

TESE DE DOUTORADO Nº 003

**ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UMA ANTENA PARA GERAR
CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS SIMILARES AOS CAMPOS
CRIADOS POR UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA**

Maria Luiza Grossi Vieira Santos

DATA DA DEFESA: 15.06.2000


**“Estudo e Construção de uma Antena para Gerar Campos
Eletromagnéticos Similares aos Campos Criados
por uma Descarga Atmosférica”**

Maria Luisa Grossi Vieira Santos


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

Aprovada em 15 de junho de 2000.

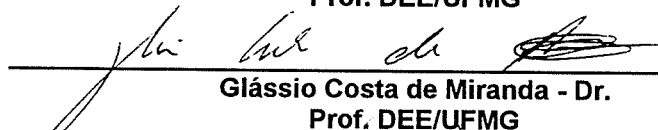
Por:



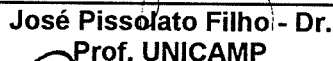
José Osvaldo Saldanha Paulino - Dr.
Prof. DEE/UFMG - orientador



Antônio Emílio Angueth de Araújo - Ph.D.
Prof. DEE/UFMG



Glássio Costa de Miranda - Dr.
Prof. DEE/UFMG



José Pissolato Filho - Dr.
Prof. UNICAMP



José Roberto Cardoso - Dr.
Prof. EP/USP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UMA
ANTENA PARA GERAR CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS SIMILARES AOS
CAMPOS CRIADOS POR UMA DESCARGA
ATMOSFÉRICA**

Aluna: Maria Luisa Grossi Vieira Santos

Orientador: Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte, 2000

Agradecimentos

A Deus, luz constante a iluminar nossos caminhos;

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela valiosa orientação e pelo grande auxílio prestado no desenvolvimento deste trabalho;

Aos colegas, professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, e em especial aos colegas Marisa Lages Murta, Joaquim Paulo da Silva, Gustavo Guimarães Parma e Tarcísio Antônio Oliveira;

Aos funcionários do Laboratório de Extra Alta Tensão e do Almoxarifado do PCA pela ajuda prestada na realização deste trabalho;

À CAPES pela ajuda financeira;

Aos meus pais e ao meu marido, pelo carinho e constante incentivo.

Resumo

Os critérios de projeto atualmente estabelecidos nas normas brasileiras não levam em consideração de forma explícita a proteção contra as sobretensões causadas pela interação dos campos eletromagnéticos da descarga atmosférica e os condutores da edificação. Uma das razões para este fato é que a quantificação destas sobretensões através de métodos analíticos ou numéricos é um problema de difícil solução, pois envolve equações de campos eletromagnéticos com fontes distribuídas e com efeitos de propagação em uma configuração tridimensional. Desta forma, este trabalho propõe uma metodologia de testes de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas instalados em edificações (centrais telefônicas, prédios comerciais, hospitais, instalações industriais, centros de processamento de dados, etc.), com o objetivo de avaliar o desempenho e a eficiência do sistema de proteção, frente a sobretensões impostas por descargas atmosféricas diretas. Para tanto, é realizado um estudo em modelo reduzido, que permite a avaliação destas sobretensões para determinadas configurações.

Primeiramente, fez-se um estudo sobre os mecanismos físicos da descarga atmosférica, a partir dos quais se desenvolve o fenômeno aqui analisado. Em seguida, através de um estudo em modelo reduzido da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, procedeu-se à escolha do modelo do canal de descarga a ser utilizado.

Uma vez definido o canal, é apresentado o modelo reduzido do prédio utilizado neste trabalho, bem como a localização dos componentes desse modelo e os equipamentos utilizados nas medições.

Apesar da técnica de modelo reduzido permitir a obtenção de várias informações, não é possível a representação de todos os componentes de uma edificação no modelo. O ideal é que sejam realizados testes em

edificações reais. Desta forma, o presente projeto procurou atingir duas metas básicas:

- estabelecer um modelo reduzido para estudos de indução de tensão em edificações causada por descargas diretas;
- propor uma metodologia de testes para avaliação da eficiência dos SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas) instalados em prédios reais.

Como resultado, é apresentado um conjunto de quatro arranjos de resistores capazes de simular a presença do canal de descarga atmosférica. O circuito de teste proposto leva em conta as dificuldades operacionais e de montagem em campo e garante que os campos eletromagnéticos gerados pelo circuito são similares aos campos gerados pelas descargas atmosféricas reais.

Abstract

This work presents a measurement procedure to test lightning protection systems (LPS) of buildings to evaluate the efficiency of their protection systems when a direct lightning discharge strikes the building. To achieve this purpose an experimental study using reduced model techniques was used as a tool for studies of induced electromagnetic fields inside a building due to direct lightning discharges.

First, a preliminary study of lightning induced voltages on overhead lines using reduced model was done with the aim of choosing the modeling used for the discharge channel. Then, the modeling used for the building, return stroke and ground are presented, as well as the measurement equipments. The measuring of the vertical electric field and induced voltage at the open ends of loops inside the building are presented.

Besides reduced model techniques allow us to obtain a lot of information, it is difficult to represent all the components present in a real building. So, the present work has two basic objectives:

- to establish a reduced model to study the induced electromagnetic fields inside a building due to lightning discharges;
- to present a measurement procedure to evaluate LPS installed in real buildings.

As a result, based on the measurements done in the reduced model implemented, an arrangement for representing the discharge channel was developed. The measurements related to the electric and magnetic fields, as well as the characteristics of the arrangement are presented.

Sumário

Resumo

Abstract

Sumário

1 - Introdução	1
1.1 A Relevância do Tema em Investigação	1
1.2 Propostas de Desenvolvimento	2
1.3 Revisão Literária	3
1.4 Abordagem do Trabalho	9
1.5 Organização do Texto	9
2 - Descargas Atmosféricas	12
2.1 Introdução	12
2.2 Origem e Formação da Descarga Atmosférica	14
3 - O Canal de Descarga	19
3.1 Introdução	19
3.2 A Teoria de Rusck	20
3.3 O Modelo Reduzido Implementado	21
3.3.1 - Plano Terra	22
3.3.2 - Canal de Descarga	23
3.3.3 - Corrente de Retorno	30
3.3.4 - Linha Aérea	32

3.3.5 - Localização dos Componentes do Modelo Reduzido	32
3.4 Considerações	34
3.5 Resultados Obtidos	34
3.6 Considerações Finais	39
4 - Modelo Reduzido e Sistema de Medição	41
4.1 Introdução	41
4.2 Modelo Reduzido	42
4.2.1 - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas	43
4.2.2 - Localização dos Componentes do Modelo Reduzido	44
4.3 Sistema de Medição Utilizado	44
4.3.1 - Osciloscópio	46
4.3.2 - Ponta de Prova de Tensão	46
4.3.3 - Ponta de Prova de Corrente	46
4.3.4 - Sensor de Campo Elétrico	47
4.3.4.1 - Determinação da Constante da Antena Utilizando Placas Paralelas	48
4.3.4.2 - Determinação da Constante da Antena Utilizando Linha Unifilar	53
5 - Resultados Parciais: Modelo de Pequenas Dimensões e Medição de Campo Elétrico	59
5.1 Introdução	59
5.2 Revisão Literária	62
5.3 Arranjo Proposto	66
5.4 Considerações Finais	72
6 - Resultados Finais: Medição de Campo Elétrico e Magnético	74
6.1 O Modelo Reduzido Implementado	74
6.1.1 - Plano Terra	75
6.1.2 - Canal de Descarga	75

6.1.3 - Corrente de Retorno	76
6.1.4 - Prédio	76
6.1.5 - Validação das Medições	77
6.1.6 - Sistema de Medição de Campo Elétrico e Magnético	86
6.1.7 - Localização dos Componentes do Sistema	87
6.2 Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em “Loops” dentro de um Prédio	87
6.3 Influência de Diferentes SPDA’s na Tensão Induzida no Interior do Prédio	93
6.3.1 – Revisão Bibliográfica	93
6.3.2 – Análise de Diferentes Configurações do SPDA	94
6.3.3 – Considerações Finais	100
6.4 Análise da Variação do Ponto de Incidência da Descarga no Prédio	100
6.5 Antena para Simular uma Descarga Atmosférica em Prédios	104
6.6 Análise de Resultados	110
7 - Conclusões	118
7.1 Propostas de Continuidade e Finalização do Trabalho	120
Anexo 1 – Canais com Perdas Elevadas	122
Anexo 2 – Análise da Tensão Induzida no Interior do SPDA	130
Anexo 3 – Fotografias dos Sistemas Implementados	136
Referências Bibliográficas	141

1 Introdução

1.1 A Relevância do Tema em Investigação

Nos últimos anos, a maciça introdução de equipamentos eletrônicos de última geração em todos os setores da sociedade incrementou os estudos relativos à compatibilidade eletromagnética, ou seja, o estudo da interação dos equipamentos com os campos eletromagnéticos naturais e com os campos criados pelos próprios equipamentos.

Os atuais equipamentos eletrônicos utilizam, em larga escala, circuitos integrados que são extremamente susceptíveis a sobretensões. Tal fato tem provocado um aumento significativo no número de danos a estes equipamentos, principalmente durante o período de chuvas.

Estudos e pesquisas sobre proteção destes equipamentos estão sendo feitos em todo o mundo, podendo-se destacar os trabalhos desenvolvidos na Itália, França, Japão, Alemanha, Estados Unidos, Canadá e Brasil [1].

Estes diversos estudos e pesquisas indicam que um dos maiores agentes perturbadores de equipamentos eletro-eletrônicos são as descargas atmosféricas. A probabilidade de uma descarga incidir sobre o equipamento ou sobre a rede é relativamente baixa, mas a probabilidade da descarga incidir nas proximidades destes é bastante elevada, o que explica o grande interesse e os elevados recursos aplicados nos estudos relativos ao cálculo de tensões induzidas em redes e equipamentos elétricos.

Relatos de acidentes ocorridos no Brasil e no mundo demonstram que, mesmo em prédios cujo sistema de proteção contra descargas atmosféricas obedece às recomendações das normas internacionais, ocorrem danos de grande extensão.

Sendo assim, justifica-se a necessidade de pesquisas adicionais para um melhor conhecimento dos efeitos de uma descarga atmosférica real, e este trabalho representa uma ação objetiva nessa direção.

1.2 Propostas de Desenvolvimento

A interação entre descargas atmosféricas e edificações ocorre basicamente através de descargas diretas e indiretas. No primeiro caso a interação ocorre pela injeção de correntes impulsivas de amplitudes elevadas (5 a 200 kA) no sistema de captação de descargas da edificação. Estas correntes fluem pelos cabos de descida ou pela ferragem da edificação, dando origem a campos eletromagnéticos que, por sua vez, interagem com o conjunto de condutores da edificação. No segundo caso, a interação ocorre apenas através do acoplamento dos campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica com o conjunto dos condutores da edificação, não havendo a injeção direta de corrente [2, 3].

Testar um prédio real no que diz respeito aos efeitos causados por uma descarga atmosférica tem sido uma tendência mundial. Para atingir esse objetivo existem vários caminhos preliminares, que avaliam as sobretensões causadas pela interação dos campos eletromagnéticos da descarga e os condutores da edificação. Muitos desses caminhos são estudos teóricos, desenvolvidos através de métodos analíticos ou numéricos. Um outro método é a utilização de soluções analógicas por meio de técnicas de modelo reduzido.

Visando criar uma ferramenta para testar um prédio real, o presente trabalho estabelece um modelo reduzido para estudos de indução de campos eletromagnéticos no interior de edificações, causados por descargas atmosféricas diretas. A simulação em modelo reduzido envolverá, então, a modelagem do fenômeno da descarga atmosférica (canal de descarga, onda de corrente, velocidade de propagação, etc.), do plano de terra, e das edificações, no que diz respeito ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Entretanto, na simulação em modelo reduzido é difícil

reproduzir todas as características presentes em um caso real, o que nos leva novamente a estudos para buscar alcançar o que seria o objetivo final desse trabalho.

Numa segunda etapa, este trabalho apresenta estudos para simular a presença do canal de descarga a fim de se testar de maneira real um sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma edificação, uma vez que, como será apresentado no desenvolvimento desse trabalho, a presença do canal é importante, não podendo ser desconsiderada. Os modelos de canais utilizados nos modelos reduzidos até então implementados são difíceis de serem utilizados em um caso real, pois como estes devem ser bem maiores que o prédio, levaria a dimensões consideráveis, resultando em um problema de como sustentá-lo em cima do prédio. Uma solução seria o uso de balões, que por sua vez, teria dificuldades de implementação e ventos. Neste aspecto torna-se necessário o desenvolvimento de um arranjo mais compacto, sendo que este trabalho propõe uma antena capaz de simular campos eletromagnéticos similares aos campos criados por uma descarga atmosférica, podendo ser utilizada em testes de prédios reais.

1.3 Revisão Bibliográfica

Neste item serão destacados alguns dos principais trabalhos referentes ao tema em estudo, sendo que no decorrer do texto, em alguns itens específicos, trabalhos relacionados com as medições realizadas são citados e comentados no próprio item, objetivando situar com mais clareza o tema em estudo.

Os trabalhos aqui apresentados estão divididos em três classes: estudos computacionais que lidam com descargas atmosféricas diretas ou indiretas em prédios; estudos experimentais utilizando modelo reduzido; estudos experimentais que analisam descargas atmosféricas diretas ou indiretas em prédios.

Existem vários trabalhos computacionais na literatura que dizem respeito a avaliação das grandezas eletromagnéticas resultantes de descargas atmosféricas em prédios, sendo que alguns deles estão aqui apresentados [4 - 16].

Nos trabalhos desenvolvidos por Cristina, Orlandi e colaboradores são apresentados métodos computacionais para o cálculo tanto da distribuição de corrente ao longo dos vários condutores do sistema de proteção de um prédio quando da incidência de uma descarga atmosférica direta [4, 6], quanto dos campos eletromagnéticos gerados dentro do prédio [5, 6]. Entretanto, a influência da presença do canal de descarga nos campos eletromagnéticos não foi considerada. Já em [7] os autores apresentam um estudo computacional para caracterizar, no domínio da frequência, a influência exercida pelo canal de descarga atmosférica na distribuição de correntes nos condutores do sistema de proteção, e, então, nos campos eletromagnéticos gerados dentro da estrutura. Essa influência é analisada considerando o canal de descargas como uma antena retilínea vertical de comprimento finito (4000 m), onde flui uma corrente. O solo é considerado um condutor perfeito. Este modelo foi testado comparando-se os valores da componente vertical do campo elétrico gerado no nível do solo, com valores existentes na literatura. Os resultados mostram que a influência exercida pelo canal de descargas é significativa.

Na referência [8] Orlandi e Schietroma consideram as tensões transitórias induzidas em circuitos elétricos dentro de uma edificação protegida, devido a descargas atmosféricas diretas. Avalia-se os níveis máximos e a atenuação das tensões induzidas em condutores internos para configurações diferentes do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).

Em [9] faz-se uma investigação analítica e experimental das correntes e tensões induzidas em "loops" localizados dentro de um SPDA devido a descargas atmosféricas diretas. São avaliadas dimensões e posições diferentes do "loop", assim como a influência do número de elementos condutores do SPDA. O canal de descargas foi simulado por um condutor vertical, por onde flui uma corrente impulsiva de forma $1/5 \mu\text{s}$. Dois casos são analisados: a) descarga próxima à estrutura; b) descarga direta na quina superior do SPDA.

Na Alemanha, Matthias Smolke e Eberhard Engelmann [10], tendo como objetivo blindar os sistemas e dispositivos eletrônicos localizados dentro de estruturas (prédios), fizeram um estudo computacional da intensidade do campo magnético e de sua distribuição em estruturas que conduzem a corrente da

descarga atmosférica, a partir da qual desenvolveram um arranjo experimental para simular o campo magnético nessas estruturas.

No Brasil, Sartori e Cardoso [11, 12, 13] apresentam resultados computacionais associados a descargas atmosféricas diretas em um edifício, tais como a distribuição de correntes nos condutores da estrutura, o campo magnético dentro da estrutura e a tensão induzida em "loops" no interior da edificação. Não são levados em consideração nem os efeitos do canal de descarga, nem as não linearidades. Em [12] são avaliadas as tensões induzidas em "loops" localizados em pontos distintos dentro do SPDA, que é modelado por uma estrutura metálica, sendo que o valor da resistência de aterramento foi considerado constante e igual a 10Ω . Já na referência [13] é feita uma análise da influência da altura do prédio na performance do SPDA quando este é diretamente atingido por uma descarga atmosférica. Para este propósito duas configurações de SPDA são consideradas: uma alta (36 m) e uma baixa (6 m). Os resultados relacionados à densidade de fluxo magnético e efeitos induzidos são comparados.

Também no Brasil deve-se destacar os trabalhos de Caixeta e Pissolato [14, 15, 16], que apresentam simulações computacionais do sistema estrutura - descarga atmosférica, onde os campos eletromagnéticos gerados pela descarga e pelo SPDA são levados em consideração. A corrente de retorno da descarga atmosférica e do sistema de proteção contra descargas foram simuladas utilizando o modelo TLM - Modelo de Linha de Transmissão. O SPDA foi considerado como uma interconexão de linhas de transmissão. No artigo [15], juntamente com a simulação da corrente de retorno da descarga, parâmetros não lineares como corona e efeito skin foram considerados. Em [16], com o objetivo de encontrar uma melhor proteção para o prédio, é feita uma análise de diferentes configurações do SPDA no cálculo dos campos eletromagnéticos gerados em seu interior e na simulação do campo elétrico induzido em um circuito localizado no interior deste.

Na área das técnicas de modelo reduzido, foi realizada uma revisão bibliográfica, onde pode-se destacar as referências [17, 18, 19, 20, 21, 22].

Na referência [17] Boaventura e Paulino apresentam o desenvolvimento e implementação de um modelo reduzido para estudar a tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas aéreas, com fator escala de 1/200. Também é feita a validação da teoria da tensão induzida proposta por S. Rusck através das

medições realizadas. Uma avaliação preliminar da influência da resistividade do solo na amplitude e forma de onda da tensão induzida é apresentada. O canal de descarga atmosférica é modelado como uma linha de transmissão vertical cuja indutância e capacitância por metro, fornecem uma velocidade de propagação igual a 32,65 m/ μ s. O canal de 6,8 m de comprimento foi construído utilizando-se um tubo isolante de 6,7 mm de diâmetro, no qual foi enrolado um fio de cobre isolado de 0,7 mm de diâmetro. A corrente de forma 5/200 ns é injetada na base do canal e se propaga em direção ao topo deste. Uma representação monofásica é utilizada para representar a linha aérea de 5 cm de altura e 5,5 m de comprimento. Os resultados de tensão induzida medidos e calculados apresentam boa correspondência, indicando que a técnica de modelo reduzido pode ser utilizada satisfatoriamente.

Em [18] é apresentado um programa para cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas baseado na teoria proposta por Sune Rusck. O programa determina a tensão induzida em linhas aéreas de dois condutores, os quais podem representar os condutores de neutro aterrado, condutores blindados, etc.. É apresentado um modelo reduzido para estudar a tensão induzida por descargas atmosféricas, sendo que o canal de descarga, a onda de corrente de retomo e a linha são modelados utilizando um fator de escala de 1:100. São apresentadas as comparações entre simulações analógicas e digitais.

Na referência [19] são realizados estudos experimentais sobre tensão induzida por descargas atmosféricas em uma linha aérea através de um canal de descarga utilizando modelo reduzido de fator de escala igual a 1:20, sendo que o solo é considerado com perdas. O canal de descarga simulado possui 28 m de comprimento e foi feito espiralando-se um fio de cobre de 0,5 mm de diâmetro ao redor de um tubo isolante de 1,5 cm de diâmetro suspenso verticalmente por um balão. A corrente impulsiva injetada na base do canal propaga em direção ao topo deste e reflete neste ponto, o qual é um circuito aberto. A velocidade de propagação da corrente no canal é igual a 125 m/ μ s. A linha aérea é simulada por um fio de cobre horizontal de 0,5 mm de diâmetro e 25 m de comprimento estando localizada a uma altura de 0,5 m acima do solo. A linha esta terminada por uma resistência de 430 Ω ou por um circuito aberto. A influência da condutividade do solo na tensão induzida por descargas atmosféricas é investigada neste trabalho

utilizando-se resultados experimentais obtidos de um modelo reduzido 1:20 sobre um solo com perdas.

Nos trabalhos desenvolvidos por Piantini [20, 21] são apresentadas comparações entre os resultados de simulações computacionais e de ensaios em modelo reduzido. Em [20], baseado na teoria de Rusck, é feita uma análise da influência do comprimento finito da linha e dos casos de linhas em ângulo e com diferentes condições de terminação na tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas. Já em [21] é feita uma análise da amplitude e forma de onda das correntes induzidas nos condutores de aterramento quando uma descarga atmosférica atinge um ponto na vizinhança de uma linha de distribuição. Neste estudo é desenvolvido um modelo reduzido de fator de escala 1:50, sendo modeladas duas linhas aéreas paralelas de 28 m de comprimento, o canal de descarga e o fio terra.

Em [22] Nucci, Borghetti, Piantini e Janiszewski apresentam uma comparação entre a teoria, onde utilizam o modelo de acoplamento de Agrawal et al., e resultados experimentais obtidos em modelo reduzido implementado na Universidade de São Paulo, da tensão induzida em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas. No modelo reduzido construído, fator de escala igual a 1:50, diferentes configurações de linha são examinadas, desde uma linha monofásica até uma linha polifásica, incluindo pára-raios, alguns modelos de transformadores e aterramentos espaçados do neutro. O canal de descarga simulado foi feito espiralando-se um fio de cobre ao redor de um tubo isolante de tal forma que sua impedância de surto fosse aproximadamente igual a 2,2 k Ω e a velocidade de propagação da corrente ao longo do canal de 11% da velocidade da luz. Chapas de alumínio interconectadas foram utilizadas para modelar o plano de terra, perfazendo uma área de 1400 x 450 m². Os resultados obtidos apresentam uma boa correspondência entre teoria e medição.

Os trabalhos que se seguem [23, 24, 03], além de apresentarem simulações analógicas por meio de técnicas de modelo reduzido, o fazem objetivando analisar a influência das descargas atmosféricas diretas ou indiretas em prédios.

Para se avaliar a distribuição de corrente em uma edificação devido a descargas atmosféricas, um estudo experimental foi feito utilizando modelo reduzido [23]. O modelo foi construído utilizando-se um fator de escala de 1/10.

sendo equivalente a um prédio real de 2 a 4 andares, formado por estruturas cúbicas de 40 cm. Para se ter uma estrutura fácil de ser modificada, foram empregados tubos de latão e elementos conectores para formar os fios da estrutura. O plano de terra foi modelado através de uma chapa fina de ferro a qual foi largamente estendida sob o modelo reduzido do prédio. Três arranjos para injeção de corrente impulsiva são examinados, sendo que nenhum deles foi capaz de fornecer corrente mais rápida que 20 ns de tempo de frente, o que corresponde a aproximadamente 200 ns em uma edificação real. O método 1 utiliza um cabo coaxial com o gerador de pulso remoto localizado sobre o plano de terra e isolado deste, no segundo método utiliza-se um fio no lugar do cabo coaxial e no método 3 utiliza-se fios de retorno circundando o prédio com o gerador de pulso localizado no topo deste. Nos três casos o ponto de injeção da corrente é o mesmo, no topo do prédio, bem no meio deste. A distribuição de corrente no modelo reduzido do prédio foi medida utilizando-se o arranjo do método 3.

Em [24], com o objetivo de fornecer uma base para a escolha do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, cálculos computacionais da tensão induzida e corrente no "loop" localizado no interior do SPDA são realizados para configurações distintas deste. Medições experimentais em modelo reduzido de correntes induzidas em "loops" fechados no interior do SPDA são realizadas. O canal de descarga é simulado por um condutor vertical, onde é aplicada uma corrente impulsiva de forma $1/5 \mu\text{s}$. Ele foi posicionado a uma distância de 3,5 m do SPDA, o qual foi modelado como uma gaiola cúbica de $2 \times 2 \times 2$ m, consistindo de condutores verticais e horizontais, de raio igual a 1 cm, dispostos ao longo de todas as extremidades da gaiola. O "loop" utilizado possui dimensões de 80×40 cm e situa-se verticalmente, aproximadamente no centro da gaiola. Em investigações sucessivas a gaiola foi equipada com condutores adicionais, $n = 1, 2, \dots, 5$, uniformemente distribuídos na superfície superior da gaiola, na direção do canal de descarga. Comparações entre os valores medidos e calculados são realizadas.

Na referência [3] Boaventura e Coelho apresentam os resultados de um estudo experimental realizado utilizando as técnicas de modelo reduzido (fator de escala igual a 1:30), com o objetivo de analisar a performance de um SPDA quando este é atingido por uma descarga direta. O canal de descarga atmosférica

é modelado como uma linha de transmissão vertical de forma que seus parâmetros geométricos fornecem uma velocidade de propagação igual a $70 \text{ m}/\mu\text{s}$, 23,3% da velocidade da luz, sendo o seu comprimento igual a 12 m. Considerando o fator de escala adotado a corrente possui um tempo de frente de $0,75 \mu\text{s}$, sendo injetada na base do canal e se propagando em direção ao topo deste. O modelo utilizado para representar o SPDA é constituído por uma estrutura cúbica de 42 cm de lado, composta por 4 condutores externos e 1 condutor de descida interno, sendo também incluído um "X" no topo deste. São avaliados a distribuição de corrente nos condutores do SPDA, os efeitos da presença do canal de descarga e a tensão induzida em um "loop" localizado dentro do prédio.

1.4 Abordagem do Trabalho

Para se obter a modelagem do fenômeno da descarga atmosférica, ou seja, o canal de descarga, a onda de corrente, a velocidade de propagação, etc., foi necessário, primeiramente, a realização de um estudo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, através da implementação de um modelo reduzido. Desta forma, através de comparações das ondas de tensão induzida medidas com as simulações obtidas no programa computacional para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, desenvolvido no CPDEE (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica), por Lopes [17, 25], baseado na teoria de Rusck [26], podemos obter uma modelagem confiável para o canal de descarga atmosférica e, então, prosseguir com os estudos que envolvem as edificações.

1.5 Organização do Texto

Este trabalho de tese compõe-se de sete capítulos e três anexos que são brevemente apresentados a seguir.

No presente capítulo, *Introdução*, apresenta-se a importância do tema em investigação, e as principais motivações que levaram ao desenvolvimento do

trabalho. Além disso, é realizada uma revisão bibliográfica a respeito do trabalho apresentado e são apresentadas as etapas de desenvolvimento propostas.

O segundo capítulo, *Descargas Atmosféricas*, apresenta o fenômeno descarga atmosférica no que diz respeito aos mecanismos físicos a partir dos quais se desenvolve o fenômeno analisado neste trabalho, bem como algumas de suas características.

No capítulo três, *O Canal de Descarga*, é apresentado um estudo para a modelagem do canal de descarga atmosférica, sendo que para isso se inclui, de forma bem sucinta, a modelagem adotada por Rusck para o fenômeno quando do cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas, o modelo reduzido implementado para o estudo do canal e os resultados obtidos nessa etapa.

O modelo reduzido implementado para o estudo de indução de campos eletromagnéticos no interior de edificações causadas por descargas atmosféricas diretas, as características do sistema de medição e dos equipamentos utilizados, bem como um estudo sobre o sensor de campo elétrico utilizado e sobre a determinação de sua constante estão apresentados no capítulo 4, *Modelo Reduzido e Sistema de Medição*.

No capítulo cinco, *Resultados Parciais: Modelo de Pequenas Dimensões e Medição de Campo Elétrico*, são apresentados os resultados obtidos com o modelo reduzido implementado utilizando o canal de descarga definido no capítulo 3. Em seguida, tendo como base os resultados obtidos anteriormente, é feito um estudo em modelo reduzido para simular a presença do canal de descarga, incluindo a apresentação dos resultados obtidos, e uma comparação entre as medições realizadas com o canal e com o arranjo desenvolvido.

No capítulo seis, *Resultados Finais: Medição de Campo Elétrico e Magnético*, é apresentada a implementação de um modelo reduzido maior, uma vez que houve dificuldades em se medir a tensão induzida no interior do prédio no modelo anteriormente implementado, pois como o "loop" era pequeno, o efeito da ponta de prova de tensão era preponderante ao "loop" utilizado. No novo modelo implementado são analisadas várias situações, como: tensão induzida por descargas atmosféricas em "loops" dentro de um

prédio, influência de diferentes SPDA's na tensão induzida no interior do prédio, análise da variação do ponto de incidência da descarga no prédio e, finalmente, baseado em estudos realizados no capítulo anterior, a construção de uma antena para simular uma descarga atmosférica direta em prédios.

As conclusões e propostas para continuidade deste trabalho são apresentadas no último capítulo, *Conclusões*.

Estudos em modelo reduzido realizados, objetivando atingir uma velocidade de propagação da onda no canal na faixa de 10% a 50% da velocidade da luz, modelaram o canal como uma linha de transmissão vertical onde aumentando-se a indutância ou a capacitância pode-se conseguir uma velocidade de propagação na faixa anteriormente citada. Uma outra forma de conseguir um canal com a velocidade desejada, sem alterar a capacitância e/ou a indutância de uma linha disposta verticalmente, pode ser conseguido através das perdas, como será mostrado no anexo 1, *Canais com Perdas Elevadas*, em um estudo inicial utilizando modelo reduzido.

No anexo 2, *Análise da Tensão Induzida no Interior do SPDA*, são apresentados estudos onde se analisa a influência das correntes que circulam no SPDA na tensão induzida em "loop" (2,5 m de comprimento, 48 cm de altura) localizado no interior do prédio, sendo utilizados dois modelos de canal distintos.

No anexo 3 são apresentadas fotografias dos modelos reduzidos implementados neste trabalho.

2 Descargas Atmosféricas

2.1 Introdução

O estudo de qualquer fenômeno físico utilizando as técnicas de modelo reduzido requer um conhecimento prévio acerca dos mecanismos físicos a partir dos quais se desenvolve o fenômeno em questão. Desta forma, serão apresentados a seguir os mecanismos físicos da descarga atmosférica.

As fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as nuvens de tempestade ou nuvens do tipo cúmulo-nimbus, embora outros tipos de nuvem também possam produzir descargas atmosféricas [27]. Estas nuvens são polarizadas segundo um processo ainda não explicado satisfatoriamente, gerando campos elétricos de valores suficientes para romper a suportabilidade do meio. A estrutura típica de uma nuvem está apresentada na figura 1, onde pode-se observar a presença de cargas positivas na base

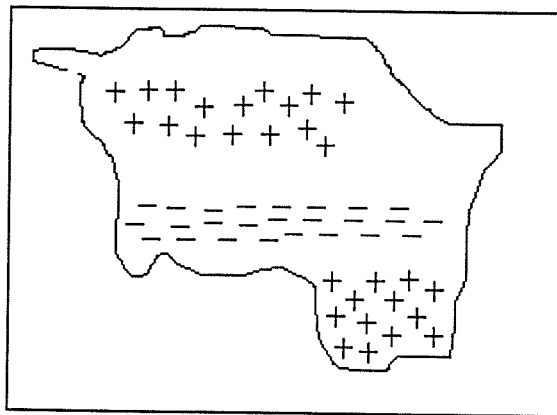


Figura 1: Estrutura típica das cargas elétricas de uma nuvem cúmulo-nimbus

da nuvem, de cargas negativas no interior da nuvem e a presença de uma concentração de cargas positivas no topo da nuvem [27].

São quatro os tipos de descargas que podem ocorrer:

- descargas dentro da própria nuvem;
- descargas entre nuvens;
- descargas entre a nuvem e a atmosfera;
- descargas entre nuvem e terra [28].

Mais da metade das descargas atmosféricas ocorre dentro da própria nuvem, mas nem sempre esta descarga é detectável, dificultando o estudo através de estações de observação localizadas em terra. Além disso, a maioria dos estudos que analisam a interação dos campos eletromagnéticos das descargas atmosféricas e instalações elétricas consideram que essas descargas podem ser desprezadas quando da análise das tensões induzidas, sendo que apenas as descargas entre nuvem e terra são de interesse. Entretanto, é importante salientar que em artigos publicados no IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility de agosto de 1999, Vernon Cooray, Viktor Scuka e outros [29, 30] mostram que as descargas dentro da própria nuvem podem gerar tensões induzidas de amplitudes comparáveis às geradas por descargas para a terra, desde que a instalação elétrica considerada possua tamanho ou comprimento limitado e a descarga atmosférica ocorra a pelo menos algumas dezenas de quilômetros do local em estudo.

Nos casos apresentados na referência [29] citada anteriormente, as descargas atmosféricas para a terra estavam localizadas a uma distância de 50 a 100 km do ponto de medição, sendo comparados os valores de campo elétrico e tensão induzida medidos e calculados, onde apresentaram boa correspondência. Ao contrário das descargas para a terra, a localização das descargas dentro da própria nuvem se torna uma tarefa difícil, sendo necessários equipamentos especiais para tal medição. Quando comparadas as tensões induzidas pelas descargas para a terra e as descargas dentro das nuvens, constatou-se que para uma determinada amplitude de campo elétrico os pulsos do último tipo de descarga podem gerar tensões induzidas mais elevadas que aquelas geradas por descargas para a terra. Entretanto,

esta observação pode não ser válida para grandes estruturas como linhas de distribuição e/ou para descargas próximas.

Desta forma, como estamos lidando com descargas próximas, apenas as descargas entre nuvem e terra são de interesse, sendo o único tipo aqui apresentado. Além disso, este tipo de descarga pode causar acidentes com pessoas e animais, incêndios em florestas e construções e distúrbios nos equipamentos elétricos e eletrônicos, sendo importante o seu conhecimento.

2.2 Origem e Formação da Descarga Atmosférica

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

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

No caso de descargas positivas, estas ocorrem com uma frequência bem menor que as negativas, são caracterizadas por uma onda de corrente de retorno de taxa de subida baixa e valor de amplitude elevado. Com relação à direção de propagação, as descargas cuja direção de propagação ocorre da nuvem para a terra, são as que normalmente ocorrem, sendo que em estruturas muito altas pode ocorrer a formação de canais a partir da terra em direção à nuvem [31].

As descargas atmosféricas descendentes de polaridade negativa representam 90% dos casos registrados [27, 32, 33], e os 10% restantes são

representados pelos demais tipos. Desta forma, será apresentado a seguir, a seqüência de uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente de polaridade negativa.

Quando o gradiente elétrico da concentração de cargas na nuvem excede a rigidez dielétrica do ar, dá-se a descarga atmosférica, a qual é caracterizada pelo movimento de cargas em direção à terra por um caminho tortuoso e em passos (etapa do líder passo a passo). De acordo com a referência [27], os passos do líder têm uma duração típica de $1 \mu\text{s}$ e dezenas de metros de comprimento. Para Berger [32], o comprimento do líder passo a passo varia entre 10 e 50 m, buscando o caminho mais fácil para a formação de um canal para a propagação de cargas para o solo. Entre cada passo existe uma pausa entre 20 e $50 \mu\text{s}$ de acordo com UMAN [27] e entre 30 e $50 \mu\text{s}$ de acordo com Berger [32]. A carga transferida por todo o fenômeno de propagação do líder passo a passo fica em torno de 5 coulombs de cargas negativas no sentido do solo, em um tempo médio de dezenas de milissegundos. A velocidade média do fenômeno é em torno de 200 km/s, sendo que a corrente média do líder situa-se entre 100 e 1000 A com pulsos de corrente em torno de 1 kA [27].

A figura 2 mostra o processo mais comum de desenvolvimento de uma descarga atmosférica - formação de uma descarga piloto a partir de um centro de cargas negativas na nuvem, seguido por uma corrente de retorno.

Antes da descarga piloto atingir o solo, ocorre um movimento ascendente de cargas de polaridade oposta à da descarga piloto, devido ao alto campo elétrico existente entre a ponta da descarga e o solo. Então, estas cargas ascendentes se encontram com a descarga piloto em algum ponto acima do solo, iniciando a partir deste ponto a corrente de retorno [31].

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

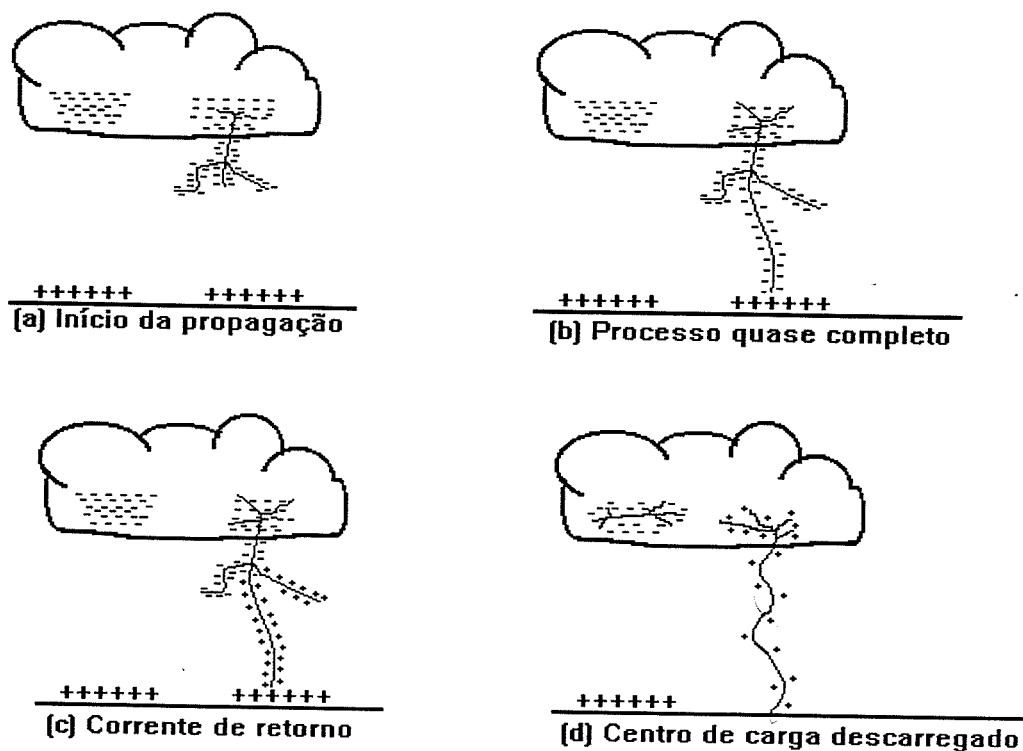


Figura 2: Aspecto de uma descarga atmosférica [31]

eletricamente carregado, que é o canal de descargas. A corrente de retorno, então, se propagará pelo canal, anulando primeiramente as cargas do canal e posteriormente as cargas da nuvem.

O tempo de frente da onda de corrente de retorno é, tipicamente, de 1 a 10 μs e o tempo de semi-cauda está na faixa de 20 a 60 μs , sendo que sua amplitude se encontra na faixa de 10 a 100 kA [34]. A velocidade de propagação da corrente de retorno varia de 10.000 km/s a 150.000 km/s conforme [27] e com velocidades na faixa de 6% a 45% da velocidade da luz no vácuo segundo referência [34]. Próximo do solo a velocidade é mais alta e à medida que se aproxima das nuvens a velocidade diminui. O tempo de trânsito típico da propagação desta corrente ao longo do canal é de 100 μs [27]. Por suas características, elevada amplitude e alta taxa de subida, a corrente de retorno pode ser identificada como a principal etapa da descarga atmosférica para o fenômeno da tensão induzida [28].

No momento em que a corrente de retorno completa a descarga do centro de cargas da nuvem que iniciou o processo, o potencial desse centro

de cargas fica bastante reduzido, desenvolvendo-se uma elevada diferença de potencial entre este e um outro centro qualquer dentro da nuvem. Desta forma, são criados canais que ligam essas regiões e o caminho ainda ionizado da primeira descarga, podendo se iniciar um novo processo só que agora o raio segue um caminho sem ramificações e com uma velocidade bem maior que a da descarga piloto. Esse processo pode repetir-se várias vezes; são as descargas subsequentes. Estima-se que a carga depositada no canal pela propagação contínua é menor que no caso anterior, o que está de acordo com as baixas amplitudes das ondas de correntes de retorno medidas em descargas subsequentes [31].

A tabela a seguir apresenta mais dados relativos às descargas atmosféricas negativas descendentes, os quais foram reunidos por Uman [34] a partir de publicações de vários autores.

	Mínimo	Médio	Máximo
Formação do Canal de Descargas:			
- <u>propagação passo a passo:</u>			
. comprimento do passo, m	3	50	200
. intervalo de tempo entre passos, μs	30	50	125
. 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
- <u>propagação contínua:</u>			
. 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
Corrente de Retorno:			
. velocidade de propagação, m/s	2×10^7	8×10^7	$1,6 \times 10^8$
. taxa de subida da corrente, $\text{kA}/\mu\text{s}$	<1	10	>80
. tempo de pico da corrente, μs	<1	2	30
. valor de pico da corrente, kA		10 - 20	110
. tempo de semi-cauda da corrente, μs	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
Descarga Atmosférica:			
. número de descargas (inicial mais subsequentes)	1	3 - 4	26
. intervalo de tempo entre inicial e subsequente, ou entre estas na ausência de corrente contínua, ms	3	40	100
. duração da descarga, s	10^{-2}	0,2	2
. carga transferida incluindo a corrente contínua, C	3	25	90

Tabela 1: Parâmetros Gerais das Descargas Negativas Descendentes

3 O Canal de Descarga

3.1 Introdução

O canal de descarga é o caminho pelo qual flui a corrente de retorno, portanto a sua modelagem é de fundamental importância, e por isso deve ser bem analisada. Visando alcançar este objetivo, fez-se um estudo da modelagem do canal através de uma análise do fenômeno da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, como será apresentado a seguir.

As técnicas de modelo reduzido para estudos de fenômenos eletromagnéticos são de grande eficácia para representar tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, assim como em cabos telefônicos. Esta técnica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos, pois permite a simulação de descargas em diversos pontos ao longo da linha, sendo que as características da corrente, como forma de onda, velocidade de propagação, tempo de frente de onda, assim como ponto de incidência da descarga e distância do canal à linha são conhecidos.

A medição de tensões induzidas por descargas reais em linhas de tamanho real não é muito utilizada, pois o tempo necessário para se obter uma quantidade de dados significativos é muito grande, não se conhecendo as características da corrente da descarga e nem o ponto de incidência desta. Estes fatores desestimulam o uso de protótipos reais nas medições, uma vez que as informações disponíveis não são completas, pois ou os dados se referem apenas às tensões induzidas ou se referem ao ponto de

incidência e características da corrente da descarga. Além disso, um modelo real é extremamente dispendioso.

Sendo assim, foi construído um modelo reduzido para estudar o fenômeno da tensão induzida em linhas aéreas, com particular atenção para a modelagem do canal de descarga.

3.2 A Teoria de Rusck

O estudo da tensão induzida em linhas aéreas causada por descargas atmosféricas já foi abordado por vários pesquisadores que desenvolveram suas teorias e metodologias para o seu cálculo teórico, dentre as quais pode-se citar: teoria de Uman, de Chowdhuri e a teoria de Rusck, proposta em 1957 [35].

De acordo com Rusck, a corrente de retorno que se propaga pelo canal de descarga é a principal causadora da tensão induzida, sendo que os demais fenômenos (ruptura preliminar e canalização de cargas negativas para a terra) podem ser desprezados, em função de não provocarem uma variação de campo eletromagnético suficientemente rápida que os tornem significativos do ponto de vista da tensão induzida em linhas.

Dessa forma, Rusck considera um canal de descarga ionizado e carregado, disposto verticalmente em relação ao solo, onde se propagará a corrente de retorno, do solo em direção à nuvem. Em sua teoria ele não considera nem a tortuosidade do canal, nem a variação da distribuição de cargas ao longo deste, causada pela variação da capacitância para a terra. Como a corrente de retorno neutraliza as cargas presentes no canal, esta é considerada em forma de uma função degrau e viaja sem distorções ao longo do canal.

Finalmente Rusck considera que o solo possui uma resistividade nula, isto é, modela o solo como um condutor perfeito e utiliza o método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético. Além disso, assume que não há variação significativa do campo entre o solo e a linha, pois a altura desta é muito pequena comparada com o comprimento do canal [26].

Resumindo, o modelo desenvolvido por Rusck para o cálculo da tensão induzida em linhas aéreas é composto por um condutor carregado uniformemente, disposto verticalmente em relação ao solo, representando o canal da descarga atmosférica, onde se propagará a corrente de retorno, representada por um degrau de corrente viajando ascendentemente no condutor. A partir dessas considerações e utilizando as equações de Maxwell, Rusck obteve uma expressão analítica para o cálculo dos campos eletromagnéticos gerados pela descarga atmosférica de onde deduz a expressão para o cálculo da tensão induzida.

Neste momento torna-se importante ressaltar que, na modelagem da descarga adotada por Rusck, a corrente de retorno viaja pelo canal neutralizando as cargas ali presentes, enquanto na modelagem implementada no modelo reduzido deste trabalho, o canal está inicialmente neutro e quando a corrente de retorno é injetada, ela se propaga pelo canal depositando cargas elétricas ao longo deste. Com relação ao campo eletromagnético calculado, esta diferença resulta em um valor de campo elétrico inicial diferente, sendo que este é igual ao valor do campo eletrostático devido à carga do canal no instante inicial no primeiro caso, e igual a zero no segundo caso [35]. Como a componente estática do campo elétrico não contribui para a tensão induzida, ambas as modelagens resultam em um mesmo valor de tensão induzida [28].

