

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS.
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO
TÉCNICAS DE MODELO REDUZIDO.

ALUNO : Wallace do Couto Boaventura

ORIENTADORES : JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO
BENJAMIM RODRIGUES DE MENEZES

Belo Horizonte - 1990.

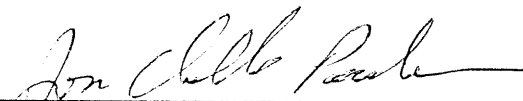
"ESTUDO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO
TÉCNICAS DE MODELO REDUZIDO."

ENG.º WALLACE DO COUTO BOAVENTURA

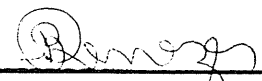
Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em 22 de Junho de 1990.

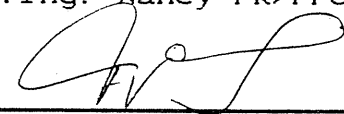
Banca examinadora:



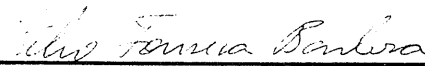
José Osvaldo Saldanha Paulino (Orientador)
Ms.C. CPGEE-UFMG/Prof. do CPGEE-UFMG



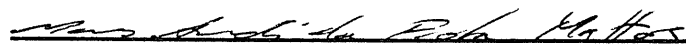
Benjamin Rodrigues de Menezes (Orientador)
Dr. Ing. Nancy-FR/Prof. do CPGEE-UFMG



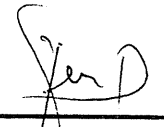
Flávio Henrique Vasconcelos
Ms.C. CPGEE-UFMG/Prof. do DEE-UFMG



Célio Fonseca Barbosa
Ms.C. CPGEE-UFMG/Eng.º CPqD-TELEBRÁS



Marcos André da Frotta Matos
Ph.D. Univ. Nottingham-Inglaterra/Prof. UNICAMP-SP



José Pizzolato Filho
Dr. Univ. Paul Sabatier-FR/Prof. UNICAMP-SP

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela orientação, pelas valiosas discussões e pelo permanente incentivo;

Aos colegas Almir, Ivan, Paulo Henrique e Eudes pelas imprescindíveis e valiosas discussões e sugestões;

Ao professor Thales Lúcio de Sá Teixeira e ao colega Eudes pelo auxílio nas montagens e medições;

Aos colegas e professores do Curso de Pós-Graduação e em especial ao professor Benjamim Rodrigues de Menezes;

A todo o pessoal do Laboratório de Extra Alta Tensão;

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD / Telebrás, em especial ao engenheiro Célio Fonseca Barbosa, pelo suporte financeiro para a realização deste projeto;

A minha família pelo carinho e apoio;

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A meus pais, Abadia e Antônio

RESUMO

Atualmente estima-se que as descargas atmosféricas sejam responsáveis por grande parte dos danos e interrupções de serviços em redes de telefonia e de distribuição de energia elétrica. As descargas atmosféricas laterais, embora originem sobretensões de amplitude menor do que as causadas por descargas que incidem diretamente na linha, ocorrem com maior frequência e seu efeito é tanto mais crítico quanto menor for o nível básico de isolamento (NBI) do sistema, como é o caso das redes de telefonia e de distribuição.

O fenômeno da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas laterais apesar de ser estudado a várias décadas ainda não se chegou a um consenso a respeito da forma de interação dos campos eletromagnéticos gerados pela descarga atmosférica e a linha. Atualmente existe mais de uma teoria que possibilita o cálculo da tensão induzida em uma linha aérea causada por descargas atmosféricas laterais. Um ponto de divergência básico entre estas teorias é a consideração ou não da resistividade do solo, se o efeito desta seria conservativo ou não. No sentido de se verificar a validade de uma destas teorias, bem como procurar um caminho para o esclarecimento da influência da

resistividade no fenômeno, optou-se por uma investigação básica possibilitada pela realização da simulação analógica do fenômeno através de modelos reduzidos.

Nesse sentido foi construído um modelo reduzido em escala 1:200 para estudo do fenômeno. Foram modelados o canal de descarga, a corrente de retorno, o plano de terra e a linha aérea (representativa tanto de redes de telefonia quanto de redes de distribuição de energia elétrica). O plano de terra foi inicialmente modelado como um plano ideal, condutividade infinita, para o qual utilizou-se chapas de cobre. O estudo da influência da resistividade do solo no fenômeno foi feito mediante a implementação do mesmo modelo sobre um solo real. Devido ao elevado fator de escala utilizado, as medições realizadas situaram-se na faixa de nanosegundos. Desse modo, foi utilizada uma técnica específica desenvolvida para a realização de tais medições. As características gerais necessárias a um sistema de medição para tal finalidade, bem como as características específicas dos equipamentos de medição utilizados, são descritas e discutidas.

A comprovação de uma das teorias acerca do fenômeno da tensão induzida por descargas atmosféricas, a qual não considera a resistividade do solo, uma avaliação

preliminar da influência da resistividade do solo na amplitude e forma de onda da tensão induzida e também o domínio da técnica de modelos reduzidos são resultados deste trabalho.

ABSTRACT

This work is concerned with the development and implementation of a 1/200 scale reduced model for lightning induced voltage study in overhead lines. The modeling used for the discharge channel, return stroke, overhead line and ground are presented. It's presented the measuring methodology used as well. The validity of S. Rusck's induced voltage theory is supported by the measurements done. Regarding the effects of the soil resistivity in the lightning induced voltage, it has been shown that its study can be performed by using reduced models. A preliminary evaluation of soil resistivity effects on the induced voltage amplitude and waveform is presented.

SUMÁRIO

	Página
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Estrutura do Trabalho	4
<u>CAPÍTULO 2 - A DESCARGA ATMOSFÉRICA</u>	6
2.1 - Introdução	6
2.2 - A Formação do Canal de Descarga	8
2.3 - A Corrente de Retorno	9
2.4 - As Descargas Subseqüentes	10
2.5 - Variações da Descarga Atmosférica	12
<u>CAPÍTULO 3 - A TEORIA DE RUSCK PARA A TENSÃO</u> <u>INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</u>	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - A Teoria de Rusck	18
3.3 - O Questionamento da Teoria de Rusck	24

<u>CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DO MODELO REDUZIDO IMPLEMENTADO</u>	26
4.1 - Introdução	26
4.2 - A Dimensão Física do Modelo Reduzido	28
4.3 - O Plano de Terra	31
4.4 - O Canal de Descarga	40
4.5 - A Corrente de Retorno	44
4.6 - A Linha	56
4.7 - Localização Física das Partes do Modelo	63
4.8 - O Modelo Reduzido em Solo Real	65
<u>CAPITULO 5 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO UTILIZADO</u>	77
5.1 - Introdução	77
5.2 - Características Técnicas do Sistema de Medição ..	79
5.2.1 - Osciloscópio	79
5.2.2 - Ponta de Prova para Medição de Tensão	80
5.2.3 - Ponta de Prova para Medição de Corrente ...	81
5.2.4 - Câmera Fotográfica	81
5.3 - Localização dos Equipamentos do Sistema de Medição	82
5.3.1 - Medição da Onda de Corrente no Canal de Descarga	82
5.3.2 - Medição de Campo Elétrico	83
5.3.3 - Medição de Tensão Induzida	85
5.4 - Simulação do Sistema de Medição	87

<u>CAPÍTULO 6 - APRESENTAÇÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS</u>	92
6.1 - Introdução	92
6.2 - Grupo de Medições N.º 1	94
6.3 - Grupo de Medições N.º 2	113
6.4 - Grupo de Medições N.º 3	117
6.5 - Grupo de Medições N.º 4	122
6.6 - Grupo de Medições N.º 5	125
6.7 - Grupo de Medições N.º 6	131
<u>CAPÍTULO 7 - ALTERNATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DA</u> <u>INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO</u> <u>NO FENÔMENO DA TENSÃO INDUZIDA</u>	137
7.1 - Introdução	137
7.2 - Tanque Eletrolítico	138
7.3 - Papel Resistivo	140
<u>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÃO</u>	142
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	145

NOMENCALTURA

$$Z_0 = \frac{1}{4 \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30 \text{ Ohms} - \text{impedância intrínseca do canal da descarga;}$$

I_0 \Rightarrow valor de pico da corrente de descarga (kA);

h \Rightarrow altura do condutor (m);

v \Rightarrow velocidade de propagação da corrente de retorno (m/ μ s);

v_0 \Rightarrow velocidade da luz (m/ μ s);

t \Rightarrow tempo, tomando-se como referência o instante em que tem início a corrente de retorno (μ s);

$\beta = v/v_0$;

x \Rightarrow distância ao longo da linha entre o ponto onde se calcula a tensão induzida e o ponto da linha mais próximo do ponto de incidência da descarga (m);

y \Rightarrow menor distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga (m);

μ_0 \Rightarrow permeabilidade magnética do espaço livre (H/m);

ϵ_0 \Rightarrow permissividade elétrica do espaço livre (F/m);

ρ \Rightarrow resistividade ($\Omega \cdot m$);

σ \Rightarrow condutividade (S/m);

N \Rightarrow número de espiras por metro do canal de descarga;

A \Rightarrow área da espira do canal de descarga (m²);

l \Rightarrow comprimento do canal de descarga (m);

d \Rightarrow diâmetro do canal de descarga (cm);

s \Rightarrow distância entre o canal de descarga e o plano de

- terra (m);
- C \Rightarrow capacitância para terra do canal de descarga (pF/m);
- L \Rightarrow indutância do canal de descarga (μ H/m);
- δ \Rightarrow profundidade de penetração de ondas eletromagnéticas (m);
- f \Rightarrow frequência (Hz);
- μ \Rightarrow permeabilidade magnética (H/m);
- X \Rightarrow profundidade de penetração no solo de ondas de corrente fluindo em uma linha aérea (cm);
- S \Rightarrow grandeza relacionada com condutividade (cm^2/s);
- Z \Rightarrow impedância característica de linha aérea (Ω);
- R_A \Rightarrow Resistência de aterramento de linha aérea (Ω);
- C_R \Rightarrow Coeficiente de reflexão para a terminação de linha aérea.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Atualmente as descargas atmosféricas e seus efeitos correlatos são alguns dos principais agressores dos sistemas baseados em linhas aéreas, como é o caso dos sistemas de telefonia e de distribuição de energia elétrica. As sobretensões originadas devido à injeção de corrente nas linhas por descargas diretas ou por indução, no caso de descargas laterais, podem causar tanto desligamentos quanto danos materiais permanentes em equipamentos destes sistemas. Com relação ao sistema de distribuição de energia a sua vulnerabilidade está no baixo NBI (Nível Básico de Isolamento) das estruturas e equipamentos de tais sistemas. Essa vulnerabilidade tende a aumentar ainda mais com a instalação de equipamentos eletrônicos na rede para sua supervisão e controle, uma vez que os níveis de sobretensões suportáveis por tais equipamentos são baixíssimos. No caso do sistema de telefonia, sendo suas redes, por concepção, uma rede de baixa tensão, com grande parte de seus equipamentos construídos a partir de componentes de estado sólido, a fragilidade desta em relação às sobretensões causadas por descargas é enorme. A previsão de instalação a

curto prazo pelas concessionárias de serviços telefônicos das RDSI - Redes Digitais de Serviços Integrados, torna a suscetibilidade do sistema telefônico a danos materiais e interferências causadas por descargas ainda maior. Portanto um profundo conhecimento do fenômeno da descarga atmosférica e seus efeitos é fundamental para que se possa tomar medidas que visem a melhoria do desempenho destes sistemas.

Com o objetivo de estudar as interferências impostas pelo sistema de energia ao sistema telefônico, devido ao posteamento mútuo utilizado por estes sistemas, foi iniciado em 1983, sob supervisão do professor José Osvaldo Saldanha Paulino, um convênio entre o Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da U.F.M.G. e o Setor de Proteção Elétrica do Departamento de Redes do CPqD da TELEBRÁS - Telecomunicações Brasileiras S.A.. No período de 1983 a 1987 o objeto de estudo do convênio foi preferencialmente a interferência devido a curto-circuitos e contatos entre as redes dos dois sistemas.

Em fevereiro de 1988 iniciou-se uma nova fase deste convênio onde seriam estudados os problemas causados ao sistema telefônico pelas descargas atmosféricas. De acordo com o convênio o CPqD/TELEBRÁS seria o órgão financiador de quatro bolsas de mestrado, durante 24 meses, para alunos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

do referido departamento. Durante este período tais alunos deveriam cursar as disciplinas necessárias à obtenção de créditos para a defesa de dissertação de mestrado, bem como elaborar a dissertação propriamente dita. Com esse esquema procurou-se abranger todo o estudo do fenômeno da descarga atmosférica, desde o questionamento das teorias existentes, a reprodução do fenômeno em modelo reduzido até a sua interação com os sistemas de energia e telefônico.

Os trabalhos desenvolvidos, os quais deram origem a quatro dissertações de mestrado, tratam dos seguintes temas:

- cálculo do campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica e da interação deste com uma linha aérea;

- estudo do comportamento de um condutor multiterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas;

- cálculo da tensão induzida em um cabo telefônico devido a injeção de corrente em sua blindagem por uma descarga atmosférica;

- estudo em modelo reduzido da tensão induzida em uma linha aérea por descargas atmosféricas laterais, considerando a condutividade finita do solo;

Assim definido, o conjunto de trabalhos resultante deste convênio, proporciona uma abordagem bastante abrangente do fenômeno da descarga atmosférica e seus

efeitos. Além disso o desenvolvimento paralelo dos trabalhos justifica ainda mais a sua realização, uma vez que a interação entre estes é direta e mutuamente fundamental. No caso do presente trabalho a sua realização se justifica no sentido de possibilitar a verificação das teorias abordadas pelo conjunto dos trabalhos, incluindo o esclarecimento de dúvidas presentes nestas teorias, além de proporcionar o domínio da técnica de simulação analógica por meio de modelos reduzidos, a qual por si só, devido a sua potencialidade, justificaria a realização do trabalho.

1.2 - A ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido discorre tanto sobre a descarga atmosférica, no que diz respeito a suas características físicas e teorias, quanto sobre a técnica de simulação analógica utilizada para estudo deste fenômeno. O conteúdo de cada um dos capítulos pode ser resumidamente apresentado da seguinte maneira:

- no capítulo 2 é apresentada a descarga atmosférica no que diz respeito a seus mecanismos físicos;

- no capítulo 3 é apresentada a teoria de Rusck para a descarga atmosférica incluindo a modelagem adotada para o fenômeno, a expressão para o cálculo da tensão induzida e as críticas a sua teoria;

- no capítulo 4, baseado no que foi colocado no capítulo 2, são definidos os modelos reduzidos implementados, um considera a condutividade finita do solo e o outro não, e descritas as partes componentes de cada um deles;

- no capítulo 5 são descritas e discutidas as características gerais necessárias a um sistema de medição adequado às medições realizadas bem como as características específicas dos equipamentos utilizados;

- no capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos com o modelo reduzido, onde as medições realizadas são comparadas a simulações feitas por métodos numéricos em computador;

- no capítulo 7 são apresentadas alternativas para a avaliação da influência da resistividade do solo na tensão induzida através da técnica de modelos reduzidos;

- no capítulo 8 é apresentada a conclusão do trabalho acompanhada de propostas de continuidade do mesmo.

Desta maneira procurou-se descrever a técnica de modelos reduzidos utilizada, bem como mostrar através dos resultados obtidos a potencialidade desta para a solução de problemas envolvendo geração de campos eletromagnéticos variantes no tempo em configurações não simétricas.

CAPÍTULO 2

A DESCARGA ATMOSFÉRICA

2.1 - INTRODUÇÃO

O estudo de qualquer fenômeno físico através de modelos reduzidos requer um conhecimento prévio acerca dos mecanismos físicos a partir dos quais se desenvolve o fenômeno em questão. Neste capítulo serão apresentados os mecanismos físicos da descarga atmosférica. Uma vez definidos seus mecanismos a descarga terá seu processo dividido em etapas e serão identificadas quais delas são determinantes para a tensão induzida. A partir desta identificação, será adotada modelagens para tais etapas a serem utilizadas no modelo reduzido.

As fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as nuvens de chuva, do tipo cumulonimbus. Devido à turbulência envolvendo vento, água e gelo e às condições de temperatura e pressão presentes nestas nuvens, ocorre uma eletrificação destas, o que se dá segundo um processo ainda não explicado satisfatoriamente. O acúmulo de cargas é tal que os campos elétricos daí advindos são suficientes para ultrapassar a rigidez dielétrica do meio no interior das nuvens. Os tipos de descargas que podem ocorrer relacionadas

às nuvens são : descargas dentro da própria nuvem, entre duas nuvens, entre nuvem e o ar à sua volta e entre nuvem e terra, sendo este último tipo o discutido neste trabalho. Através de medições de campo elétrico nas proximidades de nuvens pôde-se estimar a distribuição de cargas nestas, como relatado por Uman [05], baseado no trabalho de Malan (1952, 1963), e reproduzido na figura abaixo. Nesta figura os pontos P, N e p marcados indicam as localizações das cargas puntuais equivalentes para cada uma das distribuições. Os valores típicos destas cargas puntuais são: $P = + 40 \text{ C}$, $N = - 40 \text{ C}$ e $p = + 10 \text{ C}$. Partindo deste modelo para a nuvem eletricamente carregada serão apresentadas as etapas seguintes da descarga atmosférica: a formação do canal de descarga, a corrente de retorno e as descargas subseqüentes.

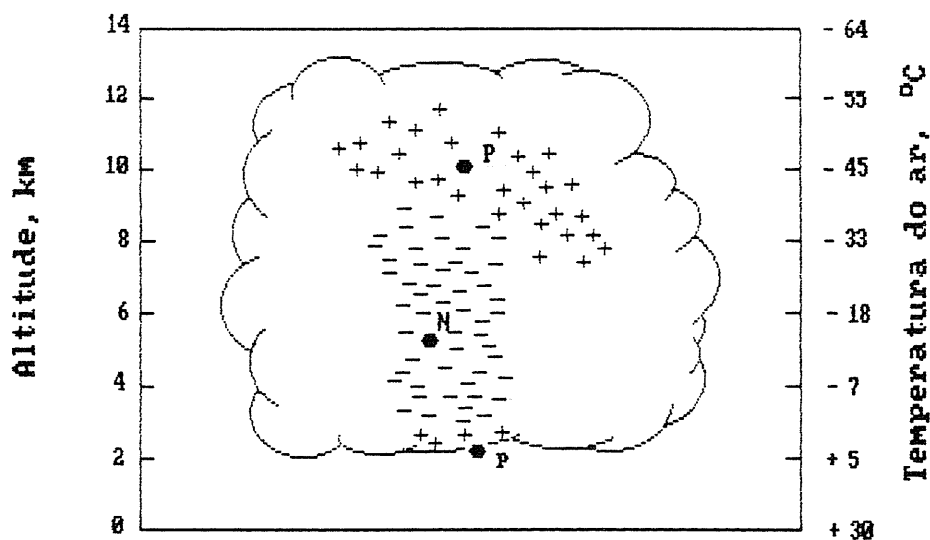


Fig 2.1 - Modelo para a distribuição de cargas em uma nuvem de tempestade.

2.2 - A FORMAÇÃO DO CANAL DE DESCARGA

A etapa da descarga atmosférica denominada formação do canal de descarga ocorre após o processo de eletrificação da nuvem ter acumulado carga suficiente para ultrapassar a rigidez dielétrica do meio provocando a ruptura do dielétrico entre as regiões de carga N e p mostradas na figura 2.1. De acordo com Uman [05], esta ruptura libera cargas elétricas negativas inicialmente presas à partículas de gelo e água dando possibilidade de movimento a essas cargas. As cargas negativas liberadas pela ruptura do meio dielétrico na parte inferior da nuvem são aceleradas em direção à terra pelo campo elétrico devido à forte concentração de cargas na região N, iniciando assim o processo de formação do canal de descarga.

A propagação das cargas a partir da base da nuvem em direção à terra se dá passo a passo, ou seja: a coluna de cargas avança em passos aproximadamente 50 m de comprimento [05] com uma pausa de cerca de 50 μ s [05] entre cada passo. Durante a propagação cada ramo torna-se luminoso por menos de 1 μ s [05] permanecendo sem luminosidade aparente até a propagação de um novo ramo. A velocidade média de propagação dos ramos de formação do canal de descarga é cerca de $1,5 \times 10^5$ m/s [05] sendo necessários portanto 20 ms para percorrer uma distância de 3 km [05], valor

representativo de altura de nuvens de tempestade. A carga depositada no canal de descarga durante a sua formação é de cerca de 5 C [05], para o que é necessário uma corrente média de centenas de ampéres. Essa deposição de cargas é necessária para que o campo elétrico na ponta do canal seja suficientemente forte para garantir a continuidade da propagação dos ramos do canal de descarga. A propagação destes ramos se dá até próximo à superfície da terra sem que o canal efetivamente toque o solo. Outros dados a respeito da formação do canal de descarga são apresentados na tabela 2.1. O processo de propagação dos ramos formadores do canal de descarga é mostrado na figura 2.2.

2.3 - A CORRENTE DE RETORNO

Quando o canal de descarga aproxima-se bastante da superfície da terra o campo elétrico devido à carga presente na ponta do canal de descarga é suficiente para causar uma ruptura do dielétrico formado pelo ar próximo à terra. Ocorre então uma descarga partindo do solo em direção ao canal, propagando-se até atingir a ponta deste, sendo o canal efetivamente conectado à terra.

Neste momento tem-se portanto o seguinte sistema: uma nuvem carregada ligada à terra por meio de um condutor não linear, com perdas e eletricamente carregado, que é o

canal de descarga. A corrente de retorno então se propagará de um ponto próximo à terra em direção à nuvem pelo canal de descarga, anulando inicialmente as cargas do canal e posteriormente as cargas da nuvem. A onda de corrente de retorno medida na terra tem, tipicamente, seu tempo de frente na faixa de 1 a 10 μ s [05] e o tempo de semi-cauda entre 20 e 60 μ s [05], com amplitude típica de 35 kA [20], numa faixa de 10 a 100 kA [05]. Essa onda de corrente inicial é responsável pelo anulamento das cargas no canal. Após esta onda, correntes da ordem de centenas de ampères podem continuar fluindo pelo canal durante vários milisegundos, as quais são responsáveis pelo anulamento da carga, ou parte dela, presente na nuvem. Pelas características da onda de corrente de retorno inicial, elevada amplitude e alta taxa de subida, pode-se identificá-la como a principal etapa da descarga atmosférica para o fenômeno da indução de tensão. Outras informações a respeito da corrente de retorno são apresentadas na tabela 2.1 e na figura 2.2 é mostrado o instante em que ela ocorre dentro do processo global da descarga atmosférica.

2.4 - AS DESCARGAS SUBSEQUENTES

O desenvolvimento completo das etapas de eletrificação da nuvem, formação do canal de descarga e corrente de retorno caracterizam a descarga atmosférica,

entretanto este processo pode não ser interrompido após a corrente de retorno. A continuidade do processo se dá através das descargas subseqüentes.

Se após o término do fluxo de corrente pelo canal devido à primeira descarga, com um intervalo de tempo menor que 100 ms [05], houverem cargas elétricas livres próximas ao topo do canal de descarga pode ocorrer uma nova descarga. Esta, denominada subseqüente, utiliza o mesmo canal da primeira. No caso da descarga subseqüente, o carregamento do canal pode não ser feito passo a passo e sim pela propagação direta de uma coluna de cargas recarregando o canal inicial. A velocidade de propagação desta coluna de cargas é de 2×10^6 m/s [05], aproximadamente 10 vezes mais rápido que a propagação passo a passo da primeira descarga. Estima-se que a carga depositada no canal pela propagação contínua é menor que no caso anterior, o que está de acordo com as baixas amplitudes das ondas correntes de retorno medidas em descargas subseqüentes. O processo denominado globalmente por descarga atmosférica pode conter mais de uma descarga subseqüente, dependendo da quantidade e distribuição das cargas elétricas na nuvem.

No caso em que o tempo decorrido entre o término da descarga inicial e o início da subseqüente exceder ligeiramente 100 ms [05] pode ocorrer um processo misto em

que o canal é carregado até certo ponto por uma propagação contínua de cargas e a partir daí inicia-se a formação de um outro canal pelo mecanismo de propagação passo a passo. Quando este tempo excede várias centenas de milissegundos [05] somente uma propagação passo a passo pode levar a uma nova descarga.

Alguns dados referentes às descargas subseqüentes são apresentados na tabela 2.1. A figura 2.2 apresenta um esquema do desenvolvimento da descarga atmosférica envolvendo as etapas: formação do canal de descarga, corrente de retorno e descargas subseqüentes. Nesta figura, na parte (a), a descarga atmosférica aparece como se fosse fotografada por uma câmera de lentes fixas na qual o filme se move com grande velocidade e na parte (b) no caso de uma câmera com filme estacionário.

2.5 - VARIAÇÕES DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

As variações principais em torno das descargas nuvem-terra dizem respeito à polaridade das cargas depositadas no canal durante a sua formação (descarga positiva ou negativa) e à direção de propagação destas cargas (descarga ascendente ou descendente).

No caso das descargas positivas, estas ocorrem

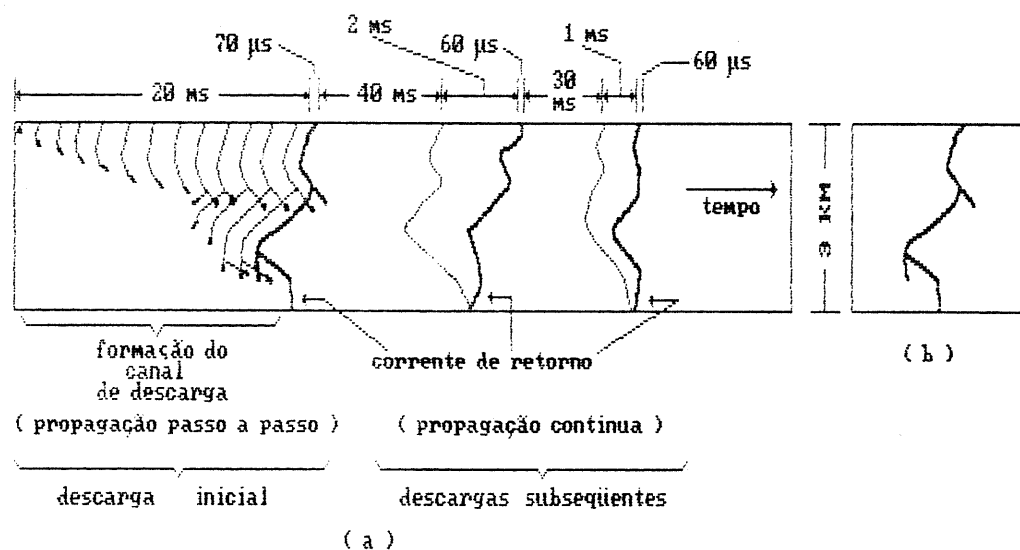


Fig 2.2 - Desenvolvimento da descarga atmosférica de acordo com Uman [05].

com uma frequência bem menor que as negativas e são caracterizadas por uma baixa taxa de subida da onda de corrente de retorno (aproximadamente 5 vezes menor do que a taxa de subida para as descargas negativas) [05] e um valor elevado de amplitude. A carga elétrica transferida da nuvem para a terra por uma descarga positiva é de cerca de 300 C [05], aproximadamente 3 vezes a de uma descarga negativa, e é transferida quase sempre em uma só descarga, já que as descargas positivas raramente têm subsequentes.

Com relação à direção de propagação, que

normalmente é da nuvem para a terra, podem ocorrer também canais de descargas que se formam a partir da terra em direção à nuvem, os quais podem ser carregados por cargas positivas ou negativas. Estes canais que iniciam-se no solo surgem normalmente em estruturas muito altas ou em torres situadas em montanhas.

TABELA 2.1

OBS - Os dados apresentados abaixo são referentes a descargas negativas descendentes e foram reunidos por Uman [05] a partir das publicações de diversos autores.

	Mínimo	Representativo	Máximo
<u>Formação do canal de des-</u>			
<u>carga:</u>			
- propagação passo a passo:			
. comprimento do passo, m	3	50	200
. intervalo de tempo entre passos, μ s	30	50	1
. velocidade média de propagação, m/s	1×10^5	$1,5 \times 10^5$	$2,6 \times 10^6$
. carga depositada no canal, C	3	5	20
- propagação contínua:			
. velocidade de propagação, m/s	1×10^6	2×10^6	$2,1 \times 10^7$
. carga depositada no canal, C	0,2	1	6
<u>Corrente de retorno:</u>			
. velocidade de propagação, m/s	2×10^7	8×10^7	$1,6 \times 10^8$

. taxa de subida da corrente, kA/ μ s	<1	10	>80
. tempo de pico da corrente, μ s	<1	2	30
. valor de pico da corrente, kA		10-20	110
. tempo de semicauda da corrente, μ s	10	40	250
. carga transferida excluindo a corrente contínua, C	0,2	2,5	20
. comprimento do canal, km	2	5	14
. diâmetro do canal, cm	1,5	5	200
<u>Descarga atmosférica:</u>			
. número de descargas (inicial mais subseqüentes)	1	3-4	26
. intervalo de tempo entre inicial e subseqüentes ou entre estas na ausência de corrente contínua, ms	3	40	100
. duração da descarga, s	10^{-2}	0,2	2
. carga transferida incluindo a corrente contínua, C	3	25	90

CAPÍTULO 3A TEORIA DE RUSCK PARA A TENSÃO INDUZIDA
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 - INTRODUÇÃO

O estudo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas iniciou-se quase que ao mesmo tempo em que este tipo de linha de transmissão começou a ser largamente utilizado. O primeiro cálculo teórico da tensão induzida em uma linha de transmissão por uma descarga atmosférica foi feito por K.W. Wagner em 1908. Desde então foram publicados vários outros trabalhos a respeito do fenômeno, embora nenhum deles o tivesse tratado na sua totalidade. Durante a primeira metade do século XX os principais pesquisadores nesta área, como citado por Rusck [04], foram: Bewley (1929), Aigner (1935), Wagner e McCann (1942), Szper (1948), Golde (1954) e Lundholm (1955).

