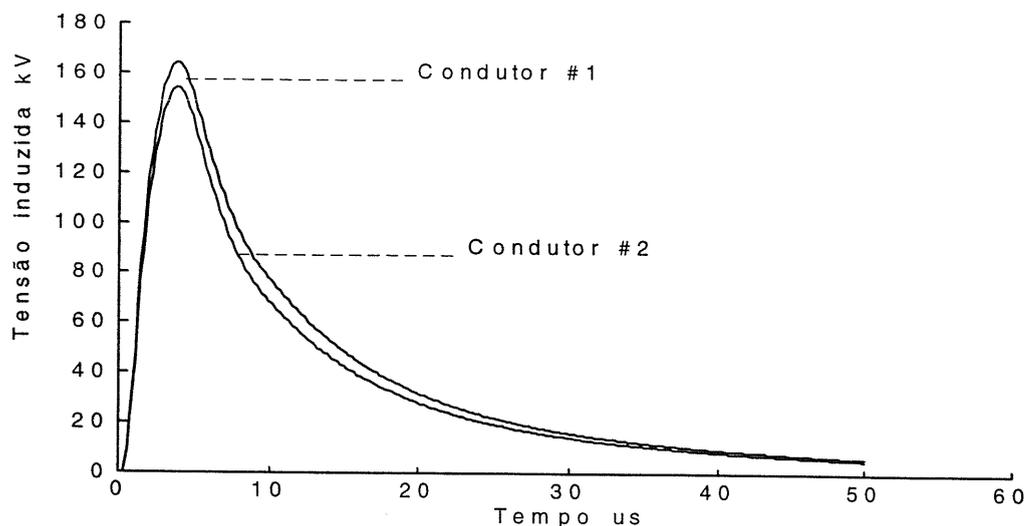
A linha bifásica utilizada para simulações é constituída por 2 condutores em um mesmo plano vertical, com as seguintes características para o caso base:

- Comprimento da linha:  $L = 1000m$ ;
- Diâmetro do condutores:  $D_c = 8,15 mm$ ;
- Altura do condutor 1:  $10m$ ;
- Altura do condutor 2:  $9m$ ;
- Terminações: casadas;

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base são:

- Valor de pico da corrente:  $I_p = 50 kA$ ;
- Tempo de frente da corrente:  $T_f = 1 \mu s$ ;
- Tempo de frente da corrente de retorno:  $30 m/\mu s$ ;
- Coordenadas da descarga ( $x$  e  $y$  como na figura 4.4):  $x = 500$ ,  $y = 100 m$ ;
- Ponto de observação da tensão induzida:  $x = 500 m$ ;

A Figura 4.8 apresenta as tensões induzidas nos 2 condutores da linha para o caso base.



**Figura 4.8 – Tensão induzida nos condutores de uma linha bifásica: caso base**

Parâmetros da descarga que influenciam a forma de onda da tensão induzida são analisados em outras figuras, onde, em cada caso, é feita a variação do parâmetro de interesse, mantidos os demais como no caso base. Fatores relacionados à metodologia utilizada, como nível de partição da linha e número de degraus com que se modela a frente da corrente de retorno, podem afetar a precisão dos resultados e são também analisados. Finalmente, são comparados os componentes da tensão induzida total.

#### 4.3.1 Influência da partição da linha

A metodologia das fontes de corrente exige que a linha de transmissão seja dividida em um certo número de segmentos, que constituem novas linhas com mesma impedância de surto e menores tempos de trânsito. A princípio poder-se-ia supor necessário um grande número de segmentos de linha para se obter uma boa precisão nos cálculos. As simulações realizadas e consolidadas na Figura 4.9 mostram que este não é o caso. Para a configuração descrita acima, a divisão da linha em 6 segmentos ( $dx = 167 m$ ) já levou a um resultado bem próximo ao melhor possível de ser obtido com nosso programa, o que se conseguiu para 10 segmentos (cada segmento de linha com um comprimento  $dx = 100 m$ ). A figura também mostra que a curva para 8 segmentos ( $dx = 125 m$ ) é praticamente igual a de 10 segmentos. Na análise, os resultados obtidos não apresentaram variações significativas quando se discretizou a linha em intervalos maiores que 100 m, ou seja, intervalos da ordem de grandeza da distância da descarga à linha. O mesmo comportamento foi verificado nas simulações que se seguem. Embora não se possa afirmar como uma regra geral, intervalos de discretização da linha, da ordem de grandeza da descarga à linha levam a resultados satisfatórios. Para evitar erros, neste trabalho todas as simulações realizadas obedeceram inicialmente a essa regra, e em seguida, foram comparadas com simulações para intervalos substancialmente menores.

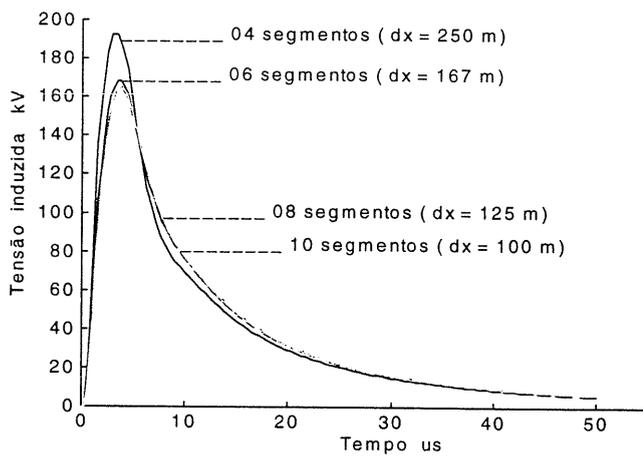


Figura 4.9 – Influência da partição da linha

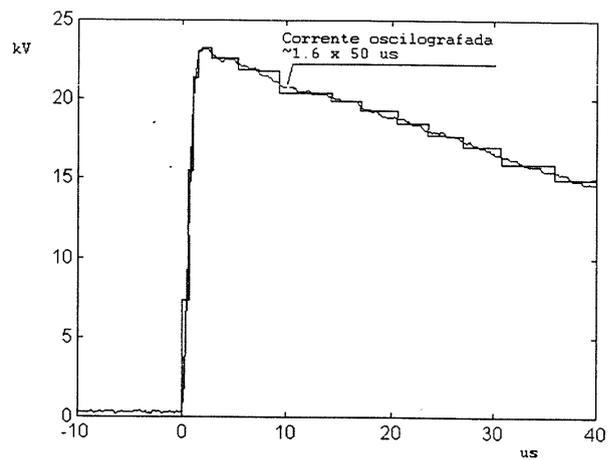


Figura 4.10 – Corrente de retorno oscilografada e sua aproximação por degraus defasados no tempo

### 4.3.2 Aproximação da corrente de retorno por degraus defasados no tempo

A teoria de Rusck, como visto no capítulo 2, fornece expressões analíticas para o cálculo de tensão induzida, que são a resposta do sistema (linha de transmissão) a uma excitação do tipo degrau. Correntes reais no canal de descarga são aproximadas por uma dupla exponencial, o que pode ser visto pela corrente oscilografada mostrado na Figura 4.10, retirada da referência [7], resultado de uma descarga provocada artificialmente. Na mesma figura apresentamos uma aproximação desta corrente por uma série de degraus defasados no tempo. Desta forma, a teoria de Rusck pode ser aplicada corretamente, para quaisquer formas de corrente.

Na realidade, a degralzação é realizada de forma automática pelo SPICE, correspondendo, a cada intervalo de tempo, um degrau. Com o intuito de se analisar as diferenças entre as respostas a um degrau e a uma corrente aproximada por degraus, efetuamos uma modificação no programa, de forma a utilizar uma degralzação predefinida.

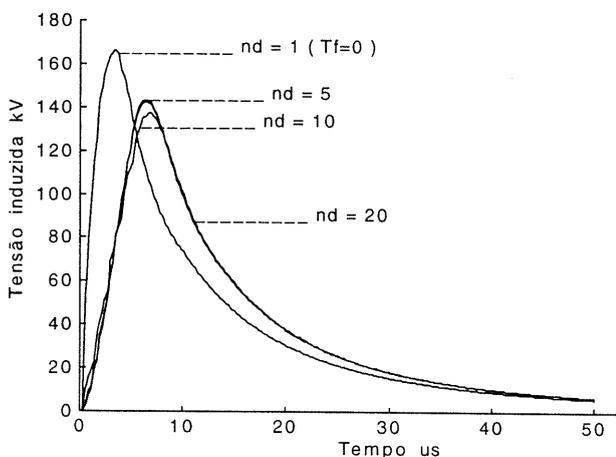


Figura 4.11 – Influência da aproximação da frente de corrente por uma série de degraus defasados no tempo.

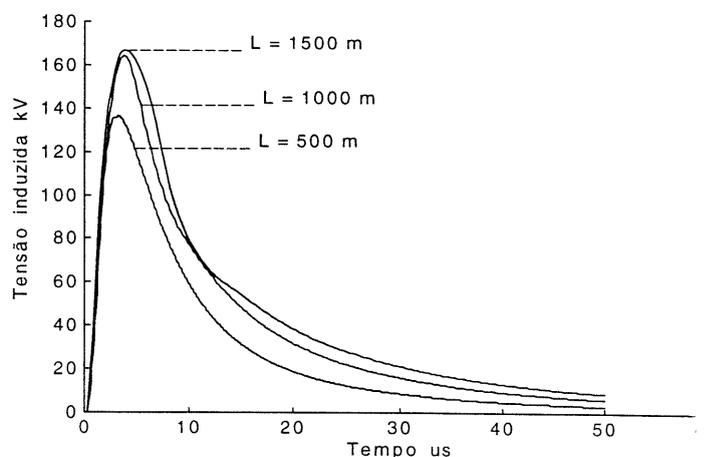


Figura 4.12 – Influência do comprimento da linha

A Figura 4.11 apresenta resultados para diversos valores do número de degraus, supondo a aproximação feita apenas para a frente da corrente, sendo que, em relação ao caso base, o tempo de frente foi alterado para  $5 \mu\text{s}$ , mantidos constantes os demais parâmetros. Assim foi feito porque a Figura 4.15 mostra que não há uma diferença substancial de resposta da linha a um degrau e a uma corrente com tempo de frente de  $1 \mu\text{s}$ . Na figura 4.14,  $nd = 1$  significa que a corrente é um único degrau, portanto, com tempo de frente nulo. Depreende-se que  $nd = 10$  já é um bom valor para o número de degraus, uma vez que isto gera uma curva muito pouco discordante daquela com  $nd = 20$ . O valor de 10 degraus será utilizado em todos os demais resultados apresentados, salvo especificação contrária.

### 4.3.3 Influência do comprimento da linha

Observa-se pelas curvas da Figura 4.12 que, para maiores comprimentos de linha, as contribuições originadas em pontos remotos da mesma são de intensidades menores e levam mais tempo para atingirem o ponto mais próximo da descarga. Essas contribuições não causam, portanto, uma elevação significativa do valor máximo da tensão induzida.

### 4.3.4 Influência do ponto de incidência da descarga e do valor de pico de corrente

A Figura 4.13 mostra um forte decréscimo do valor de pico da tensão induzida, na medida que aumenta a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha. Isso está de acordo com o comportamento esperado para um campo eletromagnético que sofre uma atenuação, que é função de sua distância à fonte (atenuação diferente para cada tipo de campo considerado: campo distante, médio ou próximo).

O valor máximo da tensão induzida é diretamente proporcional ao valor de pico da corrente de retorno, de acordo com a Figura 4.14.

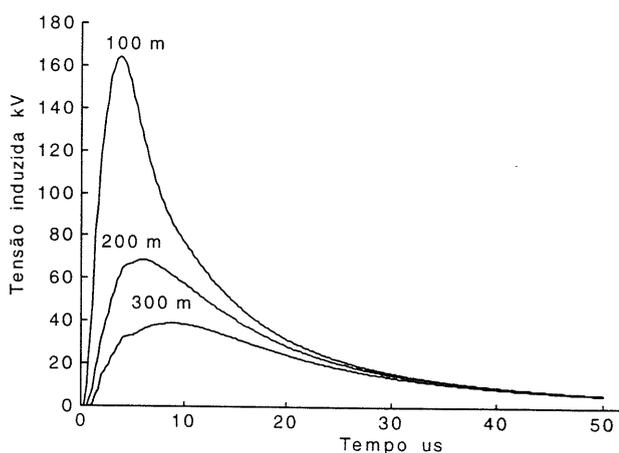


Figura 4.13 – Influência da distância da descarga atmosférica à linha

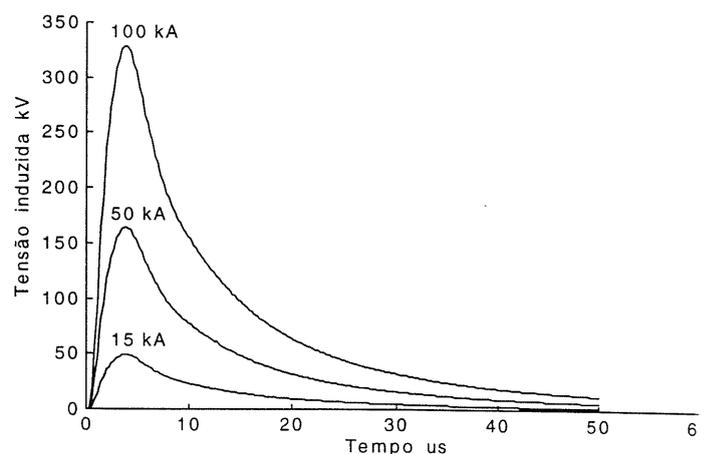


Figura 4.14 – Influência do valor de pico da corrente de retorno

### 4.3.5 Influência do tempo de frente e da velocidade da corrente de retorno

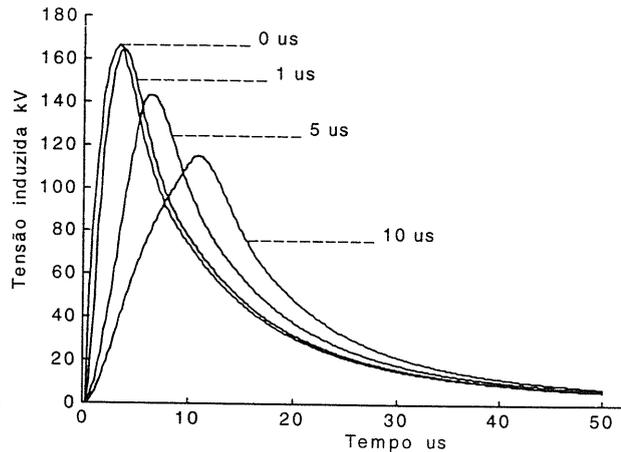


Figura 4.15 – Influência do valor de tempo de frente da corrente de retorno

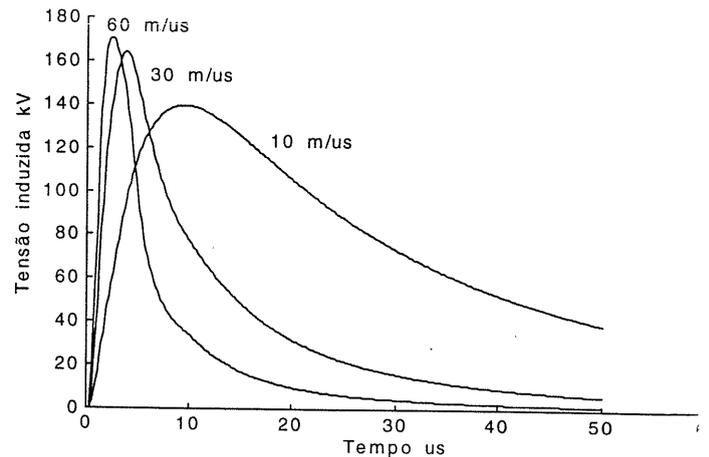


Figura 4.16 – Influência da velocidade de propagação da corrente de retorno

Fica evidenciado pela Figura 4.15, que valores maiores de tempo de frente de corrente de retorno levam a uma variação mais lenta da tensão induzida, comportamento esperado devido à menor taxa de variação do campo associado com a corrente de retorno. Fica também claro que não há uma diferença substancial de resposta da linha a um degrau e a uma rampa de pequeno valor de tempo de frente ( $1 \mu\text{s}$ , valor típico para modelagem da corrente de retorno, mostrado na tabela 1.1).

A Figura 4.16 analisa a influência da velocidade da corrente de retorno. Pode ser visto que um aumento na velocidade de propagação da corrente de retorno faz com que haja uma diminuição do tempo de frente da onda de tensão induzida, ou seja, o fenômeno da tensão induzida se processa de forma mais rápida, devido ao menor intervalo de tempo em que ocorre a variação do campo eletromagnético. Observa-se também que a relação dos valores de pico da tensão é bem menos elástica que a relação de variação das respectivas velocidades.

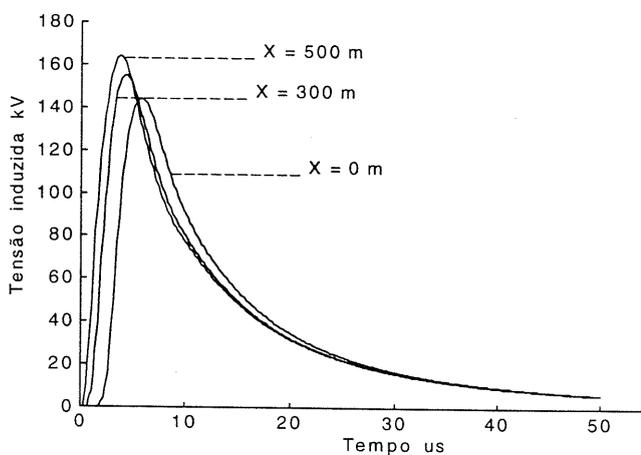


Figura 4.17 – Variação da tensão induzida ao longo da linha

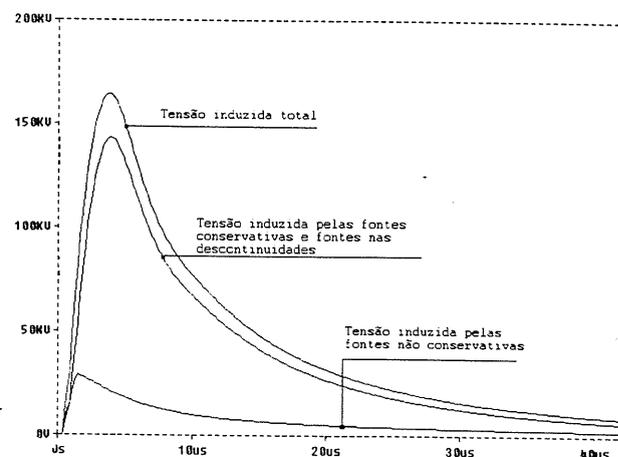


Figura 4.18 Influência do componente não conservativo do campo elétrico

### 4.3.6 Variação da tensão induzida ao longo da linha e influência do componente não conservativo do campo elétrico

A Figura 4.17 mostra que a tensão induzida é de maior intensidade nos pontos da linha mais próximos do canal de descarga e que há uma defasagem no tempo para o início de cada onda de tensão. Para a linha mostrada, com 1000 m de comprimento, as tensões induzidas no início ( $x = 0$ ) e no centro ( $x = 500$ ) diferem em menos de 15% em relação ao maior valor.

Uma análise dos efeitos do componente não conservativo pode ser visto em [40],[41]. A Figura 4.18 mostra que a contribuição do componente não conservativo do campo elétrico é bastante significativa, devendo, portanto, ser levado em consideração nos cálculos.

### 4.4 Simulações para uma linha trifásica

Para estudo de caso consideremos a linha aérea trifásica protegida por 2 cabos pára-raios, como na Figura 4.19. Os seguintes valores foram utilizados nas simulações:

- Raio do condutor fase: 9,14 mm;
- Raio do condutor pára-raios: 3,96 mm;
- Comprimento da linha: 1000 m;
- Características da corrente de retorno: valor de pico, 12 kA; tempo de frente, 0,9  $\mu$ s; tempo de cauda, 35  $\mu$ s; velocidade, 190 m/ $\mu$ s;
- Coordenadas da descarga:  $x = 500$ m e  $y = -46,34$  m.

A Figura 4.20 mostra os resultados para a linha sem os cabos pára-raios e para cada condutor terminado em sua impedância característica  $R_c = 461,4 \Omega$ .