3.3 O Modelo Reduzido Implementado

O sistema analisado nesta parte do trabalho simula basicamente uma linha aérea e uma descarga atmosférica indireta que atinge o solo nas proximidades dessa linha. Como o objetivo da simulação em modelo reduzido é ser o mais próximo possível da realidade, deve-se primeiramente determinar as dimensões físicas do modelo e dessa forma o fator de escala, de acordo com as dimensões físicas do sistema real.

Uma linha de distribuição aérea real tem uma altura que varia de 6 a 12 m, enquanto o comprimento do canal de descarga está na faixa de 2000 a

14000 m [34]. Sendo assim, quando da determinação do fator de escala deve-se levar em consideração dois fatores:

- Qual a estrutura disponível de sustentação do canal, quando este tem um comprimento muito elevado, no caso de modelo reduzido grande;
- Quais os equipamentos de geração e medição disponíveis, no caso de modelo reduzido muito pequeno, uma vez que há um aumento considerável da frequência dos sinais envolvidos, pois embora as distâncias sejam menores no modelo reduzido, em ambos os casos (real e reduzido) as perturbações eletromagnéticas se propagam com a velocidade da luz; além disso, há a dificuldade de manipulação do modelo muito pequeno [28].

Com relação ao primeiro fator, o canal do modelo pode ter um comprimento de até 25 m, que corresponde à altura do galpão do L.E.A.T (Laboratório de Extra Alta Tensão), o que daria, considerando um canal de descarga real de 5000 m, um fator de escala de até 1:200. Já para o segundo fator, tem-se que as ondas mais rápidas que ocorrem em uma descarga atmosférica têm tempo de frente da ordem de $1\mu\text{s}$ o que implicaria, usando o fator acima estabelecido (1:200), em ondas na faixa de 5 ns de tempo de frente, o qual é compatível com o sistema de medição e geração disponíveis.

Considerando os pontos acima expostos e por motivo de praticidade optou-se por um fator de escala de 1:100.

3.3.1 - Plano Terra

Embora nos sistemas reais o plano de terra apresente perdas (tanto o solo como o concreto, asfalto e calçamento apresentam condutividades finitas), para este estudo considerou-se um plano ideal (resistividade nula), uma vez que esta opção é conservativa do ponto de vista de sobretensões resultantes [28], sendo utilizado um plano de cobre cujas dimensões ideais seriam infinitas. Entretanto, como isto não é possível, pode-se reduzir essas dimensões a valores práticos suficientes para a obtenção de resultados compatíveis com os simulados.

Por facilidade de confecção optou-se por um plano metálico de 1,26 m de largura, 2,25 m de comprimento e 0,6 mm de espessura. Com este comprimento é possível a simulação de linhas reais de até 180 m de comprimento, pois foi deixada uma distância de aproximadamente 25 cm entre a terminação da linha e a borda do plano para que esta não influencie a linha.

Na realidade, este plano de terra é constituído por duas chapas de cobre de 0,63 m de largura por 2,25 m de comprimento, sendo que a junção das chapas foi soldada. O plano foi montado sobre uma estrutura de madeira de 59 cm de altura para facilitar a manipulação do modelo. A influência da elevação do plano será apresentada nos resultados.

3.3.2 - Canal de Descarga

A modelagem do canal de descarga deve procurar manter as mesmas condições de propagação da corrente de retorno presentes no canal real, ou seja, as perdas, as não linearidades, a tortuosidade e a velocidade de propagação, a qual, segundo as teorias sobre descargas atmosféricas, está na faixa de 10% a 50% da velocidade da luz [34]. Entretanto, uma modelagem completa seria extremamente difícil de ser implementada, sendo que apenas a velocidade de propagação e as perdas serão consideradas.

Portanto, adotou-se como modelo para representar o canal de descarga uma linha de transmissão retilínea disposta verticalmente em relação ao plano terra, cujos parâmetros físicos (indutância e capacitância por metro) fornecem uma velocidade de propagação na faixa anteriormente citada.

Apesar deste modelo simplificar bastante o fenômeno, estudos teóricos e experimentais indicam que os campos eletromagnéticos criados pela linha de transmissão vertical são similares aos campos criados pelas descargas reais [28].

Isto significa que podemos simular os efeitos de uma descarga atmosférica sobre uma linha aérea ou uma edificação utilizando como fonte de campo uma linha de transmissão vertical percorrida por uma corrente impulsiva. Desta forma, é apresentada a seguir a formulação matemática

utilizada na determinação dos valores da impedância e velocidade de propagação dos canais de descargas utilizados (linhas de transmissão).

Segundo Kuffel [36], a capacitância de um cilindro disposto verticalmente em relação ao plano terra é dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4s+l}{4s+3l}}\right)} \quad (1)$$

onde:

ϵ - permissividade do meio, F/m

l - comprimento do canal, m

d - diâmetro do canal, m

s - distância da base do canal ao plano de terra (figura 3).

para $s \ll l$, tem-se:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\frac{1,15l}{d}} \quad (F) \quad (2)$$

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 terra. Sendo assim, o valor calculado para a capacitância por metro do canal é um valor médio desta capacitância.

Segundo Kraus [37], a indutância de um solenóide é dada por:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (H) \quad (3)$$

onde:

μ - permeabilidade magnética do meio, H/m

l - comprimento do solenóide, m

N - número de espiras do solenóide, adimensional

A - área da espira, m²

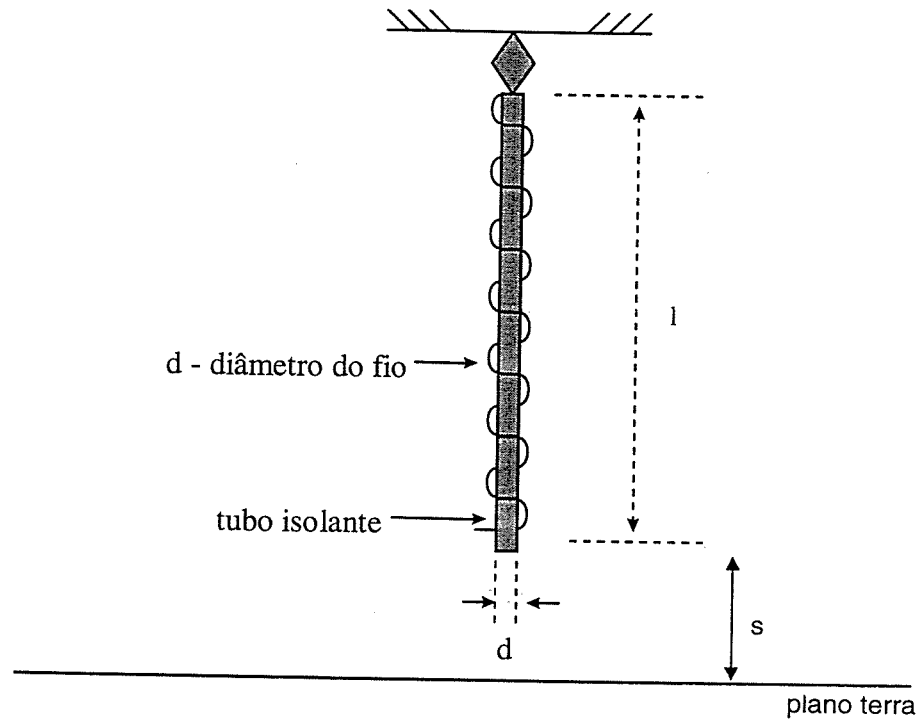


Figura 3: Configuração para determinação da capacitância do canal para a terra.

A impedância do canal pode ser então calculada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

A velocidade de propagação é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Com o objetivo de estudar a modelagem do canal de descarga, dois canais distintos foram analisados neste trabalho, os quais serão descritos a seguir:

→ Canal 1

tamanho: 2,92 m

diâmetro externo: 2,07 cm

número de espiras por metro: 610 espiras/m

impedância calculada: 3794,93 Ω

velocidade de propagação: 24,79 m/ μ s

material utilizado: tubo de pvc de 1,5 cm de diâmetro, no qual foi enrolado em hélice de passo justo um fio de cobre esmaltado de 0,5 mm de diâmetro.

→ Canal 2

tamanho: 3 m

diâmetro externo: 8,2 mm

número de espiras por metro: 1730 espiras/m

impedância calculada: 4645,56 Ω

velocidade de propagação: 25,32 m/ μ s

material utilizado: tubo de fenolite de 6 mm de diâmetro, no qual foi enrolado em hélice de passo justo um fio de cobre esmaltado de 0,57 mm de diâmetro. Como não foi possível confeccionar um canal único, pois o tamanho máximo do tubo encontrado é de 1 m, confeccionou-se 3 sessões cujas terminações metálicas foram soldadas.

Os canais apresentados possuem velocidade de propagação da onda de aproximadamente 25 m/ μ s, o que corresponde a 8,33% da velocidade da luz e, portanto, fora da faixa de uma descarga real (10% a 50%). Entretanto, como o material disponível para confecção dos canais foi o acima citado, estes foram utilizados neste trabalho, apresentando resultados compatíveis com os simulados.

Um canal de descarga real possui diâmetro externo na faixa de 1,5 cm a aproximadamente 2,0 m [34]. Neste trabalho, o diâmetro dos canais de descarga utilizados equivalem a um canal real de 2,07 m para o canal 1, e 0,8 m para o canal 2.

Todos os canais estudados, quando aplicamos o fator de escala, têm comprimentos bem menores que um canal real. Entretanto, estes foram suficientes para que a reflexão da onda de corrente de retorno na extremidade superior do canal não alterasse a onda de tensão induzida.

Com o objetivo de se analisar a velocidade de propagação das ondas nos canais utilizados, foi realizado um estudo onde aplicou-se uma onda em forma de degrau na base do canal, e mediu-se as ondas de tensão e corrente injetadas, identificando o ponto de reflexão das ondas e, conseqüentemente, o tempo de trânsito desta. O gerador utilizado para a energização dos canais analisados foi o modelo Tektronix CFG280, que fornece uma amplitude máxima de saída de 20 V_{p-p}, tem uma impedância de

saída igual a 50Ω e uma faixa de frequência de 0,1 Hz a 11 MHz. Os resultados estão apresentados nas figuras 4, 5, 6 e 7:

É importante salientar que no cálculo da velocidade de propagação, o valor da capacitância foi obtido conforme a formulação anterior. Já a indutância foi calculada utilizando a impedância medida e o valor da capacitância calculado.

→ **Canal de 2,92 m - $v = 24,79 \text{ m}/\mu\text{s}$ - $Z = 3794,93 \Omega$**

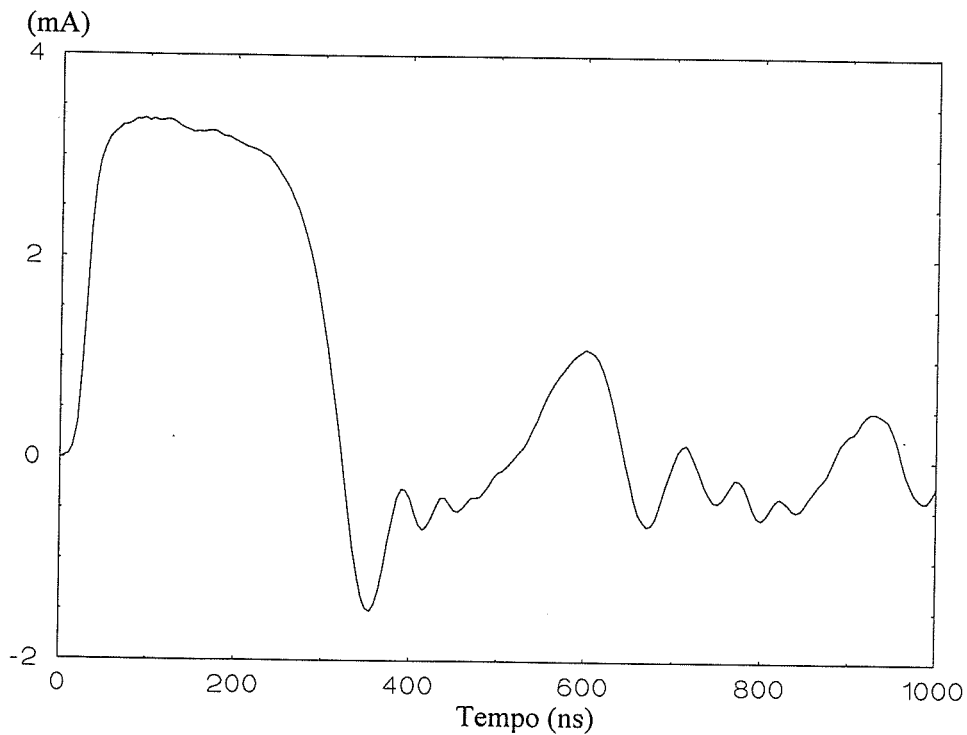


Figura 4: Corrente aplicada na base do canal 1 x tempo

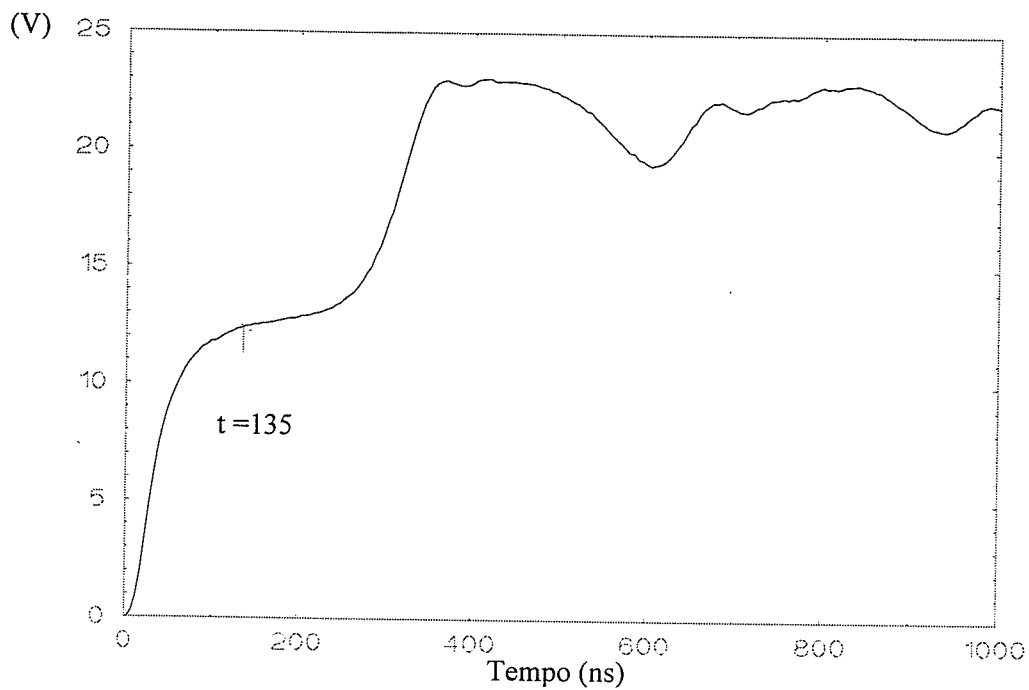


Figura 5: Tensão aplicada x tempo

impedância medida: $Z_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} / I_{\text{medido}} = 12,4\text{V} / 3,36\text{mA} = 3690,47 \Omega$

velocidade de propagação medida: $v = L/t = 2,92\text{m} / 135\text{ns} = 21,63 \text{ m}/\mu\text{s}$

→ Canal de 3 m - $v = 25,32 \text{ m}/\mu\text{s}$ - $Z = 4645,56 \Omega$

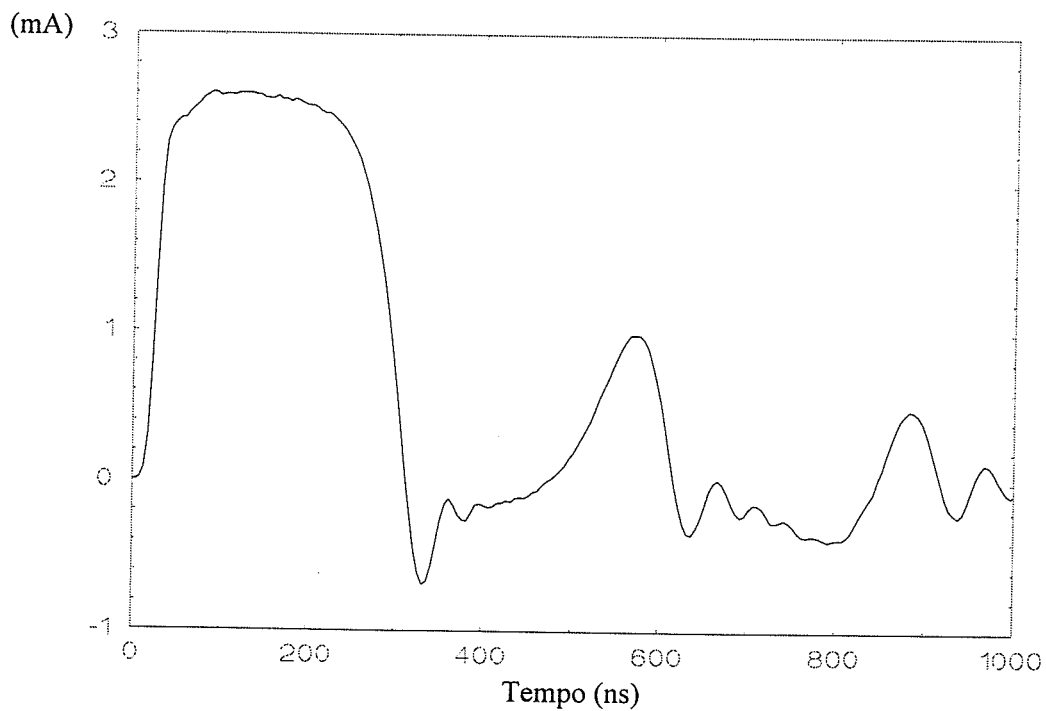


Figura 6: Corrente aplicada na base do canal 2 x tempo

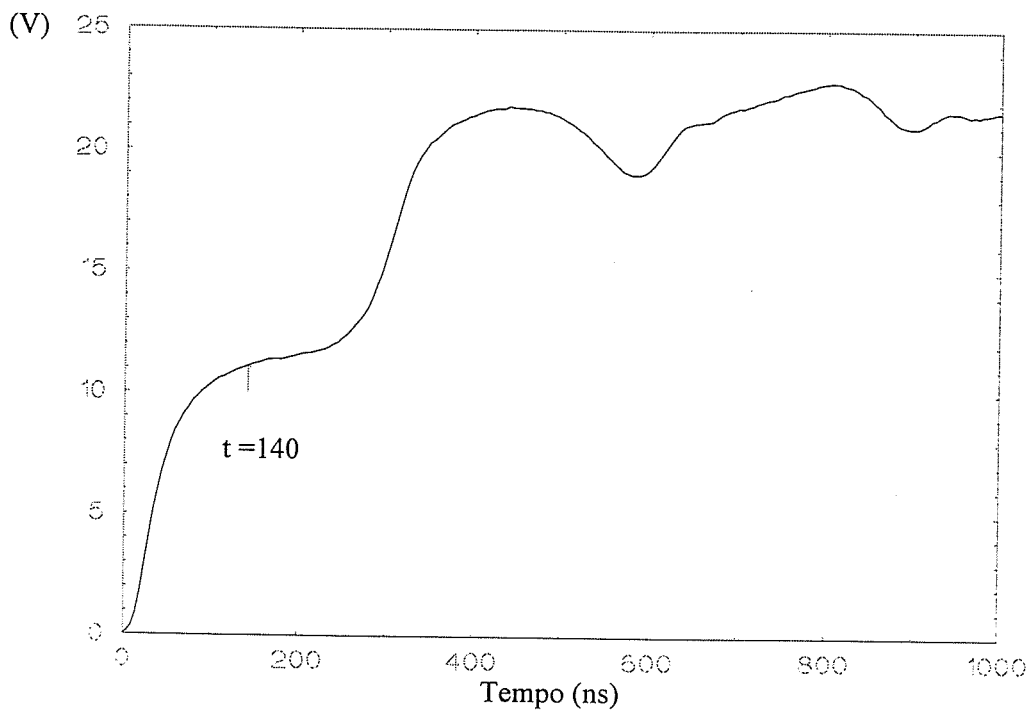


Figura 7: Tensão aplicada x tempo

impedância medida: $Z_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} / I_{\text{medido}} = 11,2\text{V} / 2,61\text{mA} = 4291,19 \Omega$

velocidade de propagação medida: $v = L/t = 3\text{m} / 140\text{ns} = 21,58 \text{m}/\mu\text{s}$

A seguir é apresentada uma tabela comparativa dos valores calculados e medidos da impedância e velocidade de propagação dos canais analisados.

	$Z_{\text{calculado}}$ (Ω)	Z_{medido} (Ω)	Ez (%)	$v_{\text{calculado}}$ (m/ μ s)	v_{medido} (m/ μ s)	Ev (%)
Canal 1	3794,93	3690,47	2,75	24,79	21,63	12,75
Canal 2	4645,56	4291,19	7,63	25,32	21,58	14,77

Tabela 2: Valores da impedância e velocidade de propagação medidos e calculados para os canais analisados.

Como podemos observar houve uma variação entre os valores calculados e medidos. Com relação à parte experimental, esses erros estão relacionados principalmente com a determinação do ponto (valor do tempo)

onde houve a reflexão da onda, o qual é utilizado para o cálculo da velocidade de propagação. Além disso, temos os erros inerentes às medições do comprimento, diâmetro e número de espiras do canal, os quais são utilizados para o cálculo das capacitâncias e indutâncias dos canais analisados. Já na parte dos cálculos, é importante salientar que as fórmulas utilizadas são aproximações, o que também leva a erros.

3.3.3 - Corrente de Retorno

A teoria de Rusck, assim como outras teorias, estabelece que a corrente de retorno é a etapa da descarga atmosférica mais importante para a tensão induzida, como já citado anteriormente. Como a velocidade de propagação da corrente de retorno já é estabelecida na modelagem do canal, resta modelar o seu tempo de frente e de cauda; entretanto, para este estudo apenas o tempo de frente será modelado.

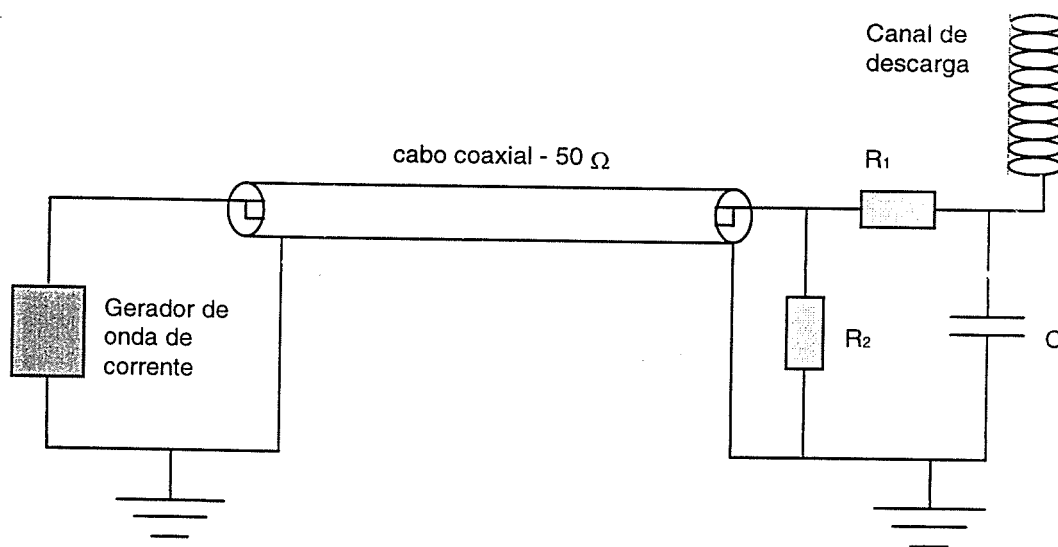
As ondas de corrente de uma descarga atmosférica real têm, na maioria das vezes, o seu tempo de frente na faixa de 7 μs , sendo o seu valor crítico da ordem de 1,2 μs [34]. O gerador de corrente utilizado no modelo reduzido fornece ondas de corrente cujos valores de tempo de frente estão na faixa de 47 ns. Sendo assim, aplicando-se o fator de escala, obtém-se ondas que na realidade têm o seu tempo de frente da ordem de 4,7 μs , que representam muito bem uma onda real.

Dessa forma, simulou-se a corrente de retorno através de uma onda de corrente de forma impulsiva, a qual foi injetada por um gerador de ondas, sendo que à medida que se propagava da terra em direção ao topo do canal, ia carregando o mesmo. Deve-se ressaltar aqui a necessidade de um circuito conformador de ondas de corrente para que se possa obter uma onda de corrente com tempo de frente adequado e sem oscilações em seus instantes iniciais, as quais influenciam muito o valor da tensão induzida na linha (apresenta um valor maior que o esperado). Entretanto, como se trata de um modelo reduzido, as dimensões desse circuito têm que ser muito pequenas para não alterarem as medições, pois caso contrário há a formação de

“loops” que induzem tensão na linha. O circuito básico utilizado é apresentado na figura 8.

O gerador de ondas utilizado foi construído no C.P.D.E.E. por Coelho e Boaventura [2], tendo as seguintes dimensões: 10 cm de largura, 4 cm de altura e 8 cm de profundidade. Ele é alimentado por 3 baterias de 9 V e fornece uma onda de tensão impulsiva máxima de 390 V de amplitude com tempo de frente de aproximadamente 33 ns e tempo de semi-cauda maior que 400 ns. Esta onda de tensão é aplicada na base do canal de descarga, produzindo uma onda de corrente de descarga na faixa de 50 mA.

A extremidade aberta do canal causa uma reflexão que modifica a onda de corrente de forma bem significativa. Entretanto, o tempo em que esta reflexão ocorre é bem maior que a duração da onda de tensão induzida correspondente a essa onda de corrente. Dessa forma, esta reflexão não altera as ondas de tensão induzidas na linha.



$R_1 = 270 \Omega$	$R_2 = 50 \Omega$	$C = 120 \text{ pF}$	→ canal 1
$R_1 = 150 \Omega$	$R_2 = 50 \Omega$	$C = 120 \text{ pF}$	→ canal 2

Figura 8: Circuito Conformador de Onda

3.3.4 - Linha Aérea

Na modelagem adotada utilizou-se uma representação unifilar para a linha aérea que, embora seja mais adequada à representação de um cabo telefônico do que de uma linha de distribuição, pode ser aplicada satisfatoriamente uma vez que o objetivo deste trabalho consiste em uma investigação básica da tensão induzida por descargas, assim como da modelagem do canal.

Considerando como valor representativo para a altura de uma linha de distribuição 7 m, modelou-se a linha do modelo a uma altura de 7 cm do plano (fator de escala 1:100). Para sustentar a linha não se utilizou postes ou qualquer outra estrutura semelhante, mas sim fios de nylon que estavam fixados em estruturas isolantes situadas na extremidade do plano. Embora esta modelagem torne o modelo bem simplificado, não chega a comprometer o trabalho, pois espera-se que o efeito de tais estruturas seja pequeno, além de não ser considerado em nenhuma teoria [28].

O diâmetro do fio utilizado na modelagem da linha é de 0,57 mm que equivale a um fio real de 5,7 cm, sendo portanto bem maior que os condutores utilizados em linhas de distribuição. Entretanto, essa diferença não influencia o fenômeno em estudo, pois as únicas alterações resultantes são no valor da impedância característica da linha e nos fenômenos relacionados com o efeito corona que não são considerados nesse trabalho [28].

3.3.5 - Localização dos Componentes do Modelo Reduzido

O plano terra, como dito anteriormente, foi montado sobre uma estrutura de madeira de 59 cm de altura. O canal de descarga foi fixado no teto do laboratório de compatibilidade eletromagnética por meio de um fio de nylon, localizando-se aproximadamente no meio do plano e bem próximo desse. O gerador de ondas de corrente foi colocado sobre o plano terra, enquanto o osciloscópio para medição de tensão induzida foi colocado sobre um carrinho de mesma altura do plano, e bem próximo ao ponto de medição

da tensão. A linha aérea, conforme exposto anteriormente, foi fixada por fios de nylon, estando a 33 cm da borda do plano (figura 9).

O modelo foi implementado no laboratório de compatibilidade eletromagnética, o qual possui dimensões pequenas (6,5 m de comprimento, 7,6 m de largura, sendo que existe uma cerca metálica a 3,35 m da parede). Dessa forma, esperava-se influências significativas de reflexões nas paredes, tetos e equipamentos desse laboratório, embora não se saiba com precisão como elas interfeririam. No entanto, os resultados se apresentaram bastante satisfatórios quando comparados com as simulações computacionais feitas, embora, para medições mais precisas, seja recomendado um local de dimensões grandes.

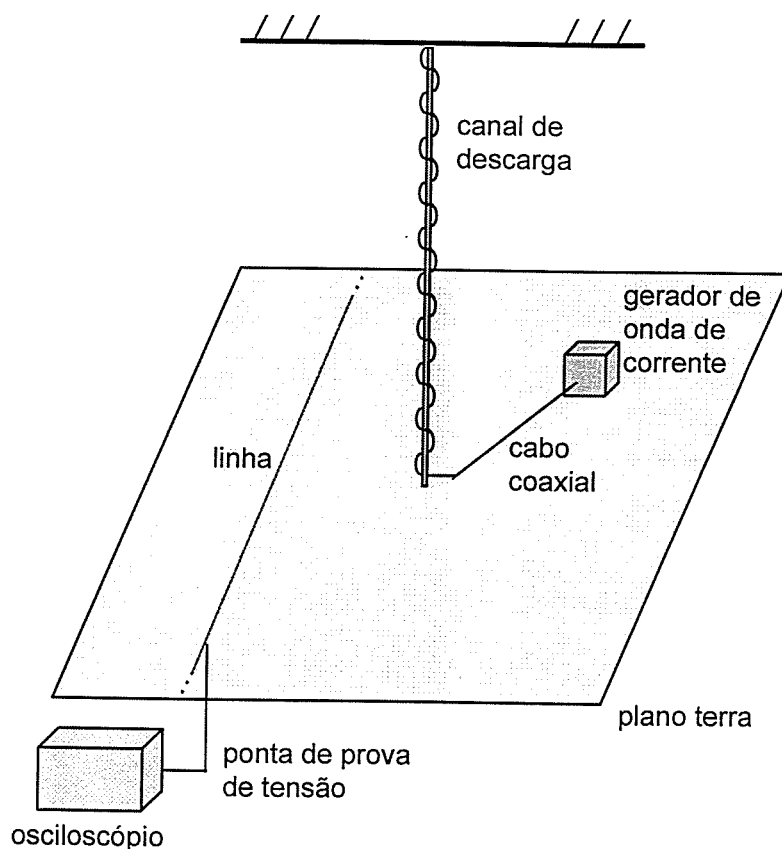


Figura 9: Disposição das partes do modelo

3.4 Considerações

Para a medição da corrente que é injetada no canal, colocou-se a ponta de prova sobre o plano, sendo a medição feita entre o circuito conformador de onda e o canal.

A medição da tensão induzida foi feita com uma ponta de prova de tensão de tal forma que a conexão da extremidade da linha (ponto de medição) e a entrada do osciloscópio foi feita a menor possível. Como a capacitância da ponta de prova de tensão é elevada (15 pF), esta deve ser considerada na simulação digital, pois influencia de forma significativa os resultados.

Como a ponta de prova de tensão foi bem aterrada, não foi preciso, neste caso específico, aterrar o osciloscópio diretamente ao plano de terra, uma vez que este ponto de terra foi suficiente para manter a carcaça do osciloscópio no mesmo potencial do plano.

3.5 Resultados Obtidos

As medições de tensão induzida realizadas no modelo reduzido implementado seguem uma configuração base, sendo que a linha possui o mesmo comprimento, a mesma terminação (casada), as mesmas distâncias com relação ao canal e às bordas do plano e a mesma altura; apenas o canal utilizado para a modelagem da descarga atmosférica varia. Nos dois casos, os resultados foram comparados com simulações computacionais obtidas através do programa para cálculo de tensão induzida desenvolvido por Lopes [17], baseado na teoria de Rusck. Além disso, fez-se uma medição com o plano de cobre no solo, para se poder analisar a influência da estrutura de madeira, usada como suporte.

A figura 10 apresenta o diagrama esquemático da montagem em modelo reduzido utilizada para as medições de tensão induzida. Em seguida serão apresentadas as ondas de corrente injetadas no canal de descarga e a

comparação entre as ondas de tensão induzida medidas e simuladas (figuras 11, 12, 13 e 14).

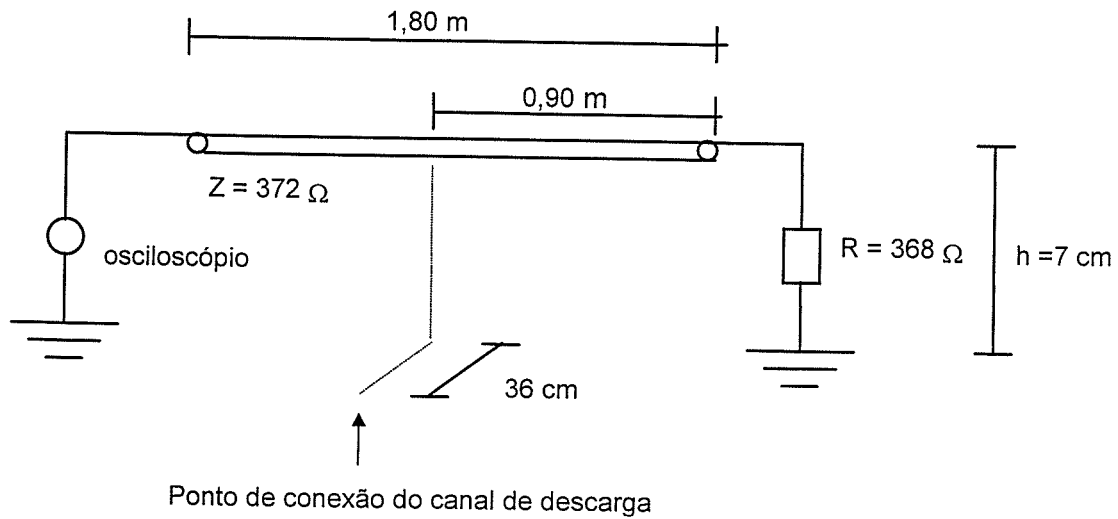


Figura 10: Diagrama esquemático da montagem em modelo reduzido

Caso 1: Canal de 1,5 cm de diâmetro - $v = 24,79 \text{ m}/\mu\text{s}$

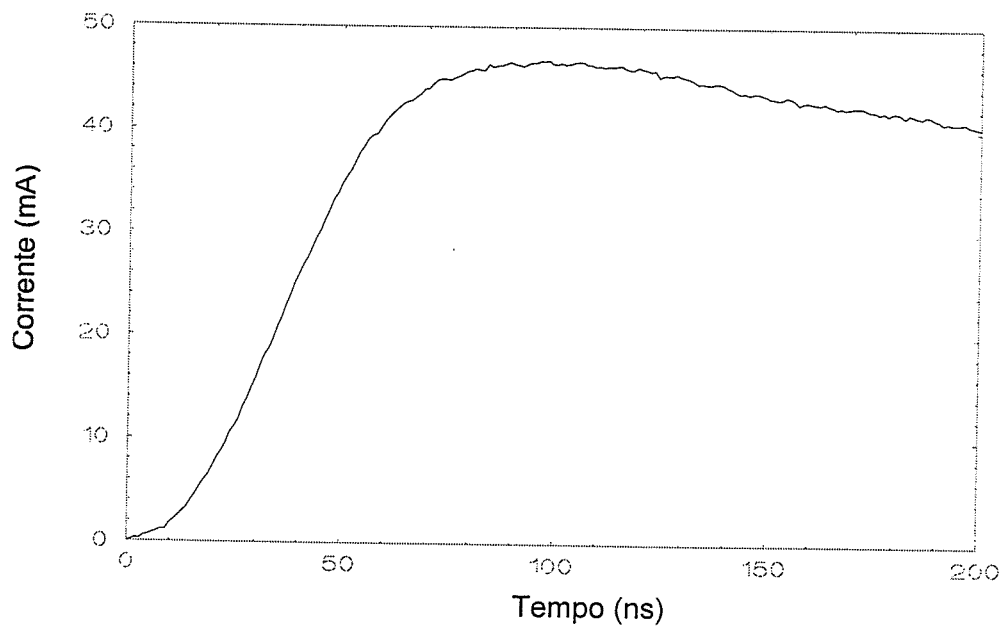


Figura 11: Corrente aplicada na base do canal 1, com valor de pico = 46,8mA e tempo de frente = 45ns

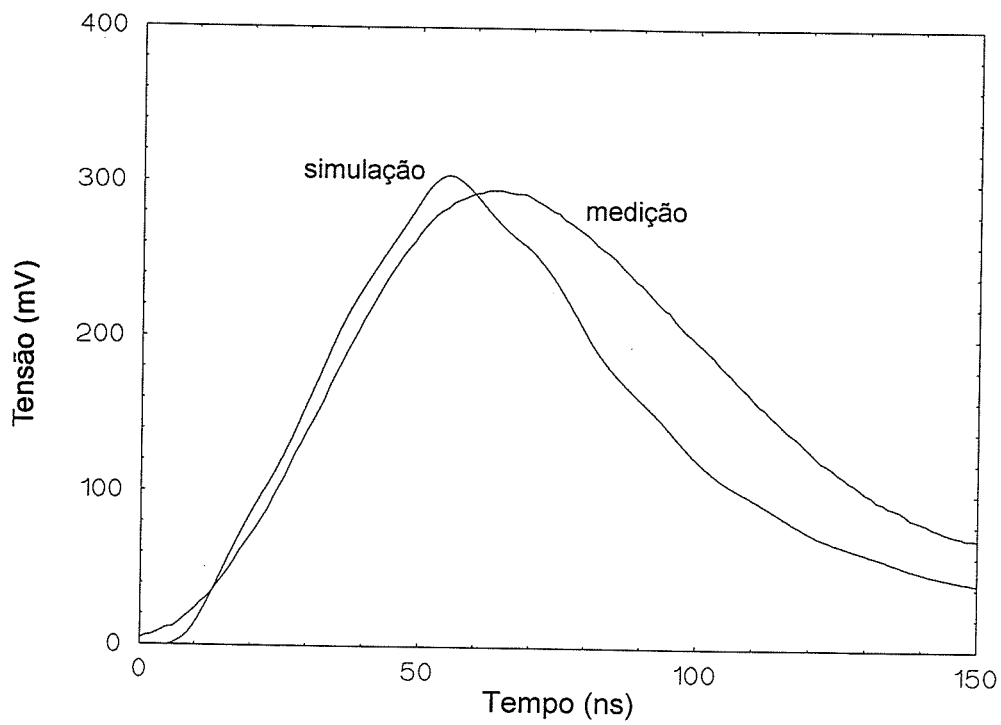


Figura 12: Tensão induzida na linha, simulação x medição

Caso 2: Canal de 0,8 mm de diâmetro - $v = 25 \text{ m}/\mu\text{s}$

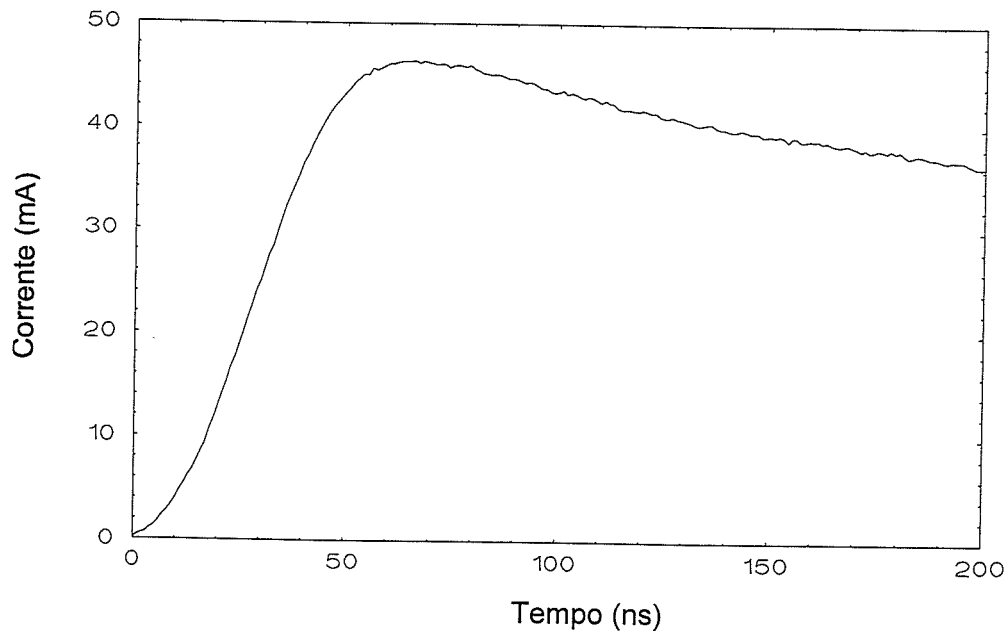


Figura 13: Corrente aplicada na base do canal 2, com valor de pico = 46,5 mA e tempo de frente = 47ns

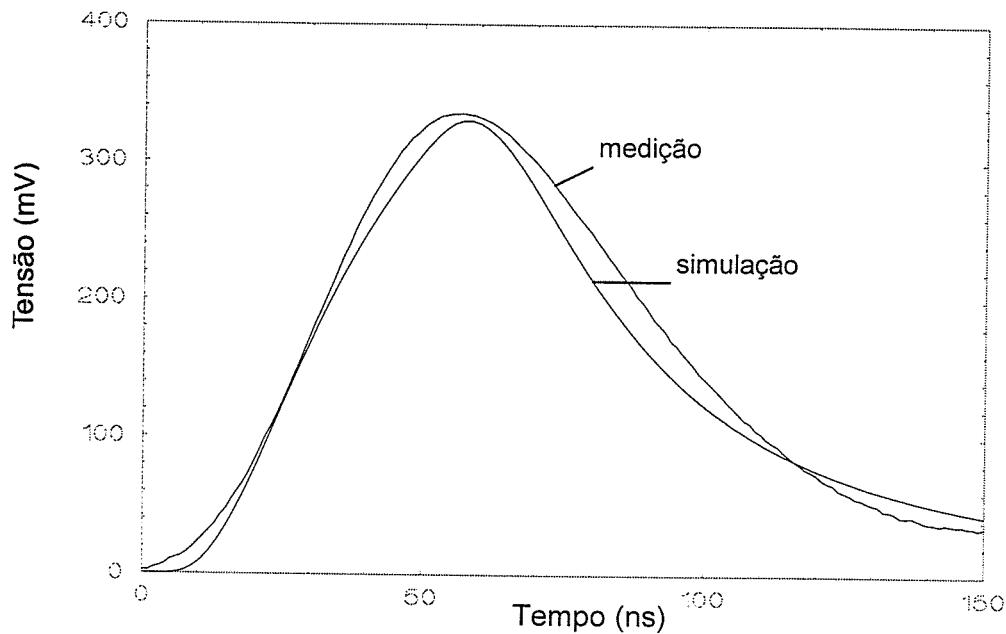


Figura 14: Tensão induzida na linha, simulação x medição

A partir da comparação entre as ondas de tensão induzida medidas e suas respectivas simulações observa-se uma boa correspondência entre suas formas de onda. Tanto os valores de pico, quanto os tempos de frente apresentam uma correlação boa, sendo que as diferenças existentes são pequenas. Há uma diferença maior nas caudas das ondas de tensão induzida medidas e simuladas, pois no programa computacional utilizado não houve uma preocupação em se modelar o tempo de cauda da onda de corrente de retorno.

No caso a seguir é apresentada uma comparação entre a onda de tensão induzida medida com o plano colocado sobre a estrutura de madeira, a 59 cm do solo, e com o plano sobre o chão (figuras 15 e 16). O canal utilizado foi o canal 2.

