

TESE DE DOUTORADO Nº 017

**CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGA  
ATMOSFÉRICA: IMPLEMENTAÇÃO DA  
TEORIA DE RUSCK NO EMTP**

*Joaquim Paulo da Silva*

DATA DA DEFESA: 02.07.2001

# **Universidade Federal de Minas Gerais**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**  
**Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica**

## **CÁLCULO DE TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGA ATMOSFÉRICA: IMPLEMENTAÇÃO DA TEORIA DE RUSCK NO EMTF**

**Por:**

**Joaquim Paulo da Silva**

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.

**Orientador: Prof. Dr. Antônio Emílio Angueth de Araújo**

**Co-orientador: Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino**

JULHO 2001

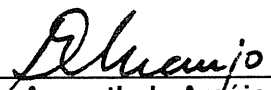
**"Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica:  
Implementação da teoria de Rusck no EMTP"**

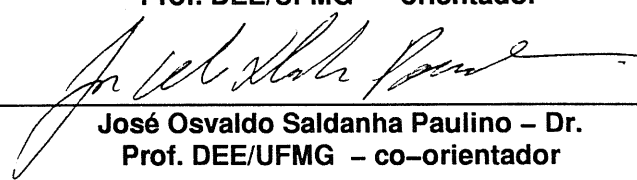
**Joaquim Paulo da Silva**

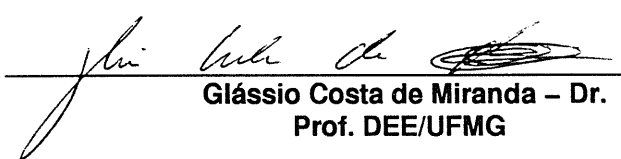
Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

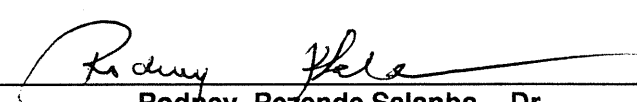
Aprovada em 02 de julho de 2001.

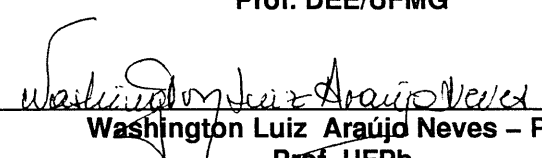
Por:

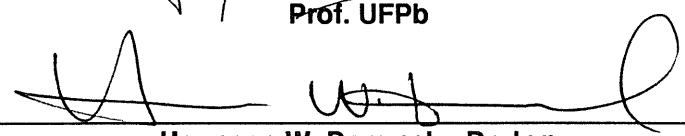
  
\_\_\_\_\_  
Antônio Emílio Angueth de Araújo – Ph.D.  
Prof. DEE/UFMG – orientador

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

  
\_\_\_\_\_  
Glássio Costa de Miranda – Dr.  
Prof. DEE/UFMG

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

  
\_\_\_\_\_  
Washington Luiz Araújo Neves – Ph.D.  
Prof. UFPb

  
\_\_\_\_\_  
Hermann W. Dommel – Dr. Ing.  
Univ. of British Columbia–Canadá

# AGRADECIMENTOS

À sombra de uma paineira  
 A tese, fruto de um trabalho  
 Pode-se encontrar sombra e ar fresco  
 Uma paixão, da grandiosidade dos raios  
 Galhos secos e formigas

Aos amigos e amigas deixo meu abraço  
 À sua sombra retiro meu cansaço  
 Quem seria eu sem eles e elas  
 Tenho meu abrigo, meu sorriso

À minha família, negra e branca folhas  
 Dou meu carinho, e recebo  
 Do que mais se precisa? Flores?  
 Um doce beijo, da Rose

Em suas raízes uma seiva  
 Que a vida caminha...percorre  
 Que faz das folhas um viço  
 A tese amadurece

Quebram-se os espinhos  
 Tristezas, que os ventos trazem  
 Quem disse que os ventos não levam  
 E que minha paineira tem espinhos!!??

Do rebento de suas flores  
 Os amores, que cores!  
 De um fruto, a semente latente  
 As idéias lançadas, içadas e valentes

Um filho..., um broto para o dia seguinte  
 As linhas de um livro..., à espera da próxima tempestade

Aos professores Antônio Emílio Angueth de Araújo, José Osvaldo Saldanha Paulino e Hermann W. Dommel pela valiosa orientação e pelo grande auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro desta pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de Minas Gerais e a University of British Columbia

## RESUMO

Durante este trabalho foi implementado uma rotina para o cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas incidentes nas proximidades de sistemas elétricos, no programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos denominado “*Electromagnetic Transients Program - EMTP*” que ainda não contempla em suas rotinas a possibilidade de realizar estudos de tensão induzida.

A metodologia de cálculo utilizada foi desenvolvida pelo pesquisador *Sune Rusck*, teoria concebida no final da década de 50 e que desde então tem mostrado aos pesquisadores a sua concepção rigorosa, resistindo aos diversos questionamentos de sua aplicabilidade aos propósitos a que foi concebida. Estas pesquisas possibilitaram a consolidação da teoria e a evolução de métodos que serão aplicados neste trabalho.

A teoria de *Sune Rusck* propõe a distribuição de fontes de correntes que representam os campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica incidente no solo nas proximidades da linha sob estudo. Assim, esta metodologia implica na utilização de fontes distribuídas ao longo da linha. Então faz-se necessário discretizar a linha em trechos e aplicar as fontes de correntes representativas dos campos eletromagnéticos iluminados.

Finalmente, com o objetivo de validar os resultados obtidos pela implementação da metodologia Rusck-EMTP, testes foram realizados em uma linha com dois condutores na configuração vertical, variando os diversos parâmetros das descargas e observando sua influência nos resultados obtidos pela metodologia. Foram realizadas comparações em um modelo em escala reduzida desenvolvido pelo CRIEPI, pois tais modelos buscam representar o fenômeno da descarga atmosférica em condições controladas. Foram também realizadas validações com medições realizadas em uma linha experimental sujeita a descargas atmosféricas forçadas, em um projeto desenvolvido pelo EPRI.

Desta forma, o presente projeto implementou uma rotina computacional a partir da teoria de Rusck para estudos de tensões induzidas em linhas de distribuição utilizando toda a potencialidade do conhecido programa computacional EMTP.

# ABSTRACT

This work deals with the implementation of the Rusck's theory of the lightning induced voltage on distribution lines in the Electromagnetic Transients Program – EMTP. The EMTP is one of the most powerful and used computer programs for electromagnetic transient's simulation in power systems. The transmission line models implemented in this program used for studies of electromagnetic transients in power systems are not adequate to analyze directly induced voltages.

The Rusck's theory developed by Sune Rusck in 1957 was used to evaluate the induced voltage effects. Although others theories have been developed to simulate lightning induced voltages on lines and equipment, the Rusck's theory, with in the approximations originally conceived, predict the same results compared with others theories and UFMG team has been used extensively.

According to this theory, it is possible to obtain an analytical expression describing the lightning induced voltage at a point of an infinite homogeneous line. Finite lines with simple discontinuities can be considered if the theory is slightly modified. Then, to implemented this theory is necessary to discretize the line in segments and to put current sources along the transmission line.

The results obtained are compared with a phase-neutral electrical line, reduced scale model and measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes to validate the results obtained with EMTP-RUSCK methodology.

The present research developed a new engineering tool to study induced overvoltages caused by lightning discharge nearby, coupling with the EMTP.

# SUMÁRIO

<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Sumário</b>	<b>v</b>

	<b>Página</b>
<b>Capítulo 1- Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 - Relevância do Tema em Investigação	1
1.2 - Proposta de Desenvolvimento	3
1.3 - Estrutura do Trabalho	3
<b>Capítulo 2 – Descargas Atmosféricas</b>	<b>5</b>
2.1 - Introdução	5
2.2 - Origem e Formação	5
2.3 - Estrutura Típica das Cargas em uma Nuvem	7
2.4 - Etapa da Ruptura Preliminar entre as Regiões Positiva e Negativa	8
2.5 - Etapa do líder Passo a Passo	8
2.6 - Etapa do Processo de Conexão	9
2.7 - Etapa da Primeira Corrente de Retorno	10
2.8 - Etapa do Líder Contínuo	11
2.9 - Etapa da Corrente de Retorno Subsequente	12
2.10 - Aspectos Gerais	14
<b>Capítulo 3 – Modelagem do Canal de Retorno</b>	<b>16</b>
3.1 - Introdução	16
3.2 - Modelagem do Canal de Retorno	18
3.3 - Modelo de Bruce-Golde	22
3.4 - Modelo de Linha de Transmissão	23
3.5 - Modelo de Linha de Transmissão Modificada	24
3.6 - Modelo de Fonte de Corrente Viajante	25
3.7 - Modelo de Diendorfer-Uman	25
3.8 - Aspectos Gerais dos Vários Modelos	26
3.9 - Comparação dos Diversos Modelos	27
<b>Capítulo 4 – Modelagem do Acoplamento</b>	<b>28</b>
4.1 - Introdução	28
4.2 - Hipóteses de Aproximações para Estudo do Fenômeno	28
4.3 - Estudos Experimentais – Medições Disponíveis	29
4.3.1 - Medições Realizadas pelo Grupo de St. Privat d'Allier na França	29
4.3.2 - Medições Realizadas no Japão	30

4.3.3 - Medições Realizadas na África do Sul	31
4.3.4 - Medições Realizadas no México	32
4.3.5 - Medições Realizadas em Tampa Bay	33
4.4 - Modelos de Acoplamento	35
4.4.1 - Modelo de Rusck	35

## **Capítulo 5- Implementação do Cálculo da Tensão Induzida no EMTP** 42

5.1 - Introdução	42
5.2 - Modelagem Digital dos Componentes dos Sistemas Elétricos	43
5.3 - Aspectos da Implementação	44
5.3.1 - Utilização da Subrotina CONNEC	44
5.3.2 - Aspectos da Teoria de Rusck	48
5.3.3 - Segmentação da linha	49

## **Capítulo 6 – Resultados do Modelo de Rusck-EMTP** 54

6.1 - Introdução	54
6.2 - Implementação do Estudo em uma Linha de Dois Condutores	55
6.2.1 - Comparação com a Expressão Simplificada de Rusck	56
6.2.2 - Influência da Amplitude Máxima da Corrente	59
6.2.3 - Efeito da Distância do Ponto de Incidência	60
6.2.4 - Efeito da Velocidade de Propagação da Corrente no Canal	61
6.2.5 - Efeito do Tempo de Frente da Corrente de Retorno	62
6.2.6 - Efeito do Tempo de Cauda da Corrente de Retorno	64
6.3 - Implementação do Estudo para um Modelo em Escala Reduzida	64
6.3.1 - Resultados Obtidos	66
6.3.2 - Variação do Valor da Resistência no Centro da Linha	66
6.3.3 - Variação do Valor da Resistência a 2m do Centro da Linha	69
6.3.4 - Influência da Amplitude Máxima da Corrente	72
6.3.5 - Efeito da Distância do Ponto de Incidência	73
6.3.6 - Efeito da Velocidade de Propagação da Corrente no Canal	74
6.3.7 - Efeito do Tempo de Frente da Corrente de Retorno	75
6.3.8 - Efeito do Tempo de Cauda da Corrente de Retorno	76
6.3.9 - Efeito do Comprimento da Linha	76
6.3.10- Efeito da Altura da Linha	77
6.3.11- Efeito da Discretização da linha	77
6.3.12- Efeito da Variação do Passo de Integração	79
6.4 - Implementação do Estudo para a Linha Experimental do EPRI	80
6.4.1 - Características do Circuito do EPRI	81
6.4.2 - Resultados Obtidos para as Diversas Medições	83
6.4.3 - Efeito da Amplitude Máxima da Corrente	90
6.4.4 - Efeito da Distância do Ponto de Incidência	91
6.4.5 - Efeito da Velocidade de Propagação da Corrente no Canal	92
6.4.6 - Efeito do Tempo de Frente da Corrente de Retorno	93
6.4.7 - Efeito do Tempo de Cauda da Corrente de Retorno	94



<b>6.4.8 - Efeito da Altura da Linha</b>	<b>94</b>
<b>6.4.9 - Efeito da Discretização da linha</b>	<b>95</b>
<b>6.4.10- Efeito da Variação do Passo de Integração</b>	<b>96</b>
<b>6.5 - Aplicações da Implementação</b>	<b>97</b>
<b>6.5.1 - Estudo da Influência do Intervalo dos Aterramentos</b>	<b>97</b>

<b>Capítulo 7 – Considerações Finais e Propostas de Continuidade do Trabalho</b>	<b>102</b>
--	------------

<b>7.1 - Considerações Finais</b>	<b>102</b>
<b>7.2 - Propostas de Trabalhos Futuros</b>	<b>103</b>

<b>Bibliografia</b>	<b>106</b>
---------------------	------------

<b>Anexos</b>	<b>113</b>
<b>Anexo A – Medições de Descargas Atmosféricas Forçadas</b>	<b>113</b>

# NOMENCLATURA

<b>Preliminary breakdown</b>	<b>Ruptura preliminar</b>
<b>Stepped leader</b>	<b>Líder passo a passo</b>
<b>Attachment process</b>	<b>Processo de conexão</b>
<b>First return stroke</b>	<b>Primeira corrente de retorno</b>
<b>Triggered lightning</b>	<b>Descarga atmosférica forçada</b>
<b>Dart leader</b>	<b>Líder contínuo</b>
<b>Second return stroke</b>	<b>Corrente de retorno subsequentes</b>
<b>Electromagnetic Transient Program</b>	<b>EMTP</b>
<b>Upward-moving discharges</b>	<b>Líder conectante ascendente</b>
<b>CRIEPI</b>	<b>Central Research Institute of Electric Power Industry</b>
<b>EPRI</b>	<b>Electric Power Research Institute</b>

# **Capítulo 1**

## **INTRODUÇÃO**

A saga da humanidade está atrelada à busca contínua pelo aprimoramento das técnicas e do conhecimento, que são aplicados nas mais diversas atividades desenvolvidas pelo homem. Quanto mais se busca mais há por alcançar.

Assim é o tema descargas atmosféricas que é descrito desde que o homem tornou-se capaz de fazê-lo. No início eram desenhos, passando para a exploração de sua magia e sua força destrutiva, evoluindo no início deste século para seus efeitos danosos nas construções, causador da morte de pessoas e animais, disseminador de distúrbios nos sistemas e equipamentos elétricos, ou seja, nos novos produtos desenvolvidos. Continua sendo neste fim de século, um agente causador de grandes distúrbios nas redes e nos novos equipamentos elétricos, desenvolvidos pela evolução tecnológica das últimas décadas. Assim, efeitos anteriormente ignorados agora ganharam relevância, e o homem prossegue em sua busca pelo aprimoramento das técnicas e pela aquisição de conhecimentos mais aprofundados da natureza que o cerca.

### ***1.1 A Relevância do Tema em Investigação***

No cenário, atual uma das atribuições básicas das concessionárias de energia é um fornecimento confiável, seguro e econômico de eletricidade para os consumidores. Com a ampliação do uso da energia nas mais diversas aplicações da sociedade, a complexidade da operação dos sistemas elétricos aumenta rapidamente. Desta forma, com o objetivo de manter um alto padrão da qualidade da energia elétrica fornecida, é necessário um refinamento dos modelos existentes, avaliação do uso de novas técnicas de procedimentos, fundamentadas na experiência e uma intensiva utilização de modelos computacionais.

A qualidade da energia não considera apenas a variação de tensão em torno do valor nominal, mas também o número e os tipos de distúrbios que podem afetar os serviços, tais como variação da frequência, quedas de tensão temporárias e pequenas interrupções de fornecimento, entre outras. Dentro deste contexto, uma fonte importante de distúrbios em sistemas elétricos são as descargas atmosféricas indiretas que causam faltas transitórias e permanentes **[Cinieri, 1996]**.

Há ainda a exigência, por parte de todo o universo de consumidores (residenciais, industriais, comerciais e rurais), por uma energia de melhor qualidade para a preservação de seus equipamentos, investimentos e garantia de maior conforto.

Cabe aqui dizer que os valores de tensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de um sistema elétrico são inferiores às descargas diretas. Mas a ocorrência das tensões induzidas são muito mais frequentes, e portanto seus efeitos necessitam de avaliação **[Eriksson 1982, Nucci 1999]**.

Assim, a obtenção dos valores de tensões induzidas em linhas de distribuição e redes secundárias de baixa tensão de energia elétrica constitui um dos mais instigantes assuntos da atualidade na área da qualidade da energia, uma vez que efeitos até então ignorados, devido principalmente à robustez dos componentes produzidos, tornaram-se fundamentais no dimensionamento dos novos componentes. Tais componentes têm se tornado cada vez mais sensíveis pela larga utilização de dispositivos eletrônicos em seus respectivos projetos. Observando, ainda, que a utilização de dispositivos eletrônicos sensíveis em equipamentos elétricos (disjuntores, chaves, circuitos de controle e proteção) tornou-se largamente difundida **[Nucci 1999, Correia de Barros 1999, Silfverskiöld 1999]**.

O Estado de Minas Gerais está inserido em uma região montanhosa, cujo solo tem uma resistividade média de  $2.400 \Omega.m$  e em algumas regiões podem alcançar valores de  $20.000 \Omega.m$  **[TRIGINELLI 1994]**. E ainda está inserido em uma região com elevada densidade de descargas atmosféricas. A qualidade do atendimento de uma rede elétrica está diretamente relacionada com a resistividade do solo e com a atividade elétrica da atmosfera na região da rede. Desta forma, torna-se premente a necessidade de desenvolver novas técnicas de estudos que possibilitem a determinação mais exata dos efeitos destes fenômenos, a fim de dimensionar melhor os novos sistemas elétricos e equipamentos, melhorar os sistemas de proteção,

reduzir custos e garantir uma boa qualidade dos serviços prestados, levando-se em conta as particularidades do solo mineiro.

Neste trabalho, estuda-se a implementação de uma metodologia que permite o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes elétricas. Utiliza-se para isso a teoria desenvolvida por *Sune Rusck*, e o programa computacional de cálculo de transitórios eletromagnéticos MICROTRAN, uma das versões comerciais do EMTP.

## ***1.2 Proposta de Desenvolvimento***

O desenvolvimento do trabalho ocorreu nas seguintes etapas:

- etapa da elaboração de um programa computacional que proceda a distribuição de fontes de correntes no circuito em estudo, conforme a teoria de Rusck;
- etapa da simulação de estudos de tensão induzida em um circuito com dois condutores na configuração vertical, em um circuito em escala reduzida, desenvolvido pelo CRIEPI e em uma linha experimental, desenvolvida pelo EPRI;
- etapa das análises dos resultados para cada uma das proposições, e comparações com as medições existentes.
- etapa final realiza uma análise global dos resultados obtidos pela metodologia Rusck-EMTP na avaliação da tensão induzida em redes elétricas.

## ***1.3 Estrutura do Trabalho***

Este trabalho de tese compõe-se de sete capítulos e um anexo que são descritos sucintamente a seguir:

No presente capítulo, *Introdução*, mostra-se a relevância do tema em investigação, e as principais motivações que levaram à elaboração deste trabalho de pesquisa, bem como são apresentadas as etapas de desenvolvimento propostas.

No capítulo 2, *Descargas Atmosféricas*, foi apresentada a origem, formação das descargas atmosféricas e seus principais aspectos. Consideram-se principalmente as descargas nuvem-solo que constituem, conforme a literatura atual, o principal agente causador de tensões induzidas em redes elétricas.

O capítulo 3, *Modelagem do Canal de Retorno*, tem por objetivo caracterizar a principal etapa do fenômeno da descarga atmosférica

causadora das tensões induzidas, que é a modelagem do canal de retorno. A partir da definição da distribuição espacial e temporal da corrente desse canal, pode-se obter os valores dos campos eletromagnéticos que irão propagar e provocar tensões induzidas nas linhas e equipamentos. São descritas as principais características dos diversos modelos usados para representar esse fenômeno, e são apresentadas as comparações entre os mesmos.

O capítulo 4, *Modelagem do Acoplamento*, trata da modelagem do acoplamento entre o campo eletromagnético produzido pela corrente do canal de retorno e o sistema elétrico. Este capítulo irá tratar basicamente do modelo de acoplamento desenvolvido por Sune Rusck.

O capítulo 5, *Implementação do Cálculo da Tensão Induzida no EMTP* trata da implementação da teoria de Rusck para cálculo de tensão no programa computacional EMTP, para um sistema bifásico, ressalta-se a grande utilização deste programa no cálculo de transitórios eletromagnéticos em geral e a grande importância de dotá-lo da possibilidade de calcular transitórios gerados pelas tensões induzidas por descargas atmosféricas. Neste tópico é abordada a utilização de uma subrotina que possibilita a interação do modelo de cálculo da tensão induzida com o programa computacional EMTP.

O capítulo 6, *Resultados*, mostra os resultados obtidos pela modelagem Rusck-EMTP em três sistemas: um sistema de dois condutores na configuração vertical teórico, um modelo em escala reduzida e em uma linha experimental sujeita a ação de descargas atmosféricas forçadas.

O capítulo 7, *Considerações Finais e Propostas para Continuidade deste Trabalho*, apresenta as considerações finais sobre a utilização do EMTP, da teoria de Rusck e apresenta as propostas de continuidade do trabalho

Em anexo, é apresentado uma descrição das atividades desenvolvidas pela equipe da UFMG, da qual fui integrante, no Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas (CIPDA), cuja finalidade é a captação de descargas atmosféricas a partir de nuvens de tempestades naturais.

## Capítulo 2

# DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### *2.1 Introdução*

O fenômeno da descarga atmosférica é um agente causador de distúrbios eletromagnéticos de elevadas magnitudes em sistemas elétricos e, portanto, deve ser considerado nos estudos de transitórios em redes elétricas.

Esses distúrbios ocasionam desligamentos das redes elétricas, queima de equipamentos elétricos, perda da continuidade da produção, acidentes com pessoas ou animais, enfim, toda uma gama de transtornos e prejuízos.

Então, determinar os efeitos desta poderosa intempérie natural é primordial para otimizar projetos, proteger equipamentos e redes elétricas, proteger seres humanos e animais, bem como garantir a produção e redução de custos.

### *2.2 Origem e formação*

As descargas atmosféricas naturais estão normalmente associadas com as nuvens de tempestades, embora se saiba que outros fenômenos possam ocasioná-las, tais como erupções vulcânicas, tempestades de areia ou de neve.

Neste trabalho, será considerada a descarga atmosférica proveniente das nuvens de tempestade ou nuvens cúmulo-nimbos que são as descargas mais comuns, embora outras nuvens também possam produzir descargas atmosféricas [UMAN 1994].

Existem várias teorias que buscam explicar o processo que torna as nuvens carregadas de cargas elétricas, mas ainda não há uma teoria consensual entre a comunidade científica. A determinação da formação da estrutura elétrica das nuvens não é um estudo trivial, pois ela depende de

---

processos microfísicos e macrofísicos, ou seja, na formação da descarga atmosférica deve-se levar em conta a colisão das partículas de gelo com diferentes tamanhos, ação da gravidade, variação da temperatura, correntes de ar ascendentes e descendentes no interior da nuvem, entre outros fatores [UMAN 1994].

A estrutura típica de uma nuvem é mostrada na figura 2.1, onde pode-se observar a presença de cargas positivas na base da nuvem, o interior da nuvem com uma concentração de cargas negativas e a presença de uma concentração de cargas positivas no topo da nuvem [UMAN 1994].

As descargas atmosféricas podem ocorrer dentro da própria nuvem - descargas intra-nuvem - da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, da nuvem para o ar e entre nuvens - descargas inter-nuvs. Mais da metade das descargas atmosféricas ocorre dentro da própria nuvem, mas nem sempre esta descarga é detectável, dificultando o estudo através de estações de observação localizadas em terra [Uman 1988].

O tipo de descarga mais estudado é a descarga nuvem-solo por causar acidentes com pessoas e animais, incêndios em florestas e construções e distúrbios nos equipamentos elétricos e eletrônicos. A descarga atmosférica nuvem-solo pode se propagar de quatro maneiras diferentes conforme mostra a figura 2.2.

As descargas atmosféricas descendentes de polaridade negativa representam 90% dos casos registrados e os 10% restantes são representados pelos demais tipos [UMAN 1994, BERGER 1994]. Em medições realizadas no Morro do Cachimbo, Minas Gerais, foi observado que 81% dos casos registrados são de polaridade negativa (ascendente e descendentes), 16.5% são de polaridade positiva (ascendente e descendente) e em 2.5% são desconhecidas as polaridades [Schroeder 1999].

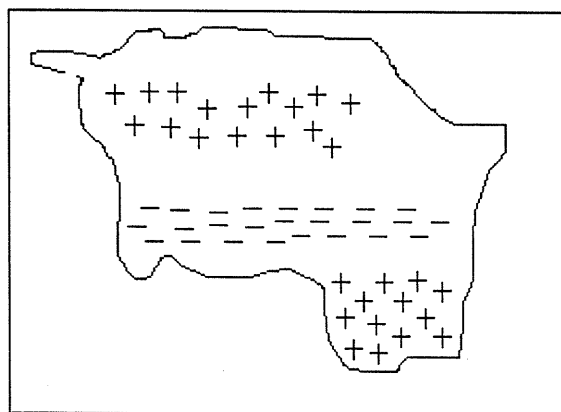


Figura 2.1 - Estrutura típica das cargas elétricas de uma nuvem cúmulo-nimbos



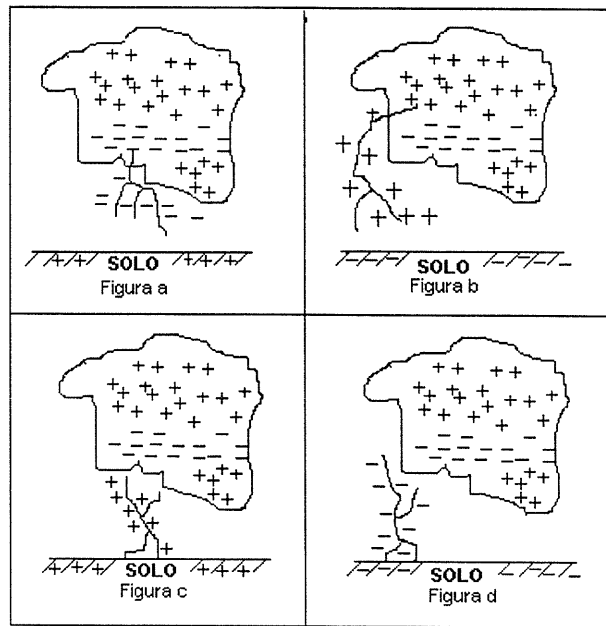


Figura 2.2 - Quatro tipos de descarga atmosférica para a terra. a: descendente polaridade negativa; b: descendente polaridade positiva; c: ascendente polaridade positiva; d: ascendente polaridade negativa

Em seguida, será detalhada a seqüência de uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente de polaridade negativa, para exemplificar a propagação do fenômeno ao completar seu percurso entre a nuvem e o solo.

### 2.3 Estrutura típica das cargas em uma nuvem

A figura 2.3 mostra a distribuição típica de cargas no interior de uma nuvem, constando de cargas positivas na base da nuvem, uma concentração de cargas negativas em seu centro e novamente cargas positivas no topo da nuvem. O processo de propagação do fenômeno se dará a partir desta estrutura básica. Os aspectos que originaram esta estrutura já foram abordados anteriormente.

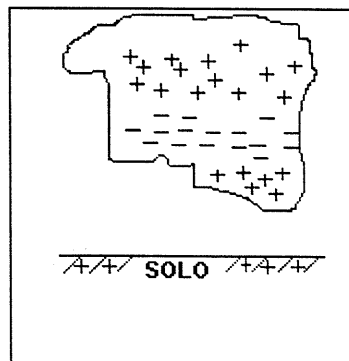


Figura 2.3 – Estrutura típica das cargas em uma nuvem

## 2.4 *Etapa da ruptura preliminar entre as regiões positiva e negativa*

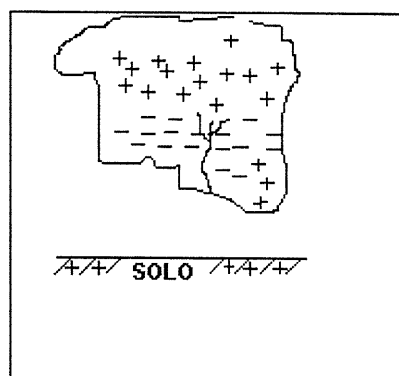


Figura 2.4 – Ruptura preliminar entre as regiões positiva e negativa

A figura 2.4 mostra a fase da ruptura preliminar que ocorre entre as regiões positiva e negativa da base da nuvem, preparando as cargas negativas para serem canalizadas em seu movimento descendente para o solo em pequenos passos fracamente luminosos. Ainda não está totalmente explicada a forma e localização exatas deste fenômeno. É essa etapa que precede a etapa do líder passo a passo [UMAN 1994, UMAN 1982].

## 2.5 *Etapa do líder passo a passo*

O líder passo a passo propaga-se em direção à terra por um caminho tortuoso e em passos, conforme figura 2.5. Os passos do líder têm uma duração típica de  $1\mu\text{s}$  e dezenas de metros de comprimento, de acordo com as referências [UMAN 1994, UMAN 1988, UMAN 1982]. O comprimento dos líderes passo a passo variam entre 10 e 50m, buscando o caminho mais fácil para a formação de um canal para a propagação de cargas para o solo, segundo [BERGER 1994].

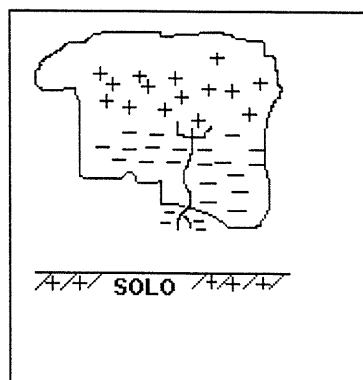


Figura 2.5 – Líder passo a passo

Entre cada passo existe uma pausa entre 20 e 50 $\mu$ s de acordo com [UMAN 1982] e entre 30 e 50  $\mu$ s [BERGER 1994]. Normalmente existe uma ramificação na propagação destes líderes para o solo, sendo que grande parte se perde no ar. 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 milissegundos [UMAN 1994, UMAN 1982].

A velocidade média do fenômeno é em torno de 200 km/s. A corrente média do líder situa-se entre 100 e 1000 ampères com pulsos de corrente em torno de 1 kA [UMAN 1994, UMAN 1982].

Quando o líder passo a passo encontra-se a algumas dezenas de metros de distância do solo, a diferença de potencial existente entre a ponta do líder e o solo atinge valores em torno de 100 milhões de volts [UMAN 1994]. Isto faz com que o campo elétrico sob a ponta do líder torne-se muito elevado, criando condições para que saia um ou mais líderes ascendentes do solo, denominados líderes conectantes. Quando um líder conectante se encontra com um líder passo a passo, inicia-se o processo de conexão.

## 2.6 Etapa do processo de conexão

Os líderes conectantes ascendentes normalmente se formam a partir de árvores, prédios, torres ou mesmo pessoas quando se encontram em locais abertos. A figura 2.6 mostra o início do processo de conexão entre o líder passo a passo e o líder conectante ascendente.

Quando estes dois líderes se encontram, o líder passo a passo é efetivamente conectado ao potencial de terra, dando início à etapa mais significativa para estudos de proteções, que é a etapa da corrente de retorno.

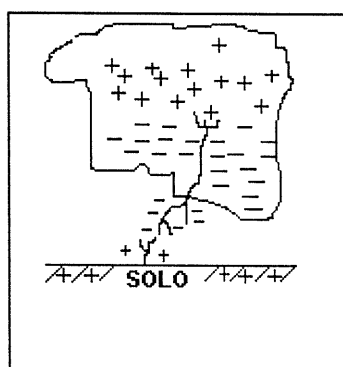


Figura 2.6 – Processo de conexão

## 2.7 *Etapa da primeira corrente de retorno*

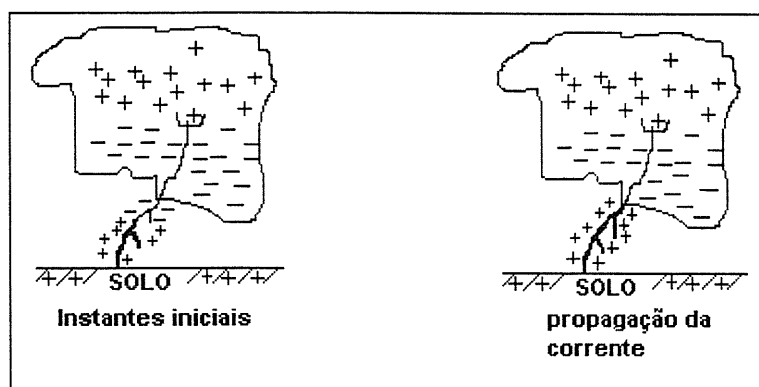


Figura 2.7 – Evolução da etapa da corrente de retorno

A etapa da corrente de retorno é caracterizada por uma onda ionizante que descarrega o canal previamente carregado criado pelo líder passo a passo, figura 2.7. A velocidade de propagação da corrente de retorno varia de 100.000 km/s a 150.000 km/s próximo ao solo, conforme [UMAN 1994] e com velocidades na faixa de 6% a 45% da velocidade da luz no vácuo de acordo com [PIANTINI 1997]. Próximo do solo a velocidade é mais alta e à medida que se aproxima das nuvens a velocidade diminui. Para medições da velocidade da primeira corrente de retorno, considerando o canal curto, quando o comprimento iniciando próximo do solo vai até 500m, a velocidade média foi de  $1.9 \pm 0.7 \times 10^8$  m/s para descargas naturais e  $1.4 \pm 0.4 \times 10^8$  m/s para as descargas forçadas. No caso de canais longos, quando o comprimento for superior a 500m, a velocidade média medida foi de  $1.3 \pm 0.3 \times 10^8$  m/s para descargas naturais e  $1.2 \pm 0.3 \times 10^8$  m/s para as descargas forçadas [Mach 1989]. O tempo de trânsito típico da propagação desta corrente ao longo do canal é de 100  $\mu$ s [UMAN 1994, UMAN 1982].

A corrente de retorno possui um valor de pico típico de 30 kA no nível do solo, com um tempo de frente de onda de poucos microssegundos e tempo de meia-cauda em torno de 50  $\mu$ s, de acordo com [UMAN 1994, UMAN 1982]. Já as medições realizadas no estado de Minas Gerais apresentam valores medianos de intensidades de corrente de 40.2kA para a primeira corrente de retorno e de 16.5kA para as correntes de retorno subsequentes [SCHROEDER 1999].

Nessa etapa, a temperatura, que pode atingir 30.000 °C, e possuir valores elevados de pressão, faz com que o ar ao redor do canal se expanda abruptamente, comprimindo o ar na sua vizinhança, quase sempre

resultando em uma onda sonora denominada trovão. Esta é a etapa mais visível da descarga atmosférica.

Esta etapa da corrente de retorno é a mais significativa para cálculos das tensões induzidas, visto que as intensidades de correntes são elevadas, com altas taxas de crescimento, provocando variações de campo, o que induz elevados valores de tensão nos equipamentos e sistemas.

A descarga atmosférica pode terminar neste ponto, mas em muitos casos a nuvem não é totalmente descarregada, possuindo ainda uma grande quantidade de cargas em seu interior. Isso irá propiciar o surgimento de novas movimentações de cargas, que poderão resultar em mais cargas sendo transferidas para o solo, utilizando o canal já ionizado pelas etapas anteriores.

## 2.8 *Etapa do líder contínuo*

A figura 2.8 mostra a movimentação de cargas através do canal previamente ionizado. É a etapa do líder contínuo, onde as cargas se movimentam em direção ao solo quase sempre pelo mesmo caminho do canal da etapa da corrente de retorno, só que geralmente não possui ramificações.

Os valores de corrente desta etapa são da ordem de centenas de ampères, com uma velocidade em torno de 3.000 km/s [UMAN 1994, UMAN 1982]. O líder contínuo é geralmente seguido por correntes de retorno subsequentes. Em alguns casos, o processo pode acabar neste ponto ou se modificar para um novo líder passo a passo.

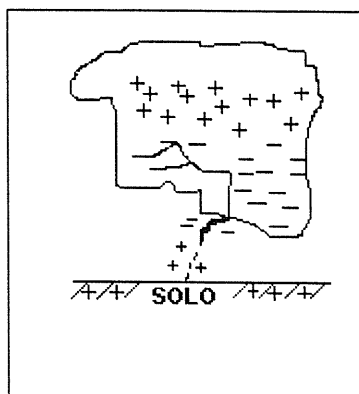


Figura 2.8 – Etapa do líder contínuo

## 2.9 Etapa da corrente de retorno subsequente

A figura 2.9 mostra a etapa das correntes de retorno subsequentes, que geralmente possuem velocidades de propagação da corrente mais elevadas, frentes de onda mais rápidas, pico da corrente em tempos menores e normalmente menores intensidades que as das correntes da etapa da corrente de retorno [UMAN 1984].