Em 1958 Rusck [03][04] publicou sua teoria. Pela primeira vez era proposto por uma teoria acerca do fenômeno uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida, a qual computava corretamente a interação entre o campo eletromagnético gerado pela descarga e a linha. Esta expressão considera a corrente de retorno fluindo pelo canal

de descarga como sendo a principal causadora da tensão induzida e também a composição completa do campo eletromagnético gerado pela descarga, tanto a parcela devido à neutralização da distribuição de cargas no canal causada pela corrente de retorno quanto a parcela causada pela própria corrente de retorno.

A teoria de Rusck, de forma sucinta, as diferenças entre a modelagem de Rusck e a implementada neste trabalho, considerações a respeito da influência da resistividade do solo juntamente com as principais críticas ao trabalho de Rusck são apresentadas a seguir.

3.2 - A TEORIA DE RUSCK

Partindo da descrição da descarga atmosférica apresentada no capítulo 2 pode-se chegar ao modelo matemático adotado por Rusck mediante algumas simplificações e aproximações, as quais são apresentadas a seguir.

Dentre as etapas da descarga atmosférica a corrente de retorno é que efetivamente dá origem a campos eletromagnéticos intensos, os quais causam a tensão induzida em linhas. Em sua modelagem, Rusck não considera nem o campo elétrico estático devido à presença de cargas nas nuvens nem os campos gerados durante a formação do canal de descarga.

Esta simplificação é perfeitamente aceitável, pois estas etapas se processam numa velocidade muito baixa e a tensão induzida por elas é praticamente nula.

Portanto Rusck parte de um canal de descarga ionizado e carregado, disposto verticalmente em relação ao solo, no qual se propagará a corrente de retorno, do solo em direção à nuvem. Com relação ao canal de descarga não são considerados nem a tortuosidade nem a variação da distribuição de cargas ao longo deste, causada pela variação de sua capacitância para a terra. A consideração de um canal retilíneo, perpendicular ao solo e com distribuição uniforme de cargas simplifica enormemente o cálculo matemático sem implicar em grandes erros. Isto pode ser justificado da seguinte maneira: na média o canal de descarga pode ser considerado vertical e a variação da distribuição de cargas no canal não é muito grande nas primeiras centenas de metros, as quais são determinantes para o valor de pico e a frente de onda da tensão induzida.

A corrente de retorno deve ter a forma de uma função degrau já que essa corrente neutraliza as cargas presentes no canal, para as quais é considerada uma distribuição uniforme. O fato de se desprezar a frente de onda da corrente de retorno altera os resultados de maneira conservativa e é fundamental para a obtenção de uma solução

analítica.

Finalmente, Rusck modela o solo como um condutor perfeito, pois considera que o efeito da resistividade seria a atenuação por perdas do campo eletromagnético gerado pela descarga, sendo esta portanto uma aproximação conservativa. Além disso é considerado também que esse campo não varia significativamente entre o solo e a altura da linha (6 a 10 m), já que essa é muito pequena comparada com o comprimento do canal (5000 m) [05].

Portanto o modelo matemático de Rusck para o cálculo da tensão induzida é composto de um condutor carregado com uma distribuição uniforme de cargas disposto verticalmente em relação à terra, representando o canal de descarga, no qual fluirá a corrente de retorno, representada por um degrau de corrente que se propaga ascendentemente no condutor. Na figura 3.1 é mostrado o modelo final de Rusck para o cálculo da tensão induzida.

Com as considerações e aproximações apresentadas acima, utilizando o método das imagens juntamente com as equações de Maxwell, Rusck obteve uma expressão analítica para o campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica e a partir daí calcula a tensão induzida em uma linha infinita e sem descontinuidades (possui a mesma

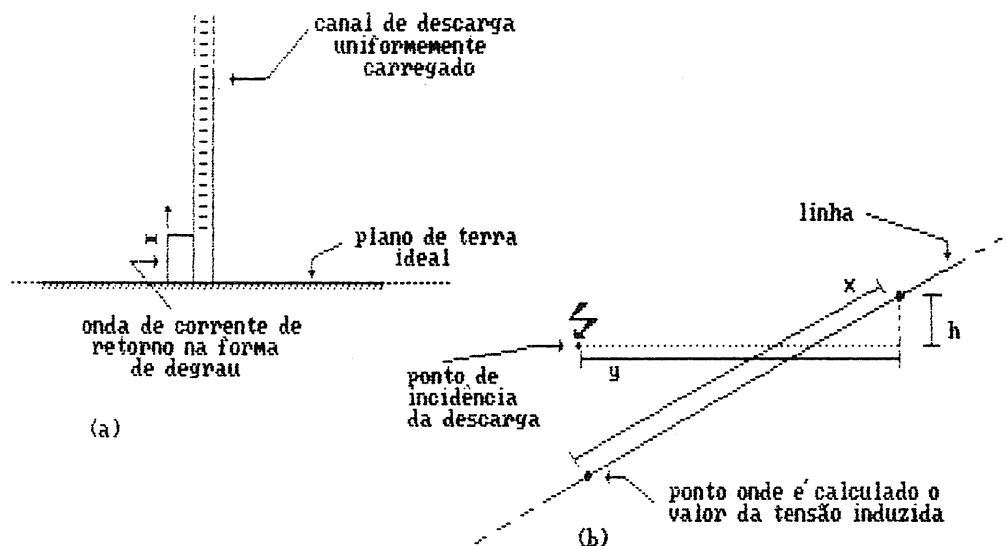


Fig 3.1 - Modelo de Rusck para a descarga atmosférica utilizado para cálculo da tensão induzida.

impedância característica ao longo de todo o seu comprimento) situada nas proximidades do ponto de contato entre a descarga e o solo. A expressão analítica para o cálculo da tensão induzida obtida por Rusck é:

$$U(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t) \quad (3.1)$$

onde :

$$U_1(x,t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(v_0 t - x)}{y^2 + \beta^2 (v_0 t - x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (v_0 t - x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2) (x^2 + y^2)}} \right] \quad (3.2)$$

$$U_z(x, t) = U_1(-x, t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(v_0 t + x)}{y^2 + \beta^2 (v_0 t + x)^2} \quad (3.3)$$

$$\left[1 + \frac{-x + \beta^2 (v_0 t + x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2) (x^2 + y^2)}} \right]$$

sendo:

$$Z_0 = \frac{1}{4 \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30 \text{ Ohms} - \text{impedância intrínseca do canal de descarga;}$$

$I_0 \Rightarrow$ valor de pico da corrente de descarga (kA);

$h \Rightarrow$ altura do condutor (m);

$v \Rightarrow$ velocidade de propagação da corrente de retorno (m/ μ s);

$v_0 \Rightarrow$ velocidade da luz (m/ μ s);

$t \Rightarrow$ tempo, tomando-se como referência o instante em que tem início a corrente de retorno (μ s);

$$\beta = v/v_0;$$

$x \Rightarrow$ distância ao longo da linha entre o ponto onde se calcula a tensão induzida e o ponto da linha mais próximo do ponto de incidência da descarga (m);

$y \Rightarrow$ menor distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga (m);

$\mu_0 \Rightarrow$ permeabilidade magnética do espaço livre (H/m);

$\epsilon_0 \Rightarrow$ permissividade elétrica do espaço livre (F/m);

O cálculo da tensão induzida em uma linha finita

e com descontinuidades causada por uma descarga atmosférica cuja corrente de retorno possui um tempo de frente finito pode ser feito numericamente. Este cálculo numérico utiliza a expressão acima aliada ao princípio da superposição e a técnicas de compensação, como foi descrito e implementado por Lopes [09].

É importante ressaltar aqui as diferenças entre a modelagem adotada por Rusck para a descarga e a utilizada na implementação do modelo reduzido deste trabalho. A diferença básica diz respeito à presença de cargas no canal no instante precedente ao início da corrente de retorno. Na modelagem de Rusck a corrente de retorno flui pelo canal neutralizando as cargas ali presentes. No modelo reduzido implementado o canal é mantido eletricamente neutro no instante inicial, sendo que a corrente de retorno é injetada ascendentemente e se propaga pelo canal depositando cargas elétricas ao longo deste. A única diferença com relação ao campo eletromagnético calculado a partir destas duas modelagens está no valor inicial do campo elétrico. Este é igual ao valor do campo eletrostático devido às cargas no canal no instante inicial no primeiro caso e igual a zero no segundo, como foi demonstrado por Fonseca [10]. Dessa maneira, tanto uma quanto a outra modelagem dão origem à mesma tensão induzida, já que a componente estática do campo elétrico não contribui para a tensão induzida.

3.3 - O QUESTIONAMENTO DA TEORIA DE RUSCK

Uma importante questão ainda hoje existente acerca do fenômeno da tensão induzida por descargas atmosféricas é a forma da interação entre o campo eletromagnético gerado pela descarga e a linha, ou seja, o mecanismo de indução de tensão.

De acordo com a teoria de Rusck, a qual modela o solo como um plano de resistividade nula, o campo elétrico gerado pela descarga é, pelas condições de fronteira, vertical na superfície do solo. Segundo esta teoria o efeito da resistividade seria conservativo, causando uma atenuação do campo elétrico gerado pela descarga, e conseqüentemente da tensão induzida.

Do outro lado da questão situam-se pesquisadores como Martin Uman [06] e Koga [07] entre outros, os quais consideram que a tensão induzida é causada exatamente devido ao efeito da resistividade do solo. Segundo esses autores o campo elétrico predominantemente vertical gerado pela descarga ao se propagar na superfície do solo sofre, devido à resistividade deste, uma inclinação no sentido de sua propagação dando origem a um campo elétrico horizontal, o qual seria o principal causador da tensão induzida. Dessa maneira o efeito da resistividade não seria conservativo,

pois estando este campo horizontal no sentido da linha ele daria origem a tensões induzidas maiores do que as previstas pela teoria de Rusck. Uma discussão mais ampla e detalhada, incluindo a modelagem utilizada por cada uma das teorias para a descarga atmosférica pode ser encontrada no trabalho de Fonseca [10]. Portanto o ponto central dessa discussão é o efeito da resistividade do solo na tensão induzida.

Não existe disponível ainda uma teoria que considere diretamente o efeito da resistividade do solo tanto na corrente de retorno quanto no campo eletromagnético gerado pela descarga e conseqüentemente na tensão induzida. Uma alternativa para a determinação deste efeito é a utilização de modelos reduzidos, nos quais procura-se reproduzir as mesmas condições de fronteira e fontes de campo eletromagnético do fenômeno real. Desse modo a influência da resistividade pode ser determinada mediante a comparação entre as medições obtidas com dois modelos de mesmas características, um implementado sobre um plano metálico (resistividade nula) e outro sobre um solo real. A descrição destes modelos reduzidos construídos é apresentada no capítulo 4.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO MODELO REDUZIDO IMPLEMENTADO

4.1 - INTRODUÇÃO

O estudo de qualquer fenômeno físico dá-se normalmente em uma seqüência de passos que poderia ser sintetizada da seguinte maneira. A partir de observações experimentais modela-se o fenômeno partindo-se de mecanismos físicos já conhecidos e explicados. Uma vez definido o modelo estabelece-se um conjunto de leis físicas que regem o fenômeno e que dão consistência matemática à relação causa/efeito passível de observação no fenômeno. Desta forma, estando definido o equacionamento matemático, obtém-se a solução deste por meio de métodos analíticos ou numéricos. Neste ponto, é possível a reprodução do fenômeno e então procede-se a comparação entre os efeitos previstos pelo modelo e os observáveis devidos ao fenômeno real.

A simulação analógica insere-se neste contexto tanto como alternativa a alguns dos passos citados acima quanto como método de comprovação da teoria proposta. No caso do estudo do fenômeno da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas a simulação analógica parte do modelo físico do fenômeno, estabelece

automaticamente as condições de fronteira para os campos eletromagnéticos, abstém-se das condições de idealização necessárias à formulação matemática da teoria e apresenta como resultado a tensão induzida.

A técnica de simulação analógica descrita aqui é referenciada ao estudo da resposta de linhas de transmissão a descargas diretas realizados por Anderson [01] e ao estudo dos efeitos de proteção de cabos guarda em linhas de distribuição contra descargas atmosféricas laterais realizado por Yokoyama [02], ambos em modelos reduzidos.

A modelagem para a descarga atmosférica adotada neste trabalho envolve as características físicas do fenômeno apresentadas no capítulo 2 e algumas considerações a esse respeito apresentadas no capítulo 3. Esta modelagem está de acordo com as principais teorias acerca do fenômeno. Inicialmente é apresentado o modelo básico utilizado no estudo, o qual foi implementado sobre um plano metálico, cuja resistividade é desprezada. São descritas as partes componentes deste modelo: o plano de terra, o canal de descarga, a corrente de retorno, a linha; bem como a interação entre estas. Em seguida são apresentadas as modificações introduzidas neste modelo básico para sua implementação sobre um solo real.

4.2 - A DIMENSÃO FÍSICA DO MODELO REDUZIDO

O sistema que se pretende estudar é composto basicamente por uma linha aérea, que pode representar um cabo telefônico ou uma linha de distribuição de energia elétrica, e uma descarga atmosférica atingindo o solo nas proximidades da linha. Como a simulação analógica em modelo reduzido pretende uma reprodução a mais fiel possível do fenômeno real, o ponto de partida para a determinação da dimensão física do modelo e conseqüentemente do fator de escala são as dimensões físicas do sistema real. Assim sendo tem-se para uma linha aérea real uma altura de aproximadamente 10 metros (numa faixa de 6 a 12 m) e para o comprimento do canal de descarga aproximadamente 5000 metros (numa faixa de 2000 a 14000 m) [05]. Dessa maneira a determinação do fator de escala fica limitado por um lado pela disponibilidade de estruturas para sustentação de um canal com comprimento muito elevado, no caso de um modelo muito grande, e por outro pelo aumento da frequência dos sinais envolvidos, no caso de um modelo muito pequeno. Neste último caso existe ainda a dificuldade de manipulação de um modelo muito pequeno. O aumento da frequência ocorre devido ao fato de que, apesar das distâncias serem reduzidas no modelo, tanto neste quanto no fenômeno real as perturbações eletromagnéticas causadas pela descarga se propagam com a velocidade da luz, já que o meio de propagação, o ar, é o

mesmo nos dois casos. O aumento da frequência dos sinais a serem medidos ou gerados torna-se então um fator de limitação no que diz respeito às restrições impostas aos equipamentos de medição e geração.

Com relação ao primeiro fator limitante, tem-se que o comprimento máximo para o canal de descarga no modelo é de 25 metros (altura do galpão do L.E.A.T.) o que permitiria, tomando como comprimento do canal de descarga real o valor de 5000 metros, um fator de escala de até 1:200.

Considerando o segundo fator tem-se que as ondas mais rápidas relacionadas com descargas atmosféricas têm o seu tempo de frente na faixa de $1 \mu s$ o que implicaria, tomando o fator 1:200, em ondas geradas ou medidas no modelo na faixa de 5 ns de tempo de frente, valor compatível com o sistema de medição e geração de ondas disponível.

Dessa maneira fica definido um fator de escala para o modelo implementado de 1:200.

A tabela a seguir mostra as relações entre o fenômeno real e o modelo reduzido no que diz respeito às principais grandezas físicas envolvidas, dadas pelo fator de escala.

$$\text{Fator de Escala, FE} = \frac{1}{200} = \frac{\text{dimensão no modelo}}{\text{dimensão real}}$$

GRANDEZA	RELAÇÃO
Comprimento	$l_{\text{modelo}} = \text{FE} \times l_{\text{real}}$
Tempo	$t_{\text{modelo}} = \text{FE} \times t_{\text{real}}$
Condutividade	$\sigma_{\text{modelo}} = 1/\text{FE} \times \sigma_{\text{real}}$
Resistividade	$\rho_{\text{modelo}} = \text{FE} \times \rho_{\text{real}}$
Constante Dielétrica	$\epsilon_{\text{modelo}} = 1 \times \epsilon_{\text{real}}$
Permeabilidade Magnética	$\mu_{\text{modelo}} = 1 \times \mu_{\text{real}}$
Frequência	$f_{\text{modelo}} = 1/\text{FE} \times f_{\text{real}}$
Comprimento de Onda	$\lambda_{\text{modelo}} = \text{FE} \times \lambda_{\text{real}}$
Velocidade de Propagação	$v_{\text{modelo}} = 1 \times v_{\text{real}}$
Resistência	$R_{\text{modelo}} = 1 \times R_{\text{real}}$
Reatância	$X_{\text{modelo}} = 1 \times X_{\text{real}}$
Impedância	$Z_{\text{modelo}} = 1 \times Z_{\text{real}}$
Capacitância	$C_{\text{modelo}} = \text{FE} \times C_{\text{real}}$
Indutância	$L_{\text{modelo}} = \text{FE} \times L_{\text{real}}$

Pode-se agora estabelecer uma configuração inicial para o modelo reduzido já com as dimensões máximas de algumas de suas partes, como mostra a figura 4.1 .

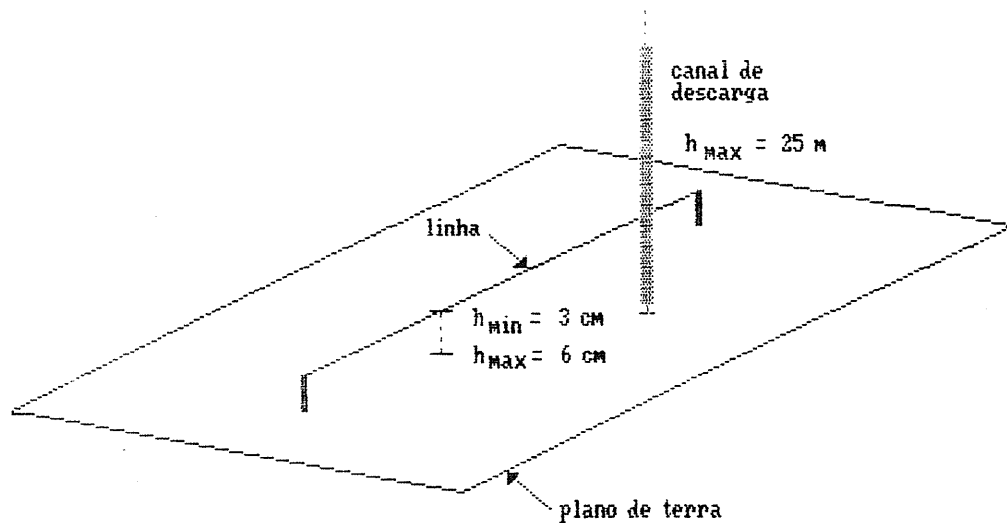


Fig. 4.1 - Configuração inicial do modelo (FE = 1/200).

4.3 - O PLANO DE TERRA

A primeira modelagem implementada para o plano de terra foi a de um plano ideal, para a qual foi utilizado um plano metálico (cobre), considerando sua resistividade nula ($\rho_{\text{cobre}} = 1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Essa modelagem foi adotada com o objetivo de verificar a teoria proposta por Rusck e possibilitar a determinação da influência da resistividade do solo através de comparações entre as medições obtidas com o plano metálico e as obtidas sobre solo real, a segunda modelagem implementada.

No caso ideal, as dimensões do plano de terra comprimento, largura e espessura seriam infinitas, mas estas dimensões podem ser reduzidas a valores práticos tendo em vista certas considerações, como é descrito a seguir.

Com relação às dimensões laterais do plano de terra é importante analisar o comportamento deste plano tendo em vista dois fenômenos: a propagação de ondas de tensão e corrente na linha do modelo e a propagação das ondas eletromagnéticas originadas devido à corrente no canal de descarga.

No primeiro caso, como a capacitância da linha para a terra é um dos parâmetros que definem a impedância característica da linha, é necessário que esta capacitância não seja gravemente alterada, como o caso em que o sistema linha e plano de terra se degenera em um sistema bifilar. Isto é, o efeito de bordas do plano de terra não deve influenciar a capacitância da linha para a terra, como mostra a figura 4.2 .

As ondas eletromagnéticas originadas no canal de descarga se deslocam radialmente a partir deste e com polarização vertical de campo elétrico na superfície do plano metálico, já que sua resistividade é praticamente nula. É, portanto, necessário que essas ondas incidam na

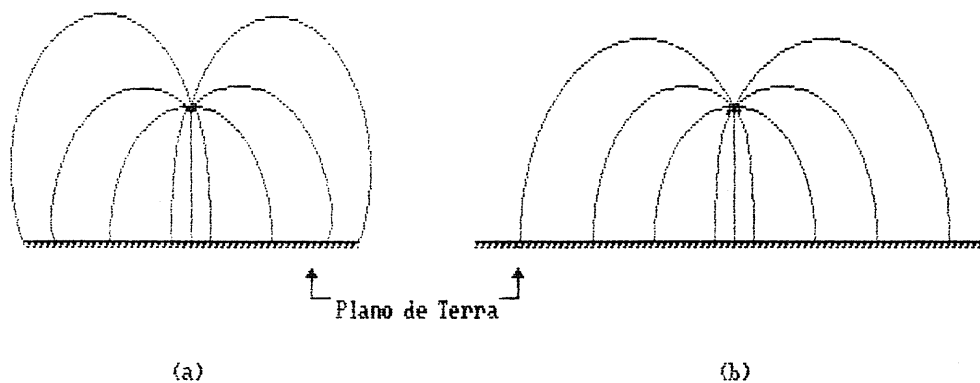


Fig 4.2 - a) modelagem degenerada b) modelagem satisfatória

linha sem terem sofrido modificações, o que é conseguido com toda a superfície entre canal de descarga e linha coberta por chapas metálicas, como pode ser visto na figura 4.3.

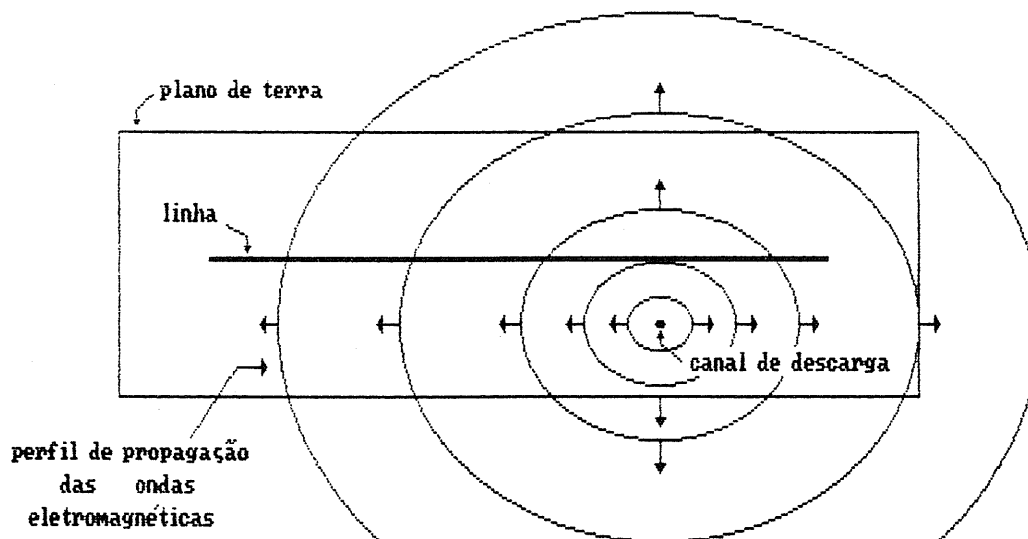


Fig 4.3 - Vista superior do plano de terra.

Estando as bordas do plano de terra além da região de interação direta entre a linha e as ondas geradas pela descarga, a interferência causada por estas bordas se daria no sentido de alterar as condições de campos elétrico e magnético da onda a partir destas, sendo que muito pouca ou quase nenhuma interferência se propagaria no sentido contrário e incidiria na linha, como será justificado a seguir.

A interferência causada pelas bordas do plano nas ondas eletromagnéticas originadas no canal de descarga é percebida também na onda de corrente que flui pelo canal, já que é esta onda que estabelece tal campo eletromagnético. Como o canal representa uma linha de transmissão para a onda de corrente que se propaga nele, o efeito das bordas do plano será sentido por esta onda através da alteração da impedância característica do canal. Esta alteração ocorre devido, principalmente, à distorção introduzida pelas bordas na capacitância do canal para terra, já que a indutância deste praticamente não é alterada por estas. Portanto, em última análise, a interferência das bordas do plano de terra nos campos elétrico e magnético pode ser avaliada através da alteração causada por estas na capacitância do canal para terra.

Com o objetivo de calcular esta alteração na

capacitância do canal para terra pode-se utilizar duas configurações limites. A primeira, na qual o plano de terra seria infinito, e a segunda na qual o canal estaria a uma altura de 60 cm do solo (referente à estrutura de sustentação do plano). Estas duas configurações são referentes à capacitância para terra vista pela onda de corrente ao se propagar pelo canal. Até a onda de campo atingir a borda do plano, tudo se passa como se o plano fosse infinito, tem-se então a primeira configuração. A partir daí, como o plano de terra é mantido isolado do piso do galpão do L.E.A.T., a capacitância vista pelo canal é a associação série da capacitância do canal para o piso do galpão com a capacitância do plano de terra para o piso, a qual pode ser desprezada por ser bem maior que a primeira. O cálculo da capacitância para cada uma das configurações pode ser feito da seguinte maneira:

- de acordo com Kuffel [12] a capacitância de um cilindro disposto verticalmente em relação a um plano de terra é:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \left[\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4s + l}{4s + 3l}} \right]}$$

ou, para $s \ll 1$

$$C \approx \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{1,15 l}{d}}$$

sendo s , l e d definidos na figura abaixo:

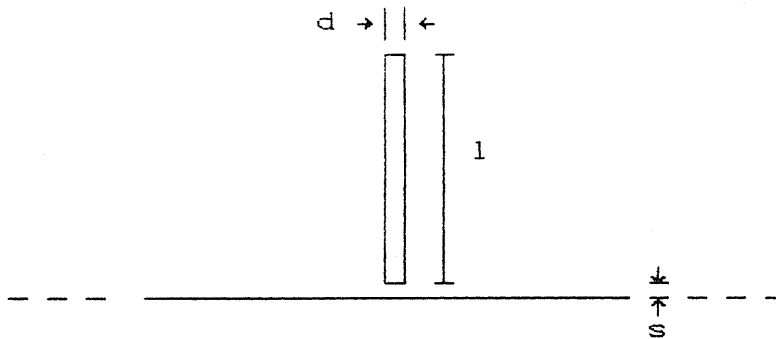


Fig 4.4 - Configuração para determinação da capacitância para terra do canal de descarga

Os valores calculados para a capacitância de cada uma das configurações, a partir dos parâmetros s , d e l apresentados no item 4.4 deste capítulo, são :

$C = 8,09 \text{ pF/m}$ para a primeira configuração (s desprezível)

$C = 7,98 \text{ pF/m}$ para a segunda configuração

A diferença entre os valores calculados para uma e outra configuração é de 1,38 % , portanto, como essa

diferença é muito pequena, pode-se desprezar a influência das bordas do plano de terra nos campos elétrico e magnético gerados pela onda de corrente.

Por facilidade de confecção a partir de chapas encontradas comercialmente, as dimensões escolhidas para o plano metálico, as quais satisfazem as considerações acima, foram : largura = 2,3 m , comprimento = 6,5 m.

A espessura do plano de terra é determinada pela profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas nele incidentes e das correntes que fluem na linha do modelo. A duração das ondas geradas e medidas no modelo raramente excedem 400 ns, ou seja, atingem o seu valor de pico e caem a zero em um tempo de até 400 ns. Uma onda senoidal cuja frequência seja 1 MHz tem um semi-período de 500 ns; no qual a onda parte de zero atinge o seu valor máximo e retorna a zero. Portanto, podemos considerar como o limite inferior das frequências das ondas do modelo o valor de 1 MHz. Essa é uma consideração simples mas satisfatória. Tomando então este valor como limite inferior das frequências envolvidas, tem -se:

- para a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas (Kraus [13]),

$$\delta = (f \pi \mu \sigma)^{-1/2} \text{ onde:}$$

f é a frequência da onda eletromagnética incidente em Hz,

σ é a condutividade do material do plano em S/m,

$$\sigma_{\text{cobre}} = 5,6 \times 10^7 \text{ S/m}$$

μ é a permeabilidade magnética do meio, considerada igual à do espaço livre (μ_0) para o meio em questão, o cobre.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\delta = 0,066 \text{ mm}$$

$$5\delta = 0,330 \text{ mm}$$

- para a profundidade de penetração das correntes fluindo na linha, de acordo com Rüdénberg [14]:

$$X = \frac{3}{\sqrt{2} \pi} \sqrt{\frac{S}{f}} \text{ cm onde:}$$

f é a frequência da corrente na linha em Hz

S é uma grandeza que leva em consideração a condutividade do material em cm^2/s .

$$S_{\text{cobre}} = 1785,71 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$X = 0,28 \text{ mm}$$

δ é o valor de profundidade para o qual o campo elétrico caiu para 36,8% do seu valor na superfície enquanto 5δ implica em uma queda para menos de 1%. A uma profundidade X abaixo da superfície praticamente não existe densidade de corrente devido a correntes fluindo na linha.

Portanto um plano de terra constituído de chapas de cobre com espessura maior que 0,3 mm comporta-se como um plano de profundidade infinita para o modelo em questão.

Desta maneira fica definido o plano de terra do modelo com as seguintes dimensões:

- comprimento = 6,5 m
- largura = 2,3 m
- espessura = 0,3 mm

Com um comprimento de 6,5 m para o plano de terra é possível a simulação de linhas reais com até 1100 m de comprimento, pois é necessário uma distância de aproximadamente 0,5 m entre a terminação da linha e a borda do plano para que esta não tenha influência sobre a linha.

O plano de terra propriamente dito é constituído por duas chapas de cobre de 1,20 L x 6,50 C sendo que as duas chapas foram superpostas numa faixa de 10 cm e rebitadas nessa faixa. Uma solda na junção das chapas seria mais eficiente mas não pôde ser realizada. O plano foi montado sobre uma estrutura de madeira de aproximadamente 60 cm de altura para facilitar a manipulação do modelo. A elevação do plano de terra não causa distorção as formas de onda geradas e medidas, como foi demonstrado anteriormente.