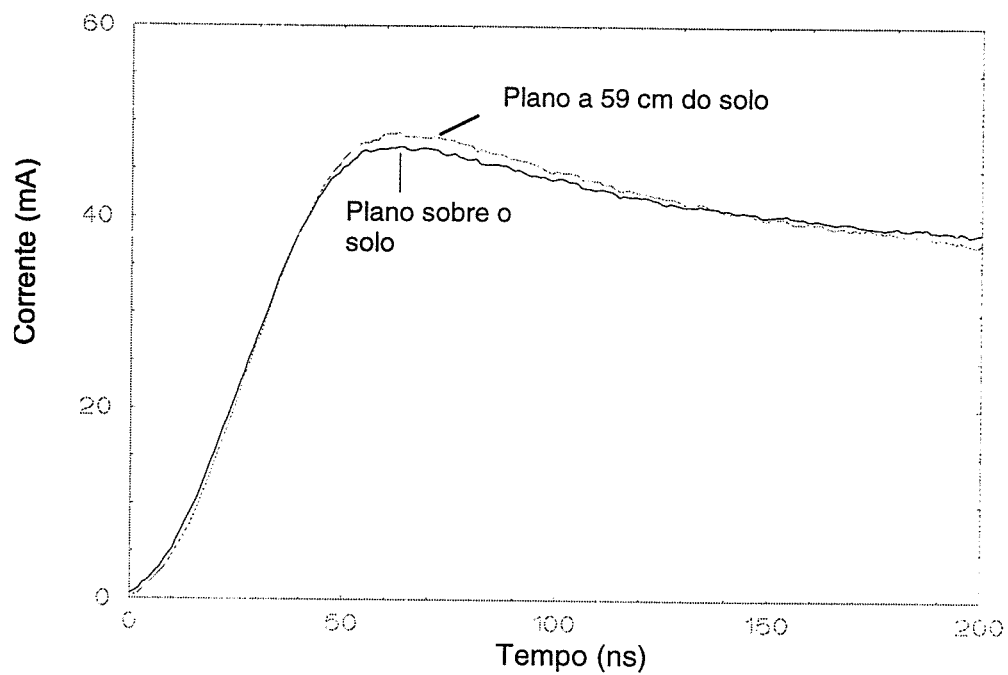


Figura 15: Corrente aplicada na base do canal 2

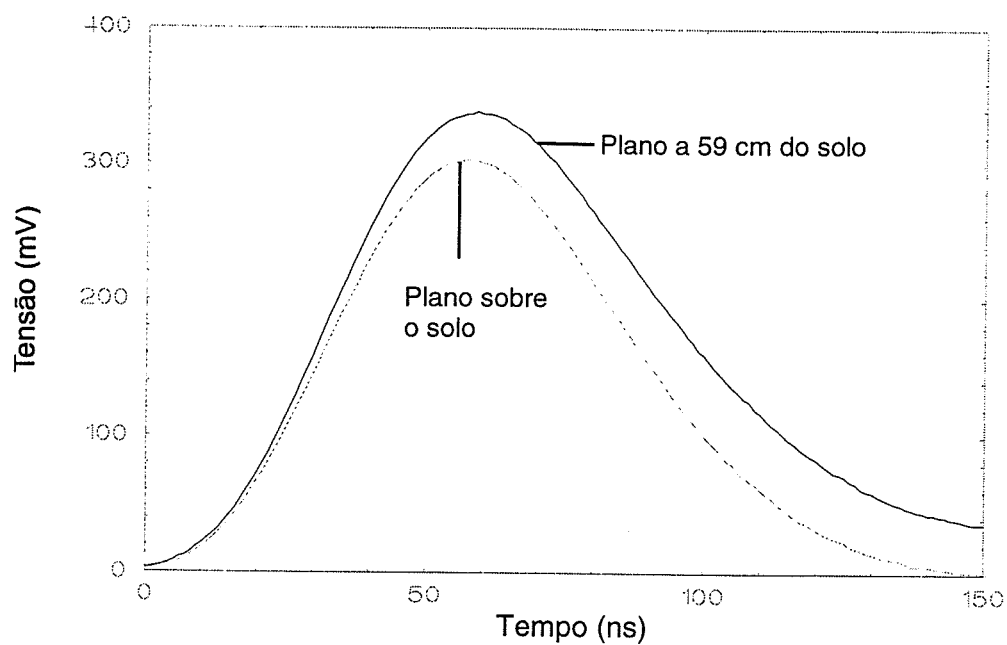


Figura 16: Tensão induzida na linha

A diferença que aparece entre as ondas de corrente injetadas no canal não têm relação com o fato do plano estar acima do solo 59 cm, ou sobre ele; essa diferença ocorreu pois o gerador não mantém a amplitude de onda, sendo que esta varia um pouco à medida que o gerador permanece em funcionamento.

Observa-se que as formas de onda da tensão induzida com o plano colocado diretamente sobre o solo ou com esse a 59 cm de altura, apresentam uma ótima correspondência. A diferença existente entre essas ondas corresponde justamente à diferença de potencial entre o plano de cobre e o piso do laboratório, tanto que quando aterrmos o plano de cobre que está a 59 cm do solo, a onda de tensão induzida obtida é idêntica ao caso em que o plano é colocado diretamente sobre o solo.

Portanto, para efeito deste trabalho, o modelo implementado sobre as estruturas de madeira é bastante apropriado, sendo a sua manipulação muito mais fácil.

3.6 Considerações Finais

Inicialmente, utilizou-se o gerador da Tektronix modelo CFG280, que fornece uma tensão cuja amplitude máxima é de 20 V e tempo de frente da ordem de 13 ns. Como a amplitude dos ruídos de rádio frequência inerentes ao ambiente de medição são da mesma ordem de grandeza da tensão induzida medida, estes ruídos interferiram de forma significativa na onda de tensão induzida. Desta forma, tornou-se necessário a utilização de um outro gerador que fornecesse uma tensão maior injetada no canal, resultando em uma tensão induzida de amplitude mais elevada. Conseqüentemente, o ruído frente ao novo valor de tensão induzida tornou-se desprezível, pois sua ordem de grandeza passou a ser pequena comparada a da tensão induzida na linha.

Quando da simulação computacional da capacitância da ponta de prova de tensão utilizou-se a forma alternativa de modelagem do capacitor onde ele é tratado como um "stub line", ou seja, o capacitor é substituído por uma

linha de transmissão tendo uma das extremidades conectadas ao ponto do circuito onde está o capacitor, e a outra extremidade aberta. A impedância característica e o comprimento do "stub line" são definidos a partir da constante de tempo envolvida no processo de carga do capacitor [25]. Sejam τ_s e Z_s o tempo de trânsito e a impedância característica do "stub line". Para obter τ_s faz-se:

$$3.Z.C = 20 \tau_s \Rightarrow \tau_s = 3/20.Z.C \quad (6)$$

onde:

Z - impedância da linha;

C - capacitância que se pretende simular.

A impedância característica é obtida da seguinte forma:

$$Z_s = \tau_s/C \quad (7)$$

Sendo assim, os valores da impedância característica, do comprimento e tempo de trânsito do "stub line" utilizados neste trabalho foram:

$$Z_s = 100 \Omega;$$

$$\text{comprimento} = 0,45 \text{ m};$$

$$\tau_s = 1,5 \text{ ns}.$$

Estudos em modelo reduzido realizados, objetivando atingir uma velocidade na faixa de 10% a 50% da velocidade da luz [34], modelaram o canal como uma linha de transmissão vertical ($v=1/(LC)^{1/2}$) onde aumentando-se a indutância ou a capacitância pode-se conseguir uma velocidade de propagação na faixa desejada. O que tem sido feito é o aumento da indutância, uma vez que o aumento da capacitância implicaria em um canal de diâmetro muito grande, o que é muito complicado para os estudos em modelo reduzido [3]. Uma outra forma de conseguir um canal com a velocidade desejada, sem alterar a capacitância e/ou a indutância de uma linha disposta verticalmente, é através das perdas. Sendo assim, em determinado momento desse trabalho foi realizado um estudo de canais com perdas, sendo apresentado no anexo 1 – Canais com Perdas Elevadas.

4 Modelo Reduzido e Sistema de Medição

4.1 Introdução

As descargas atmosféricas diretas em estruturas geram, além das quedas de tensão ao longo do condutor onde circula a corrente da descarga (cabos de descida ou ferragens da edificação), campos eletromagnéticos que são acoplados aos "loops" formados pelas instalações condutoras existentes na estrutura, dando origem a correntes e tensões induzidas. Enquanto as quedas de tensão geram diferenças de potenciais consideráveis nessas estruturas por onde circula a corrente, as quais resultam em um campo elétrico correspondente, o campo magnético depende diretamente da corrente da descarga atmosférica [10].

O nível dos transitórios é usualmente elevado o suficiente para causar danos e distúrbios a equipamentos sensíveis a influências eletromagnéticas externas, sendo portanto de grande interesse em análises de compatibilidade eletromagnética [9, 24].

Para se analisar estas influências eletromagnéticas, normalmente as correntes e tensões induzidas em "loops" detetores, ou seja, os sensores de campos eletromagnéticos, podem ser utilizadas como um indicador da intensidade da interferência eletromagnética em diferentes posições dentro da estrutura [9]. Neste trabalho, para se avaliar esses campos eletromagnéticos no interior de uma edificação devido a descargas

atmosféricas diretas, utilizou-se uma simulação analógica através da implementação de um modelo reduzido.

4.2 *Modelo Reduzido*

O sistema analisado neste trabalho simula basicamente um prédio e uma descarga atmosférica direta que interage com os conjuntos de condutores dessa edificação que, neste caso, está representado por um modelo simplificado, correspondendo apenas ao SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas). Um modelo fechado complexo resultaria em uma reprodução mais fiel da situação real, mas implicaria em inconveniências para as medições e análises futuras [23].

Uma vez definida a modelagem a ser utilizada para representar o canal de descargas atmosféricas (optou-se pelo canal 1 - capítulo 3), resta-nos a representação da edificação, sendo que a modelagem do plano terra utilizada será a mesma descrita no capítulo anterior, ou seja, a de um plano de terra ideal (resistividade nula), representado por uma chapa de cobre de dimensões finitas ($\rho_{\text{cobre}} = 1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$).

O ponto de partida para se determinar a dimensão física do modelo reduzido e, conseqüentemente, o valor do fator de escala a ser empregado, são as dimensões físicas do sistema real, assim como as dimensões do local onde o modelo será implementado. Considerando um prédio real de quatro andares, ou seja, altura de 12 m a 15 m, e sendo o modelo implementado no laboratório de compatibilidade (6,5 m de comprimento, 7,6 m de largura e 3,7 m de altura), optou-se por um fator de escala de 1:30.

A tabela a seguir mostra as relações entre o fenômeno real e o modelo reduzido, referentes às principais grandezas físicas envolvidas no fenômeno em estudo, dadas pelo fator de escala [28].

Fator de Escala (FE) = 1:30 = dimensão do modelo / dimensão real

Grandeza	Relação
Comprimento	$l_{\text{modelo}} = FE \times l_{\text{real}}$
Tempo	$t_{\text{modelo}} = FE \times t_{\text{real}}$
Condutividade	$\sigma_{\text{modelo}} = 1/FE \times \sigma_{\text{real}}$
Resistividade	$\rho_{\text{modelo}} = FE \times \rho_{\text{real}}$
Constante Dielétrica	$\epsilon_{\text{modelo}} = 1 \times \epsilon_{\text{real}}$
Permeabilidade Magnética	$\mu_{\text{modelo}} = 1 \times \mu_{\text{real}}$
Frequência	$f_{\text{modelo}} = 1/FE \times f_{\text{real}}$
Comprimento de Onda	$\lambda_{\text{modelo}} = FE \times \lambda_{\text{real}}$
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	$C_{\text{modelo}} = FE \times C_{\text{real}}$
Indutância	$L_{\text{modelo}} = FE \times L_{\text{real}}$

Tabela 3: Fenômeno Real x Modelo Reduzido [28]

4.2.1 - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

A modelagem do prédio é na realidade a mesma modelagem do SPDA, pois não foram modelados nem as paredes, nem os pisos. O modelo utilizado é constituído por uma estrutura cúbica de 42 cm de aresta, sendo também incluído um "X" no topo do SPDA. As varetas de latão utilizadas na construção do modelo foram soldadas para garantir um melhor contato nas conexões (figura 17). Considerando o fator de escala adotado neste trabalho, este modelo representa uma edificação real de 13 m de altura.

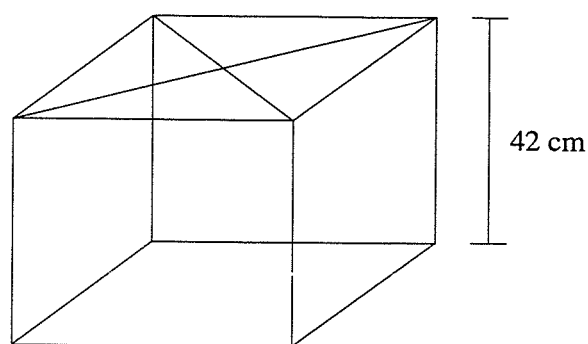


Figura 17: "Lay-out" do SPDA

4.2.2 - Localização dos Componentes do Modelo Reduzido

O plano terra foi montado diretamente sobre o solo. O canal de descarga foi fixado no teto do laboratório de compatibilidade eletromagnética por meio de um fio de nylon, localizando-se aproximadamente no meio do plano e logo acima do prédio. O gerador de ondas de corrente foi colocado sobre uma estrutura de madeira para ficar na mesma altura do prédio, sendo conectado a este através de um cabo coaxial. O osciloscópio para medição da corrente aplicada e avaliação dos campos elétricos e magnéticos foi colocado sobre um carrinho apropriado. O SPDA foi fixado no meio do plano de cobre através de quatro chapas pequenas de cobre estando uma em cada quina do SPDA (figura 18).

4.3 Sistema de Medição Utilizado

Um dos pontos críticos da simulação analógica é o sistema de medição empregado, pois este é a interface que possibilita a observação e registro do fenômeno que está sendo investigado. Sendo assim, é muito importante que uma vez definido, o sistema a ser empregado seja calibrado e testado de forma que reduza ao mínimo os erros por ele introduzidos [28].

Quando da definição do sistema de medição, algumas características básicas inerentes a estes devem ser observadas, sendo então apresentadas a seguir.

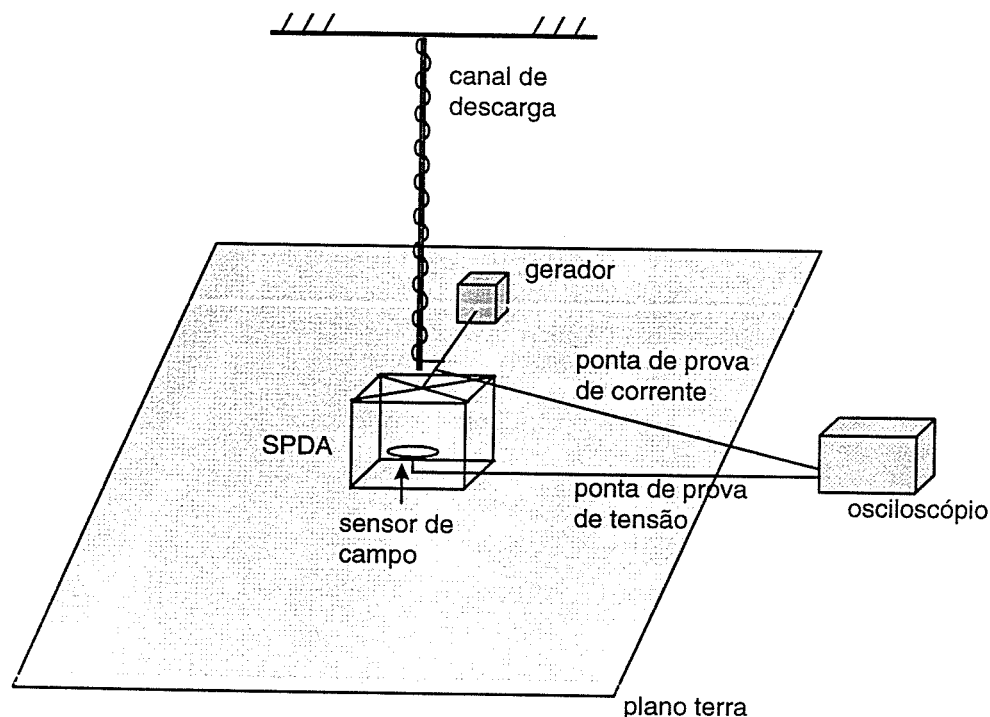


Figura 18: Disposição das partes do modelo

A frequência máxima dos sinais (tensão ou corrente) que podem ser medidos sem sofrer distorções ou atenuações, é uma dessas características. Como estamos trabalhando com modelo reduzido, a frequência dos sinais a serem medidos tornam-se bem elevadas, sendo então fundamental que os equipamentos sejam adequados.

As ondas de corrente geradas e injetadas no sistema são de baixa amplitude (aproximadamente 50 mA). Como o valor da tensão medida no interior do prédio é proporcional ao valor de pico da corrente de retorno, as ondas de tensão são de baixa amplitude. Portanto, é necessário um sistema de medição com sensibilidade suficiente para medir tais sinais.

Como a duração dos sinais a serem medidos é muito pequena (menor que 250 ns), é necessário que o sistema de medição seja capaz de visualizar esses eventos, inclusive as suas frentes de onda.

Finalmente, o sistema de medição deve ser o mais portátil possível, já que é necessário sua constante locomoção [28].

Baseado no exposto anteriormente e de acordo com os equipamentos disponíveis, o sistema de medição utilizado foi definido, sendo composto pelos seguintes equipamentos:

- 1 osciloscópio;
- 1 ponta de prova de tensão;
- 1 ponta de prova de corrente;
- sensor de campo elétrico.

A seguir serão apresentadas as suas principais características.

4.3.1 - Osciloscópio

Modelo: TDS 360

Fabricante: Tektronix

Banda de passagem: DC a ≥ 200 MHz; DC a ≥ 180 MHz (2 mV/div)

Impedância de entrada: $1\text{ M}\Omega \pm 1\%$ em paralelo com $20\text{ pF} \pm 2.0\text{ pF}$

Base de Tempo: 2,5 ns/div a 5 s/div (seqüência 1 - 2,5 - 5)

Sensibilidade: 2 mV/div a 10 V/div (seqüência 1 - 2 - 5)

Tempo de subida: 1,75 ns

4.3.2 - Ponta de Prova de Tensão

Modelo: P6111B

Fabricante: Tektronix

Banda de passagem: DC a 200 MHz

Capacitância de entrada: 13 pF a 35 pF (14,1 pF nominal)

Resistência de entrada: $10\text{ M}\Omega \pm 1,3\%$

Atenuação: 10X

Tensão máxima de entrada: 300 V

Observação: possibilita casamento com outro equipamento cuja impedância de entrada seja de $1\text{ M}\Omega$ e banda de passagem não menor que 200 MHz.

4.3.3 - Ponta de Prova de Corrente

Modelo: P6022

Fabricante: Tektronix

Sensibilidade: 1 mA ou 10 mA para cada mV, dependendo da seleção feita no controle de sensibilidade.

Banda de passagem: 8,5 kHz a 100 MHz (1mA/mV);

935 Hz a 120 MHz (10mA/mV).

Impedância de inserção: 0,00 Ω até 1MHz; 0,2 Ω até 120 MHz

4.3.4 - Sensor de Campo Elétrico

A medição de campo elétrico gerado pela descarga atmosférica foi feita por meio de uma antena ou sensor de campo elétrico especialmente desenvolvida para este propósito e adequada ao modelo reduzido implementado, de forma que não cause interferências nas linhas de campo (figura 19). Normalmente, uma antena fornece como sinal para o equipamento de medição, uma tensão que é proporcional ao campo elétrico que se pretende medir, sendo então importante que a configuração dos condutores da antena não alterem essa relação de proporcionalidade. Desta forma, para a construção da antena, utilizou-se uma chapa de cobre circular, conectada a uma ponta de prova de tensão (14 pF de capacitância e banda de passagem de 20 MHz) por meio de um conector BNC. A ponta de prova foi fixada no plano de cobre através do seu terra e ligada ao osciloscópio, de

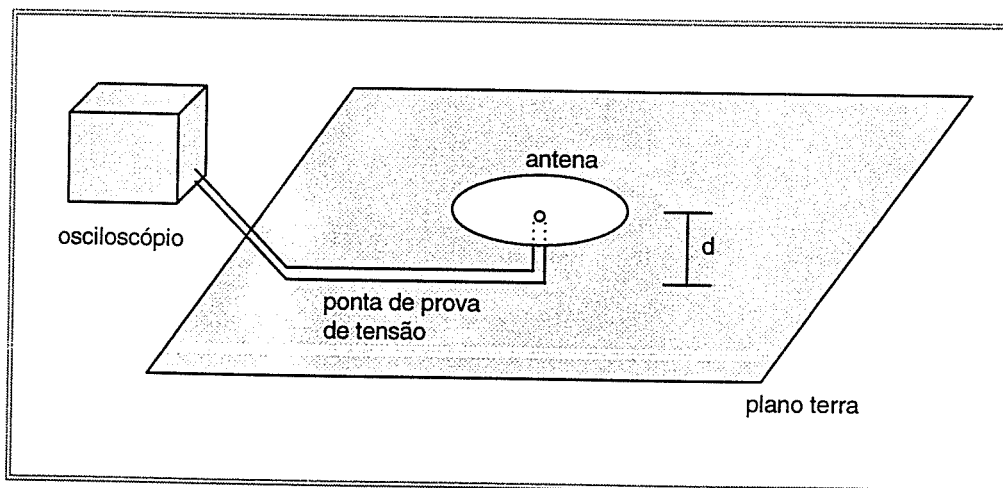


Figura 19: Detalhe do sensor de campo elétrico

modo que a chapa de cobre circular ficasse paralela ao plano de cobre, formando um capacitor [38].

A antena construída possui as seguintes dimensões:

D = diâmetro da circunferência = 8,5 cm

d = distância da chapa circular ao plano de cobre = 4,6 cm

Entretanto, antes de se utilizar a antena para a medição do campo elétrico, foi necessário a determinação do valor de sua constante, sendo que essa determinação foi feita através de dois métodos, que são apresentados a seguir.

4.3.4.1 – Determinação da Constante da Antena Utilizando Placas Paralelas

Em muitos casos, para se determinar a constante de sensores de campos elétricos, utilizam-se placas planas metálicas, sejam elas retangulares ou circulares (figura 20). Atenção especial deve ser dada à distância máxima entre as placas, à influência de campos parasitas e à proximidade de objetos. Para se evitar qualquer problema relacionado com campos elétricos parasitas, pode-se utilizar células TEM, que por serem blindadas, evitam distúrbios causados por esses campos. Entretanto, essas células apresentam desvantagens como o alto custo e o tamanho limitado, de forma que apenas sensores de tamanho pequeno podem ser utilizados nestas células [39].

O primeiro ponto que devemos levar em consideração é a máxima distância entre as placas “a”, pois caso esta seja muito grande o campo elétrico na área central do arranjo será menor que o valor de referência U/a (U - tensão aplicada), resultando em um erro significativo. Este efeito foi calculado para sensores de placas circulares, sendo este menor que 1% se a distância entre as placas é menor que metade do seu diâmetro “D”. Embora para placas retangulares não se possa fazer esse cálculo, o mesmo resultado é válido [39].

Outro ponto a ser considerado é a fonte de potência. Se a fonte é simétrica em relação ao potencial de terra, a homogeneidade do campo

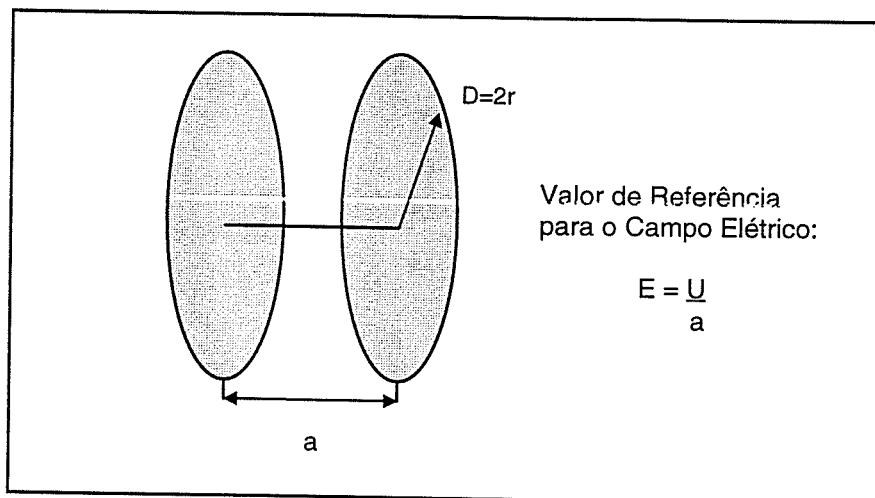


Figura 20: Arranjo de Placas Planas Circulares [39].

elétrico é muito maior que no caso de fonte assimétrica, e conseqüentemente tem-se uma determinação da constante do sensor de campo elétrico bem mais precisa [39].

Além desses fatores, qualquer objeto grande, metálico ou ferromagnético, próximo ao sistema deve ser removido, pois eles podem influenciar o resultado [39].

No caso em estudo, o primeiro método apresentado consistiu na utilização de um arranjo de placas retangulares planas, sendo uma placa de alumínio e a outra de cobre, ambas de 2 m x 1 m. O arranjo foi colocado sobre um suporte isolante de madeira a 59 cm do solo, sendo que a placa de cobre foi bem aterrada. A distância entre as placas foi de 26,5 cm, ou seja, $a < D/2 = 0,5$ m (figura 21). O gerador utilizado foi o da Tektronix modelo CFG280, descrito no capítulo anterior. Entretanto, esse método utilizado é para campos de baixa frequência, o que não é o nosso caso. Porém, como não tivemos acesso a um método para alta frequência, ou seja, a célula TEM, optamos pelo arranjo de placas retangulares planas, sendo que os resultados estão apresentados a seguir (figuras 22, 23, 24 e 25).

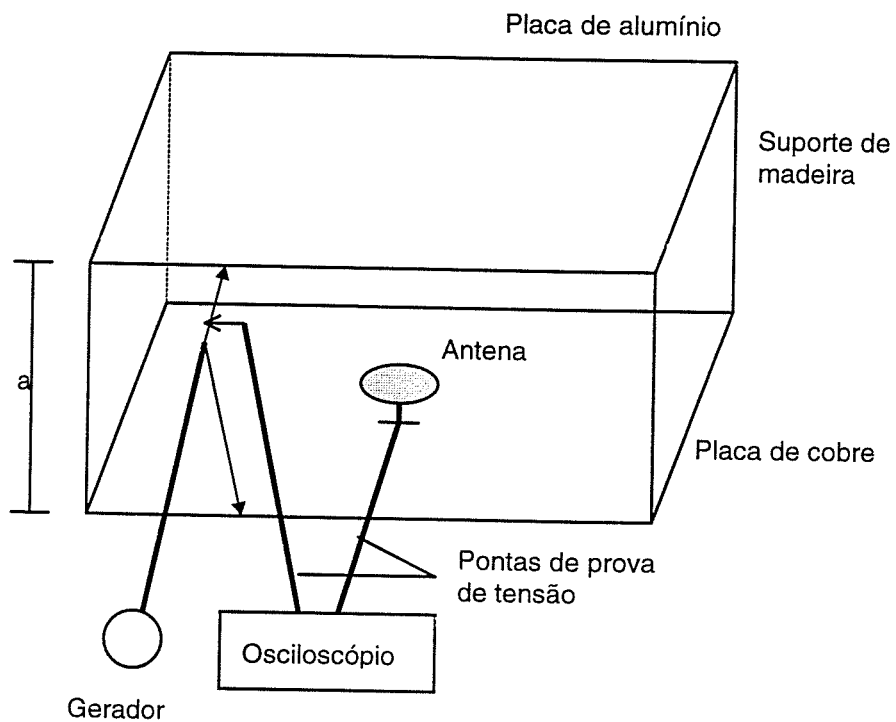


Figura 21: Montagem para determinação da constante da antena "k"

→ *Curvas Obtidas Utilizando Placas Paralelas*

I - Frequência = 3 kHz

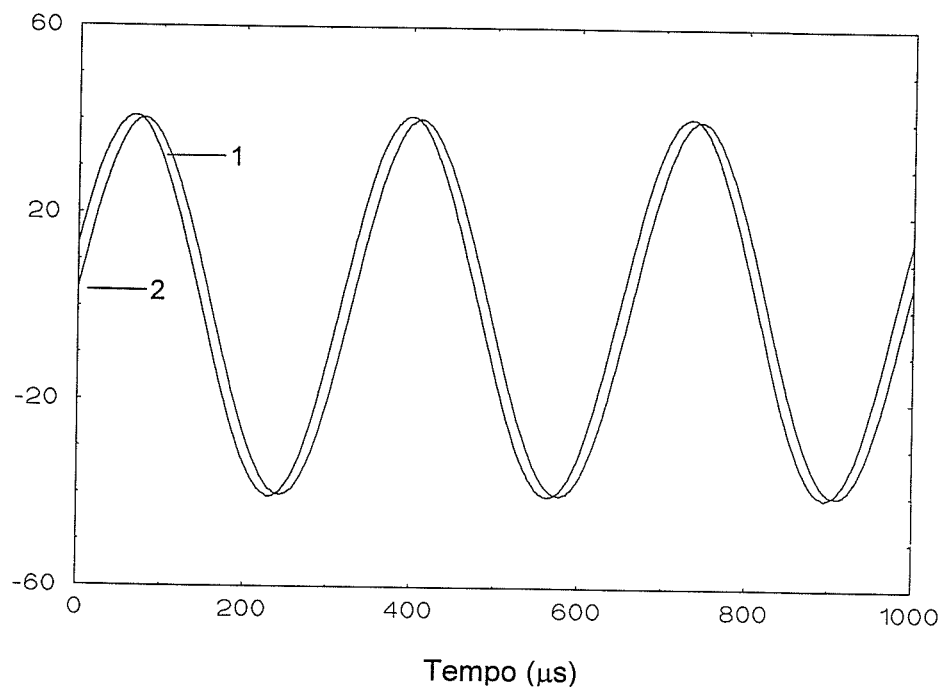


Figura 22: Curva1 - V_{aplicado} / d (V/m), curva2 - $V_{\text{medido}} (10^{-2}V) \Rightarrow k = 98,29$

II - Frequência = 100 kHz

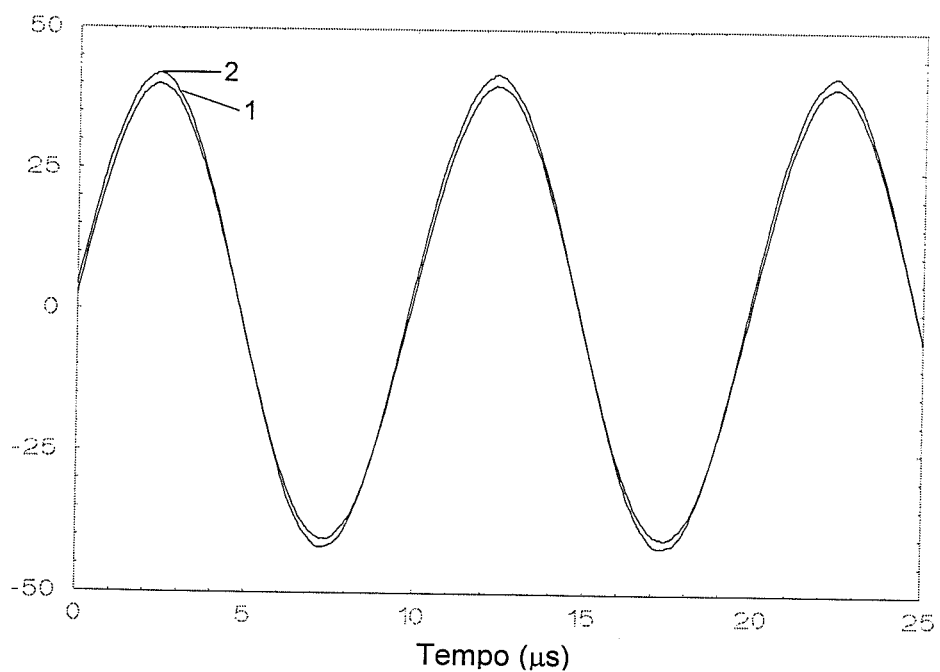


Figura 23: Curva1 - V_{aplicado} / d (V/m), curva2 - $V_{\text{medido}} (10^{-2}V) \Rightarrow k = 95,23$

III - Frequência = 1 MHz

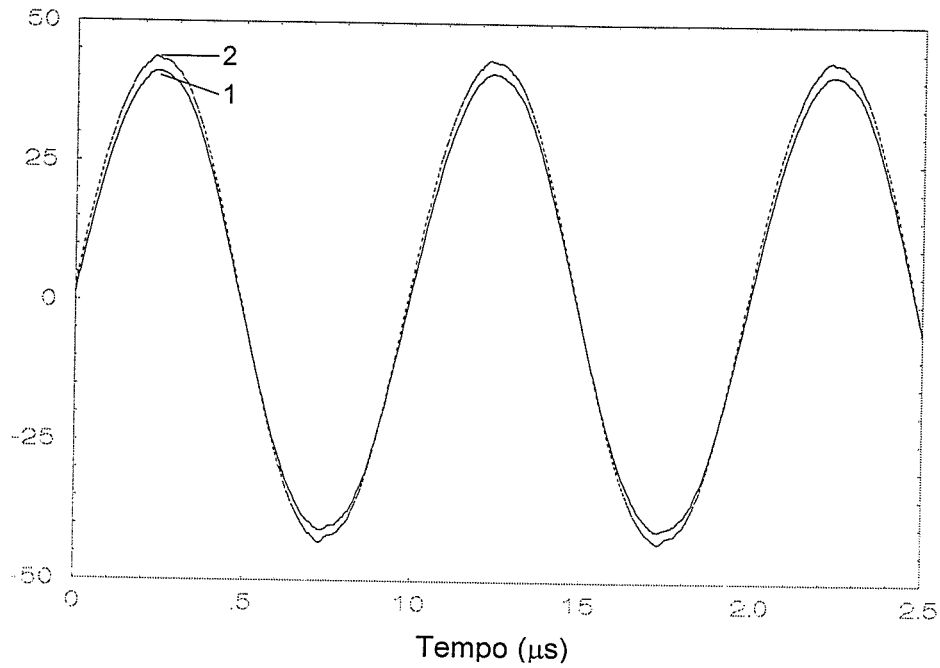


Figura 24: Curva1 - V_{aplicado} / d (V/m), curva2 - $V_{\text{medido}} (10^{-2}\text{V}) \Rightarrow k = 94,46$

VII - Frequência = 10 MHz

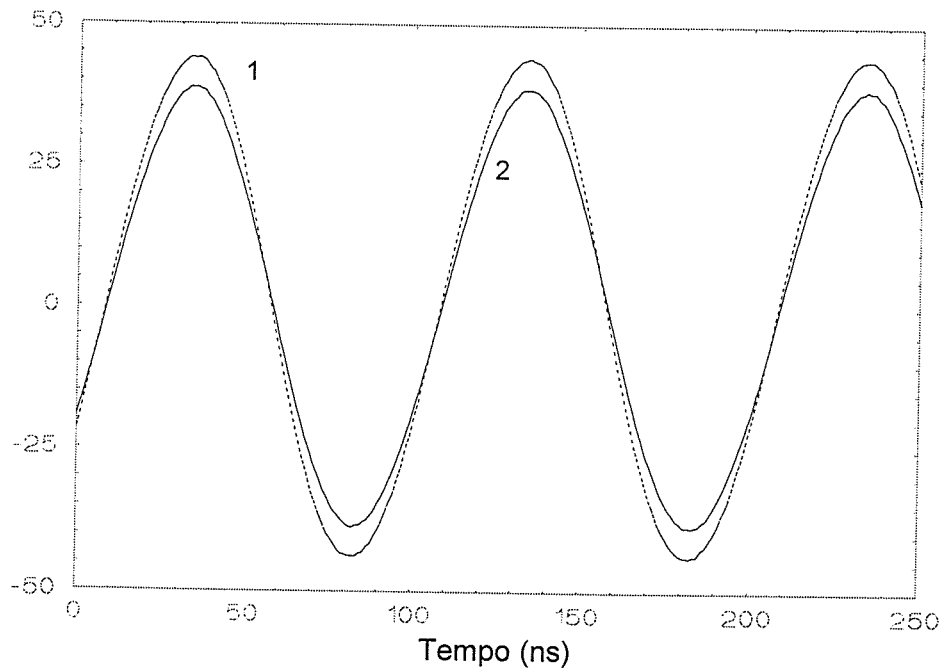


Figura 25: Curva1 - V_{aplicado} / d (V/m), curva2 - $V_{\text{medido}} (10^{-2}\text{V}) \Rightarrow k = 88,15$

4.3.4.2 - Determinação da Constante da Antena Utilizando Linha Unifilar

O outro método utilizado neste trabalho consiste na utilização de uma linha unifilar de 11 m de comprimento, casada em uma das extremidades, localizada sobre um plano de alumínio de 12 m x 1,10 m, a qual estava localizada no meio deste, a aproximadamente 50 cm do plano. Utilizando-se o mesmo gerador, aplicou-se uma onda em forma de degrau e mediu-se a tensão induzida no sensor localizado no meio da linha e bem abaixo desta. Os valores medidos foram comparados com os valores de campo elétrico calculados, resultando na constante do sensor.

A seguir será apresentada a dedução da fórmula utilizada para o cálculo do campo elétrico e, em seguida, serão apresentadas as curvas obtidas.

→ Cálculo do Campo Elétrico Devido a uma Linha Unifilar

Segundo Kraus [37], o campo elétrico produzido por uma linha fina de cargas elétricas é dado por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (8)$$

$$\vec{E}_1 = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r_1} \hat{r}_1 \quad (9)$$

$$\text{para } \hat{r}_1 = \frac{(x, y - h)}{\sqrt{x^2 + y^2 - 2hy + h^2}} \quad (10)$$

como no nosso caso $x = 0$ (fig. 26), tem-se:

$$\vec{E}_1 = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \left(\frac{y - h}{y^2 - 2hy + h^2} \right) \quad (11)$$

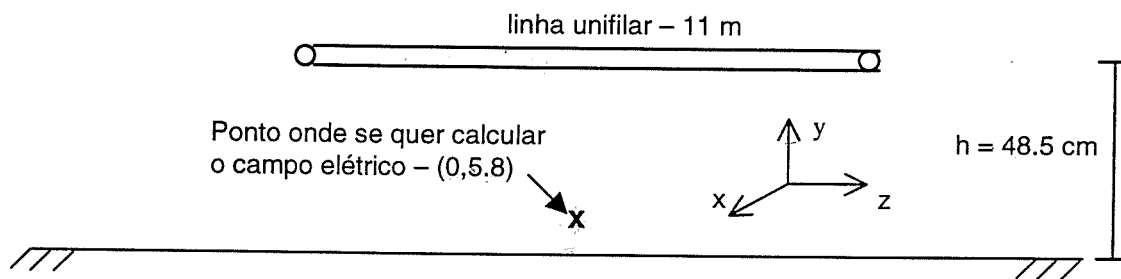


Figura 26: Montagem utilizando linha unifilar

$$\vec{E}_2 = -\frac{\rho_L}{2\pi\epsilon r_2} \hat{r}_2 \quad (12)$$

para $\hat{r}_2 = \frac{(x, y+h)}{\sqrt{x^2 + y^2 + 2hy + h^2}}$ (13)

sendo $x = 0$, obtém-se:

$$\vec{E}_2 = -\frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \left(\frac{y+h}{y^2 + 2hy + h^2} \right) \quad (14)$$

Como $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, então:

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \left(\frac{y-h}{y^2 - 2hy + h^2} - \frac{y+h}{y^2 + 2hy + h^2} \right) = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \left[\frac{(y-h)}{(y-h)^2} - \frac{(y+h)}{(y+h)^2} \right] \quad (15)$$

Simplificando, obtém-se:

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{(y-h)} - \frac{1}{(y+h)} \right] \quad (16)$$

Temos que:

$h =$ altura da linha = 48,5 cm

$y =$ ponto onde se quer avaliar o campo = 5,8 cm

Substituindo na equação anterior, tem-se:

$$|\vec{E}| = 4,18 \frac{\rho_L}{2\pi\epsilon} \quad (17)$$

Sabe-se que:

$$C = \frac{q}{V} \Rightarrow \frac{C}{m} = \frac{q/m}{V} \quad (18)$$

Mas,

$$\rho_L = \frac{q}{m} \Rightarrow \rho_L = \frac{C}{m} V \quad (19)$$

Substituindo na equação de campo elétrico, tem-se:

$$|\vec{E}| = 4,18 \frac{C/m}{2\pi\epsilon} V \quad (20)$$

A capacitância por metro de uma linha unifilar é dada por:

$$\frac{C}{m} = \frac{24,2\epsilon_r}{\log[(b/r) + \sqrt{(b/r)^2 - 1}]} \quad (21)$$