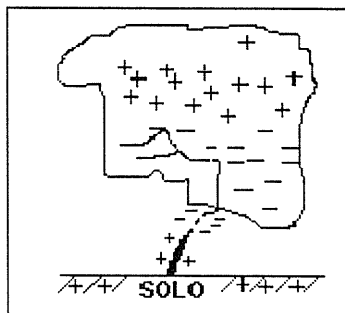


Figura 2.9 – Etapa da corrente de retorno subsequente

O número médio de correntes de retorno subsequentes para o Estado de Minas Gerais é de 6.1, segundo [TRIGINELLI 1994]. O valor mais representativo fica entre 3-4 correntes de retorno subsequentes para [UMAN 1984].

A tabela 2.1 mostra as características principais da corrente do líder passo a passo, na etapa da corrente de retorno, líder contínuo e o número de raios por descarga [Uman 1984].

Tabela 2.1 - Parâmetros Gerais da descarga Atmosférica

Valores	Mínimo	Representativo	Máximo
<b>Líder passo a passo</b>			
Comprimento do passo, em metros	3	50	200
Intervalo de tempo entre os passos em $\mu\text{s}$	30	50	125
Velocidade Média de Propagação do líder passo a passo, em m/seg.	$1.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$	$2.6 \times 10^6$
Carga depositada no canal do Líder passo a passo, em Coulombs	3	5	20

<b>Etapa da Corrente de Retorno</b>			
Velocidade de propagação em m/seg.	$2.0 \times 10^7$	$8.0 \times 10^7$	$1.6 \times 10^8$
Taxa de crescimento da corrente, em kA/ $\mu$ seg.	<1	10	>80
Tempo para atingir o pico de corrente, $\mu$ seg.	<1	2	30
Corrente de pico, (kA)		10 - 20	110
Tempo para metade do valor da corrente depois do pico, $\mu$ seg.	10	40	250
Carga Transferida excluindo A corrente contínua, em C	0.2	2.5	20
Comprimento do canal, em km	2	5	14
<b>Líder contínuo</b>			
Velocidade de propagação, em m/seg.	$1.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$2.1 \times 10^7$
Canal depositada no canal do líder contínuo, em C	0.2	1	6
<b>Descargas atmosféricas</b>			
Número de raios por descarga atmosférica	1	3-4	26
Intervalo de tempo entre raios na ausência da corrente contínua , em $\mu$ seg.	3	40	100
Tempo de duração da descarga atmosférica, segundos	$10^{-2}$	0.2	2
Carga transferida incluindo a corrente contínua , em C	3	25	90

## 2.10 Aspectos gerais

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 esta razão a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, tem realizado um extenso trabalho desde o início dos anos 70 [TRIGINELLI 1994]. Alguns resultados serão mostrados neste tópico.

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. Com o objetivo de comparação com outras regiões, é apresentada a tabela 2.2 [TRIGINELLI 1994].

A tabela 2.3 apresenta os níveis cerânicos para diversas localidades do mundo para fins de comparação. No estado de Minas Gerais, o nível cerânico médio é de 70 dias de trovoada por ano, o que mostra a importância deste estudo.

**Tabela 2.2 – Densidade média das descargas atmosféricas para diversas localidades**

<b>Localidade</b>	<b>Faixa Descargas/km<sup>2</sup>/ano</b>
Minas Gerais	1-9
México	1-9
África do Sul	1- 12
Itália	1- 4
Alemanha	1- 5.5
Austrália	0.2 – 4



**Tabela 2.3 – Nível Ceráunico para diversas localidades**

<b>Localidade</b>	<b>Níveis Ceráunicos</b>
<b>Minas Gerais</b>	<b>20 - 140</b>
<b>França</b>	<b>20 - 30</b>
<b>África do Sul</b>	<b>5 - 100</b>
<b>Itália</b>	<b>11 - 60</b>
<b>Alemanha</b>	<b>15 - 35</b>
<b>Austrália</b>	<b>5 - 107</b>

## Capítulo 3

# MODELAGEM DO CANAL DE RETORNO

### *3.1 Introdução*

Neste capítulo, será apresentada uma breve descrição dos principais modelos de canal representativos das correntes de retorno de uma descarga atmosférica. Conforme a descrição do capítulo anterior, a etapa mais significativa para estudos de tensões induzidas em redes elétricas é a etapa da primeira corrente de retorno [Nucci 1999, Working Group 33.01 1995].

De agora em diante esta primeira corrente de retorno será referida apenas por corrente de retorno.

O que se busca com a representação do canal de descarga, que é o caminho pelo qual flui a corrente da descarga, são os efeitos da localização do ponto de incidência da descarga atmosférica em relação ao sistema, com o objetivo de obter os valores e as formas de onda das tensões induzidas em uma rede elétrica. Leva-se em consideração os principais parâmetros que modificam os valores e a forma de onda das tensões induzidas que são:

- valor de pico da corrente;
- forma de onda (tempo de frente de onda e tempo de cauda);
- velocidade de propagação da corrente no canal de descarga;
- carga depositada no canal.

A análise e avaliação da tensão induzida por descargas atmosféricas, normalmente segue algumas etapas. Primeiramente, calcula-se a variação do campo eletromagnético causado pela corrente de retorno em diversos pontos da linha empregando um modelo de canal de descarga. Este modelo especifica as características da corrente retorno, em função da altura ao longo do canal e do tempo.

Em seguida, este campo eletromagnético é então usado para calcular as tensões induzidas fazendo uso do modelo de acoplamento que descreve a interação entre o campo e a rede elétrica.

Na área de estudos de tensões induzidas, são estas modelagens que possibilitam a determinação das tensões induzidas por descargas atmosféricas que aparecem em redes elétricas, quando uma descarga atmosférica incide nas proximidades das mesmas.

O número de medições de descargas atmosféricas naturais que existem para validar estes modelos não são muitas, pois exige-se a medição da corrente e campos simultaneamente, com instrumentos adequados, além de ser necessária uma quantidade significativa de dados para consolidar o modelo. Considerando a aleatoriedade do fenômeno, a formação de um banco de dados abrangente que leve em consideração os aspectos citados acima pode levar muitos anos.

A evolução da tecnologia de medições e a inovação dos métodos de estudos têm permitido a análise de diversas outras particularidades da descarga atmosférica, tais como a influência do líder passo a passo. Medições de tensões induzidas e seu correspondente campo elétrico vertical referente ao líder passo a passo para uma descarga para terra mostraram que a tensão induzida pelo líder passo a passo de maior pulso é 10% do valor da tensão induzida pela corrente de retorno seguinte [Master 1986].

Salienta-se ainda, que observações experimentais realizadas a algumas centenas de metros do canal de descarga mostraram que as variações do campo do líder eram mais lentas e mais baixas quando comparados com a corrente de retorno [Uman 1984].

Uma prática que tem sido difundida atualmente é a utilização de descargas atmosféricas forçadas, pois possibilita a incidência da mesma no local desejado e apropriado para realizar as medições dos aspectos da descarga [Barker 1996, Rakov 1999].

Como o fenômeno é artificial, as etapas do líder passo a passo e da corrente de retorno não são similares ao natural, mas a etapa da corrente de retorno subsequente da descarga atmosférica natural pode ser comparada à descarga atmosférica forçada.

[Barker 1996, Fisher 1993] acreditam que: “ the leader-return stroke sequences in triggered lightning are believed to be very similar to those constituting the subsequent strokes of natural cloud-to-ground lightning”. Outros pesquisadores compartilham da mesma conclusão [Leteinturier 1984, Le Vine 1989, Jordan 1992, Rachidi 1997b].

Com relação aos demais tipos de descargas, que não sejam para a terra, ainda é necessário mais estudos para determinar sua relevância, uma vez que acredita-se que em função das distâncias envolvidas e das características dos fenômenos, estas possuam influência menor [Paulino 1994b].

Deve-se considerar ainda um outro aspecto muito importante com relação aos vários outros tipos de descargas atmosféricas, que é a medição de seus parâmetros e dos campos gerados para que se possa constituir um banco de dados para comparação e validação de resultados obtidos teoricamente e experimentalmente.

### *3.2 Modelagem do Canal de Retorno*

Os diversos modelos existentes buscam representar a distribuição espacial e temporal da corrente de descarga ao longo do canal, nesse caso, da corrente de retorno. Pois ela é a fonte de campos eletromagnéticos que irão se propagar e provocar tensões induzidas nas linhas e nos equipamentos. Desta maneira um modelo de canal de retorno deve reproduzir as características das descargas atmosféricas medidas principalmente ao nível do solo, pois a grande maioria das medições são realizadas em bases localizadas no solo [Hirse 1995]. Além disso, um modelo para ser usado em estudos de engenharia deve ser simples e validado. Portanto, os modelos teóricos devem referir-se a esta situação para permitir a comparação com as medições [Nucci 1995, Rakov 1998]

A figura 3.1 apresenta a geometria do problema, onde o canal da descarga atmosférica é considerado uma antena vertical, retilínea, sem ramificações ou tortuosidades, sem dimensão transversal, perpendicular em relação ao solo que, é considerado ideal.

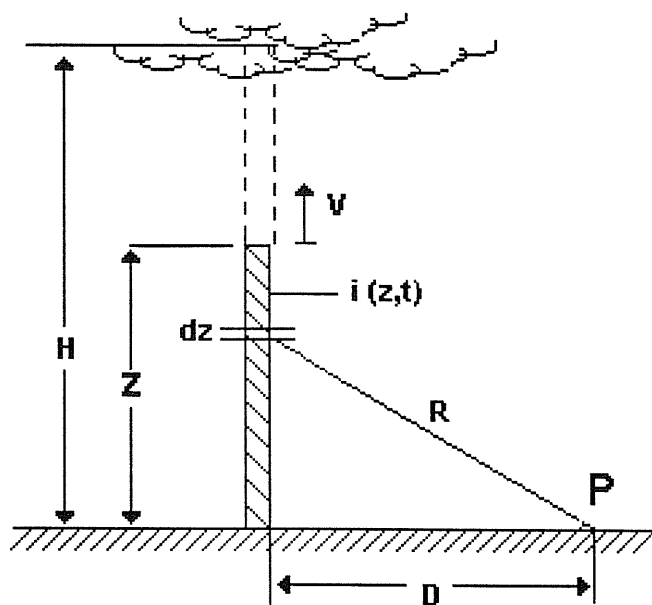


Figura 3.1 – Parâmetros para cálculo dos campos originados pelo canal de descarga atmosférica [Nucci 1995]

onde,

- H é a altura do canal que contribui com o campo;
- t é o tempo;
- R é a distância entre o ponto onde o campo é medido do segmento do canal dz;
- z altura que está sendo considerada;
- D é a distância da base do canal até o ponto onde deseja conhecer o valor do campo;
- P é o ponto onde se deseja conhecer o valor do campo;
- v é a velocidade de propagação.

Os modelos mais usuais de representação do canal de retorno são [Rachidi 1997, Paulino 1994b]:

- Modelo Bruce-Golde (BG)
- Modelo de Linha de Transmissão (TL)
- Modelo de Linha de Transmissão Modificada (MTL)
- Modelo de Fonte de Corrente Viajante (TCS)
- Modelo Diendorfer-Uman (DU)

Estes modelos que utilizam fontes de correntes podem ser divididos em duas classes:

- a fonte de corrente é estacionária e colocada no nível do solo;
- a fonte de corrente é móvel e colocada no topo do canal.

A figura 3.2 mostra a representação para os modelos que usam uma fonte de corrente estacionária localizada no nível do solo, que são os modelos BG, TL e MTL

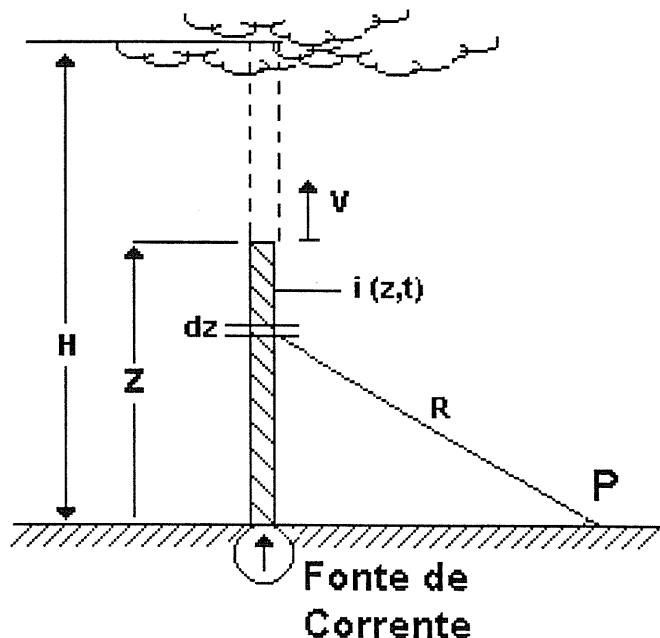


Figura 3.2 - Representação esquemática da classe de corrente estacionária colocada no nível do solo.

Nos modelos TCS e DU a fonte de corrente é colocada no topo do canal de retorno e se movimenta, no sentido da nuvem para o solo. Existem outros modelos na literatura, mas sua aplicação a estudos de tensão induzida em linhas elétricas não se justifica, uma vez que possuem parâmetros de difícil validação com valores medidos e são por demais complexos para serem considerados em programas computacionais [Cooray 1998].

De acordo com dados estatísticos, 90% das descargas são descendentes e de polaridade negativa, sendo estas que serão abordadas em nossos estudos [Uman 1982]. Mas os modelos mencionados acima podem ser aplicados igualmente para casos de descargas positivas [Nucci 1995]. Conforme [Rakov 2000] as descargas positivas são menos freqüentes, e geralmente possuem uma menor taxa de crescimento da corrente e estudos destas tensões são descritas em [Fofana 1998].

Para realizar a comparação entre os modelos de canal de descarga, deve-se assumir uma corrente no ponto de incidência permitindo desta forma a comparação dos diversos modelos, uma vez que identifica a corrente no nível do solo [Hirse 1995, Nucci 1995].

A corrente  $i(z, t)$  da figura 3.2 para  $z = 0$  é:

$$i(t) = \frac{I_o}{n} \frac{(t/\tau_1)^m}{[(t/\tau_1)^m + 1]} \cdot \exp^{(-t/\tau)} \quad (3.1)$$

onde:

$I_o$  é a amplitude da corrente no nível do solo;

$\tau_1$  é a constante do tempo de frente;

$\tau$  é a constante do tempo de cauda;

$m$  é um expoente que varia de 2 até 10;

$n$  é um fator de correção da amplitude, dado por:

$$n = \exp\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau}\right)\left(m\frac{\tau}{\tau_1}\right)^{1/m}\right] \quad (3.2)$$

A expressão 3.1 tem sido escolhida em detrimento da expressão da dupla exponencial,  $i = i_o (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ , para representar a corrente no nível do solo. Pois permite modificar a amplitude da corrente, o tempo de frente e de cauda e ajustar a carga transferida a partir da variação individual dos parâmetros de amplitude, tempo de frente e de cauda [Nucci 1995].

A figura 3.3 apresenta uma forma de onda típica para descargas negativas para a primeira corrente de retorno e subsequentes, medidas ao nível do solo utilizada para a realização dos cálculos necessários para a determinação da tensão induzida. Como pode ser observado na figura 3.3 as amplitudes da primeira corrente e segunda corrente de retorno são elevadas, da ordem de 72 kA. Mas a taxa de crescimento da corrente para a descarga subsequente é maior [Berger 1994, Lin 1980].

Com a finalidade de estabelecer um modelo teórico representativo do canal de descarga durante a corrente de retorno o canal de descarga é considerado retilíneo e perpendicular ao solo, a terra é considerada como um condutor perfeito, ou seja, de condutividade infinita, e a velocidade da corrente de retorno é considerada constante.

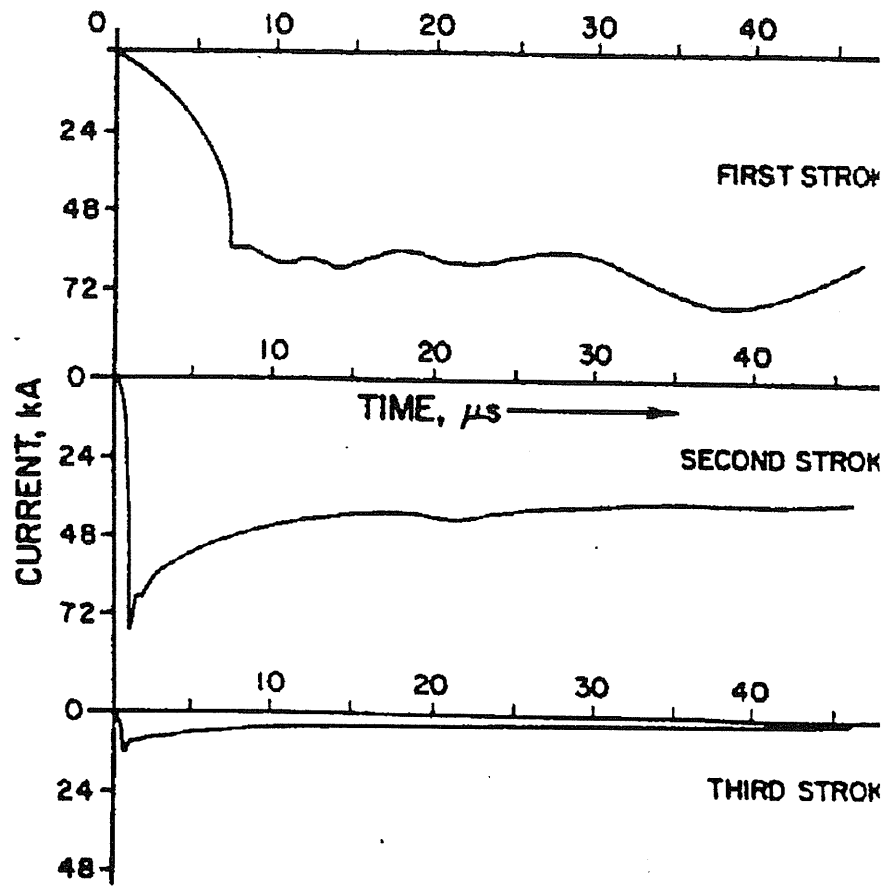


Figura 3.3 - Forma de onda típica para descargas negativas para a primeira corrente de retorno e subsequentes [Anderson 1980].

### 3.3 Modelo de Bruce-Golde

No modelo Bruce e Golde (BG) [Hirse 1995], a corrente de retorno é dada pela expressão 3.3:

$$\left\{ \begin{array}{l} i(z, t) = i_o(0, t) \dots z \leq vt \\ i(z, t) = 0 \dots z > vt \end{array} \right\} \quad (3.3)$$



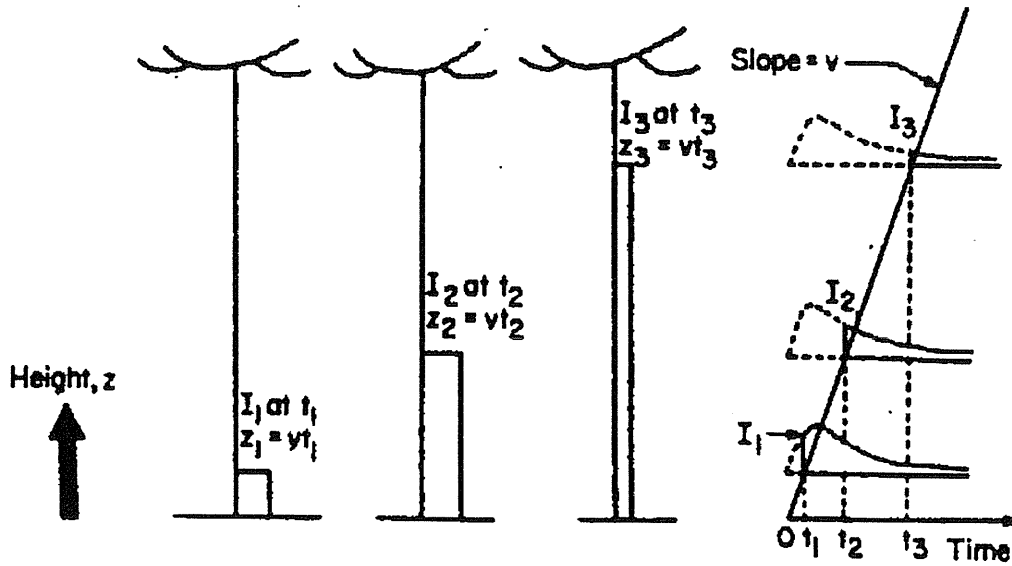


Figura 3.4—Propagação da corrente através do modelo Bruce-Golde [Lin 1980]

Para qualquer ponto no canal de retorno,  $z \leq vt$ , a corrente é a mesma do ponto de incidência e o processo elétrico propaga com velocidade infinita  $u = \infty$ .

### 3.4 Modelo de Linha de Transmissão

No modelo de linha de transmissão (TL) a corrente de retorno é dada pela expressão 3.4 [Hirse 1995]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i(z, t) = i_o \left( 0, t - \frac{z}{v} \right) \dots z \leq vt \\ i(z, t) = 0 \dots z > vt \end{array} \right. \quad (3.4)$$

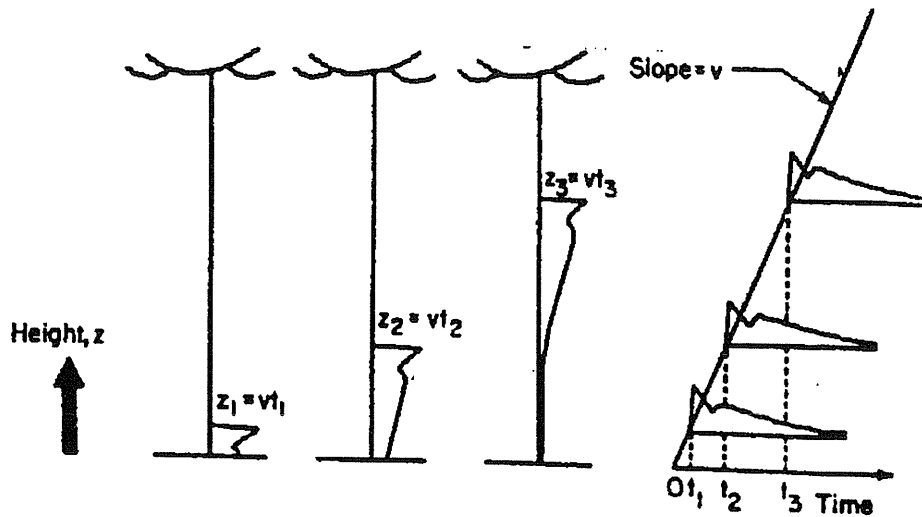


Figura 3.5 – Propagação da corrente através do modelo transmission line [Lin 1980]

A forma de onda da corrente de retorno no nível do solo trafega pelo canal sem distorção e sem atenuação com velocidade constante. Neste modelo não é considerada a remoção das cargas depositadas ao longo do canal. A corrente em uma dada altura é igual à corrente no solo em um instante de tempo  $z/v$  anterior. Este modelo de representação do canal de descarga foi utilizado na implementação da metodologia Rusck-EMTP.

### 3.5 Modelo de Linha de Transmissão Modificada

O modelo linha de transmissão modificada (MTL) é uma modificação do modelo TL [Hirse 1995]. Com a diferença que na propagação da corrente de retorno pelo canal, uma redução exponencial no valor da intensidade da corrente é considerada. A corrente é dada pela expressão 3.5:

$$\left\{ \begin{array}{l} i(z,t) = e^{-\frac{z}{\lambda}} \cdot i_o \left( 0, t - \frac{z}{v} \right) \dots\dots\dots z \leq vt \\ i(z,t) = 0 \dots\dots\dots z > vt \end{array} \right\} \quad (3.5),$$

onde:

$\lambda$  varia 1-3 km [Nucci 1990];

$v$  é a velocidade da corrente de retorno (km/s).

Esta redução da corrente simula a transferência de cargas promovidas pelo líder descendente para o envelope de corona e depois descarregada pela etapa da corrente de retorno.

### 3.6 Modelo de Fonte de Corrente Viajante

O modelo fonte de corrente viajante (TCS) que também se refere a corrente incidente no nível do solo, é um modelo que busca uma maior aproximação com o fenômeno físico [Hirse 1995]. O modelo TCS considera as cargas no canal, de forma que assume um processo de descarga instantâneo das cargas no canal por intermédio da frente da corrente de retorno que captura as cargas do líder e as converte na corrente descendente que propaga pelo canal de retorno altamente ionizado. Então a corrente flui para a terra na velocidade da luz ( $c$ ).

A fonte de corrente é considerada colocada no topo do canal de retorno que está propagando partindo do solo e viajando em direção a nuvem com a velocidade de propagação do canal de retorno. A corrente oriunda desta fonte de corrente preenche o canal da descarga propagando no sentido da terra. Portanto, a corrente na altura  $z$  é igual à do solo em um instante de tempo  $z/c$  anterior. Para o caso da corrente fluir para o solo com velocidade infinita, o modelo TCS se reduz ao BG, conforme mostra a expressão 3.6:

$$\left\{ \begin{array}{l} i(z, t) = i_o \left( 0, t + \frac{z}{c} \right) \dots\dots\dots z \leq vt \\ i(z, t) = 0 \dots\dots\dots z > vt \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

### 3.7 Modelo de Diendorfer-Uman

No modelo Diendorfer-Uman (DU) a velocidade de formação do canal de retorno é assumida constante [Hirse 1995]. A fonte de corrente se propaga da nuvem para o solo. No modelo DU, diferentemente do modelo TCS, a fonte de corrente é expandida para considerar mais alguns parâmetros, tais como corrente no canal ionizado e a corrente de corona, conforme mostram as expressões 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10:

$$i_o = i_{o/bd} + i_{o/cr} \quad (3.7)$$

$$i(z, t) = i_{bd}(z, t) + i_{cr}(z, t) \quad (3.8)$$

$$i_{bd}(z,t) = \begin{cases} i_{o,bd} \left( t + \frac{z}{c} \right) - i_{o,bd} \left( \frac{z(1 + v/c)}{v} \right) \cdot e^{-\frac{t-z/v}{\tau_{bd}}} & \dots\dots z \leq vt \\ 0 & \dots\dots z > vt \end{cases} \quad (3.9)$$

$$i_c(z,t) = \begin{cases} i_{o,cr} \left( t + \frac{z}{c} \right) - i_{o,cr} \left( \frac{z(1 + v/c)}{v} \right) \cdot e^{-\frac{t-z/v}{\tau_{cr}}} & \dots\dots z \leq vt \\ 0 & \dots\dots z > vt \end{cases} \quad (3.10)$$

onde:

$i_{bd}$  é a corrente devido ao processo de descarga;

$i_{cr}$  é a corrente devido ao envelope de corona;

$\tau_{bd}$  é a constante de tempo relativa ao processo de descarga;

$\tau_{cr}$  é a constante de tempo relativa ao processo de corona.

### 3.8 Aspectos gerais dos vários modelos

Resumidamente os parâmetros necessários para os modelos são apresentados na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Parâmetros dos diversos modelos de canal de descargas**

Modelo	Corrente	Velocidade de propagação da corrente	Parâmetros Adicionais
BG	$i_o(t)$	$\infty$	-
TL	$i_o(t)$	V	-
MTL	$i_o(t)$	V	$\lambda$
TCS	$i_o(t)$	C	-
DU	$i_{o/bd}(t)$ $i_{o/cr}(t)$	V	$\tau_{bd}$ $\tau_{cr}$

### 3.9 Comparação dos Diversos Modelos

A tabela 3.2 mostra um resumo dos valores dos erros absolutos para os modelos de canal de descarga dos valores de pico do campo com base em descargas atmosféricas forçadas, onde mediu-se simultaneamente a corrente, a velocidade e os campos para descargas subsequentes conforme referência Thottappillil e Uman [Nucci 1995].

**Tabela 3.2 – Erros entre os diversos modelos**

Erro = ( E <sub>calc</sub> - E <sub>medi</sub> ) / E <sub>medi</sub>					
	TL	MTL	TCS	DU	MDU
<b>Médio</b>	0.17	0.16	0.43	0.23	0.21
<b>Desv. Padrão</b>	0.12	0.11	0.22	0.20	0.19
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.14	0.00	0.02
<b>Máximo</b>	0.51	0.45	0.84	0.63	0.60

Na tabela 3.2 observa-se que, com exceção do Modelo TCS, os demais modelos têm um erro médio absoluto em torno de 20% para o pico do campo elétrico inicial [Nucci 1995]. Fica evidenciado que, para o cálculo dos valores máximos de tensão, o modelo TL apresenta bom desempenho [Nucci 1995, Nucci 1990].

## Capítulo 4

# MODELAGEM DO ACOPLAMENTO

### 4.1 *Introdução*

Para quantificar e qualificar as correntes e as tensões induzidas por variações de campo ao longo da linha, deve-se fazer uso de modelos de acoplamento. Neste capítulo serão descritos os parâmetros que devem ser considerados no acoplamento campo-linha, as simplificações mais usuais, os aspectos ainda não consolidados e a descrição da teoria de Rusck, que será utilizada neste trabalho.

### 4.2 *Hipóteses de aproximações para estudo do fenômeno*

Conforme [Nucci 1995], o problema da interação entre o campo eletromagnético provocado pela descarga atmosférica e as linhas elétricas pode ser tratado pela teoria de antenas, que é uma aproximação geral e rigorosa, fundamentada nas equações de Maxwell. Mas devido ao comprimento das linhas elétricas de distribuição, o uso dessa teoria implicaria em tempos de computação excessivos, necessitando-se então de teorias aproximadas mais otimizadas.

Ainda segundo este trabalho o uso da aproximação quasi-estática faz com que a propagação seja desprezada e o acoplamento entre o campo incidente e as linhas elétricas seja descrito por meio de elementos concentrados, isto é, indutâncias e capacitâncias, o que não é apropriado. Tal hipótese de estudo exige que as dimensões dos equipamentos elétricos sejam menores que um décimo do menor comprimento de onda do campo eletromagnético. Isso torna essa hipótese inaceitável para o caso de linhas elétricas iluminadas por campos eletromagnéticos provenientes de descargas atmosféricas que possuem frequências acima de 1 MHz e comprimento de onda inferiores a 300m.

---

Uma outra aproximação possível é a da teoria da linha de transmissão. A hipótese básica desta aproximação é que a resposta da linha é *quasi-TEM*, e que a dimensão transversal da linha é muito pequena quando comparada com o menor comprimento de onda significativo. Isto permite representar a linha por uma série de seções elementares, às quais se aplica a aproximação quasi-estática. Cada seção é iluminada progressivamente pelo campo eletromagnético incidente, levando-se em conta apenas os efeitos da propagação longitudinal.

O cálculo da interação entre os campos criados pelas descargas atmosféricas e as linhas elétricas por meio da aproximação de linha de transmissão apresenta-se como o mais promissor e também é o mais utilizado pelos pesquisadores do tema, conforme literatura técnica [Nucci 1995].

Um modelo adequado de acoplamento para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas é um modelo que, de acordo com os valores dos campos eletromagnéticos que iluminam a linha, calcula as tensões induzidas por estes campos. Face a isto, é necessário validar os valores de tensões induzidas obtidos, comparando-os com um banco de dados de medições simultâneas dos campos e das tensões induzidas no sistema elétrico.

### ***4.3 Estudos Experimentais – Medições Disponíveis***

Instalações experimentais têm sido montadas com o intuito de promover um melhor entendimento do fenômeno. A obtenção dos campos eletromagnéticos, tensões e correntes induzidas simultaneamente não é muito comum, exceção feita a alguns casos [Nucci 1995]. Normalmente se obtém a medição do campo ou da tensão induzida isoladamente. A seguir algumas medições serão descritas

#### ***4.3.1 - Medições realizadas pelo grupo de St. Privat d'Allier na França***

Este grupo composto por diversas instituições francesas, tais como, Electricité de France (EDF), Centre National d'Etudes Atomique (CNET)

---

[Hamelin 1979], realizou medições de campos eletromagnéticos provenientes de descargas atmosféricas forçadas nas proximidades de uma linha de comunicação com dois condutores de 2100 m de comprimento, situada a 1400m de distância da torre de lançamento, e de uma linha de energia trifásica, de 260 m de comprimento situada a 50m da torre de lançamento, conforme pode ser visto na figura 4.1.

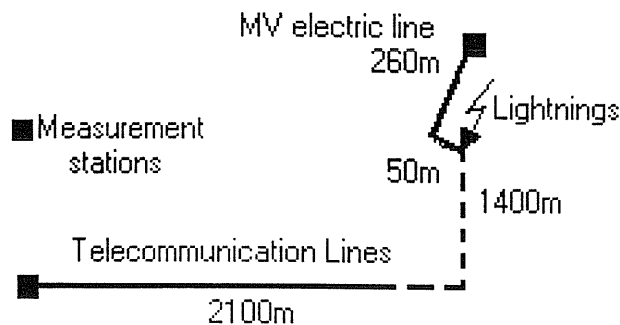


Figura 4.1 Localização das Linhas

Neste estudo o grupo buscou determinar os efeitos dos campos eletromagnéticos nas linhas aéreas a fim de determinar a amplitude a forma da tensão induzida e portanto estabelecer uma metodologia de proteção.

### 4.3.2 - Medições realizadas no Japão

A influência do solo real sob uma linha aérea submetida a uma tensão induzida por descargas atmosféricas foi desenvolvido por [Ishii 1999] em um trabalho experimental. Com o intuito de considerar o efeito do solo, o modelo em escala reduzida -1/20- foi montado sobre um solo com perdas. O canal de descarga foi representado por um condutor de cobre de 0.5mm enrolado em forma de bobina, com 28 metros e suspenso por um balão.

Nas medições, apresentadas na figura 4.2, pode-se observar que em um ponto próximo -150m- a tensão medida é maior que a tensão calculada para este mesmo ponto levando em consideração um solo ideal. E para um ponto distante -600m- a tensão medida inverte de polaridade. Mas a tensão calculada para este ponto tem um pequena inversão de polaridade e depois mantém a mesma polaridade do ponto próximo. Este trabalho concluiu que a resistividade elevou o valor da tensão induzida, para esta configuração e método de estudo.



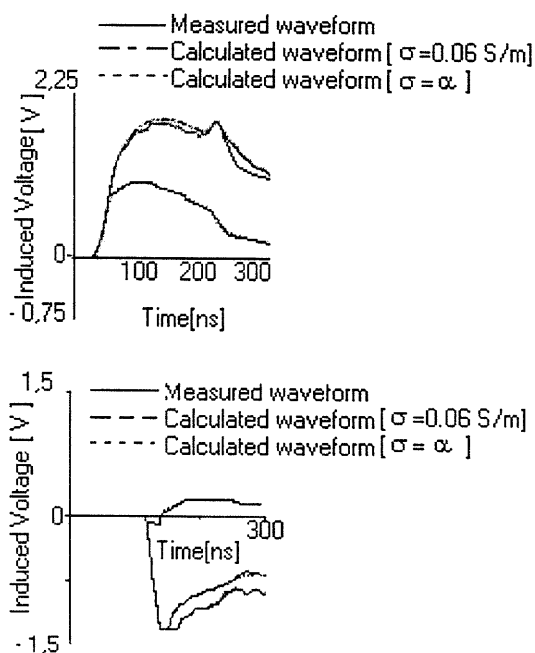


Figura 4.2 – Comparação entre as formas de onda calculadas e medidas: (a) ponto próximo -150m do ponto de incidência (b) ponto distante 600m do ponto de incidência [Ishii 1999]

Em um outro estudo apresentado por [Yokoyama 1986] foram realizadas diversas medições usando uma linha experimental trifásica desenergizada de 820 m, com uma configuração diferente das utilizadas normalmente. As tensões medidas foram induzidas por descargas atmosféricas incidentes em uma torre de 200 m de altura, cuja distância mais próxima da linha é de 200 m. Neste experimento as tensões e correntes foram medidas, mas não os campos correspondentes. A linha experimental estava casada em suas extremidades, evitando-se reflexões que pudessem dificultar a análise das formas de onda. O que facilitou a observação da polaridade das tensões induzidas. A forma de onda mais freqüente foi unipolar, apesar de esporadicamente algumas apresentarem uma forma bipolar.

### 4.3.3 - Medições realizadas na África do Sul

Na África do Sul [Eriksson 1982] foram realizados estudos em uma linha de 11kV com posteação de madeira, 9.9 km de comprimento, trifásica

na configuração horizontal, com um nível básico de isolamento de 500 kV. Um lado da linha foi aterrado e o outro estava aberto.

As medições foram efetuadas a uma distância de 4.3 km da linha de um dos lados da linha. Em torno de 300 medições alcançaram uma tensão induzida maior que 12 kV. A tensão induzida obtida possuía a mesma forma nas três fases e na sua grande maioria apresentava apenas uma única polaridade positiva, conforme pode ser observado na figura 4.3, onde o valor de pico da tensão é de 24kV. Uma pequena parte que apresentava pequenos pulsos negativos na parte inicial do onda antes do surto principal o que foi associado com descargas atmosféricas muito próximas da linha, por influência da etapa do líder descendente. Outra constatação foi que tensões superiores a 100 kV só ocorreram em praticamente 10% das medições. Nestes estudos tensões superiores a 300kV foram encontradas em poucas medições, sugerindo um nível de isolamento para esta linha de 300kV.