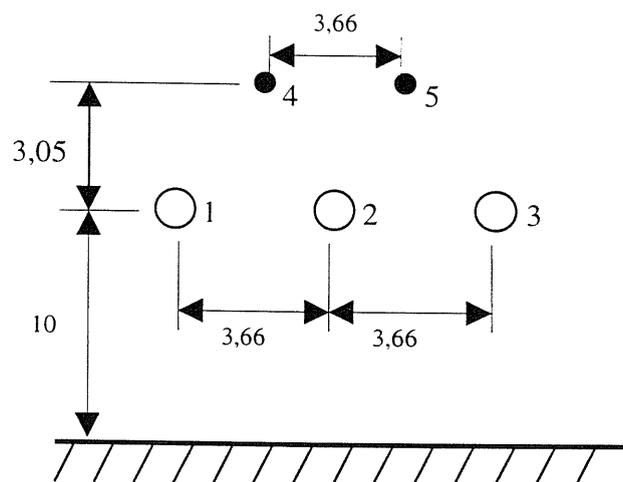
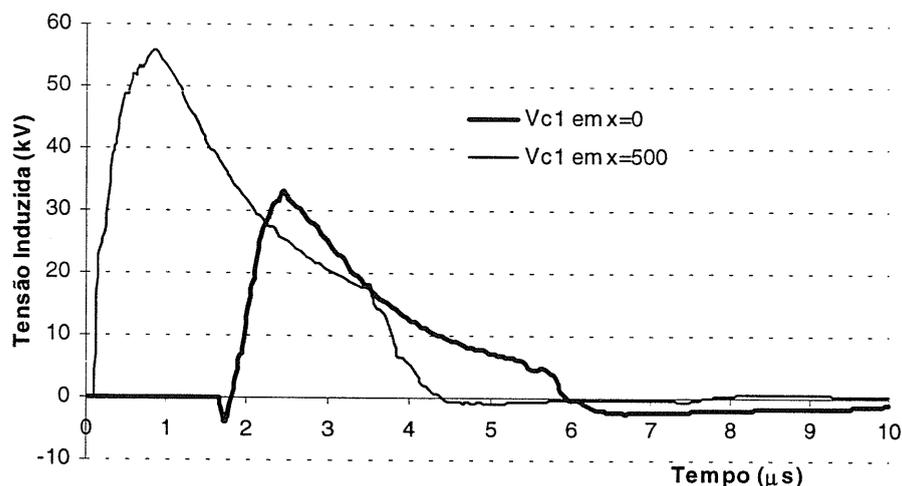


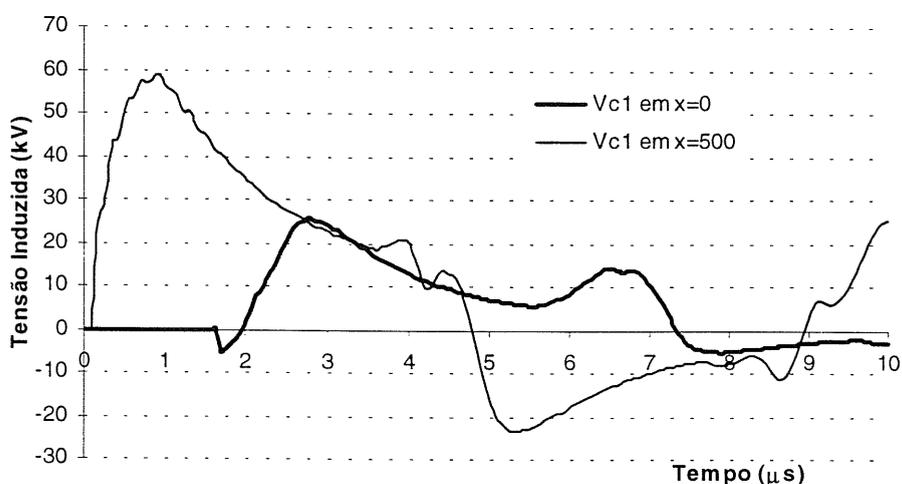
Figura 4.19 – Geometria da linha: 1,2,3: condutores fase; 4,5: cabos pára-raios; dimensões em metros.



**Figura 4.20 – Tensões induzidas em uma linha trifásica sem cabos pára-raios (condutor #1)**

A Figura 4.21 apresenta os resultados para a linha protegida pelos 2 cabos pára-raios, situação em que a linha tem as terminações dos condutores casadas e os cabo pára-raios aterrados com  $R = 0$ . A Figura 4.22 mostra a característica de um elemento pára-raios de ZnO utilizado na simulação da Figura 4.23, em que é mostrado o comportamento da linha protegida através da disposição de um pára-raios em cada uma de suas extremidades.

Os casos apresentados, relativos à ação de cabos pára-raios e elementos pára-raios, evidenciam a capacidade do programa em fazer tais análises. Não foi realizada neste trabalho uma investigação exaustiva do comportamento de tais elementos, pois, sendo o fenômeno muito complexo, com diversas variáveis atuando em sinergia, o efeito de determinado parâmetro quanto ao grau de redução das tensões reduzidas depende da situação específica analisada. Um amplo estudo da influência do cabo guarda e do elemento pára-raios é realizada na referência [42], uma tese de doutorado, em que dezenas de configurações são propostas e analisadas.



**Figura 4.21 – Tensões induzidas em uma linha trifásica com cabos pára-raios**

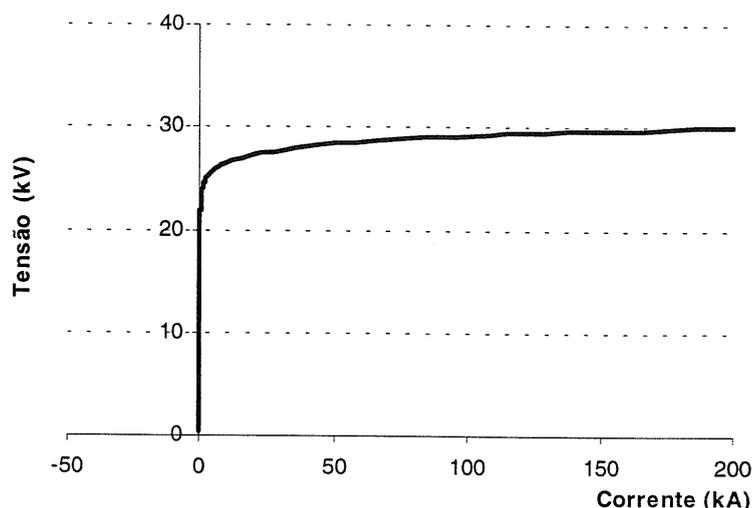


Figura 4.22 – Característica do pára-raios de ZnO

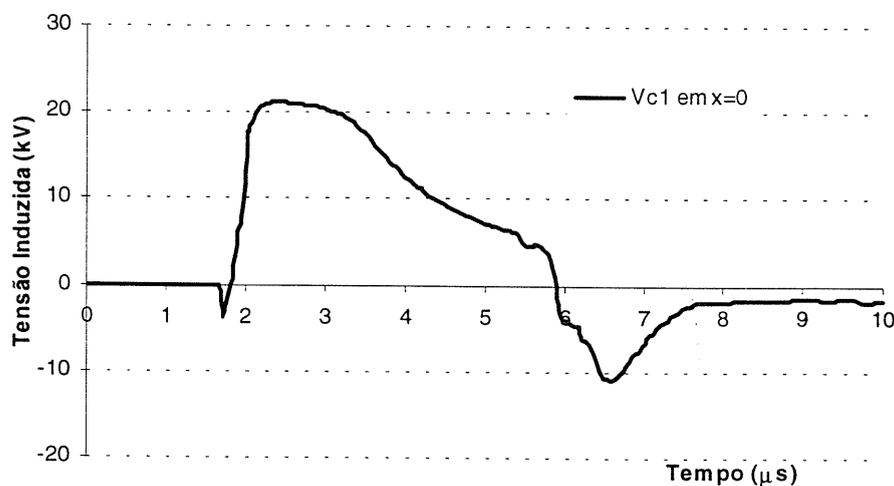


Figura 4.23 – Tensão induzida em uma linha trifásica protegida com pára-raios ZnO.

#### 4.5 Comparação com medição realizada na África do Sul

Para estudo experimental do efeito das descargas atmosféricas sobre linhas de distribuição, foi desenvolvido na África do Sul [40], [41] um projeto de medições de tensões induzidas por descargas atmosféricas. Foi construída uma linha de distribuição de 10 km de comprimento, altura de 10 m e condutor com diâmetro de 10 mm onde, ao longo dos anos, foi efetuada uma série de medições de sobretensões originadas por descargas atmosféricas. Foram instalados medidores em alguns pontos da linha e equipamento fotográfico e de filmagem nas proximidades da linha. A Figura 4.24 mostra a configuração da linha e a localização da descarga.

Por desconhecimento dos dados relativos à corrente, a simulação foi feita utilizando-se os seguintes parâmetros típicos:

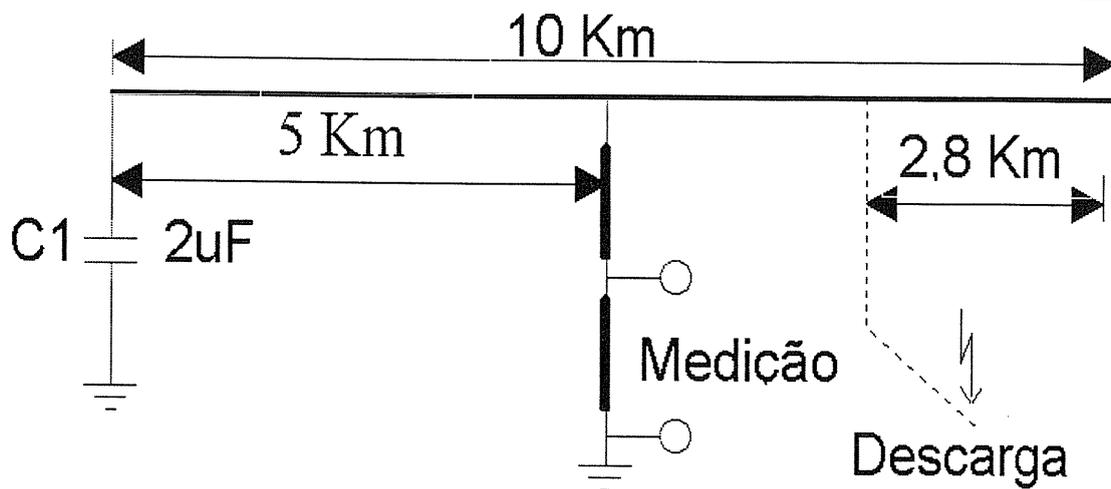


Figura 4.24 – Configuração da linha experimental Sul Africana

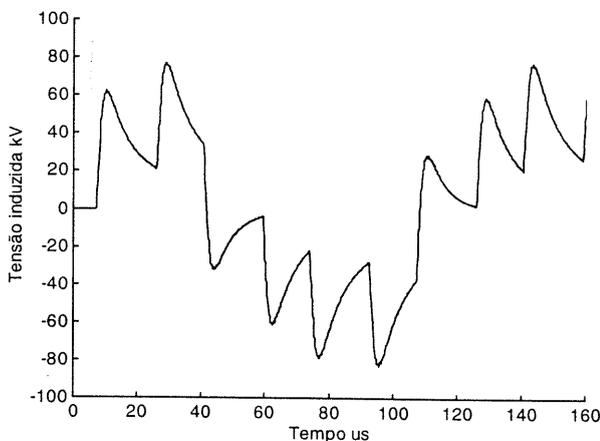


Figura 4.25 – Simulação para a descarga na linha experimental

- Valor de pico da corrente: 50 kA;
- Forma de onda da corrente: degrau;
- Velocidade da corrente: 80 m/ $\mu$ s;
- Distância da descarga à linha: 250 m.

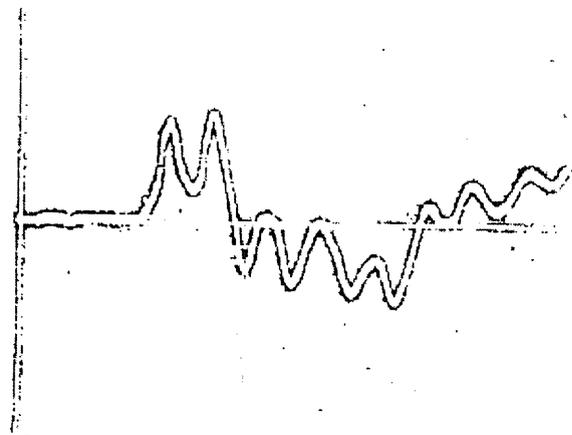
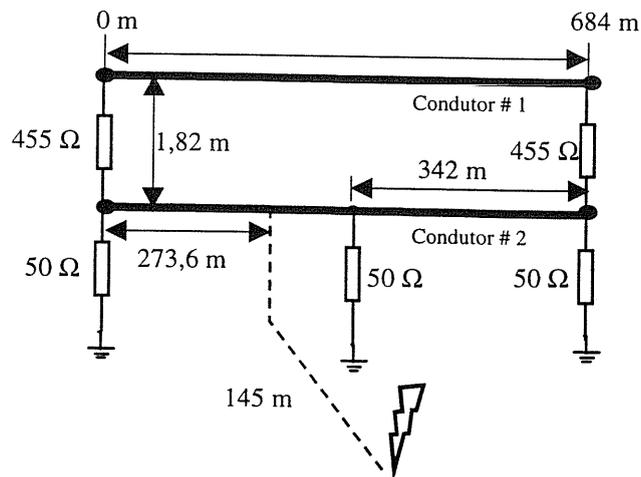


Figura 4.26 – Oscilograma da tensão induzida medida na linha experimental

O resultado da simulação é apresentado na Figura 4.25 e o oscilograma da medição na Figura 4.26. Pode-se afirmar que para uma linha sem perdas (caso da simulação apresentada), a comparação entre valores medidos e calculados é razoável.

#### 4.6 Comparação com tensões medidas na linha experimental do EPRI

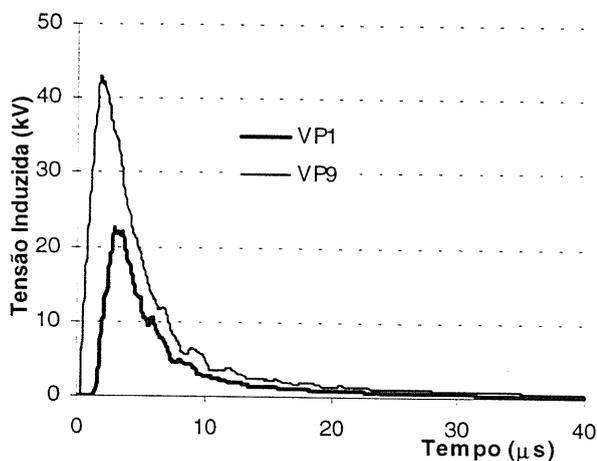
A referência [7] apresenta um estudo experimental bem amplo sobre medição de tensões induzidas. As tensões induzidas decorreram de descargas atmosféricas forçadas, o que se realizou com a utilização de um sistema consistindo de um foguete a combustível sólido de 1 m de comprimento e de um condutor com diâmetro de 0,2 mm, que é desenrolado de um carretel na medida que o foguete sobe. Sessenta e três descargas foram provocadas próximas de uma linha de distribuição experimental desenergizada.



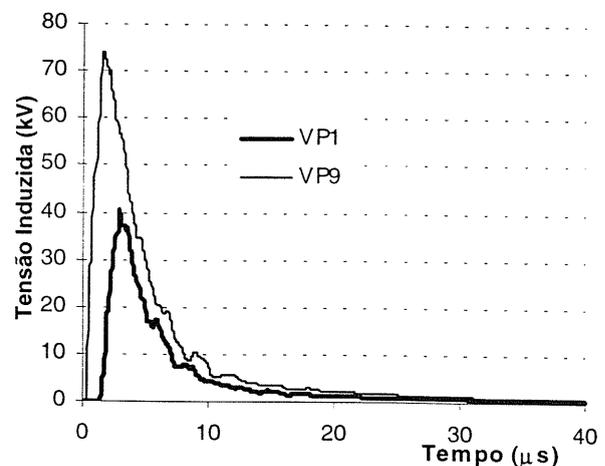
**Figura 4.27 – Circuito para a linha experimental do EPRI**

A referência citada apresenta diversos oscilogramas das correntes e respectivas tensões induzidas, aqui reproduzidos para uma melhor comparação. A Figura 4.27 mostra o circuito da linha experimental e as figuras seguintes, as formas de onda das correntes forçadas e das tensões medidas e calculadas.

A linha bifásica em estudo é suportada por um conjunto de 15 postes, espaçados por vãos aproximadamente regulares de 48,7m. As medições foram realizadas nos postes 1 e 9, situados em  $x = 684$  m e  $x = 292$  m, referenciados no texto como  $P1$  e  $P9$  respectivamente. Os parâmetros utilizados nas simulações podem ser vistos na Figura 4.27 e na tabela 4.1