→ Curvas Obtidas Utilizando uma Linha Unifilar

I - Degrau

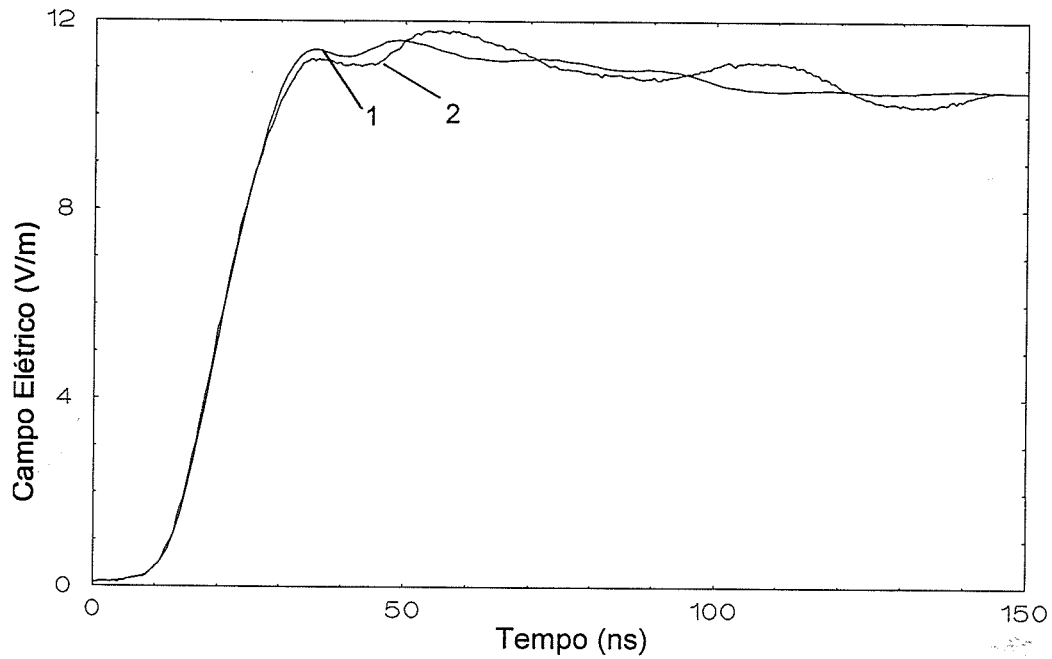


Figura 27: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k = 95$

II - Frequência = 3 kHz

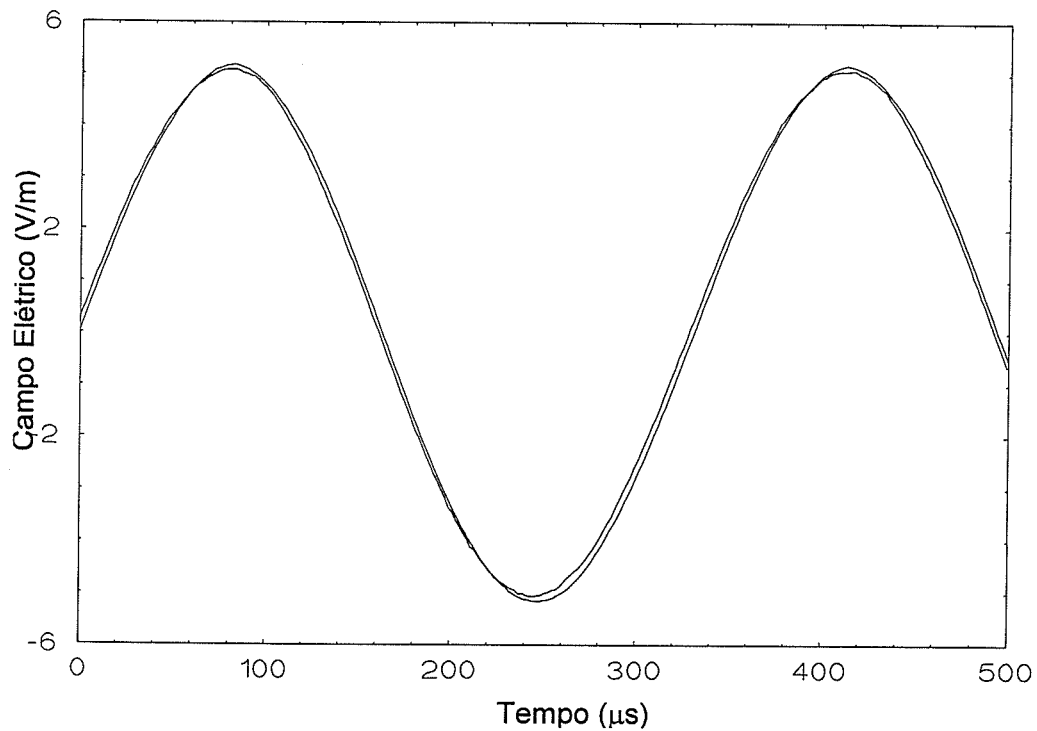


Figura 28: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k = 90$

III - Freqüência = 10 kHz

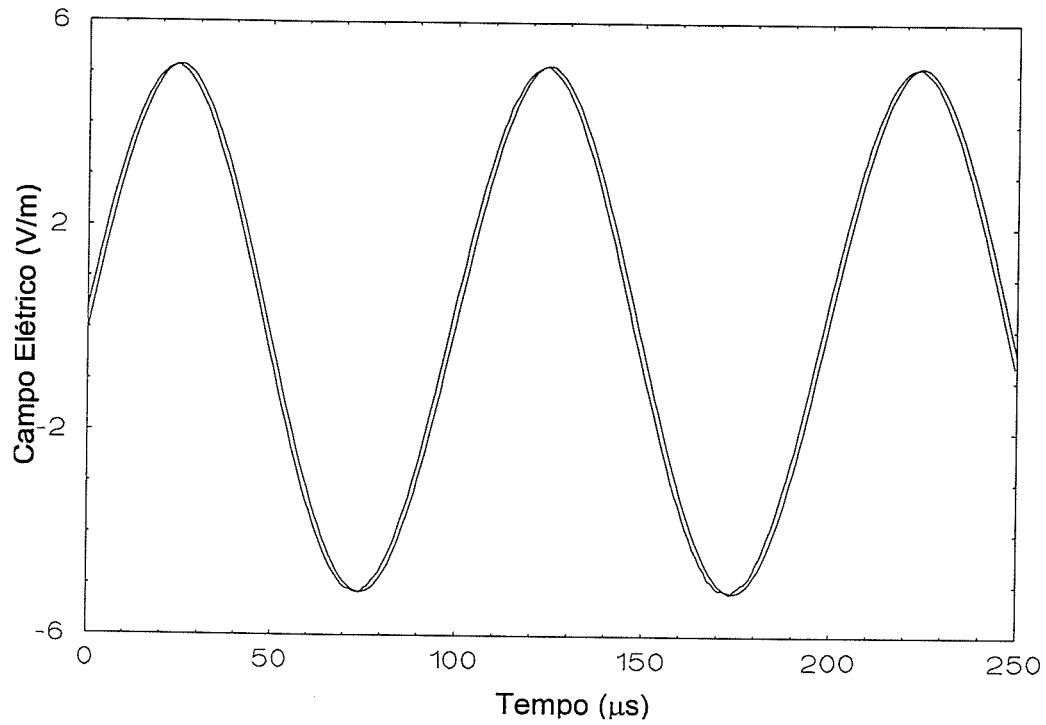


Figura 29: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k = 88$

IV - Freqüência = 100 kHz

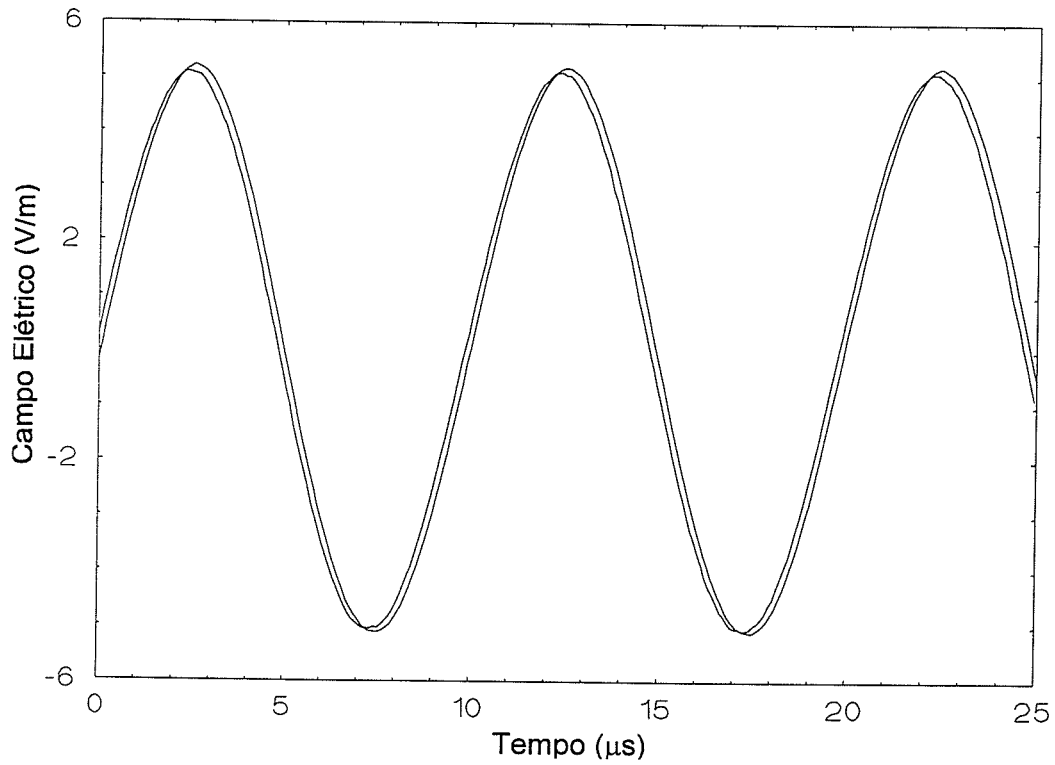


Figura 30: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k = 93$

V - Frequência = 1 MHz

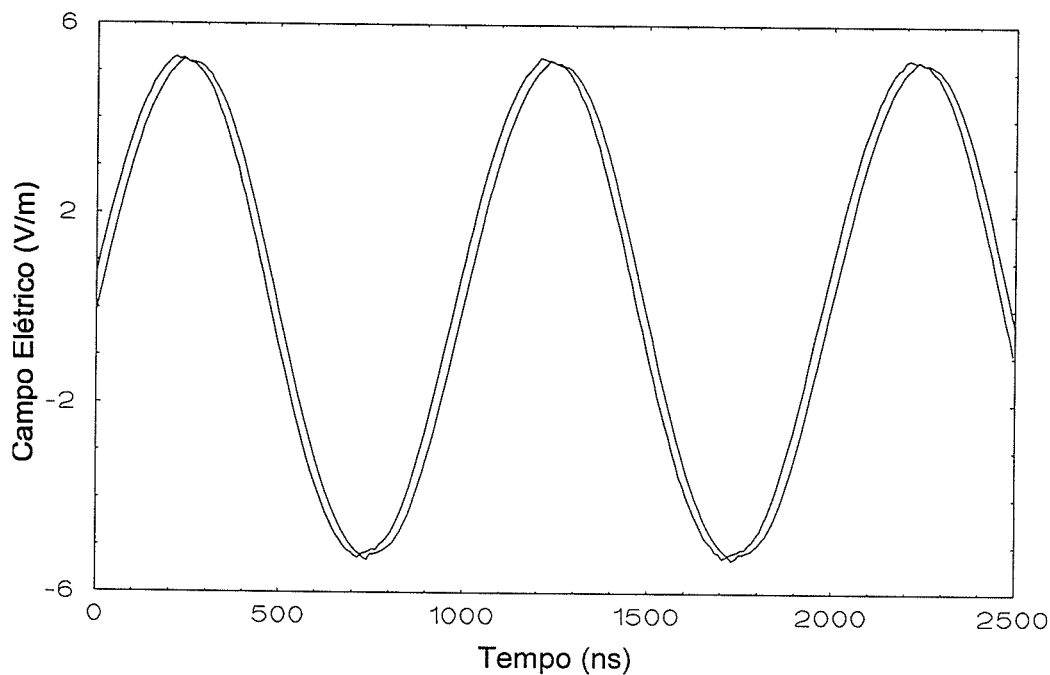


Figura 31: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k = 93$

VI - Frequência = 10 MHz

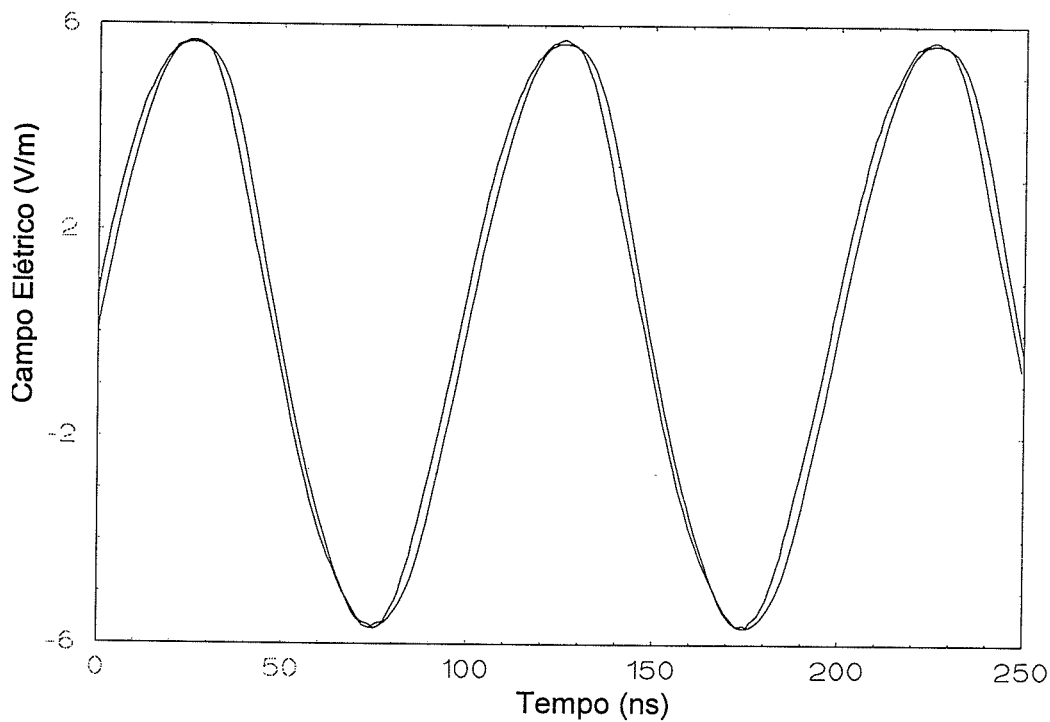


Figura 32: Curva1: $E_{\text{calculado}} = \frac{V_{\text{aplicado}} \times C/m}{2\pi\epsilon} \times 4,18$; curva2: $E_{\text{medido}} = V_{\text{medido}} \times k \Rightarrow k=104$

De acordo com os resultados apresentados anteriormente, em ambos os métodos, adotamos uma constante para esta antena de valor igual a 95, ou seja, para se obter o campo elétrico no interior do SPDA deve-se multiplicar o valor da tensão medida por 95.

Em seguida, fez-se várias tentativas para se obter um sensor de campo magnético ou de tensão induzida, de forma a se completar as medições no interior do SPDA. Entretanto, como o modelo reduzido implementado era pequeno (prédio - 42 cm), também deveriam ser pequenos os sensores de forma a não interferirem ou distorcerem as medições. Neste ponto surgiu uma limitação no trabalho desenvolvido, uma vez que a ponta de prova disponível para realizar as medições possuía capacitância da ordem de 15 pF, cujo efeito era preponderante sobre os sensores desenvolvidos, ou seja, usar só a ponta de prova de tensão ou ela acoplada ao sensor não fazia diferença nas medições. Sendo assim, houve a necessidade da construção de um modelo reduzido maior e mais adequado às medições, como será apresentado no capítulo 6. O capítulo a seguir mostra os resultados obtidos no que se refere a campo elétrico.

5 Resultados Parciais: Modelo de Pequenas Dimensões e Medição de Campo Elétrico

5.1 Introdução

Após a determinação da constante do sensor de campo elétrico foram feitas, no modelo reduzido implementado utilizando o canal de descargas (figura 33), as medições da corrente aplicada na base do canal e do campo elétrico no interior do prédio (figuras 34 e 35).

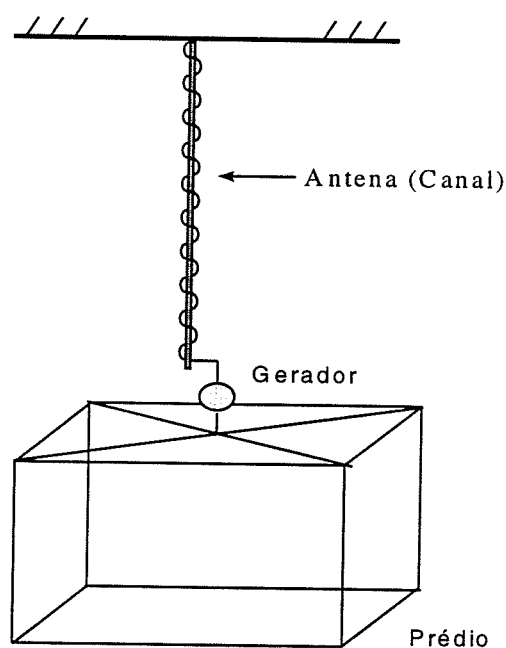


Figura 33: Modelo reduzido utilizando o canal

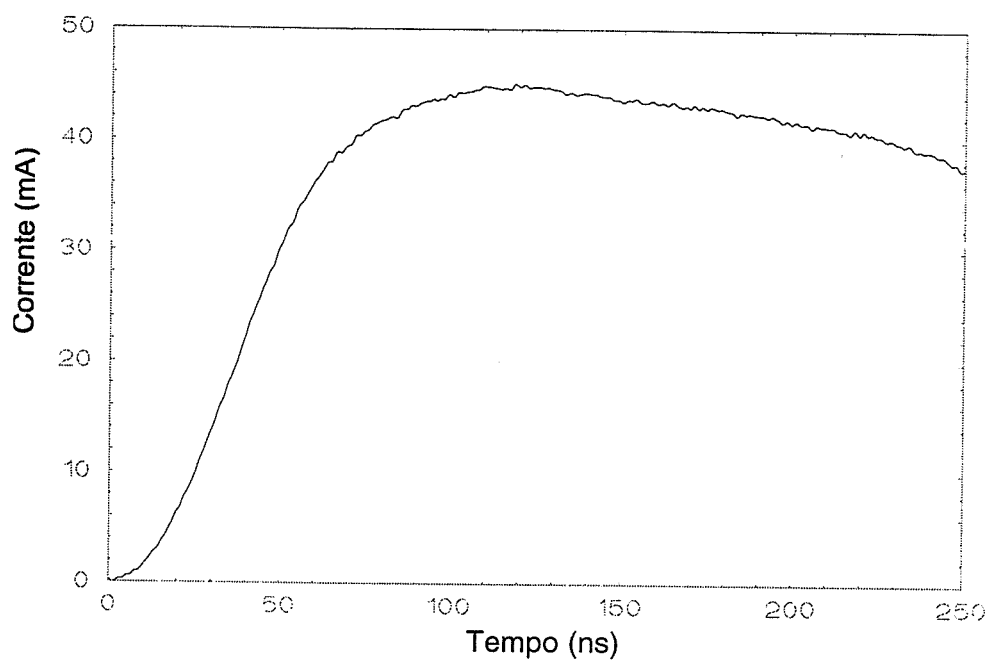


Figura 34: Corrente aplicada na base do canal em função do tempo.

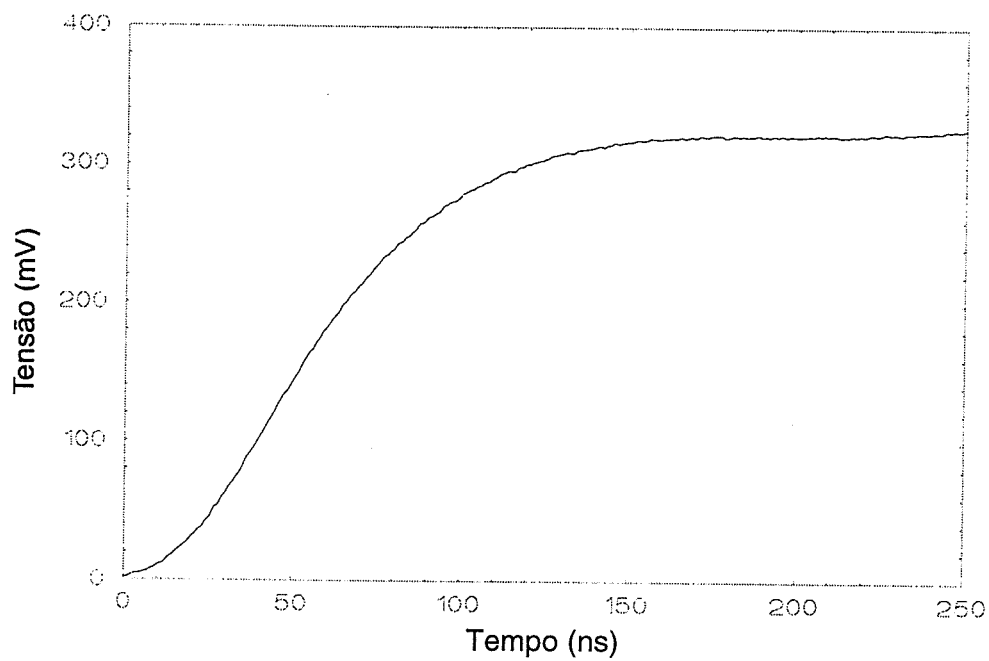


Figura 35: Tensão induzida na antena em função do tempo.

$$\text{Campo elétrico} = V \times k=95.$$

Apesar da técnica de modelo reduzido permitir a obtenção de várias informações, torna-se difícil a representação de todos os componentes de uma edificação no modelo. Paredes, pisos, fiação interna, janelas, etc. não são consideradas no estudo em modelo reduzido, sendo que o ideal é que sejam realizados testes em prédios reais. Desta forma, o presente trabalho procurou atingir dois objetivos básicos, quais sejam:

- estabelecer um modelo reduzido para estudos de indução de tensão em edificações causadas por descargas diretas e estudar alternativas para a realização de testes em edificações reais;
- propor uma metodologia de testes para avaliação da eficiência dos SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosférica) instalados em prédios reais.

Tomando o resultado anterior como base, foi realizado um estudo procurando uma alternativa mais compacta para simular a presença do canal de descarga, de forma que se possa utilizá-la para testar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas de uma edificação real. É importante salientar que o circuito de teste deve levar em conta não só as dificuldades operacionais e de montagem em campo, como também deve garantir que os campos eletromagnéticos gerados pelo circuito sejam similares aos campos gerados por uma descarga atmosférica real.

Foi levantada a hipótese de se utilizar um balão como elemento de sustentação do canal de descarga descrito anteriormente, que geraria campos eletromagnéticos similares aos campos criados pela descarga atmosférica, pois o seu tamanho seria bastante elevado quando da utilização em escala real (figura 36). Entretanto, experimentos preliminares realizados com balões cedidos pela aeronáutica, demonstraram que, para alturas superiores a 50 m, o vento dificulta tremendamente a manutenção da antena na posição vertical. Essa e outras dificuldades operacionais indicaram a necessidade de desenvolvimento de uma outra tecnologia para a realização dos testes.

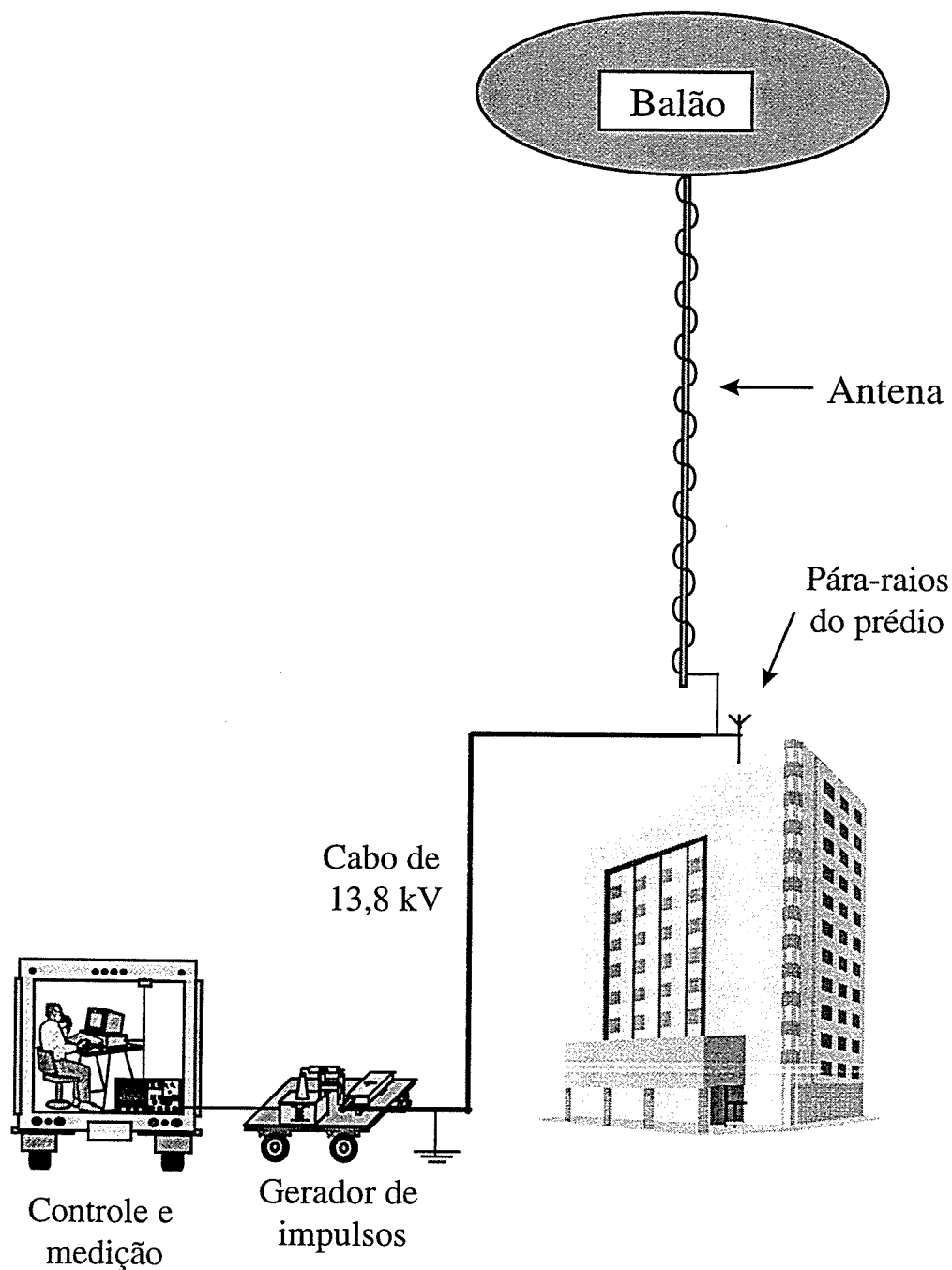


Figura 36: Teste em edificação utilizando um balão.

5.2 Revisão Bibliográfica

Existem vários trabalhos na literatura técnica que lidam com simulação analógica de descargas atmosféricas e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas [3, 23, 24, 40, 41]. Boa parte da literatura considera

que a manutenção dos valores de corrente nos condutores de descida, reproduz as condições de campo eletromagnético no interior do prédio.

Matsumoto [23] em seu trabalho desenvolveu um estudo experimental utilizando modelo reduzido para avaliar a distribuição de corrente em um prédio atingido por uma descarga atmosférica. Ele apresenta três métodos de injeção de corrente impulsiva no prédio para simular a descarga. Entretanto, nenhum dos métodos descritos em seu trabalho levam em consideração a influência da presença do canal de descarga.

Mazzetti, Flisowski, Kuca, Stanczak e outros [9, 24] apresentam medições experimentais, realizadas em modelo reduzido, de correntes induzidas em "loops" fechados localizados no interior do SPDA. O canal de descarga é simulado por um condutor vertical, onde é aplicado uma corrente impulsiva de forma $1/5 \mu\text{s}$. Entretanto, a simulação em modelo reduzido do canal não representa nem a impedância, nem a velocidade de propagação das ondas em um canal real.

Em [3] Boaventura e Coelho, através de um estudo experimental realizado utilizando as técnicas de modelo reduzido, avaliam a distribuição de corrente nos condutores do SPDA, os efeitos da presença do canal de descarga e a tensão induzida em um "loop" localizado dentro do prédio. O canal de descarga atmosférica é modelado como uma linha de transmissão vertical de forma que seus parâmetros geométricos fornecem uma velocidade de propagação igual a 23,3% da velocidade da luz. Entretanto, os resultados apresentados só analisam a influência da presença do canal de descarga na distribuição de corrente nos condutores. A tensão induzida não foi considerada nesse trabalho.

Pérez, Ming, Cooray e Scuka na referência [40] estudam a resposta de uma instalação real de baixa tensão a campos eletromagnéticos gerados por descargas distantes, utilizando uma antena para onda de modo TEM. Uma análise da geometria da antena e do sistema de medição é feita no domínio da frequência. A antena consiste de três fios condutores, sendo que as partes mais baixas possuem 1 m de altura, estando localizadas nas duas extremidades, nó 1 e nó 5 (figura 37). Nesses terminais três fios são conectados. O ápice da antena atinge uma altura de 8,5 m na parte central, onde os fios estão separados, nó 2, nó 3 e nó 4. A distância do nó 1 ao nó 5

é igual a 45 m. A antena é terminada com sua impedância característica no nó 5. Uma forma de onda impulsiva dupla exponencial, aproximadamente $1,2/50 \mu\text{s}$, foi aplicada à base da antena para simular as condições geradas por impulsos eletromagnéticos de uma descarga atmosférica. A resposta da instalação de baixa tensão (casa residencial com área de 100 m^2) à onda TEM gerada pela antena é comparada com a resposta eletromagnética da instalação a campos eletromagnéticos de uma descarga atmosférica natural, na faixa de frequência de 125 kHz a 10 MHz. São medidas as tensões e as correntes induzidas em alguns pontos do objeto em teste, neste caso a rede de baixa tensão instalada.

Em 28 de janeiro de 1993, o Ministro Francês de Desenvolvimento editou um decreto para forçar os operadores de algumas fábricas particulares a controlarem periodicamente os seus Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Para alcançar os requisitos desse decreto, SYMPA foi desenvolvido. Ele consiste de um procedimento de medição patenteado e alguns equipamentos de teste específicos, além de dois softwares. O objetivo

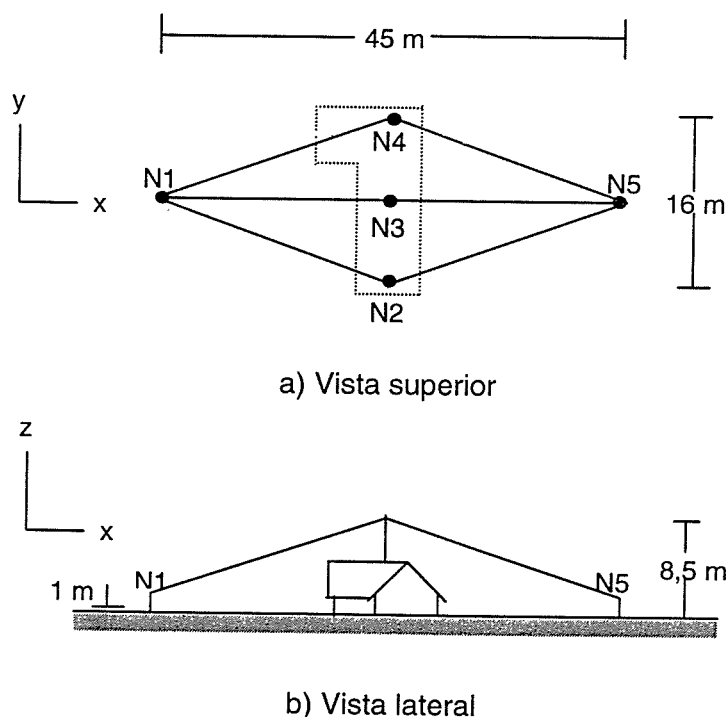
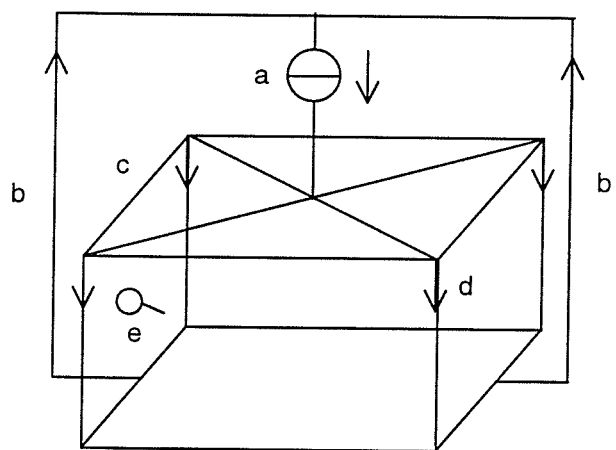


Figura 37: Diagrama da antena

do SYMPA é encontrar falhas de continuidade elétrica e faltas de equalização do potencial no SPDA. Estas técnicas de medição também localizam todos os caminhos da corrente da descarga atmosférica dentro de uma indústria. SimSymp e Impact Softwares são utilizados para aumentar a confiança dos procedimentos de medição e para simular uma descarga atmosférica real em um SPDA [41]. Este procedimento de medição tem sido usado há 5 anos em vários tipos de indústrias tais como: química ou petroquímica, equipamentos e antenas de telecomunicações, usinas nucleares, hospitais, etc.. O método consiste na injeção de uma corrente de baixa intensidade no topo do SPDA através de um gerador operado por bateria (figura 38), que fornece uma onda senoidal (duração de 2 s), seguida por um tempo de 2 s sem sinal. O sinal aplicado está na faixa de frequência de 2 a 30 kHz. A corrente se divide entre os condutores de descida e fluem por todo o SPDA, indo para os eletrodos de aterramento. Para “fechar” o circuito, condutores de retorno são conectados entre o gerador e os eletrodos de aterramento. A localização e o número de condutores de descida são definidos de forma a prevenir qualquer distúrbio na distribuição de corrente. Para se saber como a corrente se divide entre os condutores, o campo magnético irradiado é medido em cada piso do prédio,



- a – gerador de corrente
- b – condutores de retorno
- c – sistema de proteção contra descargas
- d – corrente
- e – medição do campo magnético

Figura 38: Princípio do SYMPA

sendo que considera-se a presença do campo magnético se o sinal no sensor ultrapassa 50%. Abaixo de 50%, o campo magnético é considerado não existente.

As análises obtidas com o SYMPA não revelam com precisão todas as perturbações e riscos ocorridos dentro de um prédio devido a uma descarga atmosférica. Na verdade, a frequência da corrente injetada é muito baixa e uma única frequência não pode representar o amplo espectro de frequência da corrente de uma descarga atmosférica. Para suprir essas “falhas” são utilizados softwares desenvolvidos para esta finalidade, os quais baseados nas medições realizadas, fornecem como resultado da simulação o diagnóstico do SPDA para um caso real de descarga atmosférica. Os resultados obtidos na simulação computacional foram comparados com medições de descargas forçadas, apresentando uma boa correspondência.

5.3 Arranjo Proposto

Sendo assim, como será apresentado a seguir, foi realizado um estudo experimental utilizando as técnicas de modelo reduzido onde se pretende mostrar que a representação da presença do canal de descarga é fundamental, sendo que apenas a manutenção da corrente nos condutores de descida não é suficiente para reproduzir os efeitos de um descarga atmosférica.

Desta forma, foram feitas medições procurando uma alternativa a essa questão. Uma solução viável, e que será explicada mais adiante, é a disposição de arranjos de resistores circundando o SPDA, sendo o gerador de corrente conectado entre o SPDA e a conexão destes arranjos; cada um dos arranjos de resistores é conectado diretamente à terra (neste caso, ao plano de cobre). Para se avaliar a validade dessa alternativa, realizou-se várias medições com quatro arranjos igualmente espaçados, sendo feita uma comparação com os resultados obtidos utilizando o canal de descarga atmosférica, o que vem mostrar a viabilidade da utilização deste arranjo para a simulação do canal de descarga.

A seguir será apresentado o caminho que levou ao arranjo utilizado na simulação do canal, bem como serão analisadas algumas variáveis como a altura, a distância e a posição que os arranjos são colocados em relação ao prédio.

Inicialmente, utilizou-se quatro condutores envolvendo o SPDA, os quais eram condutores de vareta de latão, e estavam isolados do plano de cobre. Entretanto, tanto a corrente medida quanto a onda de campo elétrico medido, embora tenham apresentado a mesma forma da corrente e do campo utilizando o canal, possuíam uma amplitude muito maior (aproximadamente o dobro para a corrente e 7 vezes para o campo).

Em seguida, aterramos cada um dos condutores com $R = 3,06 \text{ k}\Omega$ (figura 39) e, embora continuassem apresentando a mesma forma de onda, a amplitude das ondas de corrente e campo continuaram muito maiores que as do canal (corrente - 3 vezes, campo - 5,5 vezes). Então, optamos por aumentar o valor dos resistores de aterramento, para ver se o valor da corrente diminuía, sendo que cada um dos condutores foi aterrado com $R = 13 \text{ k}\Omega$. Comparando os valores da corrente e do campo elétrico desse caso com os obtidos quando $R = 3,06 \text{ k}\Omega$, vimos que eles permaneceram praticamente os mesmos do caso anterior, não sofrendo influência devido à alteração do valor do resistor de aterramento. Sendo assim, como variamos

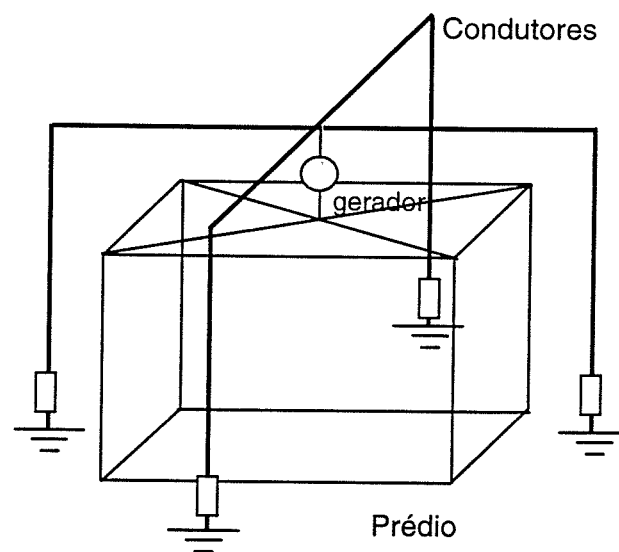


Figura 39: Conexão para 4 arranjos envolventes

consideravelmente o valor de R e quase não houve alteração no valor da corrente, e o campo elétrico permaneceu o mesmo, suspeitamos da existência de um acoplamento capacitivo entre os condutores que circundam o prédio e os condutores do próprio SPDA, o que nos levaria à conclusão que o circuito estaria se “fechando” pelo acoplamento capacitivo e não estaria “enxergando” os resistores.

Para comprovar nossas hipóteses, conectamos um resistor entre o circuito conformador e o arranjo de condutores (figura 40), sendo analisados dois casos, condutores aterrados ou isolados. Primeiramente, conectamos um resistor de valor igual a 770Ω , porém a corrente continuou muito elevada em ambos os casos. Após algumas tentativas, chegamos à conclusão que o valor desse resistor deve ser da ordem da impedância do canal de descarga, ou seja, aproximadamente 3000Ω . Sendo assim, conectamos um resistor de valor igual a $3,25 \text{ k}\Omega$ entre o circuito conformador e os condutores do arranjo, que nos possibilitou uma medição de corrente igual à corrente do canal, tanto para o caso dos condutores aterrados, quanto para os condutores isolados. Logo, podemos concluir que realmente há um acoplamento capacitivo entre os condutores do arranjo e o prédio.

Entretanto, o campo elétrico, para o caso de condutores aterrados, ficou bem menor que o campo do canal (2,8 vezes), sendo que para os condutores

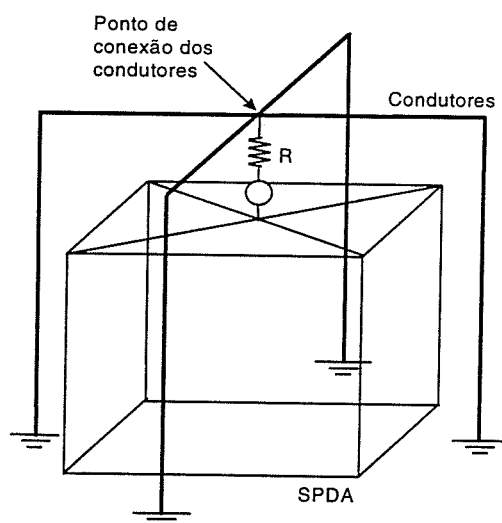


Figura 40: Arranjo com 4 condutores envolventes e um resistor.

isolados o campo continuou muito maior, aproximadamente igual aos valores que vinham apresentando anteriormente. Sendo assim, pudemos confirmar que apenas a manutenção da corrente nos condutores de descida não é suficiente para reproduzir as condições de campo eletromagnético no interior do prédio.

Como o campo elétrico está diretamente relacionado com a tensão, e como a queda de tensão estava ficando totalmente concentrada no resistor, ou seja, acima do prédio, desenvolvemos um arranjo formado pela associação série de vários resistores, de tal forma que a resistência de cada arranjo fosse aproximadamente igual a 4 vezes a impedância do canal, ou seja, a resistência equivalente de 4 arranjos (conectados paralelamente) nos forneceria um valor próximo à impedância do canal. Tanto para o caso dos arranjos de resistores aterrados como isolados, as correntes apresentaram formas e amplitudes de acordo com a corrente do canal. Já o campo elétrico só apresentou bons resultados para o arranjo de resistores aterrados, sendo muito maior no arranjo de resistores isolados. Sendo assim, descartamos a possibilidade de utilizarmos arranjos isolados para a simulação de um canal de descarga, no que diz respeito a campo elétrico. Desta forma, cada arranjo que envolve o SPDA foi formado pela associação série de 50 resistores de 270Ω , o que fornece um valor de $R = 13,5 \text{ k}\Omega$ por arranjo, resultando em um $R_{\text{equivalente}}$ para o conjunto de arranjos igual a $3,38 \text{ k}\Omega$, estando estes diretamente aterrados ao plano de cobre (figura 41).

Entretanto, devido ao acoplamento capacitivo analisado anteriormente, há alteração do valor do campo elétrico medido no interior do SPDA, se distribuimos os resistores até o plano de cobre (opção 1) ou se os distribuimos até uma certa altura (esta altura foi determinada experimentalmente), e depois conectamos um fio de cobre para terminar o percurso até o plano (opção 2). Neste trabalho, a opção 2 é que nos forneceu um valor de campo elétrico mais próximo do obtido utilizando o canal de descarga.

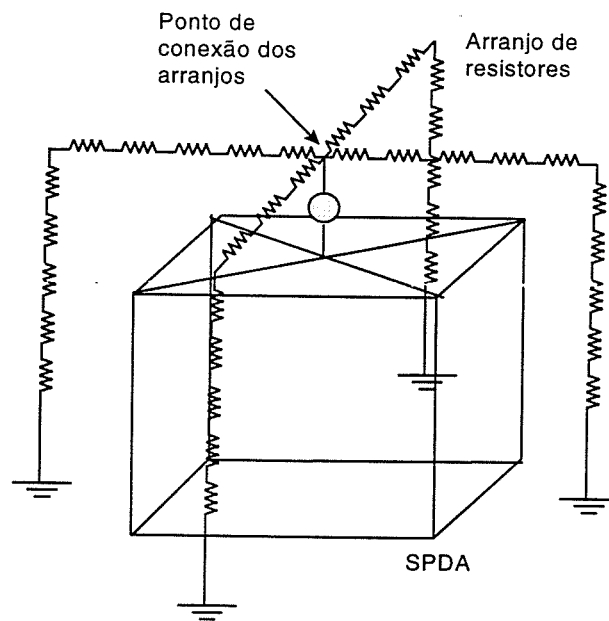


Figura 41: Modelo com 4 arranjos de resistores envolventes.

O próximo ponto importante a ser observado, e que influencia de forma significativa o valor do campo elétrico no interior do SPDA, é a distância em que os arranjos são colocados deste, assim como a altura. Pode-se observar que quanto mais próximos os arranjos estão do SPDA, maior é o valor do campo elétrico medido. No caso em estudo, os arranjos de resistores foram colocados a uma distância de 13 cm, o que equivale a 3,9 m num caso real, e a uma altura de 15 cm (equivalente a 4,5 m).

Por último deve-se ressaltar a influência da posição desses arranjos, ou seja, se eles estão paralelos aos condutores do SPDA ou não. Pode-se observar que o campo medido foi maior no caso em que os arranjos de resistores estavam paralelos ao SPDA. Neste trabalho optou-se pela configuração de arranjos transversais (figura 42).

A seguir serão apresentados os resultados obtidos utilizando a configuração anteriormente explicada para simular o canal de descarga (figuras 43 e 44).

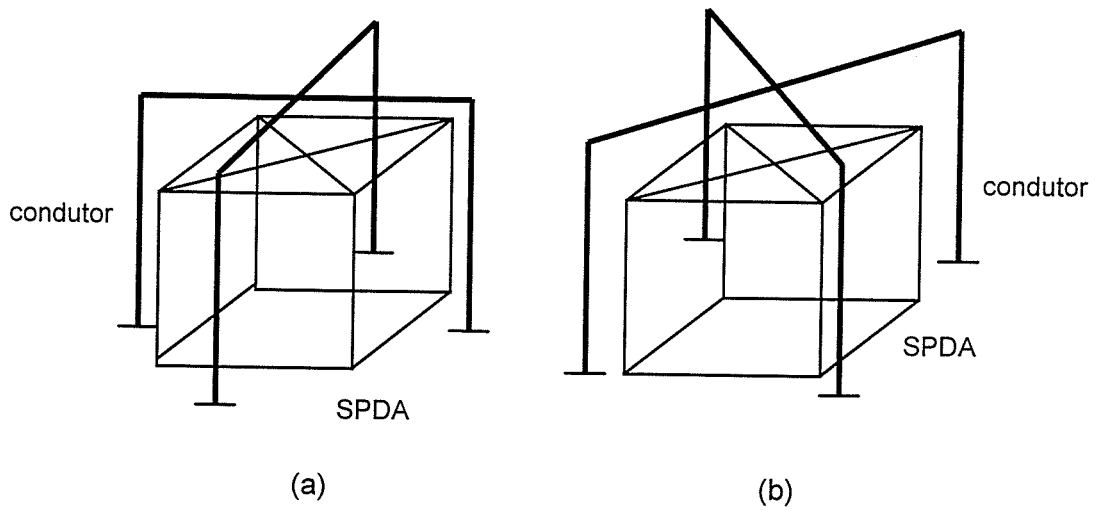


Figura 42: Posições dos arranjos: (a) transversais (b) paralelos

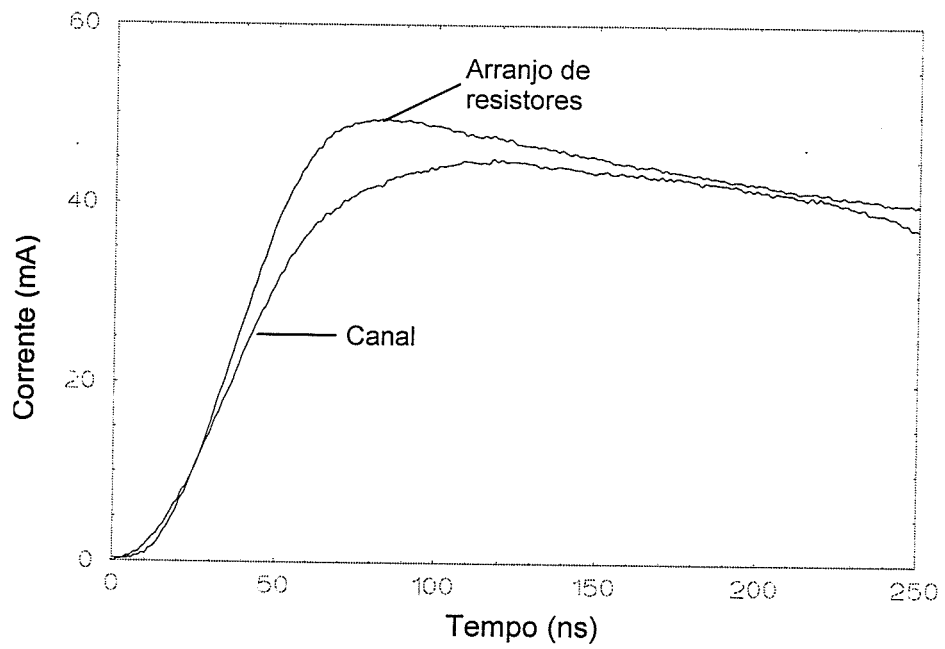


Figura 43: Corrente aplicada em função do tempo

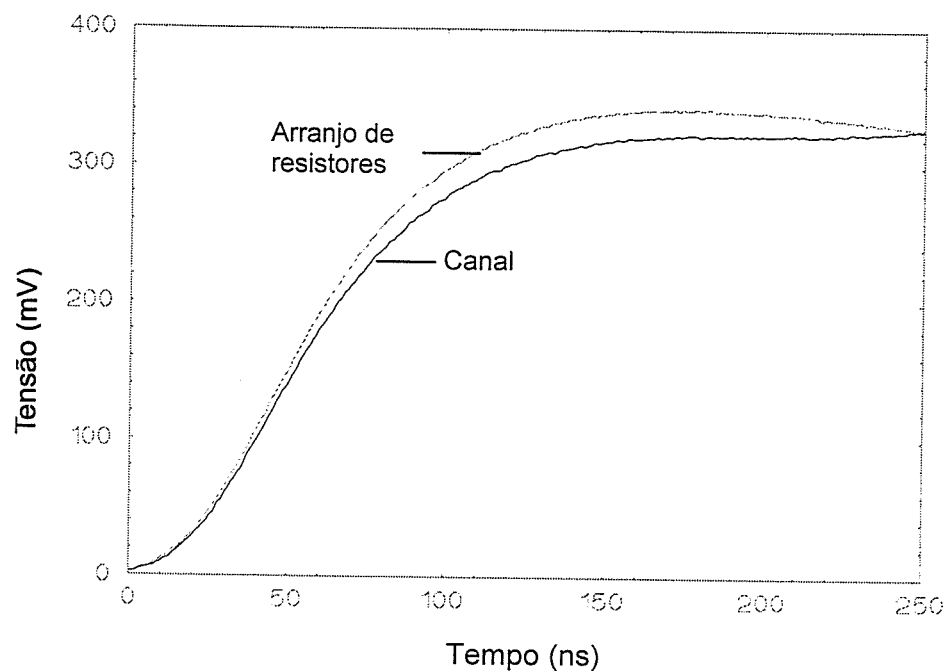


Figura 44: Tensão induzida na antena em função do tempo.