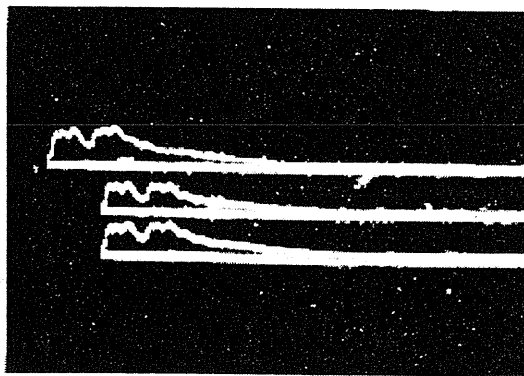


Figura 4.3 – Medição da tensão induzida nas três fases

#### 4.3.4 - *Medições realizadas no México*

Durante o verão de 1984 [Cooray 1986], no México, foi montada uma linha experimental de 13kV, de 2.8 km de comprimento, casada em suas extremidades, com instrumentos de medição colocados nas extremidades. Foram estudadas várias descargas atmosféricas com pontos de incidência variados em relação a linha, até uma distância de pelo menos 5km para minimizar os erros. Os resultados de amplitude, polaridade e forma de onda para medições realizadas em determinadas posições poderiam ser explicadas considerando a resistência finita do solo.

### 4.3.5- Medições realizadas em Tampa Bay

Nestas medições, uma linha experimental desenergizada de 682m de comprimento foi montada em Tampa Bay, Flórida. A altura do condutor mais elevado é 7.5m e o nível de isolamento é 500kV. Este estudo foi coordenado pelo Electric Power Research Institute(EPRI, conforme pode ser visto na figura 4.4 [Barker 1996].

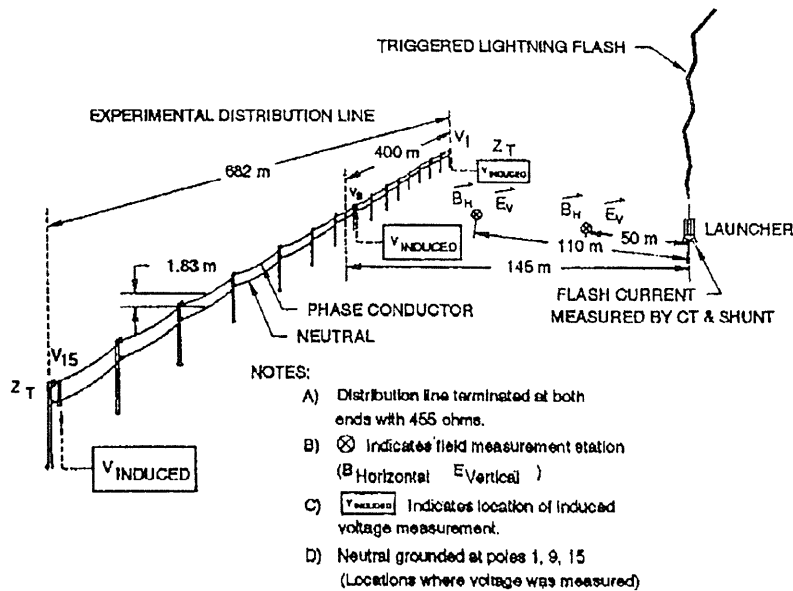


Figura 4.4 – Circuito esquemático da linha de distribuição, base de lançamento e instrumentos de medição

Nesta pesquisa os valores de pico das tensões induzidas variaram entre 8 e 100kV e as correntes das descargas atmosféricas variaram de 4 kA até 44 kA. A figura 4.5 mostra uma forma de onda de tensão induzida obtida neste experimento.

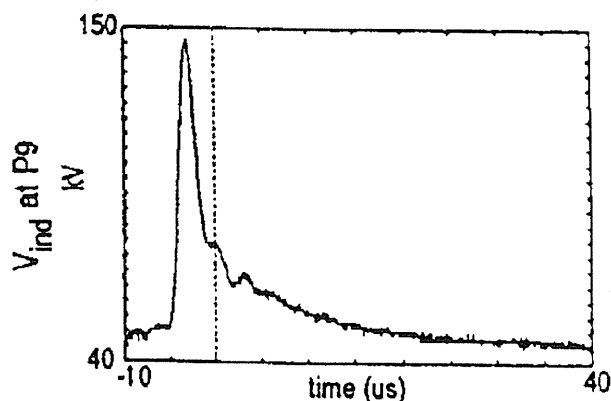


Figura 4.5 – Tensão induzida no poste 9 da linha

Neste experimento observou-se uma relação linear entre a amplitude de pico da corrente e a tensão induzida. Neste estudo observou-se que os tempos de frente variaram entre 1.09 a 3.44  $\mu\text{s}$  e o tempo de cauda variaram entre 2.4 e 12.0  $\mu\text{s}$ . Este trabalho apresentou resultados onde a teoria de Rusck teria falhado na determinação dos valores de tensão induzida fase-neutro quando comparados com os valores medidos. Mas como poderá ser observado no capítulo 6 deste trabalho a comparação entre os resultados das medições e as simulações utilizando a teoria de Rusck apresentam boa concordância.

A apresentação de um único estudo completo com todos os parâmetros estatísticos significativos do fenômeno da tensão induzida para as descargas atmosféricas não existe na literatura. A grande maioria dos trabalhos trata principalmente dos parâmetros da etapa da primeira corrente de retorno. Esta dificuldade se apresenta principalmente para as descargas naturais onde a aleatoriedade dos pontos de incidência, o número de descargas medidas, as características do solo, os parâmetros da descarga, as terminações da linha e os erros de medições, entre outros pontos, contribuem para a inexistência de um banco de dados que considerem todos pontos relevantes.

Por outro lado, com os estudos das descargas atmosféricas forçadas [Barker 1996], determinando o ponto de incidência da descarga, abre-se a possibilidade de um número maior de medições, e medição simultânea dos campos e das tensões induzidas.

Pode-se dizer que as descargas atmosféricas forçadas são um poderoso instrumento para avaliação e evolução dos estudos de tensões induzidas em linhas aéreas de distribuição por campos eletromagnéticos.

## 4.4 Modelos de Acoplamento

Os modelos de acoplamento mais utilizados são:

- Modelo de Rusck(1957);
- Modelo de Chowdhuri e Gross (1967);
- Modelo de Agrawal, Price e Gurbaxani (1980) [**Agrawal 1980**];

Estes modelos descrevem o acoplamento entre os campos gerados pela descarga atmosférica e os condutores de um sistema elétrico, valendo-se da aproximação por linhas de transmissão.

As diferenças entre estes três modelos têm causado grandes discussões e muitas controvérsias entre os pesquisadores [**Nucci 1995**]. Isso se deve ao fato dos modelos serem expressos em termos de grandezas diferentes. No modelo de Rusck, as equações são descritas em termos de potenciais escalar e vetor; no modelo de Chowdhuri, em termos de tensão total e, no modelo de Agrawal, em termos de tensão iluminada. Rusck e Chowdhuri utilizam um par de equações similares. Contudo, a avaliação dos vários modelos de acoplamento é possível, desde que se faça considerações comuns a todas as teorias, possibilitando a sua comparação.

Deve-se ressaltar que, considerando os campos eletromagnéticos criados por uma antena vertical perpendicular ao solo, os modelos de Agrawal e Rusck fornecem os mesmos resultados [**Nucci 1995, Uman 1994**].

### 4.4.1- Modelo de Rusck

A seguir será apresentada a metodologia de cálculo da tensão induzida desenvolvida por [**Rusck 1957**], que será denominada teoria de Rusck.

Quando da elaboração de sua teoria, Rusck valeu-se de um sistema de três fios posicionados na configuração horizontal, a uma altura  $h$  acima do nível do solo e uma descarga atmosférica nuvem-solo incidindo na lateral da linha. Considerou que a corrente de retorno que propaga pelo canal de descarga é a principal causadora da tensão induzida. A ruptura preliminar,

causada pelo líder descendente, e a canalização de cargas negativas para terra, pelo líder contínuo, foram desconsiderados, pois a velocidade destes fenômenos são mais baixas e não provocam uma variação de campo eletromagnético bastante rápida para torná-los significativos para as tensões induzidas em linhas.

Assim, Rusck considera um canal de descarga verticalmente ao solo, estando carregado de maneira uniforme, por onde se propagará a corrente de retorno do solo em sentido às nuvens. A tortuosidade do canal, bem como a variação da distribuição de cargas ao longo deste, não são consideradas, pois o canal de descarga pode ser considerado vertical e a variação da densidade de cargas ao longo das primeira centenas de metros, que são determinantes para a amplitude de pico e tempo de frente, não é muito grande [Boaventura 1990]. Como o canal de descarga é suposto com uma carga uniforme a corrente de retorno neutraliza as cargas presentes no canal em forma de uma função degrau e viajando sem distorções ao longo do canal.

Rusck considera o solo com resistividade nula, ou seja, modela o solo como um condutor perfeito e utiliza o método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético. Para distâncias do ponto de incidência da descarga atmosférica até a linha da ordem de poucas centenas de metros a influência da resistividade do solo é de menor importância. Para que a contribuição da resistividade do solo seja significativa na onda de tensão induzida as distâncias envolvidas devem ser maiores.

Rusck considera ainda que o campo eletromagnético sob a linha não tem uma variação significativa do solo até a altura da linha (em torno de uma dezena de metros), pois esta é muito pequena quando comparada com comprimento do canal (comprimento médio 5km) [Uman 1984].

Então, o modelo desenvolvido por Rusck para o cálculo da tensão induzida em linhas aéreas é constituído por um condutor carregado uniformemente, disposto verticalmente em relação a um solo condutor perfeito. Este condutor representa o canal da descarga atmosférica, onde se

---

propaga a corrente de retorno, representada por um degrau de corrente viajando do solo no sentido da nuvem de tempestade. A partir destas considerações e utilizando as equações de Maxwell, Rusck obteve as expressões para os campos eletromagnéticos associados à descarga atmosférica. Assim, conhecidos estes campos, Rusck desenvolveu um modelo de interação dos mesmos com um condutor aéreo localizado nas proximidades do ponto de incidência da descarga no solo. Modelo que permitiu a obtenção de uma expressão analítica para a tensão induzida. Entretanto, esta solução analítica fica restrita a linha ideais, infinitas, de geometria simples e sem descontinuidades.

Uma adaptação do cálculo da tensão induzida utilizando a teoria de Rusck para linhas finitas e com descontinuidades (pontos de aterramentos e pára-raios) foi realizada por **[Paulino 1994b]**. Este trabalho contemplava um sistema monofásico, que devido a forma de implementação, a discretização da linha ficava reduzida a poucos segmentos, que no caso de linhas com perdas, limitava-se a apenas 06(seis) nós. O presente trabalho permite que a linha seja discretizada em inúmeros segmentos, que estudos de circuitos polifásicos com diferentes configurações sejam possíveis e que a presença dos equipamentos (pára-raios, transformadores, capacitores, indutores, etc) seja considerada. No capítulo 6, que aborda os aspectos da implementação do cálculo da tensão induzida no EMTP, será visto que, estas restrições de número de segmentos, circuitos polifásicos e presença de equipamentos foram eliminadas.

A resolução numérica das equações de Rusck para o cálculo de tensões induzidas foi realizada por **[Porto 1990]**, com resultados satisfatórios porém através de um programa específico, tornando sua utilização bastante restrita **[Paulino 1994b]**.

Rusck determina a tensão induzida na linha a partir do campo elétrico criado no solo pelas cargas depositadas no canal de descarga e pela própria corrente de descarga. O campo no solo é calculado a partir da expressão:

$$\vec{E}_i = -\nabla \vec{V}_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (4.1),$$

onde:

$E_i$  - é o campo elétrico no solo;

$V_i$  - potencial escalar criado pelas cargas depositadas no canal de descarga;

$A$  - potencial vetor magnético criado pela corrente que circula pelo canal de descarga.

Vale observar que a primeira parcela do campo elétrico ( $\nabla V_i$ ) é conservativa e a segunda parcela ( $\partial A_i / \partial t$ ) é não-conservativa. Podemos expressar o campo elétrico como:

$$\vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_{NC}$$

$$\vec{E}_C = -\nabla \vec{V}_i \text{ campo conservativo}$$

$$\vec{E}_{NC} = -\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \text{ campo não conservativo}$$

A aplicação de fontes de corrente, em trechos discretizados de uma linha de transmissão, e a conseqüente resolução do transitório provocado pelas mesmas fornecem os valores das tensões induzidas pela componente conservativa do campo elétrico. A tensão induzida total é obtida pela adição da solução resultante do cálculo do transitório com a tensão gerada pela componente não conservativa do campo elétrico.

As duas componentes interagem com a linha de forma diferente. A componente originada no potencial escalar (campo elétrico conservativo) provoca a circulação de corrente na linha e a componente originada no potencial vetor (campo elétrico não conservativo) não provoca a circulação de corrente em uma linha sem descontinuidades. A componente não conservativa só provocará a circulação de corrente na linha nos casos onde existam descontinuidades da linha para a terra.

Esta dedução foi elaborada para uma corrente de retorno em forma de degrau; no entanto, pode-se calcular a tensão induzida por uma corrente com forma de onda qualquer, aplicando o princípio da integral de Duhamel numericamente, bastando substituir a forma de onda da corrente por uma sucessão de degraus defasados no tempo [Paulino 1994b]. Desta forma, a tensão induzida total é constituída pela composição das ondas de tensão



induzida oriundas dos degraus de correntes defasados no tempo. No programa computacional implementado por esta metodologia Rusck-EMTP, as formas de onda da corrente foram aproximadas por uma sucessão de degraus compondo uma onda triangular, conforme mostrado na figura 4.6.

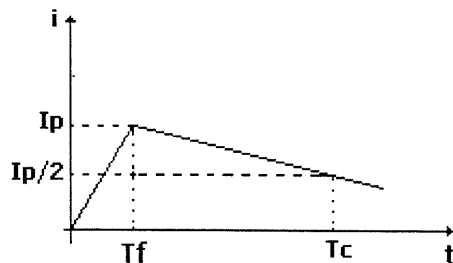


Figura 4.6 – Forma de onda de corrente utilizada na implementação onde,

$i$  é a corrente;

$t$  é o tempo;

$I_p$  é o valor da amplitude da corrente da descarga atmosférica;

$T_f$  é o tempo de frente da onda da descarga atmosférica;

$T_c$  é o tempo de cauda da onda da descarga atmosférica.

Esta metodologia de “degralização” pode ser aplicada a qualquer forma de onda [Greenwood 1992], mas para estudos de tensões induzidas, a amplitude e o tempo pico da corrente são os parâmetros mais significativos.

As expressões que serão utilizadas para elaborar a subrotina de cálculo da tensão induzida no EMTP usando a teoria de Rusck são apresentadas a seguir:

A expressão que fornece diretamente o valor da fonte de corrente para o potencial escalar (campo conservativo) que será aplicada na linha é:

$$I_c(x,t) = \frac{1}{v_0 Z} \cdot \frac{\partial \vec{V}_i(x,t)}{\partial t} \Delta x \quad (4.2)$$

Onde:

$x$  é o ponto da linha;

$t$  é o tempo (s);

$v_0$  é a velocidade da luz no vácuo (m/s);

$Z$  é a impedância de Thévenin da linha;

$\Delta x$  é comprimento dos segmentos;

A expressão do potencial escalar e:

$$\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t}(x,t) = 60.I_0.h.v.v_0 \cdot \frac{t_0}{\left\{ (v.t)^2 + \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right] r_0^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (4.3)$$

Onde:

$I_0$  é o valor de pico da corrente de descarga atmosférica (kA);

$h$  é a altura da linha (m);

$v$  é a velocidade da corrente de retorno da descarga atmosférica (m/s);

$r_0$  é a distância do ponto de incidência da descarga atmosférica até "x" na linha (m);

$t_0 = r_0 / v_0$  tempo (s).

Neste ponto, vale salientar que as fontes de corrente desenvolvidas por Rusck utilizam a resposta a uma função degrau. Foi abordado anteriormente que o programa computacional utiliza a amplitude de corrente ( $I_0$ ) representada por uma sucessão de degraus defasados.

Conforme abordado na seção 4.4.1, o campo não-conservativo produz circulação de corrente apenas nos pontos em que a linha possui descontinuidades. Quando a linha elétrica não tem descontinuidades, esta parcela do campo elétrico é apenas adicionada ao valor da tensão induzida, obtida após cálculo do transitório das fontes de corrente representativas da componente conservativa do campo elétrico, obtendo-se assim a tensão total induzida na linha [Paulino 1994b]. A tensão adicionada por esta parcela é:

$$V_{nc}(x,t) = h \frac{\partial \vec{A}_i(x,t)}{\partial t} \quad (5.4)$$

Onde,

$$h \frac{\partial \vec{A}_i(x,t)}{\partial t} = 60 I_0 h \beta \left\{ \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1 - \beta^2) r_0^2}} \right\} \quad (5.5)$$

$\beta = v / v_0$ .

Como o EMTP utiliza equações nodais para solução dos transitórios, esta contribuição é calculada através de uma fonte de corrente. Então, conforme um arranjo apropriado esta implementação foi feita através da seguinte expressão:

$$Inc(x,t) = \frac{h}{R} \frac{\partial \vec{A}_i(x,t)}{\partial t} \quad (5.6)$$

Onde,

R é uma resistência de 1 ohm.

## Capítulo 5

# IMPLEMENTAÇÃO DO CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA NO EMTP

### 5.1 – Introdução

A evolução da tecnologia computacional proporcionou a aplicação de teorias poderosas na resolução de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de energia, tornando possível a solução destes fenômenos de modo eficiente e rápido.

Os programas computacionais têm como vantagens sobre outras técnicas de estudo:

- facilidade e flexibilidade no armazenamento dos dados relativos às configurações estudadas;
- facilidade de representação de componentes, independente do tamanho do sistema em análise;
- fácil acessibilidade, em termos de equipamentos e programas;
- Eficiência e grande portabilidade.

O programa computacional “*Electromagnetic Transients Program-EMTP*”, começou a ser desenvolvido em Munique, Alemanha, entre 1960 e 1963, por *Hermann W. Dommel*. Para os elementos concentrados, foi utilizada a regra trapezoidal e o método de *Bergeron* para as linhas, baseado em um método desenvolvido por *Frey* e *Althammer* na Brown Boveri, Suíça.

Desde então, muitos têm contribuído para a implementação de novas rotinas e melhorias deste poderoso programa computacional. Assim, a partir deste passo inicial, foram surgindo os diversos aprimoramentos: linhas de transmissão com parâmetros distribuídos, linhas de transmissão com parâmetros variáveis na frequência, máquinas síncronas, elementos não-lineares, etc.

Apesar de tantos desenvolvimentos, o programa não contempla ainda a modelagem da tensão induzida por descarga atmosférica, motivo deste atual trabalho.

A metodologia de simulação do programa permite o estudo de redes polifásicas, com configurações diversas. Utiliza o método nodal de análise de circuitos, usando ainda as técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes são utilizadas durante a solução.

O trabalho aqui desenvolvido utilizou uma versão comercial do programa Microtran [**Microtran, 1991**] que, por simplicidade será referida por EMTP. Ele já tem implementado a modelagem da grande maioria dos componentes elétricos, tais como: transformadores, pára-raios, linhas polifásicas, geradores, capacitores, reatores, resistores, máquinas síncronas, diversos tipos de fontes, diodos, tiristores, etc., permitindo a análise de seus principais aspectos.

Sendo um programa digital, a solução não é contínua no tempo. Os valores são calculados a intervalos de tempo discretos, cuja escolha deve ser criteriosa.

## ***5.2 Modelagem Digital dos Componentes dos Sistemas Elétricos***

Para realizar a modelagem digital dos componentes dos sistemas elétricos, é considerado que as variáveis de interesse são conhecidas no instante  $t-\Delta t$  e é buscado determinar o comportamento das mesmas durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , possibilitando assim obter seus valores em um novo instante  $t$ . Ou seja, a partir da história do sistema elétrico (tempo  $t-\Delta t$ ), pode-se efetuar o cálculo da tensão no tempo desejado (tempo  $t$ ) [**Naidu 1985**]. Dentre os diversos programas digitais para cálculo de transitórios eletromagnéticos e de tensões induzidas, o EMTP é um dos mais conhecidos e utilizados [**D'Ajuz 1987, Paulino 1994b, Nucci 1994b**].

Pode-se aqui citar o programa desenvolvido na Universidade de Bolonha, Instituto Federal de Tecnologia Suíço e Universidade de Roma "La Sapienza" Swiss, denominado "Lightning Induced Over-Voltage- LIOV" que utiliza a teoria de Agrawal. Obtida a partir das equações de Maxwell ele adota a distribuição de fontes de tensão ao longo da linha para descrever o comportamento da incidência de um campo externo e utiliza a plataforma EMTP para realizações de cálculos de tensão induzida [**Nucci 1994b**].

---

### 5.3 Aspectos da Implementação

#### 5.3.1 – Utilização da Subrotina CONNEC

A modelagem de Rusck foi implementada em uma subrotina denominada CONNEC (incluída no pacote Microtran), que irá considerar os efeitos das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas sendo o restante do sistema modelado pelo equivalente de Thévenin.

A CONNEC é uma rotina do programa implementada pelo usuário, que permite o acesso a um dado nó do sistema modelado. Esta rotina possibilita a interação dos dados de qualquer componente externo com o programa. A figura 5.1 mostra esta interação.

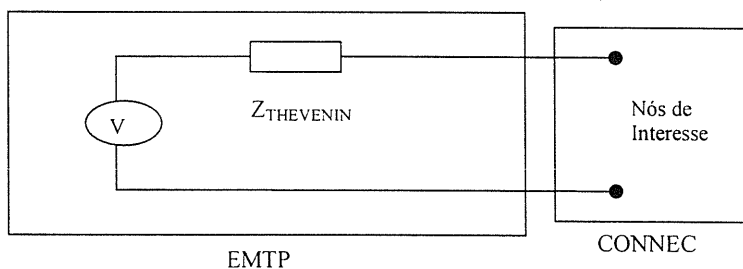


Figura 5.1 – Interação entre EMTP e a subrotina

O sistema modelado na subrotina é considerado uma não-linearidade a ser resolvida pelo método de compensação [Dommel 1996, Miranda 1994]. Neste método como mostrado na figura 5.2, o elemento não-linear entre os nós  $k$  e  $m$  de um sistema linear qualquer, pode ser retirado da malha e representado por uma fonte de corrente  $i_{km}$ , conforme mostra a expressão

$$v_{km}(t) = v_{km}^0(t) - Z_{thev} i_{km}(t) \quad (5.1),$$

onde  $v_{km}^0(t)$  é a tensão entre os nós  $k$  e  $m$  sem o ramo não-linear e  $Z_{thev}$  é a impedância de Thévenin equivalente do sistema, vista dos nós da não-linearidade. A corrente  $i_{km}$  é obtida a partir das equações que descrevem o sistema linear e o elemento não-linear, conforme a expressão 5.2:

$$\begin{cases} v_{km}(t) = v_{km}^0(t) - Z_{thev} i_{km}(t) \\ v_{km}(t) = f(i_{km}(t)) \end{cases} \quad (5.2)$$

As expressões 5.1 e 5.2 acima representam uma rede elétrica com apenas um elemento não-linear. No caso de redes polifásicas com elementos

não-lineares, a equação escalar do Thévenin equivalente se torna uma equação matricial de ordem  $M$  para um grupo de  $M$  elementos não-lineares conectados apropriadamente. A descrição completa da metodologia se encontra na referência [Dommel 1996]. As equações das fontes de corrente do Rusck podem ser implementadas dentro da subrotina CONNec. Conforme descrito acima essas fontes são portanto, consideradas elementos não-lineares.

Desta forma, o programa calcula as tensões do circuito linear ( $v^0$ ) e a impedância de Thévenin vista dos terminais do nó sob estudo a cada passo de tempo, sem considerar a tensão induzida. No programa desenvolvido pelo usuário,  $v^0$  e  $Z_{\text{thév}}$  serão utilizadas para determinar o valor da fonte de corrente  $i_{km}$  que irá retornar ao programa principal, figura 5.3.

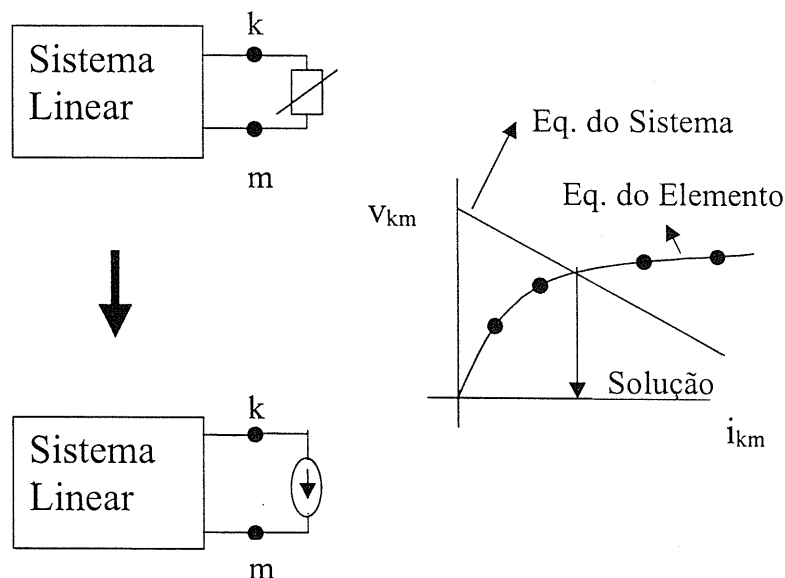


Figura 5.2 - Método de Compensação

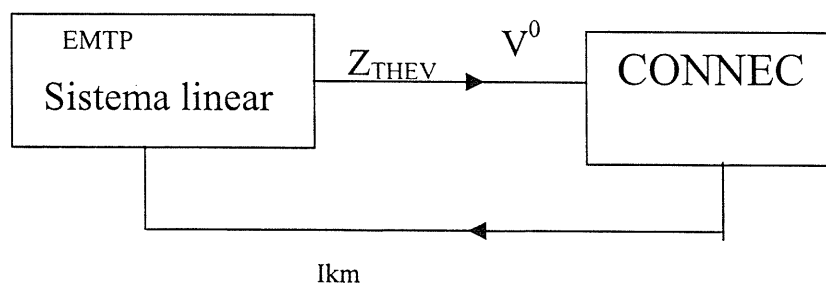


Figura 5.3 - Esquema entre CONNec e o EMTP [Paulino 1994b]

Assim, tem-se que a subrotina possibilita o acesso a qualquer nó de um dado sistema que esteja sendo modelado no EMTP, conectando nele o elemento não-linear. A partir do valor de  $i_{km}$  as tensões nodais calculadas são atualizadas e em seguida o programa avança mais um passo de integração.

A figura 5.4 apresenta o funcionamento esquemático da subrotina. A cada passo de integração o EMTP atualiza as informações referentes ao nó, processa o nó dentro da subrotina e retorna com novos dados ao programa principal do EMTP [Paulino 1994b].

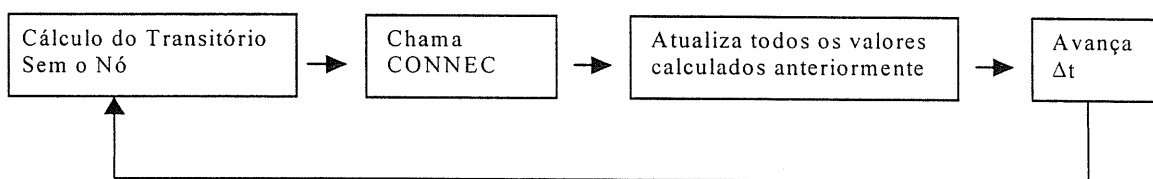


Figura 5.4 - Representação da Interação da subrotina e a modelagem no EMTP

A figura 5.5 apresenta o esquema de um arquivo de entrada do EMTP para a simulação de tensões induzidas. Pode-se observar que a exceção do cartão específico para o cálculo da tensão induzida os demais cartões do EMTP permanecem inalterados e devem ser preenchidos conforme instruções constante no manual do EMTP [Microtran 1991]. Deve-se salientar que o programa de cálculo de tensão induzida desenvolvido dentro da subrotina CONNEC irá calcular apenas as fontes de correntes que serão distribuídas ao longo da linha. Os demais aspectos da linha e os dispositivos presentes serão simulados pelo programa principal do EMTP.

Os parâmetros de entrada para o programa de cálculo da tensão induzida conforme figura 5.5 são:

#### Colunas .....01 a 08

X1⇒ ponto de origem da linha em metros

X2⇒ comprimento da linha em metros;

X3⇒ comprimento de cada segmento discretizado da linha em metros ( $\Delta x$ );

X4⇒ altura da primeira linha em metros;

X5⇒ característica do início da primeira linha.

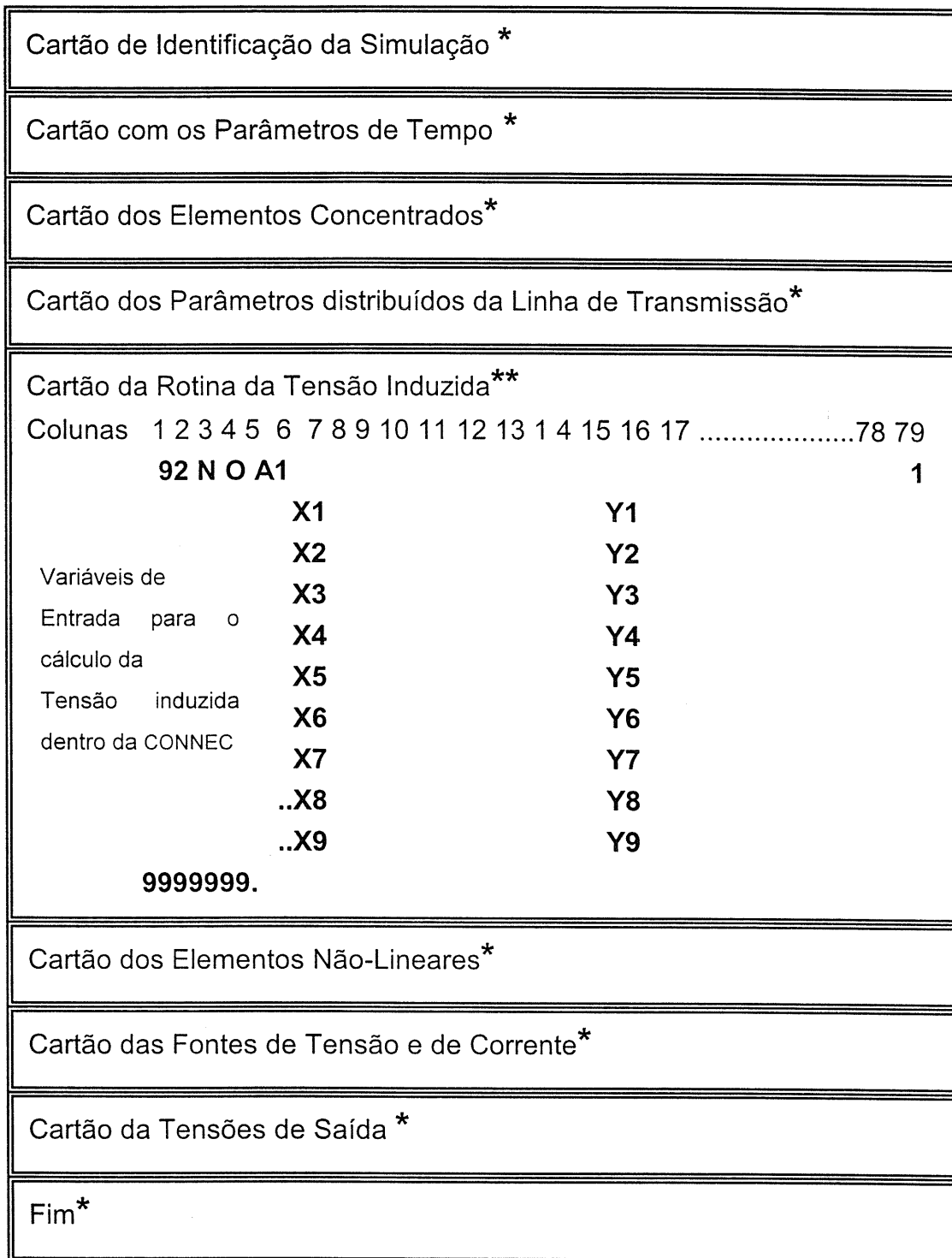
X6⇒ Deve-se colocar o número 1;

X7⇒ passo de integração numérica, em segundos( $\Delta t$ );

X8⇒ característica do início da segunda linha.

X9⇒ tempo de frente da onda da descarga atmosférica em segundos;





\* Cartão tradicional do EMTP

\*\* Cartão desenvolvido especificamente para os parâmetros que o programa da metodologia Rusck-EMTP, desenvolvido dentro da subrotina CONNEC, irá utilizar para calcular as fontes de corrente.

Figura 5.5 – Esquema do Arquivo de Entrada do EMTP para Cálculo de Tensões Induzidas

**Colunas .....09 a 16**

- Y1**⇒ amplitude da corrente de descarga em kA;  
**Y2**⇒ ponto de incidência da descarga ao longo da linha em metros;  
**Y3**⇒ distância do ponto de incidência da descarga atmosférica até a linha em metros;  
**Y4**⇒ velocidade de propagação da corrente no canal de descarga em metros por segundos;  
**Y5**⇒ característica do final da primeira linha.  
**Y6**⇒ número de fontes de corrente distribuída na linha;  
**Y7**⇒ altura da segunda linha em metros;  
**Y8**⇒ característica do final da segunda linha.  
**Y9**⇒ tempo em que a cauda atinge o valor de 50% da amplitude de pico em segundos;

**5.3.2 – Aspectos da Teoria de Rusck**

O ponto fundamental a considerar na implementação são os diferentes modos de interação das correntes originadas pelos campos elétricos conservativo e não conservativo.

Estas fontes de corrente constituem dois ramos não-lineares, um representando campo elétrico conservativo e o outro o campo elétrico não-conservativo, conforme representação esquemática da figura 5.6

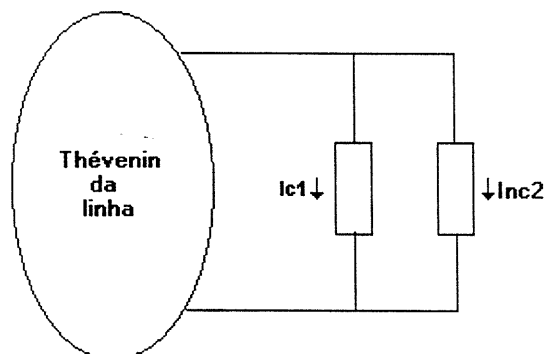


Figura 5.6 – Representação da interação das duas correntes não lineares com a subrotina

Onde,

**-Ic1** é a corrente referente ao campo conservativo

**-Inc2** é a corrente referente ao campo não-conservativo.

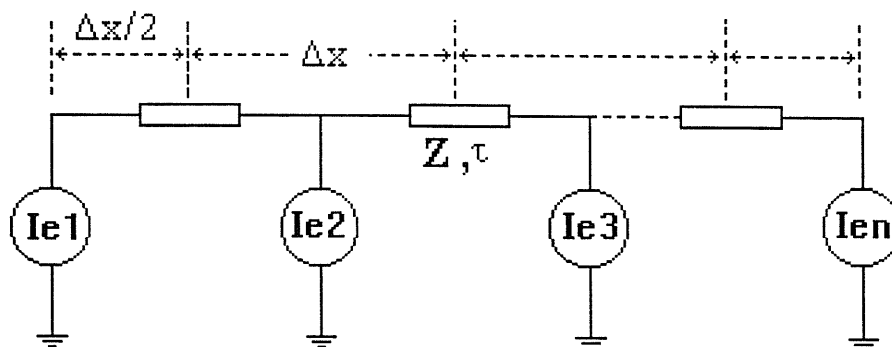
A cada nó de interesse em uma linha deve-se aplicar estes dois ramos não lineares, representando **Ic1 e Inc2**. Caso a linha seja constituída de dois condutores teremos que aplicar quatro ramos não-lineares para cada ponto de interesse. O programa faz a interação das correntes provenientes dos ramos não-lineares com os respectivos nós de interesse.

Com esta forma de implementação as correntes provenientes da tensão induzida são vistas como elementos não-lineares típicos, permitindo a discretização da linha em inúmeros segmentos, bem como a presença de outros equipamentos elétricos conectados na rede.

### 5.3.3 – Segmentação da Linha

O campo eletromagnético que ilumina a linha é distribuído continuamente ao longo da mesma. Sua implementação, portanto deve utilizar também fontes distribuídas ao longo da linha. Valendo-se da subrotina CONNEC procede-se assim à discretização da linha em segmentos e aplica-se as fontes de correntes representativas dos campos eletromagnéticos em cada uma de suas extremidades [Paulino 1994b].

A figura 5.7 mostra a discretização da linha em trechos de comprimentos “dx” e a aplicação de fontes de corrente em intervalos regulares. Observa-se que as fontes colocadas nas extremidades da linha têm a metade do valor das fontes colocadas no meio da linha, pois o comprimento dos trechos nas extremidades é metade do valor do meio da linha [Paulino 1994b].