4.4 - O CANAL DE DESCARGA

O canal de descarga é o caminho pelo qual flui a corrente de retorno, portanto a sua modelagem deve procurar manter as mesmas condições de propagação da corrente de retorno existentes no canal real. Essas condições envolvem as perdas, as não-linearidades, a tortuosidade e a velocidade de propagação do canal. Dos parâmetros citados acima, somente a velocidade de propagação; será modelada. Será desprezada a influência dos demais parâmetros, mesmo porque uma modelagem completa seria extremamente difícil de ser implementada. Uma modelagem mais elaborada do que a utilizada neste trabalho é sugerida no final deste item. As teorias sobre descargas atmosféricas relatam que a velocidade de propagação da corrente de retorno está na faixa de 10% a 50% da velocidade da luz (Uman [05]).

Tomando como base as considerações acima podemos adotar como modelo para o canal de descarga uma linha de transmissão a ser disposta verticalmente em relação ao plano de terra tal que seus parâmetros físicos, indutância por metro e capacitância por metro, propiciem uma velocidade de propagação na faixa da velocidade da corrente de retorno.

O modelo adotado para o canal de descarga foi então construído utilizando-se varetas de papelão prensado

de 6,7 mm de diâmetro nas quais foi enrolado em hélice de passo justo um fio de cobre esmaltado de diâmetro 0,7 mm. Na impossibilidade de se confeccionar um canal único com o comprimento total necessário, foram confeccionados várias seções com 1,07 m com terminações metálicas para conexões das mesmas. Foi confeccionado também uma seção, com as mesmas características, mas com 2,53 m de comprimento para ser colocado na parte inferior do canal, junto ao plano de terra. Isto foi feito com objetivo de evitar distorções na parte inicial da corrente de retorno introduzidas pelas conexões entre as seções do canal.

Os parâmetros físicos do canal de descarga assim modelado podem ser calculados aproximadamente da seguinte forma:

- o cálculo da capacitância pode ser feito utilizando-se as fórmulas apresentada no item 4.3 deste capítulo :

$$l = (4 \times 1,07) + 2,53 = 6,81 \text{ m}$$

$$d = 0,0081 \text{ m}$$

$$s = 0,6 \text{ m}$$

$$C = 8,035 \text{ pF/m}$$

o valor de capacitância aqui apresentado é a média dos valores apresentados no item 4.3.

- de acordo com Kraus [13] a indutância de um solenóide é dada por :

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l} \quad : \quad l - \text{comprimento do solenóide}$$

N - número de espiras

A - área da espira

para o modelo do canal tem-se:

$$N = 1450 \text{ espiras por metro}$$

$$A = 0,000044 \text{ m}^2$$

$$L = 116,72 \text{ } \mu\text{H/m}$$

Devido à disposição vertical do canal de descarga a capacitância deste para a terra não é uniforme, diminuindo à medida que se afasta do plano de terra. Portanto o valor calculado para a capacitância por metro do canal é um valor médio desta capacitância.

A velocidade de propagação pode ser então calculada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \Rightarrow \quad v = 32,65 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Com esta velocidade, o tempo gasto pela corrente de retorno para atingir o final da primeira seção do canal é de aproximadamente 78 ns, um tempo superior a duas vezes o

tempo de pico das ondas de tensão induzida. Dessa maneira, as imperfeições do canal devido às suas conexões não interferem gravemente nessas ondas.

O diâmetro externo do modelo do canal de descarga equivale a um canal real de 1,62 m de diâmetro, o que é um valor elevado mas não é absurdo (conforme a tabela 2.1). A medição da velocidade de propagação no modelo do canal de descarga resultou num valor medido de 11,95 % da velocidade da luz, valor próximo do calculado 10,88 % , o que valida ainda mais as considerações feitas com relação à interferência das bordas do plano de terra. Esta medição será discutida no próximo item.

Para se obter um modelo com velocidade de propagação maior utilizou-se uma cordoalha fina do tipo utilizado em ensaios de impulso em alta tensão (fornecida na forma de fita com largura igual a 4 mm e espessura de 0,5 mm), na qual a velocidade de propagação é próxima à da luz. Com isso, foi possível a avaliação da sensibilidade do modelo e do fenômeno da tensão induzida à variação da velocidade de propagação da corrente de retorno, apesar da velocidade neste último modelo estar fora da faixa relatada pela teoria (10% a 50% da velocidade da luz) [05].

O comprimento total dos dois modelos de canal

utilizados foram diferentes. No primeiro caso, um canal de 6,81 m de comprimento foi suficiente para que a reflexão da onda de corrente de retorno na extremidade superior do canal não alterasse a onda de tensão induzida. No caso da cordoalha foi necessário um comprimento de 15,5 m para que se evitasse a influência da reflexão.

Um modelo mais elaborado para o canal de descarga, envolvendo tortuosidade, perdas e variações da indutância e capacitância por metro poderia ser obtido a partir de modificações a serem introduzidas no modelo apresentado. A tortuosidade seria conseguida através da disposição em zigue-zague das várias seções que compõem o canal de descarga. A modelagem para as perdas poderia ser feita através da colocação de resistores em série com as seções do canal. Finalmente, a variação da indutância e capacitância por metro seria obtida por meio da variação do passo da hélice em que o fio de cobre foi enrolado em cada seção do canal, bem como pela utilização de seções de diâmetros diferentes.

4.5 - A CORRENTE DE RETORNO

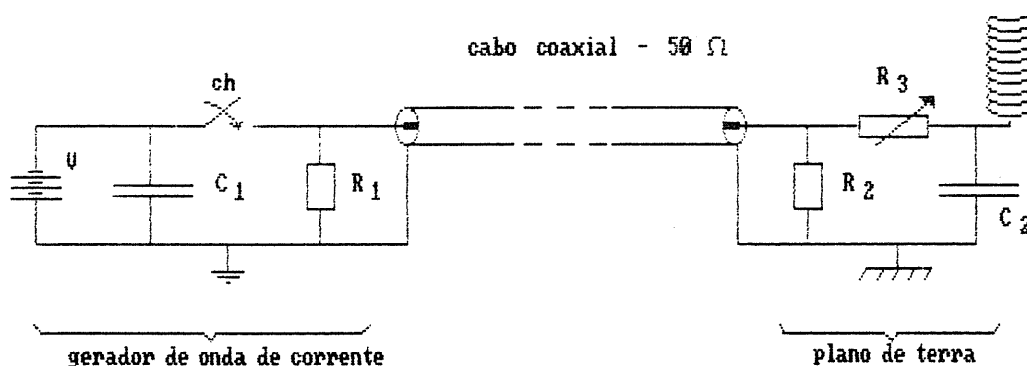
A teoria de Rusck para a tensão induzida por descargas atmosféricas, bem como outras teorias sobre o tema estabelecem que a etapa da descarga atmosférica mais

importante para a tensão induzida é a corrente de retorno, como foi descrito no capítulo 2. Segundo ainda esta teoria a corrente de retorno se propaga no canal de forma a anular as cargas depositadas neste. No capítulo 2 mostrou-se ainda que a menos do valor inicial do campo elétrico na superfície do solo uma corrente ascendente no canal, que anule as cargas deste ou que deposite cargas no canal inicialmente neutro, dá origem ao mesmo campo eletromagnético. Como a modelagem do canal encarrega-se de estabelecer a velocidade de propagação da corrente de retorno, neste item são modelados os outros parâmetros desta: os tempos de frente e cauda. Devido ao fator de escala as ondas de corrente que na realidade têm o seu tempo de frente na faixa de 1 μ s terão no modelo tempos de frente da ordem de 5 ns.

Portanto, a simulação da corrente de retorno pode ser feita através de uma onda de corrente, injetada por um gerador de onda, que se propaga no canal a partir do plano de terra carregando ou descarregando o mesmo, como foi discutido no capítulo 2. Na implementação do modelo optou-se pelo primeiro caso, em que as onda de corrente deposita cargas no canal inicialmente neutro. Isto deveu-se à maior facilidade de conformação das ondas de corrente, no que diz respeito a seus tempos de frente e cauda, propiciada por esta opção. Um outro inconveniente da segunda opção é a necessidade de se ter o elemento de chaveamento do gerador

de onda de corrente em cima do plano de terra, junto ao canal de descarga. Nessa situação as conexões entre canal, gerador de onda e plano de terra teriam seus comprimentos e indutâncias aumentados, além do tamanho físico do gerador alterar as condições de campo eletromagnético ali produzido.

O gerador de onda de corrente é constituído basicamente por um gerador de degrau, uma linha de transmissão e um circuito conformador de onda. O gerador de degrau utilizado foi o modelo TYPE 40 fabricado pela Haeffely. O circuito básico do gerador de onda e seu princípio de funcionamento são apresentados a seguir.



$$R_1 = 50 \, \Omega$$

$$C_1 = 22 \, \text{nF}$$

$$R_2 = 50 \, \Omega$$

$$R_3 = 0 \text{ a } 500 \, \Omega$$

$$C_2 = 56 \, \text{pF}$$

Fig. 4.5 - Circuito básico do gerador de onda de corrente de retorno.

O componente crítico do gerador de onda de corrente é o elemento de chaveamento do gerador de degrau, a chave CH. Essa chave é um relé de mercúrio com tempo de fechamento menor que 5 ns sendo comutada em uma frequência de 50 Hz. Esta frequência de chaveamento é suficiente para que todo o sistema volte à condição inicial de carga nula nos capacitores, durante o tempo em que CH permanece aberta. As outras partes do gerador de onda operam da seguinte maneira:

- com a chave CH aberta a fonte de tensão E carrega o capacitor C1 com uma tensão $-V$,

- quando a chave CH é fechada o capacitor C1 começa a descarregar-se pelo resistor R1 e pelo cabo coaxial,

- a onda gerada em R1 propaga-se pelo cabo coaxial até encontrar o circuito conformador de onda onde o resistor R3 e capacitor C2 serão responsáveis pelo tempo de frente da onda de corrente,

- os resistores R1 e R2 são responsáveis pelo casamento do cabo coaxial que liga o gerador de degrau ao circuito conformador de onda,

- o tempo de cauda é controlado pela descarga do capacitor C1 no sistema formado por R1, cabo coaxial e R2,

- dessa maneira a onda de tensão gerada em C2 é aplicada entre canal e plano de terra dando origem a uma onda de corrente que se propaga ascendentemente no canal.

O canal não influi na forma de onda gerada por que sua impedância característica é aproximadamente 3000Ω no caso do canal confeccionado e 500Ω no caso da cordoalha, valores que representam praticamente um circuito aberto frente a baixa impedância do gerador (50Ω).

A utilização de um cabo coaxial para conexão entre o gerador de degrau e circuito conformador de onda evitou a presença do gerador de degrau junto ao canal de descarga, o que influenciaria no campo eletromagnético gerado pois suas dimensões $10,5 \text{ cm L} \times 25 \text{ cm C} \times 20 \text{ cm A}$ são relativamente grandes para a escala do modelo.

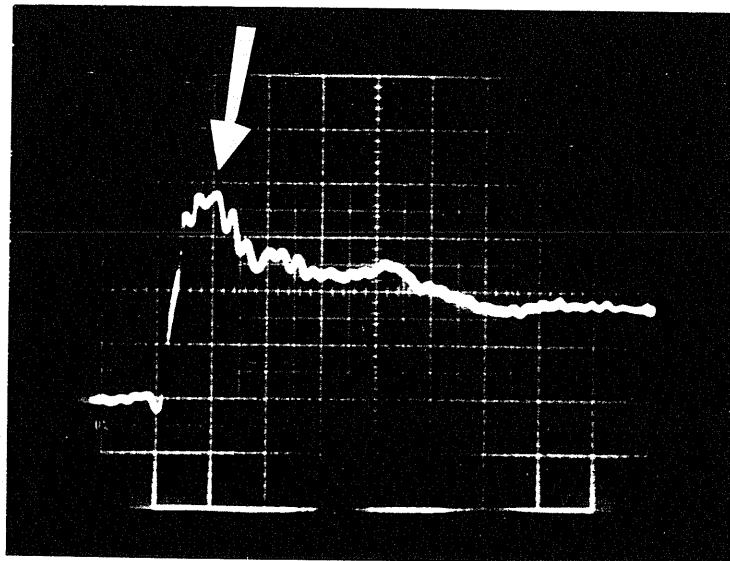
Os componentes do gerador de onda de corrente são adequados à operação em alta frequência, sendo os resistores de filme de carvão depositado e os capacitores com dielétrico em poliéster metalizado. A tensão de carga V do gerador de degrau em sua configuração interna é maior que 100 V , sendo possível a conexão de uma fonte de tensão externa de até 450 V , o que proporcionaria uma onda de corrente de maior amplitude.

A seguir são apresentadas as formas de onda de corrente de retorno utilizadas no modelo implementado sobre o plano metálico.

ONDA DE CORRENTE DE RETORNO Nº 1

10 mA/div

20 ns/div



Oscilograma 4.1

Tempo de frente = 12 ns

Tempo de semi-cauda > 200 ns

Valor de pico = 36 mA

Canal de descarga → canal confeccionado

Comprimento do canal de descarga = 6,81 m

Configuração do gerador de onda de corrente :

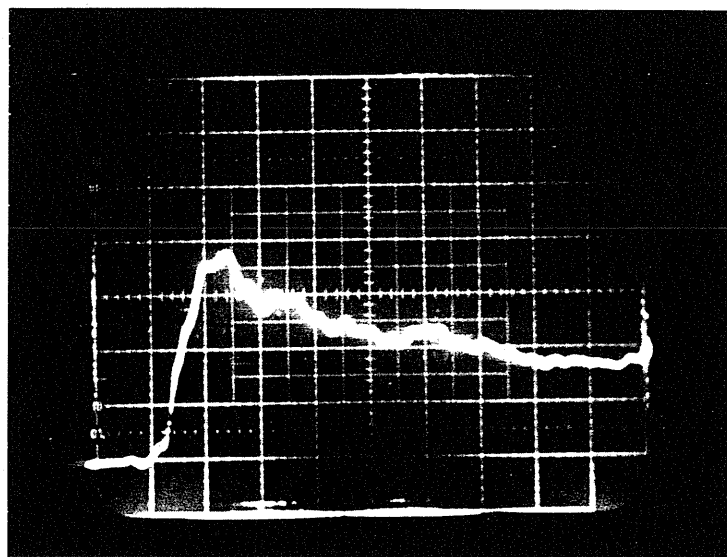
- . esta onda foi obtida com a terminação do cabo coaxial do gerador sendo formada apenas pelo resistor R_z

Fig 4.6 - Oscilograma e parâmetros da onda de corrente de retorno nº 1

ONDA DE CORRENTE DE RETORNO Nº 2

10 mA/div

20 ns/div



Oscilograma 4.2

Tempo de frente = 25 ns

Tempo de semi-cauda > 200 ns

Valor de pico = 36 mA

Canal de descarga \Rightarrow canal confeccionado

Comprimento do canal de descarga = 6,81 m

Configuração do gerador de onda de corrente :

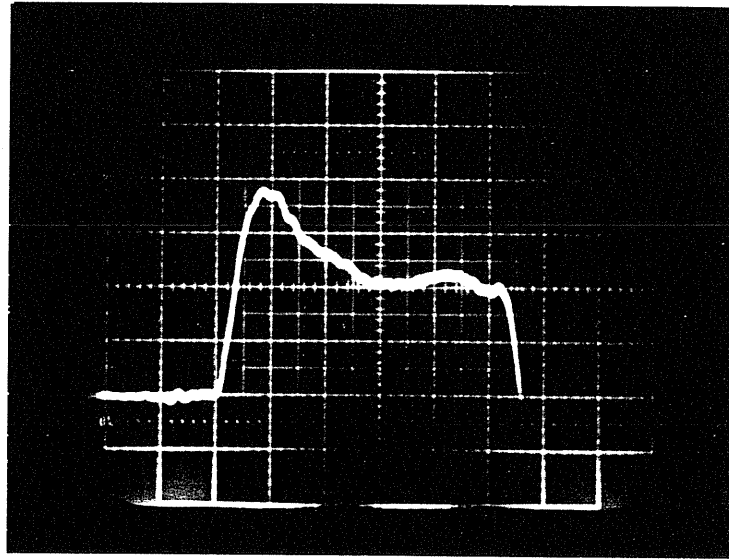
 $R_2 = 50 \Omega$ $R_3 = 88 \Omega$ $C_2 = 56 \text{ pF}$

Fig 4.7 - Oscilograma e parâmetros da onda de corrente de retorno nº 2

ONDA DE CORRENTE DE RETORNO N° 3

50 mA/div

20 ns/div



Oscilograma 4.3

Tempo de frente = 12 ns

Tempo de cauda > 100 ns

Valor de pico = 185 mA

Canal de descarga \Rightarrow cordoalha

Comprimento do canal de descarga = 15,5 m

Configuração do gerador de onda de corrente :

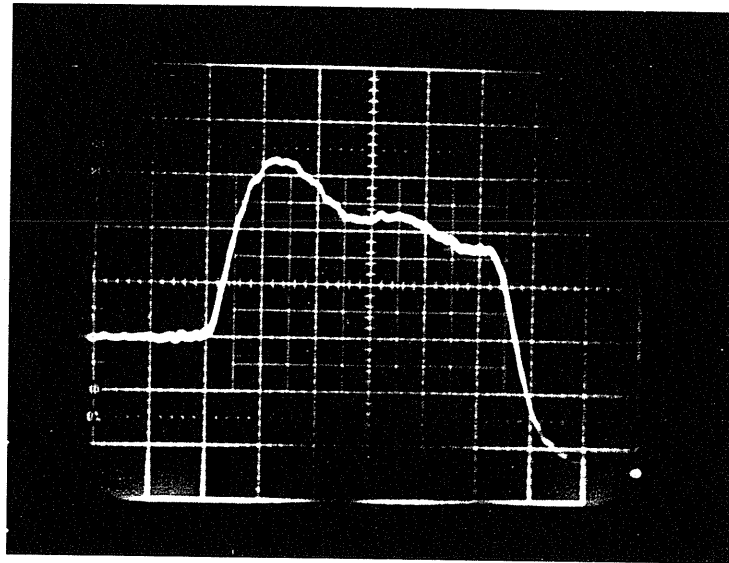
- . esta onda foi obtida com a terminação do cabo coaxial do gerador sendo formada apenas pelo resistor R_2

Fig 4.8 - Oscilograma e parâmetros da onda de corrente de retorno n° 3

ONDA DE CORRENTE DE RETORNO Nº 4

50 mA/div

20 ns/div



Oscilogram 4.4

Tempo de frente = 25 ns

Tempo de cauda > 100 ns

Valor de pico = 165 mA

Canal de descarga → cordoalha

Comprimento do canal de descarga = 15,5 m

Configuração do gerador de onda de corrente :

 $R_z = 50 \Omega$ $R_a = 88 \Omega$ $C_z = 56 \text{ pF}$

Fig 4.9 - Oscilograma e parâmetros da onda de corrente de retorno nº 4

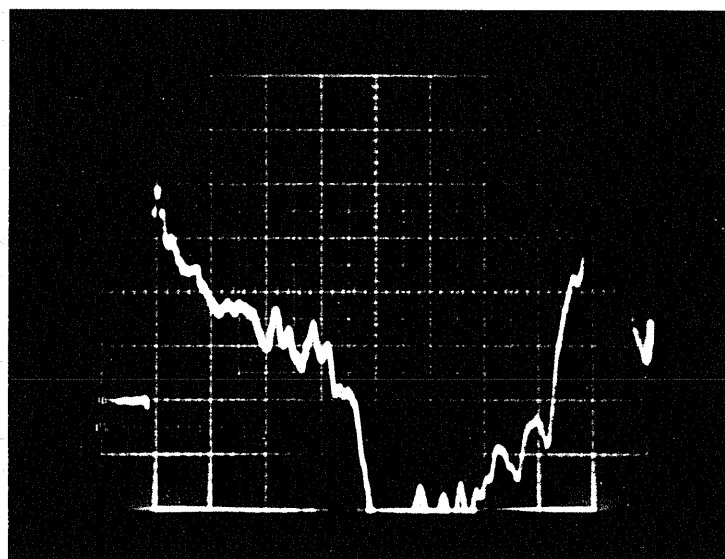
Nota-se na parte inicial das ondas de corrente apresentadas (primeiros 20 ns) uma certa oscilação de frequência bem superior à frequência fundamental destas ondas. Estas oscilações são devidas às indutâncias e capacitâncias inerentes às conexões entre circuito conformador de onda, terminação do canal e plano de terra. Acredita-se que tais oscilações não tenham influência sobre a forma de onda da tensão induzida, uma vez que elas estão restritas à parte inferior do canal (primeiros 10 cm) sendo eliminadas pela elevada indutância do canal à medida que se inicia a propagação ao longo deste. Isto é perfeitamente comprovado pelas ondas de tensão induzida obtidas, como será mostrado posteriormente.

Com relação às ondas de corrente no caso em que o canal de descarga foi simulado pela cordoalha, não se percebeu nenhuma oscilação de alta frequência, já que a cordoalha foi conectada diretamente ao gerador de onda de corrente, sem a presença de uma terminação, diferentemente do caso do canal confeccionado.

A velocidade de propagação das ondas de corrente no canal confeccionado pode ser obtida através da análise dos oscilogramas dessas ondas. Nota-se no oscilograma 4.5 seguir uma descida abrupta na forma de onda no tempo de 380 ns. Essa queda corresponde à reflexão na extremidade

aberta (superior) do canal percebida na extremidade inferior (ponto de medição da onda de corrente). Portanto o tempo de 380 ns equivale a 2 vezes o tempo de trânsito das ondas no canal (comprimento igual a 6,81 m) o que implica numa velocidade de propagação neste de 35,8 m/ μ s.

10 mA/div
100 ns/div



Oscilograma 4.5 -

Fig 4.10 - Oscilograma de medição de onda de corrente para determinação da velocidade de propagação no canal confeccionado.

Pode-se observar ainda neste oscilograma pequenas oscilações espaçadas ao longo da onda de corrente, que são devidas às conexões entre as seções do canal, as quais introduzem uma mudança local na impedância característica deste. O tempo decorrido entre estas oscilações não é o

mesmo, apesar do tamanho das seções serem iguais, sendo que menor tempo é gasto nas partes superiores. Isto ocorre por que a capacitância para a terra das seções superiores é menor que das seções próximas ao plano de terra e como esta é inversamente proporcional à velocidade de propagação as seções superiores têm maior velocidade de propagação.

A extremidade aberta do canal causa uma reflexão que modifica drasticamente a onda de corrente no canal, como pode ser observado no oscilograma anterior. Entretanto o tempo em que esta reflexão ocorre 190 ns (igual a 1 tempo de trânsito do canal confeccionado) é maior que a duração das ondas de tensão induzida referentes a essas ondas de corrente. Portanto, tais ondas de tensão induzida não são alteradas por esta reflexão.

Para o caso do canal representado por uma cordoalha, tem-se que 2 vezes o tempo de trânsito deste canal, medido na onda de corrente n^o 4, é de 104 ns. Portanto, para um comprimento de 15,5 m, a velocidade de propagação é de 298 m/ μ s , praticamente a velocidade da luz. Neste caso, apesar da influência da reflexão atingir o ponto de medição em aproximadamente 104 ns, esta não interfere nas ondas de tensão induzida, pois estas têm uma duração bem menor que no caso do canal confeccionado, como é mostrado no capítulo 6.

4.6 - A LINHA

Na modelagem adotada para a linha aérea utilizou-se uma representação unifilar, mais adequada à representação do cabo telefônico do que de uma linha de distribuição. Essa representação é satisfatória mesmo neste último caso devido ao fato deste trabalho objetivar uma investigação básica da tensão induzida por descargas atmosféricas, para o que a representação unifilar é preferida pela sua simplicidade. Embora o estudo por modelos reduzidos seja, talvez, a única maneira de se quantificar a influência do efeito de postes e estruturas próximas (edificações, torres, árvores, etc.).

Tomando o valor de 10 m como representativo para a altura de linhas de distribuição, a linha do modelo deverá estar a 5 cm de altura do plano de terra, para o fator de escala escolhido 1:200. Apesar deste valor não ser representativo da altura dos cabos da rede telefônica, a sua utilização é preferida no sentido de facilitar as conexões com as terminações da linha. Isto não interfere no resultado qualitativo do trabalho, já que não é esperado, para tais alturas, uma variação significativa do campo elétrico. Na sustentação da linha não se utilizou postes ou qualquer outra estrutura semelhante, o que torna o modelo mais simplificado mas não menos adequado, já que o efeito de tais

estruturas é esperado ser pequeno e não é considerado por nenhuma teoria.

A linha foi disposta em cima do plano de terra, ao longo da linha central deste, sendo que suas extremidades situavam-se a 0,5 m da borda do plano. A sustentação da linha foi feita por meio de fios de nylon os quais se prendiam às suas extremidades e a pedestais situados fora do plano de terra. A linha foi mantida tensionada e como o peso do fio utilizado é muito pequeno a flecha resultante é insignificante (menor que 1 mm). A dimensão máxima da linha permitida pelas dimensões do plano de terra é 5,5 m, que representa linhas reais de 1100 m de comprimento. Este valor é suficiente, já que a linha com esse comprimento pode ser considerada infinita para descargas que atinjam o solo a menos de 100 m do seu ponto central, como mostrado por Rusck [03].

O diâmetro do fio utilizado na representação da linha é de 0,4 mm o que representa um diâmetro real de 80 mm, cerca de 2 vezes o diâmetro dos cabos utilizados em redes telefônicas e 5 vezes o diâmetro dos condutores utilizados em linhas de distribuição. Essa diferença de diâmetros não tem influência para o fenômeno em estudo, já que seu valor altera apenas a impedância característica da linha e os fenômenos relacionados com o efeito corona, o

qual não é levado em conta neste estudo, apesar de estar relacionado com tensões induzidas por descargas atmosféricas.

A figura 4.11 mostra um desenho da linha do modelo.

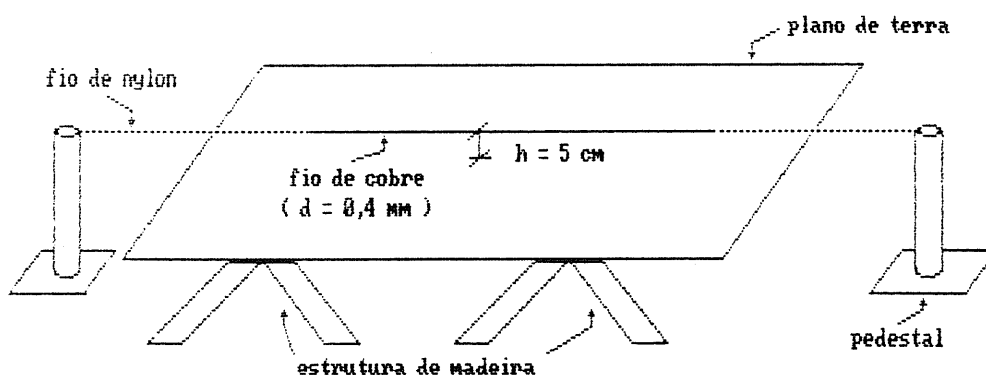


Fig 4.11 - Configuração adotada para a linha do modelo.

Nos casos estudados em que se desejava o casamento de impedâncias nas extremidades da linha, de modo a evitar reflexões, foram utilizados resistores variáveis (potenciômetros) para se efetuar tal casamento. Os potenciômetros utilizados têm variação de 0 a 1000 Ω e são do tipo comumente encontrados em aparelhos eletrônicos. A conexão do potenciômetro à linha e ao plano de terra foi feita com cordalha de cobre, de modo a minimizar a

indutância destas conexões. A utilização de tais resistores variáveis possibilita além da terminação da linha numa resistência de valor igual à sua impedância característica (casamento da linha), a simulação de aterramentos com qualquer valor ôhmico na faixa de sua variação, o que pode ser feito em qualquer ponto da linha.

A verificação da qualidade dos casamento de impedância efetuados da maneira descrita acima foi feita utilizando-se conceitos de ondas viajantes. O conceito utilizado diz respeito à influência da terminação da linha nas ondas aí refletidas. O procedimento utilizado para essa verificação foi o seguinte.

Aplicou-se em uma extremidade da linha uma onda quadrada de baixa frequência e com tempo de subida menor que 2 vezes o tempo de trânsito da linha, de modo a permitir a perfeita identificação da onda refletida na outra extremidade, na qual foi efetuado o casamento. Partindo-se do valor calculado para a impedância característica da linha $Z = 60 \ln \left(\frac{4h}{d} \right)$ [12], onde h é altura da linha e d o seu diâmetro, ajustou-se o potenciômetro até que nenhuma onda refletida fosse percebida, o que foi monitorado com o osciloscópio conectado ao ponto de aplicação da onda. A onda quadrada aplicada foi gerada a partir de um gerador de funções modelo FG 502 fabricado pela Tektronix. A figura

4.12 mostra a localização dos aparelhos nesta medição.

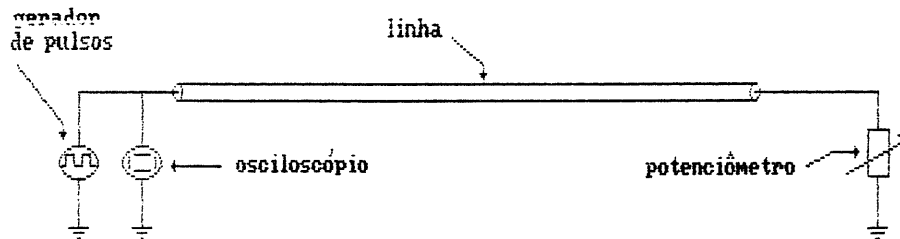
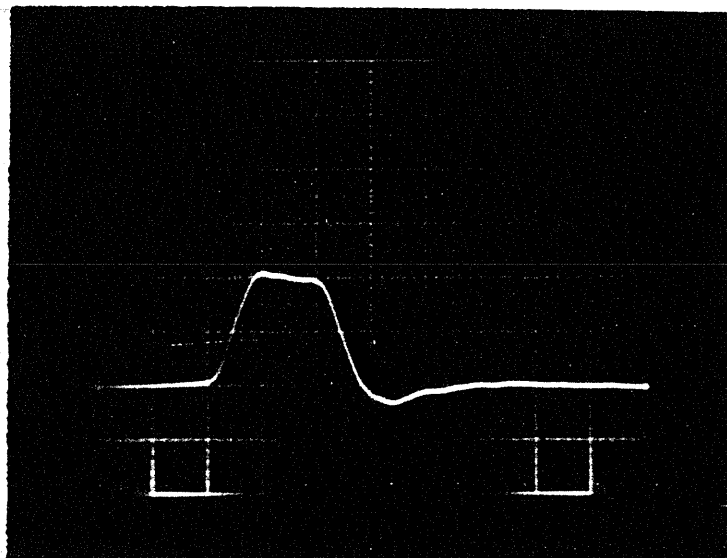


Fig 4.12 - Montagem para verificação da qualidade do casamento da linha.