Campo elétrico = $V \times k=95$.

5.4 Considerações Finais

Na construção dos arranjos, os resistores foram soldados e depois fixados em uma estrutura de PVC, a qual foi utilizada para sustentar os mesmos.

Tudo indica que o acoplamento capacitivo entre os arranjos de resistores que envolvem o SPDA e os condutores do próprio SPDA são determinantes no valor do campo elétrico. Desta forma foi necessário distribuir os resistores ao longo do percurso, pois se os colocássemos concentrados, isto é, se aterrássemos os condutores com $R = 13,5 \text{ k}\Omega$, o circuito se fecharia através do acoplamento capacitivo, ignorando assim, os resistores. Por outro lado, se conectássemos um único resistor de valor igual à impedância do canal entre o circuito conformador e os condutores, sendo estes construídos com fio de cobre ou vareta de latão, praticamente toda a queda de tensão se concentraria nesse ponto e, portanto, como o campo

elétrico depende da tensão, essa configuração não representaria o canal no que diz respeito a campo elétrico.

A diferença entre as ondas de corrente aplicadas entre o canal e o SPDA e entre o arranjo implementado e o SPDA ocorrem pois o gerador de tensão não mantém a sua amplitude, sendo difícil conseguir exatamente o mesmo valor em duas medições distintas. Como podemos observar no gráfico do campo elétrico medido, os valores obtidos para o canal e para o arranjo de resistores foram praticamente os mesmos, principalmente quando consideramos o fato de que as correntes injetadas não foram idênticas. Sendo assim, pode-se concluir que o arranjo utilizado neste trabalho pode ser empregado para representar o canal de descargas atmosféricas, no que diz respeito a campo elétrico.

6 Resultados Finais: Medição de Campo Elétrico e Magnético

6.1 O Modelo Reduzido Implementado

Dando continuidade aos nossos estudos, partimos para a implementação de um modelo reduzido maior, de forma que quando da medição da tensão induzida em sensores de campo eletromagnético, o efeito da ponta de prova de tensão não fosse preponderante ao sensor utilizado. Desta forma, como houve a necessidade de mudarmos o local de construção do modelo e o tamanho dos componentes do sistema, partiu-se para a construção de um novo modelo reduzido e, conseqüentemente, a determinação de um novo fator de escala.

Como no capítulo anterior, o sistema analisado simula basicamente um uma descarga atmosférica que interage com o conjunto de condutores localizados dentro de um prédio. Levando-se em consideração as dimensões de um sistema real e o local onde o modelo foi implementado, o laboratório de extra alta tensão da UFMG - LEAT (30 m de comprimento, 30 m de largura e 27 m de altura), optou-se por utilizar um fator de escala de 1:20.

6.1.1 - Plano Terra

Foi utilizado, para modelar o plano terra, chapas finas de alumínio que em sua totalidade resultaram em um plano de aproximadamente 4,5 m de largura, 5,5 m de comprimento e 4,76 mm de espessura.

Ele é constituído por sete chapas de alumínio, sendo três de 2 m de largura por 1 m de comprimento e quatro de 3 m por 1,25 m. A junção das chapas foi feita através da sobreposição parcial de uma em relação à outra.

6.1.2 - Canal de Descarga

Dois canais distintos foram utilizados nas medições realizadas, sendo suas características apresentadas a seguir:

→ Canal A

Comprimento: 12 m

Diâmetro externo: 2,65 cm

Número de espiras por metro: 360 espiras/m

Impedância: 3174 Ω

Velocidade de propagação: 34 m/ μ s

Material utilizado: tubo de pvc de 2,1 cm de diâmetro, no qual foi enrolado em hélice de passo justo um fio de cobre isolado de 1,5 mm de diâmetro. Como não foi possível confeccionar um único canal, pois o tamanho máximo do tubo encontrado é de 6 m, confeccionou-se 2 sessões cujas terminações metálicas foram soldadas.

→ Canal B

Comprimento: 18 m

Diâmetro externo: 2,65 m

Número de espiras por metro: 27 espiras/m

Impedância: 749 Ω

Velocidade de propagação: 150 m/ μ s

Material utilizado: tubo de pvc de 2,1 cm de diâmetro, no qual foi enrolado em hélices distantes 2 cm uma da outra um fio de cobre isolado de 1,5 mm de

diâmetro. Como não foi possível confeccionar um canal único, confeccionou-se 3 sessões cujas terminações metálicas foram soldadas.

O canal A possui uma velocidade de propagação da onda que corresponde a 11,25% da velocidade da luz enquanto a velocidade do canal B corresponde a 50% da velocidade da luz, representando, desta forma, os dois extremos da faixa de variação da velocidade das descargas atmosféricas reais – 10% a 50% da velocidade da luz [34].

6.1.3 - Corrente de Retorno

Simulou-se a corrente de retorno através de uma onda de corrente de forma impulsiva, a qual foi injetada pelo gerador de ondas descrito anteriormente, sendo que à medida que se propagava da terra em direção ao topo do canal, ia carregando o mesmo. O gerador de ondas utilizado fornece uma onda de tensão impulsiva que aplicada à base da antena, produz uma onda de corrente na faixa de 60 mA, com tempo de frente de aproximadamente 60 ns.

6.1.4 - Prédio

O prédio foi modelado através de seu sistema de proteção contra descargas atmosféricas - SPDA, sendo utilizada uma estrutura cúbica de 4 m de comprimento, 2 m de largura e 2 m de altura. O material utilizado na construção da base do SPDA foram tubos de pvc de ¾", sendo que na parte metálica utilizou-se cordoalhas, as quais foram soldadas em suas conexões para garantir um bom contato (figura 45). Considerando o fator de escala adotado, este modelo representa uma edificação real de 40 m de altura.

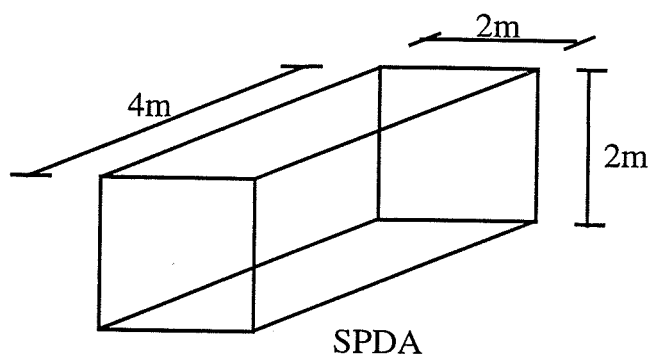


Figura 45: Modelagem do SPDA

6.1.5 – Validação das Medições

Com o objetivo de adquirir segurança nas medições realizadas, e na tentativa de diminuir ao máximo os erros de medição, fez-se necessário a realização de um estudo em modelo reduzido da tensão induzida por uma descarga atmosférica indireta em linhas aéreas.

As linhas aéreas foram modeladas utilizando-se cordoalha de 0,32 cm, sendo que para sustentá-las foram utilizados fios de nylon que estavam fixados em estruturas isolantes situadas na extremidade do plano. Considerando como valor representativo para a altura de uma linha de distribuição 8 m, modelou-se a linha do modelo a uma altura de 27 cm do plano (fator de escala 1:30). O plano terra foi montado diretamente sobre o solo, sendo utilizado placas de alumínio, as quais foram parcialmente sobrepostas para garantir um bom contato. Três comprimentos diferentes de linha foram analisados:

- a) linha de 25 m, montada sobre um plano de alumínio de 27 m x 1,25 m, estando localizada aproximadamente no meio desse e ficando suas extremidades a 50 cm da borda do plano;
- b) linha de 5 m, montada sobre um plano de alumínio de 5,5 m x 2 m, estando localizada aproximadamente no meio desse e ficando suas extremidades a 25 cm da borda do plano;
- c) linha de 1 m, montada sobre um plano de alumínio de 5,5 m x 2 m, estando localizada aproximadamente no meio desse e ficando suas extremidades a 2,25 cm da borda do plano.

O gerador de corrente é conectado à base do canal de descarga e a uma cordoalha que por sua vez está ligada ao plano de alumínio, sendo que a medida que a onda de corrente se propaga da base em direção ao topo do canal, vai carregando o mesmo. O canal estava a uma altura do plano aproximadamente igual à altura da linha (27 cm), sendo fixado no teto do laboratório de extra alta tensão por meio de uma corda de nylon. O gerador de corrente foi colocado sobre o plano de alumínio estando porém isolado desse através de uma placa de acrílico.

→ *Resultados*

Iniciamos as medições utilizando a linha aérea de 25 m de comprimento casada em ambas as extremidades ($R = 470 \Omega$). As medições foram realizadas a 8 m da extremidade da linha, sendo que as seguintes distâncias foram utilizadas:

- a) canal A - $d = 40$ cm (distância do canal à linha), $x = 9,10$ m (distância do canal em relação à extremidade da linha) e $h = 28,5$ cm (altura do canal);
- b) canal B - $d = 38$ cm, $x = 9,40$ m e $h = 29$ cm.

Os resultados são apresentados a seguir (figuras 46, 47, 48 e 49), sendo mostrada uma comparação entre medição (linha tracejada) e simulação (linha contínua) da tensão induzida pela descarga indireta. As simulações computacionais foram obtidas através do programa para cálculo de tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, desenvolvido por Lopes [18].

Canal de 12m, $v = 34 \text{ m}/\mu\text{s}$

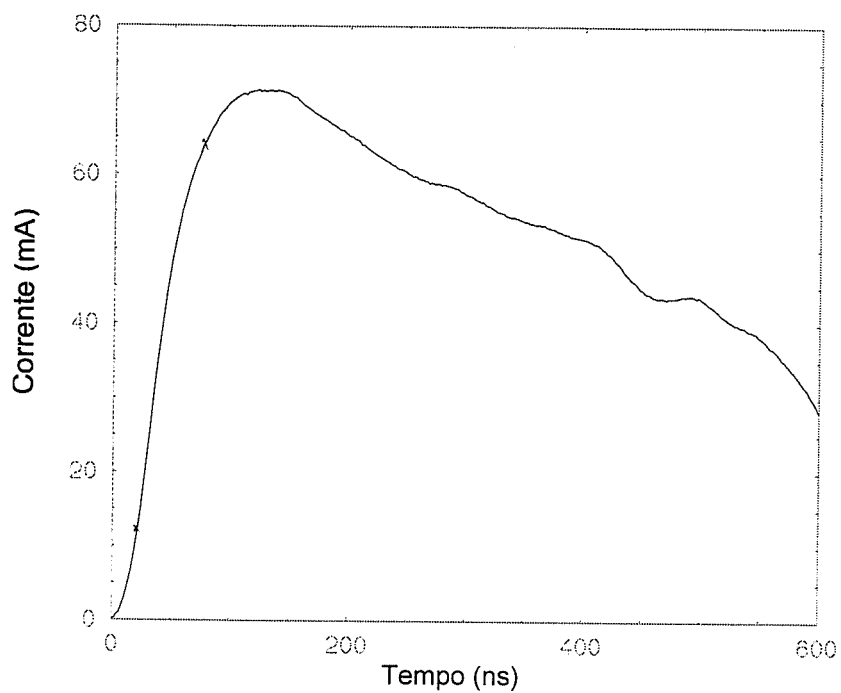


Figura 46: Corrente aplicada x tempo

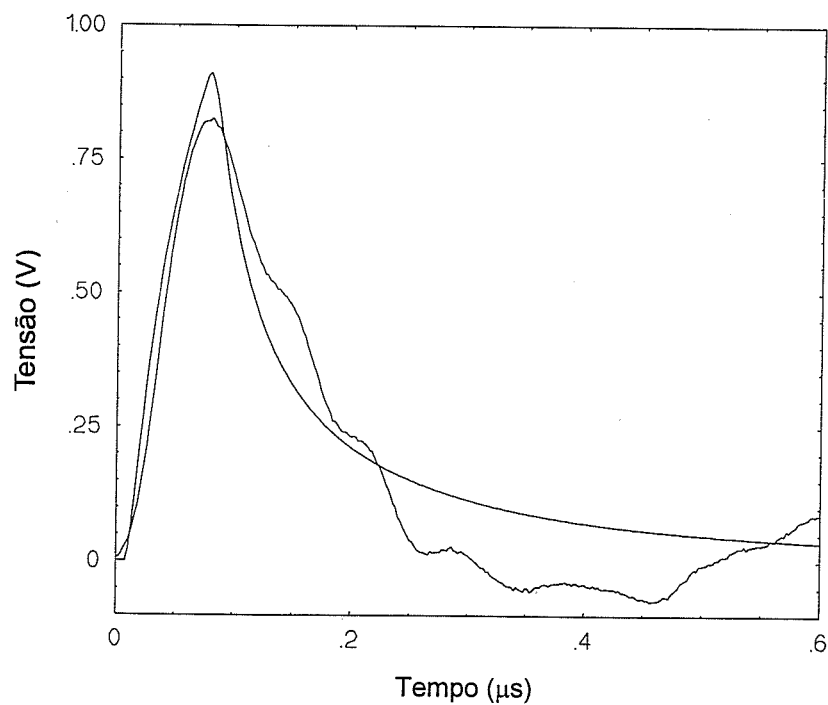


Figura 47: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Canal de 18m, $v = 150 \text{ m}/\mu\text{s}$

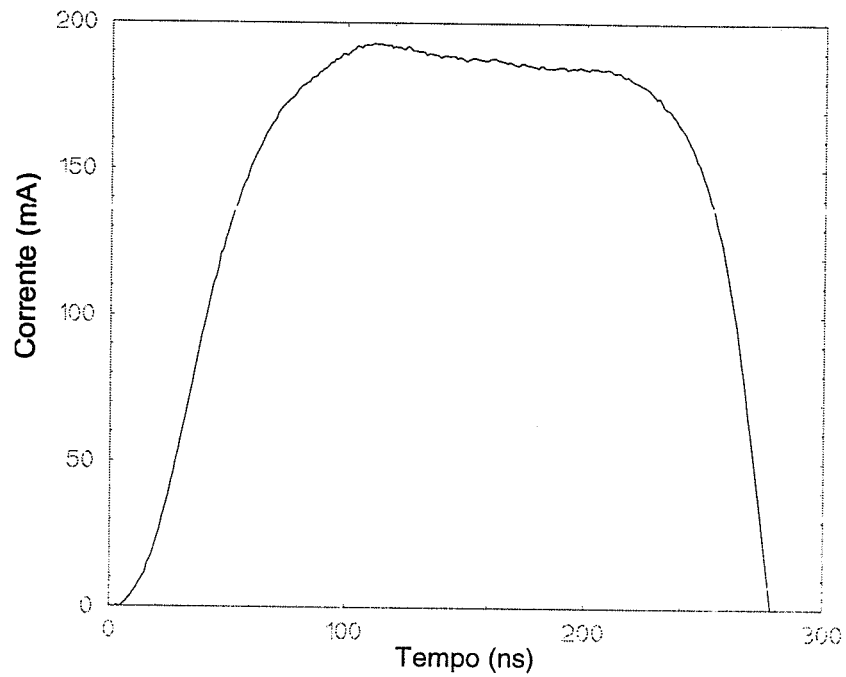


Figura 48: Corrente aplicada x tempo

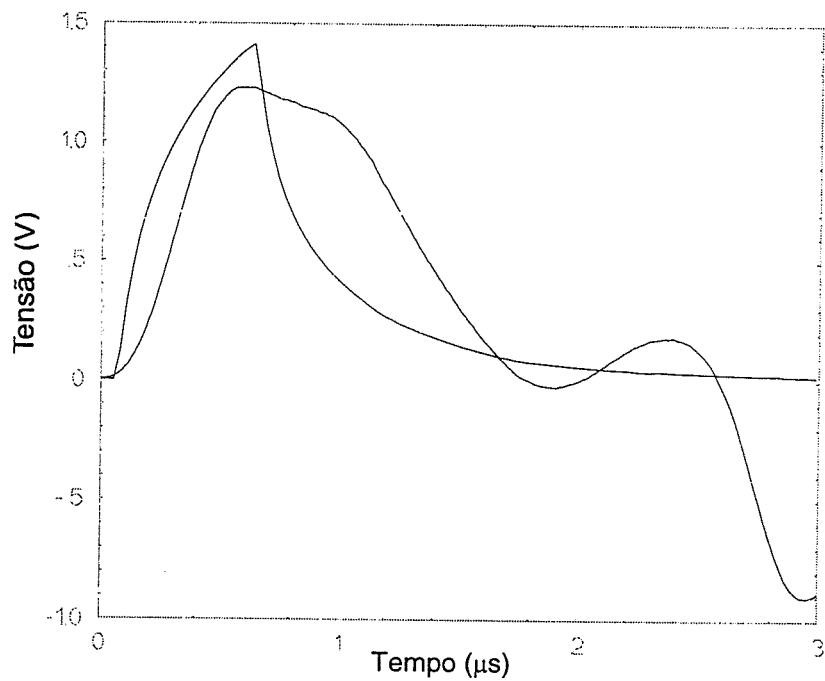


Figura 49: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Como as medições apresentaram correspondência satisfatória com as simulações computacionais, fizemos uma análise para uma linha menor. Sendo assim, foi utilizada uma linha aérea de 5 m de comprimento, casada em uma extremidade ($R = 470 \Omega$) e aberta na outra extremidade onde é feita a medição. Quando da simulação da descarga indireta as seguintes distâncias foram utilizadas:

- a) canal A - $d = 35$ cm, $x = 2,19$ m, $h = 26,5$ cm;
- b) canal B - $d = 42$ cm, $x = 1,92$ m, $h = 32$ cm.

Os resultados são apresentados abaixo (figuras 50, 51, 52 e 53), juntamente com uma comparação entre medição (linha tracejada) e simulação (linha contínua) da tensão induzida pela descarga indireta.

Canal de 12m, $v = 34$ m/ μ s

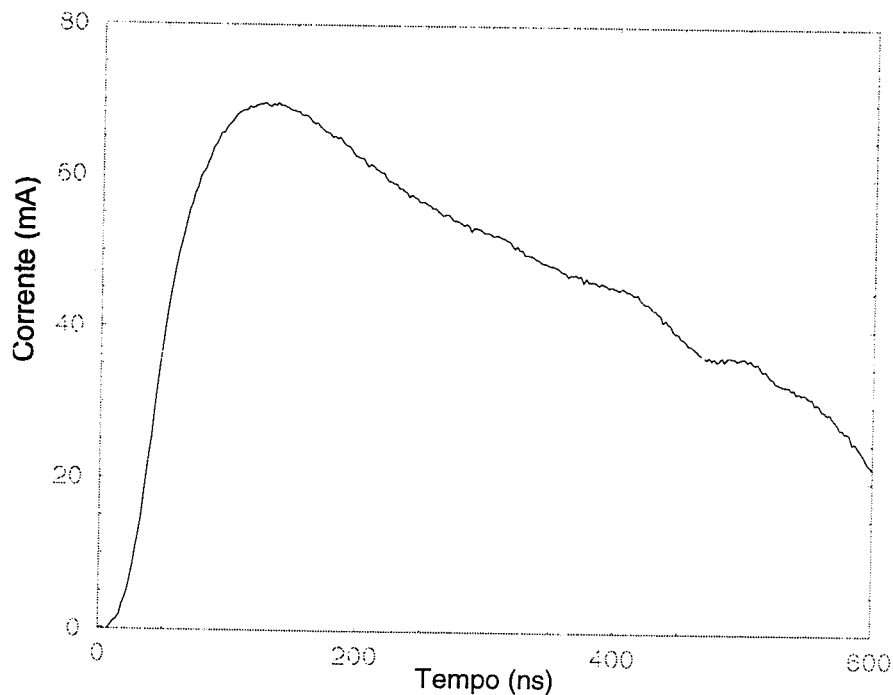


Figura 50: Corrente aplicada x tempo

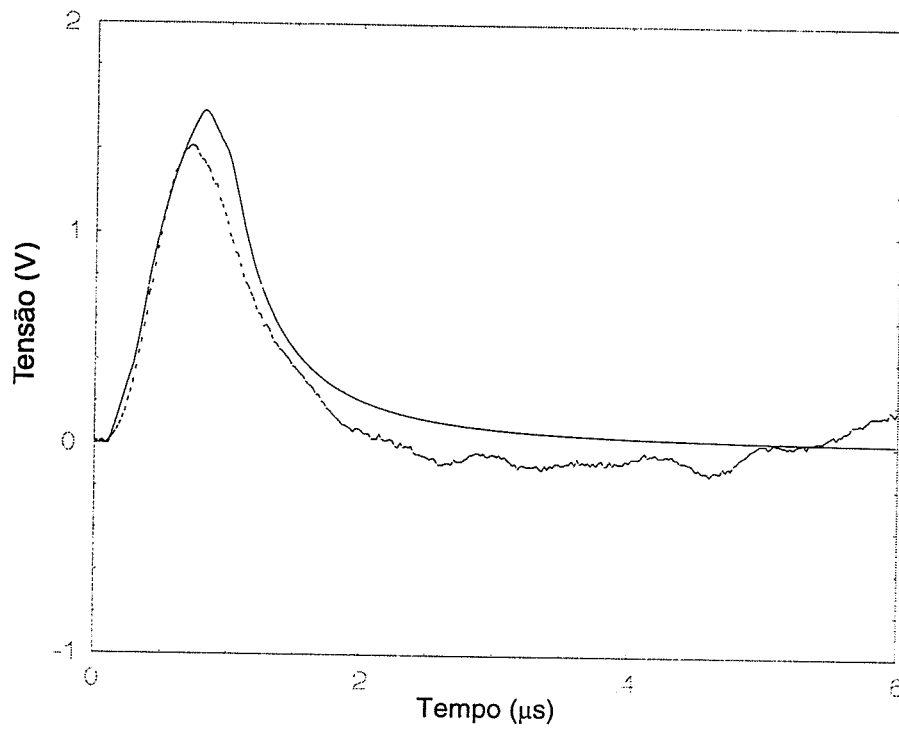


Figura 51: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Canal de 18m, $v = 150 \text{ m}/\mu\text{s}$

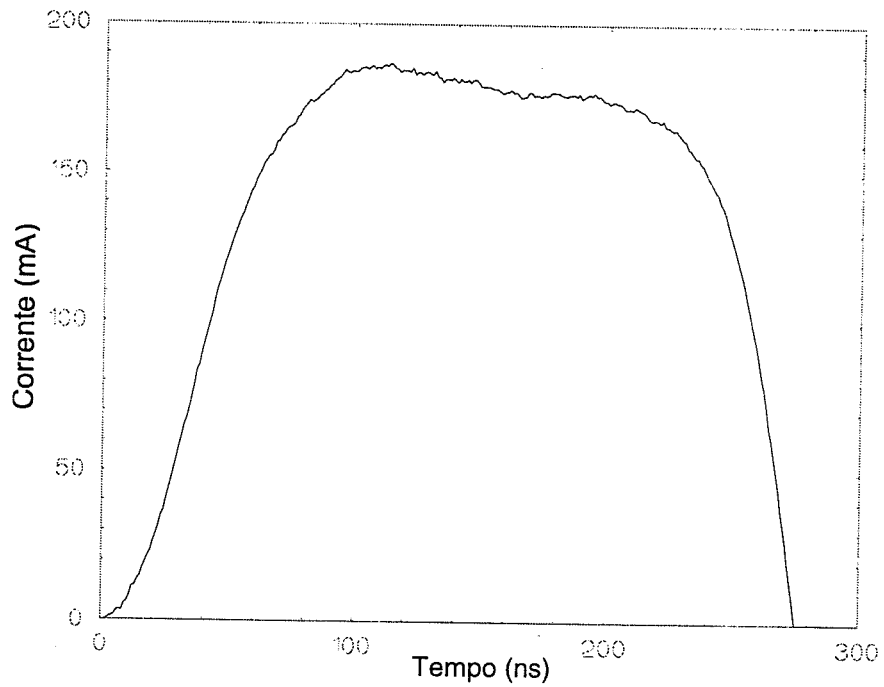


Figura 52: Corrente aplicada x tempo

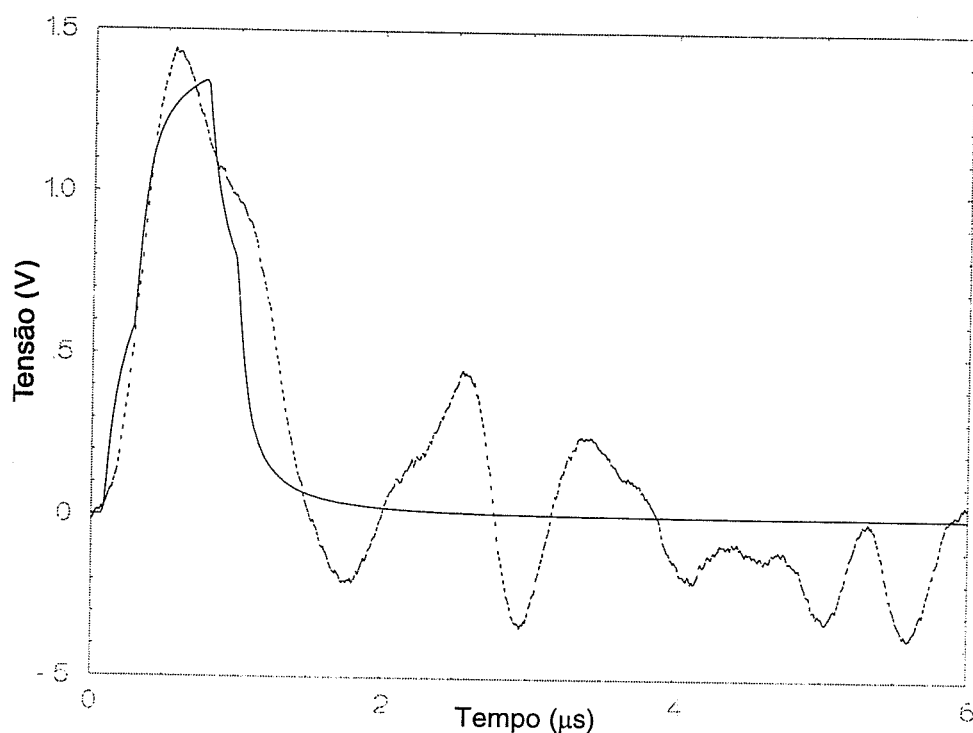


Figura 53: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Novamente houve uma correspondência satisfatória entre a medição e a simulação computacional, levando-nos a uma nova medição em uma linha aérea menor. Sendo assim, foi utilizada uma linha aérea de 1 m de comprimento, casada em ambas as extremidades ($R = 470 \Omega$). As medições foram realizadas na extremidade da linha. Para a descarga indireta as seguintes distâncias estão envolvidas:

- a) canal A - $d = 25$ cm, $x = 51$ cm, $h = 27$ cm;
- b) canal B - $d = 25$ cm, $x = 51$ cm, $h = 28$ cm.

Os resultados são apresentados a seguir nas figuras 54, 55, 56 e 57, juntamente com a comparação entre medição (linha tracejada) e simulação (linha contínua) da tensão induzida pela descarga indireta.

Canal de 12m, $v = 34 \text{ m}/\mu\text{s}$

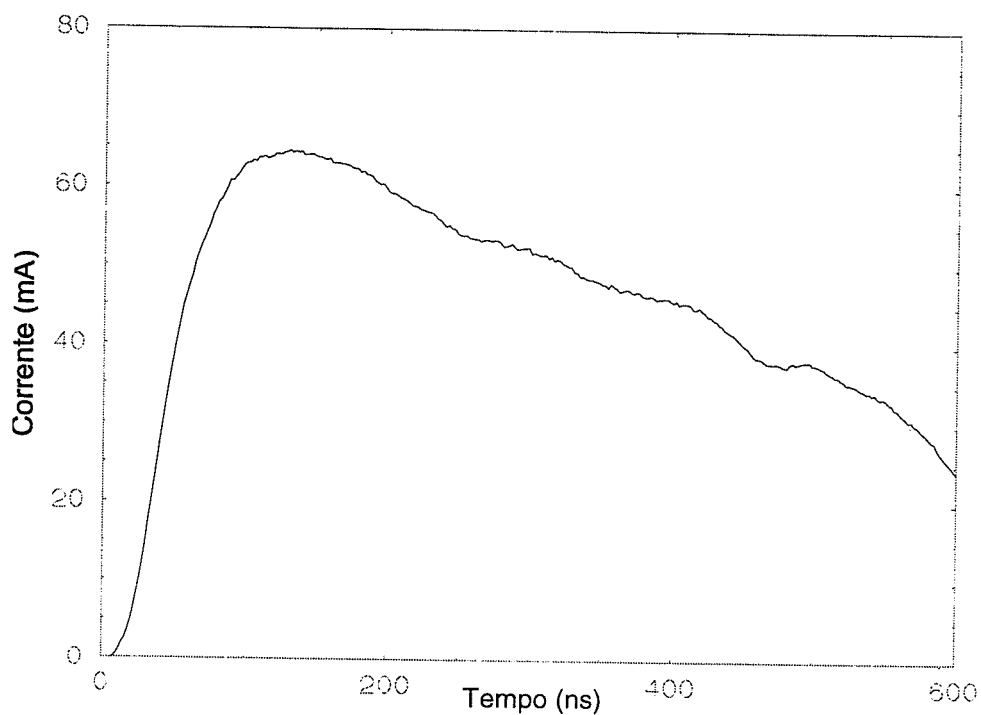


Figura 54: Corrente aplicada x tempo

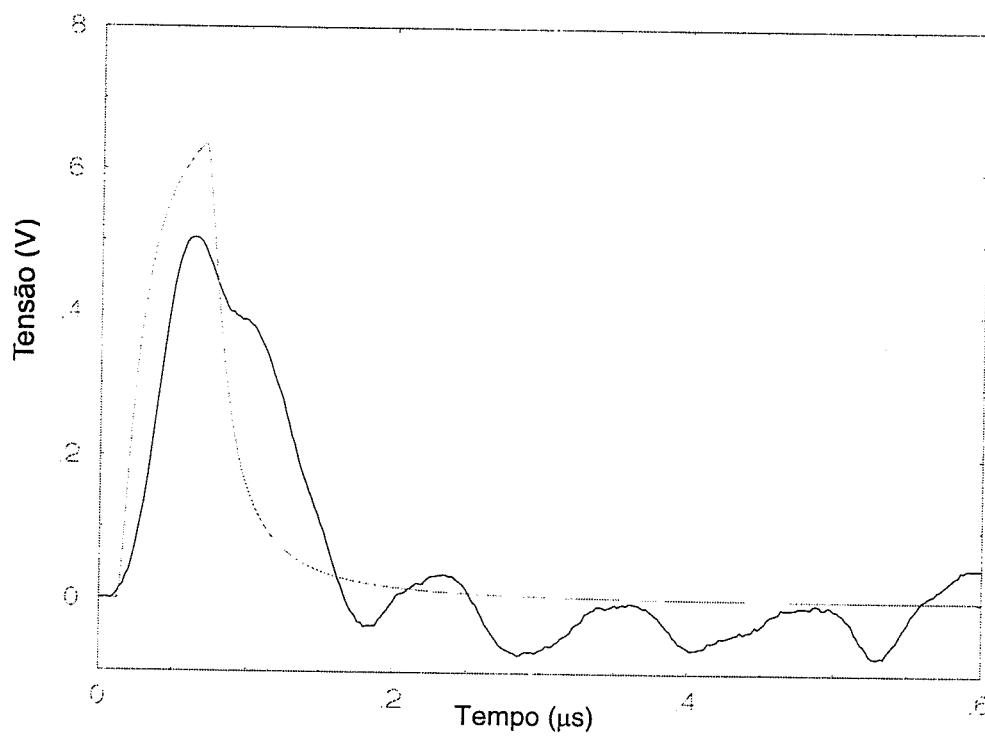


Figura 55: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Canal de 18m, $v = 150 \text{ m}/\mu\text{s}$

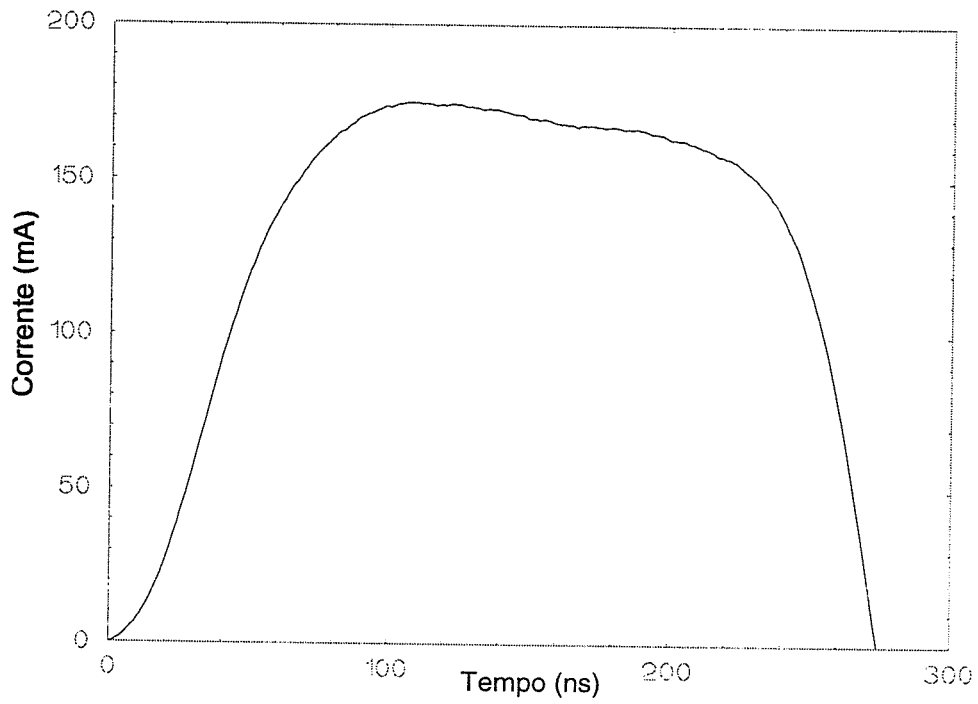


Figura 56: Corrente aplicada x tempo

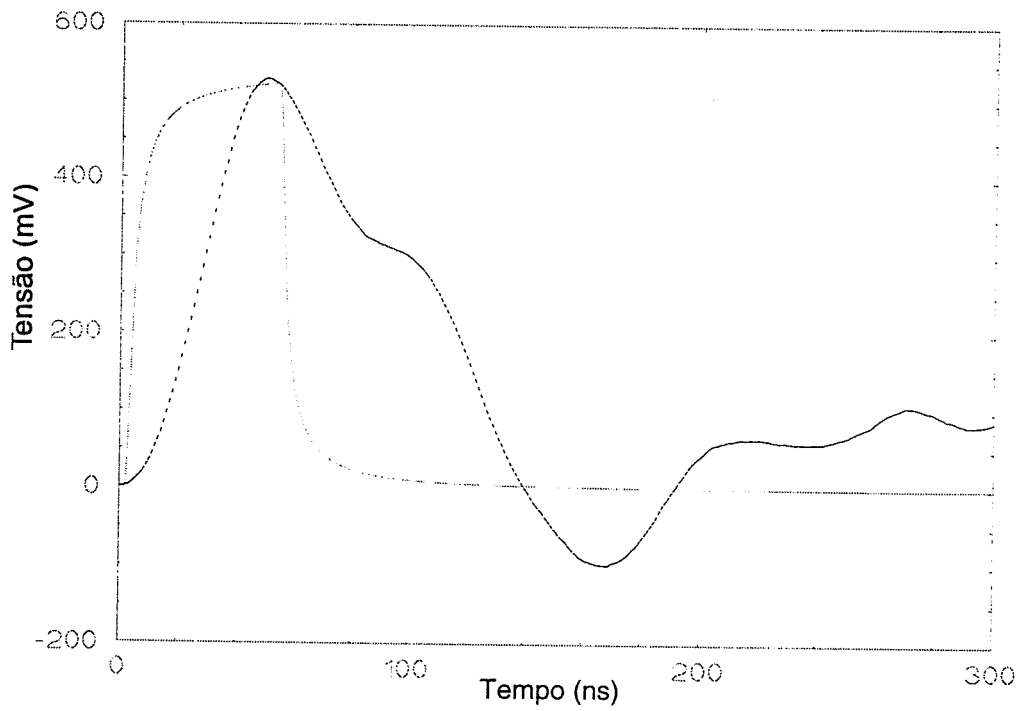


Figura 57: Tensão induzida x tempo – simulação x medição

Tentamos diminuir ainda mais o tamanho da linha mas, os resultados não foram satisfatórios.

Analisando os resultados obtidos com os três comprimentos de linha, podemos constatar que a boa correspondência entre medições e simulações indicam que os canais apresentados podem ser utilizados em nossos estudos para representar uma descarga atmosférica. Para a realização de nossas medições optamos pela utilização do canal A (12 m de comprimento e velocidade de propagação igual a 34 m/ μ s).

6.1.6 – Sistema de Medição de Campo Elétrico e Magnético

Uma vez validada a utilização dos canais apresentados, resta-nos definir o tamanho do “loop” a ser utilizado na realização das medições de tensão induzida, levando-se em consideração o efeito da ponta de prova de tensão e as dimensões do LEAT, uma vez que este limita as dimensões do canal de descarga, do SPDA e conseqüentemente do “loop”. Baseado nos estudos apresentados anteriormente, optou-se pela utilização de um “loop” de 1 m de comprimento e, por facilidade de operação, de 1 m de altura, sendo utilizado na sua confecção um fio de cobre de 1,5 mm de diâmetro. Duas situações diferentes foram analisadas: a) loop aberto em uma extremidade e na outra diretamente aterrado ao plano; b) loop aberto em uma extremidade e aterrado através de um resistor de 470 Ω (figura 58).

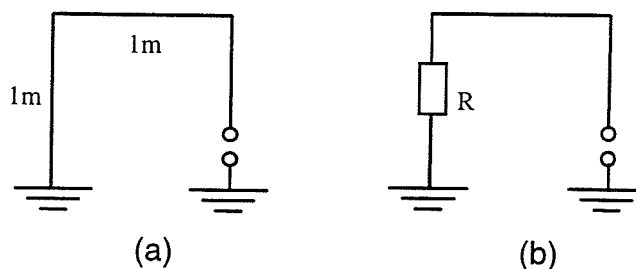


Figura 58: Tipos de “loops” utilizados para medir tensão induzida

6.1.7 - Localização dos Componentes do Sistema

O plano de terra foi montado diretamente sobre o solo. O canal de descarga foi fixado no teto do LEAT, localizando-se logo acima do prédio, em sua quina superior direita (figura 59). O gerador de ondas de corrente foi colocado sobre uma estrutura isolante de mesma altura do SPDA, sendo conectado à base do canal de descarga e ao SPDA por um cabo coaxial. O osciloscópio para medição das correntes e tensões foi colocado sobre um carrinho apropriado. O SPDA foi conectado no meio do plano de alumínio, estando aterrado ao plano nas suas quatro descidas.

6.2 Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em “Loops” dentro de um Prédio

Esta primeira análise tem como objetivo, estudar a influência das correntes que fluem nos condutores do sistema de proteção contra descargas atmosféricas nas tensões induzidas em tipos diferentes de “loops” localizados dentro do prédio, os quais representam as instalações elétricas

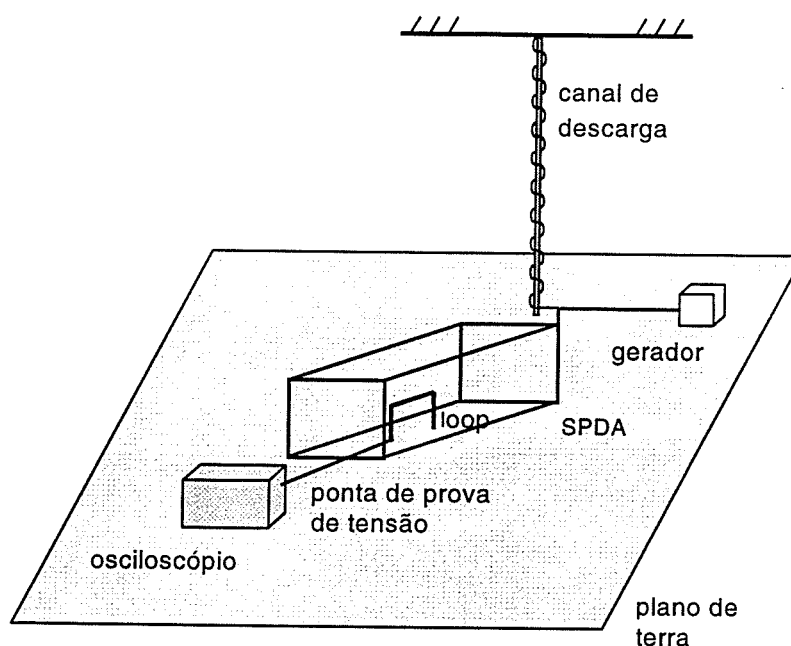


Figura 59: Disposição das partes do modelo

existentes em um prédio real. Desta forma, para atingir este objetivo três situações distintas serão analisadas, como será descrito a seguir.

Inicialmente, a incidência de uma descarga atmosférica indireta em “loop” será analisada, utilizando para tanto o canal de descarga como mostrado na figura 60, para nos certificarmos se o sistema implementado neste trabalho (canal, sistema de medição, “loop”, plano de terra) está de acordo para medir tensão induzida. Para tanto, foi realizada a simulação computacional utilizando o programa de Lopes [25] para cálculo de tensão induzida em linhas aéreas baseado na teoria de Rusck. As comparações entre medição e simulação estão apresentadas nas figuras 61 e 62.

Em seguida, visando analisar a influência da elevação do canal com relação ao plano de terra, foram realizadas medições com o canal suspenso a 2 m do plano de alumínio – altura equivalente à do prédio, utilizando o mesmo canal e mantendo as mesmas distâncias do caso anterior (figura 63). Após estas medições o prédio foi introduzido no modelo reduzido, simulando uma descarga direta na quina superior do prédio, sendo feitas as medições da tensão induzida nos “loops” dentro do prédio e da corrente aplicada na base do canal (figura 64). É importante observar que novamente as mesmas

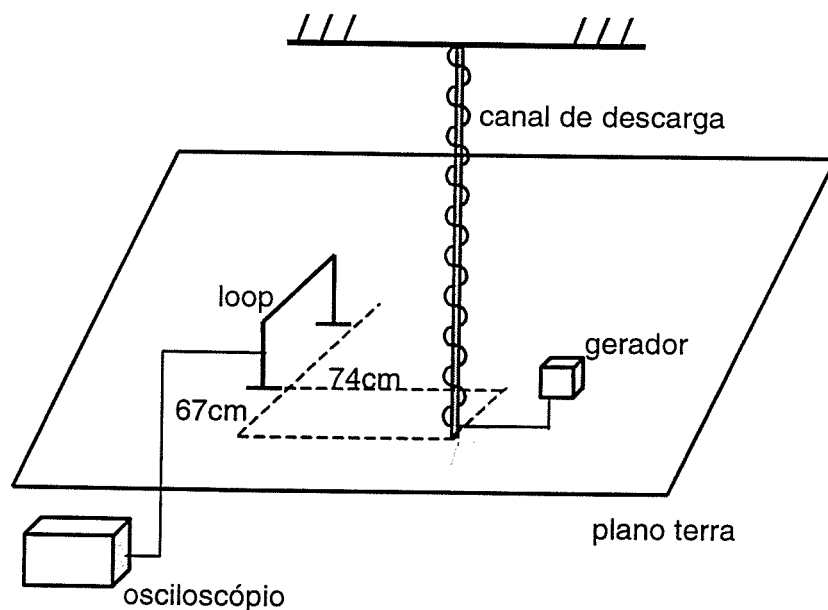


Figura 60: Caso 1 - Descarga indireta na linha

distâncias foram mantidas. Os resultados estão apresentados nas figuras 65, 66 e 67.