**Figura 4.28 – Tensões simuladas para a descarga 9305**



**Figura 4.29 - Tensões simuladas para a descarga 9306**

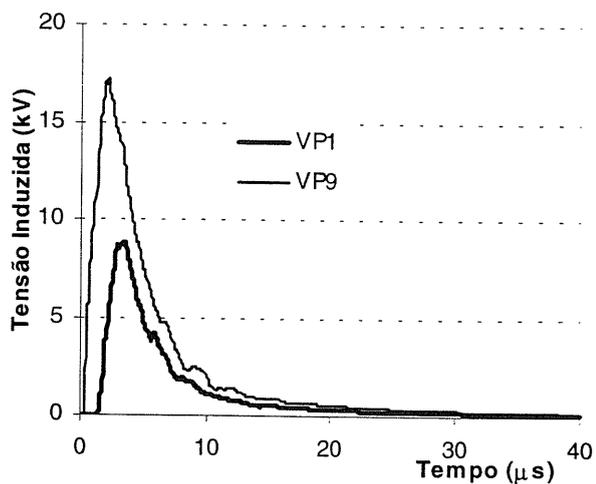


Figura 4.30 - Tensões simuladas para a descarga 9313-2

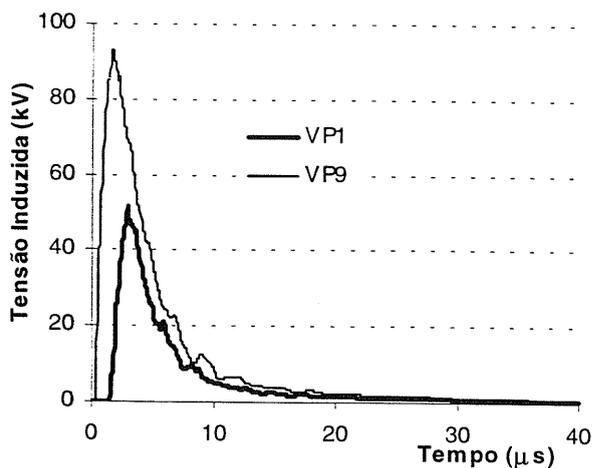


Figura 4.31 - Tensões simuladas para a descarga 9335

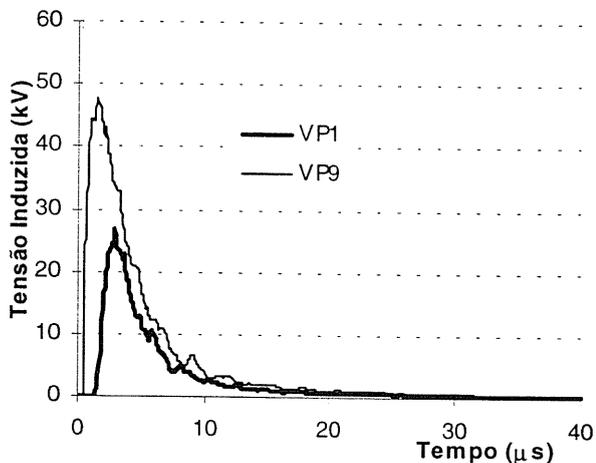


Figura 4.32 - Tensões simuladas para a descarga 9337

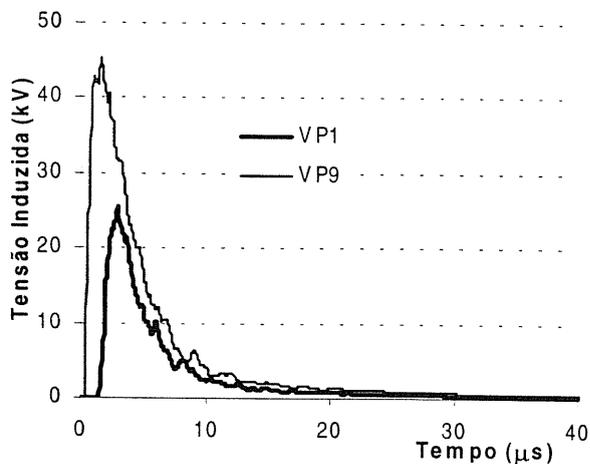


Figura 4.33 - Tensões simuladas para a descarga 9339

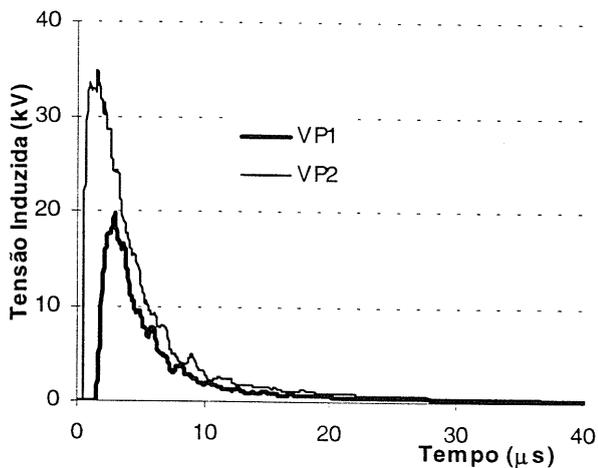


Figura 4.34 - Tensões simuladas para a descarga 9341

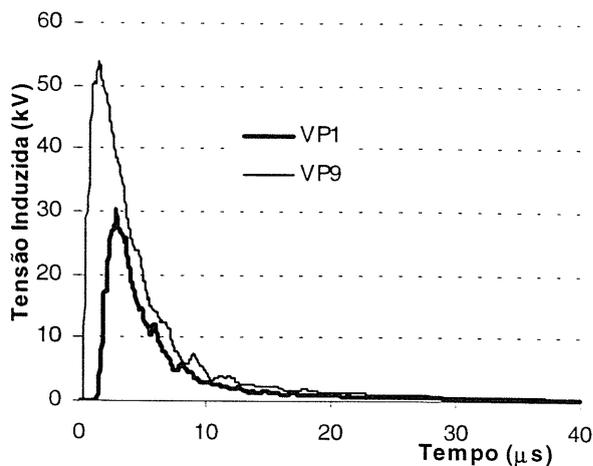


Figura 4.35 - Tensões simuladas para a descarga 9342

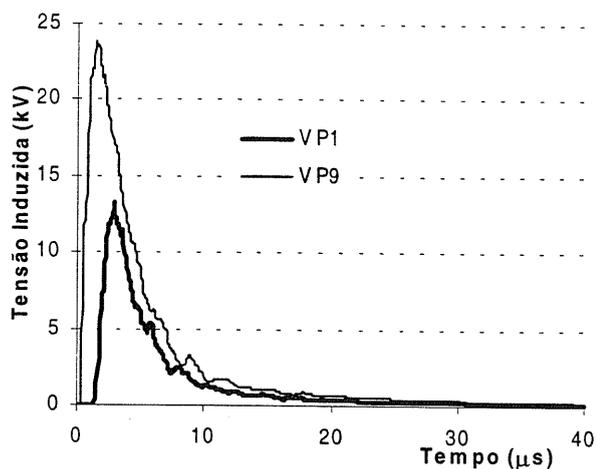


Figura 4.36 - Tensões simuladas para a descarga 9343

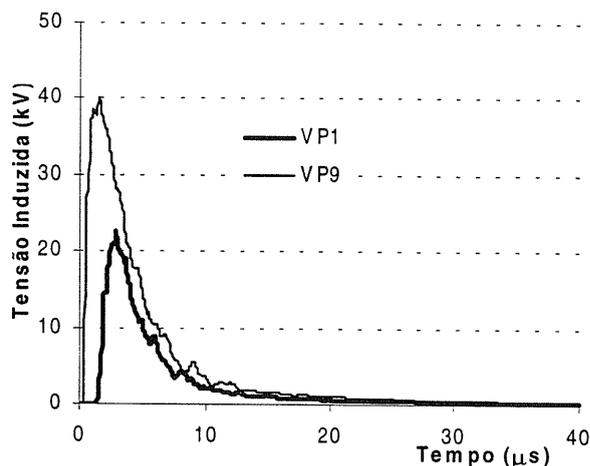


Figura 4.37 - Tensões simuladas para a descarga 9345

É importante observar que a referência [7] não menciona o valor da velocidade da corrente da descarga provocada. Uma busca às referências mostra que valores usualmente associados a esse tipo de evento variam de 100m/μs em [23] a 130m/μs em [33], [45]. Um estudo de sensibilidade com esses valores, não apresentado aqui, mas similar àquele mostrado na tabela 4.1, mostrou que as variações não eram significativas. Optamos, em consequência, por utilizar o valor 120m/μs em todos os cálculos.

A tabela 4.1 faz uma síntese dos cálculos realizados, bem como apresenta os erros relativos entre os valores medidos e calculados nos pontos P1 e P9.

Descarga	Valores Medidos							Valores Calculados			
	Ip(kA)	Tf(μs)	Ic(kA)	Tc(μs)	V(m/μs)	Vp1 <sub>med</sub>	Vp9 <sub>med</sub>	Vp1 <sub>cal</sub>	Erro para Vp1 (%)	Vp9 <sub>cal</sub>	Erro para Vp9 (%)
9305	23,0	1,8	15,0	40,0	120,0	16,7	50,5	22,4	34,1	42,9	-15,0
9306	37,0	1,5	20,0	40,0	120,0	28,9	75,6	41,1	42,2	74,1	-2,0
9313-2	9,6	2,0	4,4	40,0	120,0	12,5	22,2	8,8	-29,6	17,2	-22,5
9320-1	8,7	2,3	5,5	40,0	120,0	12,0	30,0	7,5	-37,5	14,3	-52,3
9335	45,0	1,3	19,0	40,0	120,0	53,1	93,7	51,5	-3,0	93,0	-0,7
9337	22,3	1,0	9,0	40,0	120,0	25,2	47,5	26,5	5,2	47,6	0,2
9339	21,0	0,9	12,0	40,0	120,0	26,7	44,4	25,2	-5,6	45,1	1,6
9341	16,2	0,8	8,0	40,0	120,0	17,0	34,4	19,5	14,7	34,8	1,2
9342	25,2	1,0	12,5	40,0	120,0	29,6	53,3	30,0	1,4	53,8	0,9
9343	11,2	1,1	5,5	40,0	120,0	14,1	25,6	13,2	-6,4	23,7	-7,4
9345	18,7	0,8	8,0	40,0	120,0	23,7	42,2	22,5	-5,1	40,1	-5,0

Tabela 4.1 – Quadro comparativo de valores medidos e calculados de tensões induzidas.

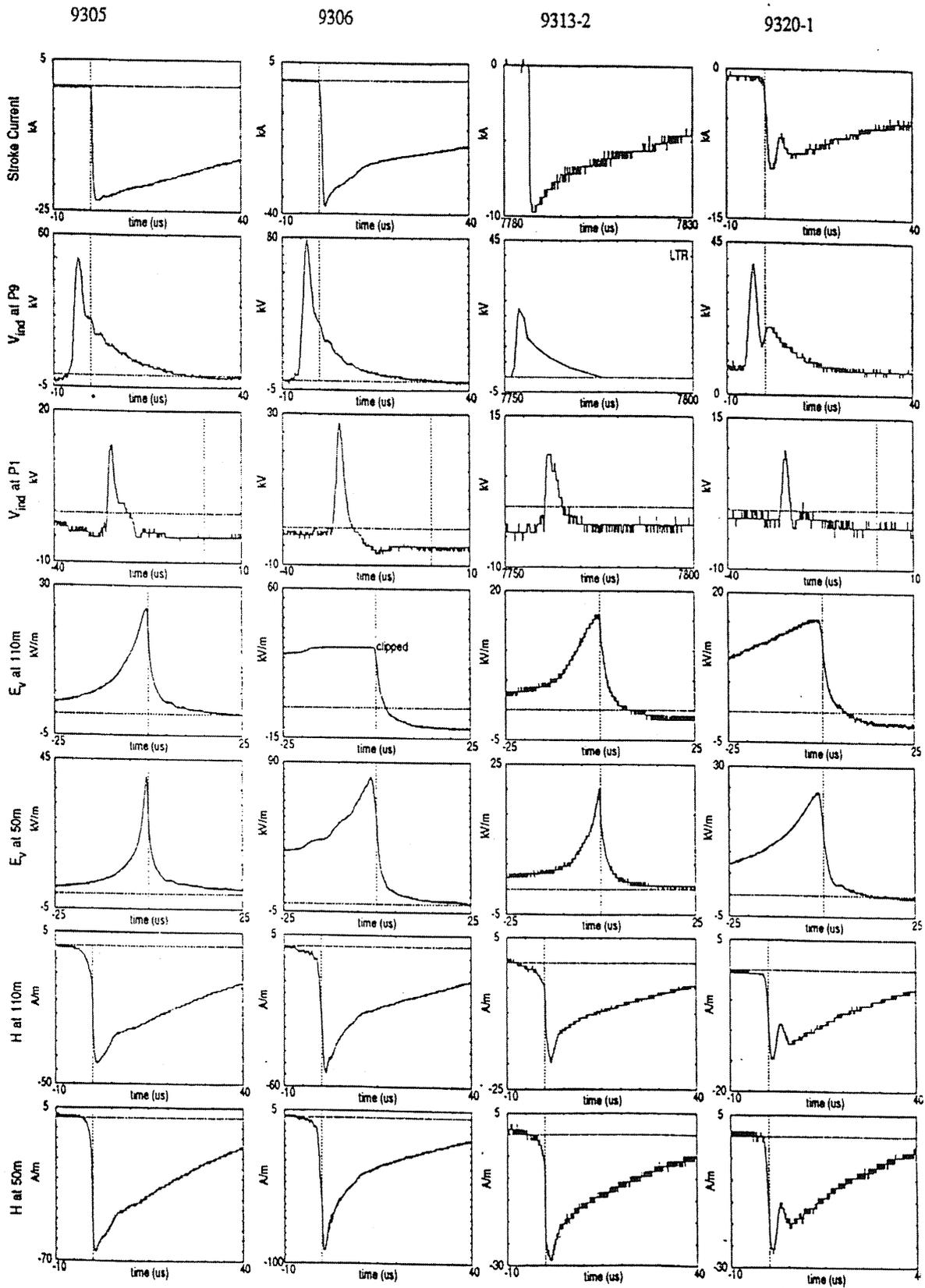


Figura 4.38 – Tensões, correntes e campos medidos para uma série de descargas provocadas conforme [7]

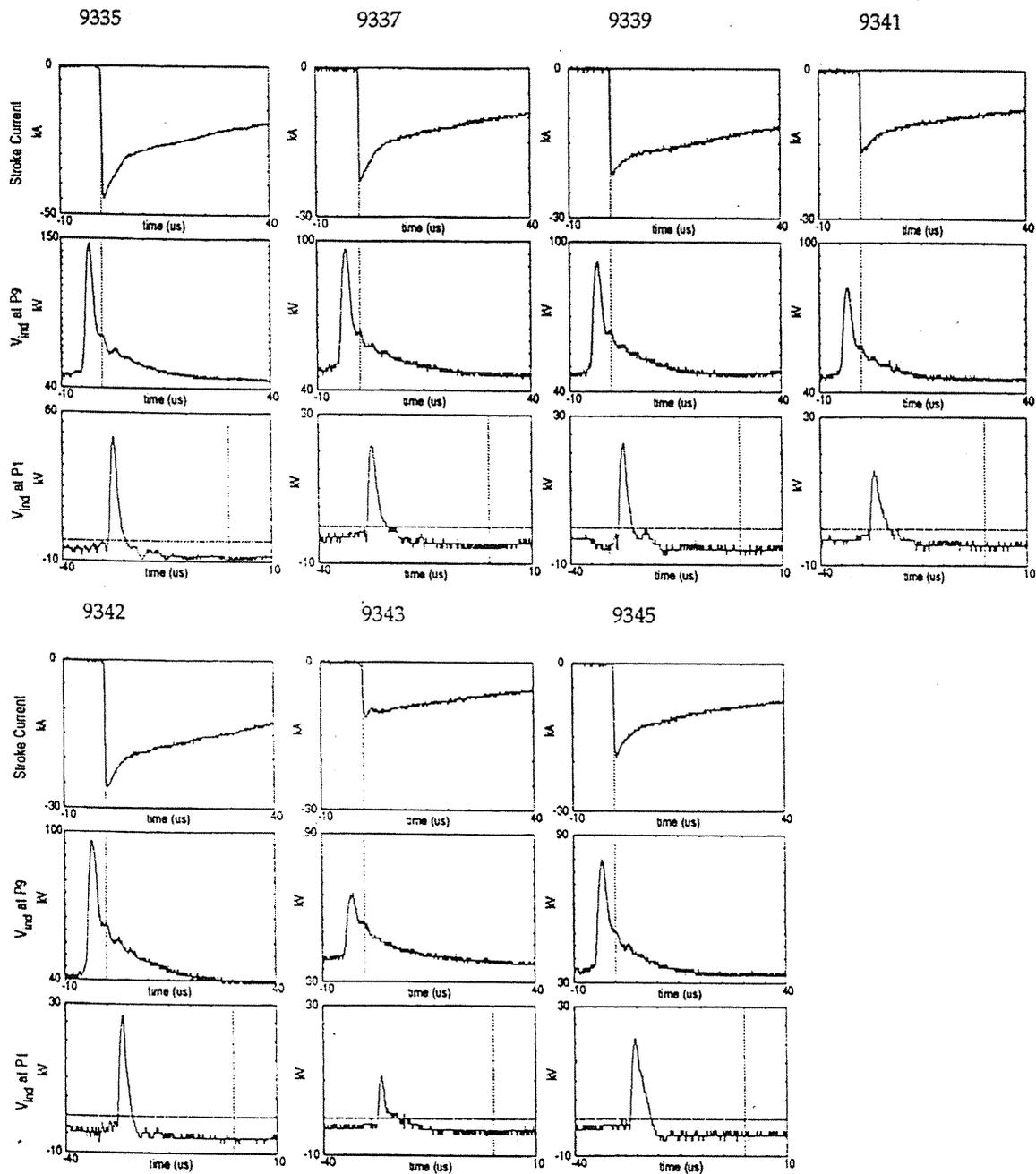


Figura 4.39 – Tensões e correntes medidas para uma série de descargas provocadas conforme [7]

Os resultados apresentados devem ser analisados sob o prisma de que a descarga atmosférica é um fenômeno extremamente complexo, envolvendo parâmetros ainda hoje sob forte investigação experimental e teórica [46], com modelos propostos que ainda suscitam polêmicas entre os pesquisadores [41]. Assim, julgamos razoável a discordância entre os valores medidos e calculados.

#### 4.7 Comparação com medições de campos na linha experimental do EPRI

A referência [7] apresenta medições de campos elétricos e magnéticos para quatro das descargas efetuadas. Utilizando as expressões para o campo eletromagnético dadas no 2, foi montada a tabela 4.2. Como se vê, alguns resultados apresentam grandes discordâncias em relação aos valores medidos. Uma reflexão mostra que a medição de campos é muito mais complexa que a medição de tensões induzidas, esta, por sua própria natureza intrinsecamente mais robusta e menos sujeita a ruídos. Devemos também salientar que, tirar uma conclusão considerando-se apenas três conjuntos de medições de campos seria precipitado.

Valores medidos						
Descarga	$I_p$ (kA)	V(m/us)	E <sub>max</sub> a 50 m (kV/m)	E <sub>max</sub> a 110 m (kV/m)	H <sub>max</sub> a 50 m (A/m)	H <sub>max</sub> a 110 m (A/m)
1-) 9305	23,0	--	39,6	25,0	70,8	42,6
2-) 9306	37,0	--	82,5	39,6	93,1	55,2
3-) 9313-2	9,6	--	20,4	17,0	29,1	20,4
4-) 9320-1	8,7	--	24,4	17,9	26,4	15,1

Valores calculados								
V(m/us)	E <sub>max</sub> a 50 m (kV/m)	E <sub>max</sub> a 110 m (kV/m)	H <sub>max</sub> a 50 m (A/m)	H <sub>max</sub> a 110 m (A/m)	Erro para E <sub>max</sub> a 50 m (%)	Erro para E <sub>max</sub> a 110 m (%)	Erro para H <sub>max</sub> a 50 m (%)	Erro para H <sub>max</sub> a 110 m (%)
1-) 120	54,5	24,0	71,9	31,9	37,6	-4,0	1,6	-25,1
2-) 120	82,2	36,2	115,1	50,8	-0,4	-8,6	23,6	-8,0
3-) 120	20,2	8,9	29,9	13,2	-1,0	-47,6	2,7	-35,3

Tabela 4.2 - Quadro comparativo de valores medidos e calculados de campos.

## Capítulo 5

# Resultados Para Cabos Telefônicos

Os modernos sistemas de telecomunicações operam com potências de baixíssima ordem, fazendo com que os problemas de interferência tornem-se cada vez mais críticos. O problema é ainda agravado pela incorporação de equipamentos eletrônicos sensíveis aos circuitos de telecomunicações, tanto do lado do usuário quanto do lado da concessionária do serviço. Para proteção de tais sistemas é necessário o conhecimento qualitativo e quantitativo das interferências produzidas, para uma correta ação de proteção elétrica, que vem a ser o conjunto de procedimentos e equipamentos a serem utilizados no sistema visando a sua compatibilização com o ambiente eletromagnético

No âmbito da UFMG e fruto de um convênio com o extinto Centro de Pesquisa e Desenvolvimento CPqD/Telebrás, foram realizados, a partir de 1982, diversos estudos [26], [9], [20], [17], [50], [6] visando a compreensão e o equacionamento do processo de indução de tensão em condutores metálicos e cabos de comunicação. Por motivos conjunturais, essas pesquisas foram interrompidas por volta de 1992/93.

Vale ressaltar que ainda hoje o tema é estudado por vários grupos de pesquisa em todo o mundo. O cálculo de tensões induzidas em condutores metálicos pode ser obtido a partir da utilização de diferentes modelos do canal de descarga, diferentes modelagens de campos eletromagnéticos associados com a corrente de retorno e diferentes modelos para o acoplamento campo eletromagnético-linha de transmissão. Pode ainda ser feito no domínio do tempo ou da frequência, que, independente da metodologia, os resultados convergem para uma faixa relativamente estreita. Já o cálculo de tensões induzidas para cabos blindados ou coaxiais, a nosso ver, ainda é pouco contemplado na literatura técnica, atendo-se, na maioria dos casos, à baixa frequência.

Dois problemas atuais, postos em nível mundial, merecem uma atenção especial dos pesquisadores:

- *O aterramento da blindagem do cabo telefônico, tanto no que se refere a posição quanto ao que se refere à forma;*
- *A utilização de dispositivos de proteção contra surtos, que também suscita dúvidas quanto ao tipo de protetor e posição de instalação.*

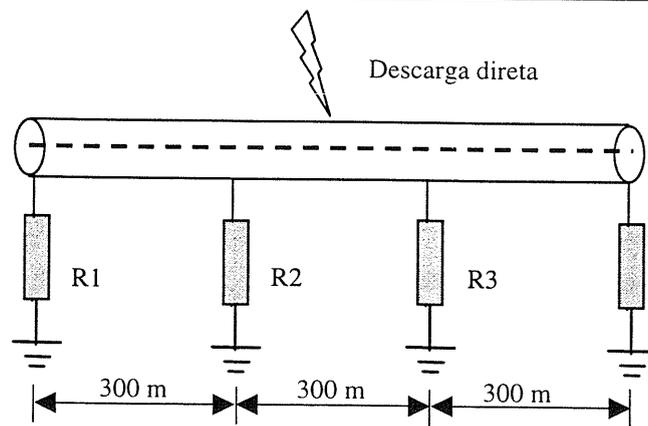
Conforme descrito no anexo B, foi montado em Cachoeira Paulista, SP, o Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas (CIPDA), que objetivava inicialmente o estudo comparativo da eficiência de pára-raios Franklin e de um novo tipo de pára-raios com ação estendida. Para aproveitamento completo de toda a infra-estrutura montada, houve a agregação de diversas instituições de pesquisa, cada uma com um fito particular. Deste modo, estão em andamento ou em fase de implementação nesse centro pesquisas relativas à medição de tensão induzida em linhas aéreas de energia, redes telefônicas, sistemas de proteção contra descarga atmosférica tipo Gaiola de Faraday, modelos reduzidos, etc.

O autor desta tese teve a chance de participar do projeto como membro da equipe de pesquisadores da UFMG, nos meses de novembro e dezembro de 2000 e janeiro de 2001. A intenção era obter dados experimentais que corroborassem a investigação teórica e enriquecessem os resultados apresentados. Infelizmente, por uma conjunção de fatores, principalmente atraso na montagem do experimento e condições atmosféricas não favoráveis, não houve incidência de raios na estação de medição. A vivência nessa pesquisa confirmou que testes sob condições de tempestades e descargas atmosféricas não são fáceis, além de morosos e complexos, exigindo anos para que uma massa adequada de dados possa ser coletada.

Está previsto ainda para 2001 a assinatura de um convênio entre a Fundação CPqD (sucessora do CPqD/Telebrás) e a UFMG, que retoma os estudos paralisados em 1992. Por sua vez, a Fundação CPqD estabeleceu um vínculo de cooperação com a France Télécom R&D, e montou uma completa estrutura para estudo de tensões induzidas em cabos telefônicos aéreos. O rol dos experimentos programados para o CIPDA almeja a solução dos problemas apresentados acima. A equipe da UFMG terá acesso aos resultados dos trabalhos vindouros, de forma que modificações, correções e validações poderão ser feitas no programa desenvolvido.