Como pode ser constatado nos oscilogramas a seguir o casamento proporcionado pelos potenciômetros mostra-se bastante satisfatório. Foram feitas medições com três valores de resistência para a terminação da linha: com a linha em curto, caso A; com linha casada, caso B; e com a linha aberta, caso C. Nota-se também que a frente de onda gerada e a frente de onda refletida no caso C têm o mesmo tempo de frente o que afasta a possibilidade de variação elevada, devido ao efeito pelicular, dos parâmetros do sistema composto pela linha, plano de terra e potenciômetro.

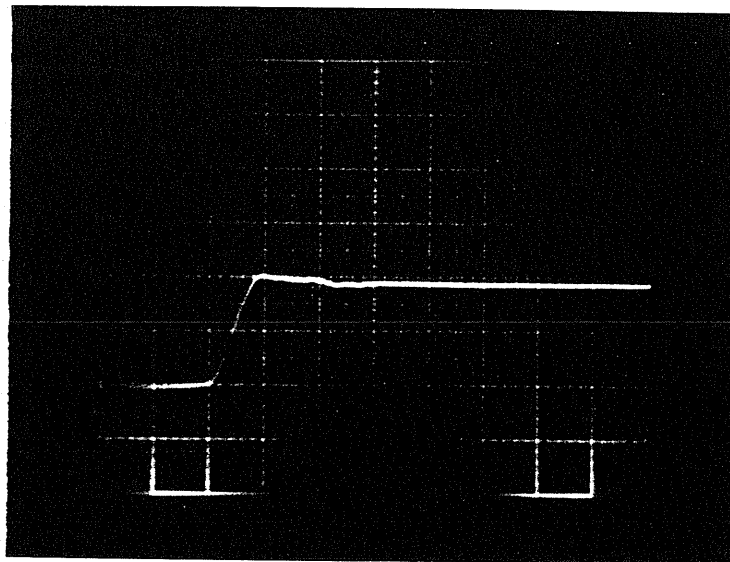
No caso B, linha com extremidade casada, não se

percebeu alteração significativa da onda medida para uma variação de $\pm 10 \Omega$ em torno do valor da impedância característica calculada para a linha a 5 cm de altura, $Z = 373 \Omega$.



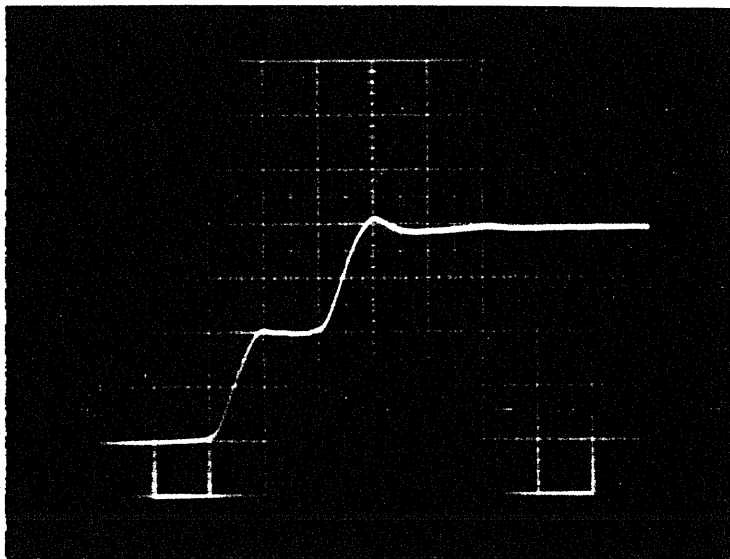
- Oscilograma 4.6 -

Fig 4.13 - Medição para verificação da qualidade do casamento - Caso A -> terminação com 0Ω



- Oscilograma 4.7 -

Fig 4.14 - Medição para verificação da qualidade do casamento - Caso B -> terminação com $Z \Omega$



- Oscilograma 4.8 -

Fig 4.15 - Medição para verificação da qualidade do casamento - Caso C -> terminação com a linha aberta.

4.7 - LOCALIZAÇÃO FÍSICA DAS PARTES DO MODELO

No que diz respeito à localização física das partes do modelo alguma precaução deve ser tomada no sentido de evitar a proximidade de grandes objetos. No presente caso, o modelo reduzido descrito foi implementado dentro do galpão do L.E.A.T. e as distâncias do modelo aos equipamentos dentro do galpão estão mostradas na figura 4.16 (vista superior).

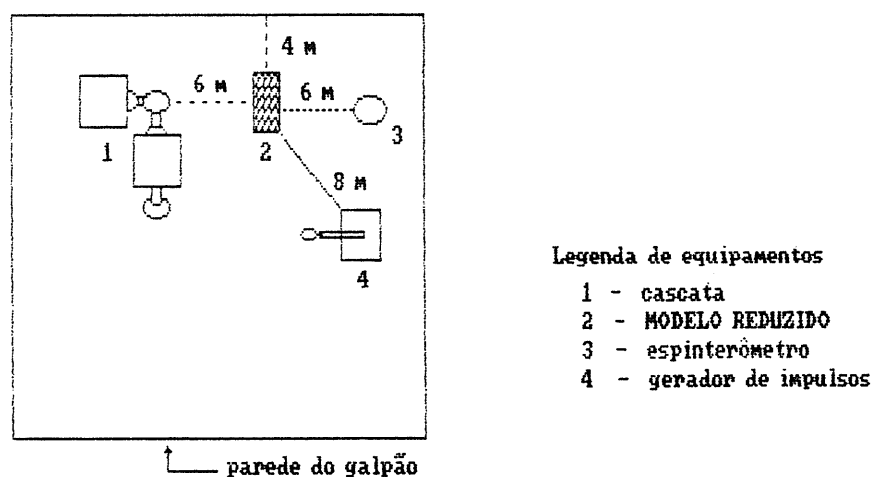


Fig 4.16 - Vista superior da disposição do modelo dentro do galpão do L.E.A.T.

A disposição das partes do modelo propriamente dito é mostrada na figura 4.17 .

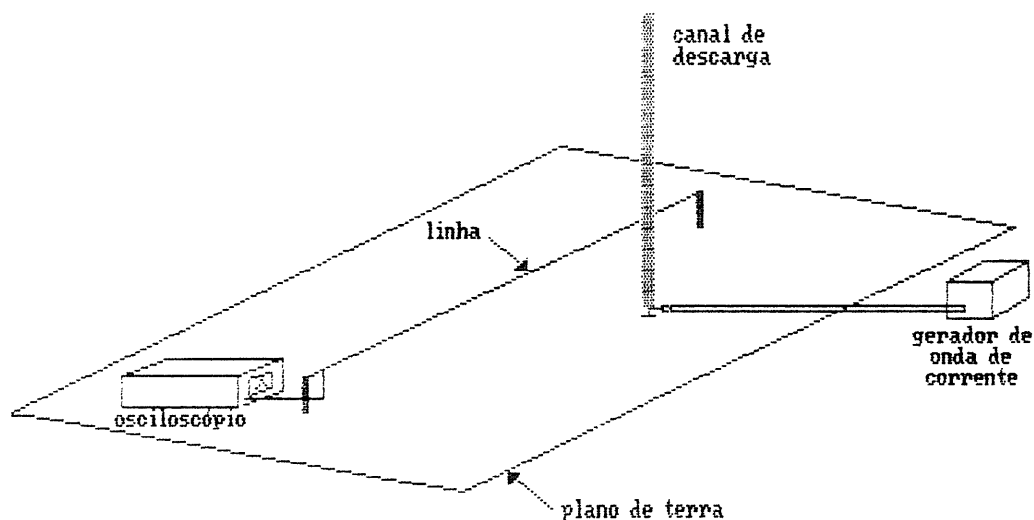


Fig 4.17 - Disposição das partes do modelo.

Como foi dito anteriormente, o plano de terra foi montado sobre uma estrutura de madeira de aproximadamente 60 cm de altura e foi mantido eletricamente isolado em relação à malha de terra do laboratório. O canal de descarga foi fixado ao teto do galpão por meio de uma corda de nylon. A parte do gerador de onda de corrente correspondente ao gerador de degrau foi colocado sob o plano de terra. A linha do modelo foi fixada por meio de fios de nylon e pedestais conforme exposto anteriormente. O osciloscópio para a medição de tensão induzida na linha foi colocado sobre o plano de terra e maiores detalhes a respeito de sua posição serão relatados no próximo capítulo.

Devido ao fato do modelo ter sido implementado em um laboratório de grandes dimensões, como é o caso do L.E.A.T. a influência de ondas refletidas nas paredes, teto ou equipamentos situados em seu interior tornam-se irrelevantes, pois a duração da tensão induzida é menor que o tempo necessário para que as ondas refletidas atinjam o ponto de medição. A influência destas reflexões, apesar de não estar perfeitamente esclarecida, poderia ser considerada como fonte de distorção da onda medidas, caso o modelo fosse implementado em um laboratório de pequenas dimensões.

4.8 - O MODELO REDUZIDO EM SOLO REAL

A maneira mais direta e efetiva de se analisar a influência da resistividade do solo no fenômeno da tensão induzida por descargas atmosféricas, através de técnicas de modelo reduzido, é a implementação do modelo sobre um plano de terra real, ou seja, diretamente sobre o solo. O local escolhido foi o terreno ao lado do galpão do L.E.A.T., em frente ao anexo deste. Sendo mantido o mesmo fator de escala 1:200 do modelo implementado dentro do galpão, a influência da resistividade no fenômeno será enormemente ampliada, uma vez que o fator de escala multiplica a resistividade real do solo. Isto é, para uma resistividade real de $100 \Omega \cdot m$ do solo

do modelo a resistividade simulada é 200 vezes maior, ou seja, 20000 $\Omega \cdot m$.

Nessa implementação praticamente não houveram modificações em nenhuma das partes do modelo. Apenas com relação aos pontos de contato do modelo com a terra (potenciômetros de aterramento da linha, circuito conformador de onda e osciloscópio) e comprimento do canal de descarga houveram alterações, as quais serão discutidas a seguir. A validade dessa simulação no sentido da determinação da influência da resistividade no fenômeno é também discutida.

A ligação dos potenciômetros de casamento da linha e do terminal "terra" do circuito conformador de onda, que antes era feita diretamente às chapas metálicas do plano de terra, agora deve ser feita ao solo por meio de um eletrodo de aterramento. Foi utilizado foi um eletrodo (25 cm de comprimento por 1,41 cm de diâmetro) devido ao fato deste proporcionar um bom contato com a terra e de seu comprimento não ser suficiente para a ocorrência de ondas viajantes, ou seja este eletrodo pode ser tratado como parâmetro concentrado para o modelo em questão. A consequência direta da utilização deste eletrodo de aterramento é o alto valor de resistência de aterramento obtido, o que, como será mostrado a seguir, não acarreta

maiores problemas.

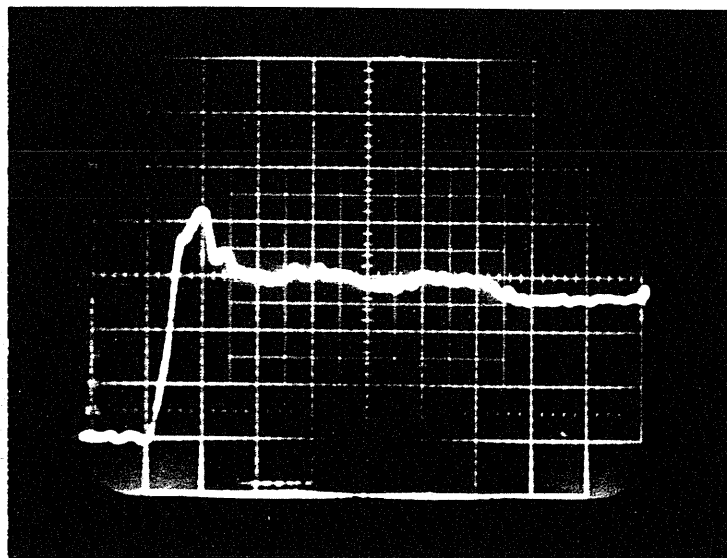
O fato da ligação entre o circuito conformador de onda e o solo ser feita por meio de uma alta resistência de aterramento não interfere significativamente na onda de corrente que flui pelo canal, pois sendo a impedância característica deste elevada ($\approx 3000 \Omega$) este valor prepondera sobre o valor da resistência de aterramento, a qual entra em série no circuito da onda de corrente, como mostra a figura 4.19 . Além do mais a influência da resistência de aterramento é devidamente contabilizada já que é feita uma medição direta da onda de corrente que flui pelo canal de descarga, apresentada no oscilograma 4.9 , figura 4.18 .

ONDA DE CORRENTE DE RETORNO Nº 5

(medida no modelo implementado sobre solo real)

20 mA/div

20 ns/div



- Oscilograma 4.9 -

Tempo de frente = 15 ns

Tempo de cauda > 200 ns

Valor de pico = 84 mA

Canal de descarga \Rightarrow canal confeccionado

Comprimento do canal de descarga = 4,67 m

Configuração do gerador de onda de corrente :

 $R_2 = 50 \Omega$ $R_3 = 50 \Omega$ $C_2 = 56 \text{ pF}$

Fig 4.18 - Oscilograma e parâmetros da onda de corrente de retorno nº 5

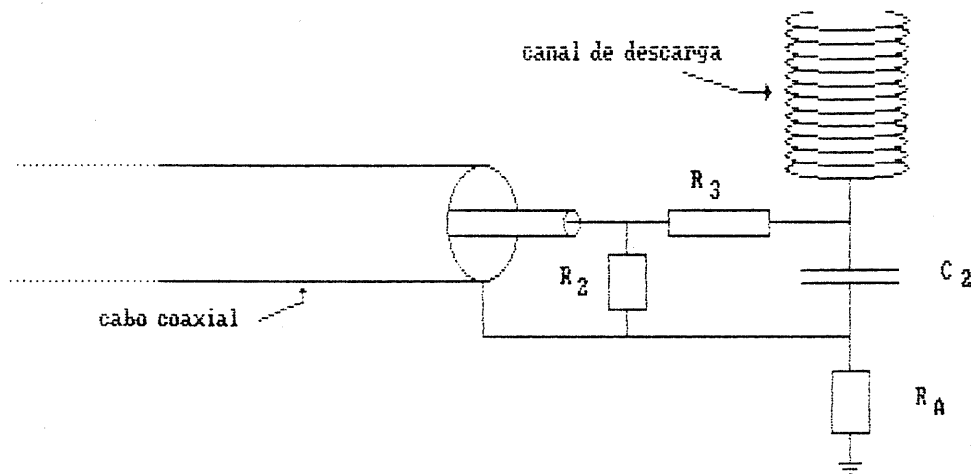


Fig 4.19 - Circuito para a onda de corrente do modelo implementado sobre solo real.

Com relação à conexão do potenciômetro de casamento da linha este foi ajustado de modo a levar em conta o valor da resistência de aterramento, já que foi utilizado o mesmo procedimento de casamento adotado para a linha do modelo implementado no galpão.

A conexão do osciloscópio para medição de tensão induzida foi feita através do mesmo tipo de eletrodo de aterramento. Isto não altera o valor da tensão induzida medida uma vez que a impedância de entrada do osciloscópio é muito maior que R_A e estes dois parâmetros entram em série

no circuito de medição, como mostra a figura 4.20 .

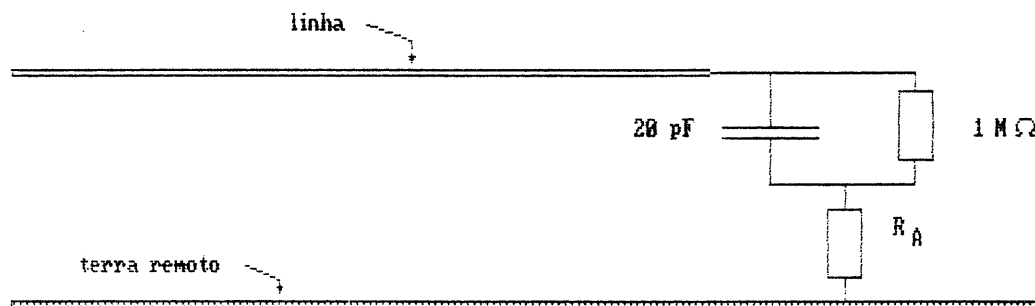


Fig 4.20 - Conexão do osciloscópio para medição de tensão induzida no modelo em solo real.

A modificação do comprimento do canal de descarga se deveu à não disponibilidade de estruturas que permitissem a sustentação do canal à mesma altura do modelo implementado dentro do galpão. A altura máxima do canal no modelo em solo real é de 5,0 m. A sustentação do canal foi feita por meio de um fio de nylon cujas extremidades foram fixadas em um poste de iluminação e na parede do anexo do laboratório, como mostra a figura 4.21 .

A reflexão da onda de corrente na extremidade superior do canal influencia a tensão induzida no instante t

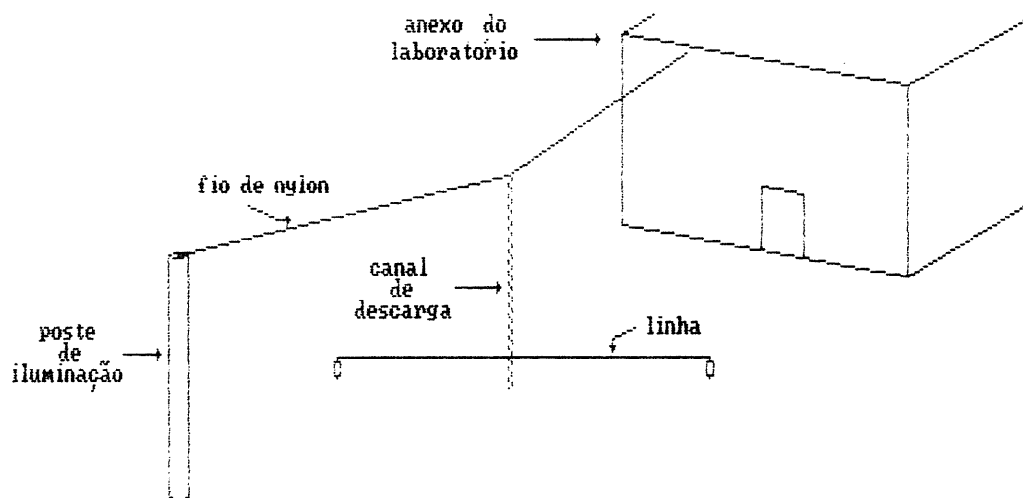


Fig 4.21 - Sustentação do canal no modelo em solo real.

igual a:

$$t = \frac{y}{\text{velocidade da corrente no canal}} + \frac{y_1}{c} = 151,7 \text{ ns}$$

sendo y , y_1 e y_2 definidos na figura 4.22 .

Descontando o tempo necessário para que a perturbação causada pela onda de corrente no início do canal atinja o ponto de medição $T = y_2/c = 14,7 \text{ ns}$, tem-se um tempo útil de medição igual a 137 ns , que é maior que a maioria das ondas de tensão induzida medidas. Portanto o fato do comprimento do canal ter sido reduzido não altera as medições realizadas.

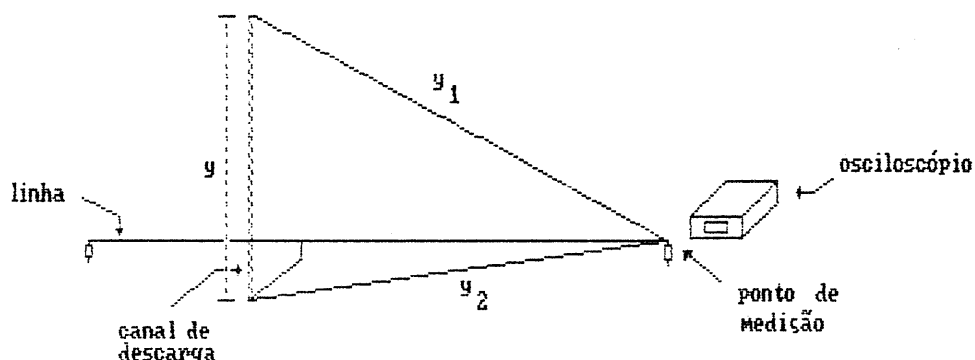
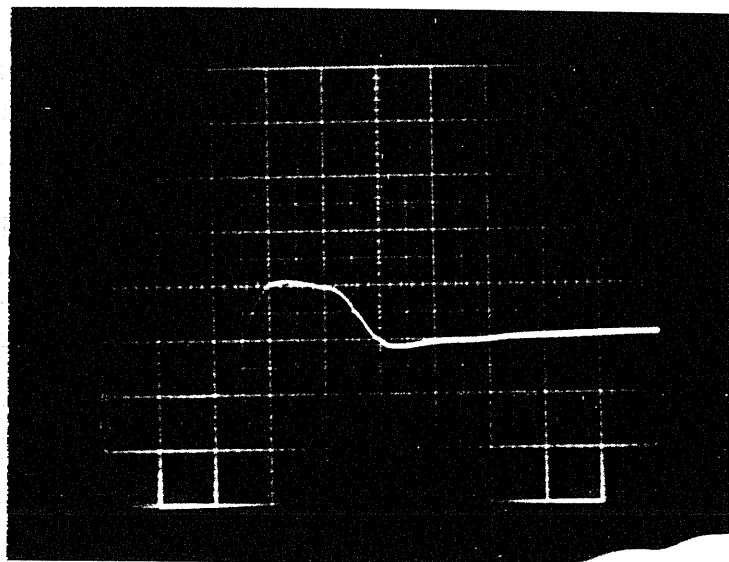


Fig 4.22 - Distâncias para determinação do tempo útil de medição.

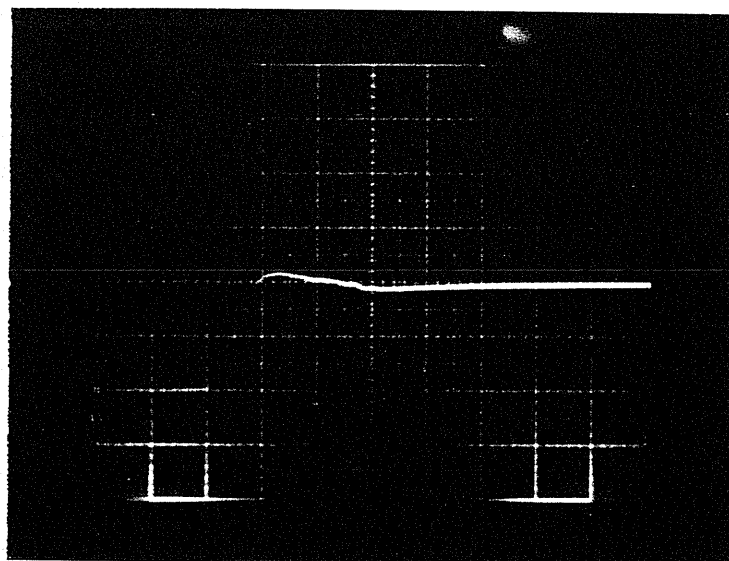
A influência da resistividade do solo no fenômeno da tensão induzida pode se dar de duas maneiras distintas. A primeira, alterando o campo eletromagnético gerado pela descarga à medida que esse campo se propaga sobre o solo, como já foi discutido no capítulo anterior. A segunda, atenuando e distorcendo as ondas de tensão induzida que se propagam na linha, conforme previsto por Carson [15] e Rüdénberg [14]. Como a medição de tensão induzida não permite a avaliação em separado de cada um desses efeitos foi feito um grupo de medições de modo a atingir esse objetivo. Essas medições foram executadas de maneira

semelhante àquela citada no item 6 deste capítulo, quando da avaliação da qualidade do casamento da linha. Dessa forma pode-se avaliar a influência da resistividade do solo na propagação de ondas na linha do modelo, como mostram os oscilogramas a seguir. Foram utilizadas três terminações para a linha: caso A, potenciômetro curto-circuitado; caso B, potenciômetro ajustado para o casamento da linha e caso C, potenciômetro aberto.



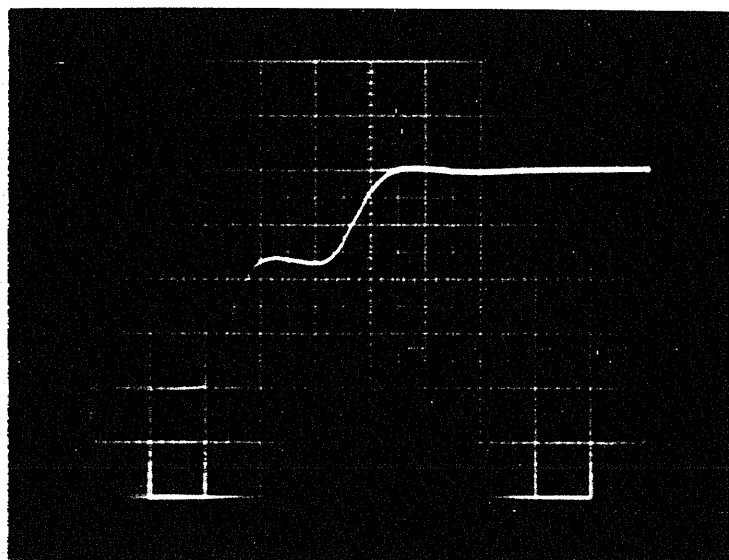
- Oscilograma 4.10 -

Fig 4.23 - Caso A -> terminação com 0Ω



- Oscilograma 4.11 -

Fig 4.24 - Caso B -> terminação com $Z \neq \Omega$



- Oscilograma 4.12 -

Fig 4.25 - Caso C -> terminação com a linha aberta.

No oscilograma 4.10 nota-se que mesmo com a linha em curto ocorreu um coeficiente de reflexão positivo, o qual é devido à resistência de aterramento R_A . O valor de R_A pode ser estimado a partir deste coeficiente de reflexão da seguinte maneira :

- como mostrado por Naidu [08], o coeficiente de reflexão para uma linha com terminação resistiva é dado por :

$$C_R = \frac{R - Z}{R + Z}$$

onde R é o valor da resistência da terminação e Z a impedância característica da linha. No oscilograma 4.10 , figura 4.23 , indicado pelas setas, tem-se que o valor de pico da onda injetada é de 2,1 divisões e o valor de pico dessa onda, após a influência da reflexão na outra extremidade da linha, é de 0,9 divisões. Isto mostra que houve uma redução de 57% na amplitude da onda injetada, o que corresponde a um coeficiente de reflexão de -0,57 na extremidade em curto da linha. Tem-se então que, a partir do valor de $C_R = - 0,57$, obtido do oscilograma 4.10, e considerando para Z o valor de 373Ω (altura da linha igual a 5 cm) o valor de R_A é 102Ω .

Pode-se observar no oscilogram 4.12, figura 4.25 que a taxa de subida da onda refletida é menor que a da onda injetada, o que é um dos efeitos previsíveis da

resistividade. Neste oscilograma nota-se ainda uma atenuação de 30% no valor de pico da onda refletida. Esta atenuação é devida, provavelmente, ao efeito da resistividade do solo e a um possível desajuste acidental do potenciômetro utilizado para casamento de impedâncias entre a linha e o gerador de ondas utilizado.

No caso B, linha casada, o potenciômetro foi ajustado em 270Ω , o que mostra a validade do cálculo de R_A desenvolvido. Pode-se notar também neste oscilograma que o casamento proporcionado pelo potenciômetro é tão satisfatório quanto o obtido no modelo implementado sobre o plano metálico.

Estas medições mostram que o efeito da resistividade nas ondas que se propagam na linha do modelo não é muito pronunciado, o que facilita a análise da onda de tensão induzida obtida neste modelo.

O valor da resistividade do solo onde foi implementado o modelo já foi medido ao longo de todas as estações do ano, tendo sido encontrados valores de 100 a $1000 \Omega \cdot m$. Como as medições foram realizadas no mês de março, próximo à estação chuvosa, será considerado o valor de $100 \Omega \cdot m$ para a resistividade do solo do modelo. Esta consideração é, obviamente, conservativa.

CAPÍTULO 5

DESCRIBÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO UTILIZADO

5.1 - INTRODUÇÃO

Um dos pontos críticos da simulação analógica é o sistema de medição utilizado, pois este é a interface que possibilita a observação e registro do fenômeno estudado. Portanto é de fundamental importância que, uma vez definido, o sistema de medição a ser utilizado seja calibrado e testado de modo a reduzir ao mínimo os erros por este introduzido. A definição do sistema de medição deve ser feita mediante a análise de certas características básicas inerentes a este, as quais são discutidas a seguir, juntamente com a sua relação com as medições realizadas.

A primeira dessas características é a largura de banda de passagem do sistema, ou seja, a frequência máxima de sinais (tensão ou corrente) que podem ser medidos sem distorção ou atenuação. Ao se trabalhar em modelo reduzido com um fator de escala tão elevado (1/200) as frequências dos sinais a serem medidos tornam-se elevadas na mesma proporção. Pode-se tomar como o sinal mais rápido a ser

canal de descarga, estando seu tempo de frente na faixa de 10 ns. Uma outra característica intimamente relacionada com a banda de passagem e igualmente importante é o tempo de subida do sistema de medição.

A geração de onda de corrente e tensão com tempos de frente próximos a 10 ns implicam na utilização de elementos de chaveamento com tempos de fechamento muito pequenos (menor que 5 ns). O elemento de chaveamento disponível, o relé de mercúrio do gerador de degrau, não tem capacidade para chavear tensões elevadas. Dessa maneira as ondas de corrente possíveis de serem geradas e injetadas no canal de descarga são de baixa amplitude (menor que 100 mA). Como o valor de pico da tensão induzida é proporcional ao valor de pico da corrente de retorno essas ondas são também de baixa amplitude. Portanto é necessário que o sistema de medição tenha sensibilidade para a medição de tais sinais.