**Z - Impedância de Surto Ie- fontes de corrente**

**τ - Tempo de Trânsito**

Figura 5.7 - Esquema de segmentação de um trecho de linha

Para as distâncias envolvidas, observou-se que a discretização da linha com segmentos que tivessem comprimentos entre a metade da distância e o dobro da distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga, levava a resultados satisfatórios e quando comparados com resultados de medições. Esta restrição foi obtida empiricamente através de resultados experimentais com modelos reduzidos e simulações computacionais desenvolvidas pela equipe da UFMG. O comprimento dos trechos deve levar em conta também o comprimento da linha, a velocidade da corrente de retorno, e o passo de integração ( $\Delta t$ ) [Porto1990].

A figura 5.8 mostra o esquema completo da representação da fontes de correntes representativas do campo conservativo e do campo não-conservativo.

As fontes de correntes referentes ao campo conservativo ( $I_c$ ) são conectadas diretamente na linha. As fontes de correntes referentes ao campo não-conservativo ( $I_{nc}$ ) são conectadas à linha por intermédio de uma resistência muito elevada ( $R_1$ )<sup>1</sup>. Em paralelo com essas fontes serão colocados resistores de  $1\Omega$  ( $R_2$ )<sup>2</sup>.

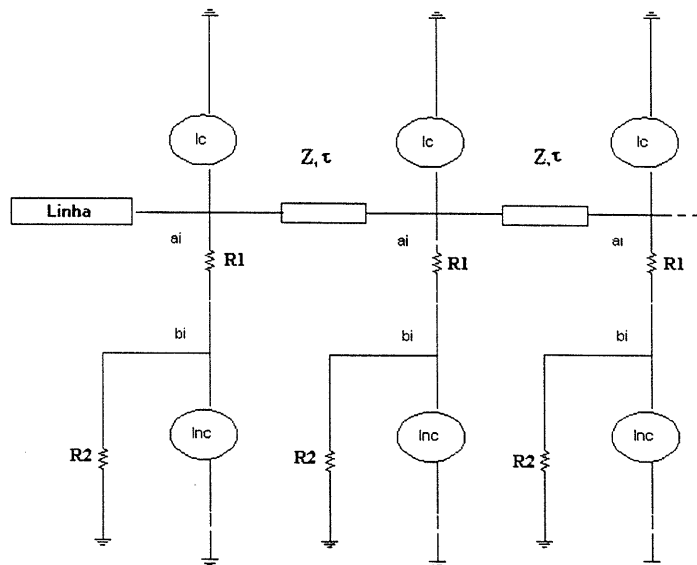


Figura 5.8 - Fontes dos campos conservativo e não-conservativo para uma linha

Onde,

$Z$  é a impedância de surto da linha, com parâmetros constantes;

$\tau$  é o tempo de trânsito;

$R_1$  é uma resistência de valor muito grande;

<sup>1</sup> Pois estas fonte não provocam a circulação de corrente na ausência de discontinuidades.

<sup>2</sup> É utilizado para haver equivalência entre esta fonte de corrente implementada e a fonte de tensão da teoria de Rusck.

$R_2$  é uma resistência de 1 ohm.

Pode-se constatar que a diferença de tensão entre os nós  $a_i$  e  $b_i$  é exatamente a soma da tensão induzida da linha para a terra pelo potencial escalar e potencial vetor magnético. Para se obter os valores de tensão induzida entre dois condutores faz-se a subtração das tensões existentes entre os condutores nos pontos desejados.

Em caso de existir uma descontinuidade da linha para a terra, a componente não-conservativa do campo elétrico irá provocar a circulação de corrente na linha. Faz-se então necessário determinar o transitório causado por esta corrente. Para o caso da descontinuidade estar presente em uma extremidade deve-se aplicar uma fonte de corrente adicional em paralelo com a descontinuidade no nó em questão cujo valor é dado pelo resultado da divisão da equação 5.5 pela resistência da descontinuidade.

No caso da descontinuidade existir no meio da linha, a fonte de corrente adicional a ser aplicada será 2(duas) vezes à da expressão 5.5 dividida pela resistência da descontinuidade.

A flexibilidade desta metodologia permite que os componentes presentes normalmente em uma linha, tais como transformadores, pára-raios, capacitores, reatores, etc., sejam conectados nas posições desejadas e em seguida seja realizado o cálculo do transitório, uma vez que a rotina que irá inserir os valores de tensões induzidas será introduzida pela subrotina que opera simultaneamente com programa principal.

Em seguida será apresentado o fluxograma figura 5.9 da interação do Programa EMTP com a rotina para cálculo da tensão induzida em linhas elétricas e também o fluxograma, figura 5.10 da rotina para cálculo da tensão induzida.

## Fluxograma da Interação EMTP com a Rotina para Cálculo da Tensão Induzida

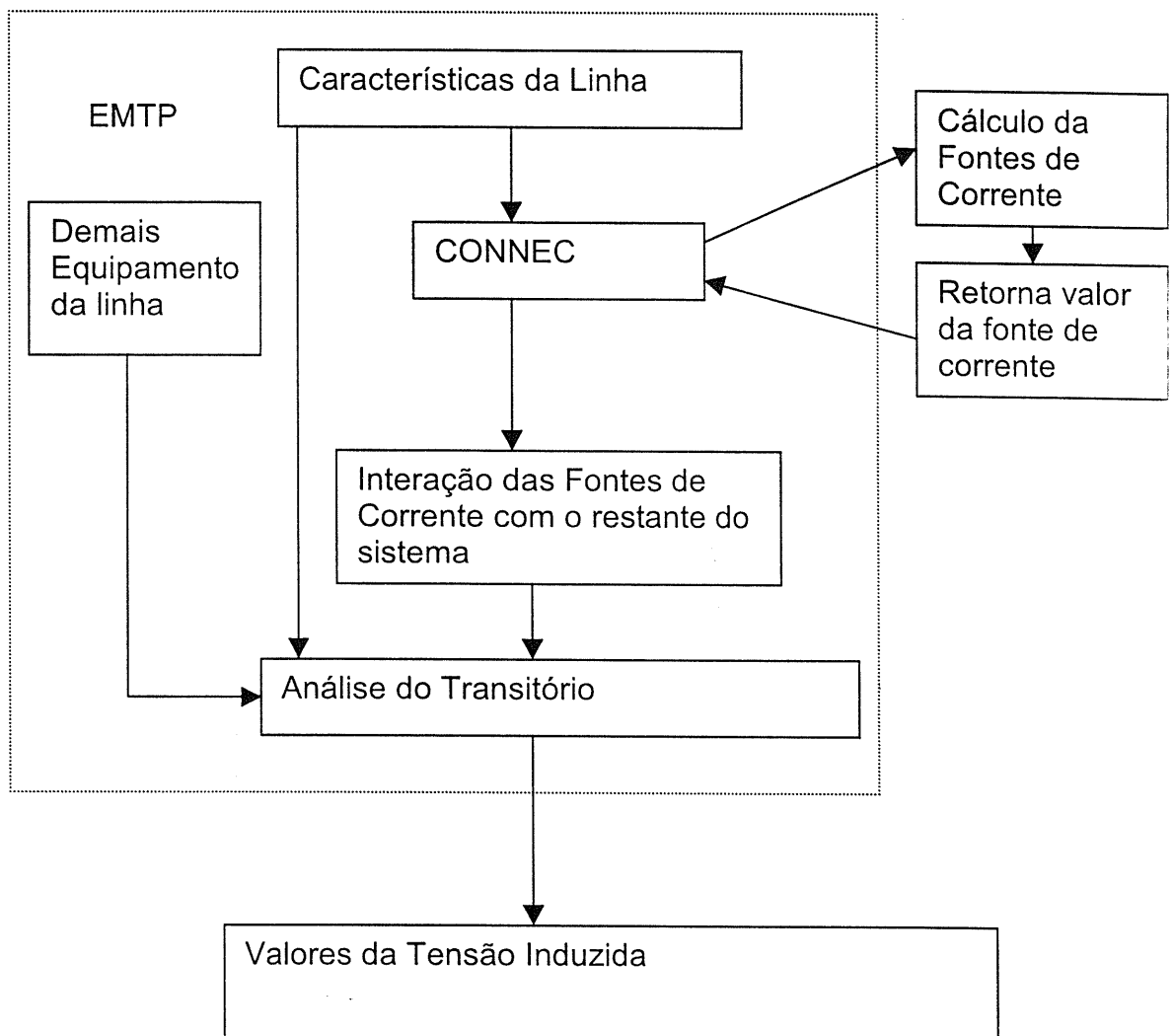


Figura 5.9 – Fluxograma da Interação do programa EMTP e a subrotina

## Fluxograma da Rotina para Cálculo da Tensão Induzida

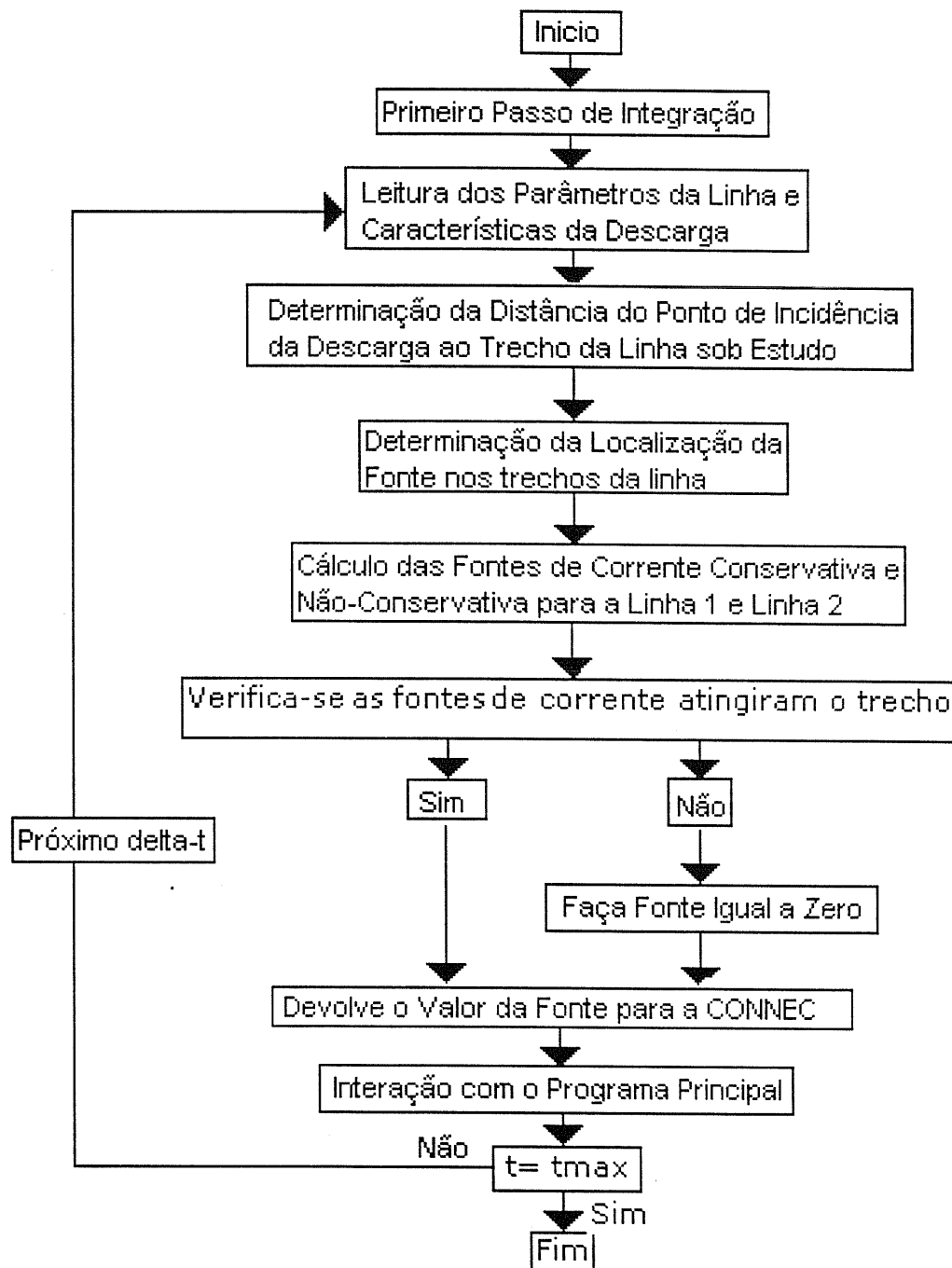


Figura 5.10 – Fluxograma da subrotina

## Capítulo 6

# RESULTADOS DO MODELO RUSCK-EMTP

*“The best model is the simplest model that accurately reflects the relevant characteristics or essence of the problem being studied.”*

*Cliff T. Ragsdale*

### 6.1 Introdução

Nesta seção o modelo de Rusck-EMTP implementado será utilizado para a análise de tensões induzidas em redes elétricas. Essa análise focalizou casos em que fosse possível a comparação dos resultados do trabalho com resultados da literatura técnica, muito dos quais experimentais. Isso determinou as escolhas das configurações apresentadas a seguir.

- A primeira configuração consiste de uma linha de 1000m com dois condutores, nas quais serão realizadas algumas considerações teóricas dos valores e formas das ondas obtidas.

- A segunda configuração utiliza um modelo em escala reduzida. Este modelo, desenvolvido no Laboratory of the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), apresenta uma série de medições para um sistema fase-terra [Yokoyama,1985]. Este trabalho buscou a apresentação dos valores da tensão induzida, das características da corrente da descarga atmosférica, da influência do condutor terra e espaçamento dos aterramentos em condições controladas.

- A terceira configuração utiliza um estudo experimental realizado em uma linha fase-neutro sob a responsabilidade do *Electric Power Research Institute* – EPRI [Barker 1996]. Este estudo desenvolvido pelo EPRI realizou medições das tensões induzidas a partir da incidência de descargas atmosféricas forçadas nas proximidades desta linha. Neste estudo, foram



medido simultaneamente os parâmetros da corrente da descarga forçada e os valores da tensão induzida nesta linha de dois condutores na configuração vertical. Desta forma foi possível fornecer à metodologia Rusck-EMTP os dados necessários e realísticos para obter uma resposta do programa. Vale observar também que este sistema fase-neutro representa, a configuração típica dos ramais que atendem áreas rurais e pequenas comunidades do estado de Minas Gerais, bem como em outras regiões.

Como a metodologia possibilita a aplicação em novos estudos, buscou-se a obtenção de novos resultados a partir de dados consolidados.

## 6.2 - Implementação do estudo em uma linha com dois condutores

O caso implementado é o de uma linha de distribuição com dois condutores dispostos em uma configuração vertical. A figura 6.1 mostra a representação esquemática da configuração simulada. A linha possui 1000m de comprimento e para efeito de simulação foi discretizada em 10 trechos de 100m para permitir a conexão das fontes de corrente representativas da tensão induzida.

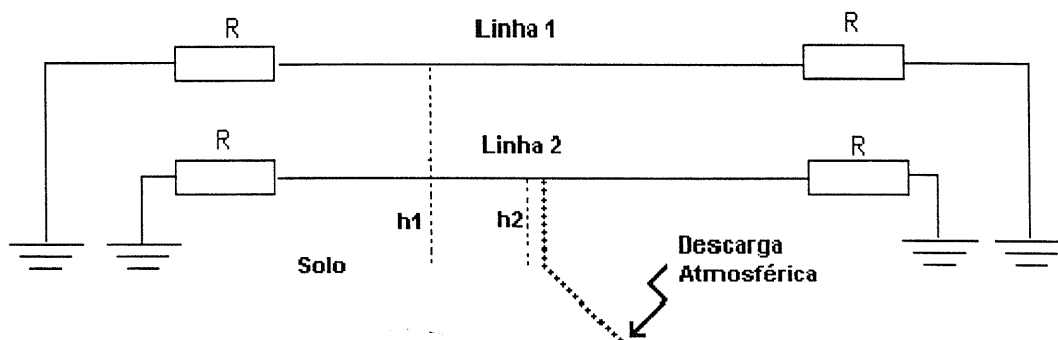


Figura 6.1 – Representação dos dois condutores casados nas extremidades.

A linha possui as seguintes características:

Comprimento da linha: 1000m;

Discretização da linha ( $\Delta x$ ): 100m

Impedância de surto dos condutores: linha 1 = 510 e linha 2 = 500  $\Omega$ ;

Altura da linha 1: 10m;

Altura da linha 2: 9m;

Aterramento nas extremidades: Casadas nas extremidades;

Intensidade da corrente de descarga: 40 kA;  
Velocidade da corrente do canal de descarga: 30m/ $\mu$ s;  
Distância da queda da descarga à linha: 100m  
Descarga incidente no meio da linha: 500 m das extremidades;  
Resistividade do solo: nula;  
Tempo de frente da corrente: 1 $\mu$ s;  
Tempo de cauda da corrente: 50 $\mu$ s;  
Passo de Integração( $\Delta t$ ): 1x10<sup>-8</sup>s

As características acima são utilizadas em grande parte das simulações do estudo de caso teórico e são denominadas características do caso base.

### 6.2.1 – Comparação com a expressão simplificada de Rusck

A figura 6.2 apresenta os resultados da tensão induzida no meio das duas linhas utilizando os parâmetros do caso base. A tensão máxima para a linha 1 é de 124 kV (traço contínuo) e para a linha 2 é de 112 kV (traço pontilhado).

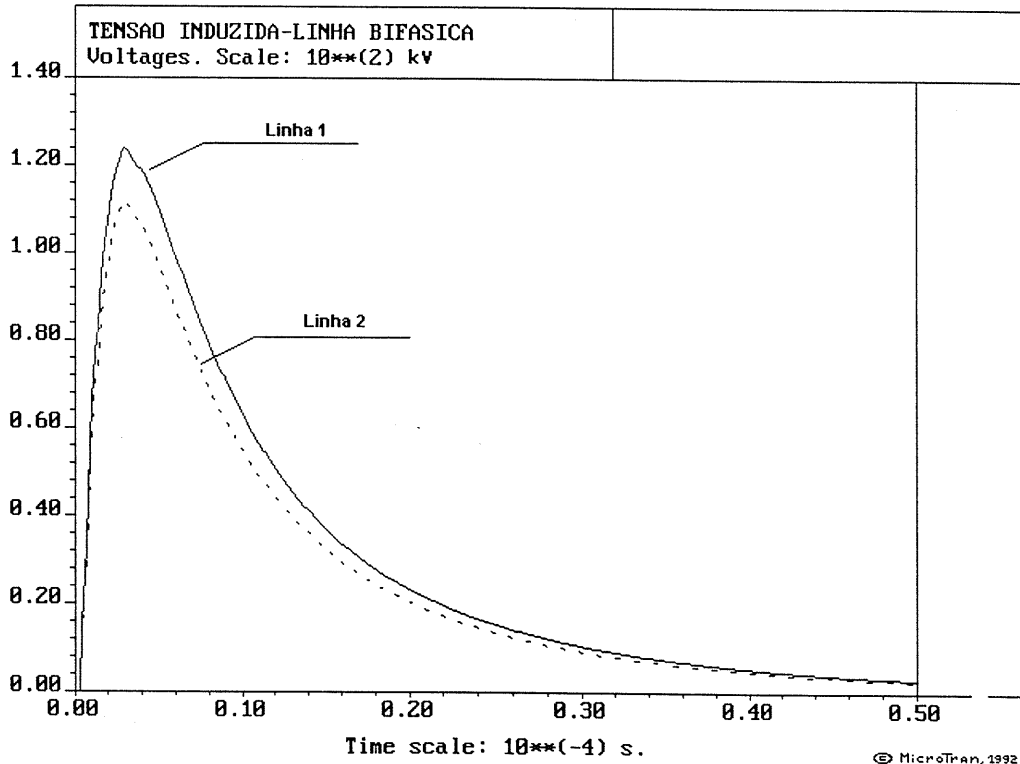


Figura 6.2 – Tensão induzida no meio das duas linhas

Fazendo uso da expressão simplificada de Rusck para cálculo da tensão induzida [Rusck 1957]

$$V = \frac{30.I.h}{d} \left[ 1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (6.1)$$

onde

v é a tensão induzida;

I é o valor do pico da corrente de descarga

h é a altura da linha;

d é a distância entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a linha,

obtém-se para a linha 1 uma tensão de 128.5 kV e para a linha 2 de 115.7 kV.

Usando a relação proposta por Rusck para condutores verticais

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{h_2}{h_1} \quad (6.2)$$

para os valores encontrados pela expressão simplificada tem-se 0.9 e utilizando os valores obtidos na simulação tem-se 0.9 [Rusck 1957].

Ou seja, os resultados obtidos numericamente são bem próximos dos resultados obtidos pela expressão simplificada, bem como a relação da tensão induzida com a altura, uma maior altura do condutor corresponde a uma tensão induzida mais elevada.

A figura 6.3 mostra as formas de onda para as tensões induzidas no início das linhas. Comparando-as com as tensões induzidas no meio da linha pode-se constatar que as maiores tensões encontram-se no ponto mais próximo da incidência da descarga atmosférica, neste caso o meio da linha.

A figura 6.4 apresenta as formas de onda da tensão induzida para o meio e para o início da linha 1. Verifica-se a diferença de amplitude entre as duas formas de onda e o tempo de propagação entre o ponto intermediário e o ponto inicial da linha. Observa-se assim a influência da distância da queda da descarga à linha, na tensão induzida.

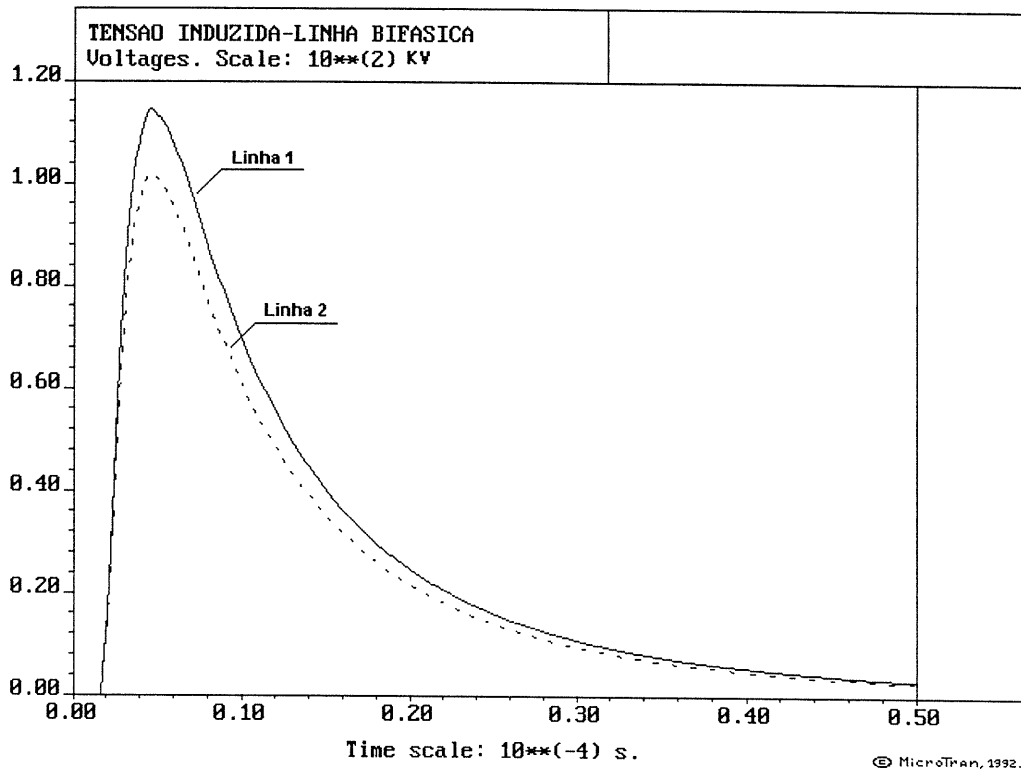


Figura 6.3 – Tensão induzida no início das duas linhas

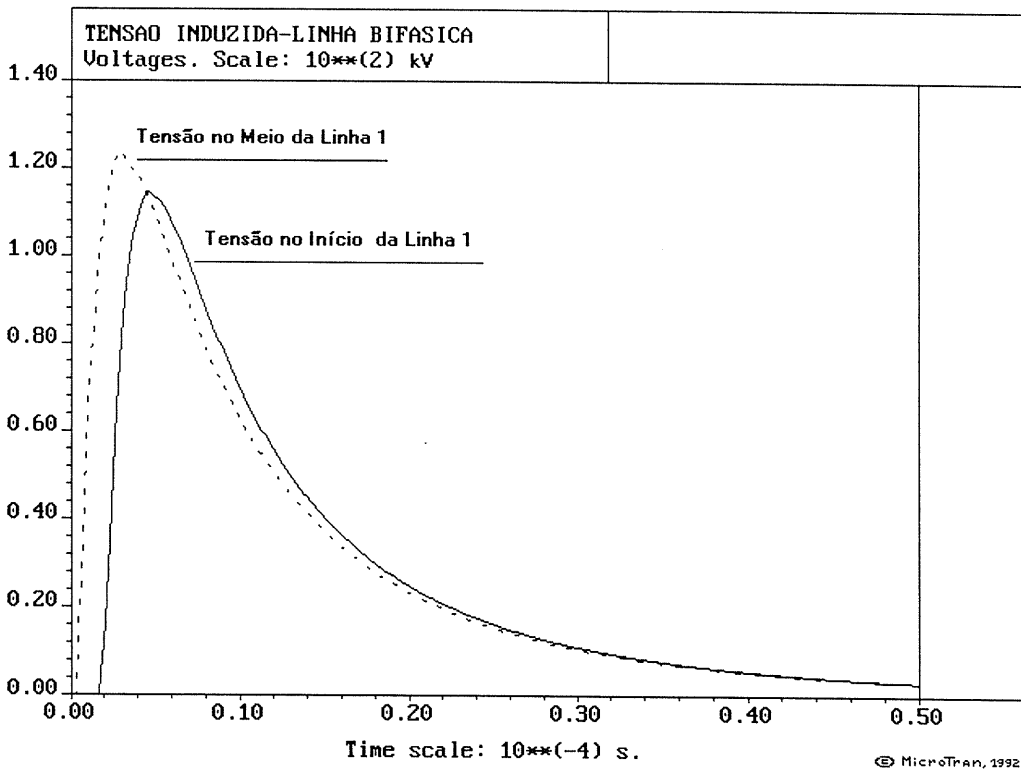


Figura 6.4 – Tensão induzida no pontos intermediário e inicial da linha 1

### 6.2.2 – Influência da amplitude máxima da corrente

As figuras 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos para os parâmetros do caso base, modificando apenas o valor da intensidade da corrente de pico. Como pode-se observar, um aumento no valor da amplitude da corrente de pico provoca uma elevação proporcional na amplitude da forma de onda da tensão induzida. Considerando as figuras 6.5 e 6.6, observa-se que para uma corrente de 30 kA, a tensão induzida foi de 92 kV; para 50 kA a tensão encontrada foi de 156 kV e para 100 kA, a tensão foi de 310 kV.

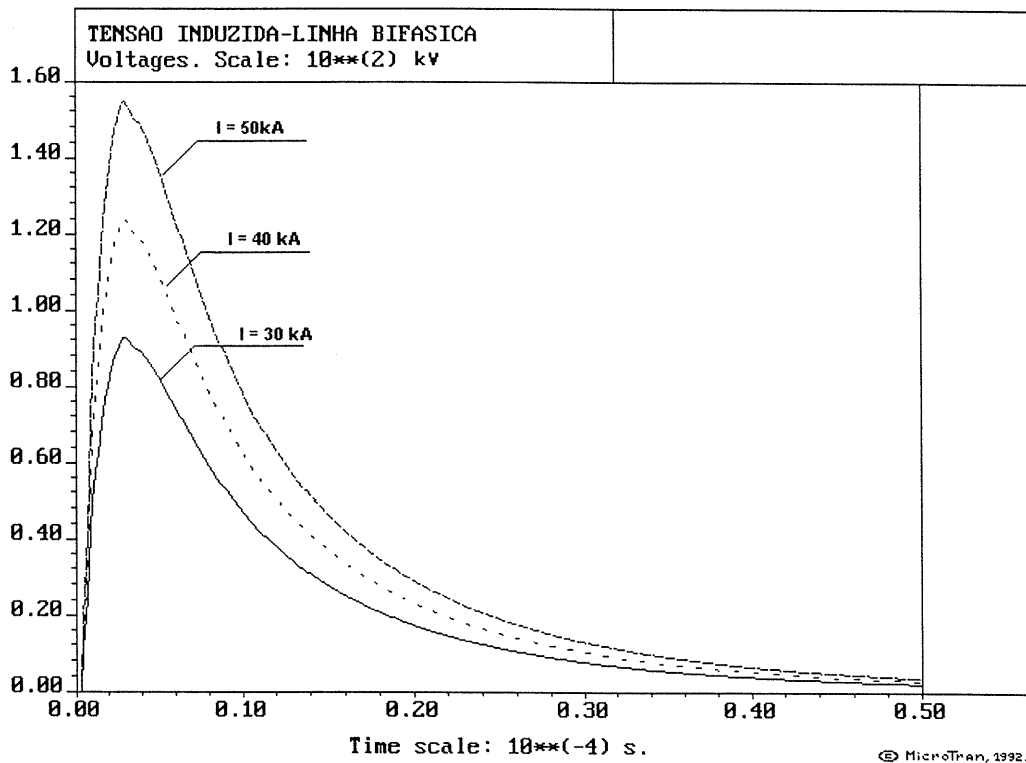


Figura 6.5 – Tensão induzida no meio da linha 1 para 30, 40 e 50 kA.

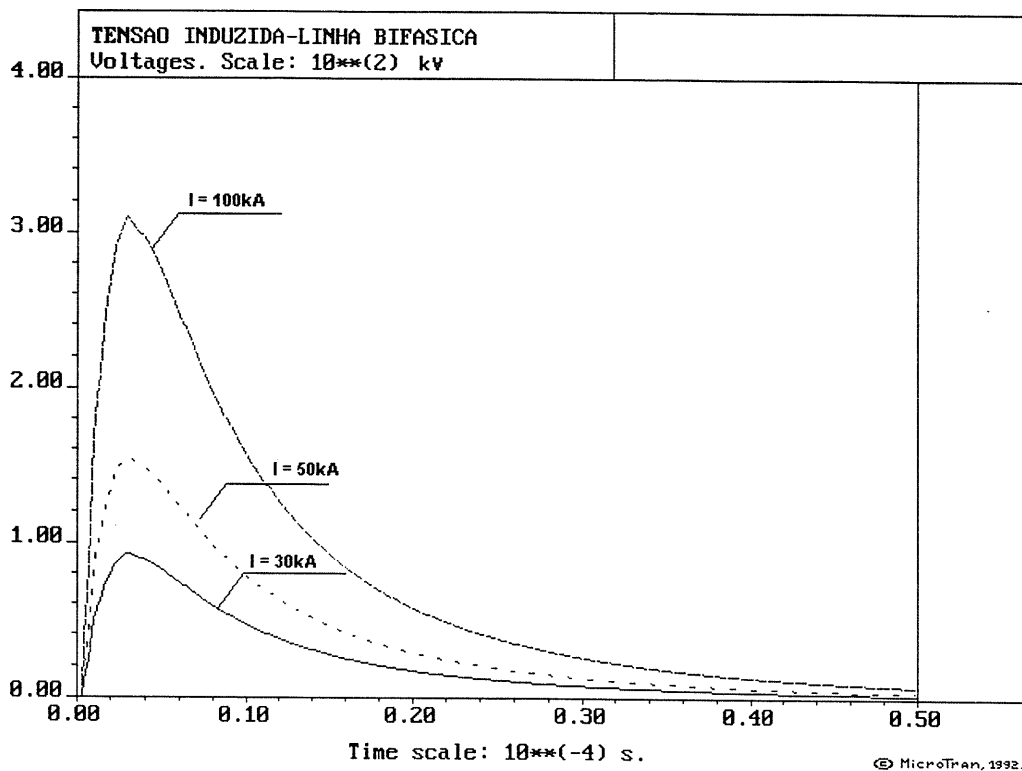


Figura 6.6– Tensão induzida no meio da linha 1 para 30, 50 e 100 kA

### 6.2.3 – Efeito da distância do ponto de incidência

A figura 6.7 apresenta a influência do ponto de incidência da descarga atmosférica em relação à linha. Pode-se observar que, quanto maior o afastamento do ponto de incidência, menor a tensão induzida, isso se deve ao fato da linha ser iluminada por menores intensidades dos campos gerados pela descarga atmosférica, devido às distâncias maiores.

Constata-se também a variação dos tempos de frente das tensões induzidas. Observa-se que menores distâncias do ponto de incidência correspondem a tempos de frente de onda menores.

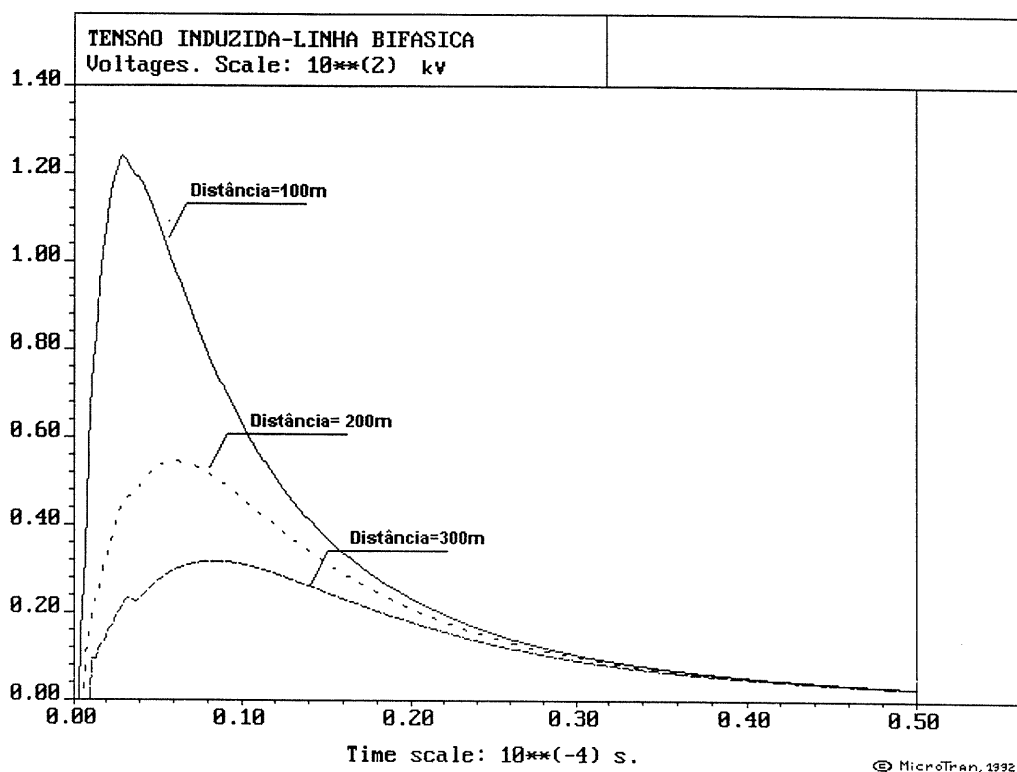


Figura 6.7 – Tensão induzida no meio da linha 1 para os pontos de incidência de 100m, 200m e 300m da linha.

#### 6.2.4 – Efeito da velocidade de propagação da corrente no canal

A figura 6.8 mostra a influência da velocidade de propagação da corrente no canal da descarga atmosférica na forma de onda da tensão induzida. Pode-se observar que uma variação significativa na velocidade de propagação da corrente no canal – de 10% a 50% da velocidade da luz – não reverteu em uma variação significativa da amplitude da forma de onda, que teve respectivamente 124 kV e 144 kV. Por outro lado, existe uma variação significativa na taxa de crescimento da tensão e sua duração será menor.

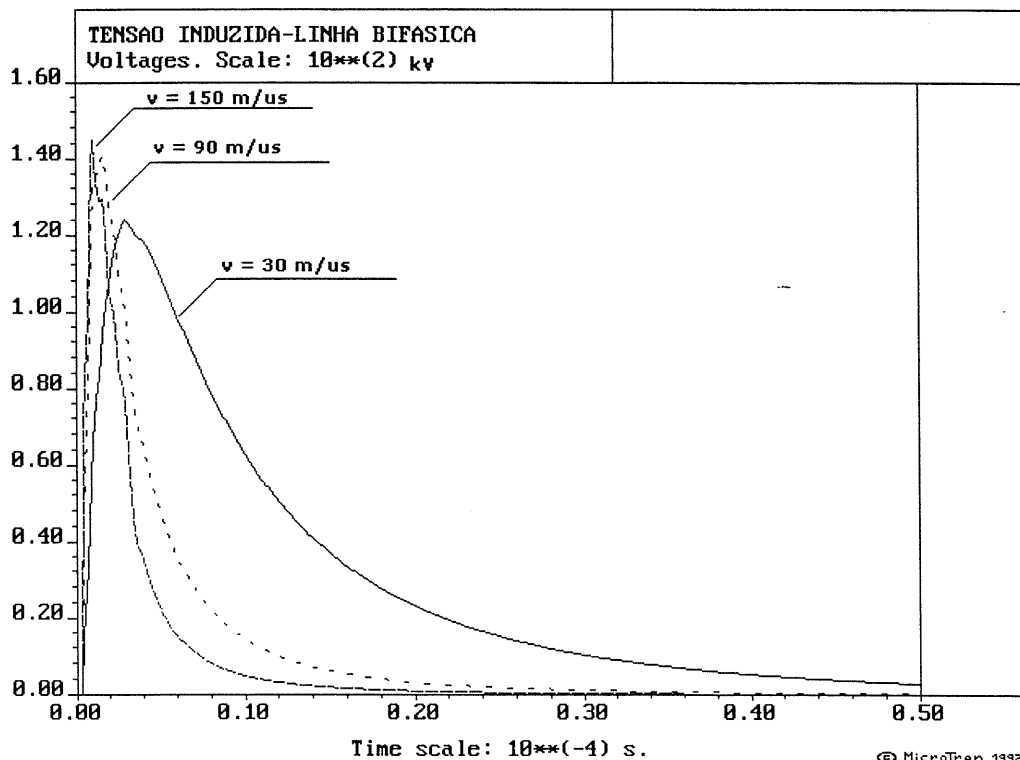


Figura 6.8 – Tensão induzida no meio da linha 1 para as velocidades de propagação da corrente no canal de 30, 90 e 150 m/μs.