## 5.1 Simulações para um cabo telefônico aéreo

Em sua dissertação de mestrado, Ferreira [17] obtém alguns resultados de tensões induzidas em um cabo telefônico para o caso de uma corrente circulando na blindagem. Para tanto, foram desenvolvidos dois programas: um para o cálculo de transitórios no domínio do tempo, aplicável ao caso em que a impedância de transferência  $Z_T$  podia ser aproximada pela resistência em corrente contínua da blindagem, e outro que trabalhava no domínio da frequência, para o caso em que  $Z_T$  se tornava uma função da frequência. Devido aos poucos recursos computacionais da época, os resultados ficaram circunscritos ao caso de uma única fonte de corrente injetada diretamente na blindagem, seja na forma de um degrau ou de uma onda  $1,2/50 \mu s$ , representando a incidência de uma descarga direta no cabo. Ainda assim, pela inexistência na bibliografia disponível de resultados similares obtidos por outros programas ou obtidos através de medições, não foi possível o confronto dos valores de tensão obtidos.



**Figura 5.1 – Cabo coaxial atingido por uma descarga direta**

Nosso trabalho pretende resgatar essa idéia de dez anos e estendê-la para o caso de descargas indiretas.

## 5.2 Incidência de uma descarga direta no cabo

Com o intuito de validação do método, consideremos o caso de um cabo coaxial, com blindagem tubular de alumínio, aterrado em vãos regulares, conforme a Figura 5.1. Apresentamos na Figura 5.2 e na Figura 5.3 os resultados obtidos pela referência [17] e pelo SPICE, para, com características dadas abaixo:

- Comprimento do cabo: 900 m;
- Parâmetros geométricos do cabo: raio interno, 6 mm, espessura da blindagem, 0,2 mm;
- Parâmetros constitutivos da blindagem: condutividade,  $3,5 \times 10^7$  S/m; indutância, 1,52  $\mu$ H/m; capacitância, 7,33 pF/m; resistência, 0,04  $\Omega$ /m;  $0,1004$
- Parâmetros constitutivos do cabo: indutância, 0,68  $\mu$ H/m; capacitância, 44,25 pF/m; resistência, 0,004  $\Omega$ /m;

As simulações consideraram uma descarga direta, modelada por uma fonte de corrente 1,2/50  $\mu$ s, valor de pico de 30 kA, conectada entre a terra e o centro da blindagem. Esta foi aterrada de 300 em 300 m, incluindo as extremidades, por resistores de 5, 30 e 100  $\Omega$ . As tensões induzidas foram obtidas em  $x = 900$  m, supondo o condutor interno aberto em ambas as extremidades. As curvas apresentadas mostram apenas uma pequena discordância. As oscilações nas ondas de tensão são devidas não apenas às reflexões de tensão nos terminais abertos do cabo, mas também às reflexões da corrente nos aterramentos da blindagem.

A faixa de frequência na qual pode-se aproximar  $R_{cc}$  por  $Z_T$  depende não só da condutividade  $\sigma$  do material que constitui a blindagem, mas também da espessura  $T$  da mesma. Quanto maior for  $\sigma$ , menor será a faixa de frequência na qual essa aproximação pode ser feita; quanto maior o valor de  $T$ , menor será a faixa de frequência em que  $Z_T$  pode ser aproximada pela resistência de corrente contínua.

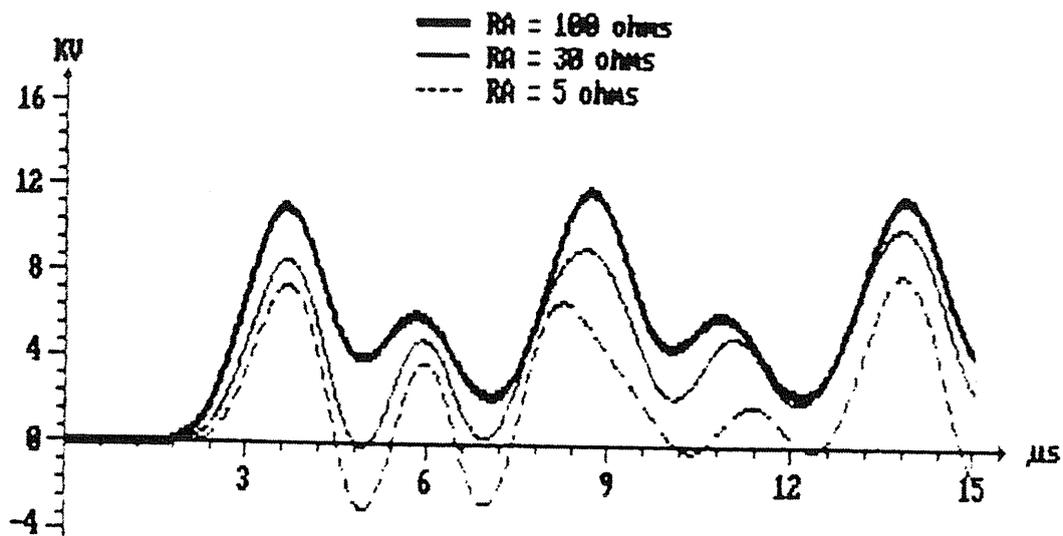


Figura 5.2 – Influência do aterramento da blindagem no valor da tensão induzida (referência [17])

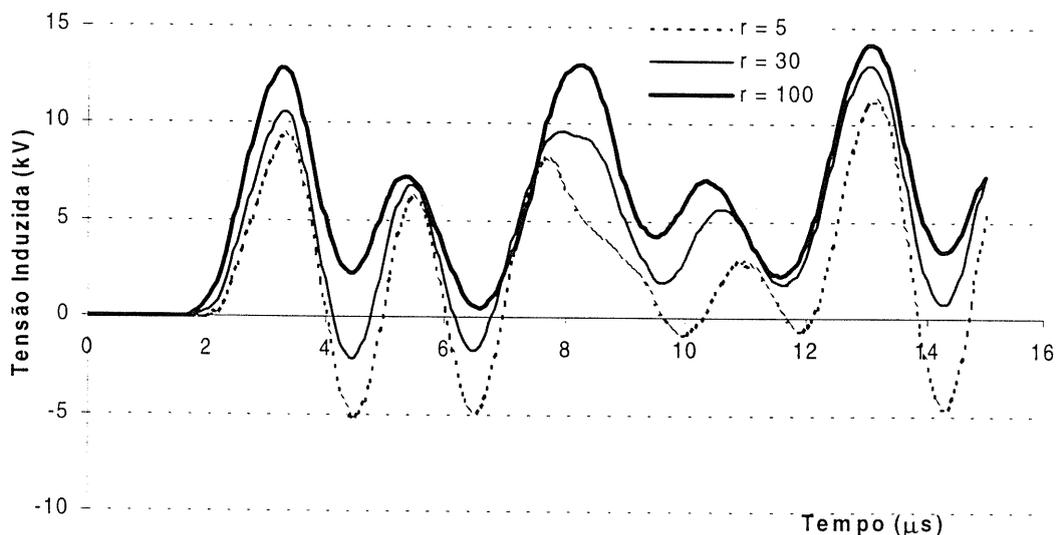


Figura 5.3 - Influência do aterramento da blindagem no valor da tensão induzida ( SPICE)

A referência [17] realiza estudos a partir de um cabo com as características descritas acima, em que o comprimento é alterado para 3000 m e a corrente com a forma de onda  $1,2/50 \mu\text{s}$ , valor de pico 1 kA, é injetada na extremidade esquerda da blindagem, mantida casada na extremidade oposta. Os dois terminais do cabo foram mantidos abertos e as perdas, tanto no circuito da blindagem como no circuito do cabo, foram consideradas desprezíveis. Para essa configuração, as tensões induzidas em  $x = 3000 \text{ m}$ , são apresentadas na Figura 5.4. Pela Figura 5.4b percebe-se uma sensível diferença no valor e na forma de onda da tensão induzida considerando-se  $Z_T = R_{cc}$  e  $Z_T$  variando com a frequência. Portanto, para uma análise adequada de engenharia, devemos ter em mente o limite de validade da aproximação, ou seja,  $\delta \gg T$ , como visto no capítulo 2.

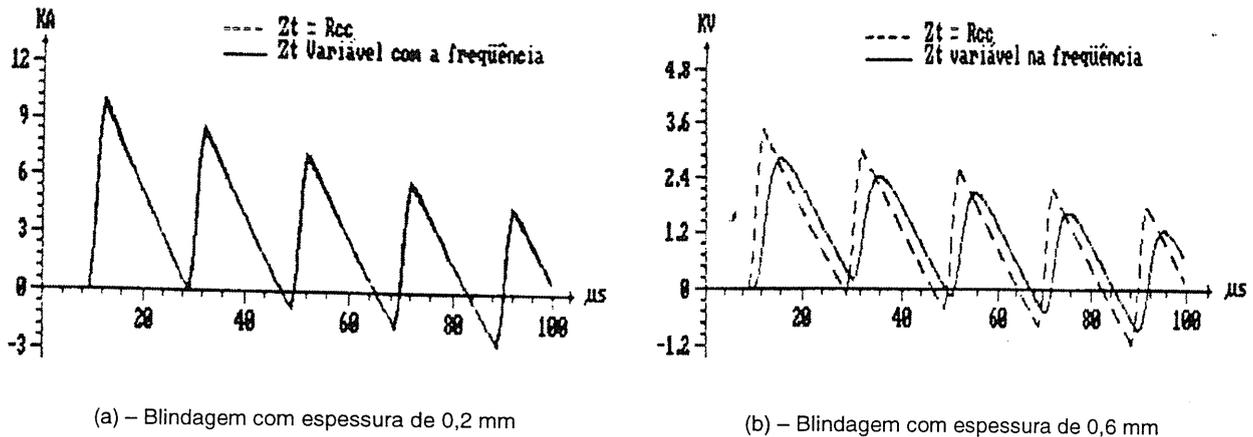


Figura 5.4 – Tensão induzida em um cabo com blindagem de alumínio

### 5.3 Incidência de descargas laterais

Uma vez validado o processo de cálculo, apresentamos a seguir algumas simulações que esclarecem a natureza da tensão induzida em cabos telefônicos por descargas laterais. Todos os cálculos são para um cabo com parâmetros físicos da blindagem e do condutor dados em 5.2. Demais características da linha, mostrada na Figura 5.6, e da descarga são fornecidas a seguir:

- Comprimento do cabo: 1500m;
- Parâmetros da descarga: onda 1,2/50  $\mu$ s, valor de pico de 50 kA, velocidade da corrente de retorno de 120 m/ $\mu$ s;
- Coordenadas da descarga:  $x=750$  m (ponto central),  $y=100$  m;
- Simulação realizada com linha particionada em 30 segmentos.

A Figura 5.6 e a Figura 5.7 mostram os resultados para um caso de referência, em que tanto a blindagem quanto o condutor são casados em suas extremidades e onde não há qualquer aterramento intermediário.  $V_{cx}$  e  $V_{bcx}$  denotam as tensões no condutor interno do cabo coaxial (ou simplesmente condutor) e na blindagem, respectivamente.

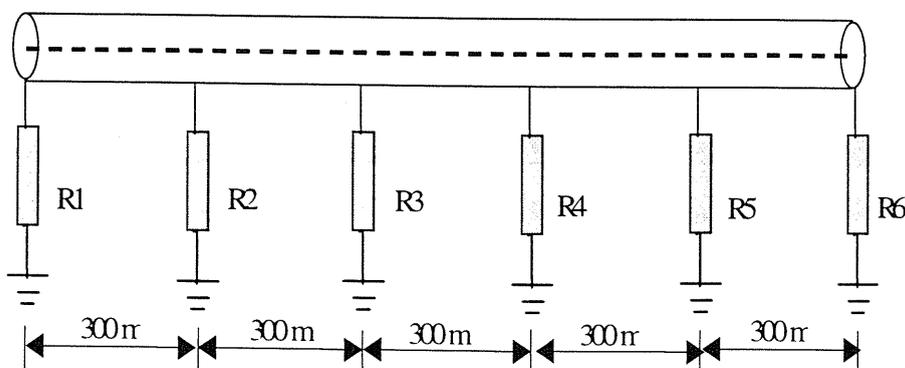


Figura 5.5 – Cabo telefônico com blindagem multiaterrada

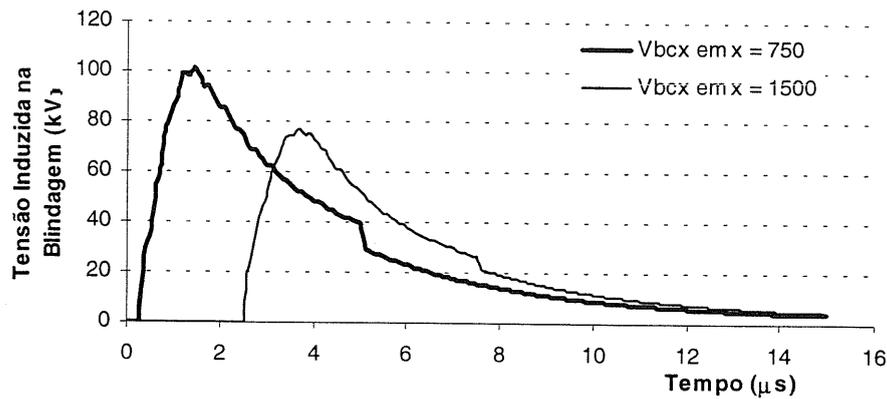


Figura 5.6 – Tensões induzidas na blindagem de um condutor

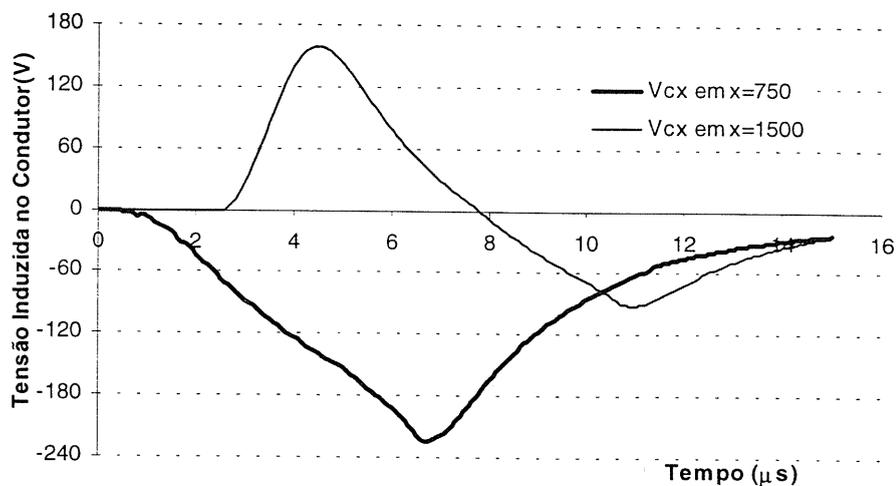


Figura 5.7 – Tensões induzidas no condutor de um cabo coaxial

Dos valores mostrados, pode-se inferir um fator de blindagem da ordem de 454 no centro do condutor ( $x = 750$  m) e de 496 na extremidade ( $x = 1500$  m), o que vale dizer, uma redução bastante significativa.

### 5.3.1 Influência do nível de aterramento da blindagem

Considerou-se nas simulações da Figura 5.8 e da Figura 5.9 o efeito da variação do resistor de aterramento da blindagem, para 4 valores escolhidos de resistência:  $r = 0, 5, 30$  e  $100 \Omega$ . O aterramento foi realizado de 300 em 300 m, através de resistores de mesmo valor para cada caso rodado. As tensões foram observadas em  $x = 750$  m, ponto central não aterrado do cabo, e em  $x = 1500$  m, extremidade aterrada do cabo.

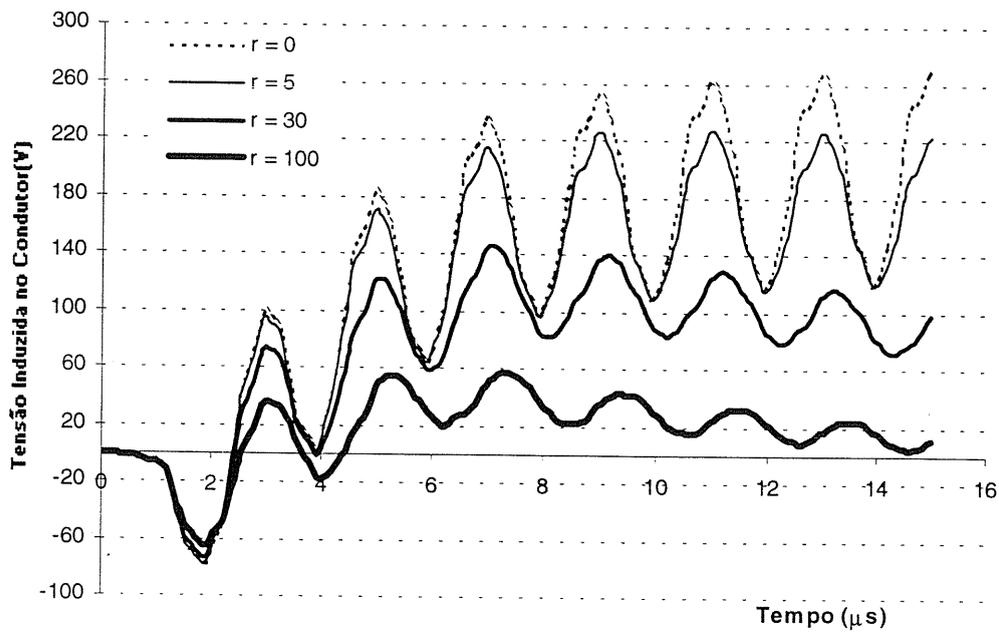


Figura 5.8 – Efeito da variação do aterramento na tensão induzida no condutor em  $x = 750 m$

Pode ser constatado que a tensão no condutor, embora com terminações casadas, sofre inúmeras reflexões, resultado dos múltiplos aterramentos realizados na blindagem.

De forma similar, apresentamos na Figura 5.10 e na Figura 5.11 os efeitos da variação do resistor de aterramento da blindagem para os pontos  $x = 750 m$  e  $x = 1500 m$ , agora tomados na própria blindagem.

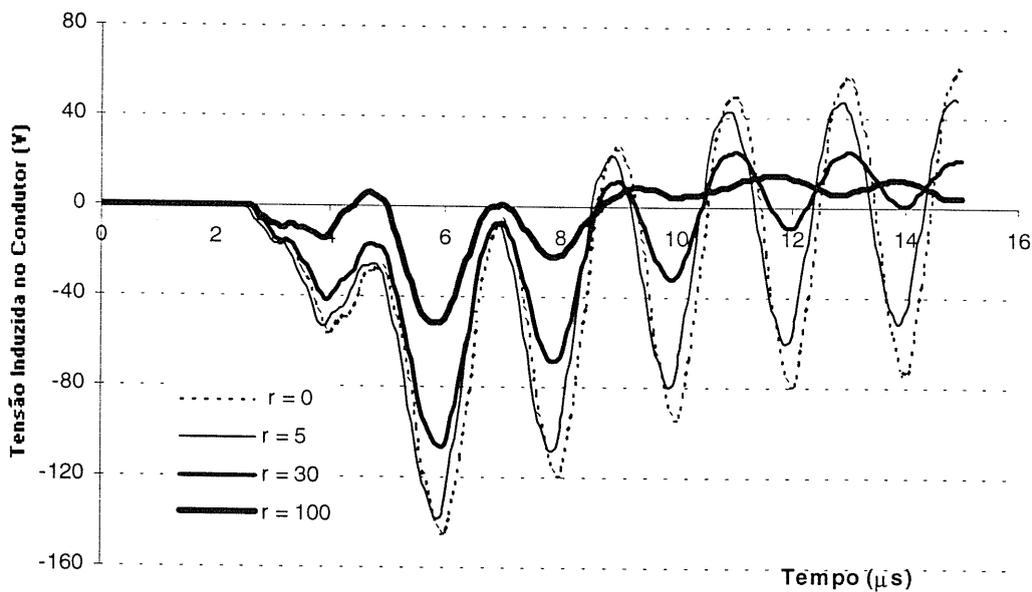


Figura 5.9 – Efeito da variação do aterramento na tensão induzida no condutor em  $x = 1500 m$

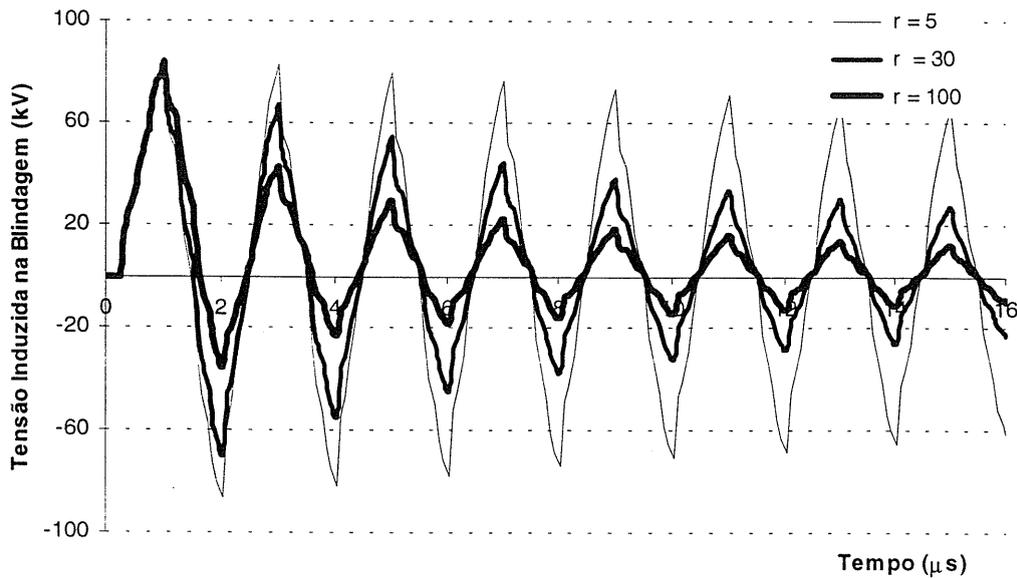


Figura 5.10 - Efeito da variação do aterramento na tensão induzida na blindagem em  $x = 750$  m