Como a duração dos sinais a serem medidos é muito pequena (menor que 200 ns), estes podem ser tratados como eventos aleatórios, é necessário então que o sistema de medição possibilite a visualização de tais eventos, inclusive de suas frentes de onda. Isto implica na necessidade, por parte deste sistema, de um circuito especial que possibilite o registro de eventos aleatórios.

Finalmente é necessário que tal sistema possibilite o registro dos sinais medidos e também que seja um equipamento o mais portátil possível, já que é necessário a constante locomoção deste.

Baseado no exposto acima analisou-se as características dos equipamentos de medição disponíveis e definiu-se o sistema de medição. As características técnicas, a localização dos equipamentos de medição utilizados e simulações do sistema como um todo são apresentadas a seguir.

5.2 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição utilizado é composto pelos seguintes equipamentos:

- 1 osciloscópio,
- 1 ponta de prova para medição de tensão,
- 1 ponta de prova para medição de corrente,
- 1 câmera fotográfica,

cujas principais características são apresentadas a seguir.

5.2.1 - Osciloscópio

MODELO - 466 - Osciloscópio portátil com memória

FABRICANTE - Tektronix

BANDA DE PASSAGEM - DC a 100 MHz (medida a -3 dB)
TEMPO DE SUBIDA - $\leq 3,5$ ns
SENSIBILIDADE - 5 mV/div a 5 V/div (seqüência 1-2-5)
BASE DE TEMPO - 50 ns/div a 0,5 s/div (seqüência 1-2-5)
(possível de ser extendida a 5 ns/div)

IMPEDÂNCIA
DE ENTRADA - $1 \text{ M}\Omega \pm 2\%$ em paralelo com 20 pF

SISTEMA
DE DISPARO - varredura disparada pelo sinal de entrada ou
por sinal externo, possui uma linha de retardo
que possibilita a visualização da frente de
onda.

MEMÓRIA - congelamento automático na tela do
osciloscópio da forma de onda medida
por um período maior que 15 segundos.

5.2.2 - Ponta de prova para a medição de tensão

MODELO - P6009 Ponta de prova para a medição de tensão

FABRICANTE - Tektronix

BANDA DE PASSAGEM - DC a 120 MHz

TEMPO DE SUBIDA - 2,5 ns

ATENUAÇÃO - 100 vezes

TENSÃO MÁXIMA DE ENTRADA - 1500 V

CAPACITÂNCIA DE ENTRADA - 2,5 pF

RESISTÊNCIA DE ENTRADA - $10 \text{ M}\Omega$

COMPATIBILIDADE
COM OSCILOSCÓPIOS - possibilita casamento com
osciloscópios com impedância de
entrada de 1 M Ω em paralelo com
capacitor na faixa de 12 a 47 pF.

5.2.3 - Ponta de prova para medição de corrente

MODELO - A6302 Ponta de prova para medição de corrente

FABRICANTE - Tektronix

BANDA DE PASSAGEM - DC a 50 MHz

TEMPO DE SUBIDA - < 7 ns

SENSIBILIDADE - 1 mA/div a 5 A/div

IMPEDÂNCIA

DE INSERÇÃO - 0,1 Ω a 5 MHz e 0,5 Ω a 50 MHz

(conector em forma de alicate)

ACESSÓRIOS - Amplificador de sonda de corrente
modelo AM 503 , possibilita conexão com
equipamentos com entrada em 50 Ω ou 1 M Ω .

OUTROS - medição de corrente por célula de efeito "Hall".

5.2.4 - Câmera fotográfica

MODELO - ACMEL CRT CAMERA M-085 D

FABRICANTE - Asanuma Camera Mechanical
Laboratory & Co., Ltd.

TEMPO DE ABERTURA - 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/15, 1/30, 1/60,
1/125 segundos.

ABERTURA DO DIAFRAGMA - 32 22 16 11 8 5,6 4 3,5 mm

FILME - Polaroid 667

OUTROS - acoplável à tela do osciloscópio 466 Tektronix.

5.3 - LOCALIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.

5.3.1 - Medição da onda de corrente no canal de descarga

No caso da medição de corrente o osciloscópio e o amplificador da ponta de prova foram colocados fora do plano de terra, próximo a este, como mostrado na figura a seguir. Apenas a ponta de prova de corrente localizava-se em cima do plano de terra. A ponta foi conectada à cordoalha de ligação entre o circuito conformador de onda e o plano de terra. Essa posição foi escolhida no sentido de minimizar a influência da presença da ponta na medição, a qual seria maior caso a conexão fosse feita à cordoalha de ligação entre o circuito conformador de onda e o canal de descarga.

A utilização de uma ponta de prova diferencial conectada a um resistor em série com o circuito de corrente possibilitaria também a medição da onda de corrente no canal de descarga.

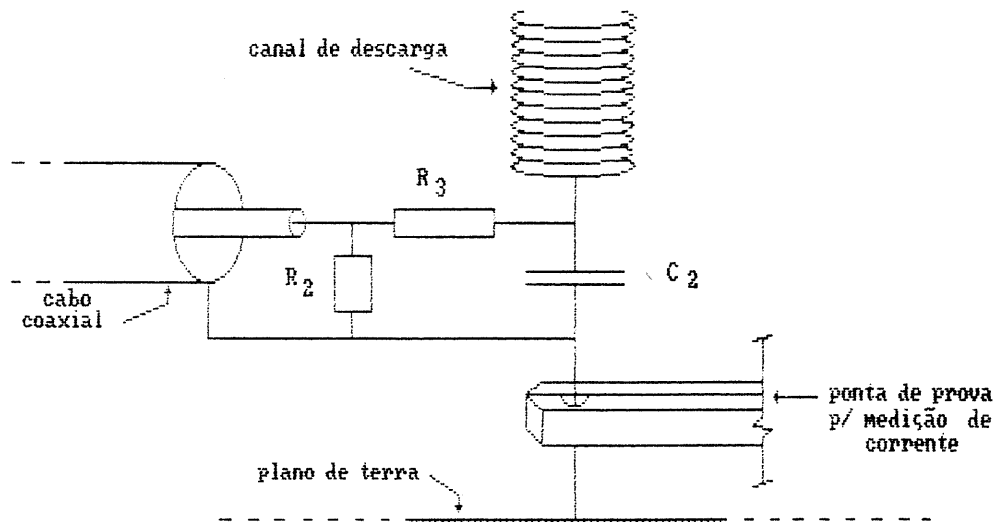


Fig 5.1 - Disposição dos equipamentos para medição da onda de corrente no canal de descarga.

5.3.2 - Medição de campo elétrico

A medição do campo elétrico gerado pela corrente de retorno foi feita por meio de uma antena especialmente desenvolvida para este propósito e adequada ao modelo reduzido implementado, de modo que não cause distorção das linhas de campo. O princípio de funcionamento da antena é baseado na própria teoria de tensão induzida.

Uma antena, normalmente, fornece como sinal para o equipamento de medição uma tensão a qual é proporcional ao campo elétrico que se deseja medir. Entretanto, é

importante que a configuração dos condutores da antena não alterem a relação de proporcionalidade do sinal de tensão produzido com o campo elétrico a ser medido, e que essa relação seja completamente conhecida. No caso do campo elétrico gerado pela corrente de retorno, em um arranjo de condutores menos cuidadoso poderiam ocorrer ondas viajantes, as quais provavelmente alterariam a onda medida. Um arranjo que evita todos estes problemas é constituído por um anel disposto em torno do canal de descarga a uma certa altura do plano de terra. Estando este anel perfeitamente centrado com relação ao canal de descarga, todos os seus pontos estariam à uma mesma distância, em qualquer instante, da fonte de campo elétrico, a corrente de retorno. Portanto, todos estes pontos perceberiam a mesma tensão induzida e não ocorreriam ondas viajantes. A relação de proporcionalidade dessa antena é exatamente a altura em que o anel está em relação ao plano de terra. Desse modo, a tensão medida em qualquer ponto do anel, por meio de uma ponta de prova, é proporcional ao campo elétrico produzido pela corrente de retorno a uma distância do canal de descarga igual a raio do anel.

O anel utilizado para as medições foi confeccionado a partir de um condutor com diâmetro igual a 0,66 cm. O raio do anel foi escolhido igual a 15,25 cm de modo que se tenha uma boa sensibilidade na

medição. O diâmetro do condutor é relativamente grande, mas com essa dimensão, o efeito de carga da capacitância da ponta de prova é menos pronunciado. Por essa razão, é importante que se utilize uma ponta de prova de baixa capacitância. Na figura 5.2 é mostrado a disposição do anel e da ponta de prova utilizados para a medição de campo elétrico. Estas medições foram realizadas no modelo implementado sobre o plano metálico.

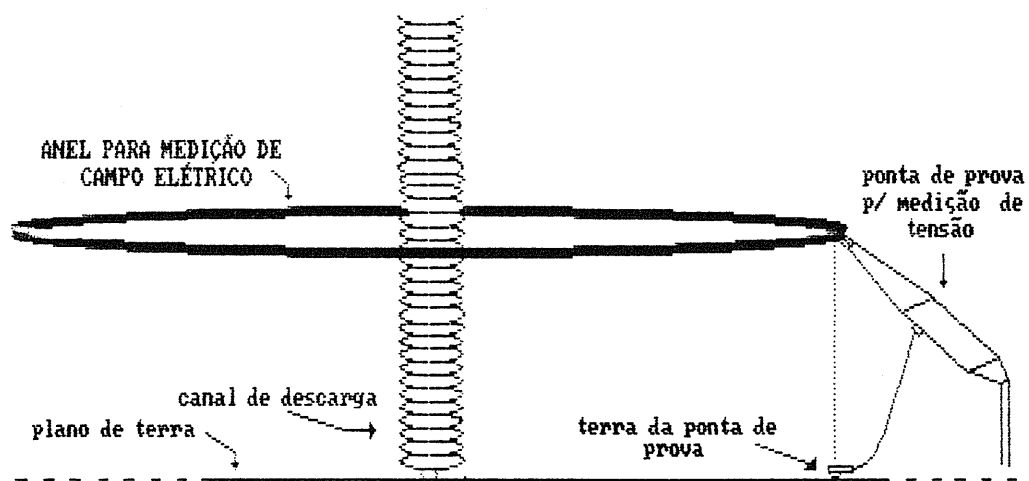


Fig 5.2 - Disposição dos equipamentos para medição da onda de tensão relativa à medição de campo elétrico.

5.3.3 - Medição de tensão induzida

A medição de tensão induzida foi feita sem a

utilização de pontas de prova, sendo a terminação da linha ligada diretamente à entrada do osciloscópio, o qual foi colocado sobre o plano de terra, junto à terminação da linha. Desse modo a conexão entre o ponto de medição (extremidade da linha) e a entrada do osciloscópio foi feita com o menor comprimento possível, reduzindo ao mínimo a indutância desta conexão. O osciloscópio foi aterrado diretamente ao plano de terra, de modo que sua carcaça se mantivesse no potencial de terra, evitando a interferência direta das ondas eletromagnéticas geradas pela descarga. A figura a seguir mostra os detalhes desta conexão.

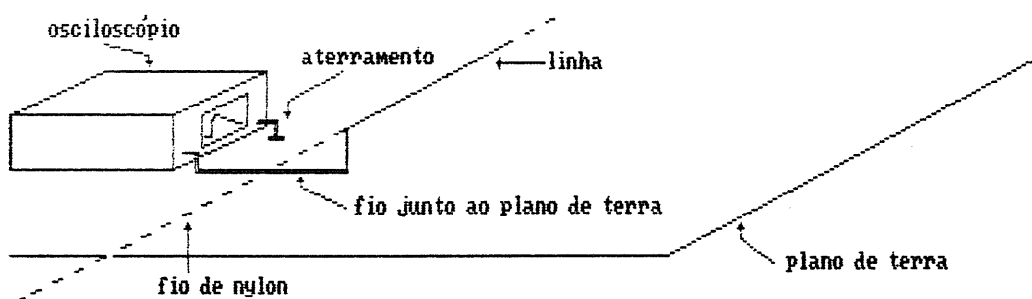


Fig 5.3 - Disposição dos equipamentos para a medição de tensão induzida.

O fato do osciloscópio estar sobre o plano de terra não acarreta problemas à medição, pois a distorção por este causada ao campo eletromagnético se dá depois do ponto de medição, sendo mantido livre o espaço entre o canal de descarga e a extremidade da linha. Esta afirmação é ainda reforçada pelo fato da tensão medida ser fruto da indução que ocorre em todos os pontos da linha, e não somente no ponto de medição.

5.4 - SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Como o sistema de medição utilizado não é, logicamente, ideal, este consome energia do modelo no ponto de medição. Com o objetivo de avaliar qualitativamente a influência deste sistema na medição foram feitas algumas simulações em computador. A medição de tensão induzida é, dentre as medições realizadas, a que pode ser mais afetada por este tipo de influência, já que a tensão induzida envolve pouca energia. Portanto o grupo de simulações realizado tem o objetivo de avaliar a influência deste sistema na medição de tensão induzida. As simulações realizadas foram feitas utilizando-se um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos desenvolvido no L.E.A.T. .

O sistema simulado, o qual retrata a medição de

tensão induzida, é composto por uma fonte de tensão ideal e uma terminação, a qual representa o sistema de medição, ligadas por uma linha de transmissão sem perdas. A fonte de tensão injeta um impulso de tensão em rampa, com tempo de frente igual a 20 ns, na linha, o qual se propaga nesta até encontrar a terminação, onde é distorcido por esta. O efeito da terminação no impulso de tensão é similar ao do sistema de medição nas ondas de tensão induzida que se propagam na linha do modelo.

Foram simuladas duas terminações: uma composta pela capacitância e resistência de entrada do osciloscópio e outra, incluindo também a indutância do fio de conexão da linha com a entrada do osciloscópio (estimada em 55,2 nH).

Como a impedância de entrada do osciloscópio representa uma terminação aberta para a linha, a onda de tensão no osciloscópio tem o dobro da amplitude da onda de tensão injetada pela fonte. A seguir são apresentados os dois sistemas simulados e os resultados destas simulações.

Caso 1 - representação do sistema de medição apenas pela impedância de entrada do osciloscópio.

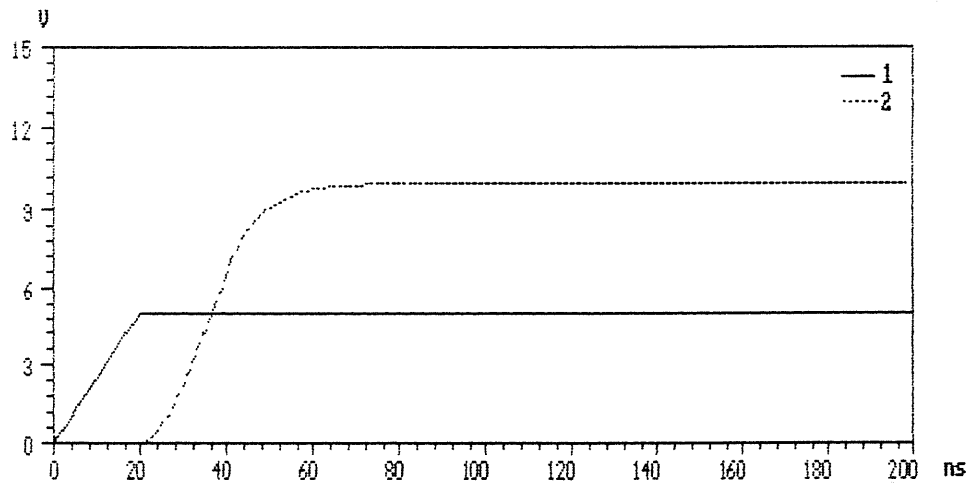
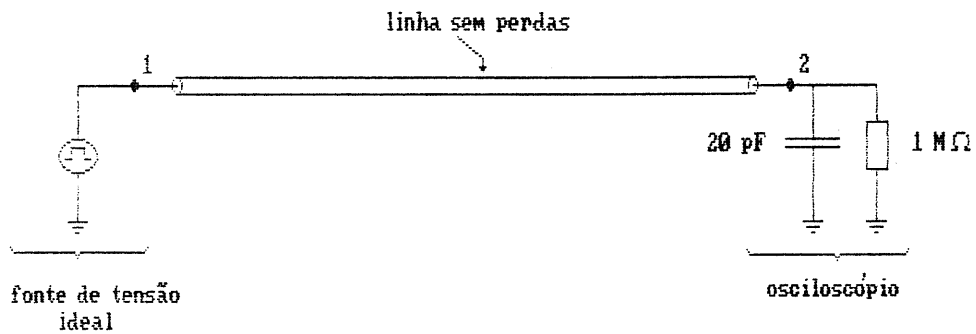


Fig. 5.4 - Diagrama de simulação e resultado de simulação para o caso 1.

Caso 2 - representação do sistema de medição pela impedância de entrada do osciloscópio mais a indutância do fio de conexão entre a extremidade da linha e a entrada do osciloscópio.

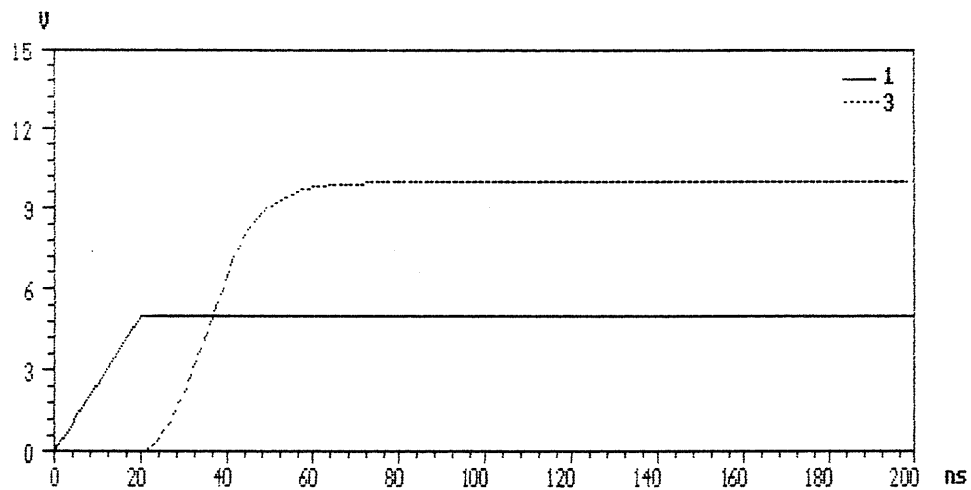
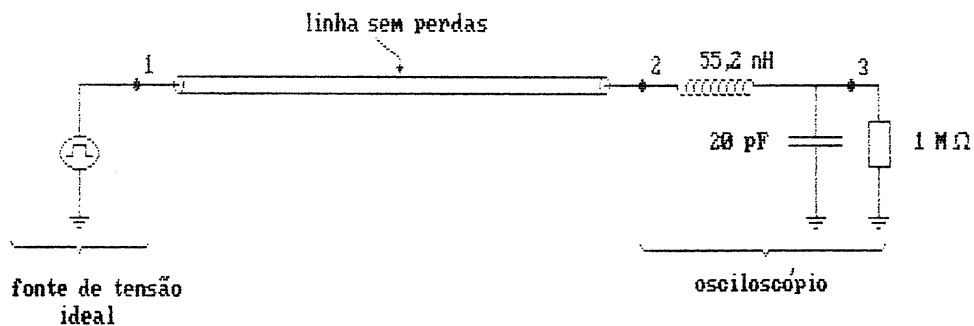


Fig. 5.5 - Diagrama e resultado de simulação para o caso 2

Como pôde ser comprovado pelas simulações apresentadas as distorções introduzidas pelo sistema de medição não comprometem o resultado das medições realizadas, já que estas distorções implicam basicamente em um atraso nas frentes de onda, não alterando significativamente o valor de pico.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS

6.1 - INTRODUÇÃO

As medições realizadas no modelo reduzido apresentado no capítulo 4 foram divididas em seis grupos para melhor clareza na sua apresentação. Os três primeiros grupos são dedicados ao estudo da teoria de Rusck propriamente dita, visando a sua validação, e à comprovação da metodologia de cálculo proposta pelos trabalhos de Lopes [09] e Fonseca [10]. Os três últimos grupos foram realizados com o objetivo de demonstrar a potencialidade da simulação analógica por meio de modelos reduzidos na resolução de problemas envolvendo campos eletromagnéticos variantes no tempo com condições de fronteira assimétricas. A seguir é feita uma descrição sucinta de cada um dos grupos de medição.

No primeiro grupo foram realizadas medições de tensão induzida na linha do modelo para várias configurações desta. Tais configurações envolveram várias combinações de comprimento e terminações da linha. Foram variados também os parâmetros da corrente de retorno: tempo de frente e velocidade de propagação. As medições realizadas neste grupo

foram comparadas com simulações obtidas através do programa para cálculo de tensão induzida desenvolvido por Lopes [09], baseado na teoria de Rusck.

No segundo grupo foram realizadas medições de campo elétrico produzido pela corrente de descarga. Foram feitas medições com o anel de medição a diferentes alturas do plano de terra. O resultado destas medições foram comparados com o cálculo realizado por Fonseca [10].

As medições do grupo três foram as únicas realizadas sobre solo real. Neste grupo foram feitas medições de tensão induzida para uma configuração básica da linha, variando-se apenas as suas terminações. Estas medições também foram comparadas com simulações obtidas através do programa desenvolvido por Lopes.

No grupo quatro foi feita uma medição de tensão induzida em uma linha com trecho aéreo e trecho subterrâneo. Foi feita também a comparação entre esta medição e a simulação realizada por Lopes.

Nos grupos cinco e seis foram realizadas medições para estudo do efeito da tensão induzida em configurações específicas de redes telefônicas. No grupo cinco foi estudada a tensão induzida entre condutor interno e

blindagem de um cabo telefônico com trechos aéreo e subterrâneo para vários procedimentos de transição (aéreo/subterrâneo). As medições do grupo seis tiveram por objetivo o estudo da tensão induzida entre condutor interno e blindagem de um cabo telefônico em função da exposição do fio externo. Os detalhes destas medições são apresentados posteriormente. Para estas medições não são apresentadas nenhuma comparação com simulações, uma vez que ainda não se encontra disponível uma metodologia para cálculo de tensão induzida em tais arranjos.

A seqüência de apresentação de cada medição é a seguinte: inicialmente é apresentado o caso a que a medição se refere, em seguida o oscilograma de medição e por último a comparação com a simulação. Os comentários são apresentados referidos a um grupo de medições ou a uma medição, quando necessário.

6.2 - GRUPO DE MEDIÇÕES Nº 1

O arranjo básico utilizado na obtenção das ondas de tensão induzida de números 1.1 a 1.11 é apresentado na figura 6.1.

As ondas de tensão induzida de números 1.1 a 1.5 são referentes à onda de corrente número 1, apresentada no

capítulo 4.

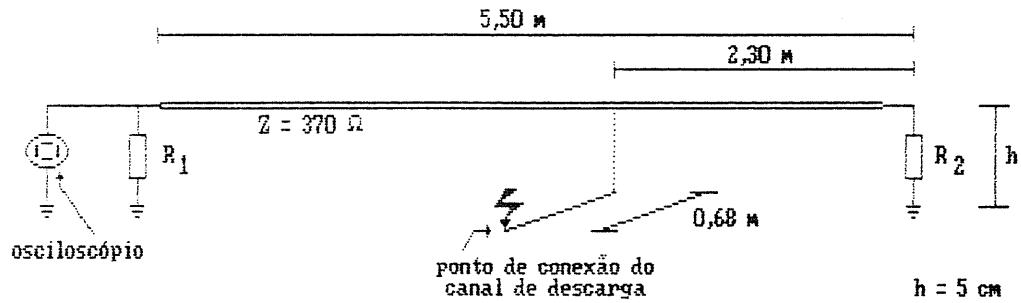
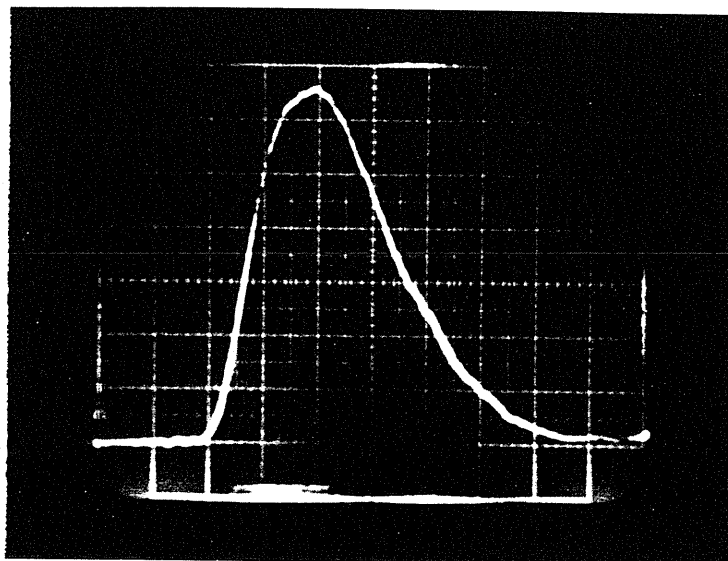


Fig 6.1 - Arranjo de simulação n° 1.

Com o objetivo de se colocar em uma mesma página o oscilograma de tensão induzida e a comparação entre medição e simulação, as ondas de tensão induzidas são mostradas sempre no início de uma página, o que pode ocasionar alguns espaços em branco ao longo do texto.

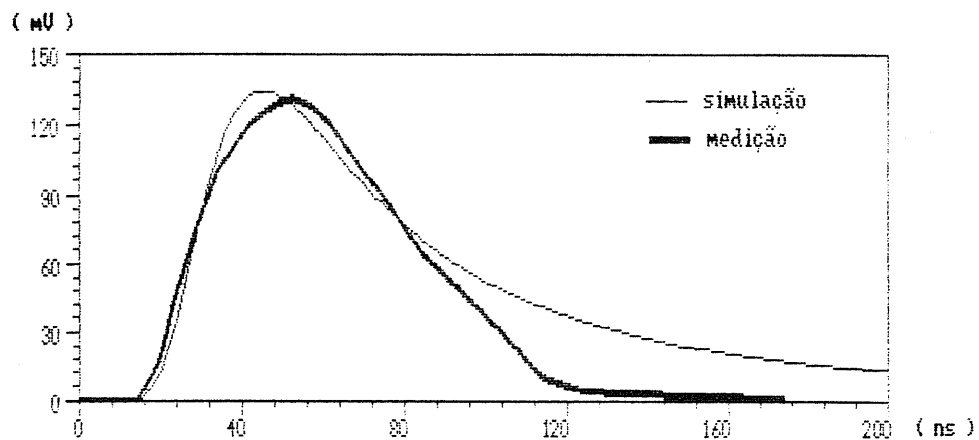
. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.1



(a)

Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 20 ns/div

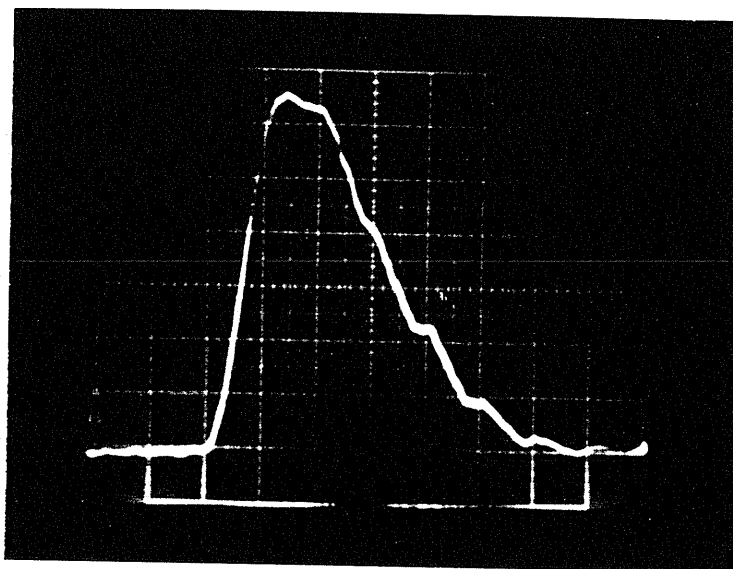
Onda de corrente: N^o 1 $R_1 = \infty$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.2 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.1

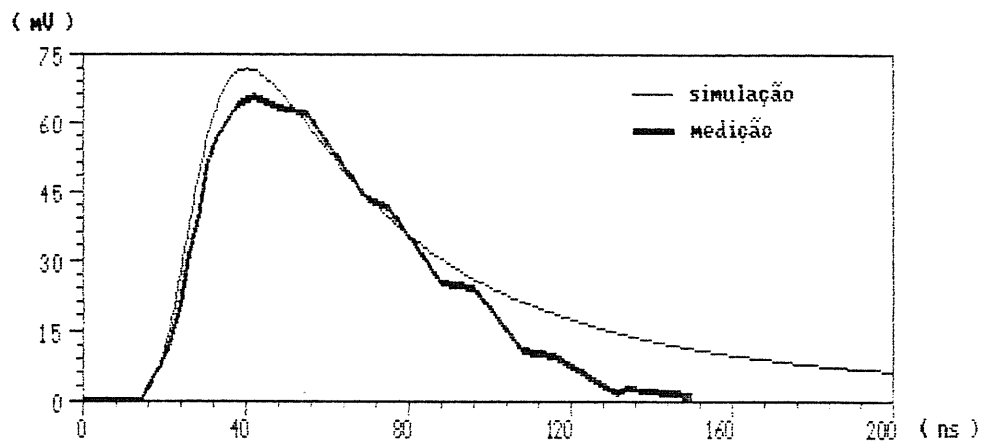
. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.2



(a)

Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 20 ns/div

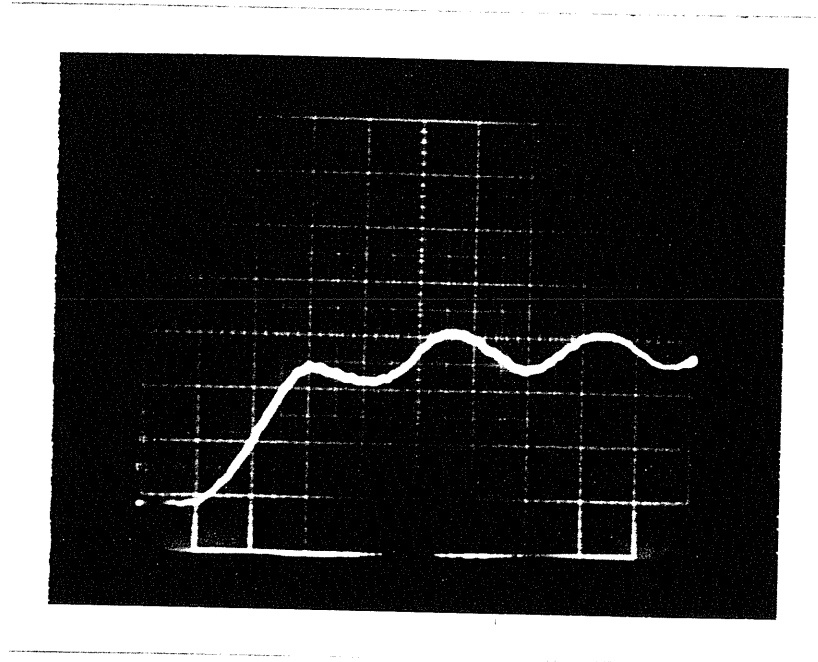
Onda de corrente: N^o 1 R₁ = 370 Ω R₂ = 370 Ω



(b)

Fig 6.3 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.2

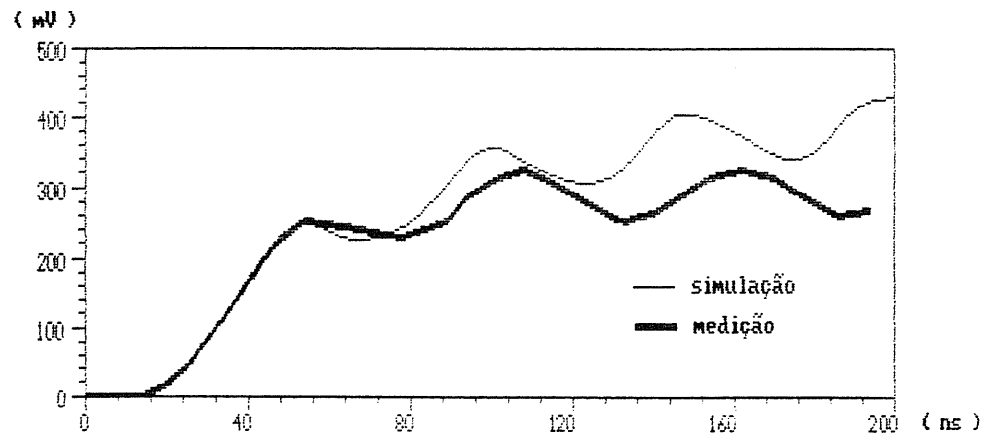
. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.3



(a)

Escalas: vertical - 100 mV/div horizontal - 20 ns/div

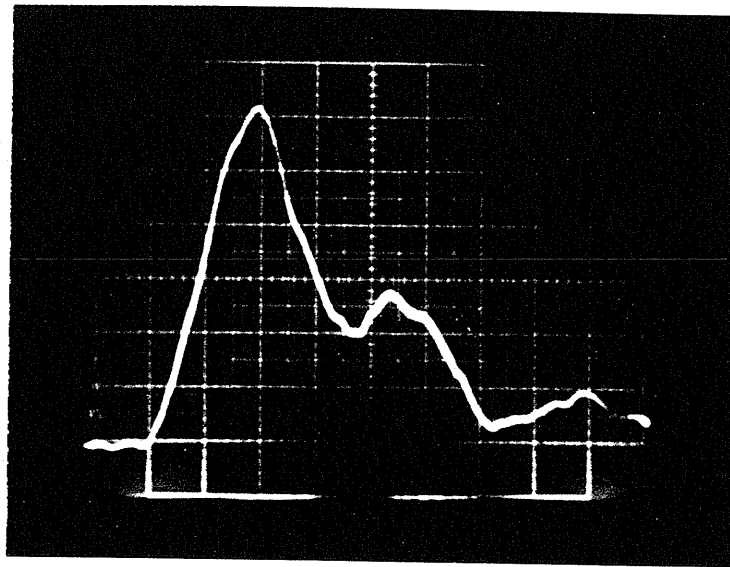
Onda de corrente: N^o 1 $R_1 = \infty$ $R_2 = \infty$



(b)

Fig 6.4 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.3

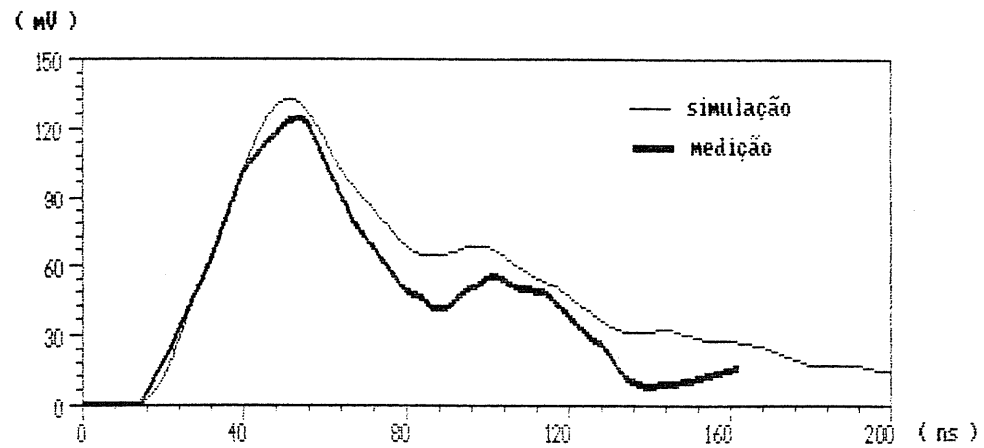
. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 1.4



(a)

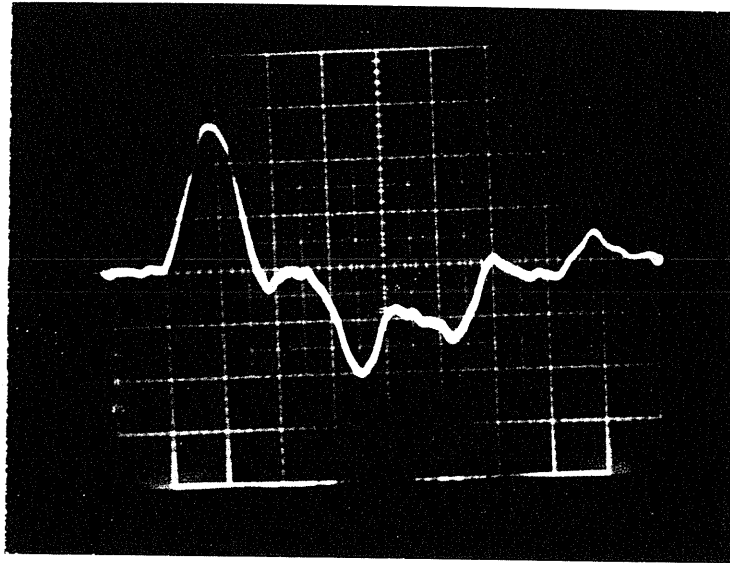
Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: Nº 1 $R_1 = 370 \Omega$ $R_2 = \infty$



(b)

Fig 6.5 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida Nº 1.4

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.5

(a)

Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 1

$R_1 = 370 \Omega$

$R_2 = 0 \Omega$

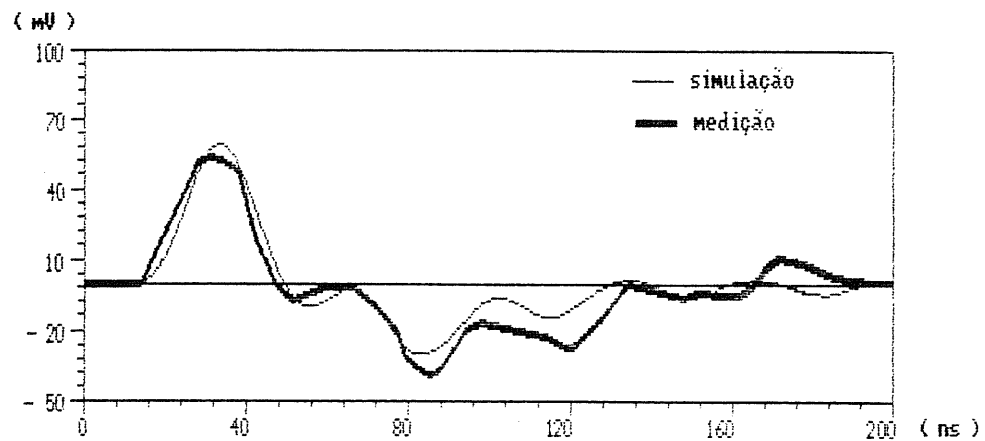


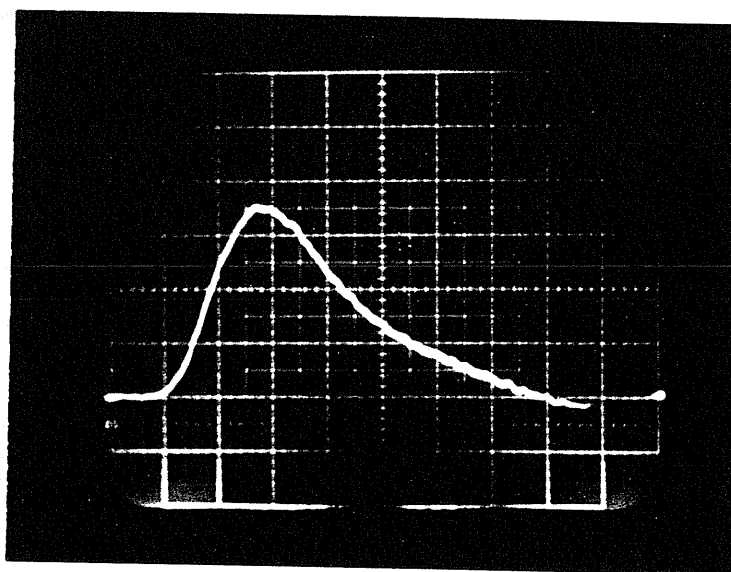
Fig 6.6 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.5

- COMENTÁRIOS :

. A ausência de oscilações de alta frequência nas ondas de tensão induzida é um indício de que realmente as oscilações nas ondas de corrente estavam restritas à parte inicial do canal de descarga, como foi dito no capítulo 4.

. As oscilações na cauda da onda de tensão induzida n^o 1.2 provavelmente se deveram a uma alteração accidental no valor do potenciômetro de casamento R₂ , já que o intervalo de tempo entre essas oscilações é próximo ao tempo de trânsito da linha do modelo.

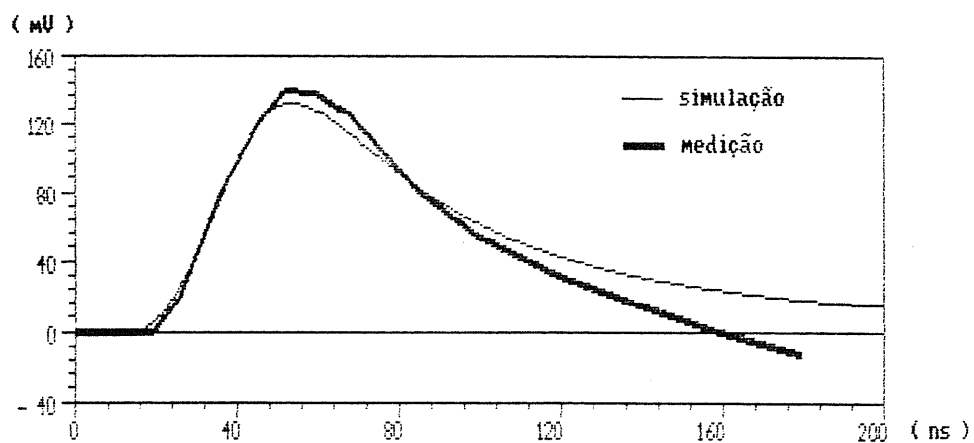
A seguir são apresentadas as ondas de tensão induzida de números 1.6 a 1.11. As ondas 1.6 e 1.7 são referentes à onda de corrente n^o 2 apresentada no capítulo 4. As ondas 1.8 e 1.9 são referentes à onda de corrente n^o 3 e as ondas 1.10 e 1.11 referentes à onda de corrente n^o 4, também apresentadas no capítulo 4.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.6

(a)

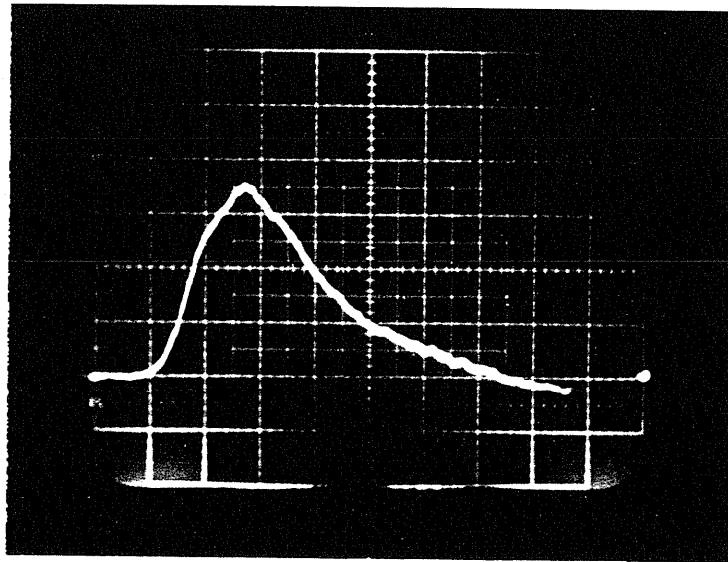
Escalas: vertical - 40 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 2 $R_1 = \infty$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

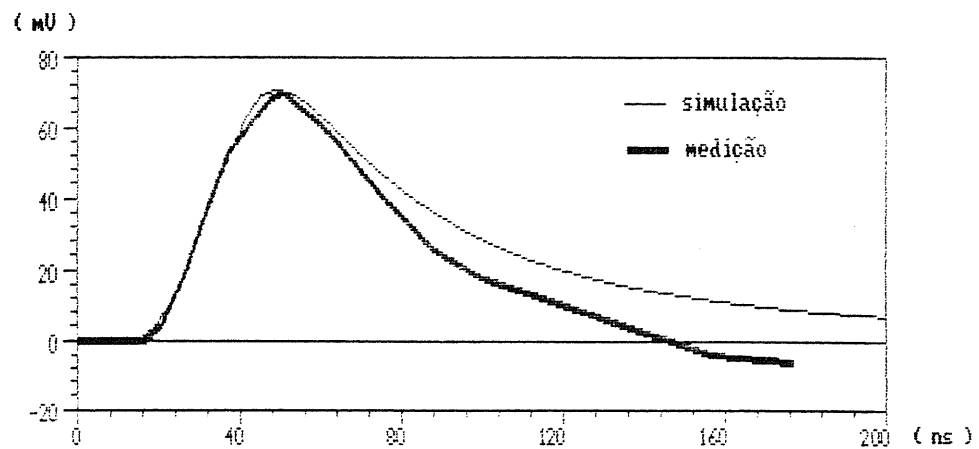
Fig 6.7 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.6

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.7

(a)

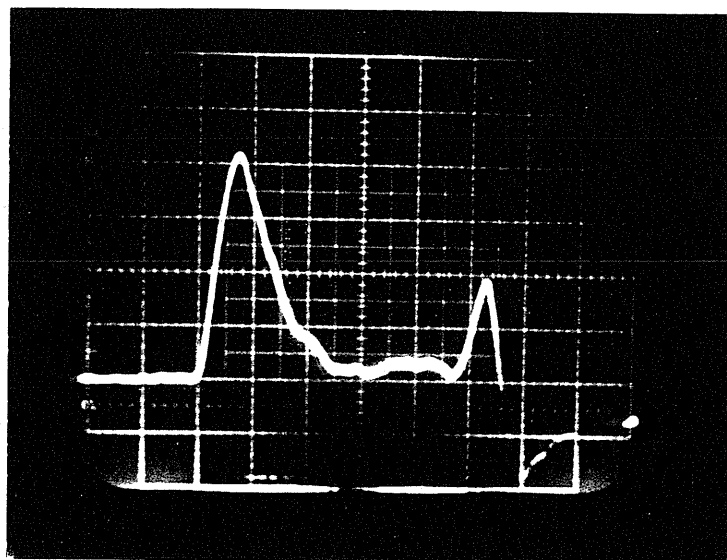
Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 2 $R_1 = 370 \Omega$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

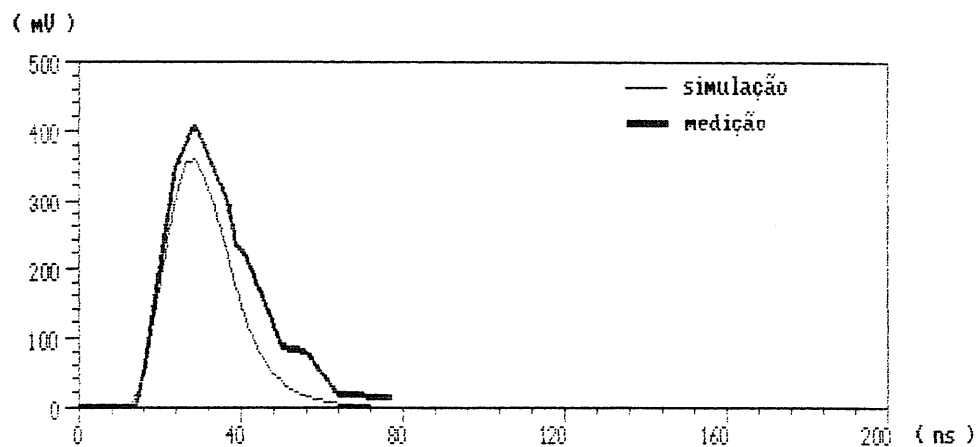
Fig 6.8 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.7

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.8

(a)

Escalas: vertical - 100 mV/div horizontal - 20 ns/div

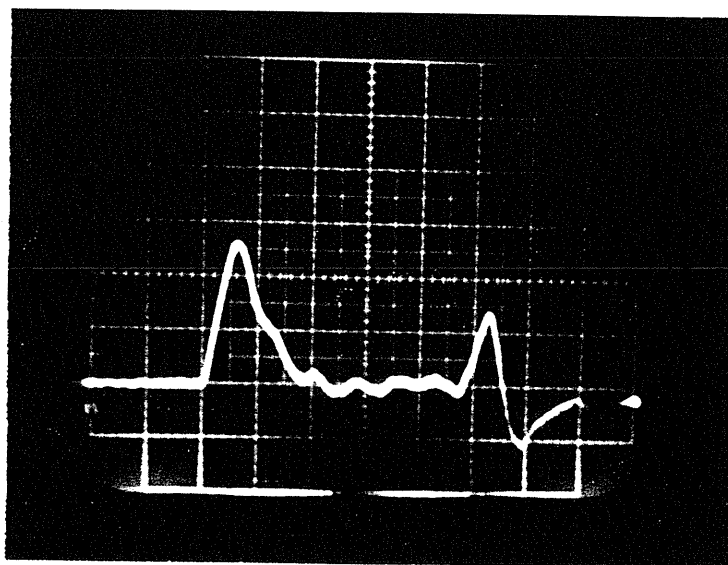
Onda de corrente: N^o 3 $R_1 = \infty$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.9 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.8

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 1.9



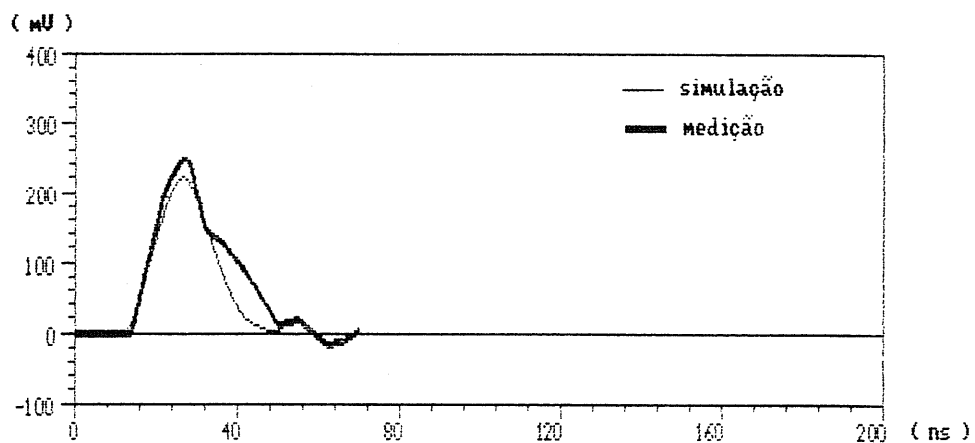
(a)

Escalas: vertical - 100 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: Nº 3

$R_1 = 370 \Omega$

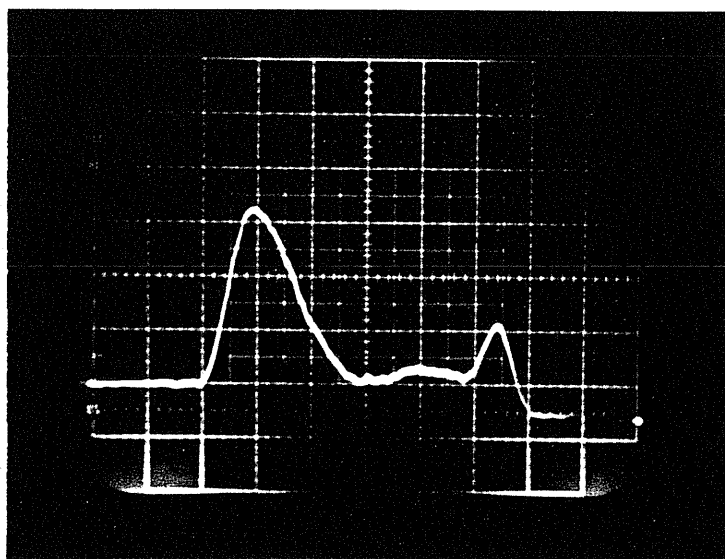
$R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.10 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida Nº 1.9

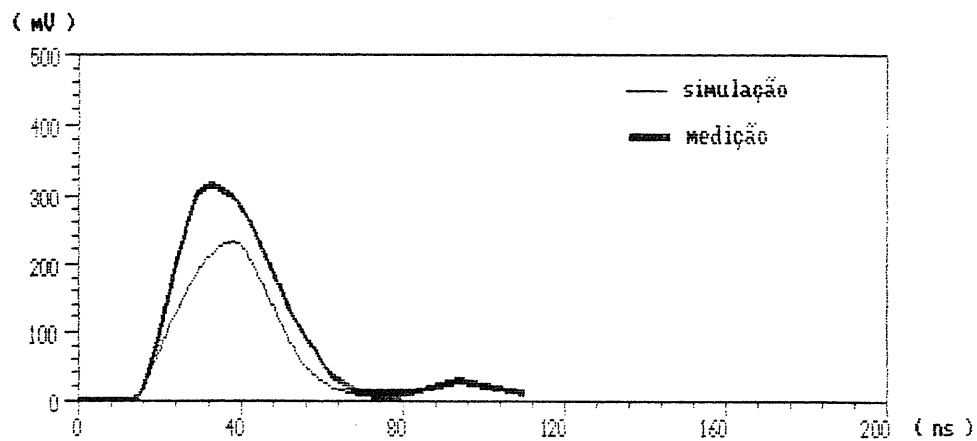
ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.10



(a)

Escalas: vertical - 100 mV/div horizontal - 20 ns/div

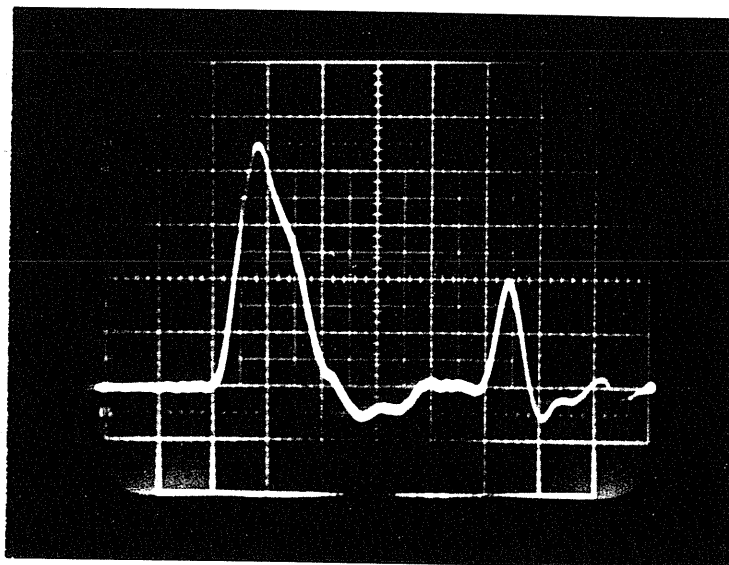
Onda de corrente: N^o 4 $R_1 = \infty$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.11 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.10

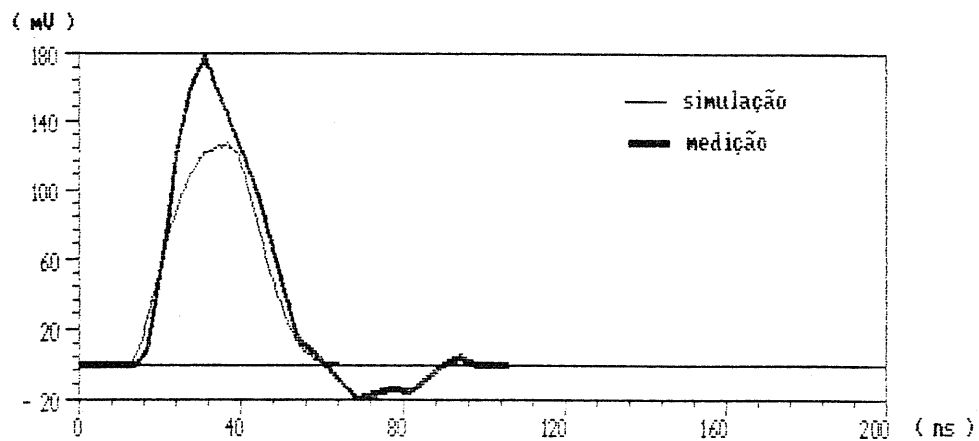
. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 1.11



(a)

Escalas: vertical - 40 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 4 $R_1 = 370 \Omega$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.12 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 1.11

- COMENTÁRIOS :

. No caso das ondas de tensão induzida de números 1.8 a 1.11, a reflexão na extremidade aberta do canal alterou a onda de corrente em um tempo muito curto, devido à elevada velocidade de propagação desta onda. Isto não afetou tais ondas de tensão induzida, uma vez que sua duração é menor que o tempo necessário para que o efeito da reflexão atinja o ponto de medição.

O arranjo mostrado na figura 6.13 foi utilizado para a obtenção das ondas de tensão induzida de números 1.12 e 1.13, sendo utilizada para tal a onda de corrente n^o 1.