### 6.2.5 – Efeito do tempo de frente da corrente de retorno

As figuras 6.9 e 6.10 mostram a influência do tempo de frente da corrente de descarga. Verifica-se que tempos de frente menores, da ordem de poucos microssegundos, elevam a taxa de crescimento da frente de onda, causando pouca alteração na amplitude da tensão induzida. Para tempos de frente da ordem de dezenas de microssegundos constata-se uma significativa redução da amplitude.



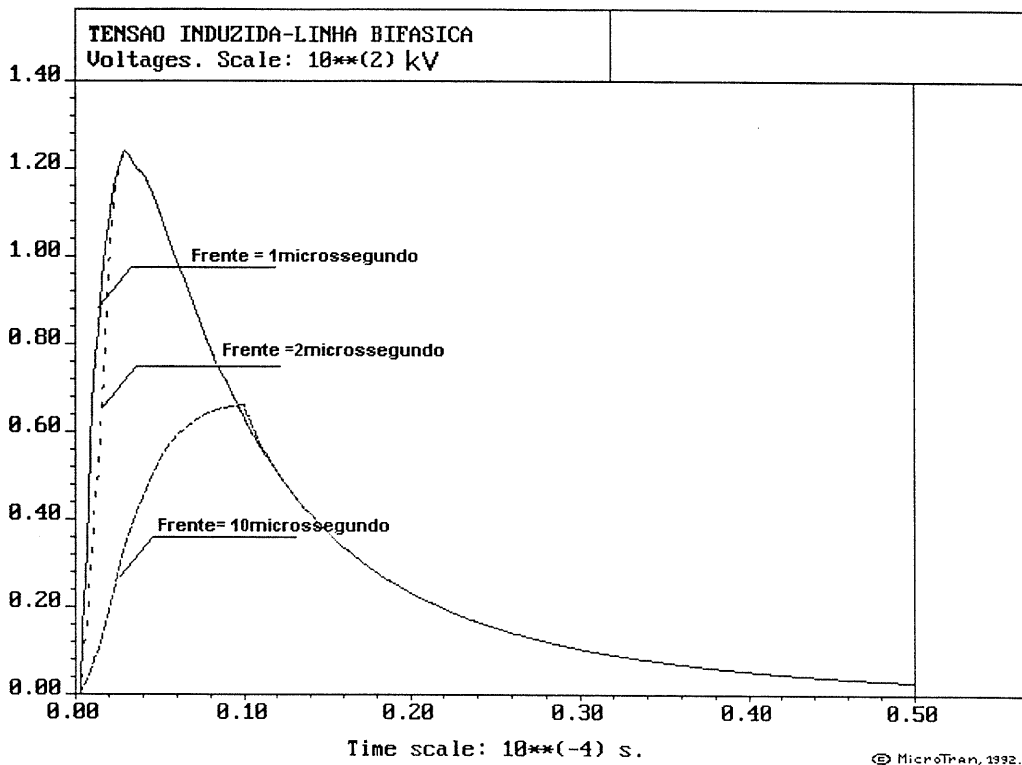


Figura 6.9 – Tensões Induzidas no meio da linha 1 para tempos de frente de 1,2 e 10 microssegundos

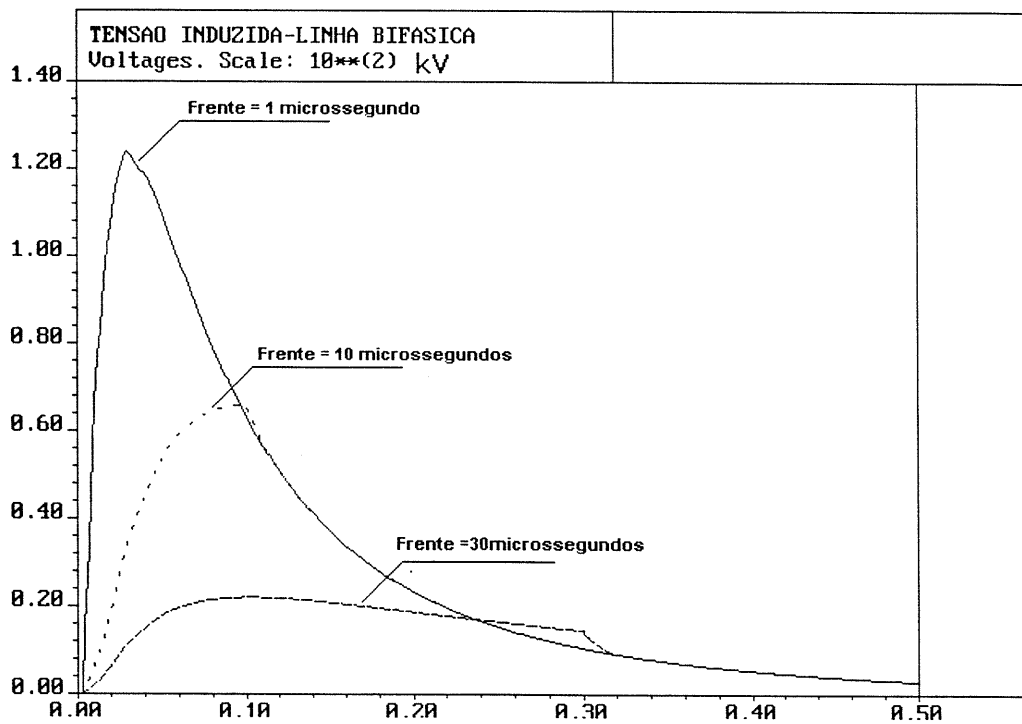


Figura 6.10 – Tensões Induzidas no meio da linha 1 para tempos de frente de 1,10 e 30 microssegundos

### 6.2.6 – Efeito do tempo de cauda da corrente de retorno

A figura 6.11 mostra a influência do tempo de cauda na amplitude e na forma de onda da tensão induzida. Conforme pode-se observar, para os tempos de cauda mais freqüentes (em torno de 50 microssegundos ou mais), a influência do tempo de cauda é menor. Para tempos na ordem de poucas dezenas de microssegundos, a amplitude da tensão induzida apresentou reduções na amplitude máxima e inversão de polaridade.

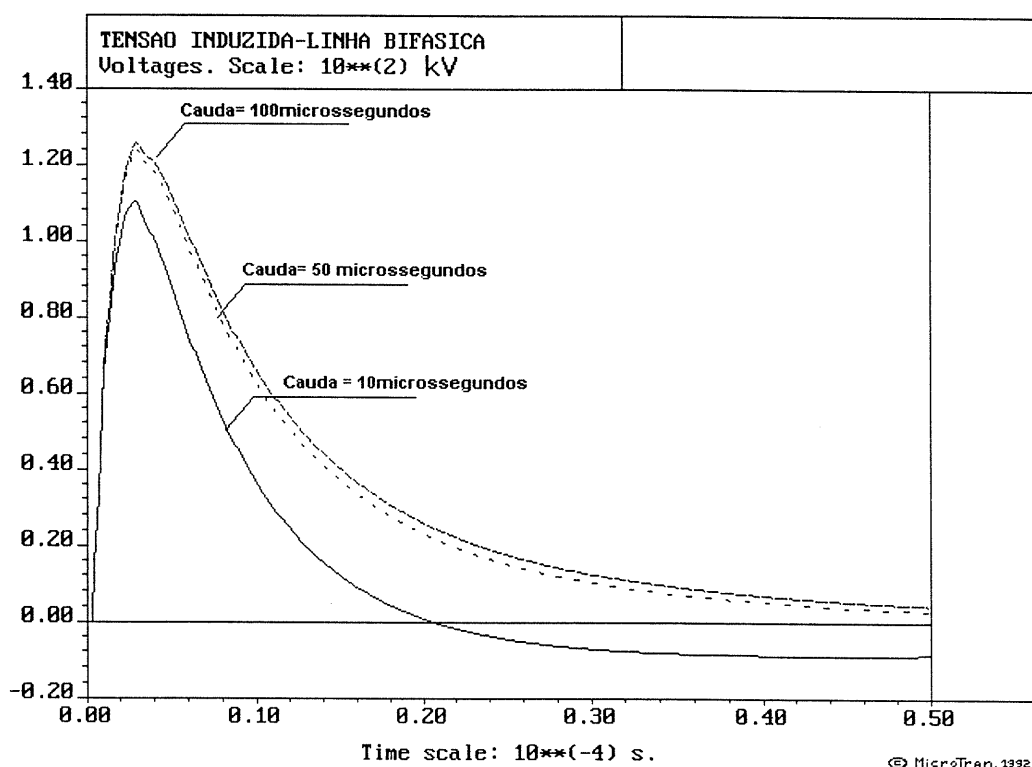


Figura 6.11 – Tensões Induzidas no meio da linha 1 para tempos de cauda de 10, 50 e 100 microssegundos

### 6.3 Implementação do estudo para um modelo em escala reduzida

O modelo em escala reduzida é uma técnica de estudo das descargas atmosféricas que busca condições controladas para representar este fenômeno, e obtendo assim resultados para uma ampla variedade de configurações do circuito, características da descarga e posicionamento do mesmo. Vale mencionar que as outras técnicas de obtenção de dados são:

- observações em linhas reais;
- medições de tensões induzidas por descargas naturais e forçadas;
- simulações digitais.

O propósito deste tópico é comparar os dados obtidos pela metodologia Rusck-EMTP com os dados de um modelo em escala reduzida.

Esta implementação utiliza de um modelo em escala reduzida de 1:200, desenvolvido no Laboratory of the Central Research Institute of Electric Power industry (CRIEPI) [Yokoyama 1985] As características deste modelo são:

- Solo condutor perfeito, representado por uma placa de alumínio;
- Comprimento da linha 5m, fio de cobre de 0.2mm de diâmetro;
- Discretização da Linha( $\Delta x$ ): 0.5m
- Velocidade de propagação da corrente pelo canal de retorno, 40m/ $\mu$ s.
- Distância ponto de incidência da descarga até a linha, 40 cm.
- Valor da intensidade de corrente, 47 mA;
- Tempo de frente da corrente de retorno , 5ns;
- Tempo de cauda da corrente de retorno, 200ns;
- Altura do condutor fase 50 mm;
- Distância entre os dois condutores adjacentes, 5 mm;
- Linha casada nas extremidades;
- Passo de Integração( $\Delta t$ ):  $1 \times 10^{-11}$ s.

Neste caso a linha estava casada nas extremidades para evitar reflexões vindas das extremidades, que dificultariam as análises.

Considerando a flexibilidade do EMTP pode-se representar a presença de capacitores, indutores, pára-raios no circuito e analisar seus efeitos.

A figura 6.12 mostra o circuito esquemático do modelo em escala reduzida que utilizado para as medições e para as simulações usando o método Rusck-EMTP .

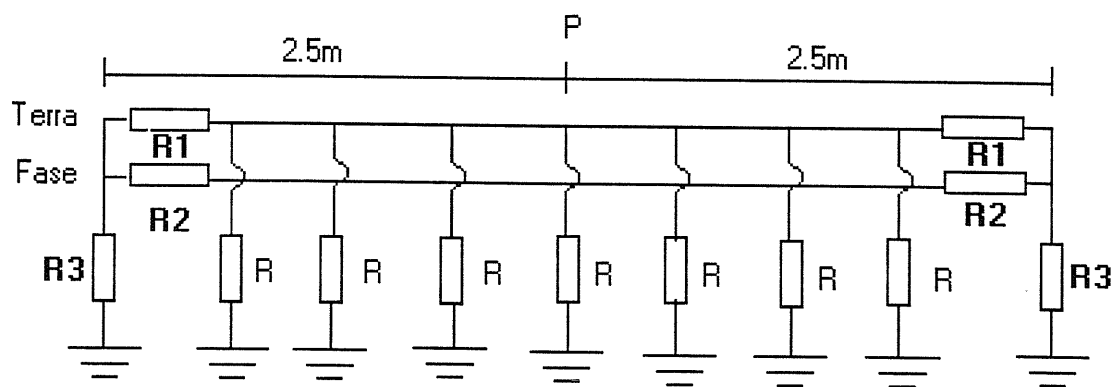


Figura 6.12 – Circuito Esquemático do Modelo em Escala Reduzida, onde:  
 P é o ponto central de medição;  
 R é o valor da resistência de aterramento.  
 R1, R2, R3 são as resistências utilizadas para o casamento de impedância.

### 6.3.1 – Resultados Obtidos

A seguir serão apresentados os resultados da tensão induzida calculada utilizando a metodologia Rusck-EMTP considerando as diversas configurações do modelo em escala reduzida.

### 6.3.2– Variação do valor da resistência no centro da linha

A figura 6.13 apresenta o circuito esquemático do modelo em escala reduzida para consideração da variação da resistência no centro do condutor terra.

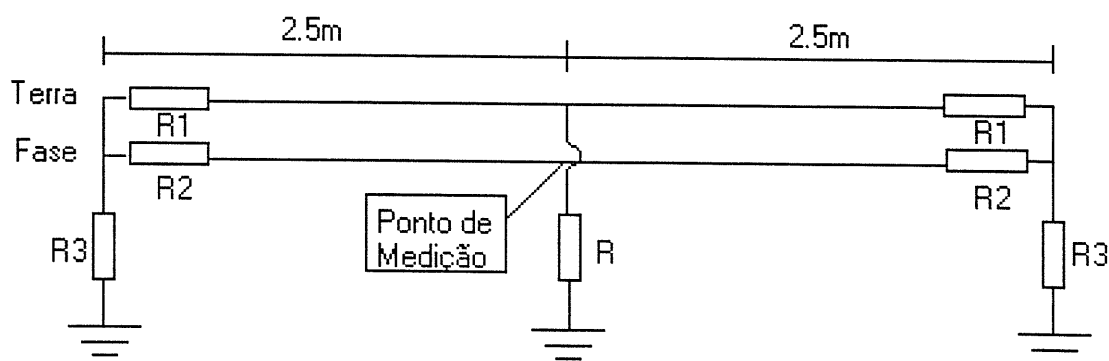


Figura 6.13 – Modelo em escala reduzida com um ponto de aterramento

As figuras 6.14 e 6.15 mostram a influência da variação da resistência no centro da linha, para as simulações usando a metodologia implementada. Pode-se observar tensões induzidas mais baixas para os menores valores de resistência. Isto porque quanto menor o valor da resistência de aterramento maior será a corrente que circulará por esta resistência e maior será a onda de cancelamento enviado pela mesma para o circuito.

Esta onda de cancelamento altera os valores da tensão induzida no fio terra e, devido ao acoplamento altera a tensão no fio fase. Quanto a resistência infinita pode-se observar que a linha se comporta como se não tivesse aterramento presente.

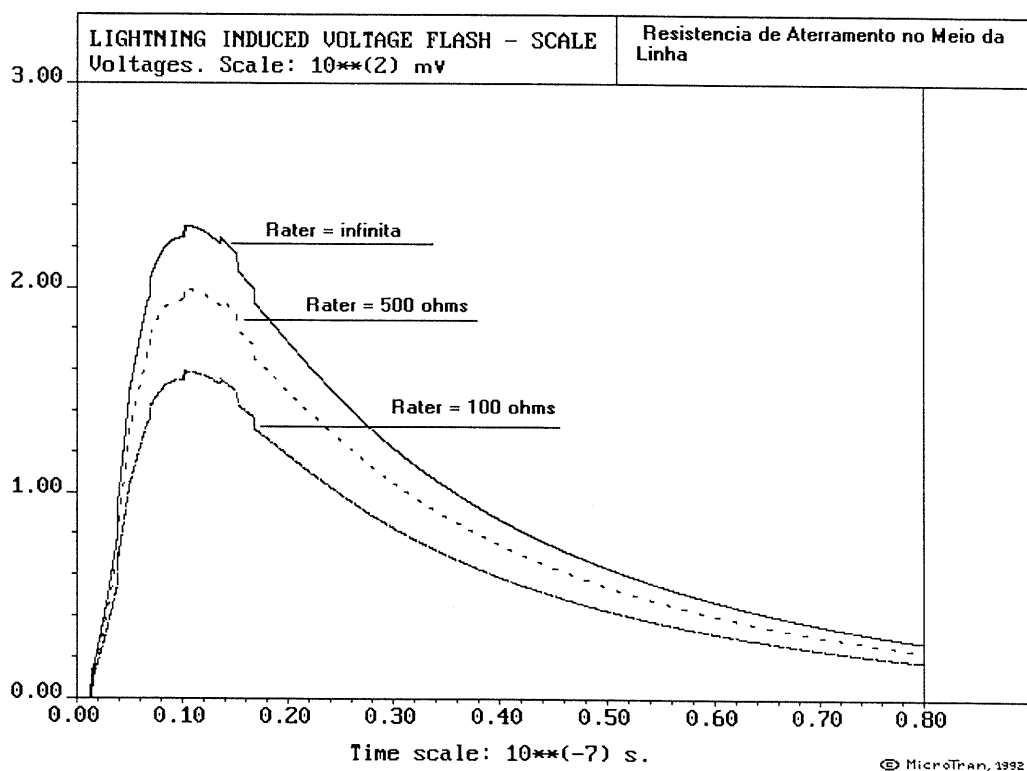


Figura 6.14 – Tensão induzida simulada em função da variação do valor do aterramento no centro da linha

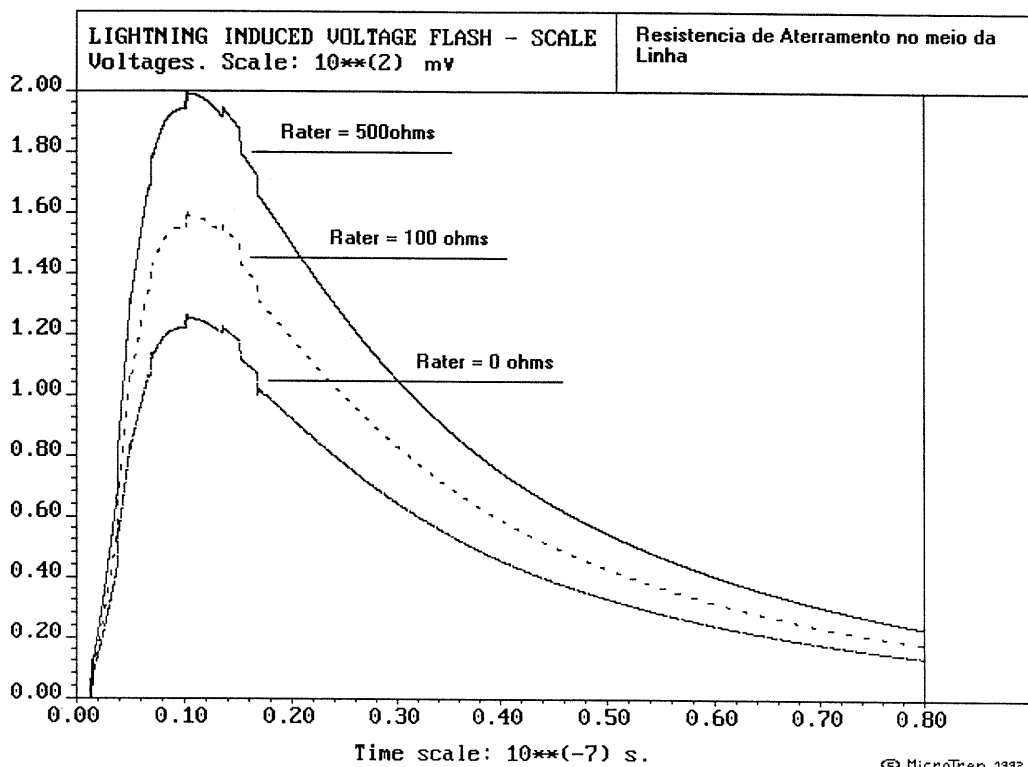


Figura 6.15 – Tensão induzida simulada em função da variação do valor do aterramento no centro da linha

A figura 6.16 apresenta as formas de ondas medidas para estes diversos valores de resistência de terra [Yokoyama 1985]. O erro relativo entre os valores medidos e simulados para os diversos valores de resistência estão entre 11 e 23%.

Pode-se observar uma diferença nos tempos de cauda medido e simulado. Por isso é importante mencionar aqui que o canal de descarga no modelo reduzido possui 3m. Desta forma, após um tempo de aproximadamente 75ns, ocorrem reflexões no final do canal, provocando alterações na forma de onda da tensão medida.

Para a metodologia Rusck-EMTP o canal é considerado infinito. Esta consideração não causa grandes erros na amplitude da tensão induzida, pois para comprimentos médios do canal de descarga, da ordem de poucos quilômetros, pode-se considerar que o efeito da base da nuvem, irá influenciar apenas no tempo de cauda da tensão induzida.

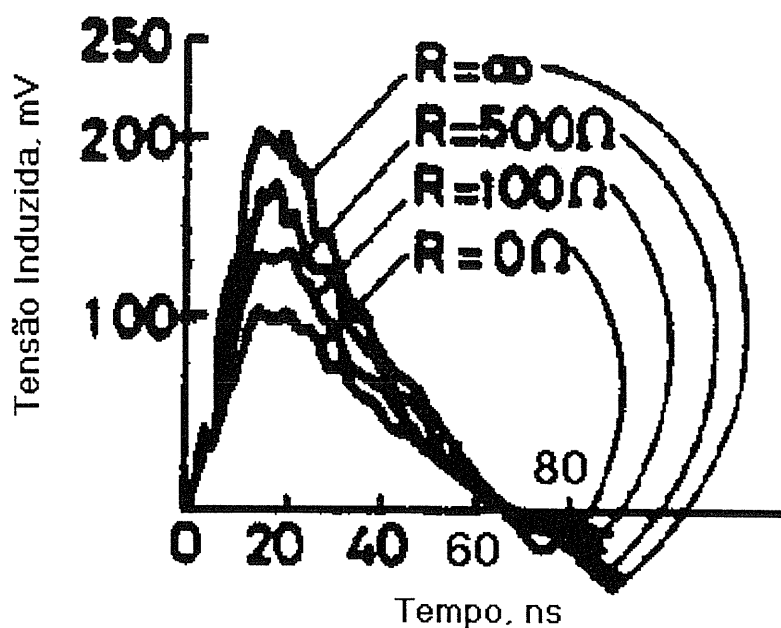


Figura 6.16 – Curvas Medidas [Yokoyama,1985]

### 6.3.3 – Variação do valor da resistência colocada a 2m do centro da linha

A figura 6.17 mostra a pouca influência do aterramento na frente de onda da tensão induzida, quando o mesmo está posicionado a 2m do ponto de incidência e de medição da descarga atmosférica. Esta distância de 2m equivale a uma distância de 400m em uma linha real.

Pode-se observar que apenas após o tempo de  $1.33 \times 10^{-8}$  s, que é o tempo de propagação entre o ponto de incidência da descarga e o ponto de aterramento, ocorrerão as primeiras alterações na forma de onda da tensão induzida.

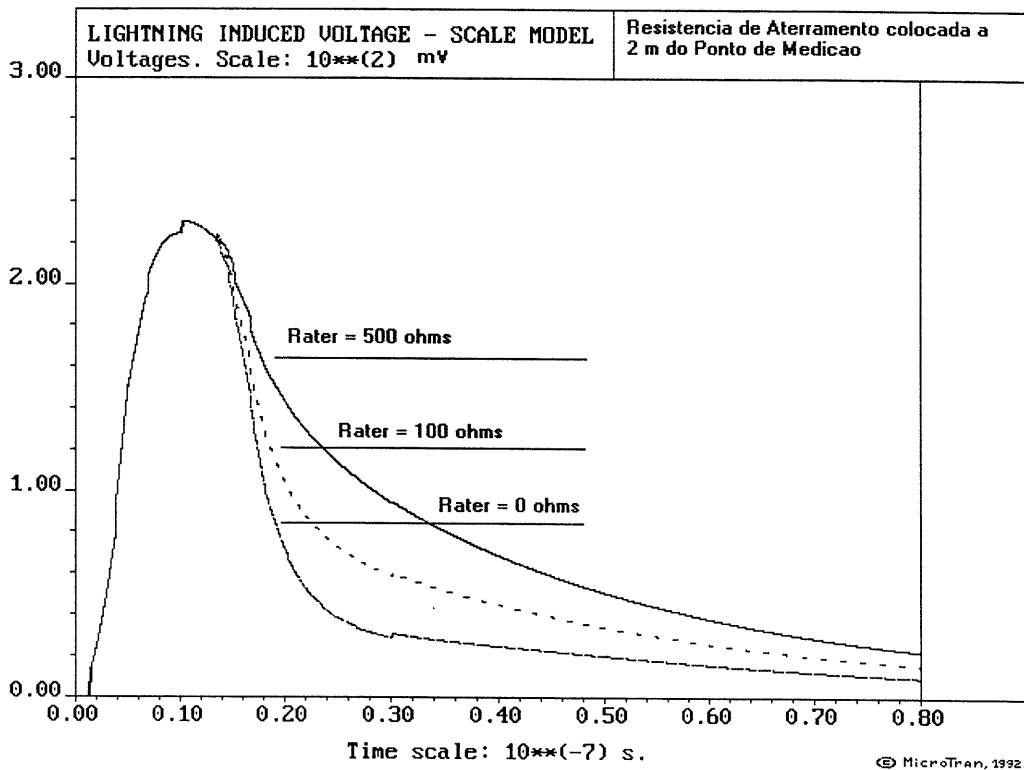


Figura 6.17 – Tensão induzida simulada para um único aterramento colocado a 2m do ponto de medição

A figura 6.18 mostra as formas de onda medidas para um único aterramento colocado a 2m do ponto de incidência. Pode-se observar uma boa concordância entre principais aspectos da forma de onda medida e simulada.

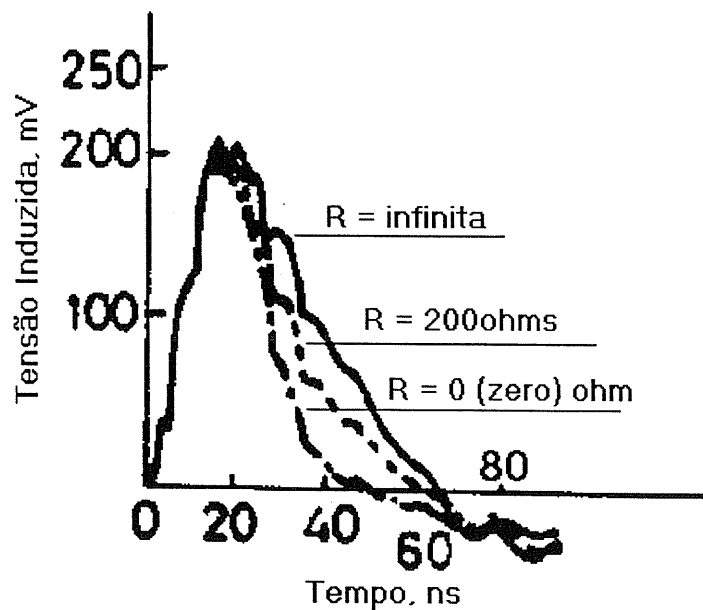


Figura 6.18 – Tensão induzida medida para um único aterramento colocado a 2m do ponto de medição



A figura 6.19 apresenta o efeito da distância do aterramento em relação ao ponto de medição. Para uma distância de 2m o pico da tensão induzida é de 230 mv. Para a distância de 1m o pico da tensão induzida é de 204 mV. Para 0.5m o primeiro pico da tensão é de 115 mV, apresenta ainda, um segundo pico de 151 mv.

Vale dizer que este último efeito ocorre devido ao efeito do aterramento ser sentido em um tempo menor que o tempo de frente de onda da corrente da descarga atmosférica, desta forma a tensão continua a crescer no ponto de medição.

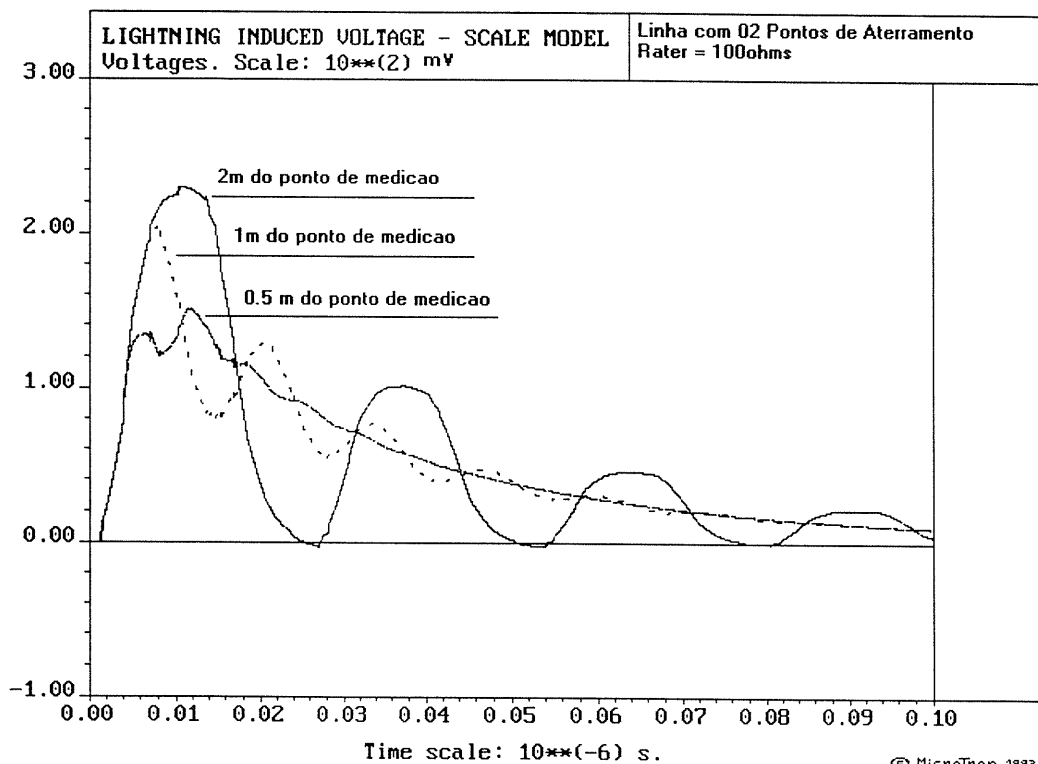


Figura 6.19 – Formas de onda da tensão induzida para intervalos de aterramento de 0.5, 1 e 2m.

Para melhor exemplificar o efeito do aterramento a figura 6.20 mostra as curvas da tensão induzida para uma linha sem aterramento, um ponto de aterramento a 2m e 02 pontos de aterramento a dois metros.

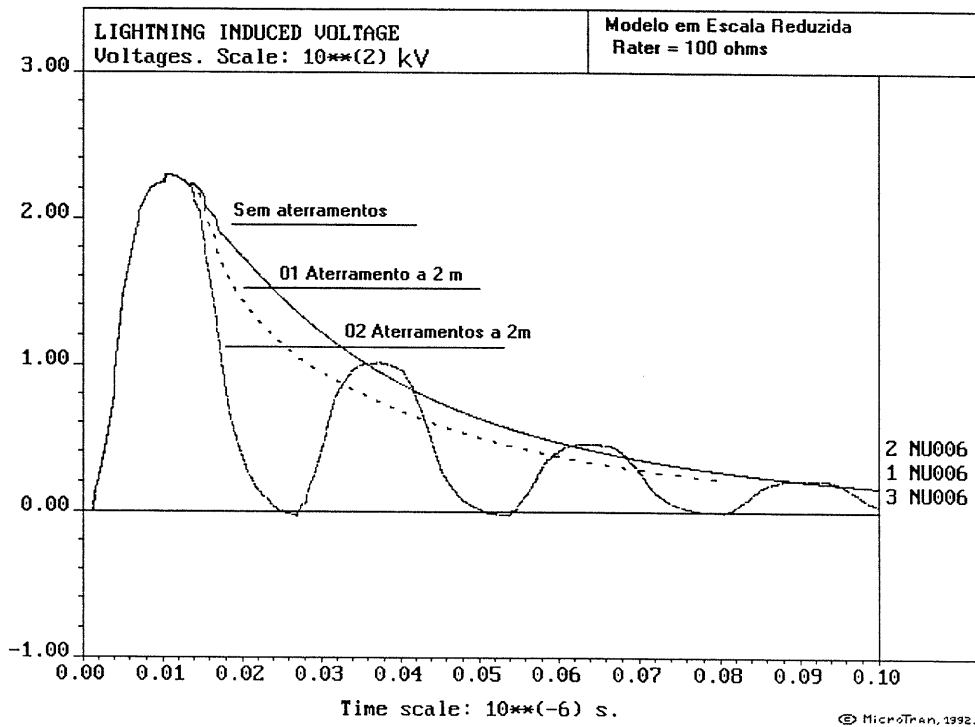


Figura 6.20 – Formas de onda da tensão induzida linha sem aterramento, 01 aterramento e 02 aterramentos a 2 m

### 6.3.4 – Influência da amplitude máxima da corrente

A tabela I mostra os efeitos da variação da amplitude máxima da corrente de descarga. A linha foi aterrada em 06 pontos com uma resistência de 100Ω, conforme mostra a figura 6.21. A tensão induzida foi medida no ponto P do condutor fase.

Conforme pode-se observar, a tensão induzida é proporcional aos valores de amplitude da corrente da descarga. Comparando o valor da tensão nesta linha multi-aterrada com a linha sem aterramentos para uma corrente de 47 mA constata-se uma redução de 36% na amplitude.

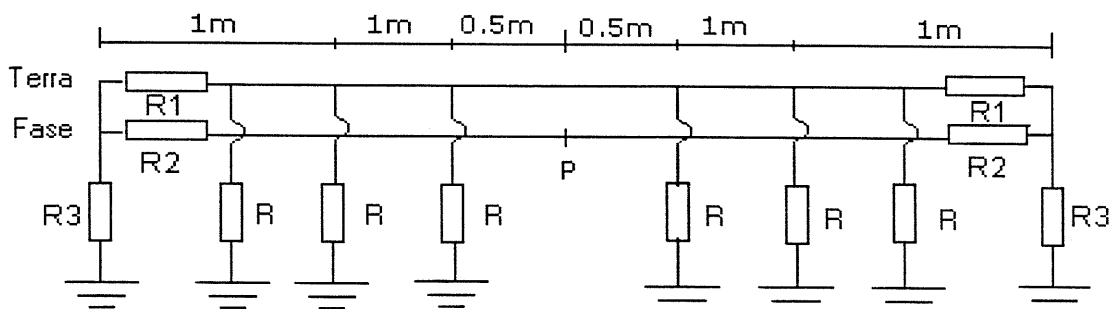


Figura 6.21 – Linha com múltiplos aterramentos

Tabela I

Amplitude da Corrente, em mA	Tensão Induzida, em mV
23.5	74
47	148
94	296

6.3.5 – Efeito da distância do ponto de incidência

A figura 6.22 mostra o efeito da distância do ponto de incidência da descarga na amplitude e na forma de onda da tensão induzida. Pode-se observar que à medida que distância diminui, a tensão induzida é mais elevada e o tempo de frente é menor. Para distâncias maiores, a amplitude é menor e o tempo de frente maior.