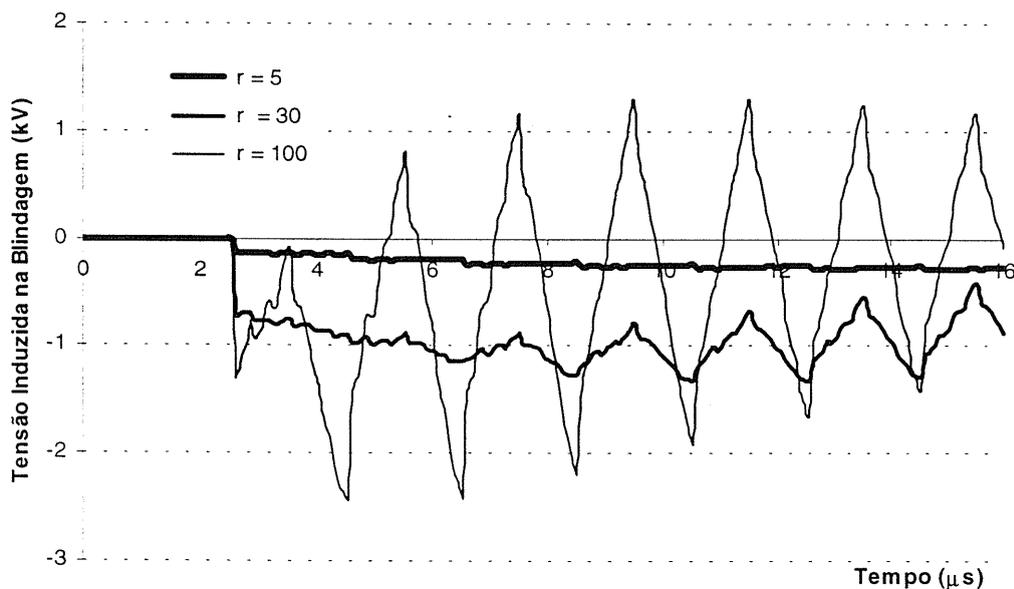
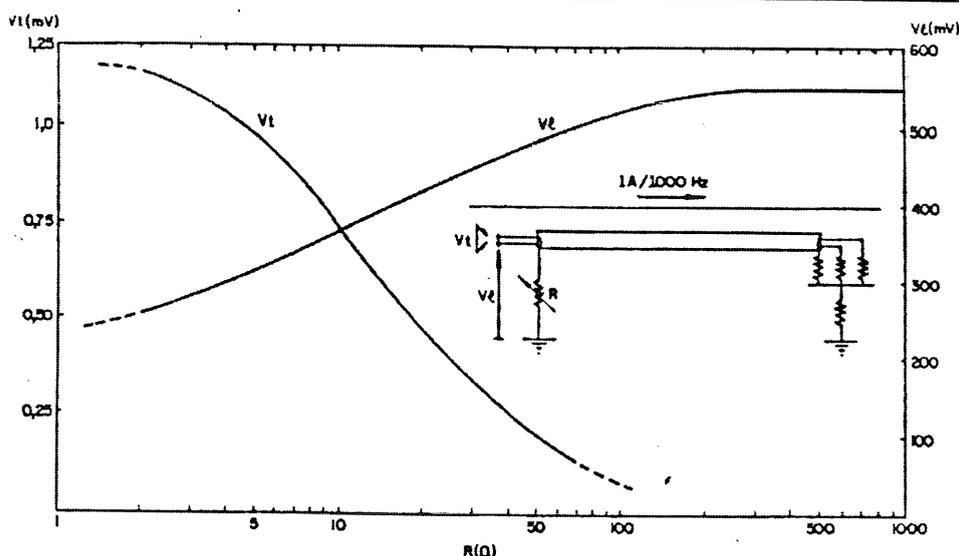


Figura 5.11 - Efeito da variação do aterramento na tensão induzida na blindagem em  $x = 1500$  m

Com base no modelo desenvolvido, evidencia-se que as tensões nas extremidades do condutor e da blindagem ( $x = 1500$  m) comportam-se de maneira distinta com relação ao aterramento da blindagem, como mostra a comparação da Figura 5.9 com a Figura 5.11. Se por um lado, uma menor resistência de aterramento leva a uma menor tensão longitudinal no ponto aterrado, por outro lado, devido ao acoplamento blindagem/condutor tem-se uma maior tensão condutor/blindagem. Como visto no item 3.5, a tensão induzida no condutor interno decorre do transitório provocado por fontes elementares de tensão, inseridas em cada uma das seções em que a linha é subdividida, e dadas pela equação (3.7).



**Figura 5.12 – Dependência das tensões transversal e longitudinal com o aterramento da blindagem: estudo em baixa frequência [6]**

Quando utilizamos resistores de aterramento de menores valores (para um melhor escoamento à terra do surto atmosférico), a corrente circulante na blindagem torna-se maior, fazendo com que as fontes elementares de tensão sejam maiores, o que ocasiona maior tensão entre o condutor interno e a blindagem. Assim, caso um cabo tenha nível de tensão induzida no condutor interno elevado, não é através da melhoria dos aterramentos que se vai corrigir-lo. Pelo contrário, tal medida tende a agravar o problema.

Um estudo realizado em [6] chegou a resultados semelhantes para baixas frequências, como esclarece a Figura 5.12, onde se faz uma corrente de 1000 Hz circular pela blindagem, para diferentes valores do resistor R. As tensões  $V_t$  e  $V_l$  são então obtidas por medição.

A observação das tensões induzidas em um ponto situado entre 2 aterramentos consecutivos ( $x = 750$  m), como visto na Figura 5.8 e na Figura 5.10, mostra que ambas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, aumentam com o decréscimo do valor do resistor de aterramento.

### 5.3.2 Influência da distância entre aterramentos

Nesse estudo, os valores de aterramento da blindagem foram mantidos constantes e iguais a  $30 \Omega$ , enquanto a distância entre aterramentos foi alterada. A Figura 5.13 apresenta os resultados para 3 casos: 1-) blindagem aterrada de 100 em 100 m; 2-) blindagem aterrada de 300 em 300 m; 3-) blindagem aterrada somente nas extremidades.

A comparação entre a Figura 5.9 e a Figura 5.13 mostra que a mudança no valor da tensão induzida é mais sensível à variação no valor da distância entre os aterramentos da blindagem do que à variação no valor das resistências de aterramento.

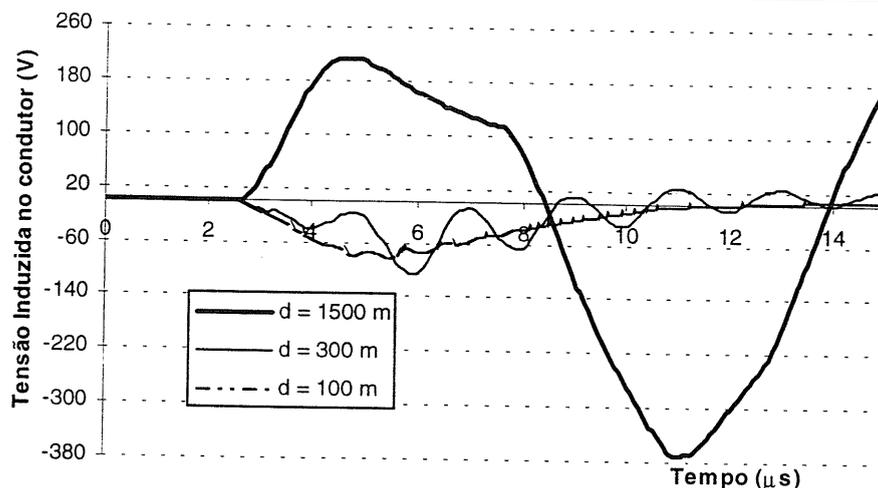


Figura 5.13 – Efeito da variação da distância entre aterramentos na tensão induzida em  $x = 1500$  m

### 5.3.3 Utilização de dispositivos de proteção contra surtos

Dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são amplamente utilizados em circuitos com equipamentos eletrônicos sensíveis e circuitos de telecomunicações. Os dispositivos modernos são, basicamente, constituídos por varistores de óxido metálico ou diodos de avalanche rápidos, cada um com características bem distintas no que se refere a tempo de resposta e capacidade de dissipação da energia do surto. Elementos de atuação rápida possuem, em contrapartida, pequena capacidade de dissipação de energia, o que torna usual a utilização de configurações híbridas, formadas por componentes de tecnologias diferentes. Nessas últimas, existe uma coordenação na operação de cada dispositivo, visando usar da melhor maneira possível, as características de cada um. Um DPS pode ser modelado como uma chave controlada por tensão.

As figuras a seguir mostram a ação de proteção de um DPS formado por 2 diodos Zenner com tensão de ruptura de 50 V, ligados “costa a costa”. A configuração da linha é aquela descrita no item 5.3.1, com o resistor de aterramento  $r = 5 \Omega$ , sendo o DPS instalado alternadamente em  $x = 750$  m e em  $x = 1500$  m, entre o condutor e a blindagem.

As simulações realizadas demonstram a potencialidade do programa. Embora tenha sido utilizado um DPS simples, pode-se usar dispositivos comerciais, desde que se tenha acesso ao circuito.

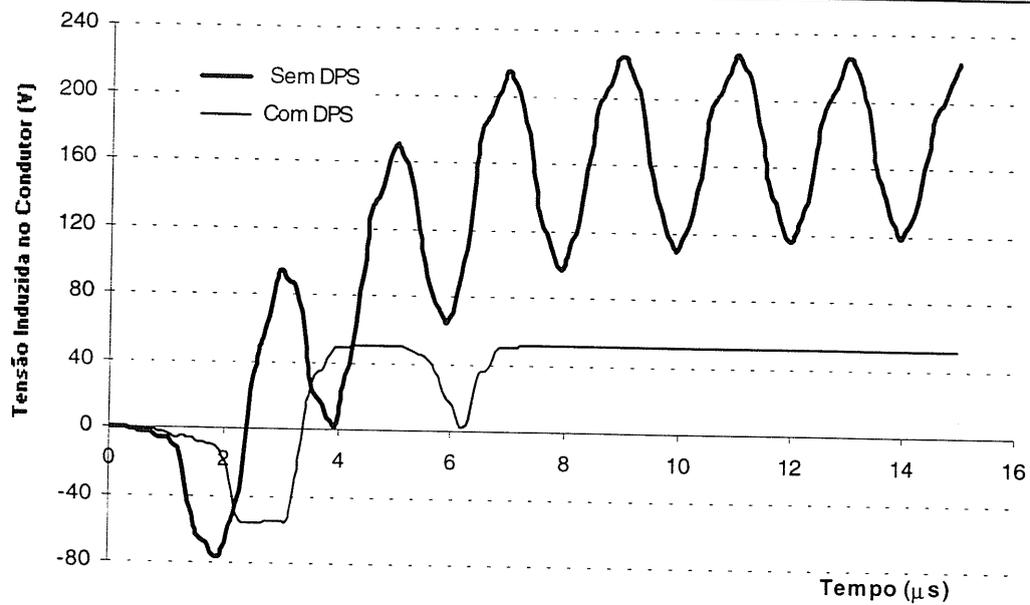


Figura 5.14 – DPS ligado em  $x = 750$  m

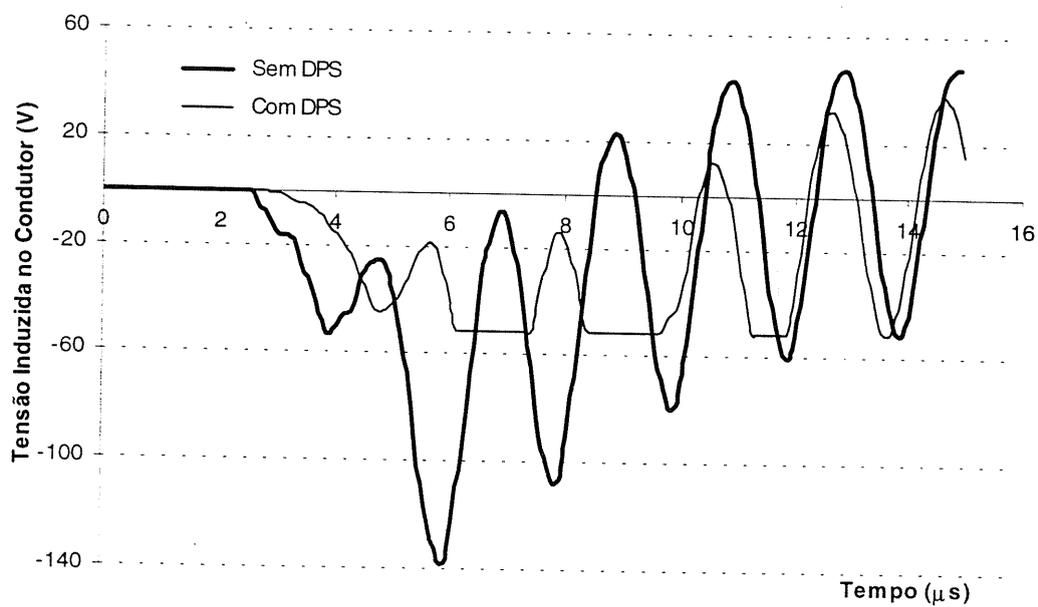


Figura 5.15 – DPS ligado em  $x = 1500$  m

# Capítulo 6

## Conclusões e Proposta de Continuidade

### 6.1 A utilização do SPICE

As inúmeras simulações apresentadas ao longo do texto demonstraram que é viável a utilização do SPICE no cálculo de tensões induzidas. As comparações efetuadas com resultados similares obtidos na literatura permitiram validar o trabalho desenvolvido e estendê-lo para linhas multifilares e cabos telefônicos aéreos.

O SPICE incorpora modelagens de inúmeros componentes de sistemas elétricos e eletrônicos e ainda permite, por parte do usuário, a criação de novos componentes, o que lhe confere grande potencialidade. Uma observação mais perspicaz de suas características permite sua aplicação em cálculos e aplicações a princípio não previstas.

Nosso trabalho permitiu, até o momento, o cálculo de tensões induzidas em linhas multifilares e com aterramentos múltiplos, etapas já alcançadas por outros pesquisadores no âmbito do PPGEE. Permitiu também o mesmo tipo de cálculo em cabos telefônicos, o que ainda não foi visto por nós em trabalhos publicados. A utilização de pára-raios, um elemento essencial em sistemas de energia, bem como de dispositivos de proteção contra surtos, foram temas de algumas simulações realizadas. Os manuais do SPICE são essencialmente voltados para o usuário tradicional, aquele que projeta e simula circuitos a partir da interface gráfica, e dificultam um pouco o trabalho daquele que deseja explorar suas potencialidades na modelagem de novos componentes e aplicações. Podemos afirmar, então que, embora vários resultados importantes tenham sido atingidos, muito tem que ser acrescentado à ferramenta desenvolvida.

### 6.2 Análise dos resultados

Os resultados obtidos são similares àqueles obtidos em outras formulações e comprovaram o acerto da pesquisa. As simulações apresentadas mostraram uma discordância aceitável em relação aos resultados experimentais mas deixam claro que várias modificações ainda podem ser implementadas.

---

### 6.3 O emprego da teoria de Rusck

Nossa metodologia é baseada no trabalho de Rusck, cuja validade e aceitação devem ser realçados. Em todos os questionamentos apresentados sempre se argumentava contra o cálculo matemático envolvido, uma vez que Rusck não apresentou, de forma clara, muitos detalhes da metodologia empregada, deixando sempre margem a esse tipo de dúvida. No entanto, a partir das referências já citadas, pode-se observar todo o rigor matemático aplicado na teoria de Rusck, onde não foi feita qualquer simplificação matemática, mas apenas restrições ao modelo físico da descarga atmosférica.

A mesma variação de campo eletromagnético para os modelos de descarga atmosférica adotados são obtidos quando se utiliza [20]:

- *Um canal de descarga com uma distribuição inicial uniforme de cargas negativas. A corrente de descarga é um degrau e ocorre para anular estas cargas (modelo de Rusck);*
- *Um canal de descarga inicialmente descarregado. A corrente de descarga é injetada na base do canal, no solo, e poderia ser a princípio arbitrária (modelo de Uman).*

No entanto, a condição necessária é que a corrente especificada no segundo modelo seja em forma de degrau.

### 6.4 Proposta de continuidade

De forma a cumprir um objetivo mais amplo, o programa desenvolvido deve ser aprimorado com o intuito de permitir sua aplicação em redes elétricas complexas e em estruturas. Uma vez alcançado esse objetivo, estaremos aptos a analisar aspectos de compatibilidade eletromagnética envolvidos. Deve-se ressaltar que o cálculo de tensões induzidas provocadas por uma descargas indiretas é uma tarefa árdua, já que o fenômeno em análise é a interação entre descarga atmosférica e conjunto de condutores, não havendo a injeção de corrente direta. A quantificação dessas sobretensões envolve a solução de equações de campos eletromagnéticos com fontes distribuídas e com efeitos de propagação em uma configuração tridimensional. É importante no projeto ou estudo de uma edificação com utilização intensiva de eletrônica o conhecimento do nível de tensão induzida, tanto em pontos da rede elétrica como em pontos da rede telefônica, considerando que, além da alimentação elétrica, boa parte dos equipamentos hoje tem uma entrada lógica (entrada de sinais). Essa preocupação se justifica em virtude da utilização em larga escala de equipamentos de elevada susceptibilidade, nos quais a ação direta dos campos eletromagnéticos, as interferências eletromagnéticas resultantes do acoplamento destes campos com os meios condutores e as sobretensões advindas das descargas atmosféricas podem provocar desde operações indevidas até a destruição dos equipamentos e sistemas eletrônicos sensíveis.

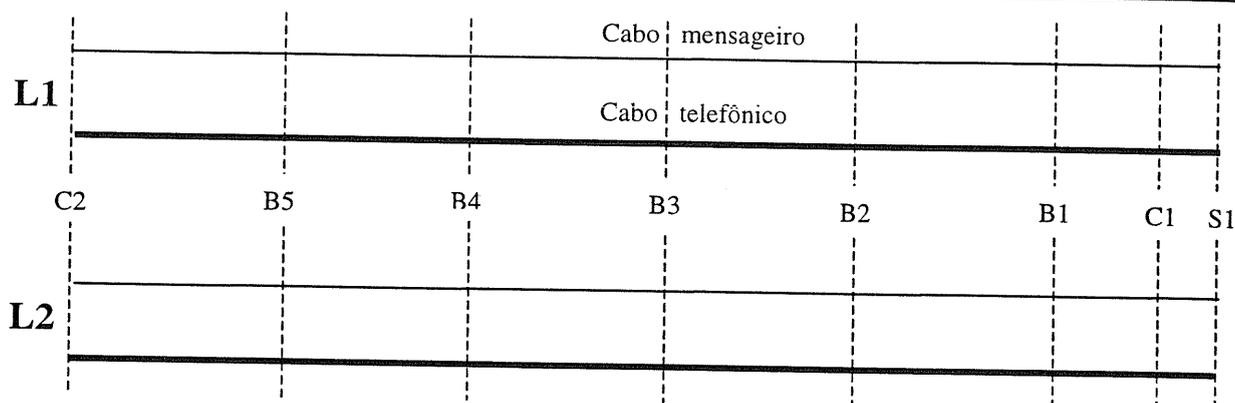


Figura 6.1– Configuração básica das linhas

#### 6.4.1 Linha experimental instalada no CIPDA

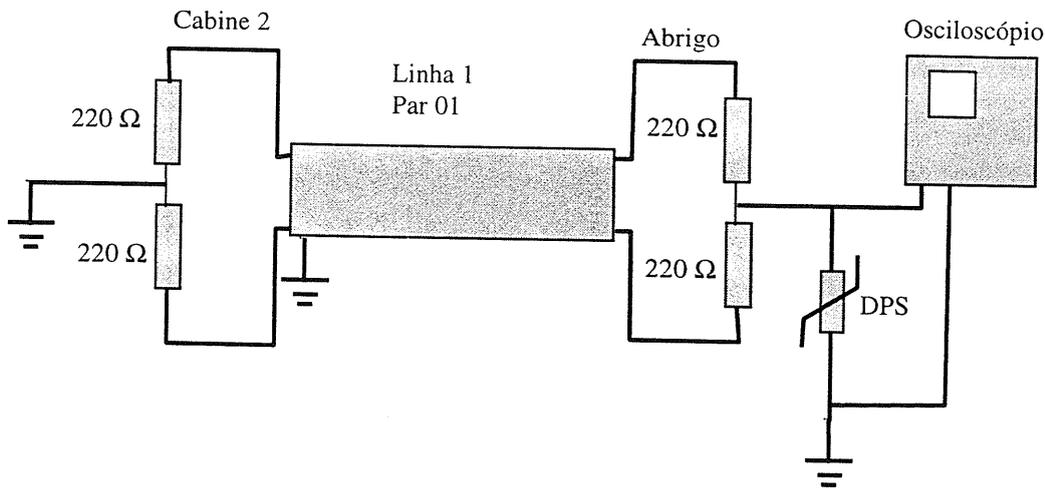
Para a aquisição de dados sobre tensões induzidas em cabos telefônicos, foram instaladas no CIPDA 2 linhas experimentais, de comprimentos 2625 m (linha 1) e 2588 m (linha 2), suportadas por postes distanciados de 6 a 8 m, conforme Figura 6.1.