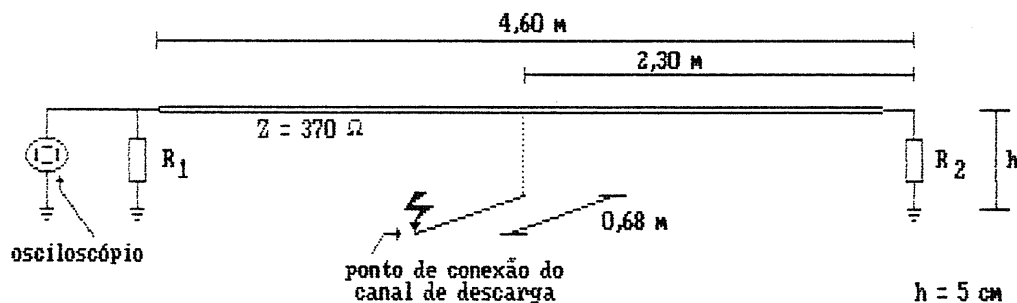
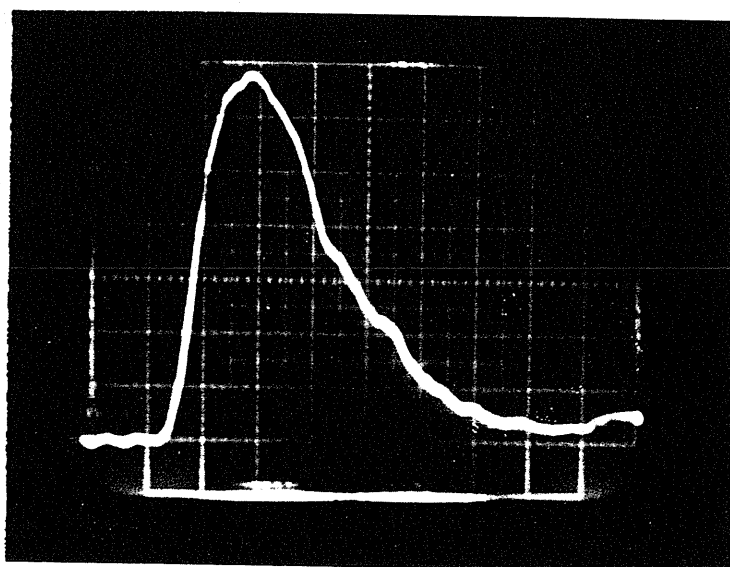


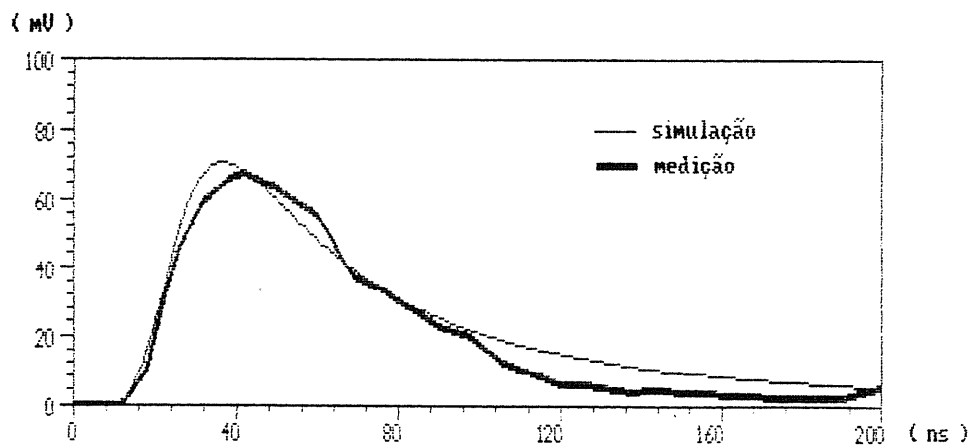
Fig. 6.13 - Arranjo de simulação n^o 2

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 1.12



Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 20 ns/div

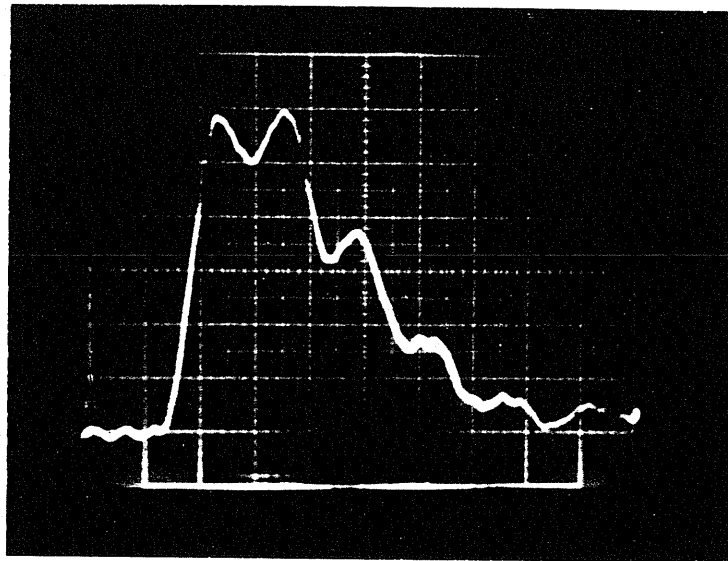
Onda de corrente: Nº 1 $R_1 = 370 \Omega$ $R_2 = 370 \Omega$



(b)

Fig 6.14 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida Nº 1.12

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 1.13

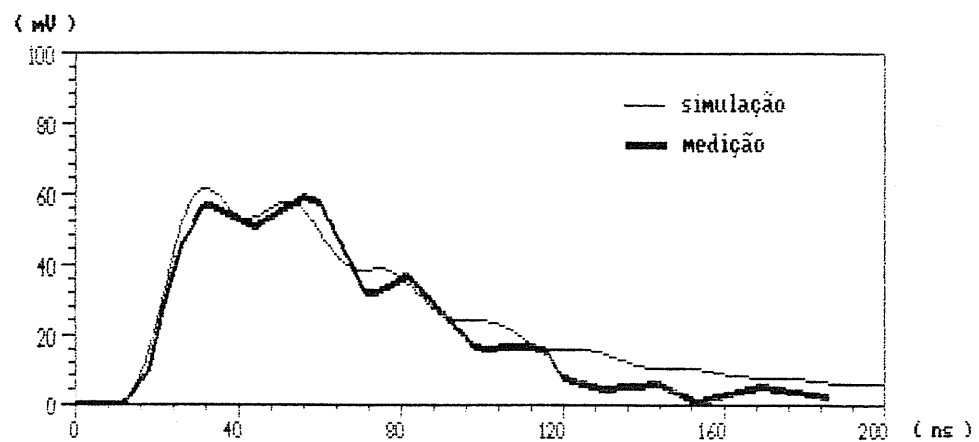


(a)

Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: Nº 1 $R_1 = 370 \Omega$ $R_2 = 370 \Omega$

Linha seccionada e isolada em seu ponto central.



(b)

Fig 6.15 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida Nº 1.13

- COMENTÁRIOS :

. Segundo a teoria de Rusck, para um arranjo simétrico como o apresentado na figura 6.13, a tensão induzida em qualquer das extremidades casadas da linha é a mesma estando a linha seccionada em seu ponto mais próximo da descarga ou não. Isto é perfeitamente comprovado pelas ondas de tensão induzida 1.12 e 1.13. As oscilações na cauda da onda referente ao caso da linha seccionada são devidas ao descasamento introduzido pela capacitância de entrada do osciloscópio, amplificado pelas reflexões na extremidade aberta no meio da linha. Estas oscilações são observadas também na simulação, sendo que esta, quando feita sem considerar o efeito de carga do osciloscópio, resulta em uma onda idêntica à apresentada para a onda de tensão induzida n^o 1.12.

- COMENTÁRIOS FINAIS REFERENTES AO GRUPO DE MEDIÇÕES N^o 1:

. Neste grupo de medições procurou-se variar os principais fatores que influenciam a tensão induzida : disposição geométrica da linha em relação à descarga, terminações das extremidades da linha, velocidade de propagação e tempo de frente da onda de corrente de retorno. Tendo sido possível a realização de medições em todos os casos fica comprovada a adequação do modelo proposto no capítulo 4 para o estudo do

fenômeno da tensão induzida por descargas atmosféricas laterais (no escopo da teoria de Rusck), o que é respaldado pelo fato da modelagem apresentada em tal capítulo estar de acordo com tal teoria.

. A comparação das ondas de tensão induzida de números 1.1 a 1.13 com as respectivas simulações mostra uma ótima correspondência entre as formas de onda medidas e calculadas. Com relação aos valores de pico e tempos de frente esta correlação se mostra muito boa para as ondas de tensão induzida de números 1.1 a 1.7, 1.12 e 1.13 (obtidas a partir de ondas de corrente com baixa velocidade de propagação) e aceitável para as ondas de números 1.8, 1.9, 1.10 e 1.11 (referentes às ondas de corrente com elevada velocidade de propagação). Nas simulações realizadas foi considerado apenas o tempo de frente da onda de corrente, portanto, as diferenças relativas às caudas das ondas de tensão induzida medidas e simuladas ocorreram devido ao fato daquela onda possuir um tempo de cauda infinito. O efeito de carga da capacitância de entrada do osciloscópio foi considerado em todas as simulações deste grupo.

. A análise global das comparações entre medições e simulações possibilita as seguintes conclusões :

1 - para planos de terra com resistividade nula a teoria de Rusck prevê valores muito próximos do correto para a

tensão induzida em uma linha aérea devido a descargas atmosféricas laterais.

2 - A metodologia de cálculo de tensão induzida em uma linha finita e com descontinuidades proposta por Lopes [09] é correta.

6.3 - GRUPO DE MEDIÇÕES Nº 2

As medições de campo elétrico foram feitas a partir da onda de corrente nº 2. O anel metálico utilizado para a medição foi colocado a duas alturas diferentes. O arranjo básico para estas medições é apresentado na figura 6.16, onde h é a altura do anel em relação ao plano de terra e r é o raio do anel.

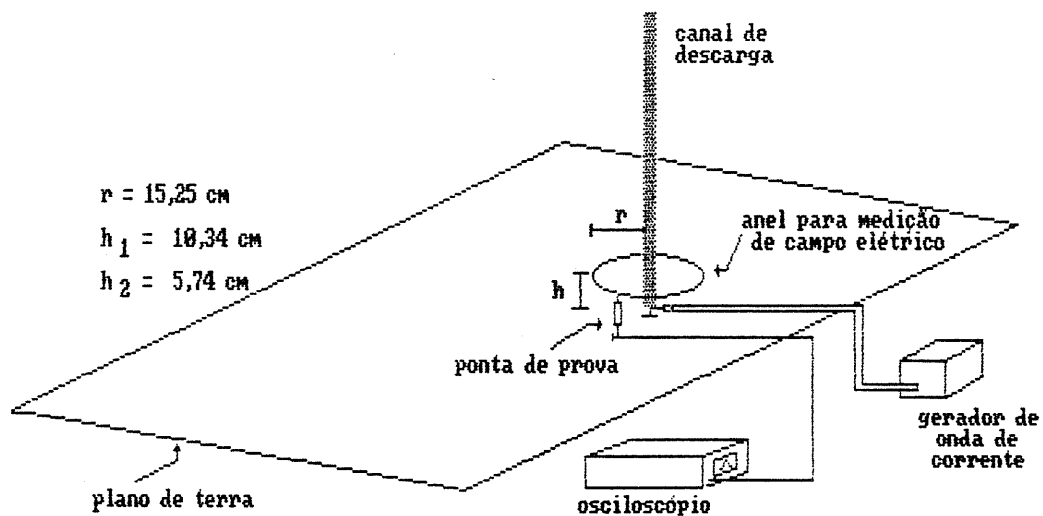


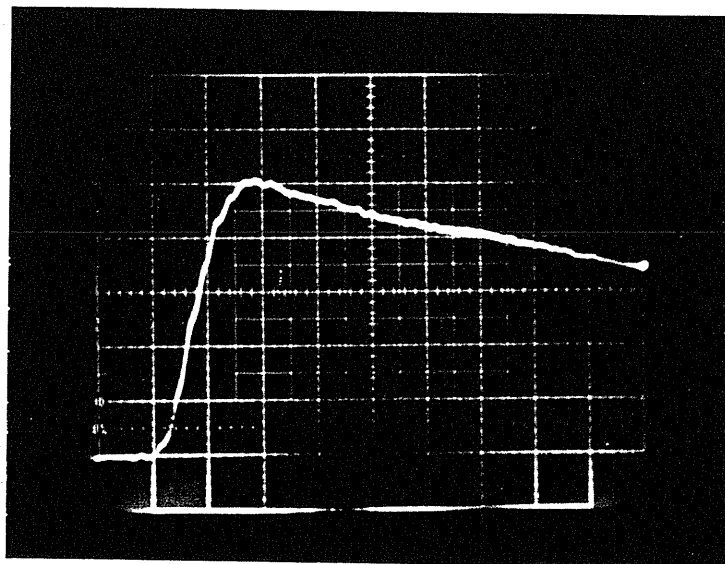
Fig. 6.16 - Arranjo de simulação nº 3

. ONDAS DE CAMPO ELÉTRICO N^{os} 2.1 e 2.2

Onda n^o 2.1

Altura do anel:

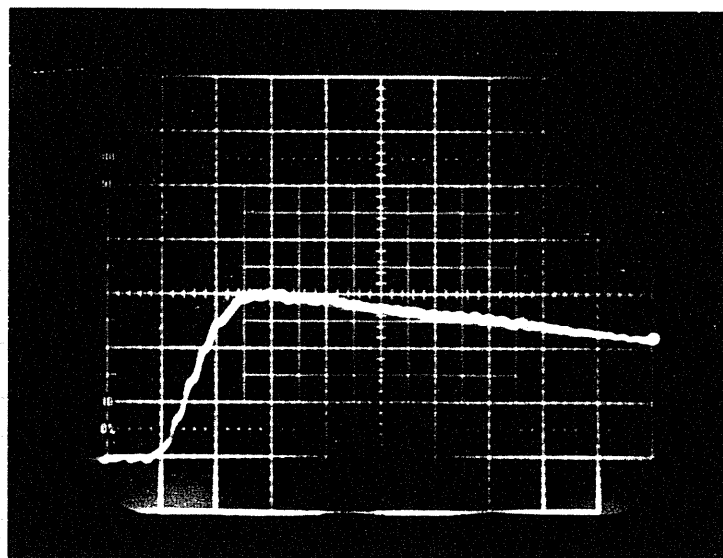
$h = 10,34 \text{ cm}$



Onda n^o 2.2

Altura do anel:

$h = 5,74 \text{ cm}$



Escala: vertical - 2 V/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 2

Fig 6.17 - Oscilogramas referentes às medições de campo elétrico.

A onda de campo elétrico utilizada para a comparação com o cálculo feito por Fonseca foi obtida a partir da onda de campo elétrico n^o 2.1, dividindo-se ponto a ponto o valor da tensão induzida pela altura média do anel.

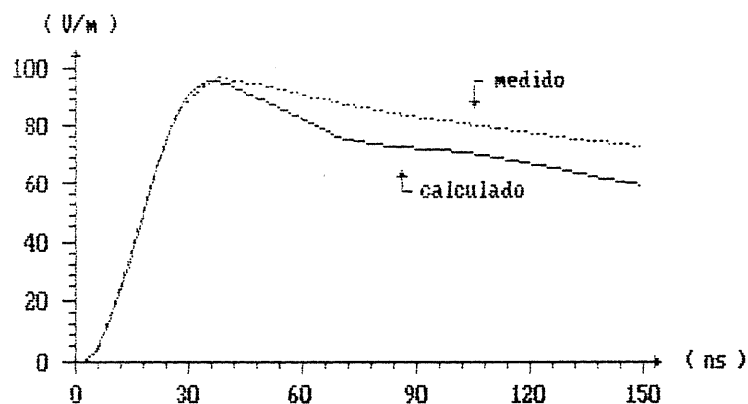


Fig 6.18 - Comparação entre medição e simulação referente à onda de campo elétrico N^o 2.1

- COMENTÁRIOS :

. O fato de se ter obtido uma medição "limpa" demonstra que a antena proposta para medição de campo elétrico no modelo proporciona resultados bastante satisfatórios.

. A diferença entre o valor de pico do campo elétrico medido a uma altura e outra é menor que 5 %. Isto indica que a

variação do campo elétrico da superfície do plano até a altura da linha é muito pequena. Esta medição valida a aproximação feita por Rusck ao desprezar, próximo ao solo, a variação do campo elétrico com a altura .

. A correlação entre os valores de pico e tempos de frente medidos e calculados é excelente. A onda de corrente utilizada para o cálculo foi aproximada por várias retas, portanto o efeito global da cauda desta onda foi considerado. A pequena diferença entre as caudas das ondas medidas e calculadas é devida, possivelmente, à aproximação por retas da onda de corrente, uma vez que essa possui oscilações na cauda, dificultando a sua representação.

. O cálculo do campo elétrico foi feito baseado na teoria de Rusck, portanto esta medição comprova a validade do modelo proposto por esta teoria para o cálculo do campo elétrico produzido por descargas atmosféricas.

6.4 - GRUPO DE MEDIÇÕES N.º 3

As medições de tensão induzida sobre solo real são relativas à onda de corrente n.º 5 apresentada no capítulo 4 e ao arranjo mostrado na figura 6.19.

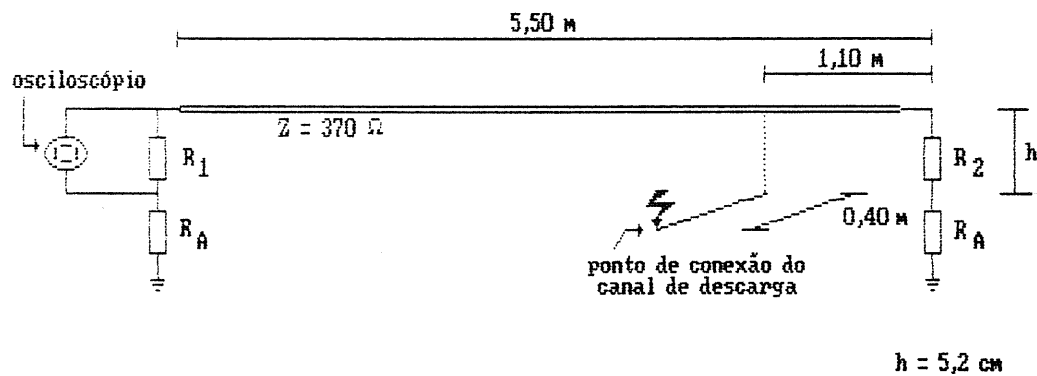
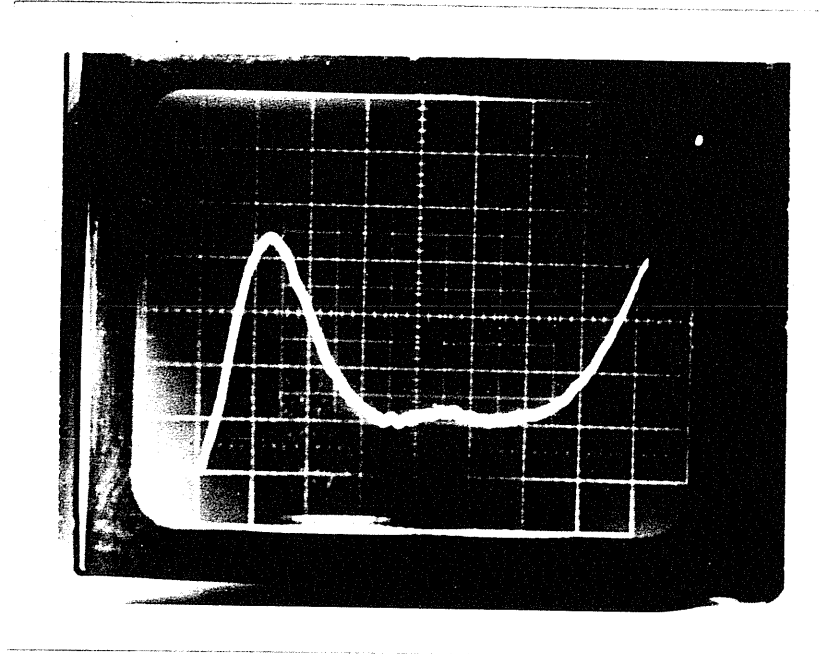


Fig 6.19 - Arranjo de simulação n.º 4

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 3.1

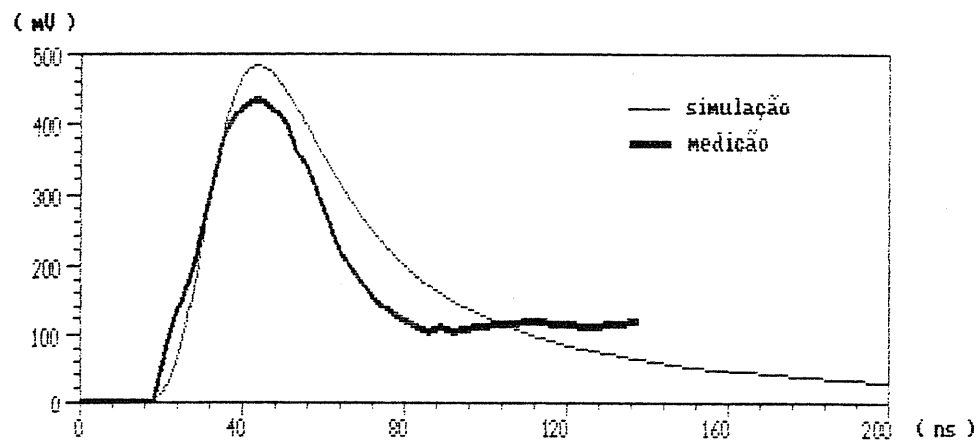
(a)

Escalas: vertical - 100 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N^o 5

$R_1 = \infty$

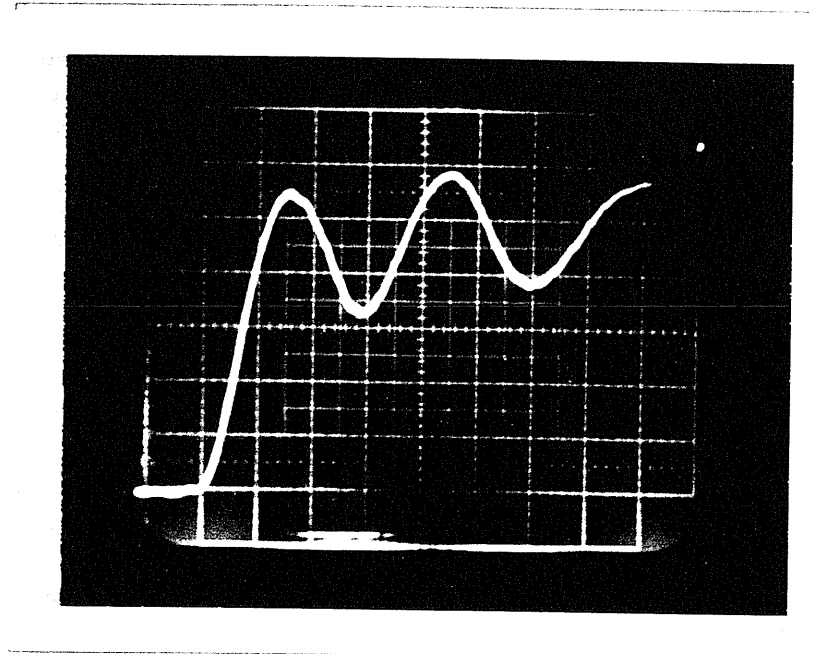
$R_2 = 270 \Omega$



(b)

Fig 6.20 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 3.1

ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N° 3.2



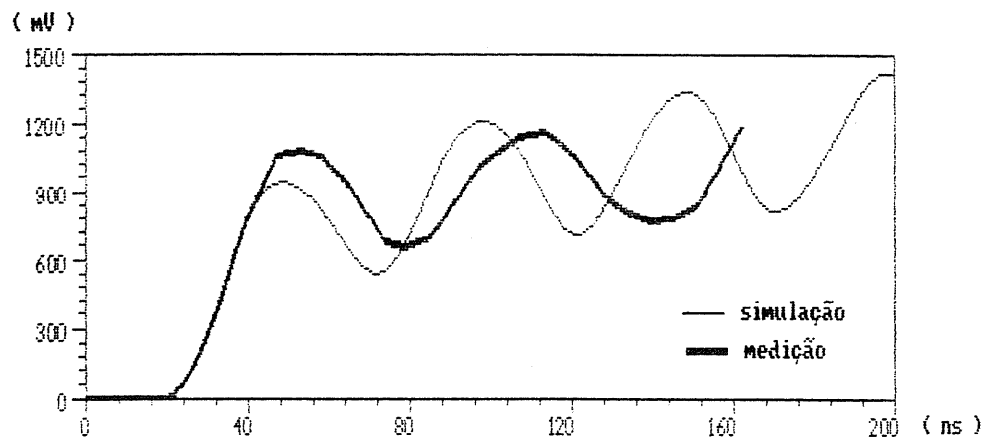
(a)

Escalas: vertical - 200 mV/div horizontal - 20 ns/div

Onda de corrente: N° 5

$R_1 = \infty$

$R_2 = \infty$



(b)

Fig 6.21 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N° 3.2

- COMENTÁRIOS :

. O objetivo principal destas medições é mostrar que a técnica de simulação em modelo reduzido pode ser utilizada para determinação da influência da resistividade do solo no fenômeno da tensão induzida. A "clareza" das medições obtidas é uma prova disto. Sendo esta uma medição preliminar, não se pode tirar conclusões definitivas a respeito do efeito da resistividade. Entretanto, algumas observações podem ser feitas.

. A comparação das formas de onda medidas e simuladas mostra uma boa correlação entre estas. É importante ressaltar que a simulação realizada não considera o efeito da resistividade, já que esta é baseada na teoria de Rusck. Com relação aos valores de pico não se obteve uma boa correspondência, uma vez que os resultados foram divergentes. Entretanto as diferenças entre os valores de pico medidos e calculados é de + 5% no primeiro caso e de - 16,7% no segundo. Considerando o fato de que a resistividade simulada para o fenômeno real é de 20000 $\Omega \cdot m$ e portanto muito elevada, podemos supor que no caso real, em que a resistividade normalmente se encontra na faixa de 100 a 10000 $\Omega \cdot m$, as diferenças entre o valor real da tensão induzida e o valor previsto pela teoria de Rusck seriam bem pequenas. Isto é um forte indício de que a teoria de Rusck seria adequada

para o cálculo de tensão induzida também em solos de condutividade finita.

. Pode-se observar, principalmente na onda de tensão induzida n^o 3.2, que existe um atraso entre os tempos de pico da onda medida em relação à calculada, o que é um efeito reconhecidamente atribuído à resistividade. Desconsiderando este atraso, não se percebeu nas formas de onda medidas nenhuma diferença significativas entre estas e aquelas medidas no plano metálico, ao contrário do previsto por Koga [07]. Segundo este autor a onda de tensão induzida em solo real deveria ter dois picos, o primeiro, bem pequeno, devido ao campo elétrico vertical e o segundo, bem maior, devido ao campo elétrico horizontal. Em nenhuma das duas formas de onda medidas percebeu-se algo semelhante ao previsto por Koga.

. É importante ressaltar que as simulações foram feitas considerando o tempo de frente da onda de corrente e o efeito de carga da capacitância de entrada do osciloscópio, ou seja, com as mesmas características das simulações feitas para os casos medidos no plano metálico.

. Um estudo completo onde se pudesse variar a resistividade do modelo e os procedimentos de aterramento da linha e do canal de descarga possui grandes chances de determinar com

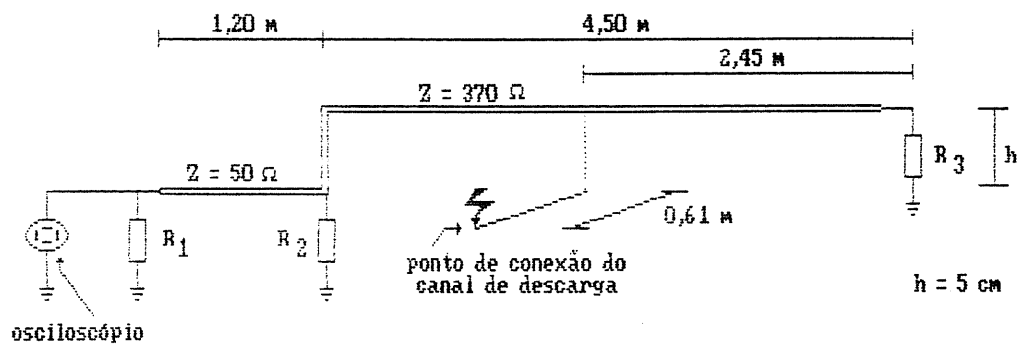
alto grau de certeza qual a real influência da resistividade no fenômeno da tensão induzida.

6.5 - GRUPO DE MEDIÇÕES Nº 4

Uma configuração muito comum nas redes telefônicas é uma linha com trecho aéreo e trecho subterrâneo, sendo encontrada principalmente nas entradas das centrais de comutação. É importante conhecer o nível de tensão induzida que chega à extremidade do cabo (entre blindagem e terra) dentro da central. A medição a seguir demonstra a adequação do modelo para o estudo de tensão induzida em tal configuração.

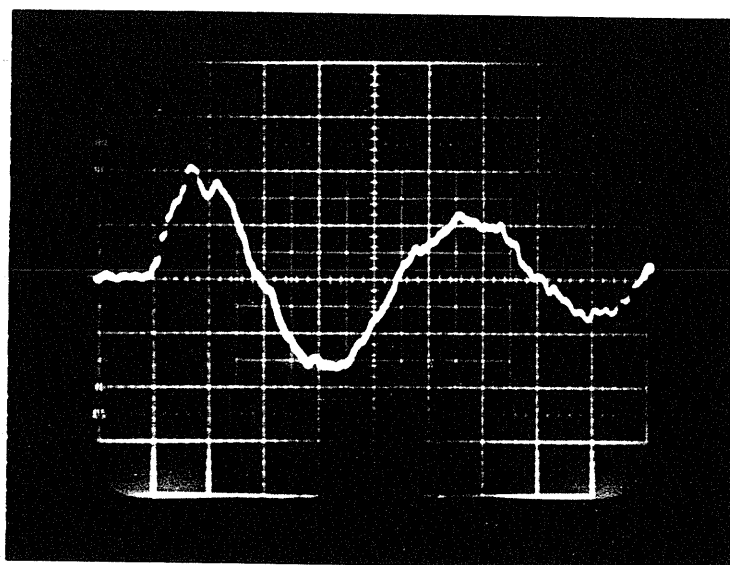
O trecho subterrâneo foi simulado por meio de um cabo coaxial o qual foi colocado rente ao plano metálico e coberto por uma chapa de cobre ao longo de toda a sua extensão. Para se ter certeza do valor da impedância característica do trecho subterrâneo utilizou-se um cabo coaxial de 50Ω , sendo que sua blindagem foi colocada em contato metálico com a chapa e plano de terra por todo o seu comprimento. Desse modo, a blindagem do cabo telefônico é simulada pelo condutor interno do cabo coaxial e o valor da impedância característica do cabo telefônico no trecho subterrâneo é 50Ω . A simulação do trecho aéreo foi feita utilizando-se a linha descrita no capítulo 4. A onda de

tensão induzida obtida é referente à onda de corrente n^o 2 e ao arranjo mostrado na figura 6.22.



velocidade de propagação no trecho subterrâneo = 192 m/ μ s

Fig. 6.22 - Arranjo de simulação n^o 5

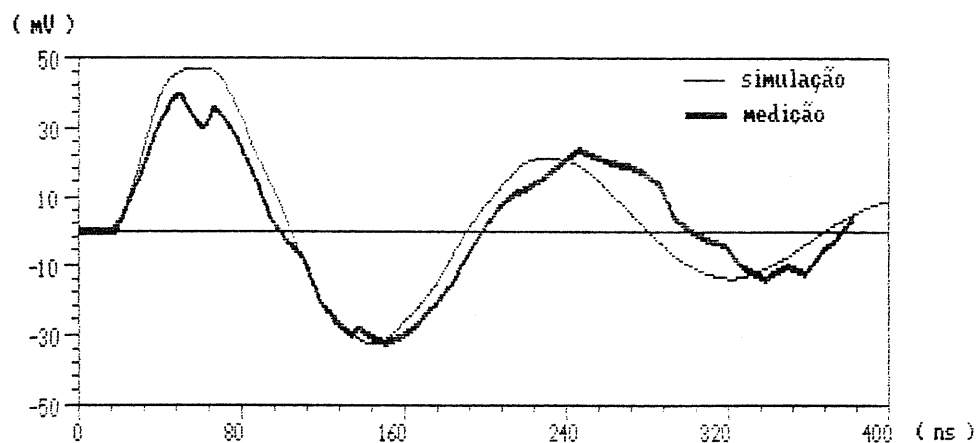
ONDA DE TENSÃO INDUZIDA N^o 4.1

(a)

Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: N^o 2

$R_1 = \infty$ $R_2 = \infty$ $R_3 = 50 \Omega$



(b)

Fig 6.23 - (a) Oscilograma. (b) Comparação entre medição e simulação referente à onda de tensão induzida N^o 4.1

- COMENTÁRIOS :

. A comparação entre as ondas medidas e calculadas mostra uma correspondência muito boa tanto nos valores de pico e tempos de frente quanto na forma de onda. Nesta simulação não foi considerado o efeito de carga da capacitância de entrada do osciloscópio, o qual é responsável por parte das diferenças entre ondas medidas e simuladas. Esta medição comprova a metodologia proposta por Lopes [09] para o cálculo de tensão induzida em linhas com trechos aéreo e subterrâneo.