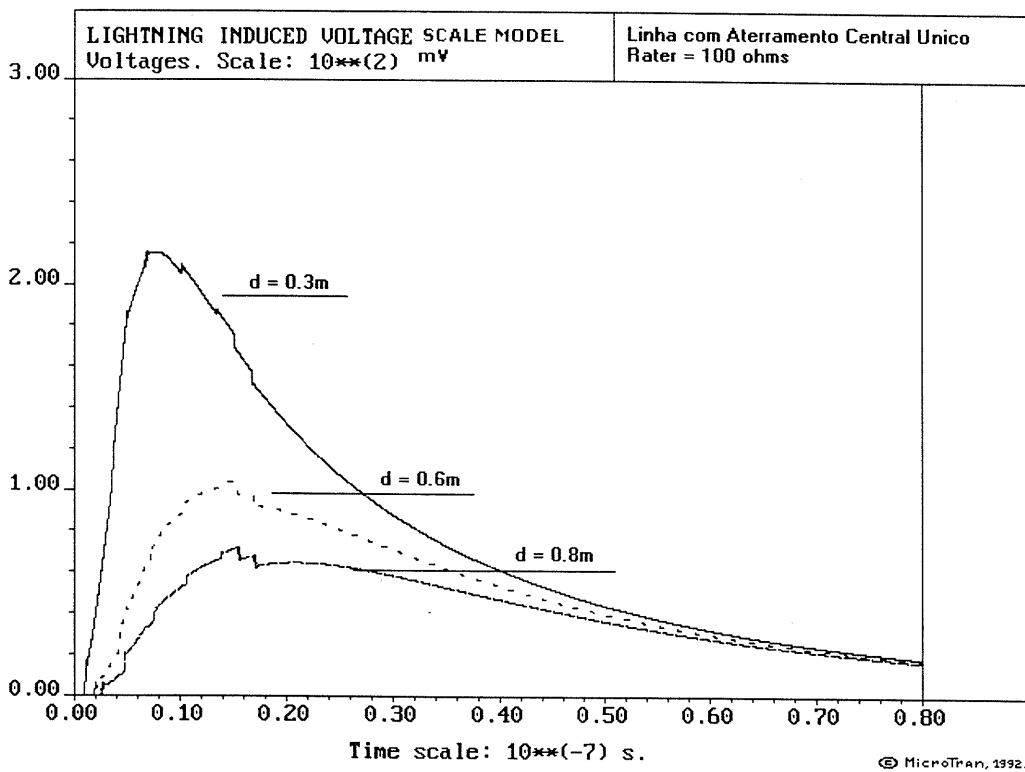


Figura 6.22 – Variação da tensão induzida em função da distancia do ponto de incidência

### 6.3.6 – Efeito da velocidade de propagação da corrente no canal

A figura 6.23 mostra o efeito da variação da velocidade da corrente no canal na forma de onda da tensão induzida. A configuração utilizada para estas simulações considerou a linha com múltiplos aterramentos, com resistência de  $100\Omega$  (ver figura 6.21).

Pode-se observar a redução da amplitude da tensão de pico com a elevação da velocidade. A tabela II apresenta simulações para a linha sem aterramentos, onde observa-se também a redução do pico da amplitude da tensão induzida com a elevação da velocidade.

Tabela II

Velocidade de Propagação m/ $\mu$ s	Linha sem Aterramento Tensão Induzida, em mV
30	240
40	230
60	220

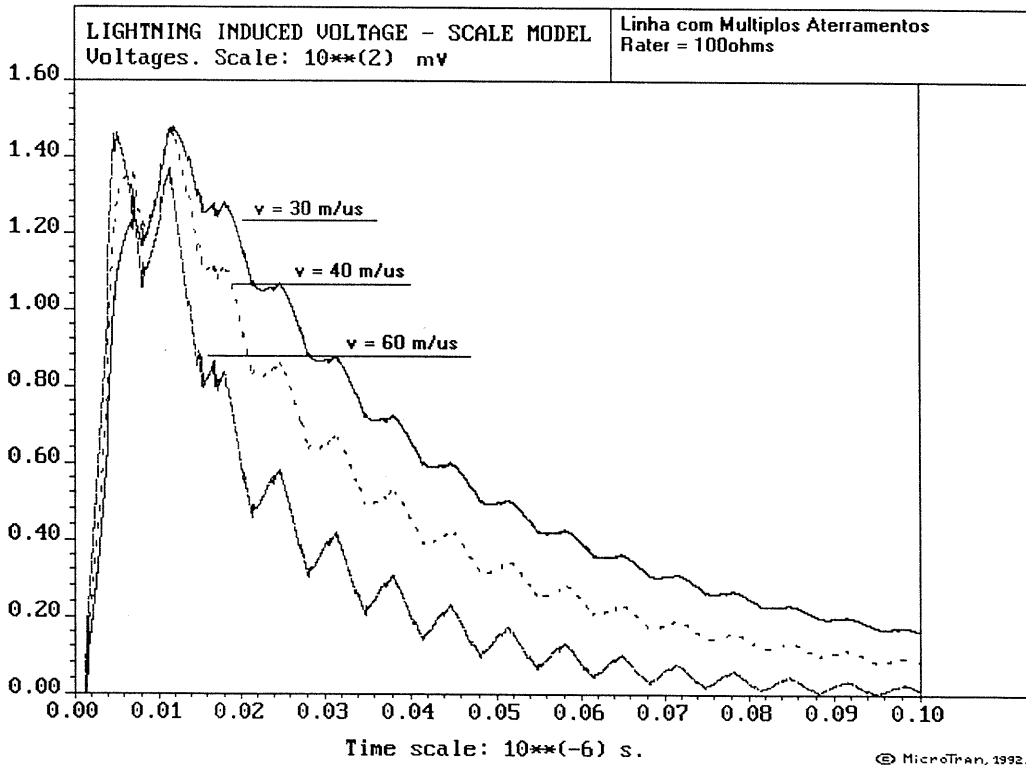


Figura 6.23 – Variação da tensão induzida em função da velocidade de propagação da corrente no canal.

### 6.3.7 – Efeito do tempo de frente da corrente de retorno

A figura 6.24 apresenta as ondas de tensão induzida considerando o efeito da variação da frente de onda. Pode-se observar que para os tempos de frente menores as tensões induzidas são mais elevadas.

A tabela III mostra a comparação da variação da frente de onda para duas configurações diferentes da linha. Pode-se observar que para os tempos de 1 e 5 ns a amplitude da tensão não apresentou alterações significativas.

Estes tempos de frente em uma escala real seriam 0.2 e 1  $\mu$ s, ou seja, tempos bem íngremes cuja diferença entre eles não causa grandes influências na amplitude da tensão induzida, alterando mais significativamente a taxa de crescimento do tempo de frente de onda da tensão induzida. Para tempos de frente maiores, ocorre uma redução na amplitude da tensão.

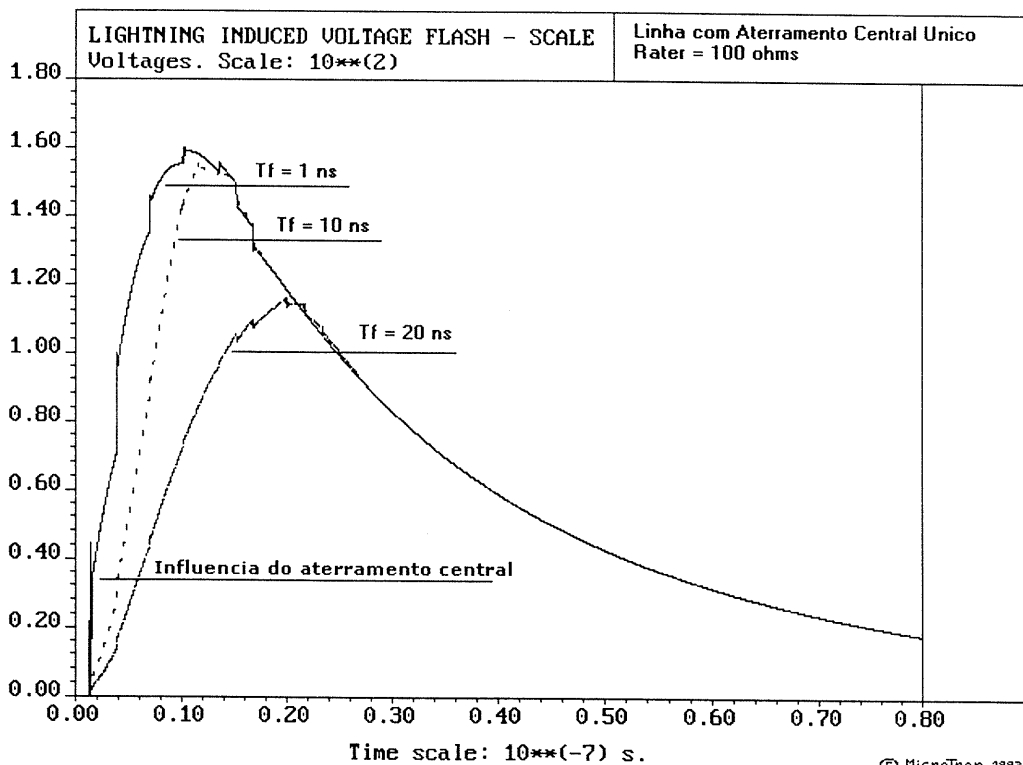


Figura 6.24 – Variação da tensão induzida em função do tempo de frente

**Tabela III**

Tempo de Frente, em ns	Linha sem Aterramento Tensão Induzida, em mV	Aterramento Central -100Ω Tensão Induzida, em mV
1	230	160
5	230	160
10	225	156
20	180	125

### 6.3.8 – Efeito do tempo de cauda da corrente de retorno

A tabela IV mostra o efeito da variação do tempo de cauda . Observa-se a pouca influência na amplitude da tensão, considerando as configurações simuladas.

**Tabela IV**

Tempo de Cauda, em ns	Múltiplos Aterramentos R = 100Ω Tensão Induzida, em mV	Aterramento Central R = 100Ω Tensão Induzida, em mV
100	144.5	156
200	147	160
400	148.5	162

### 6.3.9 – Efeito do comprimento da linha

Observa-se na tabela V o efeito do comprimento da linha. Constata-se que duplicando o comprimento da linha, têm-se uma elevação de 19% na tensão para a linha sem aterramento e para a linha com aterramento central único.

**Tabela V**

Comprimento da Linha, m	Linha sem Aterramento Tensão Induzida, em mV	Aterramento Central R = 100Ω Tensão Induzida, em mV
10	274	190

### 6.3.10– *Efeito da altura da linha*

O efeito de alteração da altura da linha pode ser observado através da tabela VI. Verifica-se que uma alteração de 20% na altura corresponde a uma alteração de 20% na amplitude da tensão induzida.

**Tabela VI**

Altura da Linha (condutor fase) m	Equivalência a uma linha real m	Linha sem Aterramento Tensão Induzida na Fase mV
0.06	12	277
0.05	10	230
0.04	8	182

### 6.3.11 – *Efeito da discretização da linha*

A tabela VII mostra o efeito da discretização da linha para 5, 7, 10 e 15 segmentos, sendo os segmentos correspondentes a 1, 0.714, 0.5, e 0.333 m, respectivamente.

Pode-se observar que para a discretização em 7, 10 e 15 segmentos a amplitude da tensão induzida é a mesma.

Mas para a segmentação em 5 trechos, a diferença percentual do valor da tensão para os outros segmentos é de 6%. Isto mostra que para os casos analisados e as distâncias envolvidas, o critério de discretização da linha em trechos que tenham comprimentos entre a metade da distância e o dobro da distância entre o ponto de incidência da descarga apresentou os melhores resultados.

Tabela VII

Comprimento dos Segmentos m	Linha sem Aterramento Tensão Induzida, em mV
0.333	230
0.5	230
0.714	230
1.0	245

Pode-se observar valendo-se das figuras 6.25 e 6.26 o efeito das diversas discretizações na forma de onda da tensão induzida.

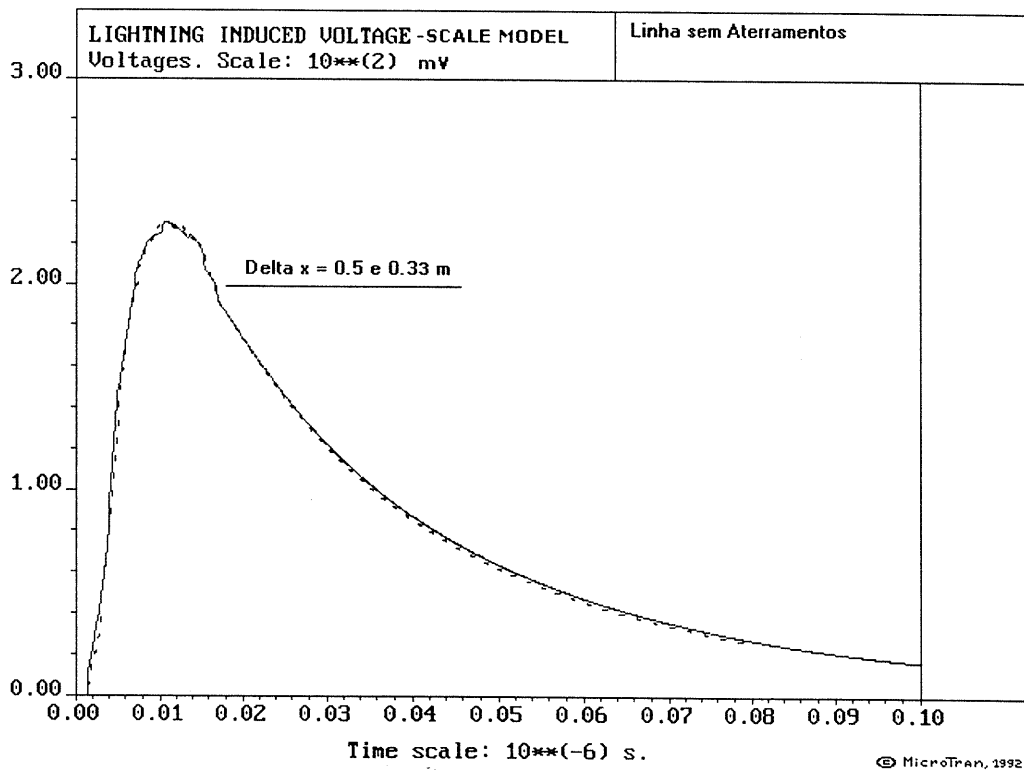


Figura 6.25 – Variação da tensão induzida em função da discretização da linha



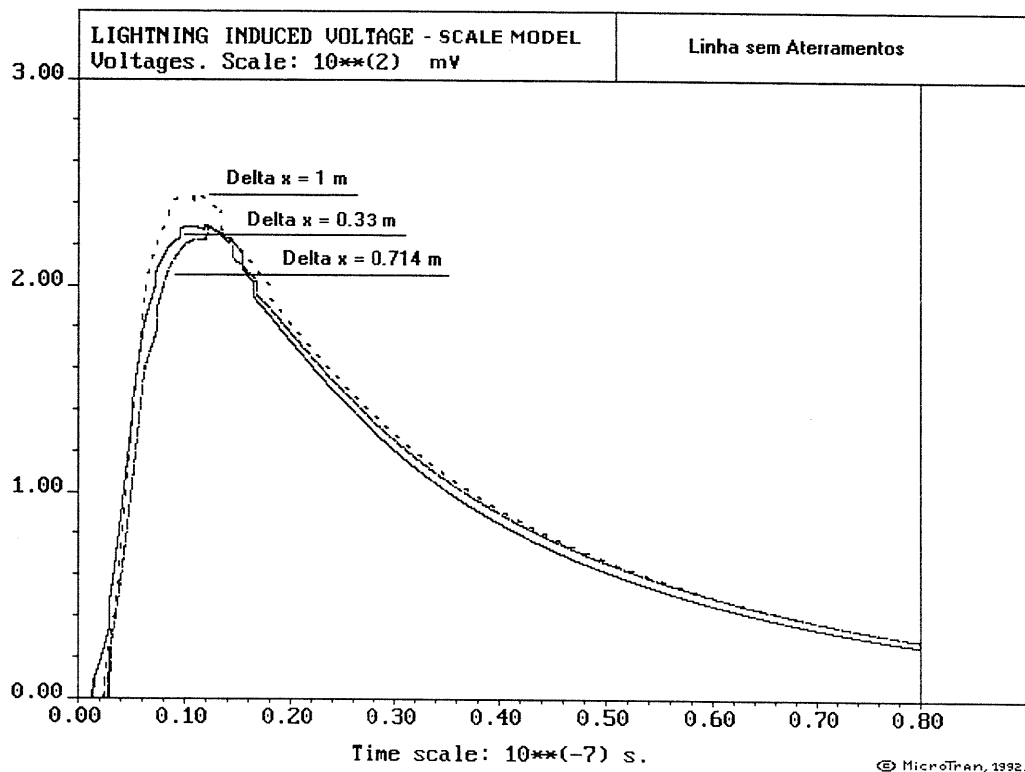


Figura 6.26 – Variação da tensão induzida em função da discretização da linha

### 6.3.12 – Efeito da variação do passo de integração

Pode-se observar na figura 6.27 que utilizando os passos de integração de  $1e10^{-9}$ ,  $1.e10^{-10}$  e  $1.e10^{-11}$  segundos não ocorrem alterações significativas na amplitude e na forma de onda da tensão de saída. Os tempos de cálculo para proceder a simulação são 1, 2 e 10 segundos, respectivamente. Neste ponto é importante observar que devido a "degralização" da fonte de corrente é interessante utilizar o menor passo de integração para uma maior "degralização" da fonte.

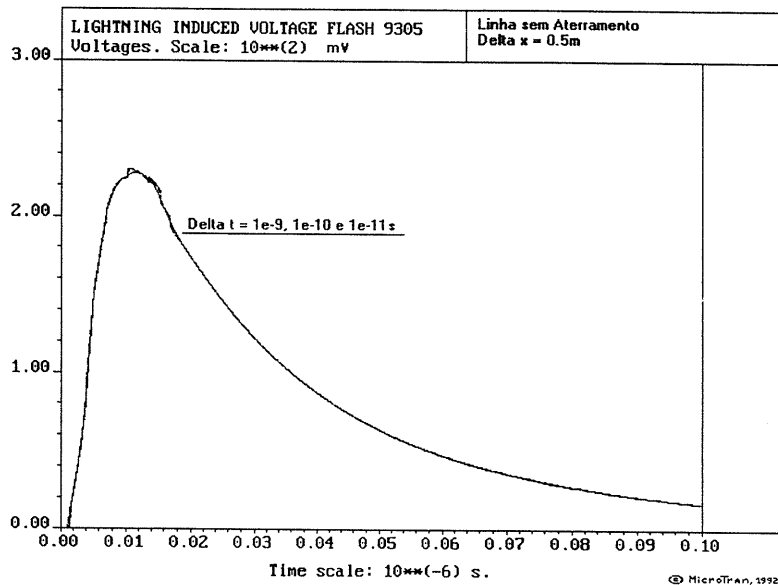


Figura 6.27 – Tensão induzida em função da variação do passo de integração

#### 6.4 – Implementação do estudo para a linha experimental do EPRI

O propósito da montagem de uma estação para medição das descargas atmosféricas, forçando sua incidência em um ponto desejado tem o intuito de obter as características das descargas incidentes. Bem como, seus efeitos em experimentos montados nas proximidades, tais como linhas elétricas, redes elétricas industriais e residenciais, dispositivos de proteção e demais equipamentos.

É interessante mencionar que a técnica de provocar uma descarga atmosférica forçada para um ponto determinado no solo, constitui atualmente uma importante fonte de dados sobre as características das descargas atmosféricas. Medições dos principais parâmetros da descarga são realizados e obtém-se a exata localização da incidência da mesma, simultaneamente é também possível realizar montagens nas proximidades para avaliar os efeitos das descargas atmosféricas, nas linhas adjacentes.

Deve-se observar que as descargas atmosféricas naturais incidem aleatoriamente sobre a superfície terrestre, fazendo com que estações de coleta posicionadas no solo, tenham um baixo nível de incidência. Isso prolonga por anos e/ou décadas, o período para a aquisição de um razoável banco de dados. O mesmo não ocorre para as descargas atmosféricas forçadas que em uma estação de chuvas pode possibilitar a aquisição de um banco de dados equivalente a anos de expectativas por descargas naturais.

Assim, com base em dados provenientes de uma linha fase-neutro experimental desenvolvida pelo Electric Power Research Institute – EPRI foi realizada uma série de simulações utilizando o método Rusck-EMTP com o intuito de sua validação[Barker 1996].

#### ***6.4.1 – Características do circuito do EPRI***

A figura 6.28 mostra o circuito esquemático da linha experimental, onde o condutor neutro foi aterrado em três pontos e a descarga atmosférica incide lateralmente à linha.

A linha não possui equipamentos instalados, tais como transformadores, pára-raios, chaves, etc. Nas extremidades, os condutores neutro e fase foram conectados por uma resistência de  $455\Omega$  para evitar reflexões. Esta configuração representa uma típica linha de distribuição rural do Estado de Minas Gerais, que por vezes percorre regiões de elevados níveis cerâmicos.

Neste experimento foram medidas as tensões fase-neutro induzidas na linha, bem como as principais características da corrente da descarga atmosférica forçada. Assim, os resultados obtidos pelas simulações podem ser comparados com os valores medidos no circuito experimental. As principais características do circuito conforme figura 4.4 são:

- Comprimento da linha : 684m;
- Segmentação da linha em trechos( $\Delta x$ ): 68.4m
- Passo de Integração ( $\Delta t$ ):  $1.10^{-9}$  s
- Resistência de aterramento :  $50\Omega$ ;
- Ponto de incidência da descarga na linha : 410.4 m da origem;
- Condutor: 1/0
- Altura da linha 1: 7.5m;
- Altura da linha 2: 5.68m;
- Terminações casadas (ver figura 6.28)
- Distância da descarga a linha: 145m;
- Velocidade da corrente no canal de descarga: não medida;

Como a velocidade da corrente no canal de retorno não foi medida neste experimento foram utilizados os valores de 100 e 120 m/ $\mu$ s, conforme [Fisher,1993;Jankov,1997;Mach,1989;Idone,1982 e Idone1984], que são os valores médios utilizados na literatura técnica.

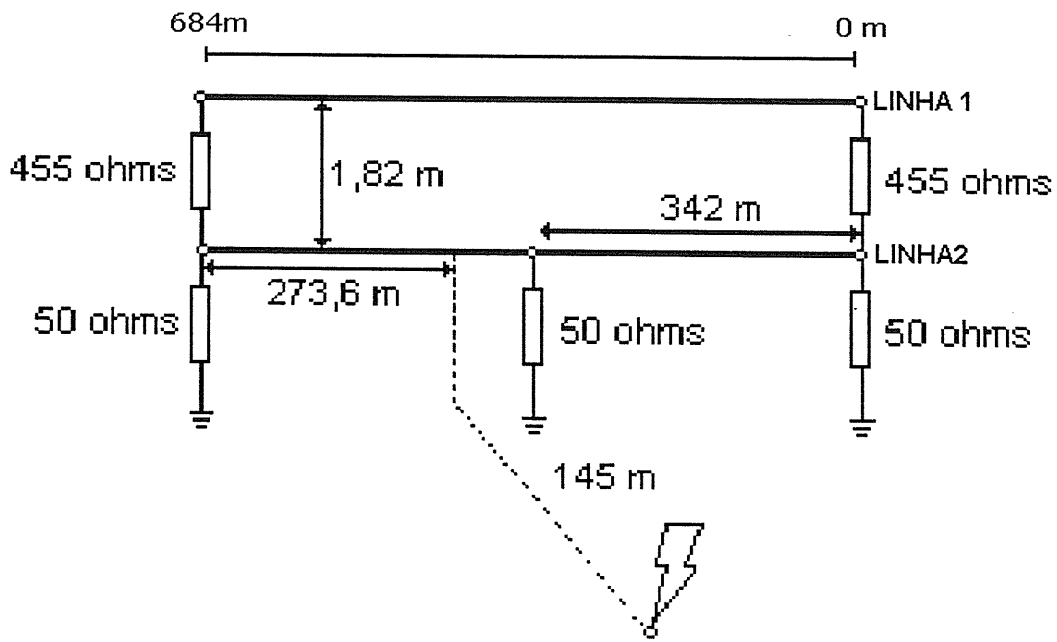


Figura 6.28 – Configuração Esquemática da Descarga Atmosférica nas Proximidades da Linha Aérea Fase-Neutro

A figura 6.29 apresenta uma forma de onda típica da corrente de descarga atmosférica medida neste experimento do EPRI. Com os dados obtidos por esta onda pode-se realizar simulações usando a metodologia Rusck – EMTP, e assim, obter as formas de ondas das tensões induzidas. Cabe ressaltar que os dados provenientes destas curvas foram obtidos através de um programa de aquisição de dados e que possibilitou a determinação da frente da onda e valor de pico da amplitude. E quanto ao tempo de cauda, na maioria das curvas não foi possível determinar o tempo de cauda devido à limitação da escala de medição. Assim, optou-se pela utilização do valor de 45  $\mu$ s adotado pela referência [Nucci,1995].

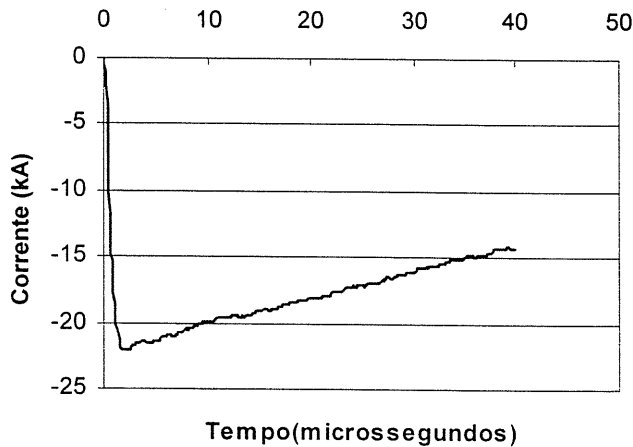


Figura 6.29 – Forma de onda da corrente para a descarga atmosférica 9305

### 6.4.2 – Resultados Obtidos para as Diversas Medições

É importante mencionar neste ponto que as comparações realizadas neste tópico consideraram as tensões fase-neutro medidas na linha experimental do EPRI com as tensões fase-neutro simuladas pelo método Rusck-EMTP.

A figura 6.30 apresenta as formas de onda das tensões fase-terra e neutro-terra provenientes das simulações utilizando a metodologia do Rusck-EMTP para a descarga atmosférica 9343. Será a partir de curvas como esta, obtidas com os dados das descargas atmosféricas forçadas provenientes desta linha experimental que serão determinados os valores de tensão fase-neutro, apresentados ao longo deste tópico.

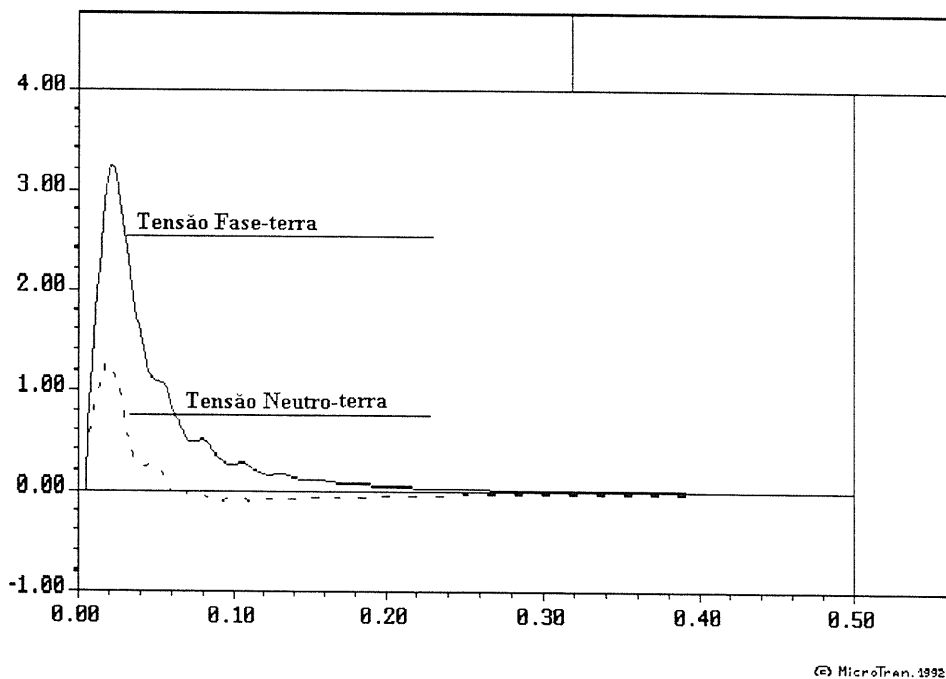


Figura 6.30 – Forma de onda da tensão fase-terra e neutro-terra obtidas pela metodologia Rusck-EMTP para a descarga atmosférica 9343

As tabelas VIII – XV, a seguir apresentam uma comparação entre os valores medidos e simulados das tensões fase-neutro, considerando as velocidades da corrente no canal da descarga atmosférica, de 100 e 120m/ $\mu$ s.

Os parâmetros das tabelas são:

$V$  é a velocidade de propagação da corrente no canal;

$V_{\text{máx9}}$  é a tensão induzida fase-terra no centro da linha 1;

$T_f$  é o tempo de frente;

$T_c$  é o tempo de cauda;

$V_{\text{máx1}}$  é a tensão induzida fase-terra no início da linha 1.

Tabela VIII

Evento	Tipo	$v$ m/ $\mu$ s	$V_{\text{máx9}}$ (kV)	$T_f$ ( $\mu$ s)	$T_c$ ( $\mu$ s)
Nº 9335	Simulação	100	81.8	2.1	4.2
		120	77.1	2.0	3.9
	Medição	Não medido	90.7	2.1	6.5
	Erro Relativo (%)	-	9.8	0.0	35.3
		-	15.0	4.8	40.0

Tabela IX

Evento	Tipo	$v$ m/ $\mu$ s	$V_{\text{máx9}}$ (kV)	$T_f$ ( $\mu$ s)	$T_c$ ( $\mu$ s)
Nº 9337	Simulação	100	42.6	1.6	4.0
		120	42.7	1.5	3.6
	medição	Não medido	46.3	2.5	3.9
	Erro Relativo (%)	-	8.0	36	2.5
		-	7.8	40	7.6

Tabela X

Evento	tipo	$v$ m/ $\mu$ s	$V_{\text{máx9}}$ (kV)	$T_f$ ( $\mu$ s)	$T_c$ ( $\mu$ s)
Nº 9339	simulação	100	40.5	1.6	4.0
		120	40.5	1.5	3.6
	medição	Não medido	43.3	2.9	4.1
	Erro Relativo (%)	-	6.5	45	2.4
		-	6.5	48	12.2

Tabela XI

Evento	tipo	V	V máx9	Tf	Tc
		m/ $\mu$ s	(kV)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)
N <sup>o</sup> 9341	simulação	100	31.3	2.0	4.1
		120	29.8	2.0	3.8
	medição	Não medido	33.1	2.7	4.1
	Erro Relativo (%)	-	5.4	26.0	0.0
		-	10.0	26.0	7.3

Tabela XII

Evento	tipo	V	V máx9	Tf	Tc
		m/ $\mu$ s	(kV)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)
N <sup>o</sup> 9342	simulação	100	47.4	1.6	4.1
		120	47.0	1.5	3.6
	medição	Não medido	52.0	2.3	4.0
	Erro Relativo (%)	-	8.8	30.4	2.5
		-	9.6	34.7	10.0

Tabela XIII

Evento	tipo	V	V máx9	Tf	Tc
		m/ $\mu$ s	(kV)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)
N <sup>o</sup> 9343	simulação	100	20.2	2.0	4.3
		120	19.1	3.1	4.5
	medição	Não medido	22.3	1.8	4.9
	Erro Relativo (%)	-	9.4	11.1	12.2
		-	14.3	72.2	8.1

Tabela XIV

Evento	tipo	V	V máx9	Tf	Tc
		m/ $\mu$ s	(kV)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)
N <sup>o</sup> 9345	simulação	100	36.5	2.0	4.1
		120	35.0	1.6	3.8
	medição	Não medido	42.3	3.1	4.7
	Erro Relativo (%)	-	13.7	35.5	12.8
		-	17.2	48.4	19.1

Tabela XV

Evento	tipo	V	V máx9	Tf	Tc
		m/ $\mu$ s	(kV)	( $\mu$ s)	( $\mu$ s)
N <sup>o</sup> 93201	simulação	100	11.6	3.1	6.1
		120	10.1	2.4	4.5
	medição	Não medido	30.2	2.5	4.0
	Erro Relativo (%)	-	61.5	24	52.5
		-	66.5	4.0	12.5

Pode-se observar de acordo com as tabelas VII - -XV uma boa concordância entre os valores de amplitude no meio da linha ( $V_{máx9}$ ) com erros inferiores a 15%. Com relação às comparações realizadas para os tempos de frente e de cauda, observa uma maior dispersão dos resultados. Mas de uma forma geral a comparação entre os valores medidos e calculados para os tempos de frente e de cauda, os melhores resultados são observados para as velocidades de 100m/ $\mu$ s.

O evento 93201 apresenta uma variação da ordem de 66% de diferença entre a tensão medida e a tensão simulada. Mas vale ressaltar que a forma de onda da corrente para este evento difere da corrente de descarga típica, conforme pode-se observar na figura 6.31.



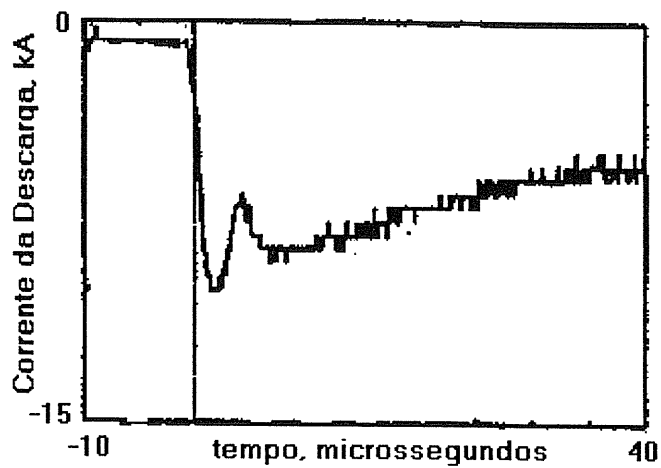
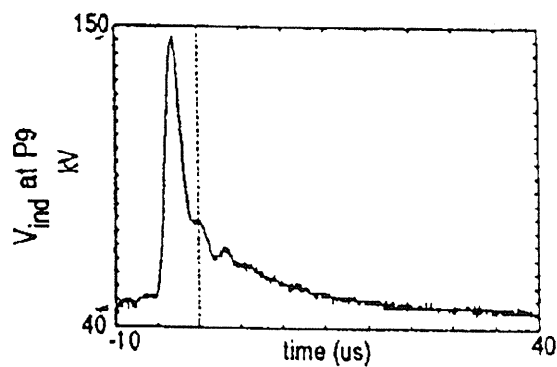
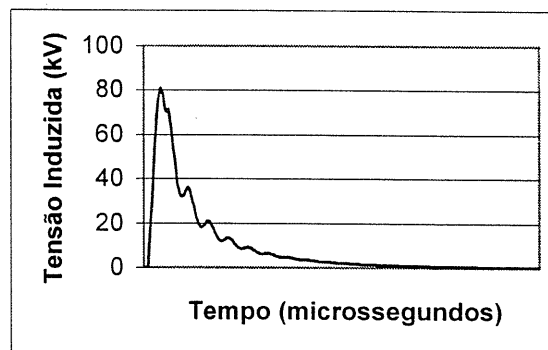


Figura 6.31 – Corrente da descarga atmosférica 93201 [Barker 1996]

A figura 6.32 apresenta as formas de onda da tensão induzida medida e simulada para a descarga 9335, como exemplo para observação dos seus principais aspectos [Barker 1996].



(a)



(b)

Figura 6.32 – (a) Tensão Induzida Medida no Centro da Linha para a Descarga 9335; (b) Tensão fase-terra proveniente da simulação do modelo proposto a 410.4 m da origem para  $I = 43.2$  kA,  $v = 100$  m/ $\mu$ s,  $T_f = 1.6$   $\mu$ s e  $T_c = 28$   $\mu$ s

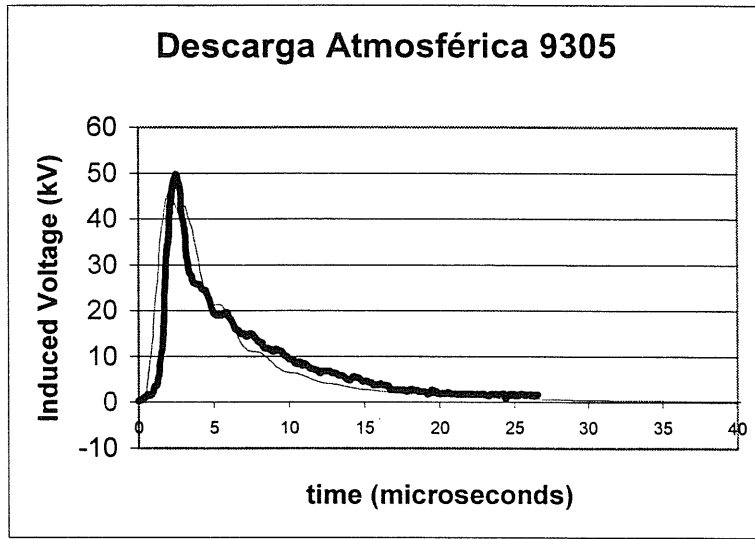
A tabela XVI mostra os parâmetros usados nas simulações para três eventos. Além disso, são apresentados os resultados das simulações, da medição na linha experimental e os resultados provenientes da equação para estimação dos valores de tensão induzida usando o modelo de Agrawal [Jankov, 1997].

Observando a tabela XVI pode-se verificar os bons resultados obtidos pelo método Rusck-EMTP, com erro relativo para o evento 9305 igual 11%, para o evento 9306 igual a 13.4% e para o evento 93132 igual 10.6%.