As linhas foram projetadas com as mesmas características, sendo que a diferença no comprimento se deveu às irregularidades do relevo. O projeto procurou reproduzir as condições de uma linha telefônica real, como aquelas encontradas nas redes telefônicas de concessionárias. A filosofia dos testes consiste em tomar uma das linhas (a de número 2) como referência, de topologia invariante. Todas as modificações previstas em diversos experimentos serão efetuadas na linha 1, de forma que os efeitos das alterações poderão ser comparados à luz das medições simultâneas na linha de referência. A Figura 6.1 mostra a configuração básica das linhas.

Cada linha tem início na cabine C1 e término na cabine C2, passando por um conjunto de caixas de distribuição (B1 a B5). A cabine C1 é interligada a um abrigo S1, onde são realizadas as medições. As cabines e caixas de distribuição são distintas para cada linha, e permitem o acesso total aos pares telefônicos (no caso de cabines) ou parcial (a um conjunto de 10 pares, no caso das caixas), o que permite grande maleabilidade na criação de configurações para testes.

As características das linhas são dadas a seguir:

- Tipo de cabo: CTP-APL, de comprimento 2625 m (linha 1) e 2588 m (linha 2), composto por 50 pares de condutores simétricos, com diâmetro nominal de 0,40 mm e resistência em corrente contínua por condutor de 136  $\Omega$ /km;
- Blindagem do cabo: diâmetro externo de 14,6 mm, espessura de 0,20 mm e, resistência em corrente contínua de 2,9  $\Omega$ /km;
- Cabo mensageiro: diâmetro externo de 4,8 mm e resistência de 10  $\Omega$ /km;
- Altura nominal de instalação: 5,4 m.



**Figura 6.2– Configuração para teste com medição no local do assinante**

A Figura 6.2 apresenta um diagrama esquemático para uma possível configuração de linha e equipamento de medição. A cabine 2 pode representar uma central onde a blindagem é aterrada e o par 01 é também aterrado por um par balanceado de resistores, representando uma típica ponte de alimentação do terminal telefônico.

A outra extremidade do cabo (no abrigo) representa o local do assinante, onde o par é também terminado por resistores balanceados, que simulam o aparelho telefônico, que tipicamente apresenta uma resistência transversal entre 100 e 300  $\Omega$  e uma impedância longitudinal praticamente infinita. Na figura é também mostrada a posição para um dispositivo de proteção contra surtos (DPS).

Pretendemos, assim que houver disponibilização dos registros relativos às medições dos experimentos, realizar uma bateria de simulações, similares àquelas apresentadas no capítulo 5.

#### 6.4.2 Edificação montada no CIPDA

Para avaliação das teorias de cálculo das tensões induzidas procedeu-se à montagem de uma estrutura constituída de postes de madeira e cordoalha de cobre (representando o SPDA) perto da base de lançamento dos foguetes do CIPDA, a uma distância tal que não interferisse na operação da base. A Figura 6.3 ilustra a montagem.

Para medição e análise da tensão induzida, foram construídos dois sistemas elétricos idênticos. Um sistema, denominado "loop 1", foi montado no interior do SPDA e o outro, "loop 2", foi montado no ambiente natural, ao lado do SPDA. A disposição dos dois sistemas elétricos é mostrada na Figura 6.4.

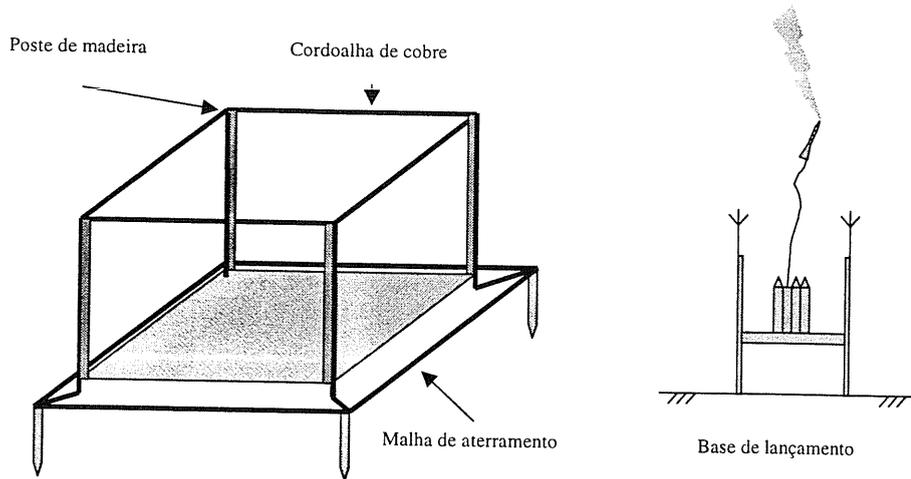


Figura 6.3 – Arranjo do SPDA.

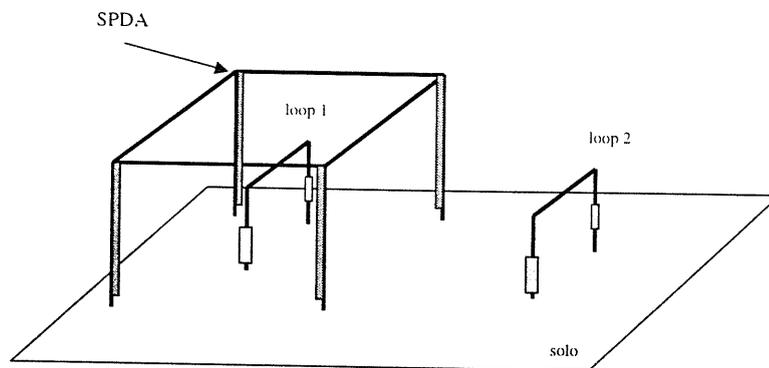


Figura 6.4 – Disposição dos dois “loops” para medição de tensão induzida.

O sistema elétrico para medição da tensão induzida é apresentado na Figura 6.5. O sinal da tensão induzida na saída de cada “loop” é ligado a um conversor eletro-ótico (E/O), que por sua vez é ligado a uma fibra ótica, levada para o interior do container. A saída da fibra ótica é ligada a um conversor ótico-elétrico (O/E) e o sinal é ligado ao osciloscópio, onde é feita a leitura da tensão induzida.

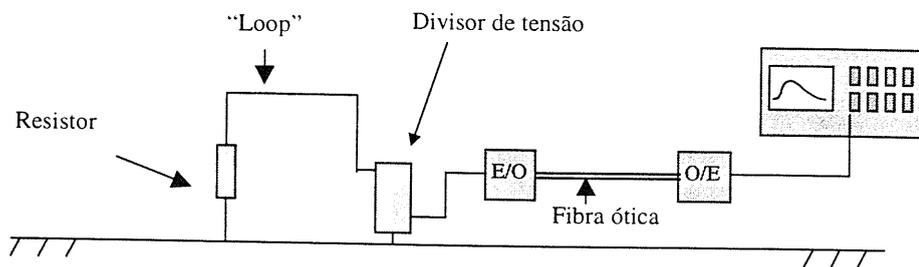
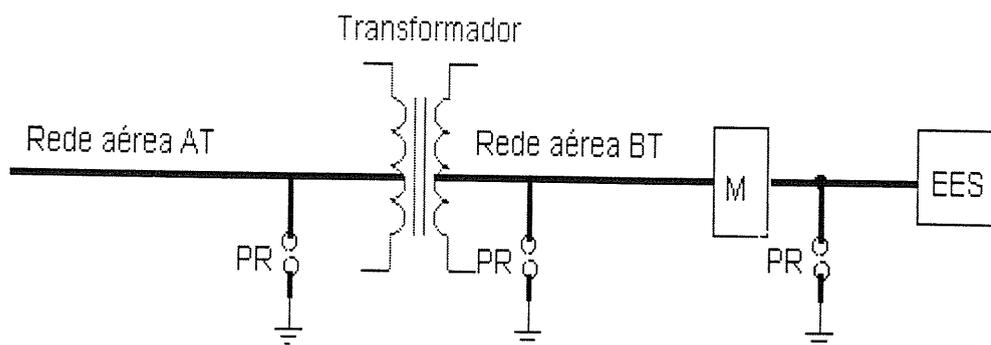


Figura 6.5 – Sistema de medição



**Figura 6.6 - Alimentação elétrica de uma edificação**

### 6.4.3 Alimentação elétrica de uma edificação

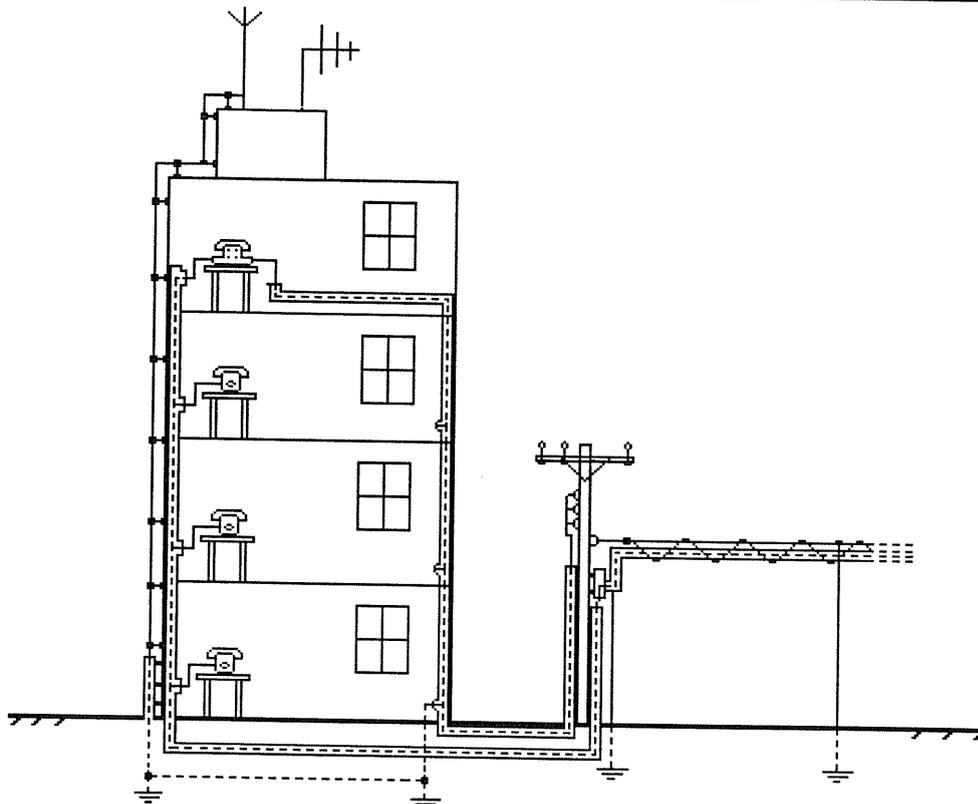
Um fator que também influencia o valor da tensão induzida no interior de uma edificação é a composição do SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas).

Este sistema é bem descrito pela norma brasileira NBR 5419, que por sua vez segue as normas congêneres internacionais. O SPDA se destina primordialmente a proteção contra descargas diretas e é constituído basicamente por uma malha de condutores envolvendo a estrutura (gaiola de Faraday). A distância entre condutores pode levar a uma malha de densidade variável, que equivale a uma “blindagem” adicional dos campos eletromagnéticos gerados por uma descarga. Na realidade, para as frequências associadas com uma descarga, uma gaiola de Faraday só seria efetiva se seus condutores formassem um reticulado com lados de dimensões de alguns centímetros, o que está longe de acontecer em um SPDA.

Neste, os condutores se comportam como linhas de transmissão aterradas, nas quais o nível de tensão induzida é menor, como visto no capítulo 4. Em resumo, uma análise completa deverá levar em conta as características dos cabos (aéreos ou subterrâneos, isolados ou não, blindados ou não, comprimento total, comprimento do trecho isolado) e das estruturas.

A Figura 6.6 e a Figura 6.7 têm por objetivo consolidar as ponderações feitas. A Figura 6.6 mostra um diagrama unifilar simplificado da rede elétrica de alimentação de uma edificação, onde temos:

- *Rede aérea AT: rede de distribuição de energia em alta tensão, típica para o padrão brasileiro;*
- *Rede aérea BT: rede de baixa tensão;*
- *PR: Pára-raios. Normalmente utilizado na AT, pode ser, eventualmente, utilizado na BT e na entrada do consumidor;*
- *M: ponto de medição da energia;*
- *EES: equipamento eletrônico sensível*



**Figura 6.7 - Edificação sujeita à tensão induzida**

A Figura 6.7 apresenta uma edificação onde se deseja calcular as tensões induzidas. Na edificação mostrada podemos ter uma série de fatores influenciando no cálculo da tensão induzida, a exemplo do SPDA, ferragens estruturais e tubulações metálicas. Esse cálculo final, em um ponto de uma instalação predial, implicará, portanto, uma seqüência de operações:

- *Cálculo da tensão induzida na rede aérea de distribuição de energia, tanto no lado de alta tensão quanto no de baixa tensão de possíveis transformadores. Para tanto, é importante analisar o comportamento dos transformadores, dispositivos pára-raios e outros dispositivos na propagação do transitório, até que este alcance um ponto da instalação;*
- *Cálculo da tensão induzida nos condutores da própria instalação*

A composição dos efeitos acima nos levará à tensão induzida final. Os resultados assim obtidos poderão ser confrontados com a imensa massa de dados obtida na referência [22], um estudo em modelo reduzido no qual são gerados campos eletromagnéticos similares ao de uma descarga atmosférica.

Assim, propomos os seguintes estudos:

- *Adaptar a teoria de Rusck para calcular a tensão induzida em condutores instalados no interior de edificações provocada por descargas atmosféricas nas proximidades;*
- *Utilizar a metodologia na comparação com medições a serem realizadas no CIPDA.*

## Referências Bibliográficas

- [1] AGRAWAL, A. K.; PRICE, H.J.; GURBAXARI, S.H.; **Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field**, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, v.22, n.2, p. 119-129, May 1980;
- [2] Andreotti, A., Martinis, U., Verolino, L; **A SPICE Simulation of Lightning Induced Overvoltages on Power Transmission Lines**, Advances in Engineering Software 31, p. 757-762, 2000;
- [3] ANTONINI, G.; CRISTINA, S.; ORLANDI, A.; **A Spice Model for Near-Field Transient Analysis of Ferromagnetic Grids**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.39, n. 2, p. 114-122, May, 1997;
- [4] Antonini, G.; Cristina, S.; Orlandi, A.; **PEEC Modeling of Lightning Protection Systems and Coupling to Coaxial Cables**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, N. 4., november 1998;
- [5] Araújo, A.E.A.; Paulino, J.O.S.; Silva, J.P., **Lightning induced voltage calculation in multi-conductor transmission lines: EMTP simulations**, 12<sup>th</sup> Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG, 25-28 October, Sapporo, Japan, 1999.
- [6] Barbosa, C.F.; **Indução Magnética de Linhas de Energia Elétrica em Linhas de Telecomunicações**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [7] Barker, P.P., Short, T.A., Eybert-Berard, A.R., Berlandis, J. P., **Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11, n. 2, April 1996.
- [8] BERGER, G., **“Lightning Phenomena”**, III Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 5 - 9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994;
- [9] BOAVENTURA, W.C., **Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [10] CAIXETA, G.P.; PISSOLATO, F.J., **“Electromagnetic Field Induced in the Interior of a Building by Lightning”**, 24<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection, p. 335-339, v. 1 United Kingdom, September 14 - 18, 1998;
- [11] Caixeta, G.P.; **Simulação Computacional de Descargas Atmosféricas em Estruturas de Proteção Visando Análises de Compatibilidade Eletromagnética**, Tese (Doutorado em Engenharia Eletrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2000;
- [12] CHOWDHURI, P; **Analysis of Lightning Induced Voltages on Overhead Lines**, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 1, n.4, p. 479-492, January 1989;
- [13] CRISTINA S.; D'AMORE M.; ORLANDI A.; **Lightning Stroke to a Structure Protection System. Part I : Current Distribution Analysis**, Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28 - September 1, 1989;
- [14] CRISTINA S.; ORLANDI A., **“Lightning Channel’s Influence on Currents and Electromagnetic Fields in a Building Struck by Lightning”**. Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 338-342, Washington, DC, USA, August 21 - 23, 1990;
- [15] D'AJUZ, A.; FONSECA, C.S.; CARVALHO, F.M. ; FILHO, J.A.; DIAS, L.E.N.; PEREIRA, M.P.; ESMERALDO, P.C.V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. , **“Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão”**, Editora Universitária Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil, 1987;

- [16] FELIZIANI M.; ORLANDI A.; **Lightning Stroke to a Structure Protection System. Part II : Electromagnetic Field Analysis**, Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28 - September 1, 1989;
- [17] Ferreira, P.H.N; **Tensão Induzida em um Cabo Telefônico por uma Corrente Circulando na sua Blindagem**; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [18] FILHO, A.C.A; Silva, S R; LYRA, R O C; MARTINEZ, C B. **A competitividade entre a utilização de painéis fotovoltaicos e outras formas de energia em sistemas de bombeamento d'água**, III Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, Campos do Jordão, São Paulo, Brasil, 1997;
- [19] FLISOWSKI, Z.; STANCZAK, B.; KUCA, B.; MAZZETTI, C.; ORLANDI, A.; YARMARKIN, M., **Induced Currents and Voltages inside LPS Models due to Lightning Current**, 23<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection, p. 527-532, v. 2, Italy, September 23 - 27, 1996;
- [20] FONSECA, A.F.L., **Cálculo Analítico do Campo Eletromagnético e da Resposta Transitória de uma Linha Monofásica Infinita Devido à Incidência de uma Descarga Atmosférica sobre um Solo de Resistividade Nula**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [21] GREENWOOD, A; **"Electrical Transients in Power Systems"**, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991;
- [22] Grossi, M.L; **Estudo e Construção de uma Antena para Gerar Campos Eletromagnéticos Similares aos Campos Criados por uma Descarga Atmosférica Natural**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2000;
- [23] Jankov, V.; **Estimation of the Maximal Voltage induced on an Overhead Line due to the Nearby Lightning**, IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 12, n.1, pp. 315-324, January 1997;
- [24] KRAUS, J.D.; CARVER, K.R., **"Eletromagnetismo"**, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 1978;
- [25] Laan, P.C.T.; Deursen, P.J.; **Reliable Protection of Electronics against Lightning: Some Practical Applications**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, N. 4., november 1998;
- [26] LOPES, I.J.S., **Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [27] MASTER, M.J; UMAN, M.A; **Lightning induced voltages on power lines: theory**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 103, n.9, p. 2502-2518, september 1984;
- [28] Montandon, E.; Rubinstein, M.; **Some Observations on the Protection of Buildings against the Induced Effects of Lightning**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, N. 4., november 1998;
- [29] MOREIRA, A.F; **Interface para controle de acionamentos elétricos: Aplicação a um conversor monofásico/trifásico**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, 1999;
- [30] Naidu, S.R., **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**, Editora GRAFSET, Campina Grande, Brasil, 1985;
- [31] Nucci, C. A., Ianoz, M., Rachidi, F., Rubinstein, M., Tesche, F.M., Uman, M.A. e Mazzetti C, **Modelling of lightning-induced voltages on overhead lines: recent developments**, EMC'94 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, September 13-16, 1994;
- [32] Nucci, C. A.; Diendorfer, G.; Uman, M.A.; Rachidi, F.; Ianoz, M.; Mazzetti C. **Lightning Return Stroke Current Models with Specified Channel-Base Current: A Review and Comparison**. Journal of Geophysical Research, v.95, n°12, November 20, 1990 ;
- [33] Nucci, C. Al.; Rachidi, Farhad; Ianoz, Michel V. Mazzetti Carlo. **Lightning; Induced Voltages on overhead lines**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 35, February, 1993;