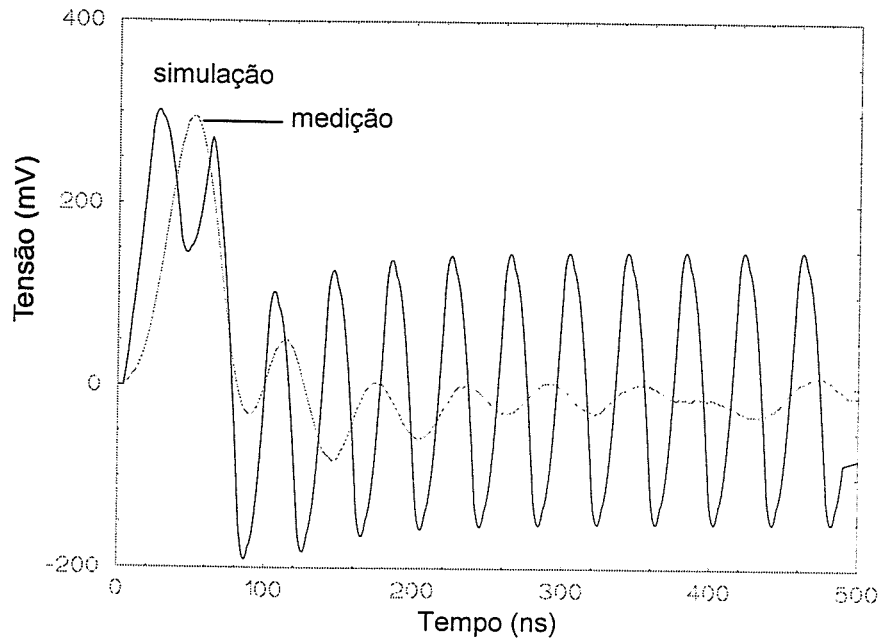


Figura 61: Medição x simulação – loop diretamente aterrado

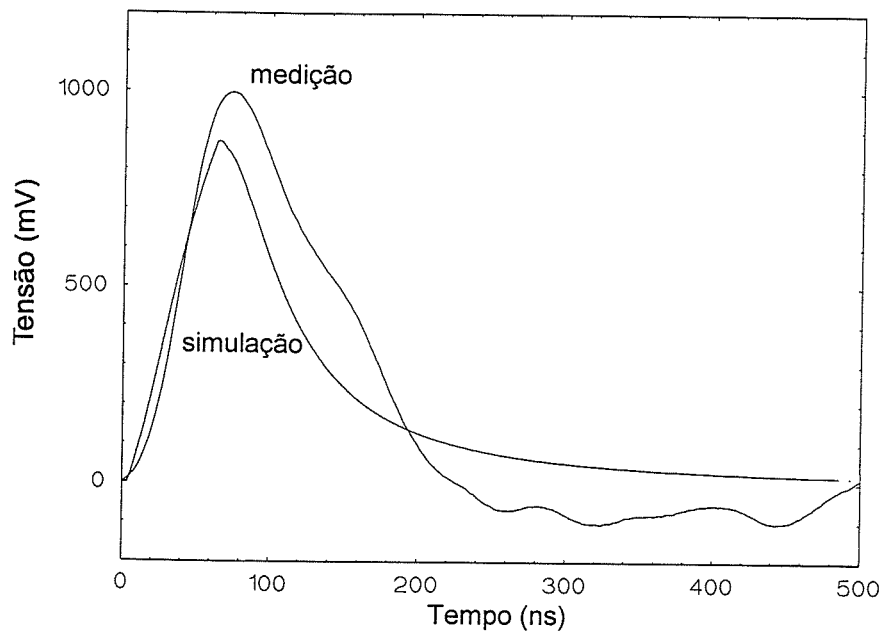


Figura 62: Medição x simulação – loop aterrado por resistor

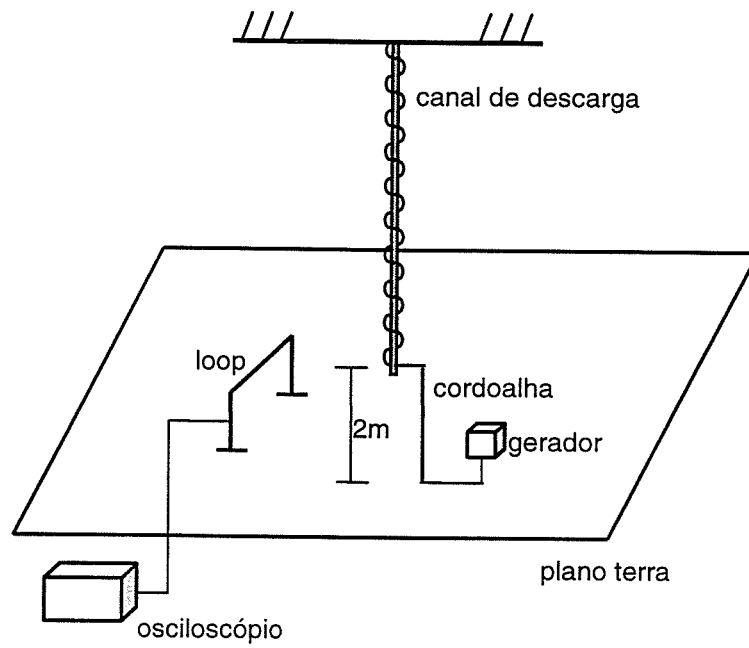


Figura 63: Caso 2 - Descarga indireta na linha, canal a 2 m do plano

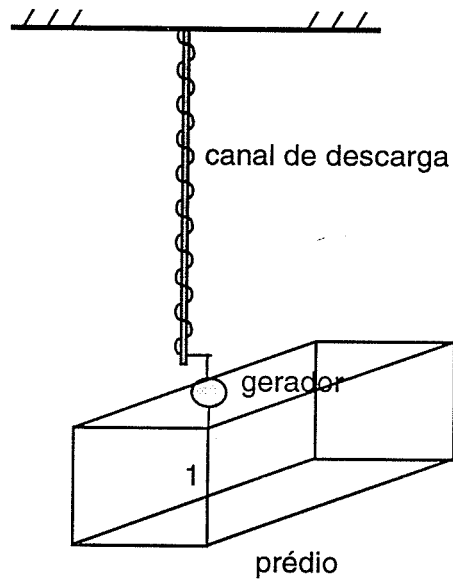


Figura 64: Caso 3 - Descarga direta em um prédio

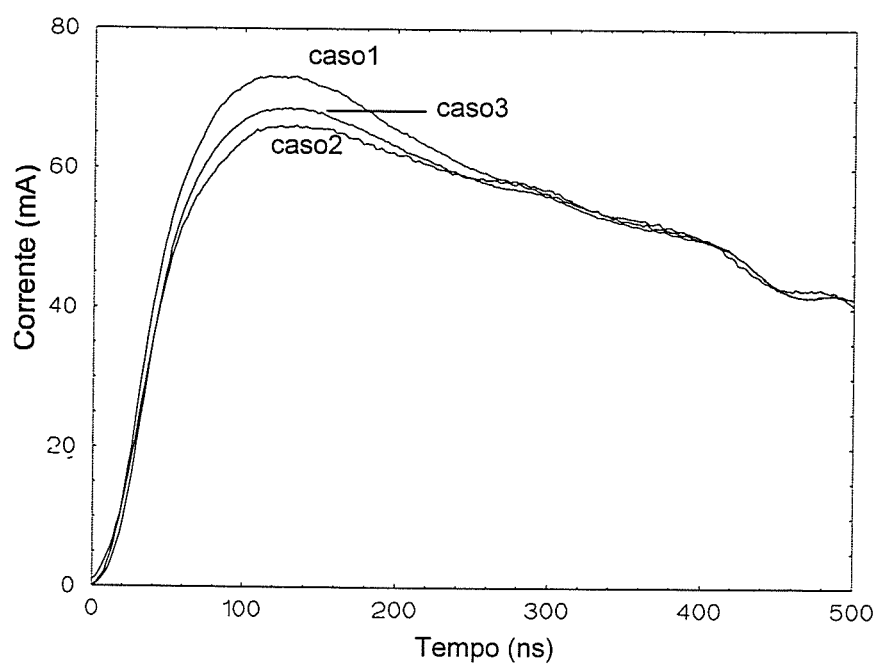


Figura 65: Corrente aplicada x tempo

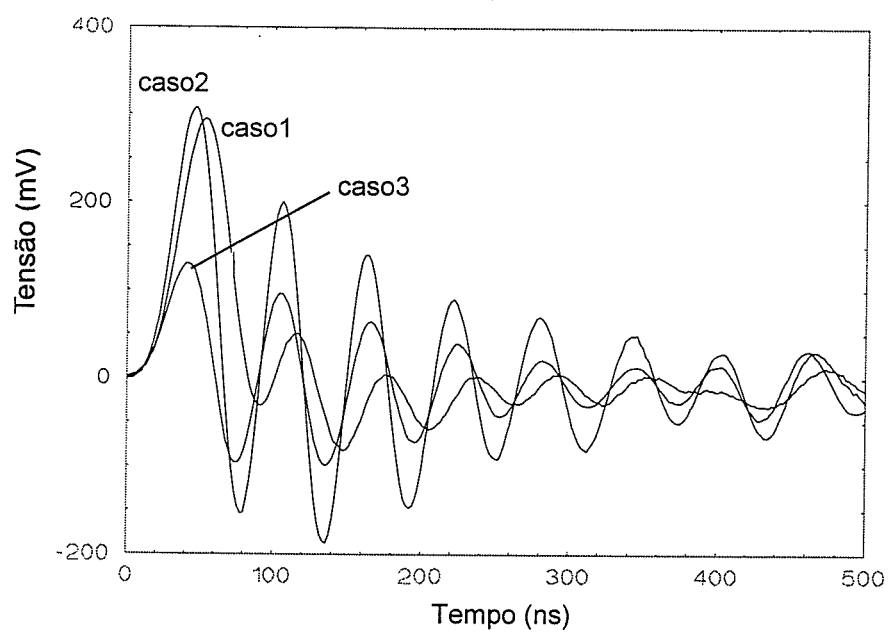


Figura 66: Tensão induzida em loop diretamente aterrado

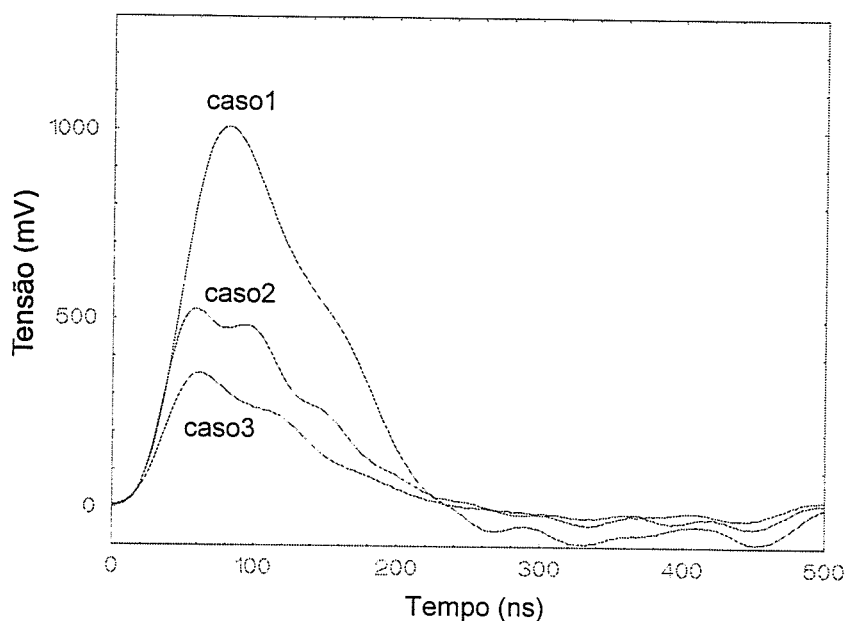


Figura 67: Tensão induzida em loop aterrado por resistor

A qualidade e a correspondência satisfatória entre as simulações computacionais e as medições da tensão induzida nos “loops” (figuras 61 e 62) indicam que o modelo reduzido apresentado é uma boa ferramenta para ser utilizado na avaliação das sobretensões causadas por descargas atmosféricas diretas ou indiretas em prédios.

Os resultados obtidos mostram que no “loop” diretamente aterrado a tensão induzida quase não é influenciada pelo canal, ela depende basicamente da corrente. Isto pode ser notado no caso 3 onde a corrente que flui no condutor de descida 1 é 45% da corrente total, resultando em uma tensão induzida 50% menor que nos outros casos. Já no “loop” aterrado por resistor a tensão induzida depende muito do canal de descarga e conseqüentemente da velocidade de propagação da onda; ela quase não é influenciada quando a corrente varia (compare caso 2 e caso 3 - figura 67).

No anexo 2 são apresentadas medições complementares a este item, onde se utiliza um “loop” de dimensões distintas, e dois modelos de canais de descarga, sendo um idêntico ao aqui apresentado e o outro com velocidade de propagação de aproximadamente $150 \text{ m}/\mu\text{s}$.

6.3 Influência de Diferentes SPDA's na Tensão Induzida no Interior do Prédio

6.3.1 – Revisão Bibliográfica

Para se avaliar as sobretensões resultantes no interior de construções devido às descargas atmosféricas, fatores diferentes devem ser levados em consideração, entre os quais pode-se citar o tipo de “loop”, o local onde ocorre a descarga atmosférica, assim como o modelo do sistema de proteção contra descargas atmosféricas utilizado no prédio. Neste tópico do trabalho será feita uma análise do último item.

Recentemente, na literatura técnica, pode-se destacar alguns trabalhos que lidam com estudos tanto experimentais quanto analíticos da geometria do sistema de proteção contra descargas atmosféricas de edificações, com o objetivo de limitar as sobretensões induzidas dentro do SPDA devido a uma descarga atmosférica [8, 9, 16, 24, 42].

Orlandi e Schietroma [8] fazem uma investigação analítica do nível máximo de transitório esperado e da eficiência de sua atenuação por diferentes configurações do SPDA.

Mazzetti, Flisowski, Kuca, Stanczak, Yarmarkin [24] e Orlandi [9] fazem uma investigação analítica baseada em simulações computacionais e algumas medições experimentais das correntes induzidas em “loops” fechados localizados dentro de diferentes modelos de SPDA. O canal de descarga é simulado por um condutor vertical onde é injetada uma corrente impulsiva da forma $1/5 \mu\text{s}$ sendo posicionado próximo ao modelo do SPDA. Entretanto, esta simulação não representa a impedância e a velocidade de propagação de um canal de descarga real.

Em [16] são apresentados os resultados computacionais dos transitórios de corrente em um SPDA de uma edificação. Objetivando encontrar uma melhor proteção para o prédio, é feita uma análise da influência de diferentes configurações do SPDA no cálculo dos campos eletromagnéticos gerados em seu interior e na simulação do campo elétrico induzido em um circuito localizado no interior deste. O modelo TLM - Modelo de Linha de Transmissão, foi

utilizado para simular tanto canal de descarga como o SPDA, o qual é considerado como uma interconexão de linhas de transmissão.

Na referência [42] é apresentada uma avaliação numérica, realizada através de um programa computacional, da distribuição do campo magnético dentro do volume protegido pelo SPDA quando uma descarga atmosférica direta atinge um prédio. Configurações diferentes do SPDA são avaliadas, sendo introduzido e avaliado o fator de blindagem. Entretanto, os sistemas simulados são muito diferentes dos aqui estudados, não permitindo que se faça uma comparação com os nossos resultados.

6.3.2 – Análise de Diferentes Configurações do SPDA

Desta forma, nesta parte do trabalho será feita uma análise da redução das tensões induzidas por descargas atmosféricas diretas em “loops” condutores internos por SPDA’s e seus condutores adicionais.

Baseado nas medições de tensão induzida em “loop” por descarga indireta realizadas no item anterior e em sua comparação com as simulações computacionais obtidas, figuras 60, 61 e 62 - caso 1, constatou-se a adequação de todo o sistema (canal, sistema de medição, “loop”, plano de terra) a ser utilizado nas medições. Em seguida, simulou-se uma descarga direta no SPDA, o qual é composto por quatro condutores de descida (d) de 2 m cada e quatro condutores superiores (u), sendo dois condutores de 2 m e dois de 4 m (fig. 68). Medições da tensão induzida nas extremidades abertas tanto do “loop” diretamente aterrado quanto do aterrado por resistor foram realizadas. Então, adicionou-se mais oito condutores de descida de 2 m cada ao SPDA, os quais foram diretamente conectados ao plano de alumínio, realizando-se assim novas medições (fig. 69). A distância entre os condutores de descida é de 1 m.

É importante salientar que a posição do “loop” com relação ao SPDA e ao canal se manteve a mesma em todos os casos implementados. Em seguida um SPDA composto por três condutores horizontais (h) adicionais de 12 m cada foi implementado, estando distantes 0,5 m um do outro (fig. 70).

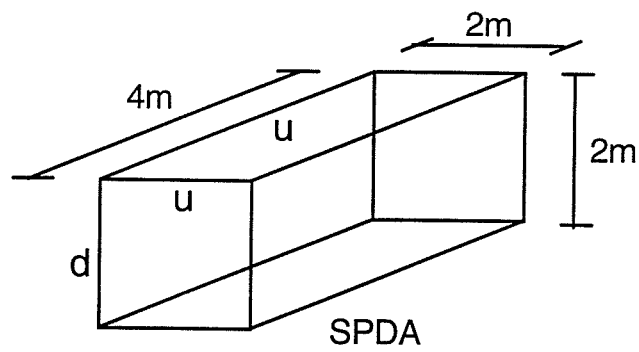


Figura 68: Configuração base do SPDA - caso1

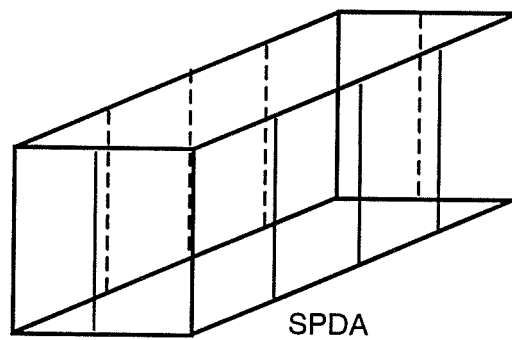


Figura 69: SPDA com 12 condutores de descida e 4 condutores superiores - caso2

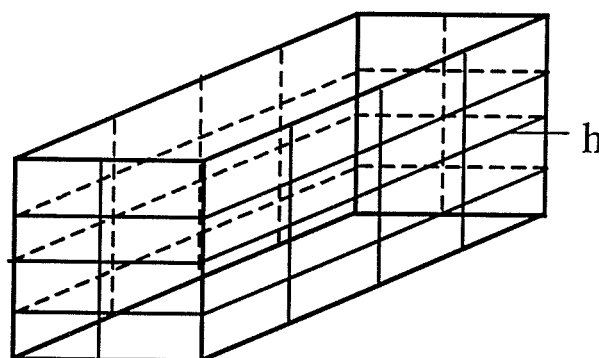


Figura 70: SPDA com 12 condutores de descida, 4 condutores superiores e 3 horizontais – caso3

O próximo modelo de SPDA implementado foi composto por quatro condutores superiores adicionais, um de 4 m e três de 2 m como mostrado na figura 71. Finalmente, um SPDA com vinte e quatro condutores de descida (distantes 50 cm), oito condutores horizontais (25 cm distantes) e 14 condutores superiores, sendo cinco de 4 m e nove de 2 m (distantes 50 cm) foi implementado (caso5). A corrente aplicada e a tensão induzida na extremidade aberta dos "loops" estão apresentadas nas figuras 72, 73 e 74.

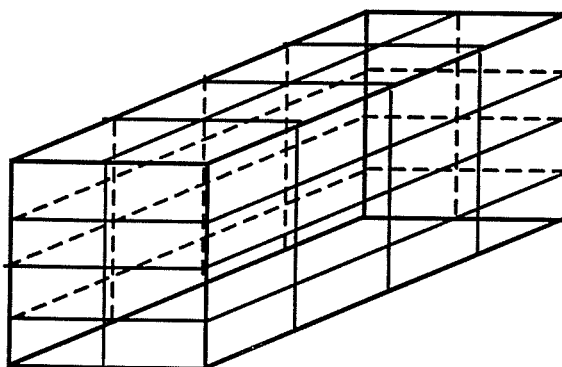


Figura 71: SPDA com 12 condutores de descida, 8 superiores (3 de 4 m e 5 de 2 m) e 3 condutores horizontais - caso4

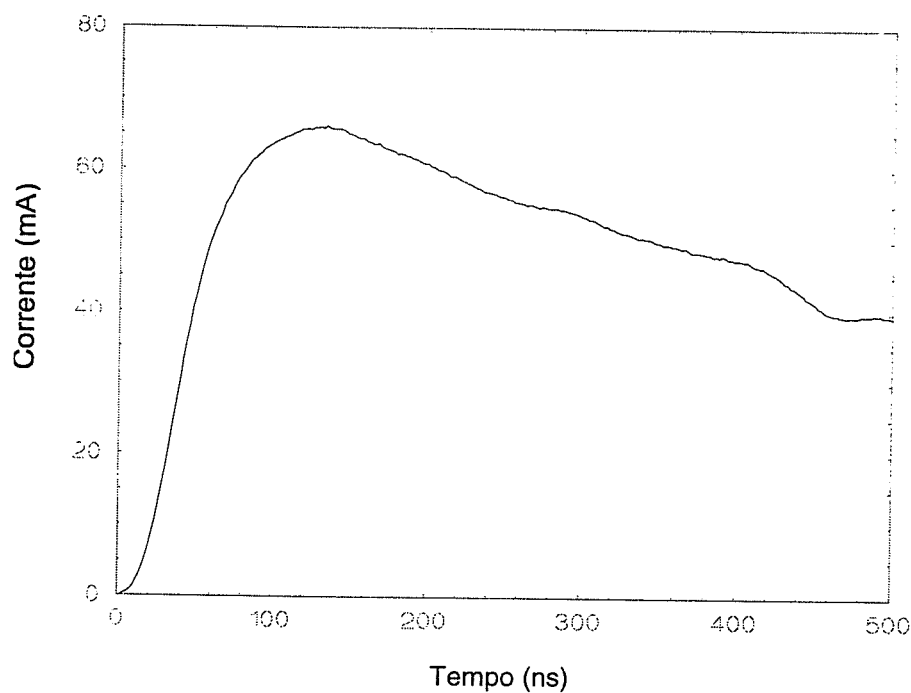


Figura 72: Corrente aplicada x tempo

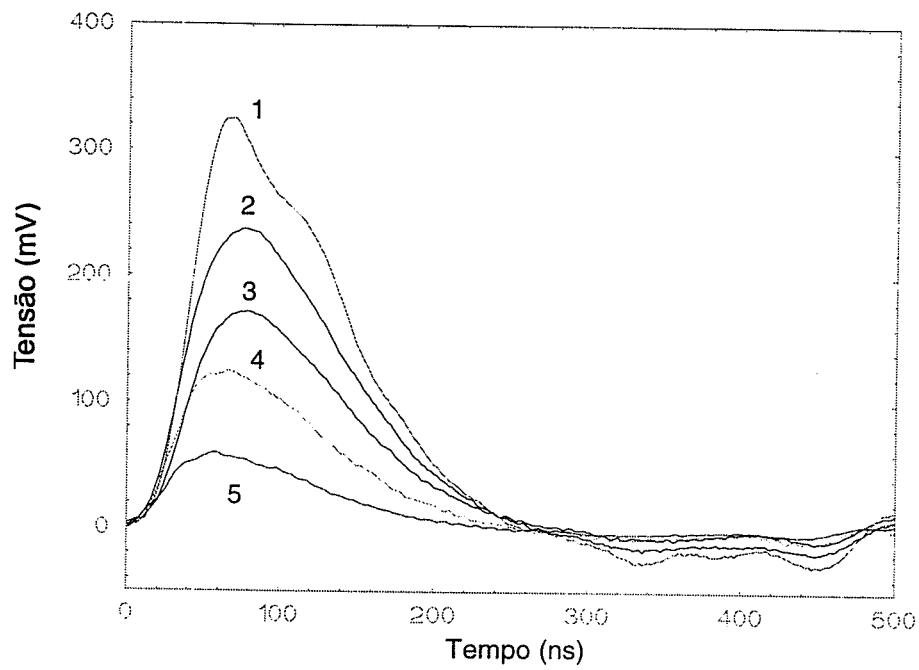


Figura 73: Tensão induzida em loop aterrado por resistor

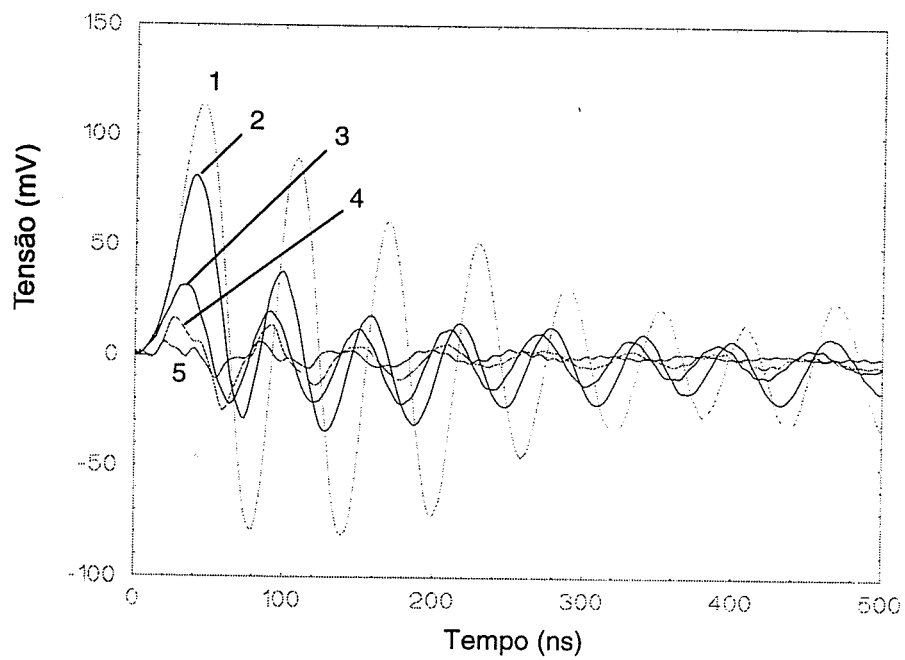


Figura 74: Tensão induzida em loop diretamente aterrado

Além das configurações anteriormente mostradas, três outras foram analisadas, sendo feita uma variação da posição dos condutores, resultando nas seguintes situações:

- a) caso6 - configuração base mais 8 condutores horizontais, distantes 25 cm um do outro;
- b) caso7 - configuração base adicionada de 10 condutores superiores, sendo 3 deles de 4 m de comprimento (distantes 50 cm) e 7 de 2 m (distantes 50 cm um do outro);
- c) caso8 - configuração base mais 20 condutores de descida, distantes 50 cm um do outro.

Nos gráficos que se seguem é apresentada uma comparação das medições realizadas na configuração base (caso1) e nos três casos anteriormente descritos (figura 75, 76, 77 e 78).

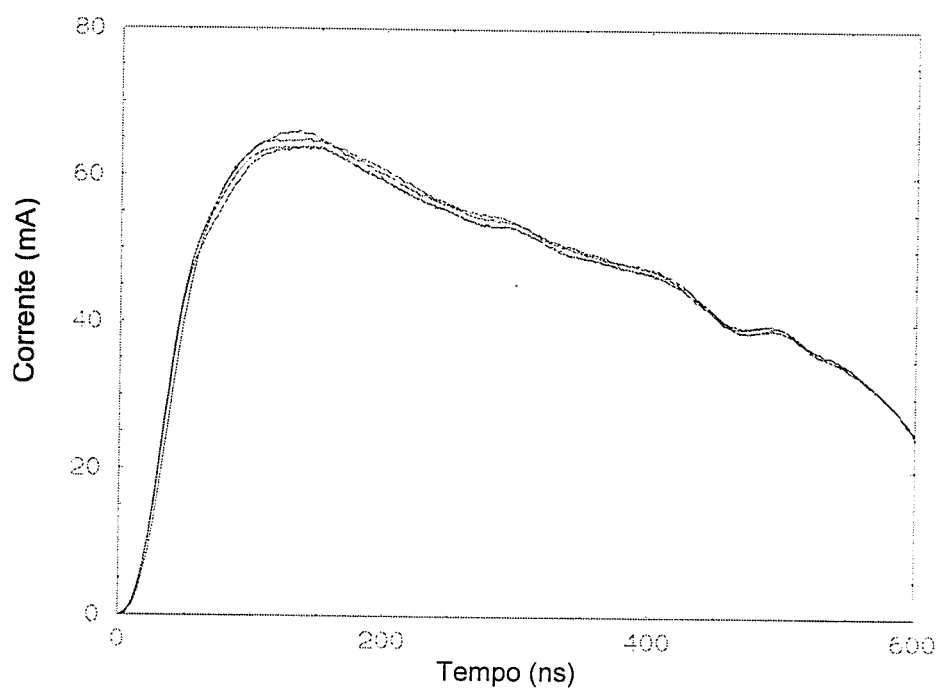


Figura 75: Corrente aplicada x tempo

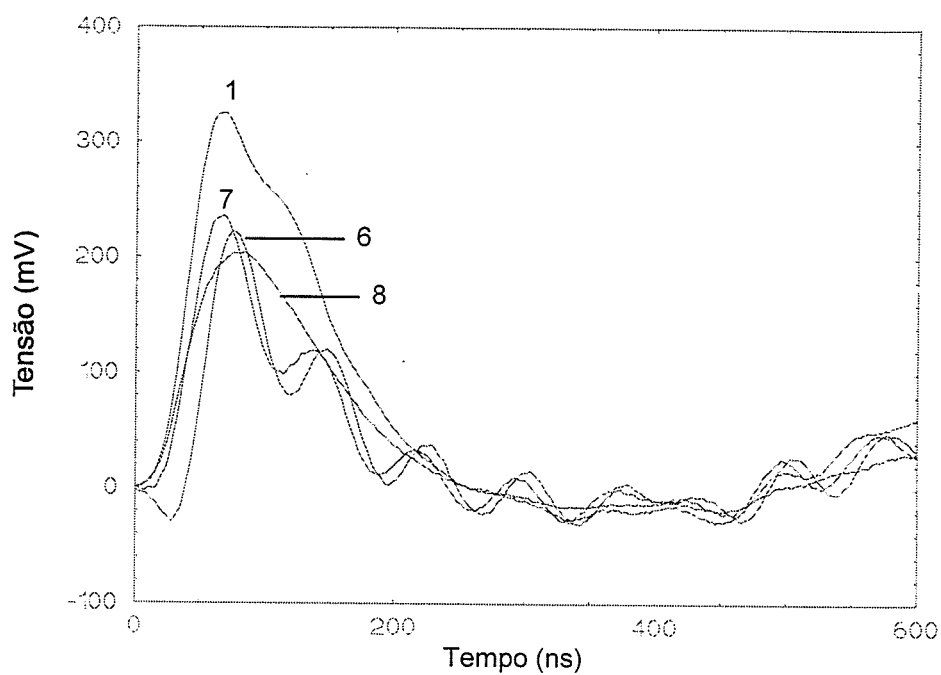


Figura 76: Tensão induzida em loop aterrado por resistor

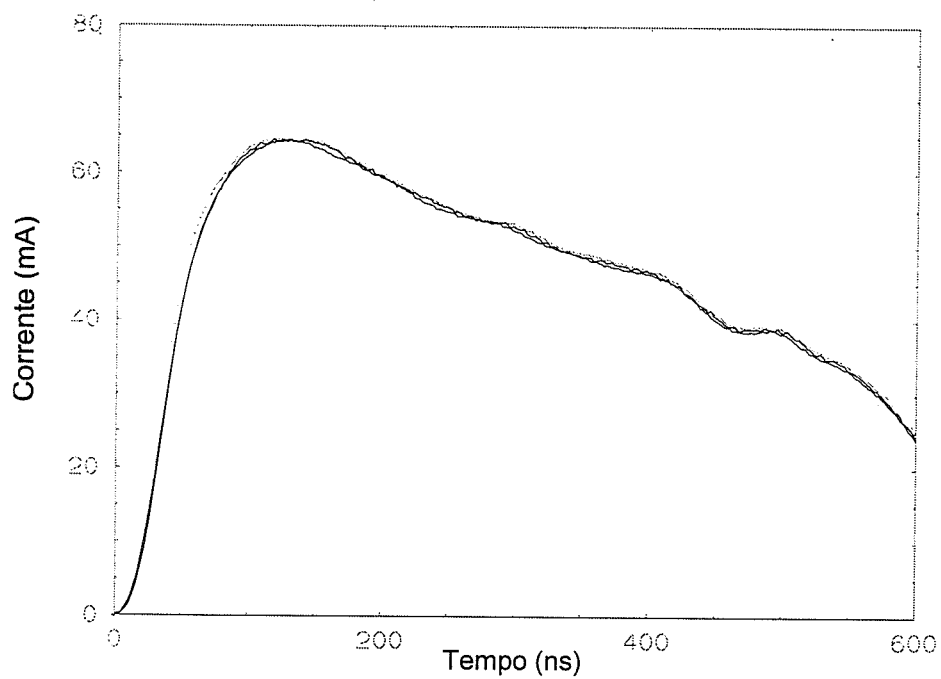


Figura 77: Corrente aplicada x tempo

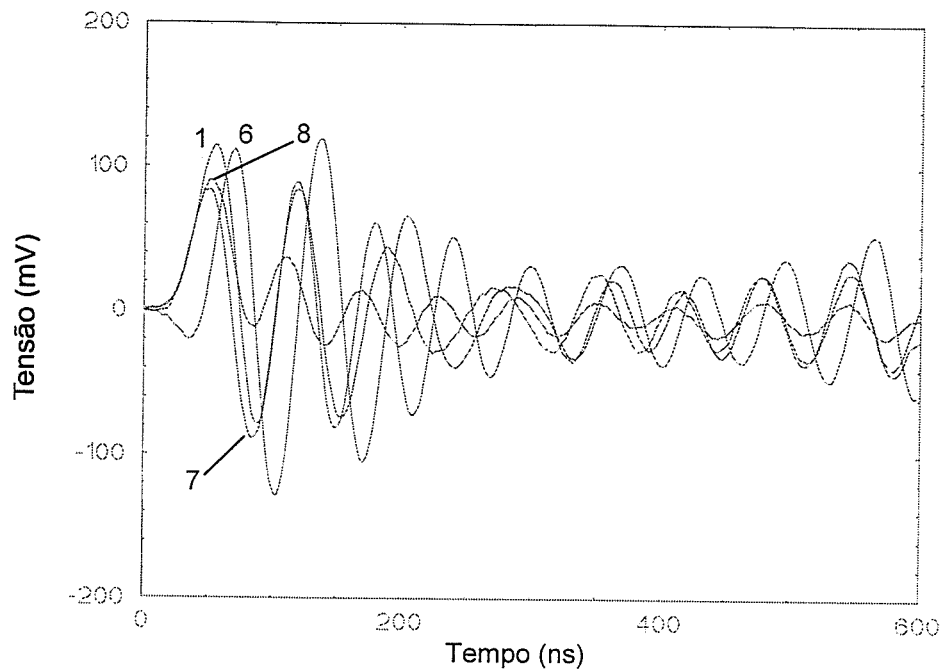


Figura 78: Tensão induzida em loop diretamente aterrado

6.3.3 – Considerações Finais

Analisando os gráficos apresentados anteriormente constata-se que um aumento no número de condutores do SPDA (condutores de descida, horizontais e/ou superiores) resulta em uma redução dos campos eletromagnéticos, melhorando o nível de blindagem da edificação, resultando em um decréscimo significativo nos valores de tensão induzida.

Além disso, através desse estudo, podemos constatar a potencialidade da ferramenta desenvolvida, sendo este apenas um exemplo das muitas situações que podem ser implementadas no laboratório analógico desenvolvido.

6.4 Análise da Variação do Ponto de Incidência da Descarga no Prédio

Objetivando tornar este estudo mais genérico, foi realizada uma análise da influência da variação do ponto de incidência da descarga direta no prédio nas tensões induzidas nos dois tipos de “loops” já apresentados nos itens

anteriores. Sendo assim, o canal de descarga foi conectado na parte superior do prédio, localizando-se aproximadamente no meio do condutor superior que contorna o SPDA (figura 79). O gerador foi conectado entre a base do canal e o prédio. A posição dos “loops” se manteve a mesma mas, como houve a variação da posição do canal, resultou em uma distância do “loop” ao canal de 76 cm e de 38 cm a distância do ponto de incidência da descarga ao início da linha.

Os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos que se seguem (figuras 80, 81, 82 e 83).

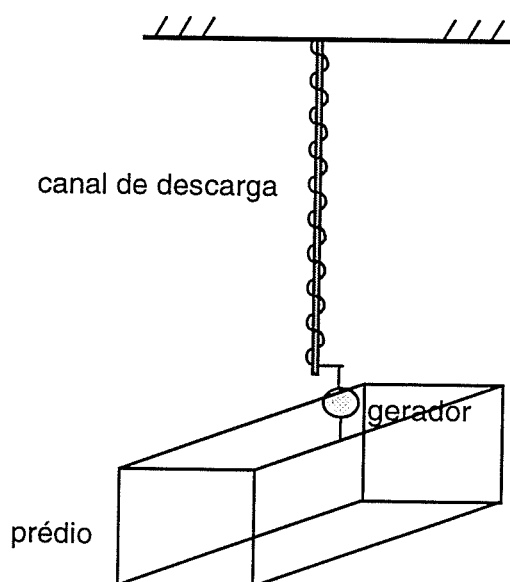


Figura 79: Descarga direta no prédio – variação do ponto de incidência da descarga

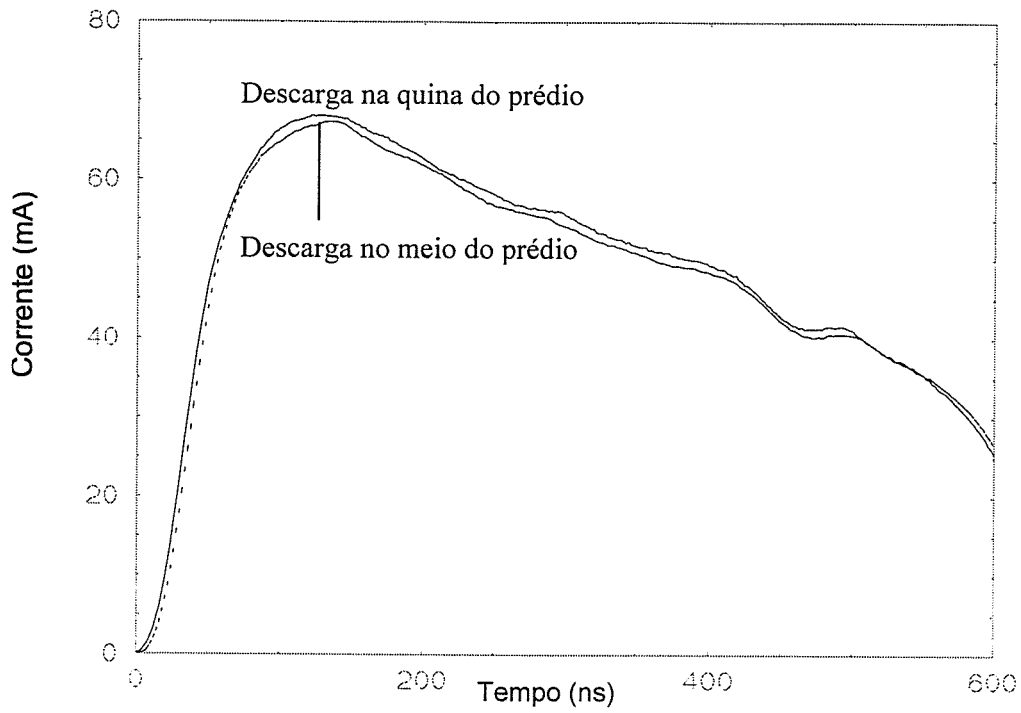


Figura 80: Corrente aplicada x tempo

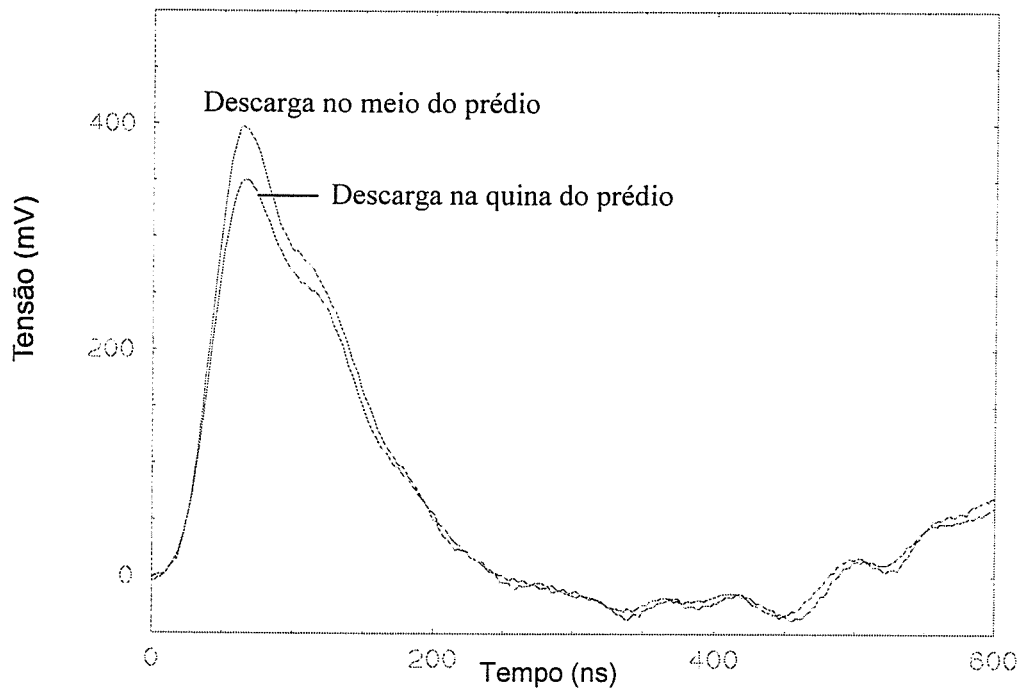


Figura 81: Tensão induzida em loop aterrado por resistor

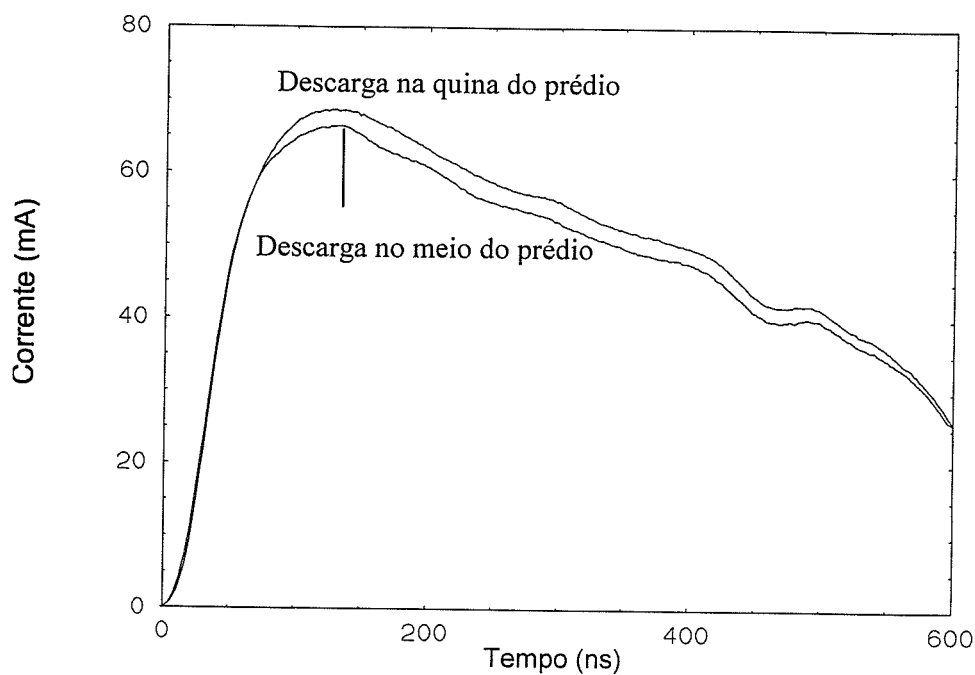


Figura 82: Corrente aplicada x tempo

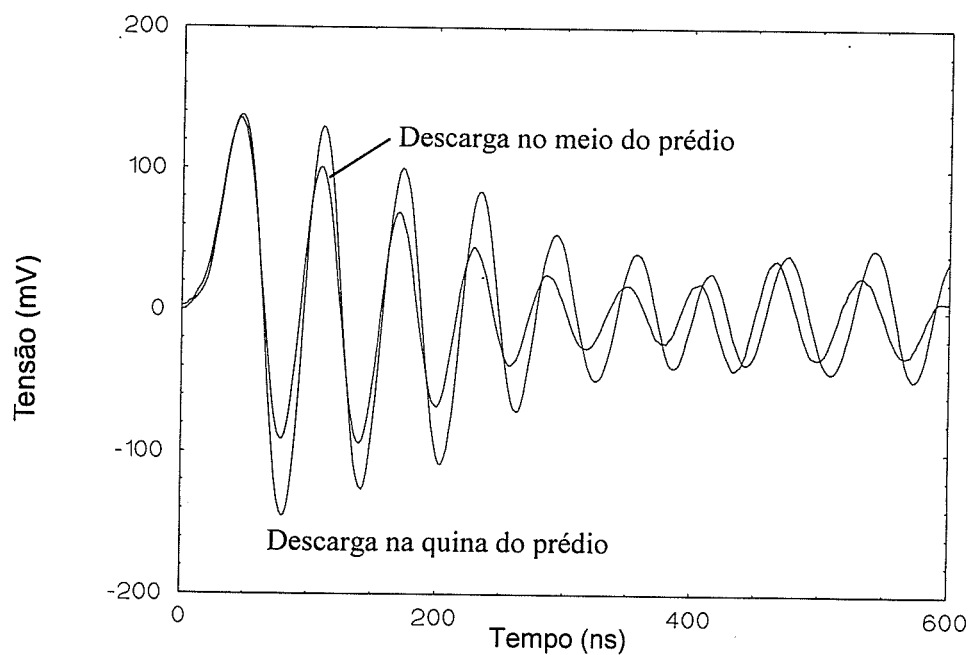


Figura 83: Tensão induzida em loop diretamente aterrado

Analisando os resultados obtidos, podemos constatar que neste caso específico a mudança do ponto de incidência da descarga atmosférica no SPDA praticamente não influenciou na tensão induzida nos "loops".