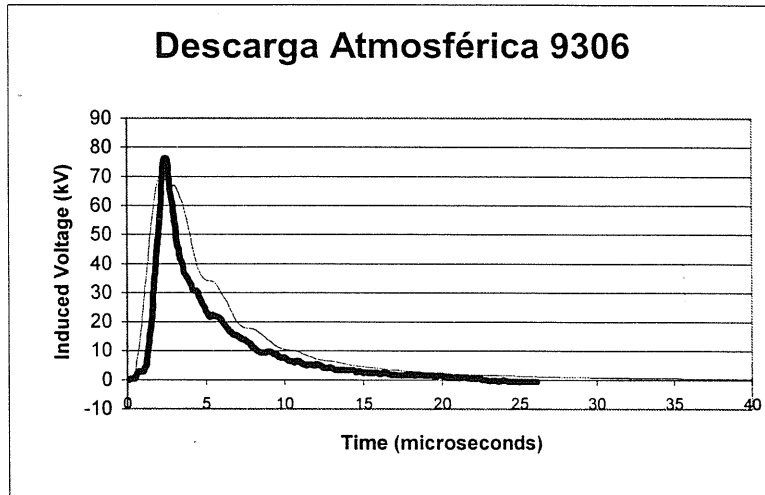
Tabela XVI

Evento N <sup>o</sup>	Corrente da Descarga KA	Tempo de Frente $\mu$ s	Tempo de Cauda $\mu$ s	Tensão Induzida KV (medida)	Tensão Induzida KV $v=100m/\mu$ s (Jankov)	Tensão Induzida Kv $v=100m/\mu$ s (Rusck)
9305	23	1.5	45	50.0	45.4	44.5
9306	37.5	1.75	45	79.0	74.6	68.4
93132	9.75	1.0	40	22.5	18.4	20.1

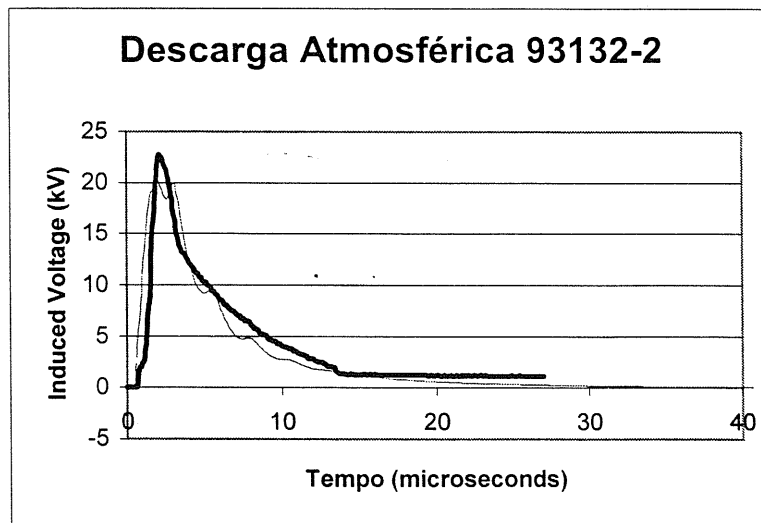
As figuras 6.33a, 6.33b e 6.33c mostram a comparação entre as formas de onda medidas (traço contínuo) e simuladas (traço pontilhado) para os eventos 9305, 9306 e 9313-2, respectivamente. Pode-se observar uma boa concordância entre as formas de onda medidas e simuladas.



(a)



(b)



©

Figura 6.33 (a, b, c) – Curvas medidas (traço grosso) [Barker 1996] e simuladas pelo modelo Rusck-EMTP (traço fino)

### 6.4.3 – Efeito da amplitude máxima da corrente

A figura 6.34 mostra a curva da tensão induzida em função da variação da amplitude de pico da corrente de descarga atmosférica. Pode-se observar o aumento da tensão induzida com a elevação do valor de pico da corrente.

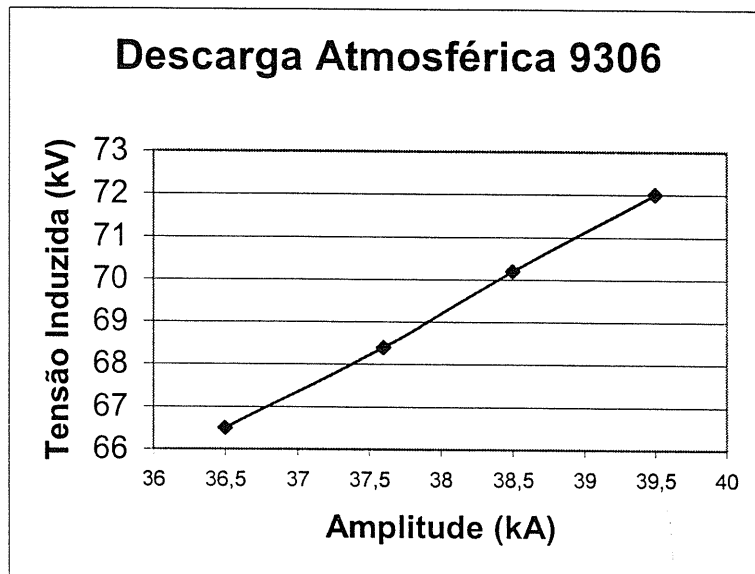


Figura 6.34 – Variação da tensão induzida em função da amplitude da corrente para a descarga atmosférica 9306

A Tabela XVII mostra os efeitos de pequenas variações na amplitude da corrente de pico no valor da amplitude máxima. Os dados da medição do EPRI não apresentavam os valores de amplitude máxima, razão pela qual obteve-se estes dados utilizando um programa capaz de digitalizar as curvas.

Comparando os valores da tensão induzida medidas, com a equação de Jankov utilizando o modelo de acoplamento de Agrawal e a simulação pelo modelo Rusck-EMTP para a mesma intensidade de corrente, constata-se que o modelo Rusck\_EMTP apresenta um erro inferior a 11%.

Considerando uma variação de 1 kA entre o valor apresentado no artigo de [Jankov 1997] observa-se que os resultados provenientes da metodologia Rusck-EMTP obteve erros inferiores a 20%.

TABELA XVII

Evento N <sup>o</sup>	Valores Simulados pelo Modelo Rusck- EMTP					Jankov	Barker et al
9305 $I_p$ (kA)	21	22	23	24	25	23	23
9305 $V_{ind}$ (kV)	40.6	42.5	44.5	46.3	48.3	45.4	50.0
9306 $I_p$ (kA)	35.5	36.5	37.5	38.5	39.5	37.5	37.5
9306 $V_{ind}$ (kV)	66.6	66.5	68.4	70.2	72.0	74.6	79.0
9313-2 $I_p$ (kA)	7.75	8.75	9.75	10.75	11.75	9.75	9.75
9313-2 $V_{ind}$ (kV)	16.0	18.0	20.1	20.7	22.6	18.4	22.5

onde:  $I_p$  é o valor de pico da corrente de descarga atmosférica;  
 $V_{ind}$  é a amplitude da tensão induzida.

#### 6.4.4 – Efeito da Distância do Ponto de Incidência

A figura 6.35 mostra a influência do ponto de incidência na amplitude da tensão induzida. Verifica-se a dependência da tensão induzida do ponto de incidência da descarga: quanto maior a distância de incidência, menores serão os valores de tensão induzida.

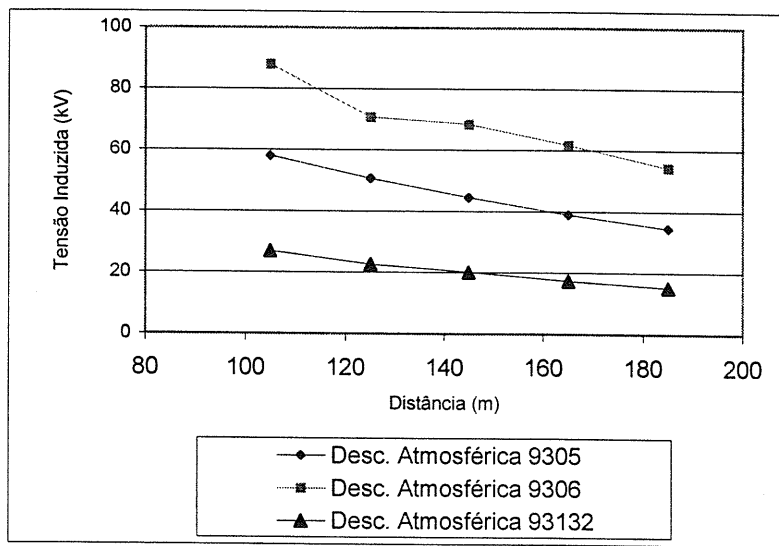


Figura 6.35 – Variação da tensão induzida em função da distância do ponto de incidência

#### 6.4.5 – Efeito da Velocidade de Propagação da Corrente no Canal

Neste item é discutido o efeito da variação da velocidade da corrente no canal na amplitude e forma de onda da tensão induzida. A figura 6.36 mostra os resultados da variação da velocidade para três eventos. Pode-se observar uma redução na amplitude da tensão induzida para elevados valores de velocidade de corrente.

Pode-se observar que para os valores 100, 120 e 130 m/ $\mu$ s a tensão induzida apresenta pouca alteração em seu valor de pico. Mas, considerando a variação da velocidade de 60 até 180 m/ $\mu$ s pode-se constatar que existe alteração significativa no valor de pico da tensão induzida.

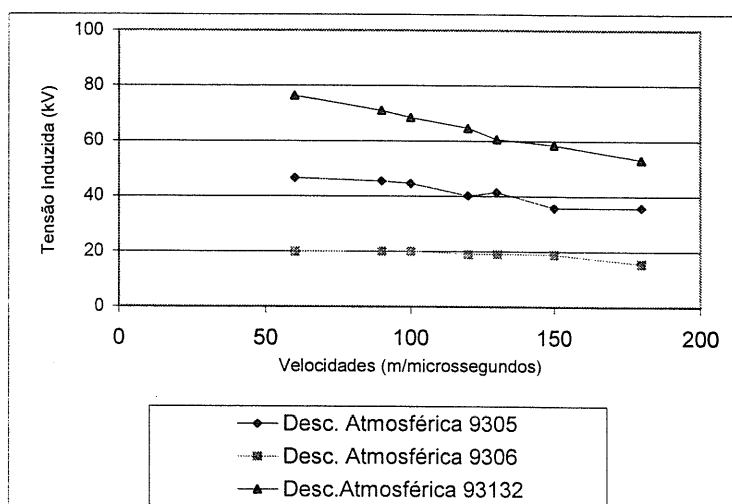


Figura 6.36 – Variação da tensão induzida em função da velocidade da corrente no canal de descarga

### 6.4.6 – Efeito do Tempo de Frente da Corrente de Retorno

O efeito do tempo de frente da corrente de retorno pode ser observado nas Tabelas XVIII e XIX, onde constata-se que menores tempos de frente da corrente levam a maiores amplitudes de tensão induzida. Como os valores de tempo de frente provenientes da medição não são conhecidos, nestas tabelas pode-se observar o impacto da variação do tempo de frente. Na Tabela XVIII uma alteração de 33% no tempo de frente obtido da digitalização, proporcionou como maior erro relativo entre os valores simulados e o medido de 18.2%.

A tabela XIX teve como maior erro relativo 21.5% entre os valores simulados e medidos para uma variação do tempo de frente de 28.5 %.

Tabela XVIII

Valores simulados pelo modelo Rusck-EMTP					Jankov	Medição	
Evento nº 9305						Barker	
V m/μs	100					100	Não-medida
Tf (μs)	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	1.50	1.50
V <sub>ind</sub> (kV)	47.5	46.4	44.5	41.9	40.9	45.5	50.0

Tabela XIX

Valores simulados pelo modelo Rusck-EMTP						Jankov	Medição
Evento nº 9306							Barker
V m/ $\mu$ s	100					100	Não- medida
Tf ( $\mu$ s)	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	1.75	1.75
V <sub>ind</sub> (kV)	75.7	72.5	68.4	66.7	62	74.6	79.0

#### 6.4.7 – Efeito do Tempo de Cauda da Corrente de Retorno

A figura 6.37 mostra o resultado da variação do tempo de cauda para o evento 9305; pode-se observar a pouca alteração na amplitude da tensão para os valores típicos de tempos de cauda, da ordem de poucas dezenas de microssegundos.

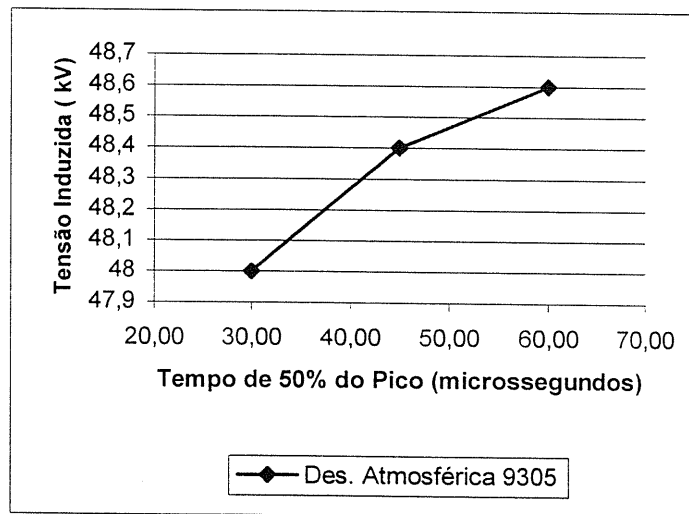


Figura 6.37 – Variação da tensão induzida em função do tempo de cauda

#### 6.4.8 – Efeito da Altura da linha

A figura 6.38 mostra a influência da altura na forma de onda da tensão induzida. Para realizar esta avaliação foi escolhidas as alturas de 11.25 e 15 m que representam 1.5 e 2 vezes a altura original da linha. Pode-se constatar o aumento proporcional do valor da tensão induzida com a elevação da altura da linha, constatação contemplada pela teoria de Rusck.



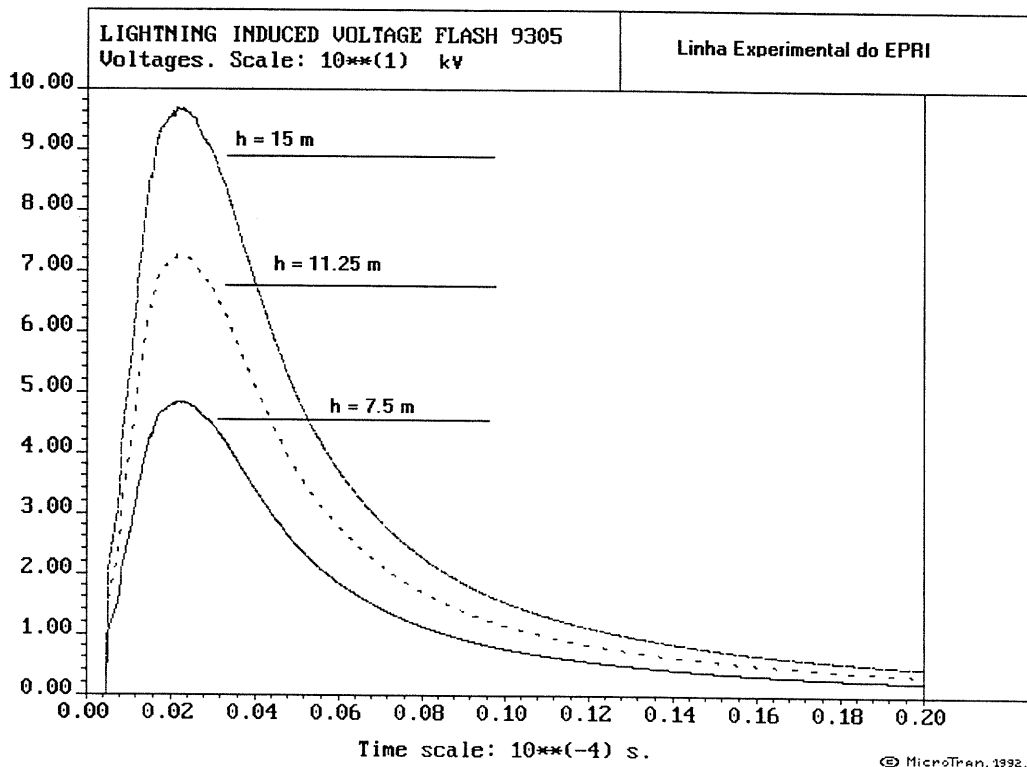


Figura 6.38 – Variação da tensão induzida em função da amplitude da corrente

#### 6.4.9 – Efeito da Discretização da Linha

A figura 6.39 mostra a tensão induzida em função do comprimento de cada seção da linha, ou seja, da discretização da linha, para um passo de integração de  $1 \times 10^{-7}$  s. Pode-se observar que comprimentos de dividindo a linha em 10 seções de 68.4m e em 8 seções 85.5m, não foi constatado nenhuma alteração nas características da forma de onda da tensão induzida. A tentativa de discretizar a linha em segmentos menores da ordem 34.2 m não pode ser implementada devido ao número de elementos não lineares ter ultrapassado a entrada de dados do EMTP. E segmentos maiores trazem como inconveniente a dificuldade de comparação da tensão para os mesmos pontos de medição e simulação.

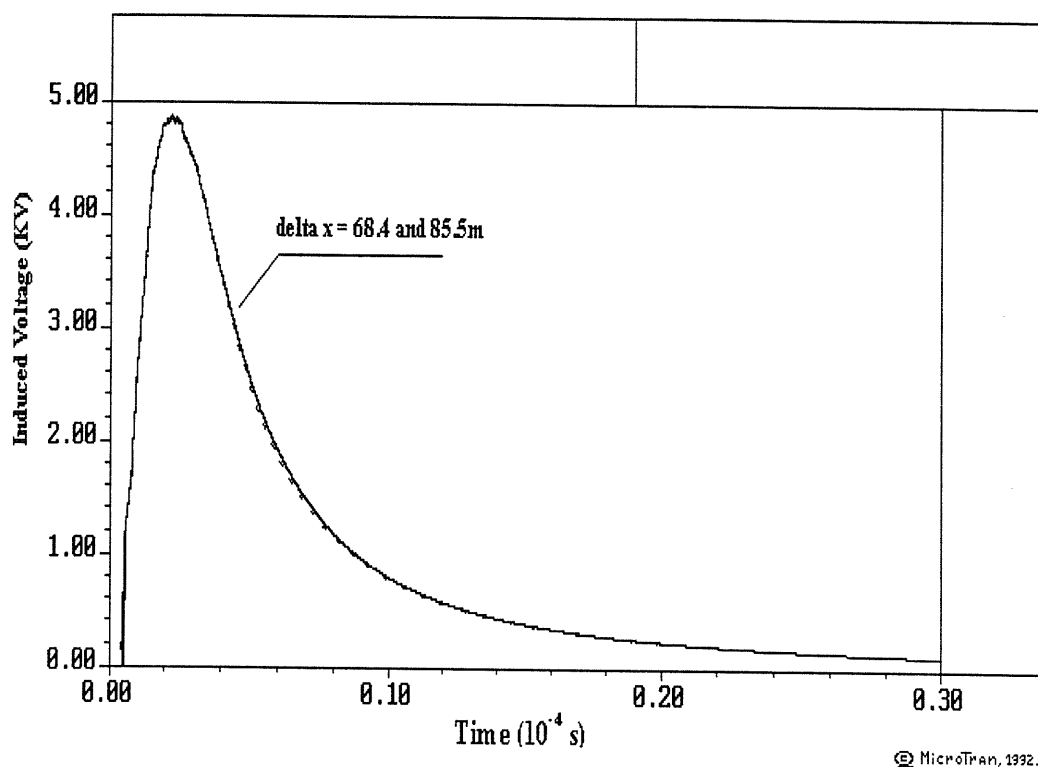


Figura 6.39 – Variação da tensão induzida em função da discretização da linha

#### 6.4.10 – Efeito da Variação do Passo de Integração

A figura 6.40 mostra o efeito de variação do passo de integração nas formas de onda da tensão induzida, para a linha discretizada em 10 segmentos de 68.4m. Pode-se observar que não houve alteração nas características da forma de onda para os três valores de passo de integração simulados. Existem apenas pequenas diferenças no início das formas de ondas. Devido a alteração do passo de integração, o ponto de início das curvas é ligeiramente modificado.

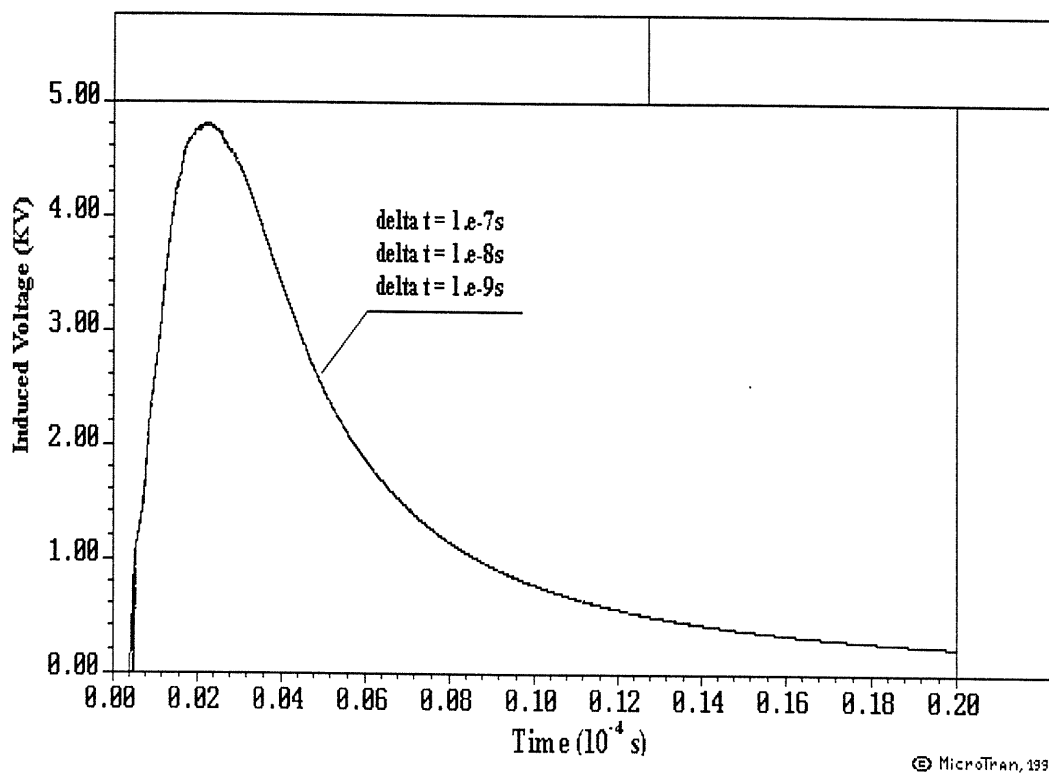


Figura 6.40– Variação da tensão induzida em função do passo de integração

## 6.5 Aplicações da Implementação

### 6.5.1 – Estudo da Influência do Intervalo dos Aterramentos

O propósito deste item é apresentar a influência do espaçamento do aterramento na amplitude da tensão induzida na linha experimental do EPRI. A tensão induzida neste item é avaliada no condutor fase no ponto P e o valor do aterramento é de  $R = 100\Omega$ , conforme figura 6.41. Ressalta-se que todas as demais características da linha experimental e da descarga atmosférica foram mantidas, conforme figura 6.13. Os parâmetros da descarga atmosférica utilizados neste tópico referem-se ao evento 9305.

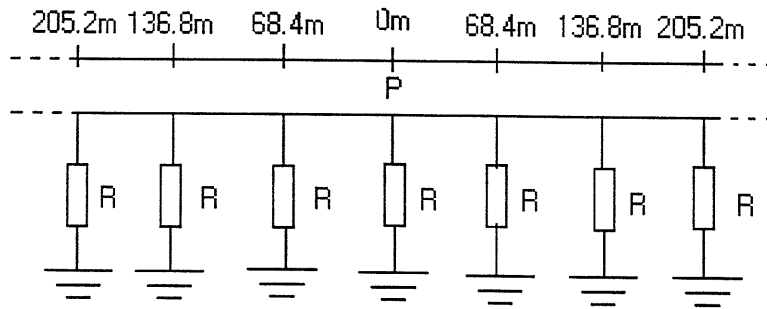


Figura 6.41 – Espaçamento dos Aterramentos

A metodologia usada foi a seguinte: Aterramento no ponto central apenas uma resistência de  $100\Omega$  colocada nas proximidades da metade do comprimento do condutor neutro. Para os demais pontos foram usados dois pontos de aterramento situados à distância escolhida do centro da linha.

As figuras 6.42 e 6.43 apresentam as tensões induzidas obtidas para os diversos espaçamentos. Pode-se observar que o aterramento colocado no ponto mais próximo da descarga ( $d = 0\text{m}$ ) apresenta os menores valores de tensões induzidas. E à medida que os pontos de aterramento afastam-se do ponto de medição, o efeito de redução da amplitude causado pelo aterramento vai diminuindo, devido ao atraso dado pelo maior intervalo.

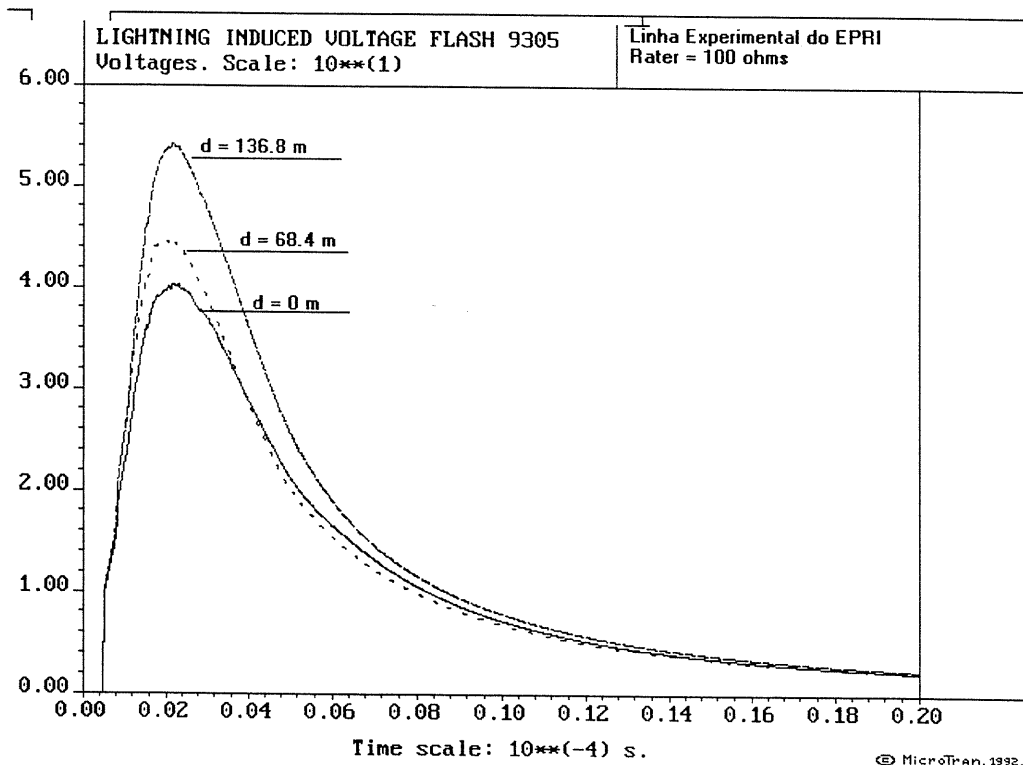


Figura 6.42– Variação da tensão induzida em função do intervalo de aterramento

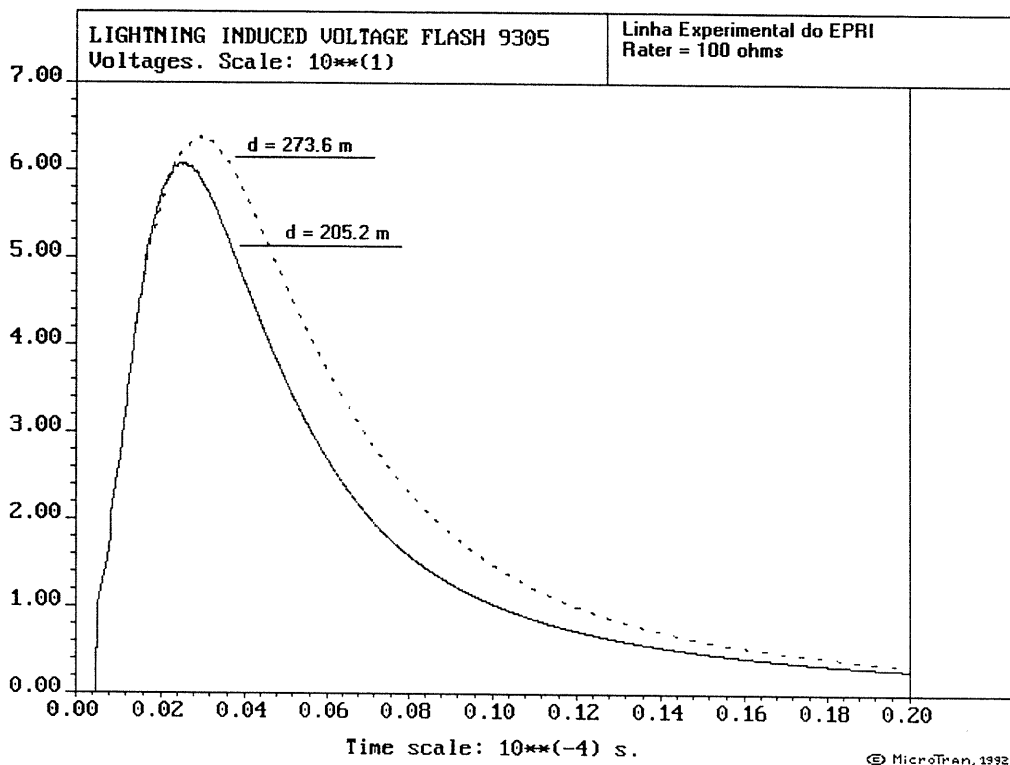


Figura 6.43 – Variação da tensão induzida em função do intervalo de aterramento

A figura 6.44 compara a influência da colocação dos aterramentos a 273.6m e uma linha sem aterramento. Conforme pode-se observar para esta dada configuração, pontos de aterramentos situados a esta distância não alteram o valor de pico da amplitude da tensão induzida no ponto P. Apenas o tempo de cauda da forma de onda com aterramento é modificado. Isto se deve ao efeito do aterramento que devido ao tempo de propagação, retorna em tempo apenas de alterar os valores de tensão da cauda para este ponto de medição. Comparando a tensão induzida máxima para a linha sem aterramento, 64kV, com a linha de um aterramento central de  $50 \Omega$ , 45.4 kV, observa-se uma redução de 29% devido à presença do aterramento no evento 9305.

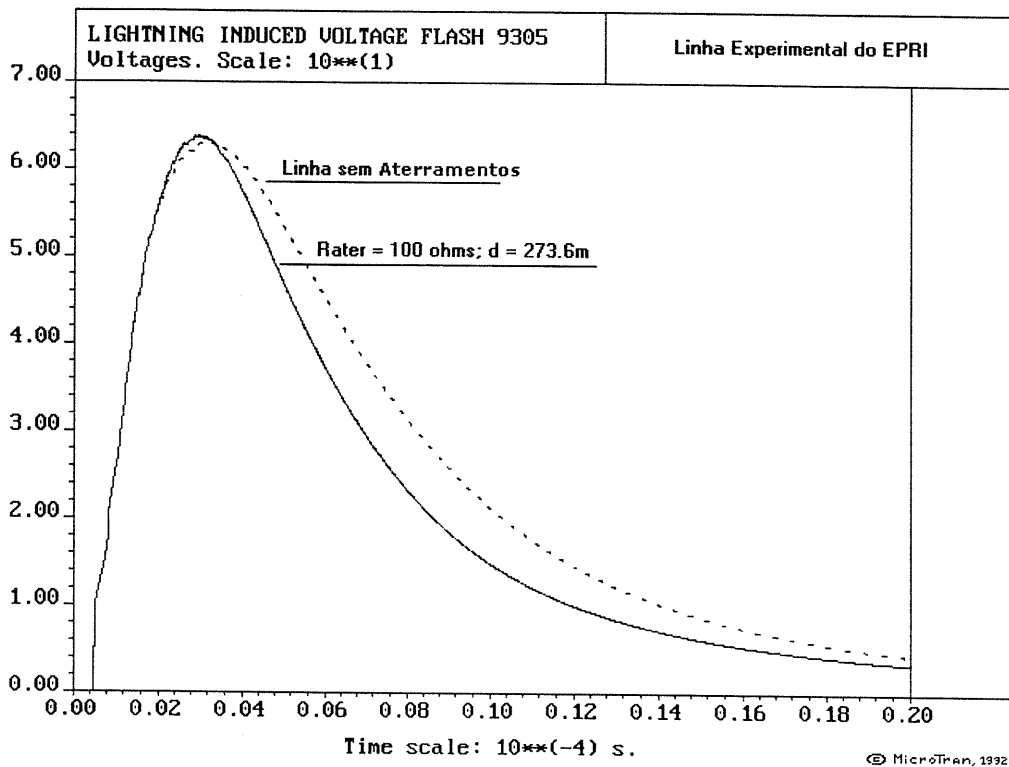


Figura 6.44– Comparação da tensão induzida para uma linha sem aterramento e para uma linha com intervalo de aterramento de 273.6m

Para avaliar a influência da distância do aterramento em um ponto específico da linha ou a um determinado equipamento para propiciar a redução das tensões induzidas, deve considerar os efeitos dos tempos de frente, tempos de cauda, intensidade das correntes, velocidades de propagação, ou seja, os parâmetros da descarga atmosférica.

A figura 6.45 mostra a influência da distância de incidência da descarga a linha e um ponto de aterramento no meio da linha de 100  $\Omega$ . Pode-se observar a tensão induzida a um ponto situado a 68.4 m do meio da linha do condutor fase apresenta uma redução média de 20% em sua amplitude de pico para as diversas distâncias do ponto de incidência apresentadas.

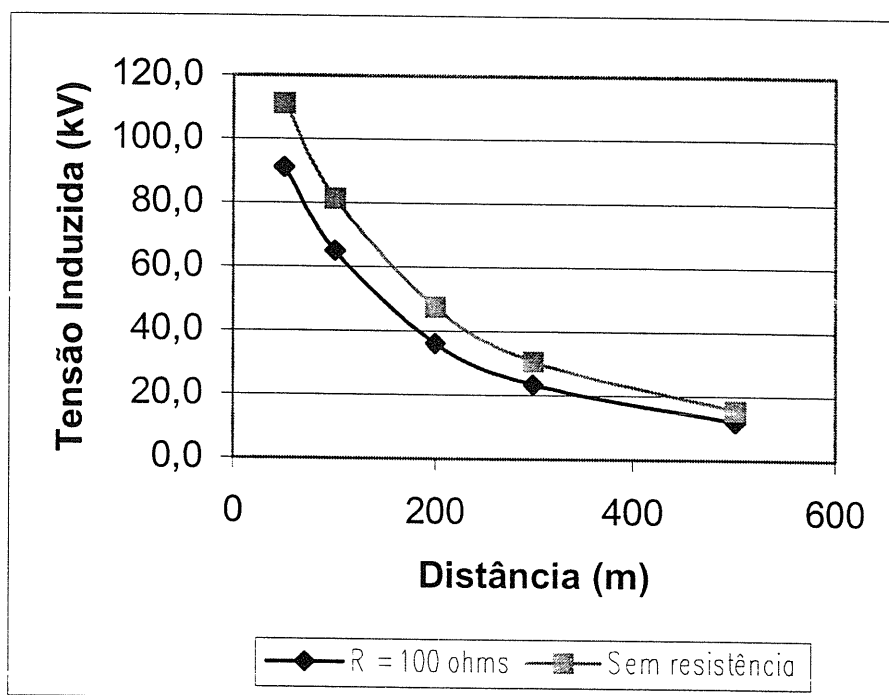


Figura 6.45 - Influência do Ponto de Incidência

Neste capítulo a teoria de Rusck foi aplicada em três configurações diferentes de linha, onde os principais parâmetros que influenciam as características da forma de onda da tensão induzida foram avaliados. Pode-se constatar, pelos resultados obtidos que a teoria de Rusck é uma metodologia consistente e de fácil utilização, pois os parâmetros utilizados são obtidos diretamente pela configuração do sistema e pelas características da descarga atmosférica.

Os resultados das comparações quanto aos principais aspectos da forma de onda, tais como, tempo de frente, tempo de cauda, amplitude de pico e comportamento diante da variação dos parâmetros da descarga, entre as formas de onda medidas e simuladas, mostrou que a metodologia Rusck-EMTP é um método robusto para estudos de tensão induzida.

## **Capítulo 7**

# **CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE DO TRABALHO**

### ***7.1-Considerações Finais***

Pelo que foi apresentado pode-se concluir que o objetivo básico do trabalho, a implementação da teoria de Rusck no programa computacional EMTP foi alcançado, resultando no desenvolvimento de uma metodologia onde se estudou tensões induzidas em linhas elétricas constituída de dois condutores na configuração vertical com a presença dos equipamentos da rede elétrica.

Os resultados obtidos com a implementação da metodologia Rusck-EMTP, quando comparados com resultados de medições apresentaram boa concordância, considerando os aspectos de amplitude e forma de onda.