- [34] Nucci, C.A., **Lightning induced voltage on overhead distribution lines( with special reference to low-voltage networks )**, IV SIPDA – IV International Seminar on Lightning Protection , São Paulo, Brasil, 8-12 September, 1997.
- [35] Oliveira, T.A S; **Lightning Induced Voltage Calculation on Electric Lines By Using Pspice**, ICLP 2000 – Internacional Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000;
- [36] ORLANDI A.; SCHIETROMA F., “**Attenuation by Lightning Protection System of Induced Voltages due to Direct Strikes to a Building**”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 1, p. 43-50, February 1996;
- [37] PAUL, C.R, Nasar, S.A; **Introduction to Electromagnetic Fields**, McGraw-Hill, New York, 1987;
- [38] PAUL, C.R; **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1994;
- [39] PAUL, C.R; **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, John Wiley Interscience, New York, 1992;
- [40] PAULINO, J.O.S.; **Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes elétricas: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP; Estudo da influência das perdas na linha**, Tese (Concurso Público para Professor Titular), Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 1994;
- [41] Paulino, J.O.S.; **Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas atmosféricas**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, 1994;
- [42] Piantini, A.; **Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas Indiretas em Linhas Aéreas, Rurais e Urbanas, Considerando Diferentes Métodos de Proteção- Modelagens Teórica e Experimental e Aplicação ao Cálculo de Interrupções**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1997;
- [43] **Pspice, The Design Center. Analysis, - Reference Manual**, Microsim Corp., Julho 1992;
- [44] Rachidi, Farhad, Nucci, Carlo Alberto, Ianoz, Michel V. e Mazzetti Carlo. **Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines**, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 38. n. 3, August 1996;
- [45] Rakov, V.A.; **Lightning Properties from triggered Lightning experiments at Camp-Blanding**, Florida, 1997-1999;
- [46] Rakov, Vladimir A.; Uman, Martin A.; **Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects os Their Application**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 40, n° 4, november, 1998;
- [47] RASHID, M. H; **Spice for Power Electronics and Electric Power**, Prentice Hall, New Jersey, 1993;
- [48] RoyChowdhury, J.S; Pederson, D.O; **Efficient Transient Simulation of Lossy Interconnect**, Design Automation Conference, 1991;
- [49] RUSCK, S., **Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks**, Doctor's Thesis, Trans. of Royal Institute of Technology, Stockolm, 1957;
- [50] Santos, I.M.; **Modelamento e Cálculo de Indução Magnética de Linha de Energia Elétrica em Linha Telefônica**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- [51] Sartori, A.F.; **Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética em Estruturas Atingidas por Descargas Atmosféricas**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999;
- [52] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J. R., “**Determinação dos Efeitos Resultantes de Descargas Atmosféricas Diretas em Edificações**”, IV International Seminar on Lightning Protection, p. 113-118, São Paulo, Brasil, September 8 - 12, 1997;

- [53] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J. R., “**Evaluation of Electromagnetic Environment around a Structure during a Lightning Stroke**”. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 746-749, Rome, Italy, September 13 - 16, 1994;
- [54] SARTORI, C.A.F.; CARDOSO, J. R., “**Lightning Performance of High and Low Buildings**”. V International Symposium on Lightning Protection, p. 247-250, São Paulo, Brazil, May 17 - 21, 1999;
- [55] Silva, J.P.; Araújo, A.E.A.; Paulino, J.O.S.; “**Implementation of the Rusck’s Theory of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines in the EMTP-Phase and Neutral Systems**”. V International Symposium on Lightning Protection – V SIPDA, pp. 225-228, São Paulo, Brazil, 1999;
- [56] Silva, J.P.; **Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001;
- [57] SMOLKE, M.; ENGELMANN, E.. “**Analysis and Simulation of the Magnetic Field in Lightning Current - Carrying Structures**”. IX International Symposium on High Voltage Engineering, p. 8345-1 8345-4, v. 8, Austria, August 28 - September 1, 1995;
- [58] Stansberry, R.A.; Protecting Distribution Circuits: **Overhead Shield Wire versus Lightning Surge Arresters**. Transmission & Distribution, v.4, n.4, p.52-62, abril 1991;
- [59] TRIGINELLI, W.A.C.; CARVALHO, A.M.; DINIZ, J.H.; CHERCHIGLIA, L.C.L., “**Descargas Atmosféricas Principais Parâmetros Aplicáveis a Estudos de Engenharia**”, III Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 5 - 9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.
- [60] Tripathi, V.K; Rettig, J.B; **A SPICE Model for Multiple Coupled Microstrips and other Transmission Lines**, IEEE MTT-S Internal MicroWave Symposium Digest, 1985;
- [61] UMAN, M.A., “**Lightning**”, Dover Publications, Inc., New York, 1984;
- [62] UMAN, M.A., “**Natural Lightning**”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, May/June, 1994;
- [63] Vance, E.F.; **Coupling to Shielded Cables**, John Wiley & Sons, Inc, New York,1978;
- [64] WORKING GROUP REPORT; **Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines**. IEEE Transactions on Power Delivery, v.5, n.3, p. 1408-1417, July 1990;
- [65] INTERNET: <http://www.weather-photography.com/lightning>
-

## Nomenclatura

- $r_0$  - Menor distância entre o canal e o ponto de observação de campo;  
 $r$  - Distância de um ponto genérico do canal ao ponto de observação de campo;  
 $L$  - 1-) Comprimento do canal de descarga;  
       2-) Indutância por unidade de comprimento;  
 $h$  - Altura do condutor de uma linha de transmissão;  
 $s$  - Posição do elemento  $ds$  da fonte, a qual coincide com o eixo  $z$ ;  
 $q(s,t)$  - Carga por unidade de comprimento distribuída ao longo do canal de descarga;  
 $I(s,t)$  - Corrente que viaja pelo canal como função do processo de anulação de  $q(z,t)$ ;  
 $I_0$  - 1-) Valor de pico da corrente de retorno;  
       2-) Corrente total na blindagem de um cabo coaxial;  
 $v$  - Velocidade de propagação da corrente no canal;  
 $x,y,z$  - Coordenadas retangulares;  
 $\hat{z}$  - Vetor unitário da direção  $z$ ;  
 $\hat{\phi}$  - Vetor unitário da direção  $\phi$  em coordenadas cilíndricas;  
 $V_i$  - Potencial escalar indutor;  
 $\vec{A}_i$  - Potencial vetor magnético indutor;  
 $\vec{E}_i$  - Campo elétrico indutor;  
 $v_0$  - Velocidade da luz no vácuo;  
 $\mu_0$  - Permeabilidade do espaço livre;  
 $\epsilon_0$  - Permissividade do espaço livre;  
 $\vec{E}_V$  - Componente originado no potencial escalar (campo elétrico conservativo);  
 $\vec{E}_A$  - Componente originado no potencial vetor magnético (campo elétrico não conservativo);  
 $V_{cx}$  - Tensão induzida no condutor interno de um cabo coaxial;  
 $V_{bcx}$  - Tensão induzida na blindagem de um cabo coaxial;  
 $V_{nc}$  - tensão induzida devido ao componente não conservativo do campo;  
 $I_c$  - fonte de corrente associada ao campo conservativo;  
 $R_d$  - resistor em uma descontinuidade;  
 $I_{ncd}$  - fonte de corrente associada ao campo não conservativo em pontos com descontinuidade;  
 $I_{nc}$  - fonte de corrente associada ao campo não conservativo em pontos onde não há descontinuidade.  
 $Z_0$  - Impedância intrínseca do canal de descarga;  
 $Z_c$  - Impedância característica da linha;  
 $Z_T$  - Impedância de transferência de um cabo coaxial;  
 $Y_T$  - Admitância de transferência de um cabo coaxial;  
 $L_m$  - Indutância mútua;

---

$C_m$  – Capacitância mútua;

$E_l$  - Campo elétrico longitudinal na blindagem de um cabo coaxial;

$I_b$  - Corrente que circula na blindagem de um cabo coaxial;

R, L, G, C – Parâmetros da linha por unidade de comprimento;

$a$  - Raio interno da blindagem de um cabo coaxial;

$T$  - Espessura da blindagem de um cabo coaxial;

$\sigma$  - Condutividade do material da blindagem de um cabo coaxial;

$\delta$  - Profundidade de penetração;

$R_{cc}$  - Resistência em corrente contínua da blindagem por unidade de comprimento;

$T_v$  - Matriz de transformação modal para tensão;

$T_I$  - Matriz de transformação modal para corrente;

H- fonte de tensão controlada por corrente;

SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas;

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos;

CEM – Compatibilidade Eletromagnética;

CIPDA – Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas.

---



```

%
for nl=1:ncond
  for nc=1:ncond
    if (nl<=nc)
      fprintf(fid, '.param L%i%i = {%e}\n', nl, nc, lm(nl, nc));
    end
  end
end
%
for nl=1:ncond
  for nc=1:ncond
    if (nl<=nc)
      fprintf(fid, '.param C%i%i = {%e}\n', nl, nc, cm(nl, nc));
    end
  end
end
%
for kc=1:ncond
  fprintf(fid, '.param y%i = {%f} \n', kc, yzr(kc, 1));
  fprintf(fid, '.param h%i = {%f} \n', kc, yzr(kc, 2));
  fprintf(fid, '.param r%i = {%e} \n', kc, yzr(kc, 3));
  fprintf(fid, '.param dr%i = {yraio-y%i} \n', kc, kc);
  fprintf(fid, '.param zc%i = {%f} \n', kc, zc(kc, kc));
end
%
fprintf(fid, '.param dr = {yraio-y1} \n');
fprintf(fid, '.param Rp = {2*Dx*RLT/4} ; Perda para um trecho 2Dx\n');
fprintf(fid, '.param vo = {3e8} ; Velocidade da luz no vácuo \n');
fprintf(fid, '.param dx = {11/nseg} \n');
fprintf(fid, '.param nr = {(xraio/dx)+1} ; Local do raio (função da fonte)\n');
fprintf(fid, '.param fnum = {60*V*dx}\n');
fprintf(fid, '.param fden = {1-(V/vo)**2}\n');
fprintf(fid, '.param k = {ip/tf} \n');
fprintf(fid, '.param a = {(ip-ic)/(tf-tc)} \n');
fprintf(fid, '.param b = {ip-a*tf} \n');
fprintf(fid, '.param pi = {3.14159265} \n');
fprintf(fid, '*\n* Configuração do Circuito\n*\n');
fprintf(fid, '* FC - Fonte de corrente para campo conservativo\n');
fprintf(fid, '* FN - Fonte de corrente para campo não conservativo\n');
fprintf(fid, '* FD - Fonte de corrente nas descontinuidades\n');
%
for kc=1:ncond % Estabelece, para cada condutor, o conjunto de fontes.
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #%i - Fontes de corrente para o campo conservativo\n*\n', kc);
%
for kf=1:nf
  fprintf(fid, 'GFC%i_C%i 0 FC%i_C%i VALUE = {if(time <
tf, \n+((fnum*k*time*h%i*time)/(zc%i*((V*time)**2 + fden*\n+(dr%i**2+((Nr-
%i)*dx)**2))**1.5)}*\n+stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo), \n', kf, kc, kf, kc, kc, kc, kc, kf, kc, kf);
  fprintf(fid, '\n+((fnum*(a*time+b)*h%i*time)/(zc%i*((V*time)**2 + fden*\n+(dr%i**2+((Nr-
%i)*dx)**2))**1.5)}*\n+stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo))\n*\n', kc, kc, kc, kf, kc, kf);
end
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #%i Fontes de corrente para o campo não conservativo\n*\n', kc);
%
for kf=1:nf
  fprintf(fid, 'R1_FN%i_C%i FC%i_C%i FN%i_C%i 1E9\n', kf, kc, kf, kc, kf, kc);
  fprintf(fid, 'R2_FN%i_C%i FN%i_C%i 0 1\n*\n', kf, kc, kf, kc);
  fprintf(fid, 'GFN%i_C%i 0 FN%i_C%i VALUE={if(time <tf, \n+ -
(60*k*time*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-
%i)*dx)**2) + ((nr-
%i)*dx)**2)))*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo), \n', kf, kc, kf, kc, kc, kf, kc, kf, kc, kf);
  fprintf(fid, '\n+ -(60*(a*time+b)*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-
%i)*dx)**2) + ((nr-
%i)*dx)**2)))*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo))\n*\n', kc, kc, kf, kc, kf, kc, kf);
end
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #%i Fontes de corrente para as descontinuidades
(aterramentos)\n*\n', kc);
%
% Descontinuidade no início da linha
%
fprintf(fid, 'GFD1_C%i 0 FC1_C%i VALUE={if(time < tf, \n+ -(60*k*time*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 +
((nr-1)*dx)**2) + ((nr-1)*dx)**2)))*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-1)*dx)**2)/vo), \n', kc, kc, kc, kc, kc, kc, kc);
fprintf(fid, '\n+ -(60*(a*time+b)*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-1)*dx)**2) + ((nr-1)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr%i**2 + ((nr-1)*dx)**2)))/Rai_C%i)*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-1)*dx)**2)/vo))\n*\n', kc, kc, kc, kc, kc);
%

```

```

% Descontinuidades intermediárias
%
for kr=1:nrint
  if fd(kr,1)==kc
    kf=round((fd(kr,2)/dx)+1);
    rd=fd(kr,3);
    fprintf(fid,'GFD%i_C%i 0 FC%i_C%i VALUE={if(time < tf,\n+ -
(60*k*time*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2) +\n+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr%i**2
+ ((nr-%i)*dx)**2)))/%f)*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo),\n',kf,kc,kf,kc,kc,kc,kf,kc,kf,rd,kc,kf);
    fprintf(fid,'\n+ -(60*(a*time+b)*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2) +\n+
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2)))/%f)*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo))\n\n',kc,kc,kf,kc,kf,rd,kc,kf);
  end
end
%
% Descontinuidade no fim da linha
%
fprintf(fid,'GFD%i_C%i 0 FC%i_C%i VALUE={if(time < tf,\n+ -(60*k*time*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2
+ ((nr-%i)*dx)**2) +\n+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2)))/Raf_C%i)*\n+
stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-%i)*dx)**2)/vo),\n',nf,kc,nf,kc,kc,kc,nf,kc,nf,kc,nf);
fprintf(fid,'\n+ -(60*(a*time+b)*h%i*(V/vo)*(1/sqrt((dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2) +\n+
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr%i**2 + ((nr-%i)*dx)**2)))/Raf_C%i)*\n+ stp(time-sqrt(dr%i**2+((nr-
%i)*dx)**2)/vo))\n\n',kc,kc,nf,kc,nf,kc,kc,nf);
%
% Disposição dos segmentos de LT
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #i - Disposição dos segmentos de LT\n*\n', kc);
% (60*(a*time+b)
for kf=1:nf-1
  if kf==9 | kf == 10
    fprintf(fid, '\n');
  end
  fprintf(fid,'T%i_C%i FC%i_C%i 0 FC%i_C%i 0 LEN={dx} R={RLT} L={L%i%i} G={GLT}
C={C%i%i}\n',kf,kc,kf,kc,kf+1,kc,kc,kc,kc);
end
%
% Amarração dos nós do subcircuito com os nós externos
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #i - Amarração dos nós externos com os internos\n*\n', kc);
%As tentativas comentadas abaixo não funcionaram, pois, as fontes E isolam o circuito
%externo do subcircuito
%*Rft_C1 PFT_C1 FC1_C1 1
%*E_EC1 PFT_C1 0 VALUE ={V(E1)}
%*E_EC1 PFT_C1 0 E1 0 1
%*E_S1 S1 0 value = {V(FC11_C1) - V(FN11_C1)}
%fprintf(fid, 'E_E%i E%i 0 value = {V(FC%i_C%i) - V(FN%i_C%i)} \n',kc,kc,kc,kc,kc,kc);
%fprintf(fid, 'E_S%i S%i 0 value = {V(FC%i_C%i) - V(FN%i_C%i)} \n',kc,kc,nf,kc,nf,kc);
%
fprintf(fid,'Re_C%i E%i FC1_C%i 1e-2\n',kc,kc,kc);
fprintf(fid,'Rs_C%i S%i FC%i_C%i 1e-2\n',kc,kc,nf,kc);
fprintf(fid,'RE%i E%i 0 1e8\n',kc,kc);
fprintf(fid,'RS%i S%i 0 1e8\n',kc,kc);
%
% Disposição dos resistores de aterramento(descontinuidades)
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #i - Disposição dos resistores de aterramento
(descontinuidades)\n*\n', kc);
fprintf(fid,'Ra1_C%i 0 FC1_C%i {Rai_C%i}\n',kc,kc,kc);
for kr=1:nrint
  if fd(kr,1)==kc
    kf=round((fd(kr,2)/dx)+1);
    rd=fd(kr,3);
    fprintf(fid,'Ra%i_C%i 0 FC%i_C%i %f\n',kf,kc,kf,kc,rd);
  end
end
fprintf(fid,'Ra%i_C%i 0 FC%i_C%i {Raf_C%i}\n',nf,kc,nf,kc,kc);
%
% Disposição de pontos para amostragem da tensão induzida total. (soma das tensões
% das diversas fontes)
%
fprintf(fid, '*\n* CONDUTOR #i - Pontos para medição da tensão total\n*\n', kc);
for kf=1:nf
  fprintf(fid, 'EF%i_C%i F%i_C%i 0 FC%i_C%i FN%i_C%i 1 \n',kf,kc,kf,kc,kf,kc,kf,kc);
  fprintf(fid, 'RF%i_C%i 0 F%i_C%i 1E8 \n',kf,kc,kf,kc);
end
%
end % final do laço kc
%
% Disposição dos resistores conectados entre 2 condutores da LT, distintos

```



## A2 – TASOLIB (Arquivo com o subcircuito SPICE)

O exemplo de subcircuito abaixo mostrado refere-se a linha da figura 4.27, capítulo 4, suposta dividida em 2 segmentos, de forma a gerar o menor arquivo possível, mas ainda ilustrativo do processo. Nos exemplos apresentados no capítulo 4 a linha foi dividida em 14 segmentos.

```

*
*           TASOLIB           ARQUIVO GERADO EM 16-Nov-2001
*
* Caso estudado: Arquivo.de.entrada.para.as.diversas.descargas.do.artigo.do.Baker
*
* Subcircuito para cálculo de tensões induzidas em linhas com 2 condutores
* divididas em 2 segmentos. Para outros valores de segmentos e condutores,
* rode o programa em MATLAB "TINDLT.m"
*
.subckt TINDLT2 E1 S1 E2 S2
+params:
*Parâmetros da Linha de transmissão (MKS)
+   RLT   = 0       ; Resistência específica da linha
+   GLT   = 0       ; Condutância específica da linha
*Parâmetros da descarga atmosférica/Configuração da linha
+   Ip    = 50k     ; Valor de pico da corrente
+   Tf    = 1.2u    ; Tempo de frente da onda de corrente
+   Ic    = 25k     ; Valor de cauda da corrente
+   Tc    = 50u     ; Tempo de cauda da onda de corrente
+   V     = 3e7     ; Velocidade da corrente de retorno
+   Xraio = 150     ; Coordenada x da descarga
+   Yraio = 150     ; Coordenada y da descarga
+   Rai_C1 = 500    ; Resistência de aterramento no início da LT
+   Raf_C1 = 500    ; Resistência de aterramento no fim da LT
+   Rai_C2 = 500    ; Resistência de aterramento no início da LT
+   Raf_C2 = 500    ; Resistência de aterramento no fim da LT
*
*Parâmetros auxiliares
.param l1 = {682.000000}           ; Comprimento da LT
.param ncond = {2}                 ; Número de condutores da LT
.param nseg = {2}                  ; Número de segmentos da LT
.param L11 = {1.564809e-006}
.param L12 = {3.959728e-007}
.param L22 = {1.509219e-006}
.param C11 = {7.616100e-012}
.param C12 = {-1.998231e-012}
.param C22 = {7.896630e-012}
.param y1 = {0.000000}
.param h1 = {7.500000}
.param r1 = {6.000000e-003}
.param dr1 = {yraio-y1}
.param zc1 = {469.118063}
.param y2 = {0.000000}
.param h2 = {5.680000}
.param r2 = {6.000000e-003}
.param dr2 = {yraio-y2}
.param zc2 = {452.452490}
.param dr = {yraio-y1}
.param vo = {3e8}                  ; Velocidade da luz no vácuo
.param dx = {l1/nseg}
.param nr = {(xraio/dx)+1}         ; Local do raio (função da fonte)
.param fnum = {60*V*dx}
.param fden = {1-(V/vo)**2}
.param k = {ip/TF}
.param a = {(ip-ic)/(tf-tc)}
.param b = {ip-a*tf}
.param pi = {3.14159265}
*
* Configuração do Circuito
* FC - Fonte de corrente para campo conservativo
* FN - Fonte de corrente para campo não conservativo
* FD - Fonte de corrente nas descontinuidades
*
* CONDUTOR #1 - Fontes de corrente para o campo conservativo
GFC1_C1 0 FC1_C1 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h1*time)/(zc1*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-1)*dx)**2)**1.5)))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h1*time)/(zc1*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-1)*dx)**2)**1.5)))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}