6.5 Antena para Simular uma Descarga Atmosférica em Prédios

Como já dito anteriormente, testar um prédio real é uma tendência no mundo todo, e, de acordo com os estudos apresentados em itens anteriores, pode-se constatar a importância do canal de descarga na representação de uma descarga atmosférica real. Porém, devido às elevadas dimensões do canal necessárias para um teste real, torna-se difícil a sua utilização, sendo necessário o desenvolvimento de um arranjo mais compacto capaz de representar o canal de descarga e que tenha a sua implementação viável em um caso real.

Sendo assim, baseado nos estudos realizados no modelo reduzido menor, implementado no laboratório de compatibilidade eletromagnética, cujos resultados estão apresentados no capítulo 5, construiu-se uma antena para simular uma descarga atmosférica direta em um prédio. Desta forma, em condições distintas das anteriores, como tamanho do laboratório, proximidade de paredes e objetos, modelagem do prédio, do canal de descarga, do plano de terra e do sensor para realizar as medições, fez-se a implementação de uma nova antena a fim de confirmar os resultados anteriormente obtidos.

A antena formada por um conjunto de arranjos de resistores distribuídos é composta por quatro partes, as quais são ligadas em paralelo de forma a se obter uma resistência equivalente de valor próximo à impedância do canal utilizado nas medições, o qual é a nossa referência. Sendo assim, o conjunto de arranjos de resistores é composto por:

- duas partes de 3,80 m possuindo cada uma 180 resistores de 56Ω , os quais foram soldados para garantir um bom contato;
- duas partes de 2,80 m possuindo cada uma 123 resistores de 82Ω , os quais foram soldados, totalizando cada parte 10086Ω .

O conjunto de arranjos foi colocado a uma altura de 10 cm acima do SPDA, estando a uma distância de 40 cm deste, o que equivale a uma distância de 8 m num caso real, e a uma altura de 2 m (fator de escala de

1/20). A posição dos arranjos em relação ao SPDA, ou seja, se eles estão paralelos aos condutores deste ou transversais também deve ser observada, sendo que neste caso optou-se pela configuração de arranjos transversais (figura 84). Finalmente deve-se ressaltar que os resistores foram distribuídos até a aproximadamente 85 cm do plano de alumínio, sendo depois conectado uma cordoalha que termina o percurso até o plano, onde são diretamente aterradas.

Objetivando validar a antena proposta, três situações foram implementadas. Inicialmente fez-se a medição da corrente aplicada e da tensão induzida nos dois tipos de "loops" usando-se o canal de descarga de 12 m de comprimento e velocidade de propagação de $34 \text{ m}/\mu\text{s}$, o qual foi conectado no meio do prédio. A posição do "loop" se manteve a mesma das situações já analisadas (figura 85).

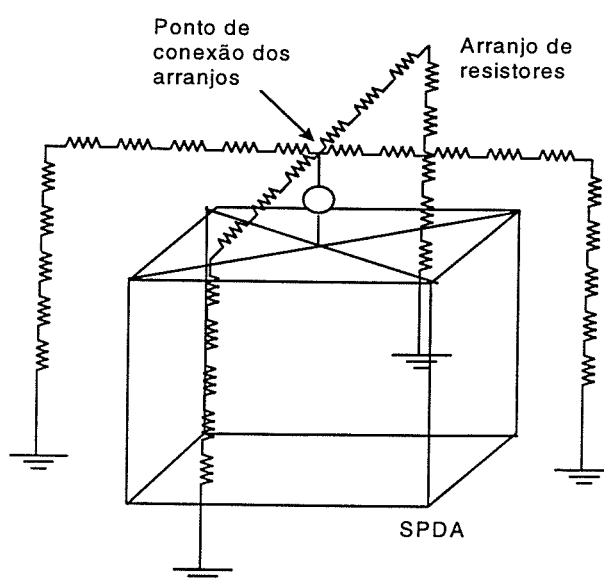


Figura 84: Modelo com 4 arranjos de resistores envolventes.

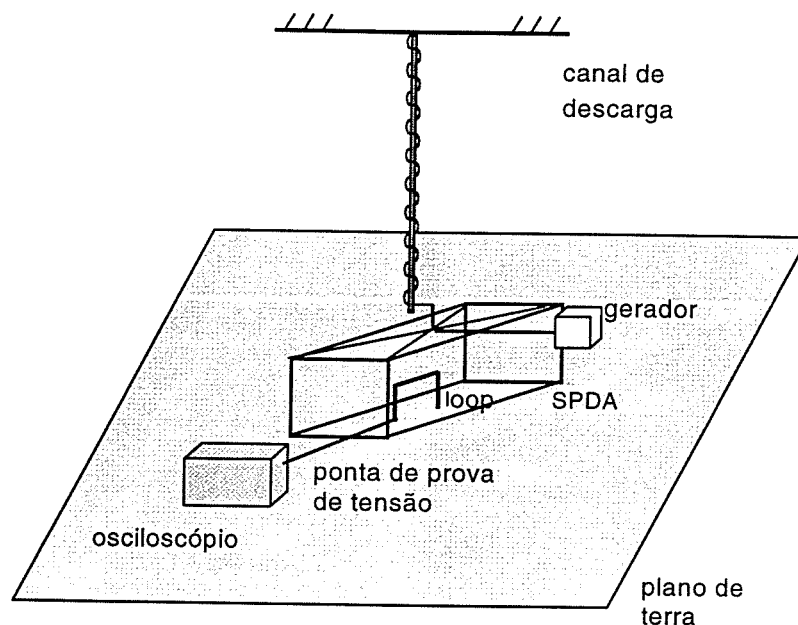


Figura 85: Disposição das partes do modelo – situação 1

Em seguida, desconectou-se o canal de descarga e em seu lugar foi conectado o conjunto de arranjos de resistores, sendo mantidas as mesmas posições do “loop”. Uma vez realizadas as medições de corrente e tensão induzida, fez-se a implementação da última situação analisada, sendo o conjunto de arranjo de resistores desconectado e em seu lugar, na mesma posição, foi conectado um arranjo de quatro condutores circundando o prédio, igualmente espaçados e diretamente aterrados ao plano de alumínio. Para obtermos um valor próximo ao valor da corrente medida quando da utilização do canal de descargas, foi conectado um resistor de valor igual a 2350Ω entre o gerador de ondas e o ponto de conexão dos 4 condutores (figura 86).

Os resultados obtidos utilizando o canal de descargas (fig. 85), o arranjo de condutores (fig. 86) e o conjunto de arranjo de resistores (fig. 84) estão apresentados a seguir (figuras 87, 88, 89 e 90).

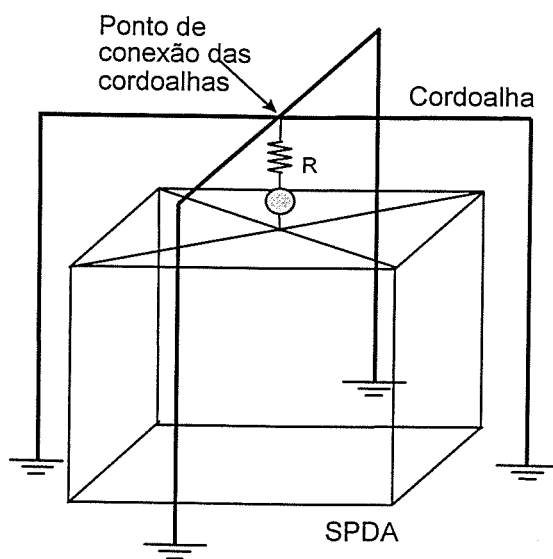


Figura 86: Modelo com resistor concentrado

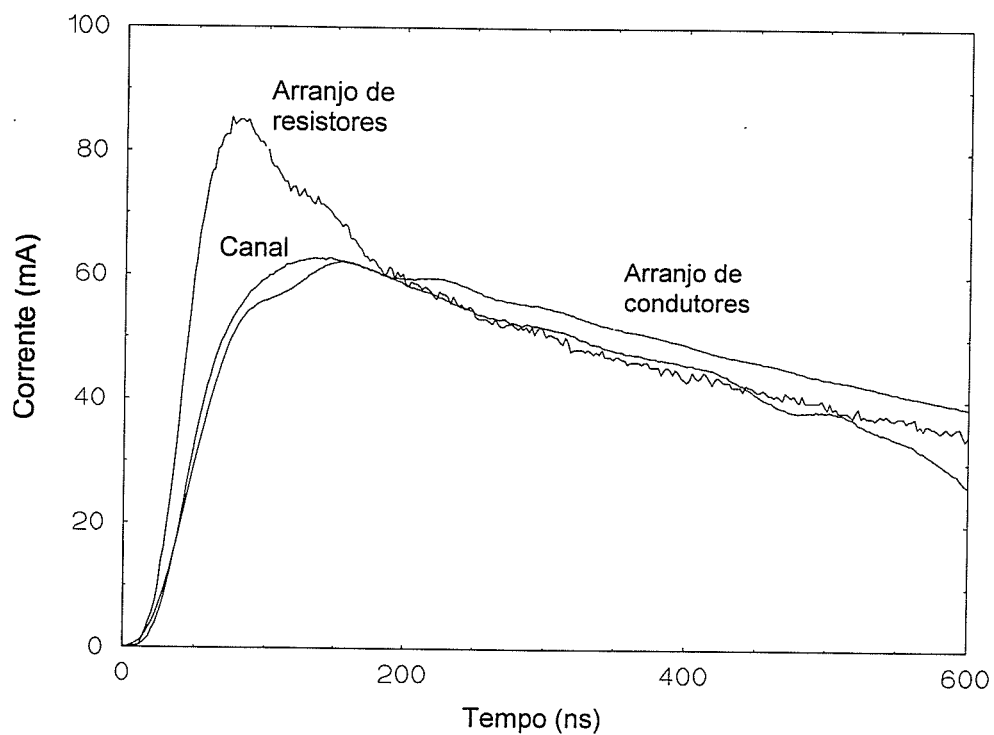


Figura 87: Corrente aplicada x tempo

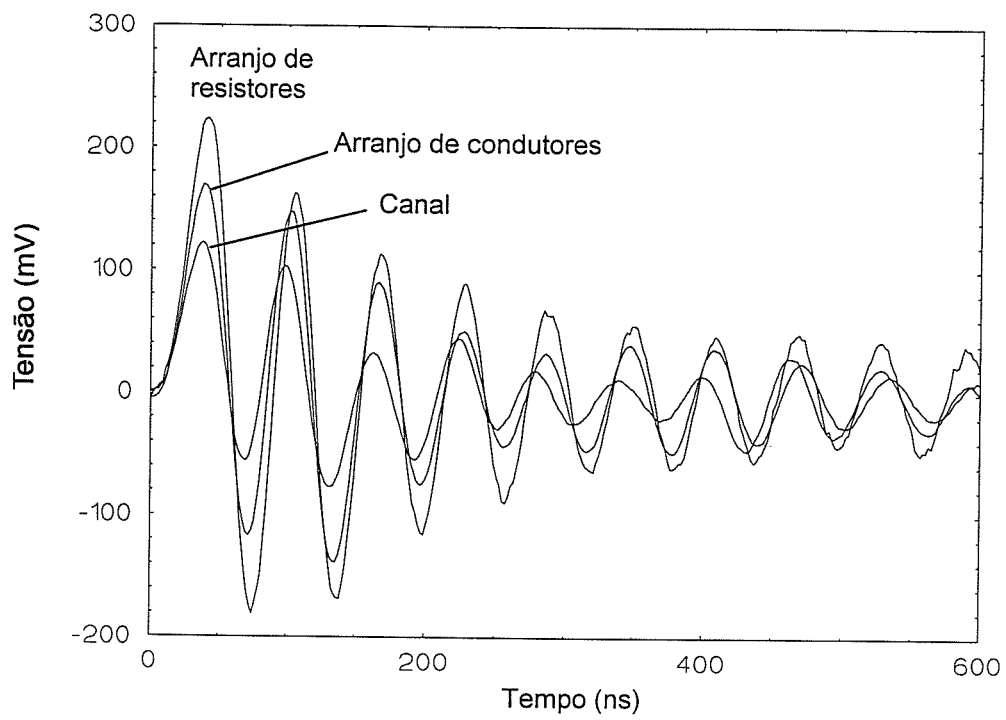


Figura 88: Tensão induzida em loop diretamente aterrado

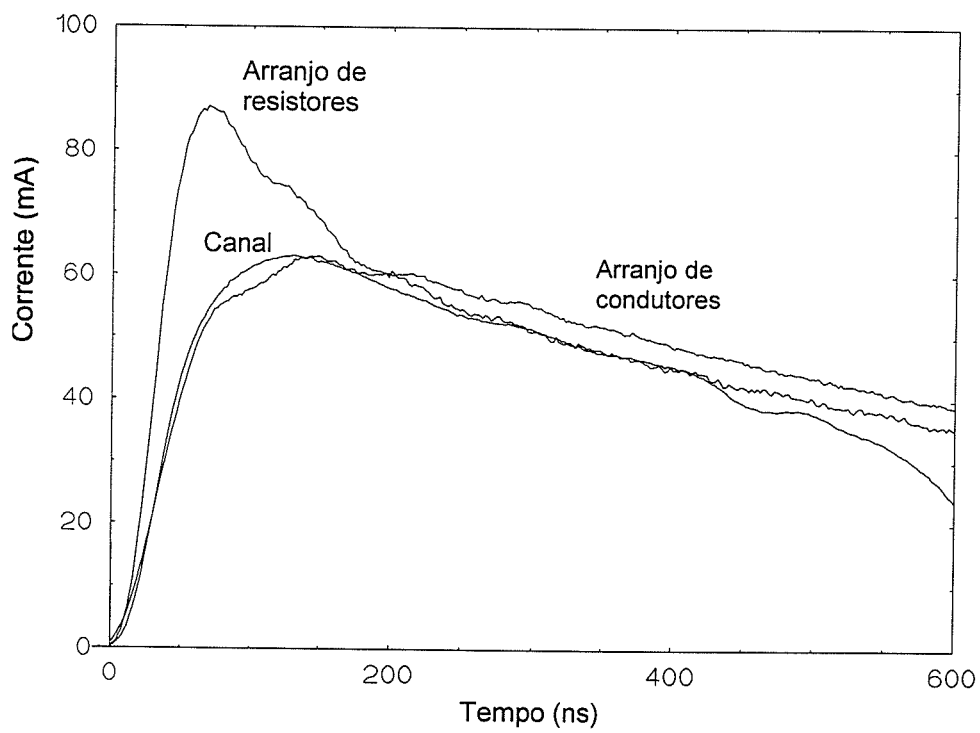


Figura 89: Corrente aplicada x tempo

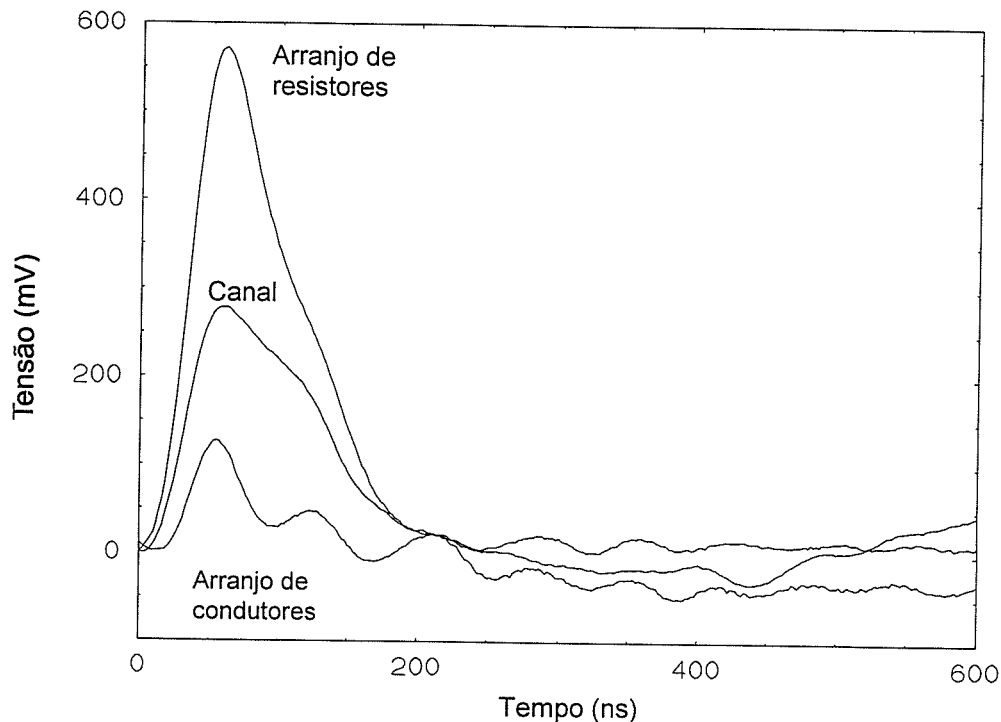


Figura 90: Tensão induzida em loop aterrado por resistor

Como podemos observar, a corrente aplicada quando da utilização do arranjo de resistores possui amplitude maior e tempo de frente menor. Entretanto, não nos preocupamos em ajustá-la, sendo que isto poderia ser feito ou acrescentando-se mais resistores no arranjo para obtermos uma resistência equivalente maior e, conseqüentemente, uma corrente menor, ou variando a distância dos condutores do arranjo ao prédio. Mesmo assim, levando-se em conta a diferença entre as correntes, pode-se fazer uma análise dos resultados obtidos.

Quando da avaliação da tensão induzida nos dois tipos de "loop" utilizados, podemos observar que para o "loop" diretamente aterrado a manutenção da corrente nos condutores de descida do SPDA é suficiente para reproduzir os efeitos do canal de descarga utilizado. Já no "loop" aterrado por resistor isto não ocorre, o que pode ser observado comparando as curvas do canal e do arranjo de condutores, ou seja, mantendo-se a mesma corrente aplicada, o valor de tensão medido quando da utilização do canal (278 mV) é mais que o dobro do valor obtido com o arranjo de

condutores (110 mV). Isto ocorre pois, como será visto a seguir em “análise de resultados”, quando da utilização do “loop” diretamente aterrado a tensão induzida é devido apenas ao campo magnético, enquanto no “loop” aterrado com resistor ela é fruto tanto do campo elétrico quanto do campo magnético.

6.6 *Análise de Resultados*

As simulações computacionais apresentadas neste trabalho foram feitas utilizando-se um programa computacional baseado na teoria de Rusck, a qual é uma das melhores ferramentas disponíveis para se calcular tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas aéreas.

Apesar de desenvolvida para linhas aéreas, muitas das conclusões da teoria podem ser utilizadas para explicar os resultados obtidos neste trabalho.

Rusck considera um solo condutor perfeito, um canal de descarga retilíneo e uma linha aérea de altura “h” acima do solo. A partir destas considerações ele desenvolveu uma expressão analítica para a tensão induzida na linha se a mesma for infinita e sem descontinuidades. Como mostrado em [25] é possível, a partir da tensão induzida em uma linha infinita, calcular a tensão induzida considerando-se as descontinuidades e o comprimento finito da linha.

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

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V_i - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (22)$$

onde:

E - campo elétrico no solo;

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

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

É importante observar que a primeira parcela do campo elétrico (∇V_i) é conservativa e a segunda parcela é não conservativa ($\partial A/\partial t$). Podemos expressar o campo elétrico como:

$$\vec{E} = \vec{E}_C + \vec{E}_V \quad (23)$$

$$\vec{E}_C = -\vec{\nabla}V_i \Rightarrow \text{campo conservativo;} \quad (24)$$

$$\vec{E}_V = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \Rightarrow \text{campo não conservativo.} \quad (25)$$

Rusck demonstra em sua tese que a parcela de campo conservativo irá originar ondas viajantes na linha aérea, e que a tensão induzida devido a esta parcela do campo pode ser calculada a partir da aplicação de fontes de corrente distribuídas ao longo da linha, conforme figura 91.

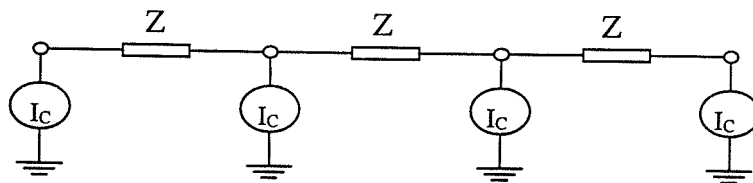
Rusck deduziu expressões analíticas para as fontes de corrente e para a tensão induzida em um ponto "x" da linha, devido ao campo conservativo.

A tensão induzida total no ponto "x" será a tensão induzida originada em E_C (V_C) adicionada à tensão originada na parcela de campo não conservativa (E_V). Conforme Rusck, a parcela originada em E_V será:

$$V_V = -h \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \quad (26)$$

A tensão induzida total será:

$$V = V_C + V_V = V_C + (-h \cdot \partial A/\partial t) \quad (27)$$



I_c - Fonte de corrente que representa a componente de campo conservativo.

Z - Impedância de surto da linha.

Figura 91: Fontes de corrente que representam o campo conservativo.

Em sua tese, Rusck prova que o valor da tensão induzida depende fortemente de V_C , parcela originada no campo conservativo, sendo que se desprezarmos a parcela devido ao campo não conservativo os erros serão inferiores a 20%. A figura 92 mostra uma simulação de tensão induzida considerando ou não o campo não conservativo, realizada em um programa computacional desenvolvido por Oliveira [43], baseado na teoria de Rusck, onde é possível calcular separadamente as tensões induzidas devido às duas parcelas de campo, e que utiliza a plataforma do PSPICE. As simulações foram feitas para uma linha de um fio, com as seguintes características:

- altura em relação ao solo - 10m;
- diâmetro do condutor - 10 mm;
- comprimento - 1500 m;
- terminações casadas.

Os parâmetros da descarga atmosférica são:

- valor de pico da corrente - 50 kA;
- forma de onda da corrente - degrau;
- distância da descarga à linha - 150 m;
- localização da descarga ao longo da linha - no ponto central;
- velocidade de propagação da corrente - 30 m/ μ s.

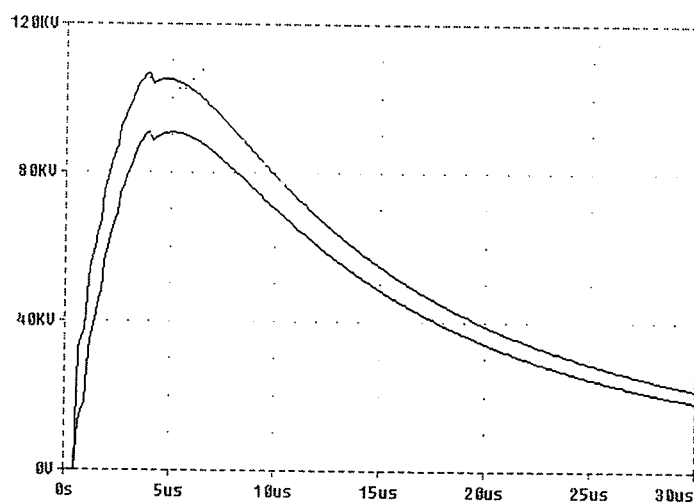


Figura 92: Influência do campo não conservativo: curva superior - tensão induzida total; curva inferior - tensão induzida pela componente conservativa

É importante lembrar que, enquanto os valores das tensões da ponta do canal de descarga para a terra (V_i) são da ordem de milhões de volts, as correntes da descarga são da ordem de milhares de ampères. Rusck calcula em seu trabalho a relação entre os valores de E_c e E_v e propõe a seguinte expressão:

$$\frac{E_c}{E_v} = \left[\frac{v}{v_0} \right]^2 \quad (28)$$

onde:

v_0 - velocidade da luz;

v - velocidade de propagação da corrente no canal.

A literatura considera que:

$$0,1 v_0 < v < 0,5 v_0$$

O que leva a:

$$E_v/E_c = 0,01 \text{ a } 0,25 \quad (29)$$

Ou seja, o valor do campo conservativo é muito maior que o valor do campo não conservativo.

As afirmações anteriores mostram que se formos calcular a tensão induzida em um linha aérea considerando apenas a corrente do canal de descarga os erros serão muito grandes.

A situação estudada neste trabalho é um pouco diferente da estudada por Rusck. No presente caso a corrente de descarga se distribui pelos condutores do SPDA e envolve os fios (ou "loops") onde se mede a tensão induzida. Apesar destas diferenças, as conclusões da teoria de Rusck ainda são válidas.

Para provarmos a afirmação anterior precisamos, inicialmente, analisar os dois tipos de "loops" que foram utilizados nas medições. A figura 93 mostra os "loops" utilizados, um aterrado diretamente e o outro aterrado via resistor de 470Ω .

Mostraremos que a tensão induzida no "loop" tipo 2 (aterrado diretamente) é devido basicamente à parcela de campo não conservativo

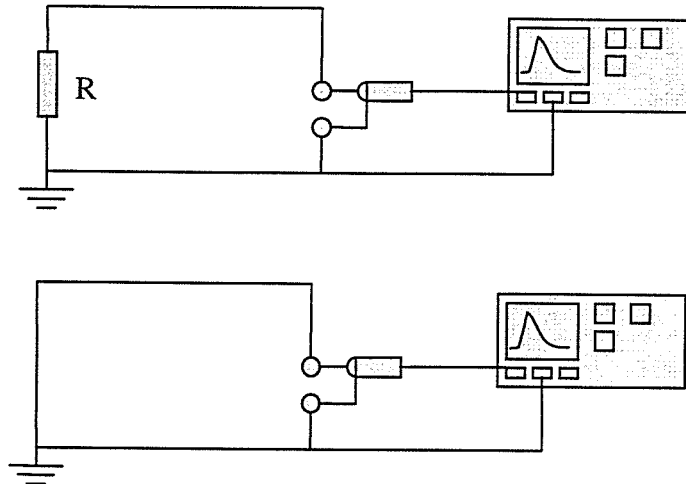


Figura 93: “Loops” utilizados nas medições

(E_V) e que no “loop” tipo 1 a tensão induzida é devido às duas parcelas de campo ($E_V + E_C$).

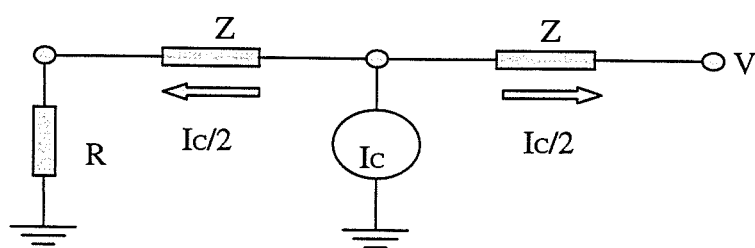
Em outras palavras, a tensão induzida no “loop” tipo 2 é devido ao campo magnético gerado pela corrente de descarga e no “loop” tipo 1 a tensão induzida é originada no campo magnético gerado pela corrente e no campo elétrico originado nas cargas depositadas no canal.

Podemos modelar o circuito do “loop” como uma linha de transmissão de impedância de surto igual a “Z”. Como dito anteriormente, a parcela de campo conservativo que incide numa linha pode ser modelada como fontes de corrente aplicadas na linha. Para simplificar a dedução utilizaremos uma linha e apenas uma fonte de corrente, figura 94.

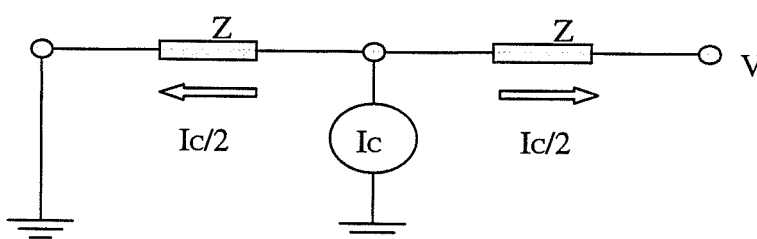
No caso 1, “loop” aterrado via resistor, a fonte de corrente irá injetar em cada trecho da linha uma corrente de valor “ $I/2$ ”, que irá criar na linha uma tensão de valor “ $(I/2) \cdot Z$ ”; na extremidade direita, se “ $R = Z$ ”, não haverá reflexão de onda, e na extremidade esquerda, a tensão irá dobrar de modo que:

$$V_c = 2 \cdot (I/2) \cdot Z = Z \cdot I \quad (30)$$

No caso do “loop” utilizado nas medições o valor da resistência era de $R=470 \Omega$ que é igual ao valor da impedância de surto da linha.



Caso 1 - "Loop" aterrado via resistor



Caso 2 - "Loop" aterrado diretamente

Figura 94: Tensões induzidas nos "loops" devido ao campo conservativo

No caso 2, "loop" aterrado diretamente, os fatores de reflexão para a tensão serão iguais a "1" no lado direito da linha e "-1" no lado esquerdo, de modo que a tensão "V" será:

$$V_c = 2.V_1.u(t-t_0) - 2.V_1.u(t-3t_0) - 2.V_1.u(t-5t_0) + 2.V_1.u(t-7t_0) + \dots \quad (31)$$

onde:

$$V_1 = (I/2).Z;$$

" $2.t_0$ " é o valor do tempo de trânsito na linha;

$$u(t-t_0) = 0 \text{ se } t < t_0;$$

$$u(t-t_0) = 1 \text{ se } t \geq t_0.$$

Nas medições realizadas, os tempos de frente das tensões induzidas no "loop" foram da ordem de 100 ns, o comprimento do "loop" era igual a 1 m, ou seja, tempo de trânsito igual a 3 ns. Como o tempo de trânsito é muito menor que o tempo de frente da tensão induzida, o mesmo pode ser desprezado e a tensão na extremidade aberta da linha será: $V_c = 0$.

É importante lembrar que, conforme a teoria de Rusck, a tensão total induzida na linha será a soma da tensão originada na parcela de campo

conservativo (V_c) adicionada à tensão originada na parcela de campo não conservativo. Conforme Rusck, a parcela originada em E_v é:

$$V_v = -h \cdot \frac{\partial A}{\partial t} \quad (32)$$

Logo, a tensão total induzida no "loop" aterrado via resistor será:

$$V = V_c + (-h \cdot \partial A / \partial t) \quad (33)$$

A tensão induzida total no "loop" aterrado diretamente será:

$$V = (-h \cdot \partial A / \partial t) \quad (34)$$

Podemos concluir que no caso do "loop" diretamente aterrado estamos medindo basicamente a tensão induzida devido ao campo não conservativo. Isto era de se esperar pois geralmente são utilizados "loops" fechados para a medição de campos magnéticos.

Os "loops" utilizados neste trabalho permitem a medição das tensões induzidas devido aos dois tipos de campo e além disto eles representam bem os fios ou cabos instalados dentro de um prédio. Cabos tipo o neutro da rede elétrica que são aterrados na entrada do prédio, são representados pelo "loop" diretamente aterrado. Cabos não aterrados, tipo cabos de comunicação e cabos fase da rede elétrica, são bem representados pelo "loop" aterrado via resistor.

Podemos notar nas medições apresentadas neste capítulo, figuras 88 e 90, que nas medições efetuadas como o "loop" diretamente aterrado a influência da presença do canal de descarga é pequena. Isto significa que para as tensões induzidas originadas no campo magnético (corrente de descarga) a manutenção dos valores de corrente no SPDA, com ou sem a presença do canal, é suficiente para simular os efeitos de uma descarga no prédio. Já para o "loop" aterrado via resistor a influência do canal de descarga é grande.

A conclusão a que chegamos é que as medições realizadas estão de acordo com a teoria de Rusck, ou seja, para a medição ou cálculo das tensões induzidas em fios ou cabos dentro de um prédio a presença do canal de descarga deve ser considerada.

A antena proposta para se testar prédios reais gera os dois tipos de campo, conservativo e não conservativo.

Como a antena tem uma resistência elevada (resistência equivalente igual à impedância de surto do canal) a mesma impõe ao SPDA correntes iguais às que a descarga real imporá.

A tensão na ponta do canal real, que é a responsável pela geração da parcela de campo conservativa é igual a :

$$V_i = ZI \quad (35)$$

Na antena o potencial será:

$$V_i = RI \quad (R = Z) \quad (36)$$

Ou seja, a antena cria potenciais similares aos criados pela descarga real, figura 95.

Os valores medidos, mostrados no capítulo 5 (modelo no laboratório de EMC), onde se mediu apenas o campo elétrico, e os resultados mostrados no presente capítulo (item 6.5) onde se mediu as tensões induzidas nos dois tipos de "loop", demonstram que a antena proposta gera campos e tensões induzidas muito semelhantes às geradas pelo canal de descarga.

Como os valores das tensões induzidas variam linearmente com o valor da corrente de descarga é possível se pensar na possibilidade de testar um prédio real, utilizando a antena proposta, com baixos valores de corrente e a partir dos resultados obtidos, através de simples extrapolação, estimar os valores que seriam gerados no caso de uma descarga atmosférica real.

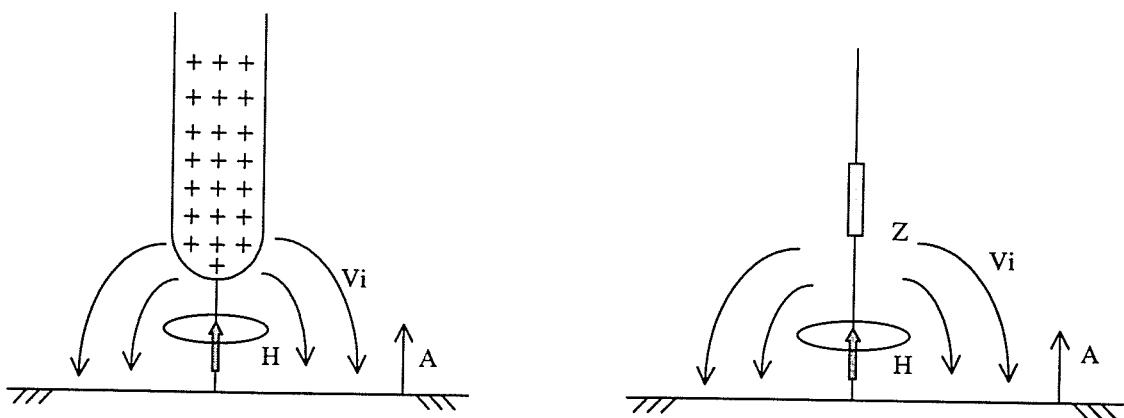


Figura 95: Campos gerados por uma descarga atmosférica

7 Conclusões

Pelo que foi apresentado pode-se concluir que o objetivo básico do trabalho, ou seja, o estabelecimento de um modelo reduzido para estudo da interação de descargas atmosféricas diretas e o SPDA foi satisfatoriamente atingido, resultando no desenvolvimento de um laboratório onde se pode estudar e analisar várias situações envolvendo descargas atmosféricas e prédios.

Com relação às medições realizadas pode-se afirmar que as mesmas foram de boa qualidade, isto é, baixa interferência e boa resolução, o que vem a confirmar a viabilidade da utilização do modelo reduzido desenvolvido.

De acordo com os resultados obtidos no anexo 1 - canais de perdas elevadas, parece-nos que este tipo de modelagem pode ser utilizada para representar o canal de descargas atmosféricas, sendo que a análise realizada neste trabalho é apenas um passo inicial para um estudo completo dessa modelagem.

Como exemplo de utilização do laboratório desenvolvido, foi realizado um estudo onde se analisa a influência de vários tipos de SPDA na tensão induzida em "loops" localizados no interior da edificação. Com esse estudo constatou-se que um aumento no número de condutores do SPDA (condutores de descida, horizontais ou superiores), melhora o nível de blindagem da edificação, resultando em um decréscimo significativo nos valores de tensão induzida, tanto para o "loop" diretamente aterrado, quanto para o aterrado com resistor.

Foram apresentadas dois "sensores" para medição de campo elétrico e magnético, sendo um constituído por um "loop" aterrado diretamente ("loop" tipo 2) e o outro por um "loop" aterrado via resistor de 470Ω ("loop" tipo 1).

Foi demonstrado que a tensão induzida no "loop" tipo 2 é devido basicamente à parcela de campo não conservativo (E_V) e que no "loop" tipo 1 a tensão induzida é devido às duas parcelas de campo ($E_V + E_C$). Em outras palavras, a tensão induzida no "loop" tipo 2 é devido ao campo magnético gerado pela corrente de descarga e no "loop" tipo 1 a tensão induzida é originada no campo magnético gerado pela corrente e no campo elétrico originado nas cargas depositadas no canal.

Sendo assim, pode-se concluir que com os "loops" apresentados é possível realizar medições de tensão induzida devido tanto ao campo conservativo quanto ao campo não conservativo. Além disto os "loops" utilizados representam bem os fios instalados no interior de um prédio real. Cabos tipo o neutro da rede elétrica que são aterrados na entrada do prédio, estão representados pelo "loop" diretamente aterrado. Cabos não aterrados, como cabos de comunicação e cabos fase da rede elétrica, estão representados pelo "loop" aterrado com resistor.

Quando da avaliação da tensão induzida nos dois tipos de "loop" utilizados, podemos observar que para o "loop" diretamente aterrado a influência da presença do canal de descarga é pequena, o que significa que a manutenção dos valores de corrente no SPDA, com ou sem a presença do canal, é suficiente para simular os efeitos de uma descarga no prédio. Já no "loop" aterrado por resistor isto não ocorre, ou seja, a influência do canal de descarga é grande. A conclusão a que chegamos é que as medições realizadas estão de acordo com a teoria de Rusck, ou seja, para a medição ou cálculo das tensões induzidas em fios ou cabos dentro de um prédio a presença do canal de descarga deve ser considerada.

Os estudos realizados indicam que é possível simular uma descarga atmosférica em um prédio a partir da energização do sistema de pára-raios por uma antena ou arranjo de condutores alimentados por uma fonte de corrente impulsiva. Baseado nessa afirmação foi proposta uma metodologia que utiliza um circuito constituído de uma cadeia de resistores ou de um "fio resistivo", a qual simula a presença do canal da descarga atmosférica. Esta representação é conseguida através de um conjunto de quatro arranjos de resistores igualmente espaçados circundando o prédio, aterrados ao plano

de terra. O valor da resistência equivalente desse conjunto de arranjos deve ser aproximadamente igual à impedância do canal de descarga, sendo também necessário observar e definir a altura, a distância e a posição que estes arranjos devem ser colocados em relação ao prédio.

Os resultados obtidos no capítulo 5 - medição apenas de campo elétrico, e os obtidos no capítulo 6 - medição de tensão induzida nos dois tipos de "loop", demonstram que a antena proposta gera campos e tensões induzidas muito semelhantes às geradas pelo canal de descarga.

Como os valores de tensão induzida variam linearmente com o valor da corrente de descarga, é possível pensar na possibilidade de se testar um prédio real utilizando a antena proposta com baixos valores de corrente. Assim, a partir dos resultados obtidos, através de simples extrapolação, poder-se-ia estimar os valores que seriam gerados no caso de uma descarga atmosférica real.

7.1 Propostas de Continuidade do Trabalho

Avaliação de configurações mais complexas do prédio, de tal forma que se possa incluir modelos dos sistemas de condutores presentes em edificações (telefone, interfone, etc.) com maior detalhe, inclusão da modelagem de pisos, paredes, janelas metálicas e tubulações de incêndio, com a realização de medições da tensão induzida em vários andares do modelo, reproduzindo com maior fidelidade um prédio real.

Análise e implementação em modelo reduzido de tamanhos de "loop" diferentes dos aqui apresentados, variando-se também a sua posição, de forma a se tentar definir locais dentro do prédio onde a tensão induzida é menor em face ao SPDA utilizado. Com isso, estes locais poderiam ser "reservados" para equipamentos mais sensíveis e/ou fundamentais para a instalação analisada.

Aperfeiçoamento e implementação do arranjo proposto neste trabalho para simular uma descarga atmosférica em um prédio real, com realização de medições da tensão induzida em pontos distintos do prédio.

Aplicação da metodologia proposta para se testar um prédio real, a fim de se avaliar o desempenho e a eficiência do sistema de proteção, frente a sobretensões impostas por descargas atmosféricas.

Adaptação da teoria de Rusck para calcular tensão induzida no interior de um prédio quando este é atingido por uma descarga atmosférica.

Anexo 1: Canais com Perdas Elevadas

1 - Introdução

Como dito no capítulo 3, os estudos em modelo reduzido realizados, para atingir uma velocidade na faixa de 10% a 50% da velocidade da luz [34], modelaram o canal como uma linha de transmissão vertical, onde aumentando-se a indutância ou a capacitância pode-se conseguir uma velocidade de propagação na faixa anteriormente citada. O que tem sido feito é o aumento da indutância, pois o aumento da capacitância implicaria em um canal de diâmetro muito grande, o que é inviável para os estudos em modelo reduzido [3]. Uma outra maneira de modelar um canal com a velocidade desejada, sem alterar a capacitância e/ou a indutância de uma linha disposta verticalmente, é através das perdas, como será mostrado nesta parte do trabalho.

Sendo assim, em momentos distintos desse trabalho, foram realizados estudos em modelo reduzido da tensão induzida em uma linha aérea por uma descarga atmosférica, utilizando dois modelos de canais com perdas distintos. Os resultados obtidos experimentalmente são comparados com simulações feitas no programa computacional para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas, desenvolvido no CPDEE por Lopes [25], baseado na teoria de Rusck [26].

O trabalho de simulação em modelo reduzido envolverá, então, a modelagem do fenômeno da descarga atmosférica (canal de descarga, onda

de corrente, velocidade de propagação, etc.), do plano de terra, e da linha aérea.

2 - Canal Modelado como LT com Fio Resistivo

Primeiramente, apresentaremos o modelo reduzido e os resultados obtidos em simulação realizada no laboratório de compatibilidade eletromagnética. As características do canal estão descritas a seguir.

→ Canal A

tamanho: 3 m

diâmetro externo: 1,5 cm

número de espiras por metro: 650 espiras/m

velocidade de propagação: 32,26 m/ μ s

material utilizado: tubo de pvc de 1,5 cm de diâmetro, no qual foi enrolado em hélice de passo justo um fio de 60 Ω /m de 0,56 mm de diâmetro.

A linha aérea foi modelada por um fio de 0,57 mm de diâmetro, estando a uma altura de 7 cm do plano de terra (fator de escala 1:100). Para sustentar a linha não se utilizou postes ou qualquer outra estrutura semelhante, mas sim fios de nylon que estavam fixados em estruturas isolantes situadas na extremidade do plano. A linha possui 1,80 m de comprimento e está casada ($R = 368 \Omega$) em uma extremidade e aberta na outra, onde foi feita a medição, estando a 36 cm do ponto de incidência da descarga, sendo que esta ocorre aproximadamente no meio da linha.

O plano de terra foi modelado por um plano de cobre de 1,26 m de largura, 2,25 m de comprimento e 0,6 mm de espessura.

Simulou-se a corrente de retorno através de uma onda de corrente de forma impulsiva, a qual foi injetada por um gerador de ondas, sendo que à medida que se propagava da terra em direção ao topo do canal, ia carregando o mesmo. O gerador de corrente utilizado no modelo reduzido fornece ondas de corrente cujos valores de tempo de frente estão na faixa de 47 ns e amplitude de aproximadamente 50 mA.

A comparação entre medição em modelo reduzido e simulação computacional está apresentada abaixo nas figuras 96 e 97.