Considerando os aspectos do modelo implementado, temos a observar a influência de alguns aspectos nos resultados obtidos. Inicialmente tem-se a segmentação da linha, pode-se constatar que segmentos cujos comprimentos estivessem contidos entre a metade do valor da distância do ponto de incidência à linha e o seu respectivo dobro, causavam pouca alteração na amplitude e forma de onda da tensão induzida. Mas para segmentos que ultrapassavam estes limites ocorriam variações na amplitude e forma da onda de tensão induzida. Quanto ao passo de integração, observa-se uma pouca influência na amplitude e forma de onda da tensão induzida. A plataforma utilizada mostrou-se versátil para a implementação deste modelo, sendo um programa já testado ao longo de décadas, de boa acessibilidade e de grande aceitação por parte da comunidade científica.



Consideramos, além disso, como um resultado marginal do trabalho, que poucas modificações seriam necessárias para que a implementação desenvolvida fosse transformada em uma versão profissional de amplo uso.

Pelo exposto fica demonstrado que a tensão induzida na linha é diretamente proporcional à amplitude de pico da corrente da descarga atmosférica. Nas simulações fica claro a influência da distância do ponto de incidência da descarga atmosférica nos valores de tensão induzida, quanto maior a proximidade do ponto de incidência maiores os valores de tensão induzida.

A velocidade de propagação da corrente no canal tem influência na amplitude da forma de onda. Observa-se uma tendência de redução da amplitude com a elevação da velocidade de propagação. Outro fato observado é a modificação significativa dos tempos de frente e de cauda das formas de ondas da tensão induzida com a elevação da velocidade de propagação.

O parâmetro do tempo de frente da corrente, para tempos da ordem de poucos microssegundos provoca uma alteração mais significativa na taxa de crescimento da tensão induzida, não alterando muito as amplitudes. Tempos de frente maiores produzem variações significativas na amplitude e forma de onda da tensão induzida para linha.

O tempo de cauda da corrente de descarga mostrou que para valores médios, isto é, valores da ordem de algumas dezenas de microssegundos, a sua influência é de pouca importância, mas para tempos de cauda pequeno sua influência pode ser significativa na determinação da forma de onda da tensão induzida.

Por fim, deve-se destacar que a integração desta importante teoria de Rusck no conceituado e largamente utilizado programa computacional de transitórios eletromagnéticos–EMTP constituiu-se numa importante aplicação que pode se estender para toda a área de sistemas de energia.

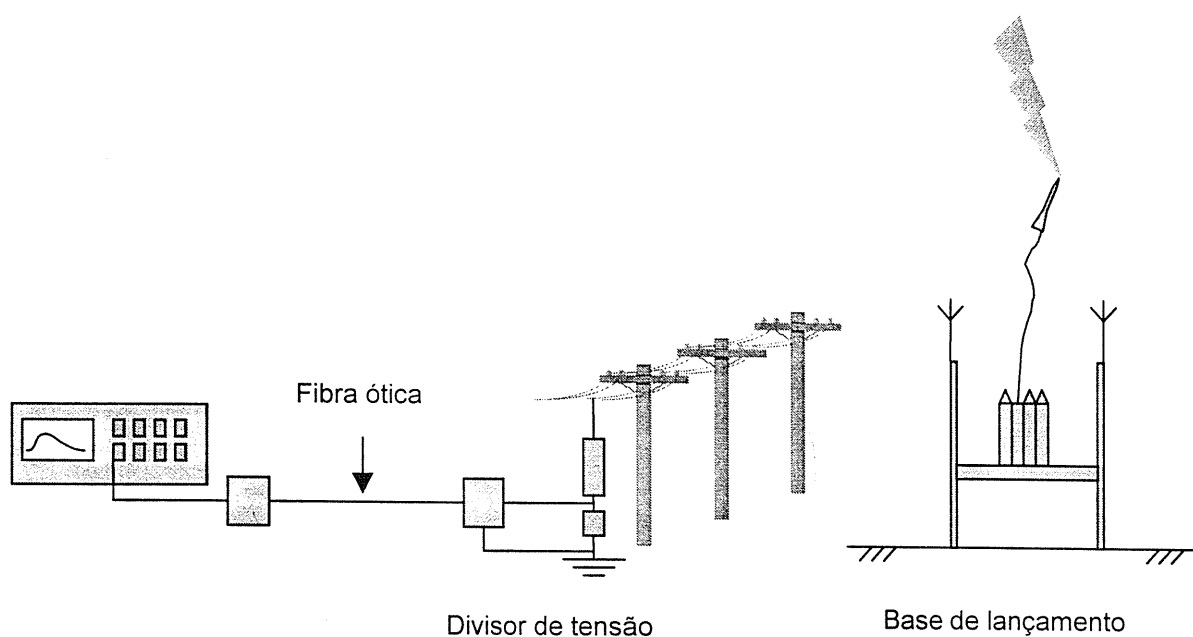
## ***7.2-Propostas de Trabalhos Futuros***

Com a possibilidade de utilização da Estação Experimental de medição de Descargas Atmosféricas Forçadas em Cachoeira Paulista poderá explorar mais o modelo com a ampliação da gama de dados experimentais tais como:

---

- Medição de tensões induzidas em cabos e linhas aéreas situados nas proximidades do ponto de incidência das descargas atmosféricas.

A proposta é montar um trecho de linha de distribuição, desenergizada, nas proximidades da base de lançamento e realizar a medição das tensões induzidas nos cabos (fase e neutro). A figura a seguir ilustra o experimento proposto.



-Com este experimento poderá se obter dos tempos de frente, de cauda e amplitude de pico diretamente da medição para as correntes de descargas e tensões induzidas para nossas condições climáticas.

-Poderão ser realizadas medições em linhas com ângulos.

-Pode-se realizar a medição em circuitos secundários de baixa tensão experimentais, para que possam representar a entrada de residências e outros consumidores. Bem como a aplicação de protetores e carga para observar o comportamento das tensões induzidas e comparar com o modelo implementado. Com o objetivo de estudar tensões induzidas em equipamentos eletrônicos sensíveis.

-Pode-se realizar medições em circuito com transformador e pára-raios.

A elaboração de uma interface mais amigável da metodologia Rusck-EMTP.

Nos casos estudados por este trabalho foram observadas apenas as tensões fase-neutro induzidas no meio da linha, para a montagem experimental do EPRI, fica como sugestão estudo das tensões induzidas nas extremidades da linha.

## BIBLIOGRAFIA

Agrawal, A.K.; Price, H.J.; Gurbaxani, S.H., Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.22, n.2, p119-129, May 1980.

Anderson, R. B.; Eriksson A. J. Lightning Parameters for Engineering Application, Electra, nº 69, 1980 pag 65-102.

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.

Barker, P.P., Mancao, R.; Kvaltine, D.J.; Parrish, D. E. Characteristics of Lightning Surges Measured at Metal Oxide Distribution Arresters, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, n 1, January, 1993..

Barker, P.P., Short,, T.A .,Eybert-Berard, A.R., Berlandis, J. P., Induced voltage measurements on na experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.11,n 2, April, 1996.

Berger, Gérard.; Lightning Phenomena, III Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas. III SIPDA 5-9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.

Boaventura, W. C. Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas em Modelo Reduzido. dissertação de mestrado do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.

Borghetti, A.; Iorio, R.;Nucci, C.A.; Pelacchi, P. Calculation of Voltages Induced by Nearby Lightning on Overhead Lines Terminated on Distribution Transformers. International Conference on Power Systems Transients – IPST'95 – Lisbon, 3-7 September, 1995.

Budner, A. Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-89, n<sup>o</sup> 1, January, 1970.

CEMIG 02.111-EG/PA1-3015-Proteção de Surtos em Linhas de Distribuição – Quinze Anos de Experiência de Campo e Estudos de Laboratório,.

Cinieri, E.; Muzi, F., Lightning Induced Overvoltages. Improvement in Quality of Service in MV Distribution Lines by Addition of Shield Wires, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, n 1, January, 1996.

Cooray, V., De la Rosa, F., Shapes and amplitudes of the initial peaks of lightning-induced voltage in power lines over finitely conducting earth: theory and comparison with experiment, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol AP-34, n1, January, 1986.

Cooray, V. e Scuka, V. Lightning-Induced overvoltage in power lines: validity of various approximations made in overvoltage calculations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40. N 4. November 1998.

Correia de Barros, M.T.; Festas, J.; Almeida, M.E. Lightning Induced Overvoltages on Multiconductor Overhead Lines. International Conference on Power Systems Transients – IPST'99 – Budapest, 20-24 June, 1999.

D'Ajuz, Ary, Transitórios Elétricos e Coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão, Rio de Janeiro, FURNAS, Niterói, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987, 435p.

Diendorfer Gerhard, Induced Voltage on an Overhead Line Due to Nearby Lightning, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 32. N 4. November 1990.

Dommel, H.W., "EMTP Theory Book", Second Edition, Microtran, 1996.

Eriksson, A.J.; Stringfellow, M.F.; Meal, D.V. Lightning – Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, n 4, April, 1982.

Fisher, R. J.; G. H. Schnetzer, R. Thottappillil, V. A. Rakov, M.A. Uman and J. D. Goldberg, "Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama," *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, nº D12, December 20, 1993, pp. 22,887-22,902.

Fofana, I.; Bérroual, A. Induced Effects on an Overhead Line Due to Nearby Positive Lightning Downward Leader. *Electric Power Systems research*, nº 48, pages 105-119, 1998.

FONSECA, ALMIR FÉLIX LORENZATO DA. CÁLCULO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO E ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. dissertação de mestrado do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. 1990.

Greenwood, A, *Electrical transients in power systems*. John Wiley & Sons-Inc, New York, 1992

Haldar, M.K.; Liew, A.C. Alternative Solution for the Chowdhuri-Gross Model of Lightning-Induced Voltages on Power Lines. IEE Proceedings, Vol.135, PTC, n<sup>o</sup>4, July, 1988.

Hamelin, J.G., Djebari, B., Barreau, R. e Fontaine, J., Electromagnetic Field Resulting from a Lightning Discharge, Surges Induced on Overhead Lines, Mathematical Model, Proc.Int. Symp. On Electromagnetic Compatibility, Rotterdam, May, 1979.

Hirse, S.; Heidler, F.; Sensitivity Analysis for Different Return Stroke Models. Ninth International Symposium on High Voltage Engineering - 9<sup>th</sup> ISH, August 28- September 1 Austria, 1995.

Høidalen, H. Kr., Sletbak, J. e Henriksen, T., Ground effects on induced voltages from nearby lightning, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39. N 4. November 1997.

Ishii, M.; Michishita, K.; Hongo, Y. Experimental Study of Lightning-Induced Voltage on an Overhead Wire Over Lossy Ground. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 41. N 1. February 1999.

Jordan, D. M.; V. P. Idone, V. A. Rakov, M. A. Uman, W. H. Beasley and H. Jurenka, "Observed dart leader speed in natural and triggered lightning," *Journal of Geophysical Research*, vol. 97, n<sup>o</sup> D9, June 20, 1992, pp. 9951-9957.

Le Vine, D. M.; J. C. Willett and J.C. Bailey, "Comparison of fast electric field changes from subsequent return stroke of natural and triggered lightning," *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, n<sup>o</sup> D11, September 30, 1989, pp. 13,259-13,265.

Leteinturier, C.; C. Weidman, J. Hamelin and M. Le Boulch "The phenomenology of natural and triggered thunderstorm discharges," International Conference on Lightning and Power Systems, London, England, June 5-7, 1984.

Lin, Y. T.; Uman, M.A.; Standler, R. B.; Lightning Return Stroke Models. *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, n<sup>o</sup> C3, pages 1571-1583, March, 20, 1980.

LOPES, IVAN JOSÉ SILVA. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONDUTOR MULTITERRADO FRENTE A TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. dissertação de mestrado do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. 1990

Mach, D.M.; David Rust W. Photoelectric Return-Stroke Velocity and Peak Current Estimates in Natural and Triggered lightning. *Journal of geophysical Research*, vol.94,n<sup>o</sup> D11, Pages 13,237-13,247, September 30, 1989.

Marti, J.R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Line in Electromagnetic Transient Simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-101, nº 1, January, 1982.

Master, M. J.; Uman, M. A.; Beasley, W. Lightning Induced Voltage on Power Lines: Experiment. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-103, nº 9, September, 1984.

Master, M.J.; Uman, M.A.; Beasley, W.H.; Darveniza, M. Voltages Induced on an Overhead Line by the Lightning Stepped Leader, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-28. N 3. August 1986.

Miranda, Glássio Costa. Uma Contribuição ao Estudo do Efeito Corona em Linhas de Transmissão Utilizando o Método de Elementos Finitos. Tese de Doutorado da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de 1994.

Meyer, W.S.; Dommel H.W. Numerical Modelling of Frequency-Dependent Transmission Line Parameter in an Electromagnetic Transients Program. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-99, January/February, 1970.

Microtran Power System Analysis Corporation, *Transients Analysis Program Reference Manual*, Vancouver, Canada, 1991.

Mirra C., Porrino, A., Ardito, A. e Nucci, C. A.; *Lightning Overvoltages in low voltage Networks*, CIRED-97, Conference Publication n 438, 2-5 June, 1997.

Naidu, S. R., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Campina Grande, Editora GRAFSET, 1985, 316p.

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*. Vol,95, nº d12, November 20, 1990

Nucci, Carlo Alberto ; Rachidi, Farhad; Ianoz, Michel V. e Mazzetti Carlo. Lightning; *Induced Voltages on overhead lines*, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35. N 1. February, 1993.

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*, September 13-16, 1994, Rome, Italy.

Nucci, C. A., Bardazzi, V.; Iorio, R.; Mansoldo, A.; Porrino, A. A Code for the Calculation of Lightning-Induced Overvoltages and its Interface with the Electromagnetic Transient Program, *International Conference on Lightning Protection*, nº R3b-05, pages 1-7, Budapest, 1994b.

Nucci, C.A.; Working Group 33.01 (Lightning) ; Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part I: Return - Stroke Models with Specified Channel-Base Current for the Evaluation of the Return-Stroke Electromagnetic Fields; ELECTRA, nº 161, August ,1995.

Nucci, C.A.; Task Force 33.01.01 (Lightning induced voltages) of Study Committee 33; Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines, Part II: Coupling Models for the Evaluation of the Induced Voltages; ELECTRA, nº 162, October ,1995.

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.

Nucci, C. A.; Rachidi, F.; Lightning -Induced Overvoltages; IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session “Distribution Lightning Protection”, New Orleans, April 14,1999.

Paulino, José Osvaldo Saldanha. Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes Elétricas: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP: Estudo da Influência das Perdas na Linha, Monografia para Concurso de Professor Titular na UFMG, 1994.

PAULINO, JOSÉ OSVALDO SALDANHA. UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA PROTEÇÃO DE REDES ELÉTRICAS CONTRA TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS., tese de doutorado apresentada à faculdade de engenharia elétrica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP – 1994a

PAULINO, JOSÉ OSVALDO SALDANHA. TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM REDES ELÉTRICAS: IMPLEMENTAÇÃO DA TEORIA DE RUSCK NO EMTP; ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PERDAS NA LINHA., tese apresentada como requisito parcial para a participação em concurso público para o cargo de professor titular do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. 1994b

Piantini, A.; Janiszewski, J. M.; Modelo Reduzido de Linha Aérea para Estudo de Sobretensões Induzidas. Eletricidade Moderna, Dezembro, 04 pags.1993.

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 de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1997.

PORTO, EUDES WEBER. CÁLCULO DE SOBRETENSÕES EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS LATERAIS. dissertação de mestrado do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. 1990



Rachidi, F., Nucci, C. A., Ianoz, M. V.; Mazzetti C. Influence of a Lossy Ground on Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38. N 3, August, 1996.

Rachidi, Farhad, Nucci, Carlo Alberto, Ianoz, Michel V. e Mazzetti Carlo. Response of multiconductor power lines to nearby lightning return stroke electromagnetic fields, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12. N3. July, 1997.

Rachidi, F.; M. Rubinstein, S. Guerrieri and C. A. Nucci, "Voltages induced on overhead lines by dart leaders and subsequent return strokes in natural and rocket-triggered lightning," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, n° 2, May, 1997b, pp. 160-166.

Rakov, Vladimir A.; Uman, Martin A.; Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects os Their Application. *IEEE Transactions os Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, n° 4, November, 1998.

Rakov, V.A. Lightning Discharges Triggered Using Rocket-and-Wire Techniques. *Recent Res. Devel. Geophysics*, 2 (1999), page 141-171.

Rakov, V.A. Positive and Bipolar Lightning Discharge: A Review – International Conference on Lightning Protection – ICLP-2000, Greece, 2000

Rusck.S., "Induced Lightning Over-voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to Over-voltage Protection of Low Voltage Network." Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1957.

Schroeder, M.A.O.; Filho. S. V.; Cherchiglia, L.C.L.; Diniz, J.H. Evaluation of Directly Measured Lightning Parameters. *V International Symposium on Lightning Protection – V SIPDA*, São Paulo, Brazil, pp. 07-11, 1999

Silfverskiöld, S.; Thottappillil, R.; Cooray, V.; Scuka, V. Induced Voltages in a Low-Voltage Power Installation Network Due to Lightning Electromagnetic Fields: Na Experimental Study.. *IEEE Transactions os Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, n° 3, August, 1999.

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*, São Paulo, Brazil, pp. 225-228, 1999

Stringfellow, M.F. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines. *Internacional Conference on Lightning and Power Systems- IEE Conference Publication*, n° 236, 5-7 June, 1984.

---

Triginelli, Wagner 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 - III SIPDA. 5-9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.

Uman, M. A., Krider, E. Philip, *A review of natural lightning: experimental data and modelling. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-24. N<sup>o</sup> 2. May, 1982.*

Uman, Martin A.; *Lightning, Dover Publications, Inc. New York. 300 pag. 1984.*

Uman, Martin A.; *Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test Standards, Proceedings of the IEEE, vol.76, n<sup>o</sup> 12, December 1988.*

Uman, Martin A.; *Natural Lightning, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.30, n<sup>o</sup> 3, May/June 1994.*

Yokoyama, S. Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-103, n<sup>o</sup> 1, January, 1984.*

Yokoyama, S.; Yamamoto, K. Kinoshita, H., Analogue Simulation of Lightning Induced Voltages and its Application for Analysis of Overhead-Ground -Wire Effects. *IEE Proceedings, vol.132, Pt. C., n 4, July 1985.*

Yokoyama, S; Miyake, K., Mitani, H, Yamazaki, N. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines, *IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRD-1, n<sup>o</sup> 2, pp129-139, April 1986.*

---

---

# **Centro Internacional de Pesquisas em Descargas Atmosféricas - CIPDA**

Período: 2000/2001  
Cachoeira Paulista - SP

---

# SUMÁRIO

**1- HISTÓRICO**

**2- DESCRIÇÃO DAS MONTAGENS**

**3- ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS**

**4- MEDIÇÕES REALIZADAS**

**5- EQUIPE**

## 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.

Este relatório descreve as atividades desenvolvidas durante a execução desta montagem experimental e os resultados obtidos no período de 2000/2001.

## 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.

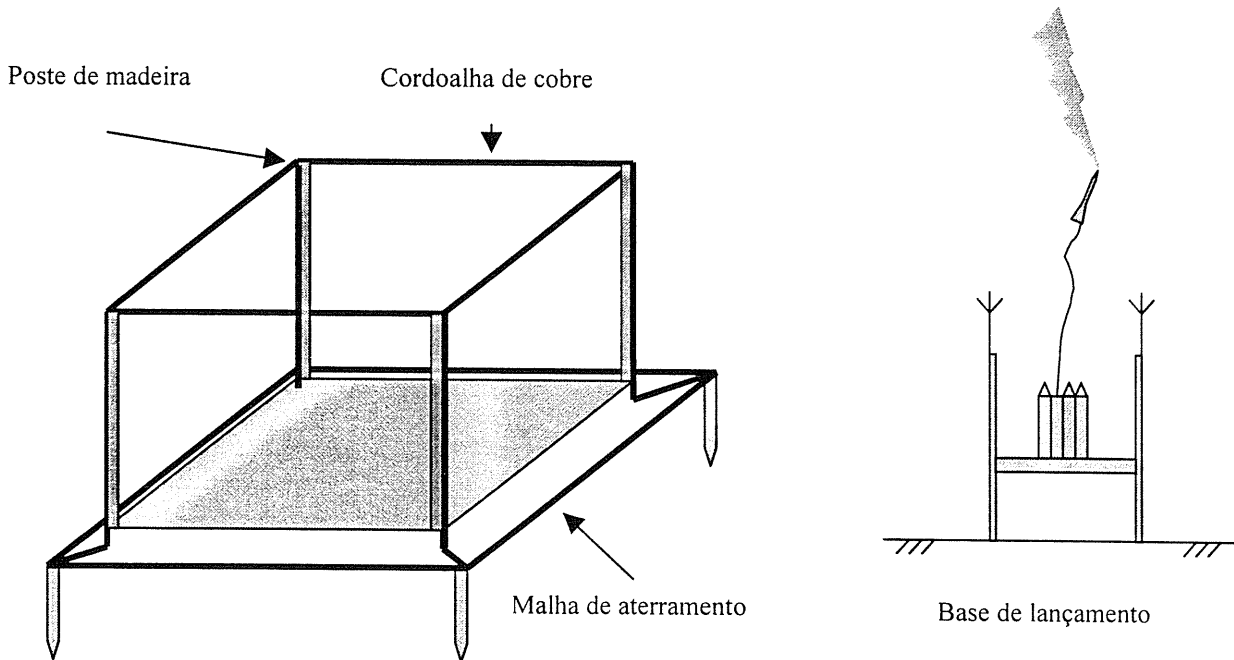


Figura 1 – Arranjo do SPDA.

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.

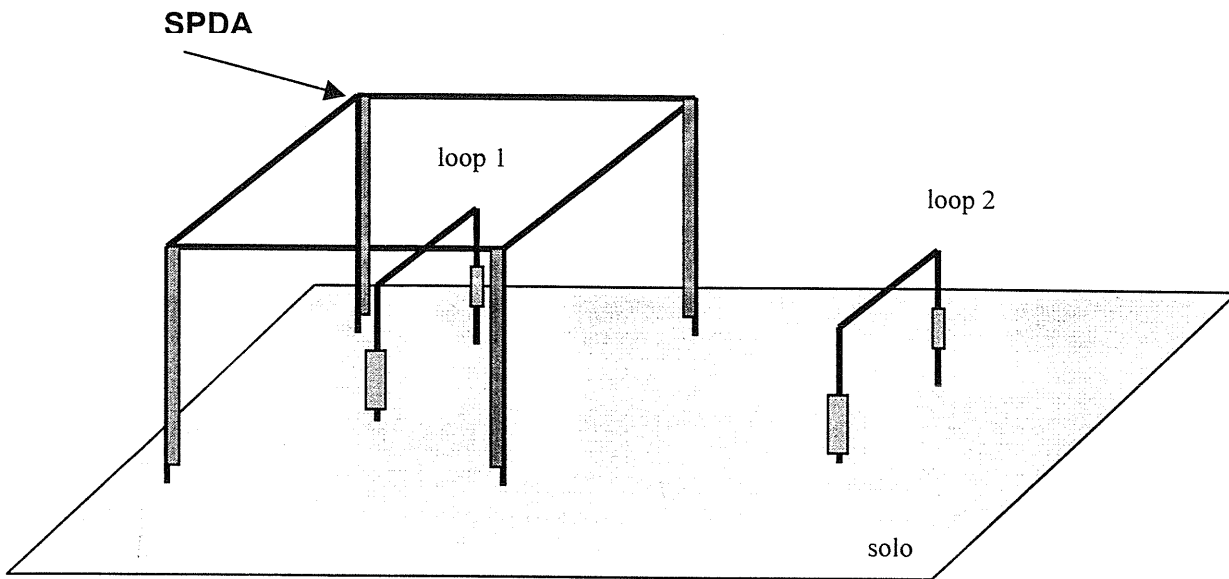


Figura 2 – Disposição dos dois “loops” para medição de tensão induzida.

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.

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

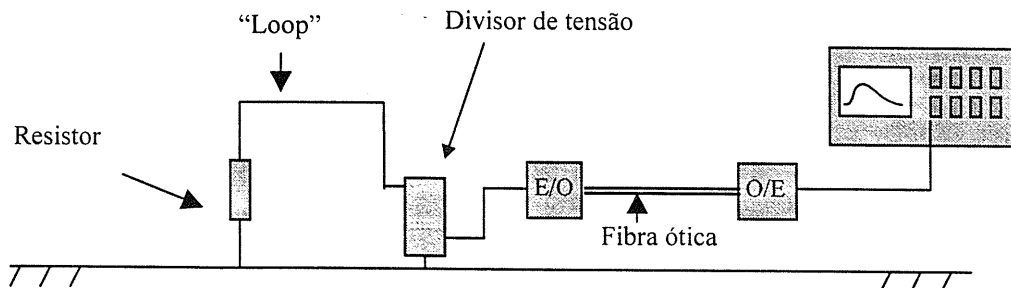
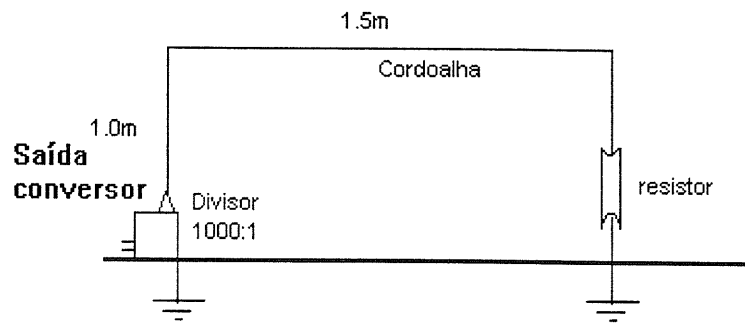
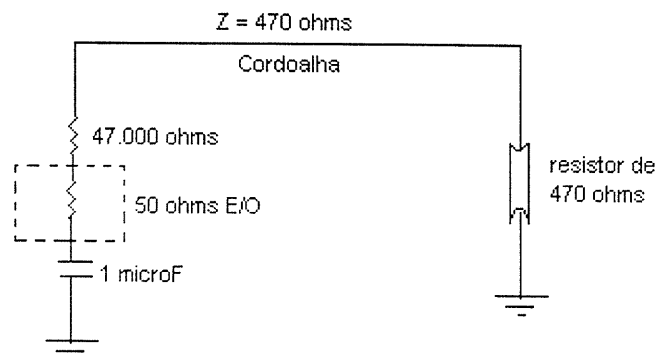


Figura 3 – Sistema de medição



(a)



(b)

Figura 4 – Características dos sistemas de medição:  
 (a) Configuração Esquemática dos "loops" 1 e 2;  
 (b) Configuração Elétrica dos "loops" 1 e 2.

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-TELEBRAS 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".

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



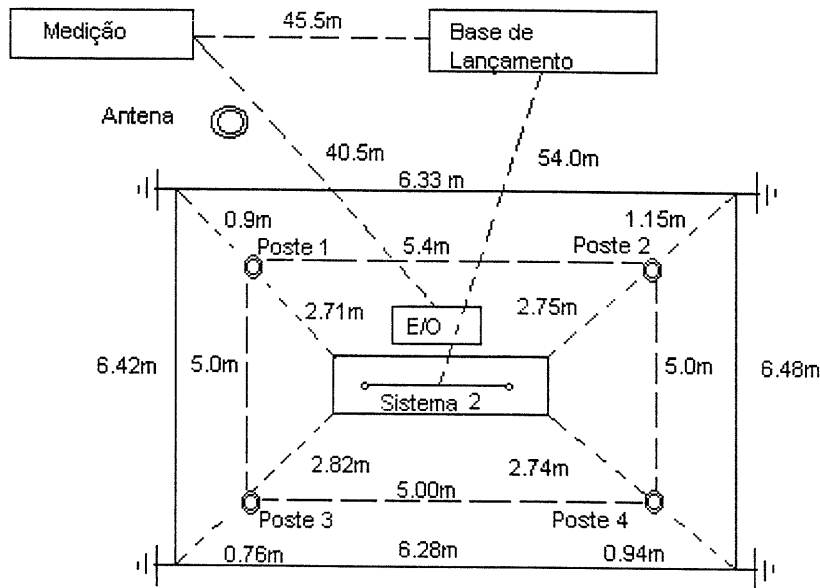


Figura 5 - Posicionamento do sistema 1, com a blindagem por cordoalha de cobre estanhado

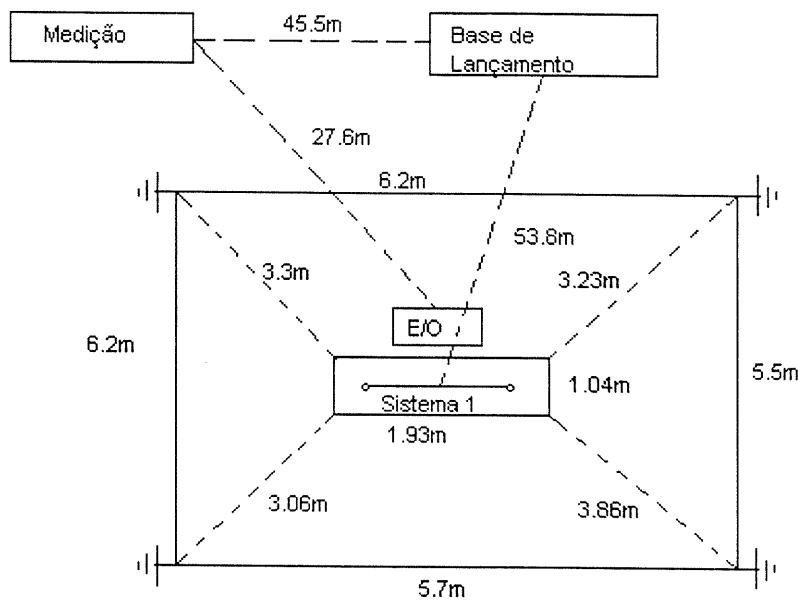


Figura 6 - Posicionamento do sistema 2, sem a blindagem por cordoalha

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.

### 3 - ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

#### 3.1 - Captor de Tensão TSN 245 V30 - THOMSON –CSF

Este dispositivo mede os valores de tensão incidente em um equipamento em teste e transmite esta tensão à distância por intermédio de fibra ótica, sem sofrer perturbações eletromagnéticas do meio ambiente.

##### *Características Elétricas:*

Gama de Medição Telecomandada: 10mV até 31,6V.

Número de Calibrações: 8, de 10 dB em 10dB

Precisão dos Calibres:  $\pm 0,5$ dB

Características da Entrada:  $1M\Omega/20pF$

Banda Passante a 3 dB: 200Hz à 150MHz

Configurações

Capteur	Sous-Capteur	Filtre	Comm & Contr
V400	CH4	160	S10 - 50V
			S15 - 28,1V
			S20 - 15,8V
			S25 - 8,89V
			S30 - 5V
			S35 - 2,81V
			S40 - 1,58V
			S45 - 889 mV
			S50 - 500mV
			S55 - 281mV
			S60 - 158mV
			S65 - 88,9mV
			S70 - 50mV
			S75 - 28,1mV

#### 3.2 - Osciloscópios

##### Osciloscópio Lecroy 9314M – Quad 300MHz

- 100Ms/s - 50 Kpts/CH – 04 Canais
- Utilizado para adquirir as tensões provenientes dos sistemas 1 e 2, corrente do shunt, “tensão” da antena de campo elétrico e sinal de disparo.

**Medições realizadas:**

- CH1 – corrente em 10 seções (100ms)
- CH2 – sistema 1
- CH3 – sistema 2
- CH4 – “tensão” da antena de campo elétrico

**Osciloscópio Lecroy 9314<sup>A</sup> – QUAD 400MHz**

- 100Ms/s – 50 Kpts/CH – 04 Canais
- Utilizado para adquirir a corrente total em uma base de tempo de 1s proveniente e sinal de luz.

**Medições realizadas**

- CH1 – corrente total
- CH2 – sinal de luz

**3.3 - Computador**

- Notebook Toshiba AMD K6-2 – 475 MHz
- Modelo Satellite 2180 CDT

**3.4 - Antena de Campo Elétrico**

$$R = 1 \text{ M}\Omega$$

$$C = 22 \text{ }\mu\text{F}$$

$$RC = 22 \text{ ms}$$

$$V_s = 10 \text{ V}$$

$$E = 126 \text{ kV/m}$$

## 4 - MEDICÕES REALIZADAS

No período de 2000-2001, foram iniciados o projeto e a montagem do experimento. Até o início de 2001, foram realizados vários testes na montagem e nos sistemas de medição, a metodologia de calibração dos sistemas de medição foi estabelecida e os valores das constantes para a determinação dos valores de tensão induzida foram determinadas. O cálculo da constante do sensor de campo, determina a relação entre o valor da tensão medida pelo osciloscópio e o valor do campo elétrico gerado pela descarga.

Um exemplo da medição de campo elétrico gerado por uma descarga atmosférica natural realizada com o sensor de campo é indicada nas figuras 5 e 6.

### Medição de Campo Elétrico

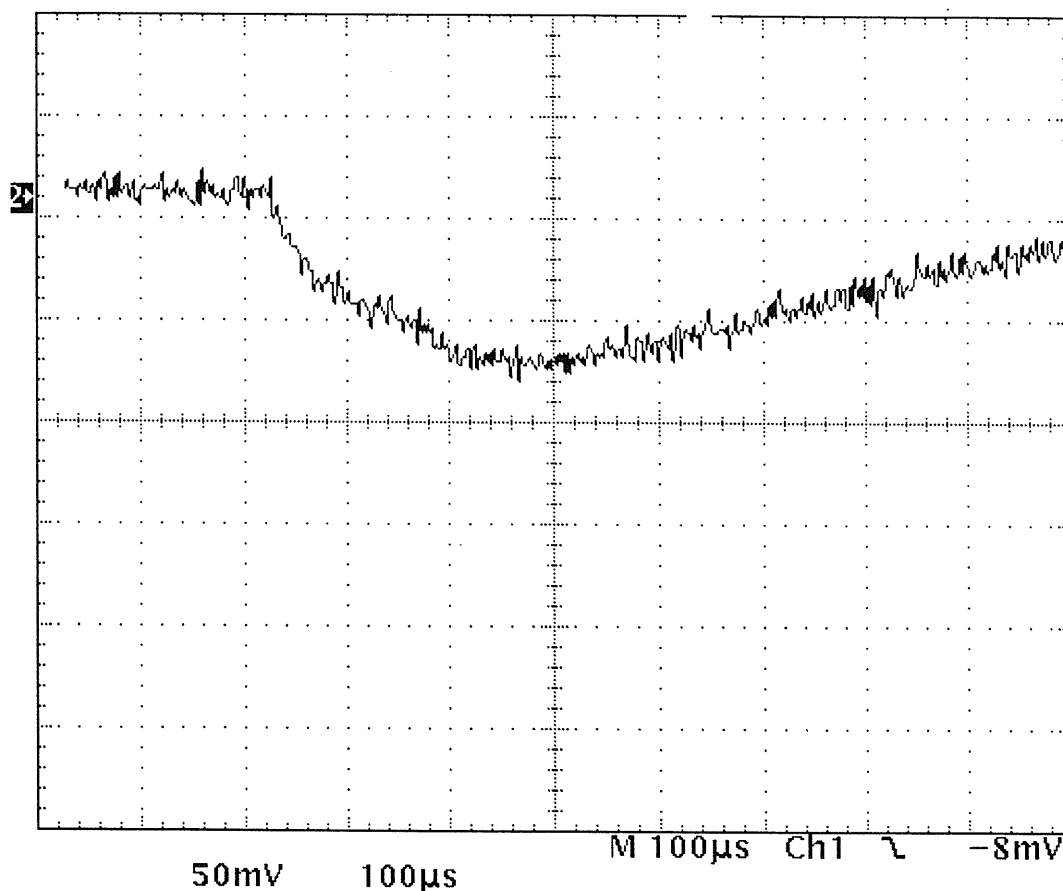


Fig.5 – Medição de Campo Elétrico obtida para uma Descarga Atmosférica natural nas proximidades do campo de testes.

## **6 - EQUIPE**

### **Centro de Pesquisas de Energia Atômica da França-CEA-França**

Dr. André Eybert-Berard

Coordenador Geral da Campanha e Diretor dos Lançamentos

Criador do método de captura de Raios Naturais

### **INDELEC- França**

Eng. Bernard Lambin e Pascal Boilloz

Responsáveis pelos sistemas elétricos e eletrônicos franceses e criadores do Prelectron.

### **INDELEC- Brasil**

Eng. Luis Fernando

Eng. Hélio Luis Blauth

Pesquisadores de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

### **HYDRO-QUEBEC – Canada**

Eng. Carl Potvain e André

Responsável pela monitoração de descargas atmosféricas com câmeras de alta velocidade.

Pesquisador de sistema de proteção contra descargas atmosféricas utilizando raio laser.

### **INPE – Brasil**

Dr. Osmar Pinto Júnior

Coordenador do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT).

### **UNICAMP – Brasil**

Dr. José Pissolato Filho

Responsável pela monitoração de longa duração da descarga atmosférica e responsável pelo intercâmbio Brasil - França.

Coordenador do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da FEEC da UNICAMP.

**UFMG – Brasil**

Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino

Responsável pelas medições de tensões induzidas em sistemas elétricos.

***Equipe de UFMG:***

Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Prof. Glassio Costa de Miranda

Alunos de Doutorado: Joaquim Paulo da Silva – UFLA, Tarcisio Antônio Santos de Oliveira – CEFET – MG, Marisa Lages Murta e Moacir de Souza Jr.

Alunos de graduação: Rafael, Flavia, Francisco e Italo.