```

```

GFC2_C1 0 FC2_C1 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h1*time)/(zcl*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-2)*dx)**2)**1.5))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-2)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h1*time)/(zcl*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-2)*dx)**2)**1.5))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-2)*dx)**2)/vo)}}

GFC3_C1 0 FC3_C1 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h1*time)/(zcl*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-3)*dx)**2)**1.5))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h1*time)/(zcl*((V*time)**2 + fden*
+(dr1**2+((Nr-3)*dx)**2)**1.5))*
+stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}}
*
* CONDUTOR #1 Fontes de corrente para o campo não conservativo
R1_FN1_C1 FC1_C1 FN1_C1 1E9
R2_FN1_C1 FN1_C1 0 1
GFN1_C1 0 FN1_C1 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}}

R1_FN2_C1 FC2_C1 FN2_C1 1E9
R2_FN2_C1 FN2_C1 0 1
GFN2_C1 0 FN2_C1 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-2)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-2)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-2)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-2)*dx)**2)/vo)}}

R1_FN3_C1 FC3_C1 FN3_C1 1E9
R2_FN3_C1 FN3_C1 0 1
GFN3_C1 0 FN3_C1 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}}
*
* CONDUTOR #1 Fontes de corrente para as descontinuidades (aterramentos)
GFD1_C1 0 FC1_C1 VALUE={if(time < tf,
+ -(60*k*time*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 - ((nr-1)*dx)**2))))/Rai_C1*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-1)*dx)**2))))/Rai_C1*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}}

GFD3_C1 0 FC3_C1 VALUE={if(time < tf,
+ -(60*k*time*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2))))/Raf_C1*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h1*(V/vo)*(1/sqrt((dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
(V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr1**2 + ((nr-3)*dx)**2))))/Raf_C1*
+ stp(time-sqrt(dr1**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}}
*
* CONDUTOR #1 - Disposição dos segmentos de LT
T1_C1 FC1_C1 0 FC2_C1 0 LEN={dx} R={RLT} L={L11} G={GLT} C={C11}
T2_C1 FC2_C1 0 FC3_C1 0 LEN={dx} R={RLT} L={L11} G={GLT} C={C11}
*
* CONDUTOR #1 - Amarração dos nós externos com os internos
Re_C1 E1 FC1_C1 1e-2
Rs_C1 S1 FC3_C1 1e-2
RE1 E1 0 1e8
RS1 S1 0 1e8
*
* CONDUTOR #1 - Disposição dos resistores de aterramento (descontinuidades)
Rai_C1 0 FC1_C1 {Rai_C1}
Raf_C1 0 FC3_C1 {Raf_C1}
*
* CONDUTOR #1 - Pontos para medição da tensão total

```

```

EF1_C1 F1_C1 0 FC1_C1 FN1_C1 1
RF1_C1 0 F1_C1 1E8
EF2_C1 F2_C1 0 FC2_C1 FN2_C1 1
RF2_C1 0 F2_C1 1E8
EF3_C1 F3_C1 0 FC3_C1 FN3_C1 1
RF3_C1 0 F3_C1 1E8
*
* CONDUCTOR #2 - Fontes de corrente para o campo conservativo
GFC1_C2 0 FC1_C2 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-1)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-1)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}}

GFC2_C2 0 FC2_C2 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-2)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-2)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo)}}

GFC3_C2 0 FC3_C2 VALUE = {if(time < tf,
+((fnum*k*time*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-3)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+((fnum*(a*time+b)*h2*time)/(zc2*((V*time)**2 + fden*
+(dr2**2+((Nr-3)*dx)**2))*1.5))*
+stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}}

*
* CONDUCTOR #2 Fontes de corrente para o campo não conservativo
R1_FN1_C2 FC1_C2 FN1_C2 1E9
R2_FN1_C2 FN1_C2 0 1
GFN1_C2 0 FN1_C2 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}}

R1_FN2_C2 FC2_C2 FN2_C2 1E9
R2_FN2_C2 FN2_C2 0 1
GFN2_C2 0 FN2_C2 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo)}}

R1_FN3_C2 FC3_C2 FN3_C2 1E9
R2_FN3_C2 FN3_C2 0 1
GFN3_C2 0 FN3_C2 VALUE={if(time <tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2))))*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}}

*
* CONDUCTOR #2 Fontes de corrente para as descontinuidades (aterramentos)
GFD1_C2 0 FC1_C2 VALUE={if(time < tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2))))/Rai_C2)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-1)*dx)**2))))/Rai_C2)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-1)*dx)**2)/vo)}}

GFD2_C2 0 FC2_C2 VALUE={if(time < tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2))))/50.000000)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-2)*dx)**2))))/50.000000)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-2)*dx)**2)/vo)}}

```

```

GFD3_C2 0 FC3_C2 VALUE={if(time < tf,
+ -(60*k*time*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2))))/Raf_C2)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo),
+ -(60*(a*time+b)*h2*(V/vo)*(1/sqrt((dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2) +
+ (V/vo)**2*((vo*time)**2 - (dr2**2 + ((nr-3)*dx)**2))))/Raf_C2)*
+ stp(time-sqrt(dr2**2+((nr-3)*dx)**2)/vo)}
*
* CONDUCTOR #2 - Disposição dos segmentos de LT
T1_C2 FC1_C2 0 FC2_C2 0 LEN={dx} R={RLT} L={L22} G={GLT} C={C22}
T2_C2 FC2_C2 0 FC3_C2 0 LEN={dx} R={RLT} L={L22} G={GLT} C={C22}
*
* CONDUCTOR #2 - Amarração dos nós externos com os internos
*Re_C2 E2 FC1_C2 1e-2
Rs_C2 S2 FC3_C2 1e-2
RE2 E2 0 1e8
RS2 S2 0 1e8
*
* CONDUCTOR #2 - Disposição dos resistores de aterramento (descontinuidades)
Ra1_C2 0 FC1_C2 {Rai_C2}
Ra2_C2 0 FC2_C2 50.000000
Ra3_C2 0 FC3_C2 {Raf_C2}
*
* CONDUCTOR #2 - Pontos para medição da tensão total
EF1_C2 F1_C2 0 FC1_C2 FN1_C2 1
RF1_C2 0 F1_C2 1E8
EF2_C2 F2_C2 0 FC2_C2 FN2_C2 1
RF2_C2 0 F2_C2 1E8
EF3_C2 F3_C2 0 FC3_C2 FN3_C2 1
RF3_C2 0 F3_C2 1E8
*
* Disposição dos resistores conectados entre 2 condutores
RF1_C1C2 FC1_C1 FC1_C2 455.000000
RF3_C1C2 FC3_C1 FC3_C2 455.000000
*
*Acoplamento dos segmentos de LT
k12_S1 T1_C1 T1_C2 LM=3.95973e-007 CM=-1.99823e-012
k12_S2 T2_C1 T2_C2 LM=3.95973e-007 CM=-1.99823e-012
*
.ends
*
*Final do componente Tind2C
.ends
*Final da biblioteca

```

### A3 – Função LCPUC para cálculo de parâmetros de linhas aéreas.

```

%
%           FUNÇÃO LCPUC
%
%           Calcula a matriz com as indutâncias e capacitâncias de uma
% linha com NCOND condutores, dispostos sobre um solo plano condutor
% perfeito. Os condutores são supostos imersos em um meio homogêneo com
% permissividade relativa ER e permeabilidade relativa MUR. Os dados
% relativos aos condutores, coordenadas e raio do condutor, são fornecidos
% pela função leitura
%
function[lm,cm,zc]=lcpuc(ncond,yzr)
c=2.997925e8;
c2=c*c;
mu02pi=2.e-7;
mu04pi=1.e-7;
mur=1.;
er=1.;
%
for i=1:ncond
    lm(i,i)=mu02pi*mur*log(2.*yzr(i,2)/yzr(i,3));
end
%
if ncond > 1
    for i=1:ncond
        ip=i+1;
        for j=ip:ncond
            sij2=(yzr(i,2)-yzr(j,2))^2+(yzr(i,1)-yzr(j,1))^2;
            lm(i,j)=mu04pi*mur*log(1+4.*yzr(i,2)*yzr(j,2)/sij2);
            lm(j,i)=lm(i,j);
        end
    end
end
%
%           CALCULA A MATRIZ DE CAPACITÂNCIAS COMO C=MU*EPS*L-1
%
linv = inv(lm);
cm=(mur*er/c2)*linv;
%
%           CALCULA A MATRIZ DAS IMPEDÂNCIAS CARACTERÍSTICAS
%
zc=c*lm;

```

### A4 – Função DIAGONAL para cálculo das matrizes de transformações modais e das impedâncias e velocidades modais

```

%
%           Função DIAG - Diagonaliza, como proposto em "Multiconductor Transmission Lines" 2 matrizes
% reais, simétricas, positiva definidas de ordem n. Como resultado, retorna ZCM contendo as % %
% impedâncias modais características, ZCmi=sqrt(lmi/cmi) and VM, as velocidades modais de
% propagação, Vmi = 1/sqrt(lmi.cmi).
% Durante o programa é chamada uma função auxiliar para diagonalizar uma determinada matriz
%
function[zcm,vm,tv,ti]=diagonal(ncond,ld,cd);
%
%*****Diagonaliza CD
%
[cd,u]=jacobi(ncond,cd);
for i=1:ncond
    cd(i,i)=sqrt(cd(i,i));
end
%
for i=1:ncond
    for j=1:ncond
        sum=0.0;
        for k=1:ncond
            sum=sum+ld(i,k)*u(k,j)*cd(j,j);
        end
        temp(i,j)=sum;
    end
end
%
for i=1:ncond
    for j=1:ncond
        sum=0.0;
        for k=1:ncond
            sum=sum+cd(i,i)*u(k,i)*temp(k,j);
        end
        ld(i,j)=sum;
    end
end

```

```
end
end
%
[ld,s]=jacobi(ncond,ld);
%
%*****Gera TV temporário
%
for i=1:ncond
    for j=1:ncond
        sum=0.0;
        for k=1:ncond
            sum=sum+u(i,k)*cd(k,k)*s(k,j);
        end
        tv(i,j)=sum;
    end
end
%
%*****Normaliza T
%
for i=1:ncond
    sum=0.0;
    for j=1:ncond
        sum=sum+tv(j,i)*tv(j,i);
    end
    temp(i,i)=1.0/sqrt(sum);
end
%
%*****Gera TI
%
for i=1:ncond
    for j=1:ncond
        ti(i,j)=tv(i,j)*temp(j,j);
    end
end
%
%*****Gera TV definitiva
for i=1:ncond
    for j=1:ncond
        sum=0.0;
        for k=1:ncond
            sum=sum+u(i,k)*s(k,j)/(cd(k,k)*temp(j,j));
        end
        tv(i,j)=sum;
    end
end
%
%*****Gera zcmi=sqrt(lmi/cmi) e vmi=1/sqrt(lmi.cmi)
%
for i=1:ncond
    zcm(i)=temp(i,i)*temp(i,i)*sqrt(ld(i,i));
    vmi(i)=1.0/sqrt(ld(i,i));
end
end
%
```

## Anexo B – Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas

### 1 - HISTÓRICO

O Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas - CIPDA, sediado no INPE em Cachoeira Paulista, tem como objetivo a captação de descargas atmosféricas, que serão denominadas neste trabalho descargas atmosféricas forçadas. Esse procedimento inicia-se a partir do lançamento de foguetes de uma plataforma localizada a poucos metros do solo. A partir da observação e coleta das principais características dessas descargas forçadas, é possível aprofundar o conhecimento do fenômeno, além de desenvolver, avaliar e testar metodologias de proteção.

A equipe da Universidade Federal de Minas Gerais/UNICAMP, que ao longo dos anos tem pesquisado tal tema por intermédio de abordagens teóricas e práticas, juntou-se ao grupo de Pesquisadores do CIPDA para desenvolver um trabalho experimental.

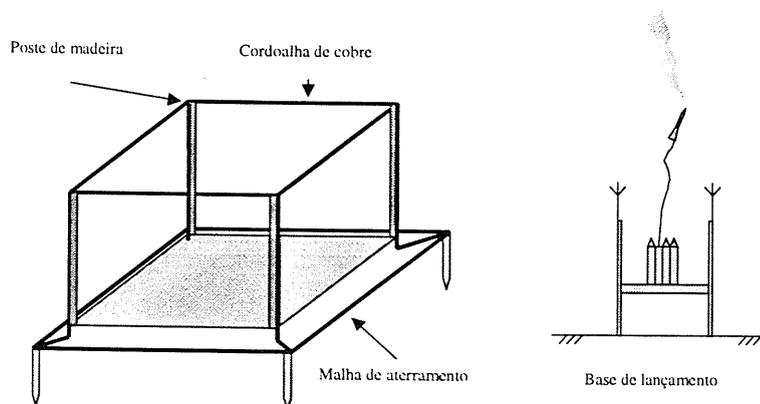
O experimento é constituído de uma estrutura simulando uma edificação real, representada por seu SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), e por um circuito representando a instalação elétrica típica de uma edificação. Na ocorrência de uma descarga atmosférica próxima ao local, são geradas tensões induzidas no circuito, cujas características (intensidade, tempo de duração, forma de onda, etc.) são registradas através de um sistema de medição adequado.

Além de medir os valores de tensão induzida em um sistema elétrico, o projeto visa também a medição de campo elétrico e magnético a algumas dezenas de metros do ponto de queda das descargas atmosféricas forçadas.

De posse dos parâmetros da descarga atmosférica, dos valores da tensão induzida e campos elétrico e magnético, será possível a avaliação das teorias de cálculo das tensões induzidas utilizadas em projetos desenvolvidos na UFMG/UNICAMP. Além disso, as características obtidas através das medições serão utilizadas como base para revisão de normas técnicas, especificação de equipamentos de proteção contra sobretensões e análise da eficácia de equipamentos já existentes no mercado.

### 2 - DESCRIÇÃO DAS MONTAGENS

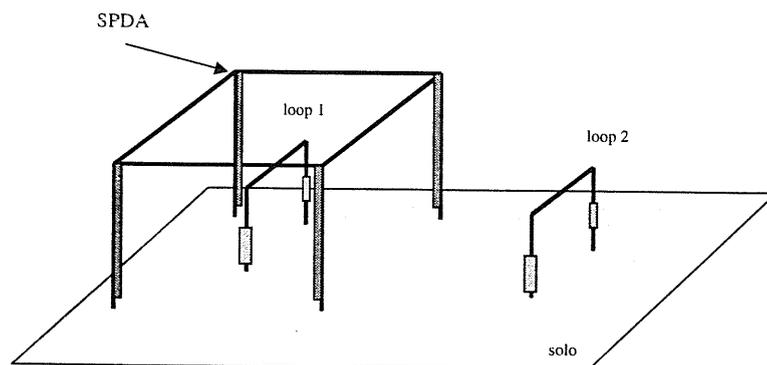
Uma estrutura constituída de postes de madeira e cordoalha de cobre (representando o sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma edificação - SPDA) foi montada perto da base de lançamento dos foguetes, a uma distância tal que não interferisse na operação da base. A figura 1 ilustra a montagem.



**Figura 1 – Arranjo do SPDA.**

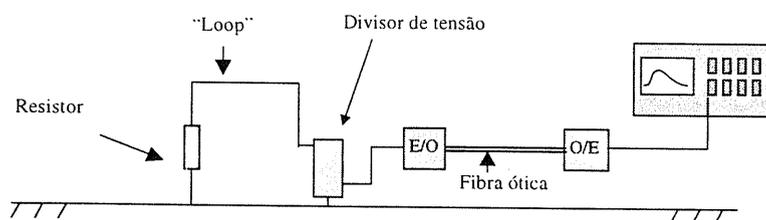
Para medição e análise da tensão induzida, foram construídos dois sistemas elétricos idênticos. Um sistema, denominado "loop 1", foi montado no interior do SPDA e o outro, "loop 2", foi

montado no ambiente natural, ao lado do SPDA. A disposição dos dois sistemas elétricos é mostrada na figura 2.



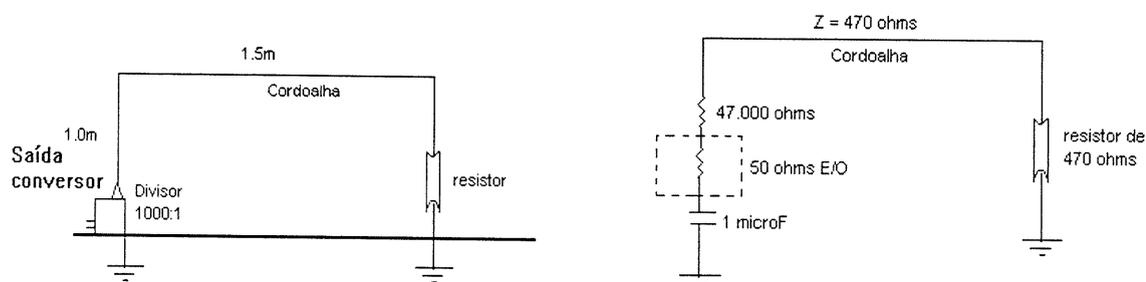
**Figura 2 – Disposição dos dois “loops” para medição de tensão induzida.**

O sistema elétrico para medição da tensão induzida é apresentado na figura 3. O sinal da tensão induzida na saída de cada “loop” é ligado a um conversor eletro-ótico (E/O), que por sua vez é ligado a uma fibra ótica, levada para o interior do container. A saída da fibra ótica é ligada a um conversor ótico-elétrico (O/E) e o sinal é ligado ao osciloscópio, onde é feita a leitura da tensão induzida.



**Figura 3 – sistema de medição**

As características específicas de cada “loop” são detalhadas na figura 4.



(a) - Configuração Esquemática dos “loops” 1 e 2

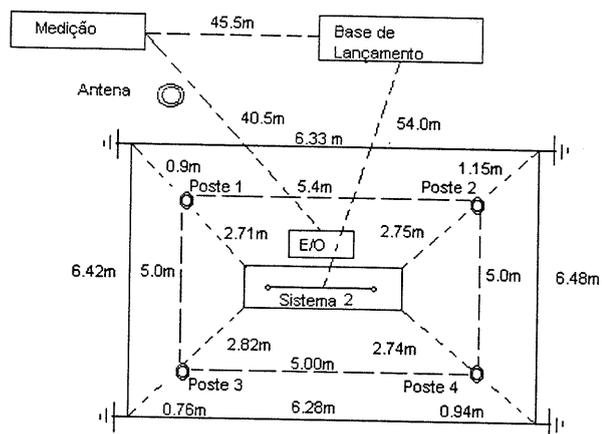
(b) - Configuração Elétrica dos “loops” 1 e 2.

**Figura 4 – Características dos sistemas de medição**

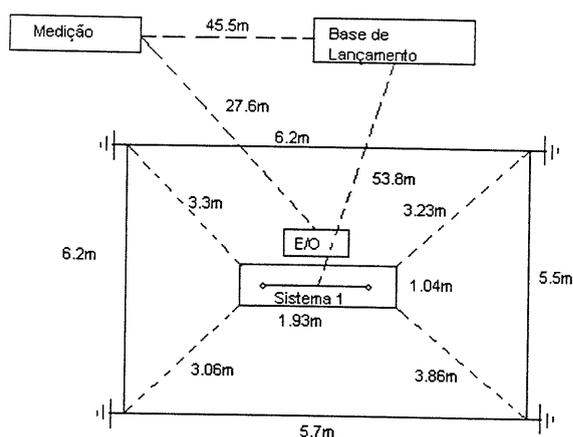
A configuração elétrica apresentada na figura 4(b) indica o circuito do sistema elétrico utilizado para a medição da tensão induzida. Em uma de suas extremidades, foi conectado um resistor de 470 ohms, evitando, assim, reflexões que possam contaminar as medições. Na outra extremidade, foi conectado um divisor de tensão para a medição da tensão induzida. O detalhe do divisor de tensão é mostrado na figura.

A saída do divisor é conectada a um sistema de fibra ótica para que o sinal seja medido no interior do container. O sistema ótico utilizado foi desenvolvido pelo CPqD e é constituído de dois conversores eletro-óticos e um link ótico. Para sua utilização, é necessária a determinação da constante do sistema ótico, ou seja, qual a constante que relaciona o sinal medido no osciloscópio e o sinal existente no “loop”. A determinação das constantes dos dois “loops” utilizados encontra-se no apêndice.

O posicionamento dos sistemas em relação à base de lançamento dos foguetes e do centro de medição são detalhados nas figuras 5 e 6.



**Figura 5 - Posicionamento do sistema 1, com a blindagem por cordoalha de cobre estanhado**



**Figura 6 - Posicionamento do sistema 2, sem a blindagem por cordoalha de cobre estanhado**

Altura da cordoalha de cobre estanhado nos postes:

Poste 1 – 3,00m

Poste 2 – 3,43m

Poste 3 – 3,40m

Poste 4 – 3,83m

A resistência da malha de aterramento é aproximadamente  $30 \Omega$ , medida na base do lançador de foguetes. A distância entre os “loops” 1 e 2 é de 8,7m. A distância da cabine de medição até a antena de campo é de 18,8m.