6.6 - GRUPO DE MEDIÇÕES Nº 5

Na transição da rede aérea para a subterrânea, no caso de redes telefônicas, existe uma polêmica sobre os procedimentos de vinculação e aterramento a serem adotados neste ponto. Os procedimentos de vinculação dizem respeito à conexão ou não entre as blindagens dos cabos dos trechos aéreo e subterrâneo, já os procedimentos de aterramento relacionam-se com o aterramento destas blindagens. O objetivo destas medições é determinar qual a configuração de aterramento e vinculação que leva à menor tensão induzida entre condutor interno e blindagem na extremidade do cabo no trecho subterrâneo, já que esta tensão pode causar a ruptura do dielétrico do cabo danificando-o permanentemente.

O cabo telefônico foi simulado por meio de um cabo coaxial com impedância característica de 25Ω , com diâmetro externo igual a 2 mm . O fato do diâmetro do cabo utilizado na simulação corresponder a um cabo telefônico de dimensões irreais implica em um estudo qualitativo do fenômeno. O trecho subterrâneo foi simulado colocando-se o cabo coaxial sobre o plano metálico e cobrindo-o com uma chapa de cobre. O cabo foi, no trecho subterrâneo, mantido isolado ao longo de toda a sua extensão. A montagem básica para este estudo é mostrada na figura 6.24.

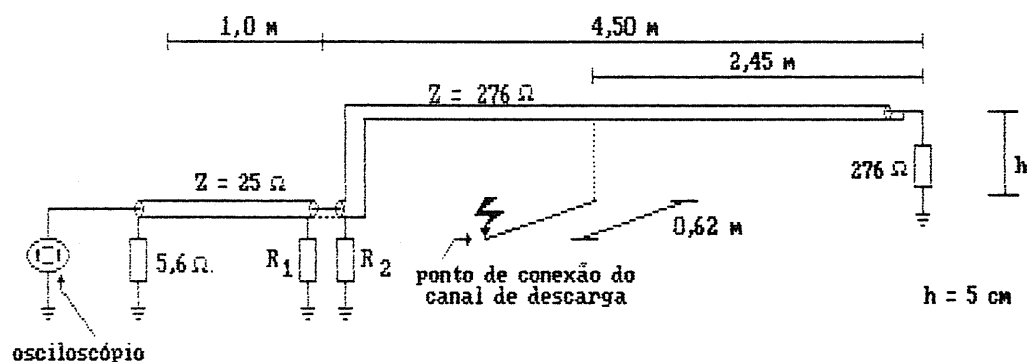
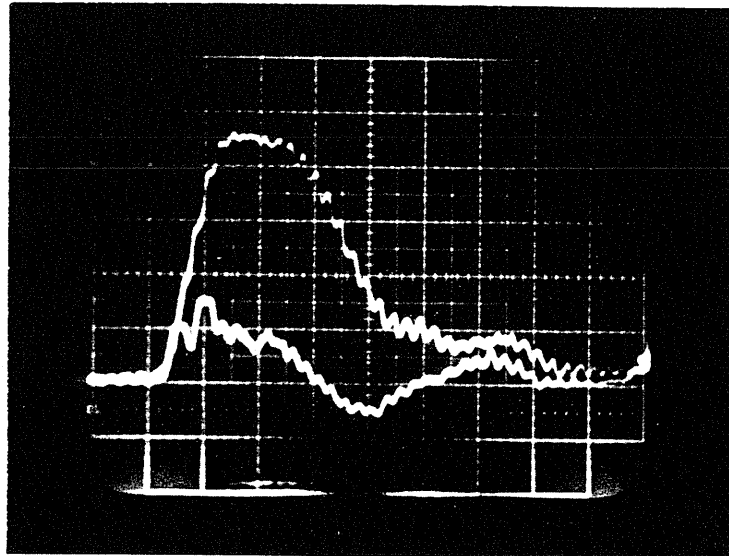


Fig. 6.24 - Arranjo de simulação n^o 6

Na simulação procurou-se uma configuração do sistema a mais real possível, sendo a blindagem do cabo na extremidade do trecho subterrâneo aterrada com um resistor de $5,6 \Omega$ e a extremidade do trecho aéreo casada para evitar a influência desta nas medições. Utilizou-se a onda de corrente n^o 2 para esta simulação.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 5.1



Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

Onda superior : blindagem → sem vinculação

$$R_1 = 27 \Omega$$

$$R_2 = \infty$$

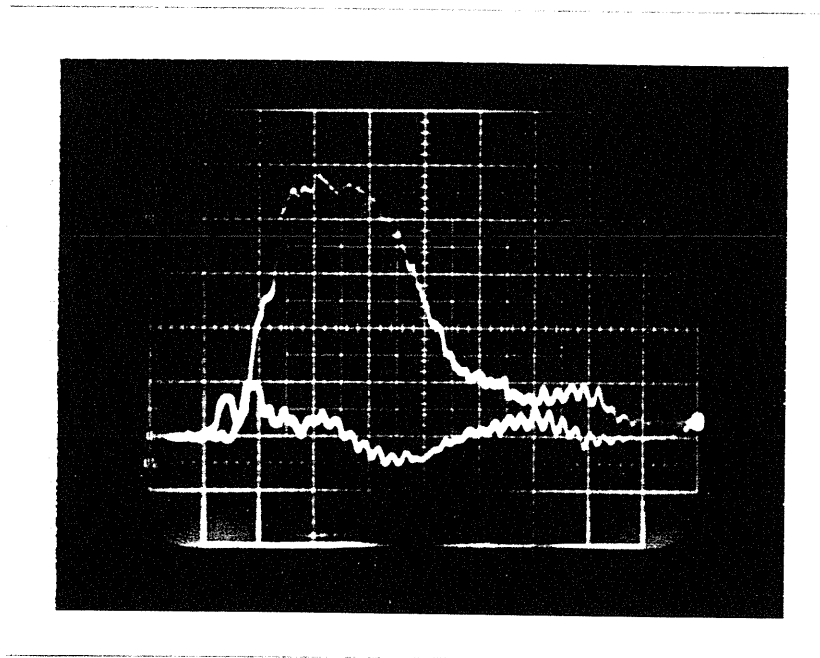
Onda inferior : blindagem → sem vinculação

$$R_1 = 27 \Omega$$

$$R_2 = 27 \Omega$$

Fig 6.25 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise de critérios de transição.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 5.2



Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

Onda superior : blindagem → sem vinculação

$$R_1 = \infty$$

$$R_2 = \infty$$

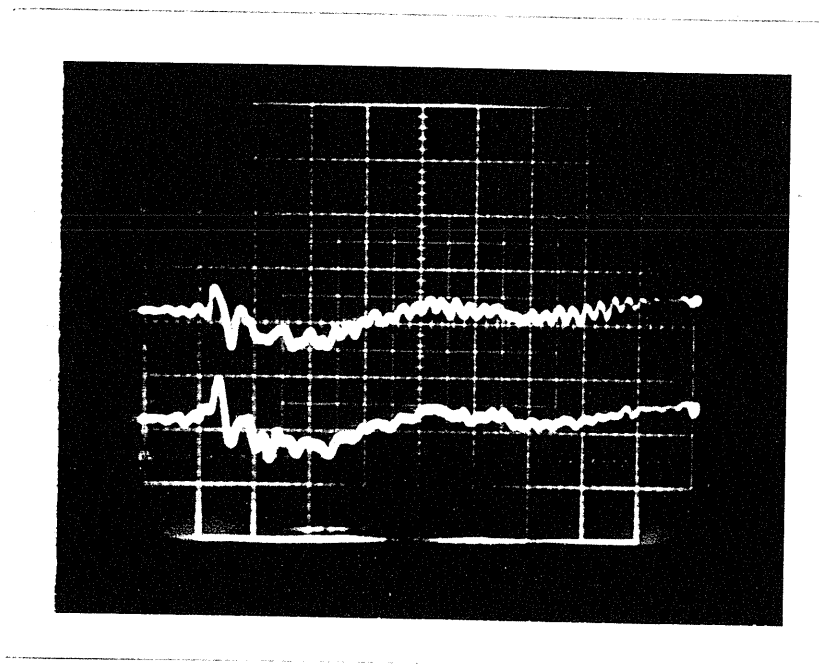
Onda inferior : blindagem → sem vinculação

$$R_1 = \infty$$

$$R_2 = 27 \Omega$$

Fig 6.26 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise de critérios de transição.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 5.3



Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

Onda superior : blindagem → com vinculação

$$R_1 = \infty$$

$$R_2 = 27 \Omega$$

Onda inferior : blindagem → com vinculação

$$R_1 = \infty$$

$$R_2 = \infty$$

Fig 6.27 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise de critérios de transição.

- COMENTÁRIOS :

. Estas medições mostram que o modelo reduzido desenvolvido é apropriado qualitativamente para o estudo de tensão induzida em configurações de redes bastante complexas. Não foram apresentadas comparações com simulações numéricas devido ao fato de não se ter disponível uma metodologia para cálculo de tensão induzida em configurações deste tipo.

. Como as medições de tensão induzida foram feitas entre condutor interno e plano de terra, em todas as ondas medidas está superposta a tensão desenvolvida no resistor de aterramento da blindagem do cabo no trecho subterrâneo. Portanto, a tensão induzida entre condutor interno e blindagem é menor que a tensão medida. Pode-se supor que, proporcionalmente, a tensão desenvolvida no resistor de $5,6 \Omega$ é a mesma em todos os casos, dessa maneira, a configuração que levasse à menor tensão induzida total implicaria também na menor tensão induzida entre condutor interno e blindagem. Baseado nisto, a melhor configuração para os procedimentos de transição da rede aérea para a subterrânea seria aquela com vinculação da blindagem e aterramento na transição (onda de tensão induzida n^o 5.3, onda superior).

. Uma medição direta da tensão induzida entre condutor

interno e blindagem poderia ser feita com a utilização de uma ponta de prova diferencial amplificadora. Tal equipamento eliminaria os problemas de sensibilidade e de necessidade de aterramento da carcaça do osciloscópio percebidos nestas medições.

6.7 - GRUPO DE MEDIÇÕES Nº 6

O fio externo é um condutor sem blindagem que é conectado a um condutor interno de um cabo telefônico, podendo, portanto, trazer tensão induzida para dentro do cabo, o que pode causar uma ruptura do dielétrico deste. A instalação de equipamentos de proteção no ponto de conexão do fio externo com o cabo telefônico é função do comprimento deste fio. Entretanto não se encontra disponível um estudo completo onde se determina qual é este comprimento. O objetivo destas medições é demonstrar que tal estudo pode ser feito utilizando-se o modelo reduzido desenvolvido. A montagem básica utilizada nas medições é mostrada na figura 6.28.

O cabo telefônico foi simulado por um cabo coaxial de impedância característica igual a 25Ω e o fio externo com o mesmo condutor utilizado na linha do modelo. Da mesma maneira que no grupo de medições nº 5, procurou-se utilizar uma configuração para o sistema a mais real possível, sendo

deixada aberta a extremidade do fio externo e casada a blindagem do cabo no ponto de medição. Para estas medições utilizou-se a onda de corrente n^o 2.

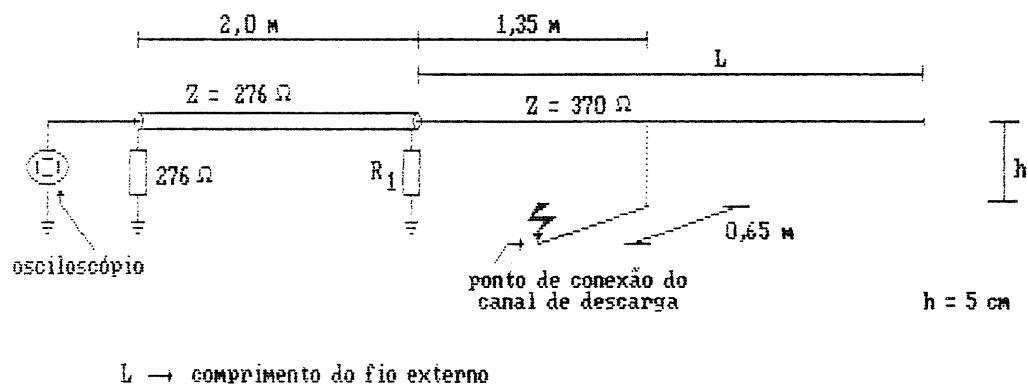
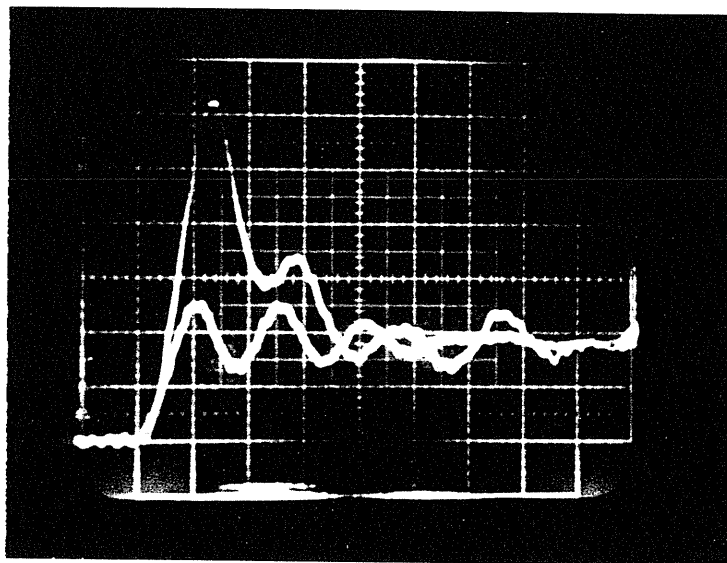


Fig. 6.28 - Arranjo de simulação n^o 7

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 6.1



Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

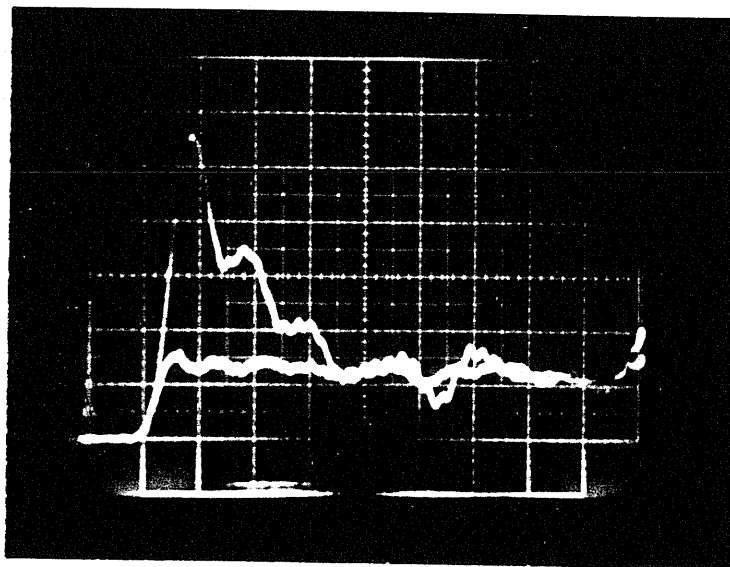
$l = 4 \text{ m}$

Onda superior : $R_1 = \infty$

Onda inferior : $R_1 = 27 \Omega$

Fig 6.29 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise da influência da exposição do fio externo.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 6.2



Escalas: vertical - 20 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

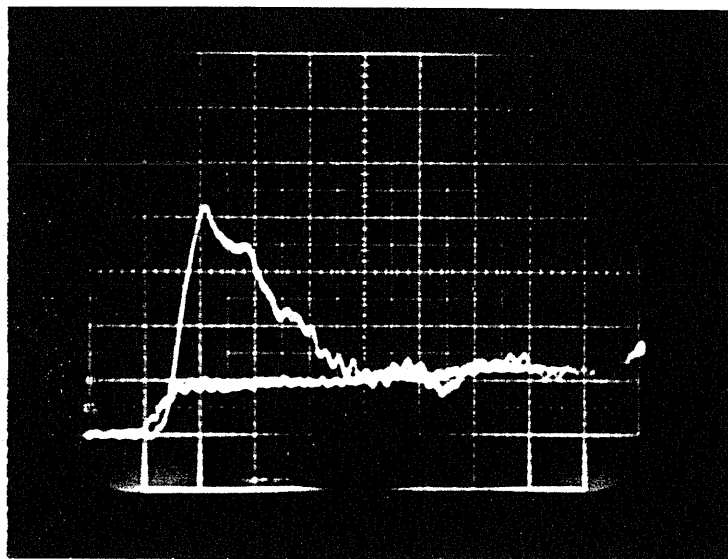
$l = 2 \text{ m}$

Onda superior : $R_1 = \infty$

Onda inferior : $R_1 = 27 \Omega$

Fig 6.30 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise da influência da exposição do fio externo.

. ONDA DE TENSÃO INDUZIDA Nº 6.3



Escalas: vertical - 10 mV/div horizontal - 40 ns/div

Onda de corrente: Nº 2

$l = 1 \text{ m}$

Onda superior : $R_1 = \infty$

Onda inferior : $R_1 = 27 \Omega$

Fig 6.31 - Oscilograma referente à medição de tensão induzida para análise da influência da exposição do fio externo.

- COMENTÁRIOS :

. A tensão induzida medida é a soma da tensão desenvolvida no resistor de aterramento da blindagem (276Ω) com a tensão induzida entre condutor interno e blindagem do cabo, a qual poderia ser medida com a utilização de uma ponta de prova diferencial amplificadora.

. Ficou claro a partir das medições que quanto maior o comprimento do fio externo maior a tensão induzida medida. Entretanto, como o nível de suportabilidade do cabo telefônico a tensões impulsivas é um valor bem definido, a determinação do comprimento crítico do fio externo só poderia ser feita mediante uma simulação mais elaborada. Nesta simulação seria utilizado um cabo que se aproximasse mais do cabo telefônico, tanto nas dimensões quanto na característica da blindagem (blindagem tubular e não com fios dispostos em torno do condutor interno, como no presente caso), e as medições seriam feitas por meio de uma ponta de prova diferencial amplificadora.

CAPÍTULO 7ALTERNATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA
RESISTIVIDADE DO SOLO NO FENÔMENO DA TENSÃO INDUZIDA

7.1 - INTRODUÇÃO

O principal efeito da resistividade a ser considerado quando da proposição de um modelo reduzido para estudo da tensão induzida em solos reais é o aumento da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas incidentes no modelo. O modelo proposto neste trabalho para este estudo não teve como limitação a profundidade de penetração, já que este foi implementado diretamente sobre o solo. Entretanto, este modelo impossibilita um estudo completo do fenômeno, uma vez que não é possível a variação da resistividade em uma larga faixa (100 a 10000 $\Omega \cdot m$) representativa dos valores normalmente encontrados. Duas alternativas para este modelo, as quais englobam a variação da resistividade, seriam a utilização de um tanque eletrolítico e de um plano metálico coberto por papel resistivo. Algumas características relativas à implementação destas duas alternativas são discutidas a seguir.

7.2 - TANQUE ELETROLÍTICO

A implementação de um modelo reduzido com as mesmas características do apresentado neste trabalho onde o plano de terra fosse simulado por um tanque, no qual a resistividade da água pudesse ser controlada, possibilitaria um estudo completo do fenômeno da tensão induzida. Entretanto é preciso estabelecer criteriosamente as dimensões deste tanque, para que nenhum outro efeito introduzido pelas bordas do tanque se sobreponha à influência da resistividade.

A profundidade do tanque será dada pela profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas incidentes na água para a maior resistividade e menor frequência que se deseja simular. Tomando como limite superior da faixa de resistividade que se pretende simular o valor de $10000 \Omega \cdot m$ e o valor de 1 MHz para o limite inferior de frequência das ondas envolvidas, tem-se :

- para o fator de escala $1/200$ a simulação de um solo com $10000 \Omega \cdot m$ é feita com uma resistividade de $50 \Omega \cdot m$ para a água do tanque,
- utilizando a fórmula apresentada no item 3 do capítulo 4, tem-se:

$$\delta = (f \pi \mu \sigma)^{-1/2} \Rightarrow \delta = 3,56 \text{ m}$$

onde :

$$\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} - \text{permeabilidade magnética do espaço livre}$$

$$f = 1 \text{ MHz}$$

$$\sigma = 1/\rho = 0,02 \text{ S}$$

O valor da profundidade do tanque calculado com estes parâmetros é muito grande e impraticável. Entretanto, considerando-se como a frequência fundamental das ondas envolvidas o valor de 80 MHz encontra-se para a profundidade de penetração o valor de 0,40 m ($5\delta = 2,0 \text{ m}$). Isto indica que um tanque com uma profundidade de 2 m seria apropriado para o estudo, pois a essa profundidade somente as frequências inferiores a 3,16 MHz (correspondente a $\delta = 2 \text{ m}$) seriam fortemente alteradas.

As dimensões laterais do tanque devem ser tais que a influência de suas bordas, agora amplificada pela existência de um campo elétrico horizontal, não atinjam a linha antes que o valor da tensão induzida tenha caído abaixo da metade do seu valor de pico. A maioria das ondas de tensão induzida têm o seu tempo de semi-cauda inferior a 80 ns. Tomando como base este valor tem-se que para uma linha de 6 m de comprimento disposta sobre a linha central do tanque as dimensões adequadas deste seriam 24 m de largura por 30 m de comprimento. Neste cálculo considerou-se

que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na superfície da água é igual à velocidade de propagação da luz.

Uma outra característica favorável do tanque é o perfeito contato do eletrodo de aterramento independentemente do seu tamanho, o que não foi possível no modelo implementado neste trabalho.

As possibilidades de simulação em um modelo implementado em um tanque eletrolítico com as características aqui descritas são enormes e acredita-se que a questão da influência da resistividade, a qual é o principal ponto de polêmica nesta área de estudo, possa ser satisfatoriamente resolvida.

7.3 - PAPEL RESISTIVO

A simulação de um solo real por meio de um plano metálico coberto por papel resistivo é válida no sentido de se garantir na superfície do papel a mesma condição de fronteira para o campo elétrico existente na superfície do solo. No entanto, é difícil de se avaliar a influência do plano metálico colocado sob o papel resistivo. Esse plano garantiria a simulação de um plano de profundidade infinita, mas introduziria uma mudança brusca dos parâmetros do meio

na interface entre o papel resistivo e o plano metálico. Apesar dessas alterações introduzidas, a influência da resistividade poderia ser determinada mediante comparações entre simulações feitas com papéis de diferentes resistividades. Um outro problema seria as dimensões laterais, o que poderia ser solucionado com a utilização dos mesmos valores calculados para o tanque: 24 m de largura e 30 m de comprimento. A utilização do papel resistivo tem como vantagem sobre o tanque eletrolítico a facilidade de manipulação dos equipamentos do modelo, embora sejam claras as limitações com relação à profundidade de penetração.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO

A proposta inicial do trabalho possuía dois objetivos complementares. O primeiro, relacionado com a proposição e implementação do modelo reduzido e o segundo, relativo à análise das medições que seriam realizadas no modelo implementado. Pode-se dizer que ambos os objetivos foram plenamente alcançados.

Com relação ao primeiro objetivo, a qualidade das medições obtidas comprovam a validade tanto do modelo proposto, quanto da implementação deste. O nível de complexidade dos arranjos de simulação utilizados demonstram a potencialidade da simulação analógica por meio de modelos reduzidos na solução de problemas envolvendo campos eletromagnéticos variantes no tempo, com condições de fronteira assimétricas. A investigação do fenômeno da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas laterais, a qual é o objetivo básico do trabalho, pôde ser realizada a contento utilizando-se o modelo implementado.

A análise das medições obtidas mostram que a teoria de Rusck para a tensão induzida por descargas

atmosféricas em planos de terra de resistividade nula produz resultados bastante satisfatórios. O relacionamento deste trabalho com os demais, citados na introdução, mostrou-se bastante produtivo, uma vez que foi possível a realização de medições que comprovam a validade das metodologias propostas naqueles trabalhos. A questão, reconhecidamente polêmica, da influência da resistividade do solo, apesar de não ter sido completamente esclarecida, um grande passo foi dado no sentido de se mostrar que tal questão pode ser resolvida através de um estudo em modelo reduzido.

A continuidade deste trabalho seria a implementação de um modelo reduzido em que se pudesse estudar com mais flexibilidade a influência da resistividade, como foi proposto no capítulo 7. Neste modelo seria utilizado também um sistema de medição composto por equipamentos de características superiores aos utilizados neste trabalho. Poderia ser utilizado também um modelo mais elaborado para o canal de descarga, como sugerido no capítulo 4.

Em sua configuração atual, o modelo pode ser utilizado para o desenvolvimento de uma metodologia que permita o cálculo de tensões induzidas em redes com ramais.

Uma outra aplicação imediata do modelo é a sua

utilização para uma análise mais criteriosa do efeito da tensão induzida em redes telefônicas. Essa análise seria iniciada nas medições preliminares realizadas neste trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - FISHER, F.A.; ANDERSON, U.G.; and HAGENGUTH, J.H., "Determination of Lightning Response of Transmission Line by Means of Geometrical Models.", Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs., pp. 1725-1735, February 1960.
- [02] - 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, No. 4, pp. 208-216, July 1985.
- [03] - RUSCK, S., "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks.", Doctor's Thesis, Trans. of Royal Institute of Technology Stockholm, No. 120, 1958.
- [04] - GOLDE, R. H., "Lightning - Vol.2 - Lightning Protection.", Academic Press, London, 1977.

- [05] - UMAN, M. A., "Lightning.", Dover Publications, Inc., New York, 1984.
- [06] - UMAN, M. A.; MASTER, M. J., " Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2502-2518, September 1984.
- [07] - KOGA, H.; MOTOMITSU, T.; TAGUCHI, M., "Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines.", The Transactions of the IECE of Japan., Vol. E 62, No. 4, pp. 216-223, April 1979.
- [08] - NAIDU, S. R. , "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.", Co-Edição Eletrobrás/UFPb, 1985.
- [09] - LOPES, I. J. S., " Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas.", Dissertação de Mestrado - Curso Pos-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.

- [10] - FONSECA, A. F. L., "Cálculo Analítico do Campo Eletromagnético e da Resposta Transitória de uma Linha Monofásica Infinita devido à Incidência de uma Descarga Atmosférica sobre um Solo de Resistividade Nula.", Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [11] - FERREIRA, P. H. N., "Tensão Induzida em um Cabo Telefônico por Corrente Circulando na sua Blindagem.", Dissertação de Mestrado - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [12] - KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S., " High-Voltage Engineering.", Pergamon Press, Toronto, 1984.
- [13] - KRAUS, J.D.; CARVER, K.R., "Eletromagnetismo.", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- [14] - RÜDENBERG, R., "Transient Performance of Electric Power Systems.", McGraw-Hill, New York, 1950.
- [15] - CARSON, J.R., "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return.", Bell Syst. Tech. J., vol 5, October, 1926.

- [16] - GOLDE, R. H., "Lightning - Vol.1 - Physics of Lightning .". Academic Press, London, 1977.
- [17] - GOLDE, R.H., "Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightning Strokes"., AIEE Transactions, Vol. 73, pp. 437-447, June 1954.
- [18] - RUSCK, S., "Lightning Over-Voltages and Over-Voltage Protection in Low Voltage Networks.", ASEA Journal, Vol. 31, No. 6, pp. 75-82, 1958.
- [19] - ANDERSON, R.B.; ERIKSON, A. J., "Lightning Parameters for Engineering Application.", Electra, No. 69, pp. 65-102, 1980.
- [20] - RAGALLER, K., "Surges in High-Voltage Networks.", Plenumm Press, 1980.
- [21] - LIEW, A. C.; HALDAR, M. K., "Validation of Rusck's Scalar and Vector Potencial Expressions Due to a Return Stroke in a Lightning Channel.", IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. C, No. 5, pp. 366-367, September 1987.

- [22] - UMAN, M. A.; MASTER, M. J., " Lightning Induced Voltages on Power Lines: Experiment", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2519-2529, September 1984.
- [23] - CHOWDHURI, P.; GROSS, E. T. B., "Voltage Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes.", Proc. IEE, Vol. 114, No. 12, pp. 1899-1907, December 1967.
- [24] - CHOWDHURI, P., "Analysis of Lightning Induced Voltages on Overhead Lines.", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 479-492, January 1989.
- [25] - YOKOYAMA, S., "Numerical Analysis of Induced Lightning Surges.", IEEE Conference Paper No. A. 78-123-2, IEEE Winter Meeting, January 1978.
- [26] - YOKOYAMA, S., "Calculation of Lightning Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems.", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, No. 1, pp. 100-108, January 1984.

- [27] - 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. EMC-22, No. 2, pp. 119-129, May 1980.
- [28] - RUBINSTEIN, M.; TZENG, A. Y.; UMAN, M. A.; MEDELIUS,
P. J.; THOMSON, E. M., "An Experimental Test of a
Theory of Lightning Induced Voltages on a Overhead
Wire.", IEEE Transactions on Electromagnetic
Compatibility, Vol. 31, No. 4, pp. 376-383, November
1989.
- [29] - RUBINSTEIN, M.; UMAN, M. A., "Methods for Calculating
the Electromagnetic Fields from a Known Source
Distribution: Application to Lightning.", IEEE
Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.
31, No. 2, pp. 183-189, May 1989.
- [30] - PLONSEY, R.; COLLIN, R.E., "Principles and
Applications of Electromagnetic Fields.", TATA
McGraw-Hill Publishing Company, New Dehli , 1976.