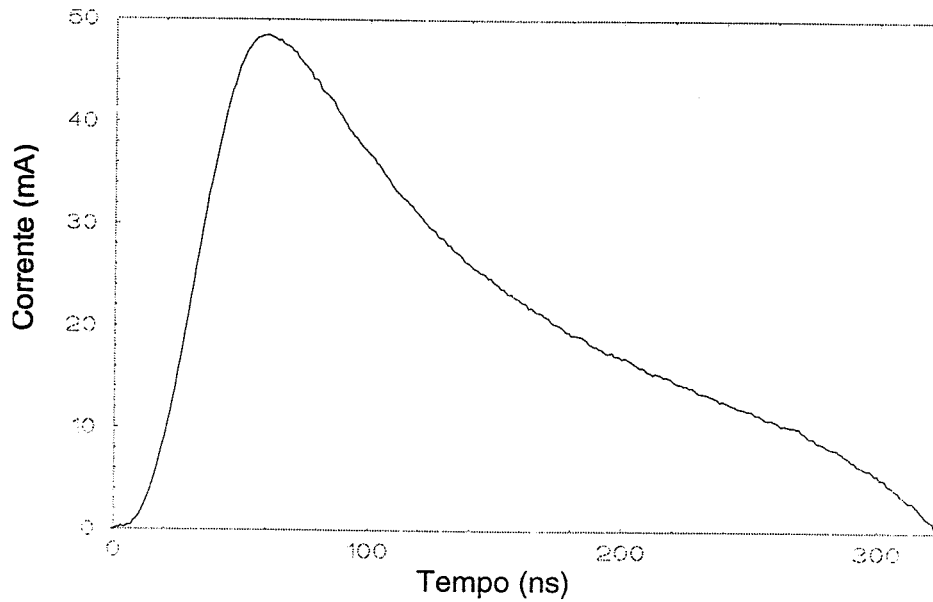


Figura 96: Corrente aplicada na base do canal x tempo

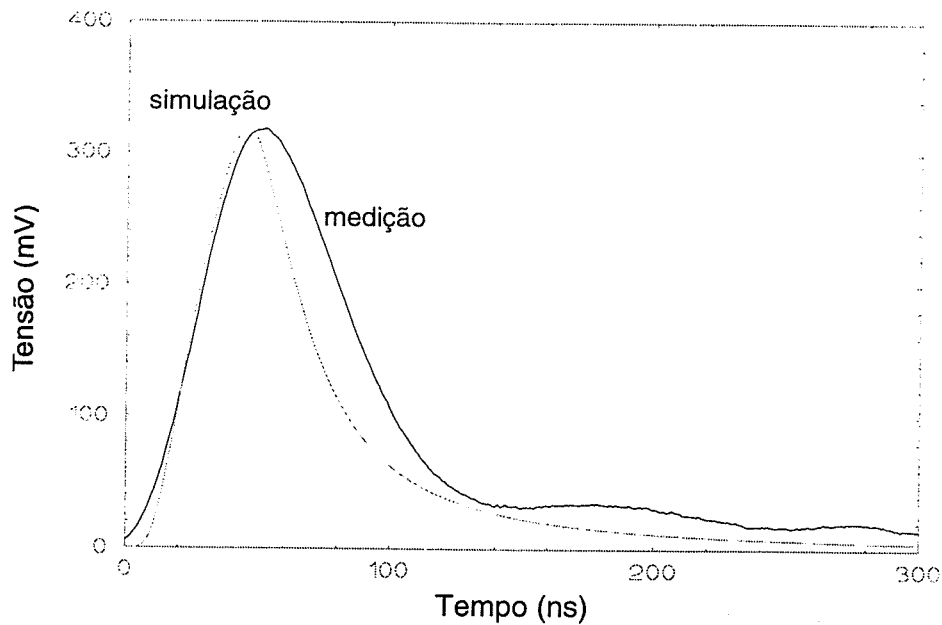


Figura 97: Tensão induzida na linha, simulação x medição

Na simulação do canal com perdas, embora não se tenha calculado a velocidade de propagação da onda de corrente no canal, utilizou-se as formulações existentes para o canal sem perdas e fez-se a comparação com os valores medidos. Deve-se ressaltar aqui, que este caso foi implementado para se ter uma idéia qualitativa do comportamento de um canal modelado com perdas, sendo apenas um passo inicial para o estudo dessa modelagem. Neste caso não há reflexão da onda de corrente na extremidade superior do canal, pois quando a corrente atinge este ponto o seu valor é zero, o que parece representar bem a realidade, uma vez que estando o topo do canal real muito distante da linha, as reflexões que ocorrem nesse ponto provavelmente não são representativas para o cálculo da tensão induzida. Os resultados foram bons.

Sendo assim, podemos concluir que esta representação do canal com perdas pode ser utilizada para a representação do canal de descargas atmosféricas, tomando o cuidado de identificarmos qual o tamanho do canal necessário para que não ocorram erros, pois o tamanho do canal a ser utilizado no modelo reduzido depende tanto do tamanho da estrutura analisada, quanto da distância entre o canal e a estrutura. Além disso, podemos concluir que apenas parte do canal real contribui para a tensão que é induzida na linha, pois caso essa afirmação não fosse verdadeira não conseguiríamos resultados tão próximos aos obtidos na simulação.

3 - Canal modelado por associação de resistores

Neste momento, apresentaremos o modelo reduzido e os resultados obtidos em simulação realizada no laboratório de extra alta tensão.

A linha aérea foi modelada utilizando-se uma representação unifilar, através de um fio de comprimento igual a 2,5 m, estando localizada a 96 cm do canal e sendo de 74 cm a distância do início da linha ao canal (fig. 98). A extremidade onde foi feita a medição estava aberta e a outra extremidade

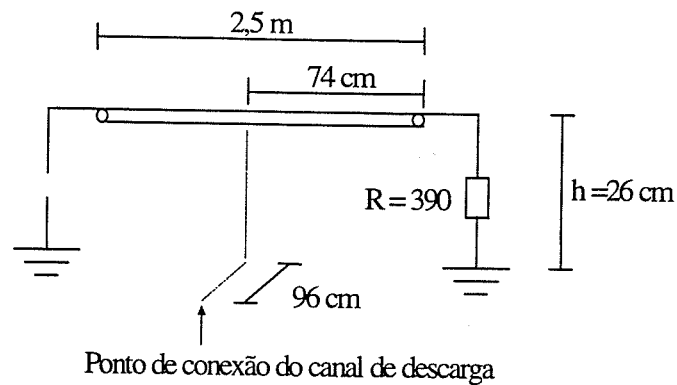


Figura 98: Diagrama esquemático da montagem em modelo reduzido

casada através de um resistor de valor igual a 390Ω . Considerando como valor representativo para a altura de uma linha de distribuição 8 m, modelou-se a linha do modelo a uma altura de 26 cm do plano (fator de escala utilizado 1:30).

Para modelar o plano terra utilizou-se chapas finas de alumínio que em sua totalidade resultaram em um plano de aproximadamente 4,5 m de largura, 5,5 m de comprimento e 4,76 mm de espessura.

Simulou-se a corrente de retorno através de uma onda de corrente de forma impulsiva que, aplicada à base da antena, produz uma onda de corrente na faixa de 60 mA, com tempo de frente de aproximadamente 60 ns.

O primeiro canal utilizado foi o canal A, apresentado no início do capítulo 6, o qual foi modelado como uma linha de transmissão retilínea disposta verticalmente em relação ao plano terra, de comprimento igual a 12 m e velocidade de propagação de $34 \text{ m}/\mu\text{s}$.

Já o segundo canal (canal C) foi modelado como um canal de perdas elevadas, sendo composto por resistores de filme metálico de 22Ω cada, os quais foram soldados uns aos outros, dando origem a um canal de 5 m de comprimento, sendo a resistência total obtida de 4950Ω (figura 99). Quando aplicamos o fator de escala obtém-se um canal de $33 \Omega/\text{m}$ e 150 m de comprimento.

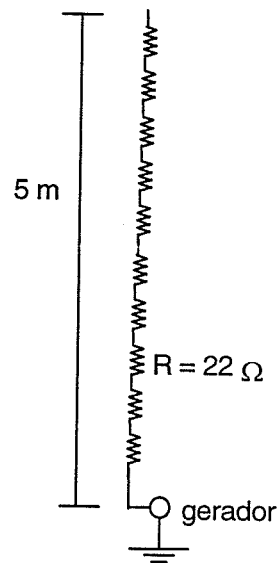


Figura 99: Canal formado pela associação de resistores

Inicialmente foram realizadas medições da corrente aplicada à base do canal e da tensão induzida na linha utilizando o canal de descarga A e, em seguida, utilizando o canal de descarga resistivo (canal C). Os resultados obtidos experimentalmente são apresentados nas figuras 100 e 101, onde também é mostrada a tensão induzida obtida quando da simulação computacional, sendo que como parâmetros de entrada foram fornecidos:

- comprimento, altura e impedância característica da linha aérea;
- terminações da linha;
- valor de pico e tempo de frente da corrente;
- velocidade de propagação da onda;
- distância do canal à linha;
- distância do canal com referência à extremidade da linha.

Os valores relacionados à corrente e velocidade de propagação são os que ocorrem no canal A.

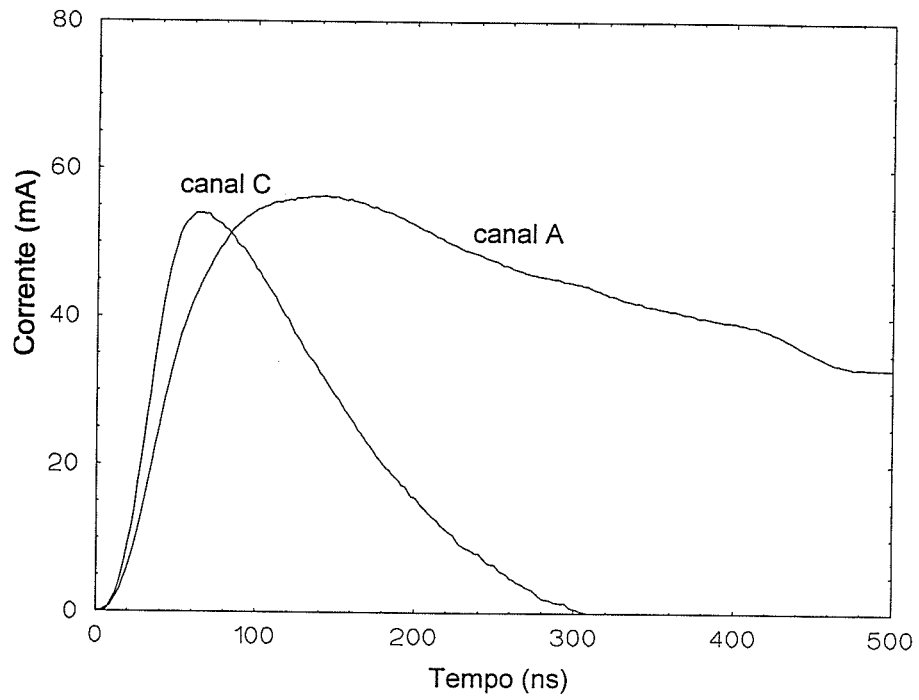


Figura 100: Corrente aplicada x tempo

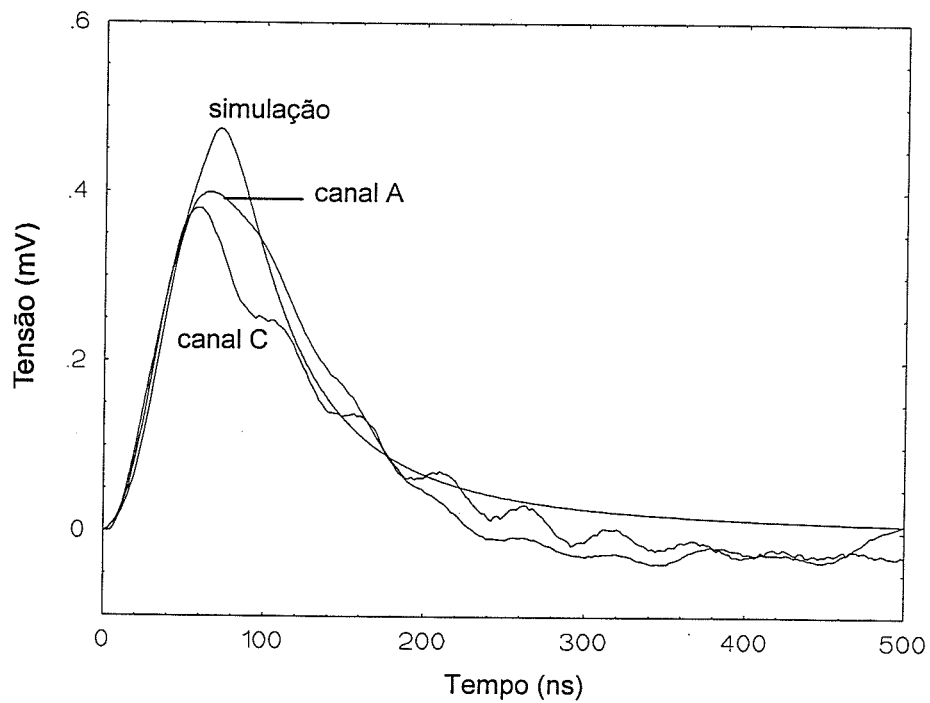


Figura 101: Tensão induzida em linha aérea x tempo

De acordo com os resultados apresentados para os dois tipos de canais analisados, pode-se concluir que estes canais podem ser utilizados para representar uma descarga atmosférica, sendo que no canal A a velocidade de propagação depende das dimensões físicas do canal e do número de espiras por metro. Já no canal C a velocidade de propagação (constante de propagação) depende do valor dos resistores utilizados, sendo que um estudo mais completo ainda deve ser realizado, tanto para se determinar o valor dos resistores quanto para definir qual o comprimento do canal necessário para que a onda de tensão induzida se estabeleça.

Anexo 2: Análise da Tensão Induzida no Interior do SPDA

Neste anexo são apresentados estudos onde se analisa a influência das correntes que circulam no SPDA na tensão induzida em um “loop” localizado no interior do prédio. São apresentadas simulações em modelo reduzido utilizando-se os dois canais de descarga apresentados no início do capítulo 6. O “loop” utilizado nesta parte do trabalho é modelado por uma linha aérea de 2,5 m de comprimento, 48 cm de altura, casada nas duas extremidades. Para tanto, três situações distintas foram simuladas, quais sejam:

Caso1 - tensão induzida no “loop” localizado no interior do prédio. O canal de descarga está conectado na quina do prédio, sendo o gerador conectado entre a base do canal e o prédio (figura 102).

Caso2 - canal de descarga a 2 m do plano, conectado a uma cordoalha que desce até o plano. Gerador conectado entre a base do canal e a cordoalha. Prédio fisicamente ausente (figura 103).

Caso3 - canal de descarga acima do plano (4 cm), gerador conectado entre a base do canal e o plano de alumínio. Prédio fisicamente ausente (figura 104).

É importante salientar que as distâncias do “loop” em relação ao canal de descarga foram mantidas as mesmas em todas as situações.

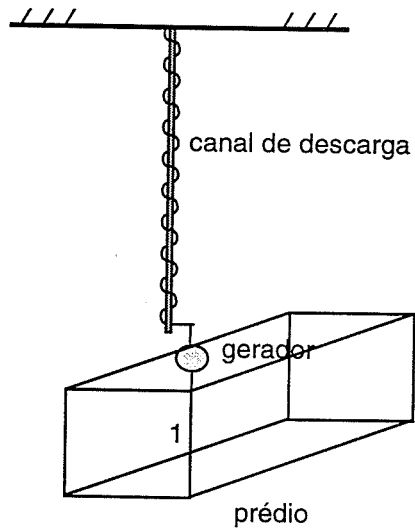


Figura 102: Caso 1 - Descarga direta em um prédio

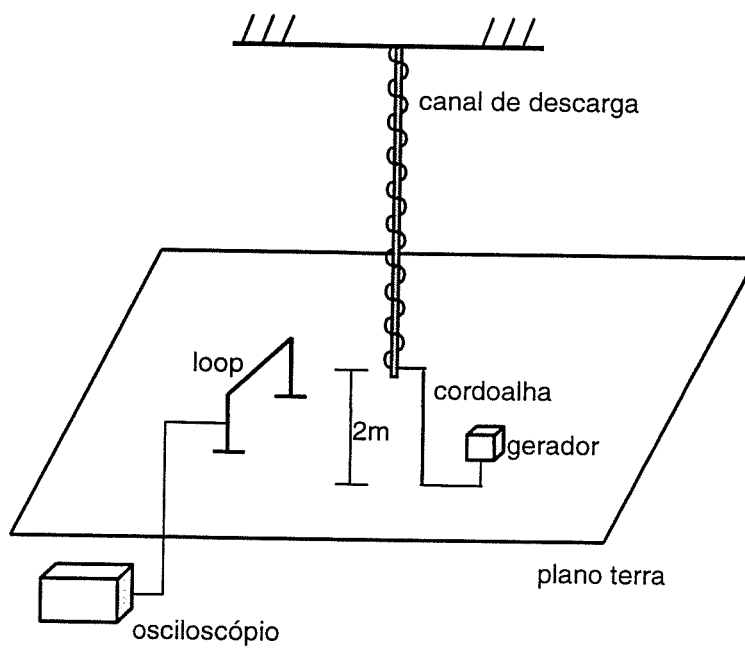


Figura 103: Caso 2 - Descarga indireta na linha, canal a 2 m do plano

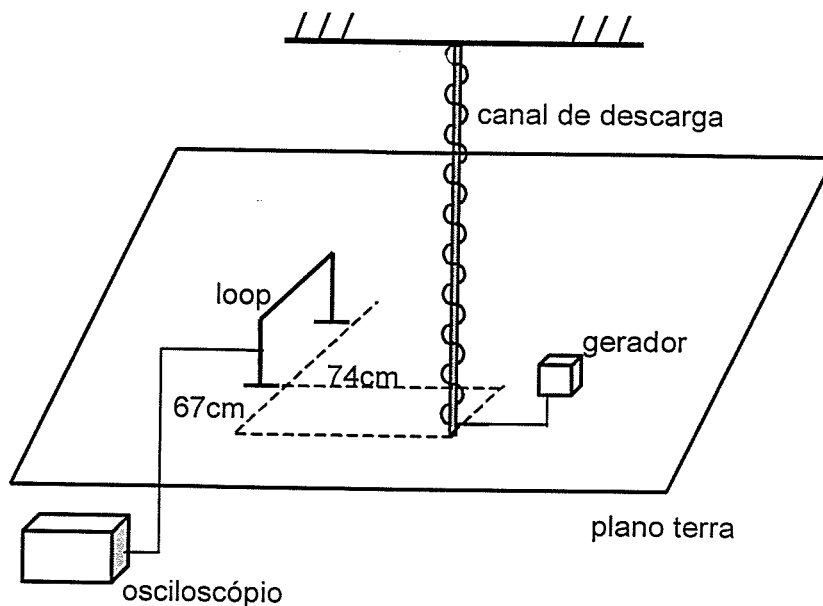


Figura 104: Caso 3 - Descarga indireta na linha

Para o caso 3 também foi realizada a simulação computacional utilizando o programa de Lopes [25] para cálculo de tensão induzida em linhas aéreas baseado na teoria de Rusck. Os resultados estão apresentados nas figuras 105, 106 e 107 (canal A); 108, 109 e 110 (canal B).

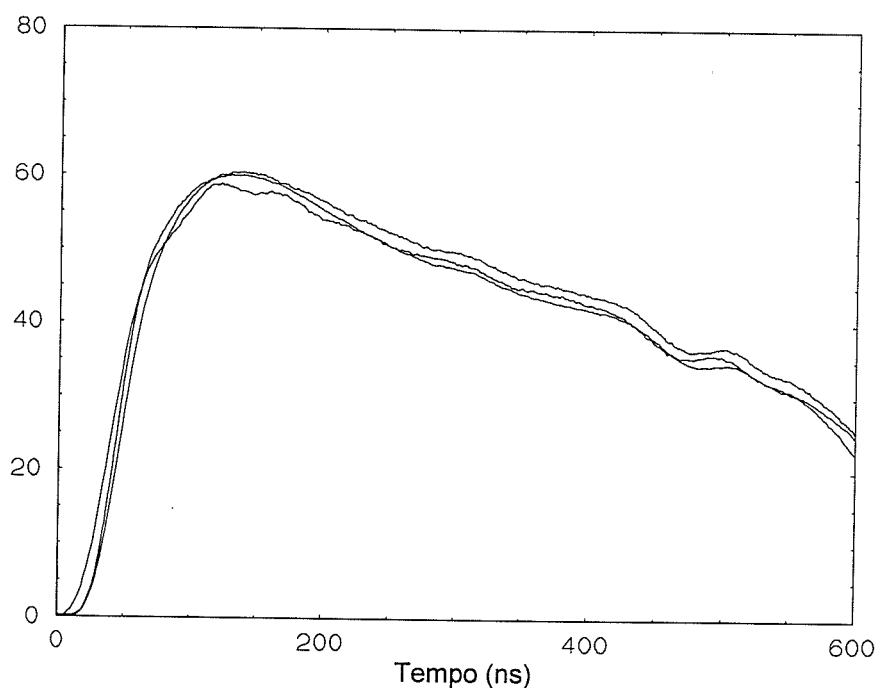


Figura 105: Corrente aplicada no canal A x tempo

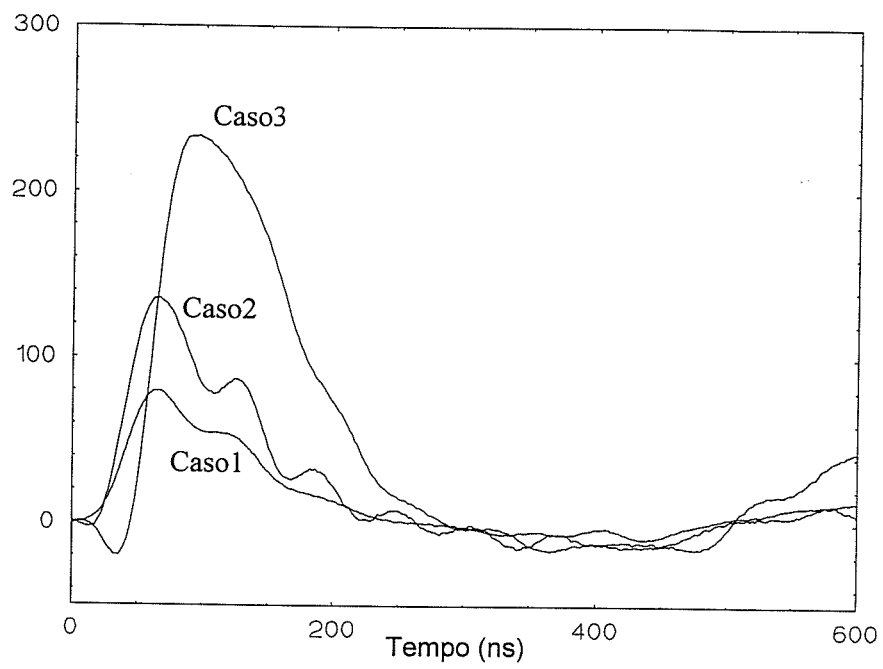


Figura 106: Tensão induzida em linha aérea x tempo

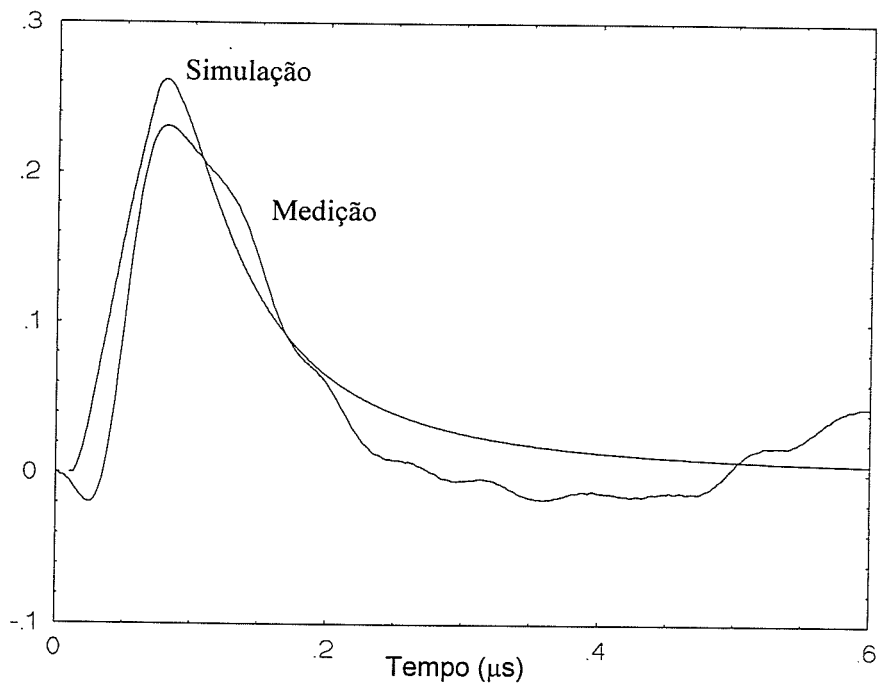


Figura 107: Tensão induzida na linha, simulção x medição

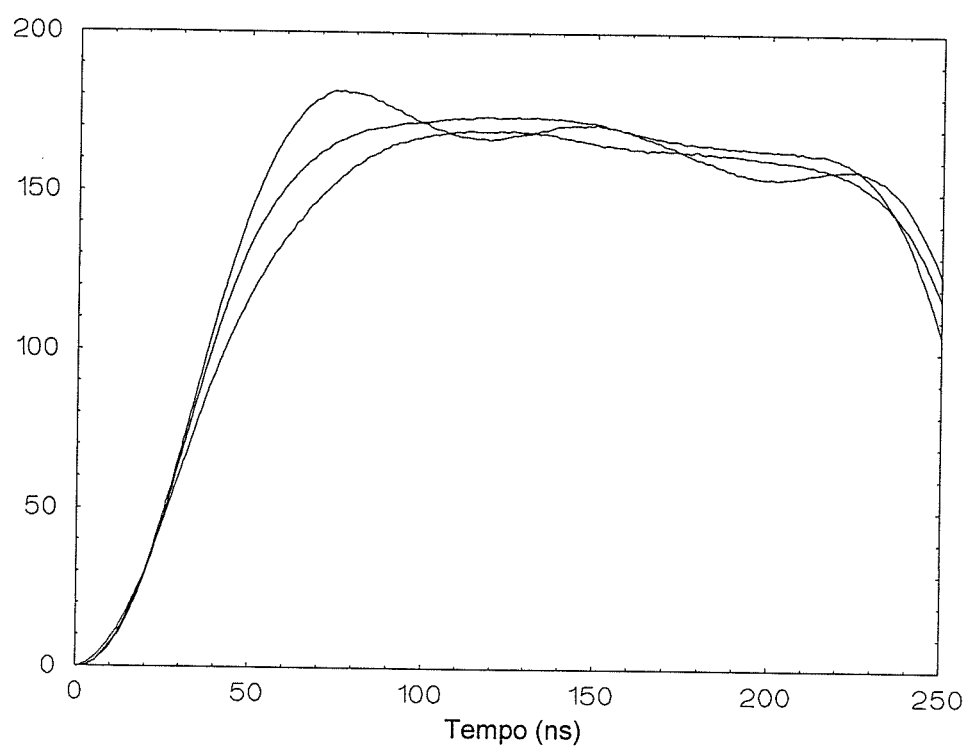


Figura 108: Corrente aplicada no canal C x tempo

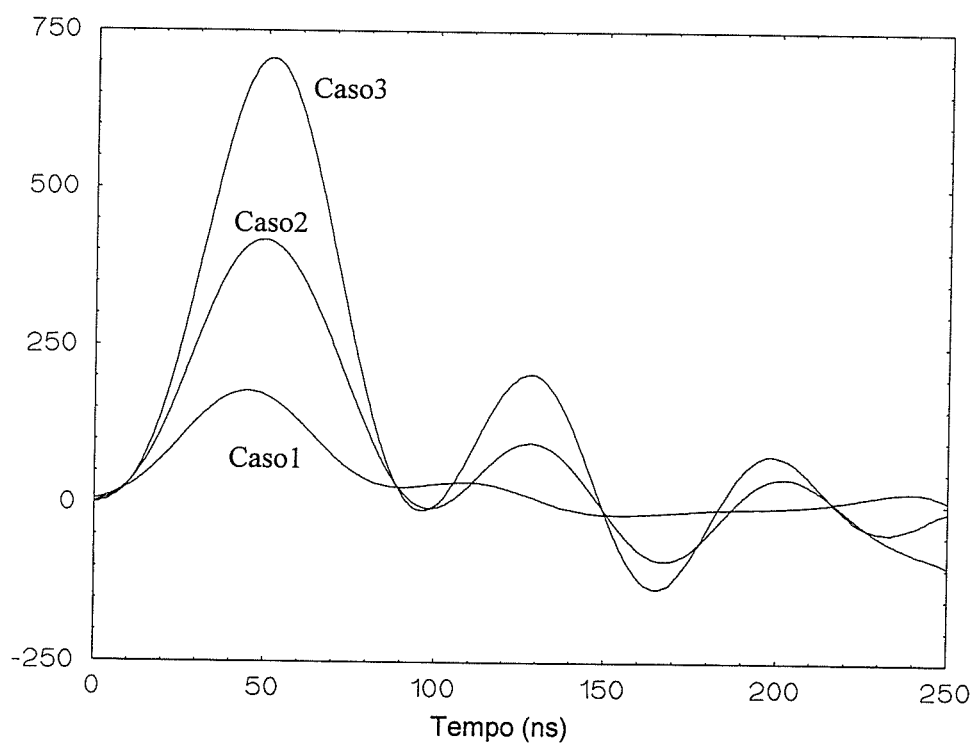


Figura 109: Tensão induzida em linha aérea x tempo

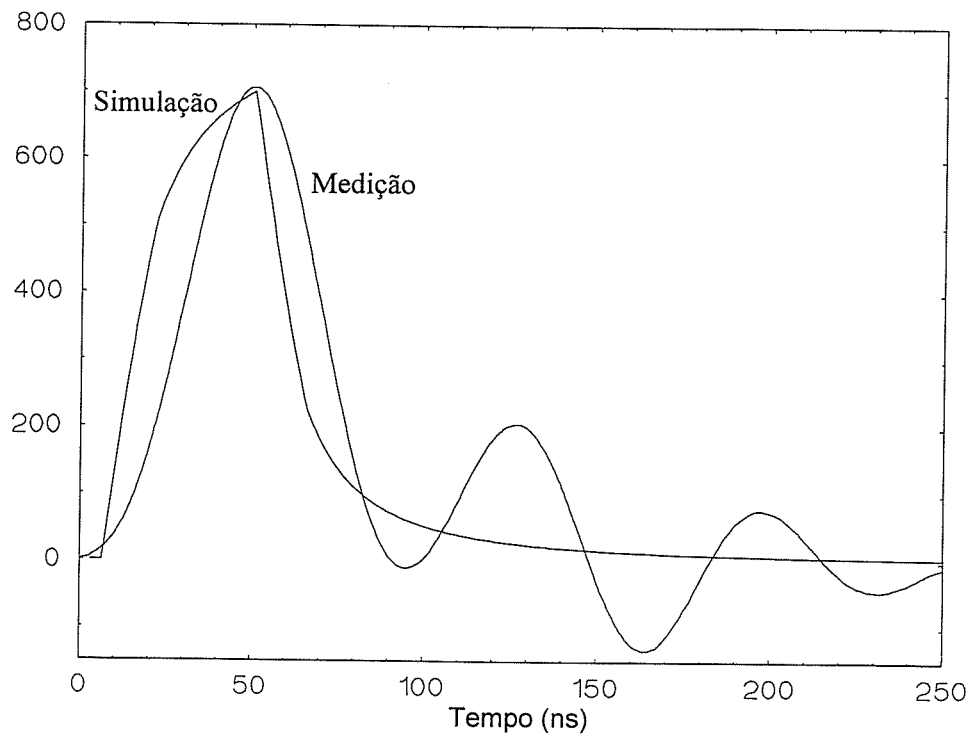


Figura 110: Tensão induzida na linha, simulação x medição

Anexo 3 : Fotografias dos Sistemas Implementados

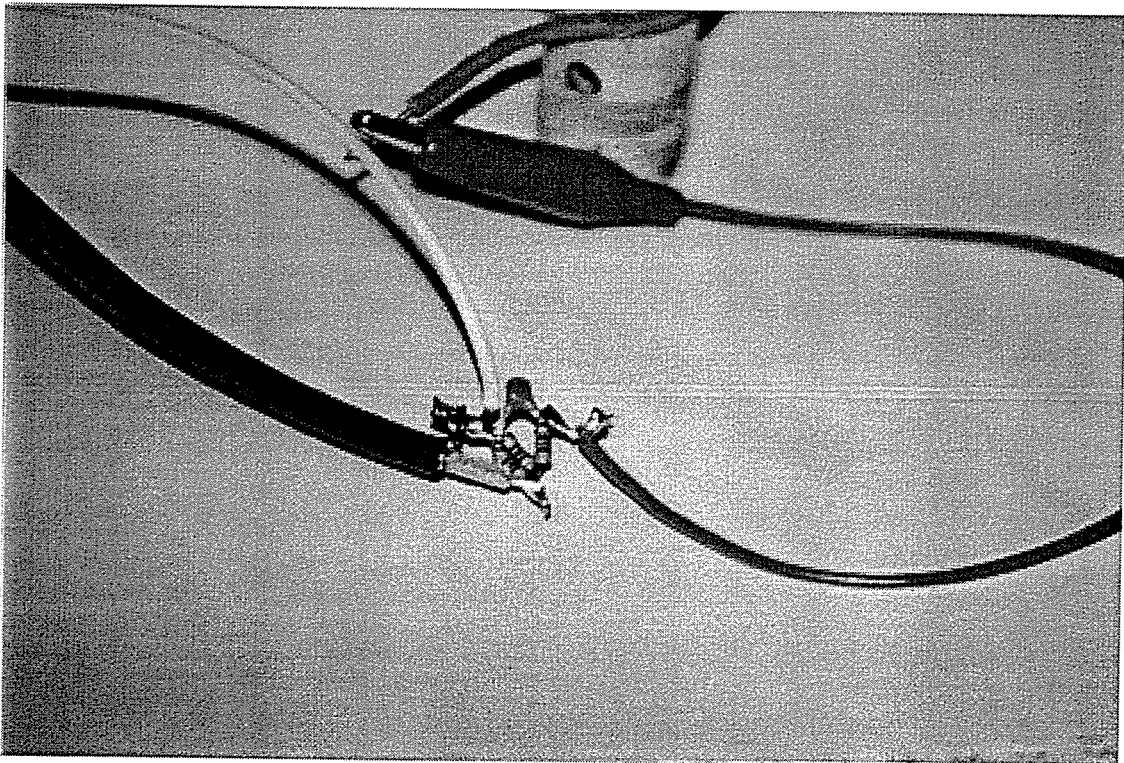


Figura 111: Detalhe do circuito conformador



Figura 112: Gerador de Impulsos

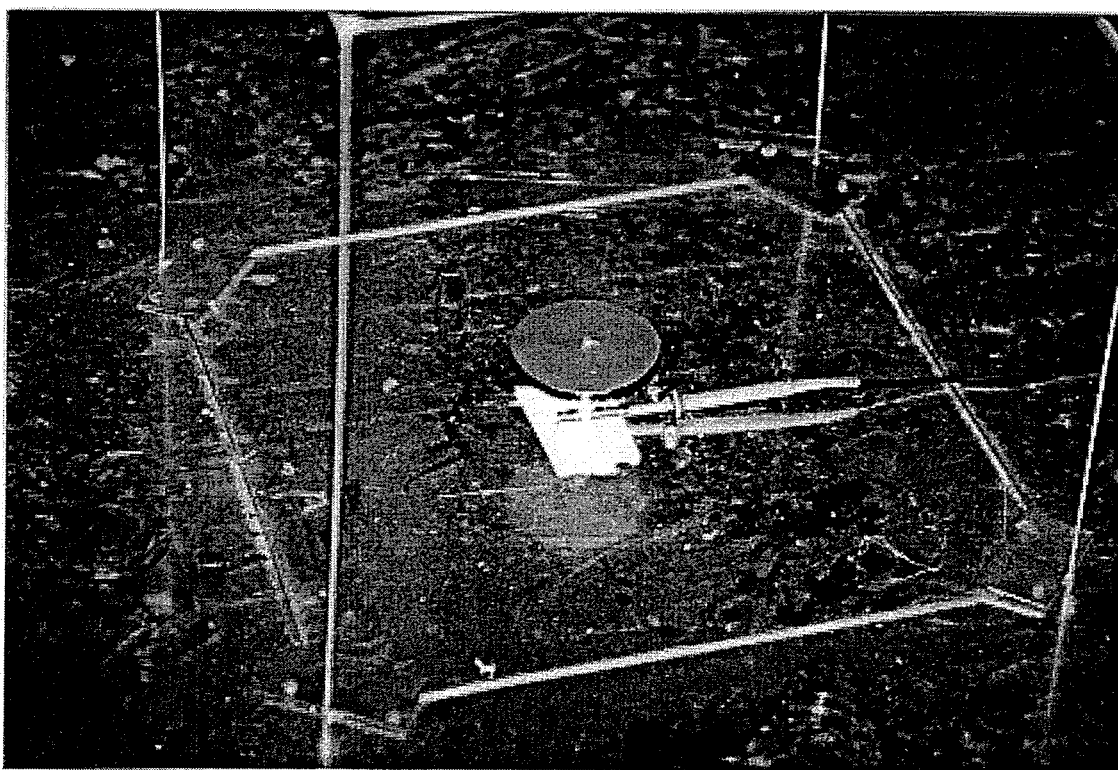


Figura 113: Sensor de campo elétrico

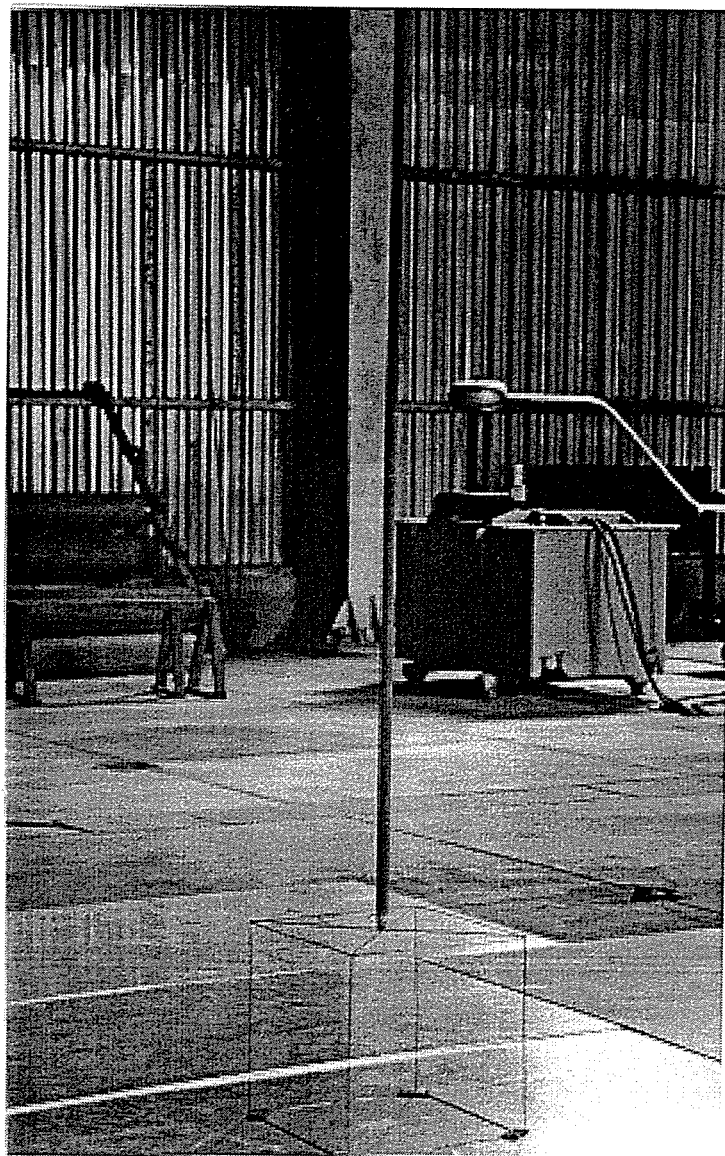


Figura 114: Modelo de pequenas dimensões

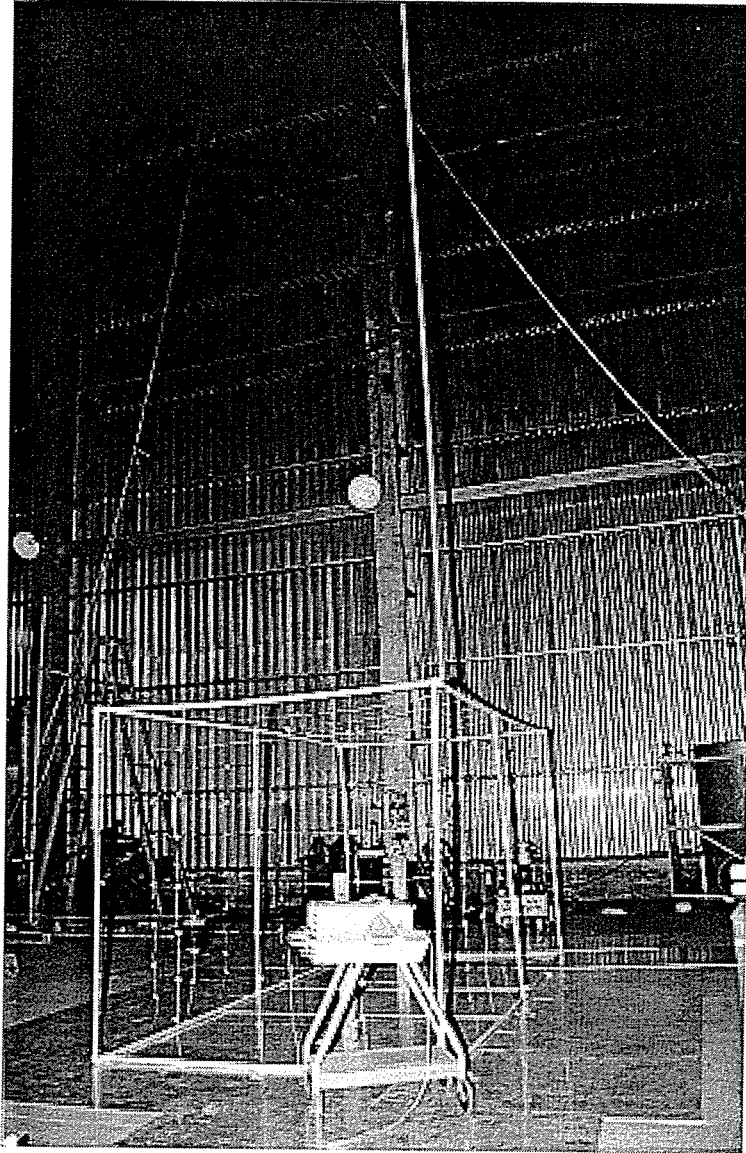


Figura 115: Modelo reduzido implementado no LEAT com detalhe do canal de descargas

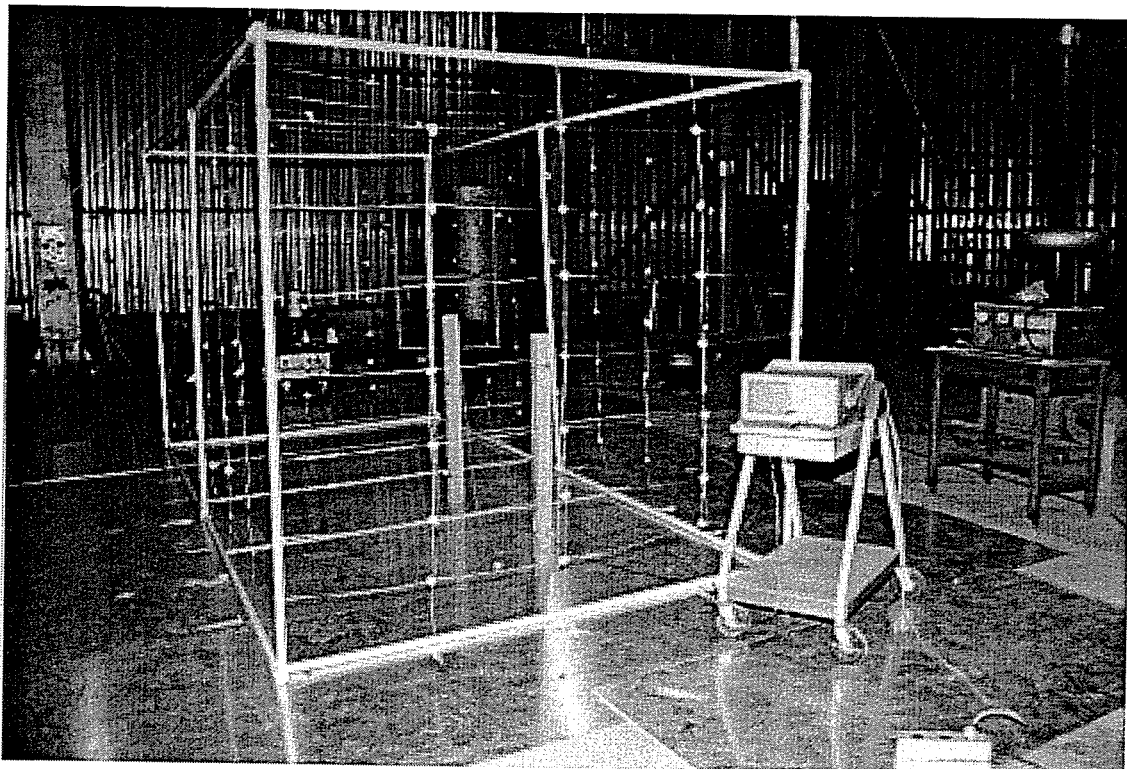


Figura 116: Condutores adicionais ao SPDA para redução da tensão induzida no interior do prédio

Referências Bibliográficas

- [1] - PAULINO, J.O.S., "Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes elétricas: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP; Estudo da influência das perdas na linha". Belo Horizonte, 1994. Tese apresentada como requisito parcial para a participação em concurso público para o cargo de professor titular do departamento de engenharia elétrica da UFMG.
- [2] - BOAVENTURA, W. C.; COELHO F. G. F., "Estudo de Tensões Induzidas em Edificações por Descargas Atmosféricas Utilizando-se Técnicas de Modelo Reduzido", Relatório Técnico - Termotécnica/FCO/EEUFMG, 1997.
- [3] - BOAVENTURA, W. C.; COELHO F. G. F., "Experimental Study of Lightning Protection Systems: Current Distribution, Effect of Discharge Channel Presence and Induced Voltages". 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Canada, August 25 - 29, 1997, p. 141-144, v. 5.
- [4] - S. CRISTINA; M. D'AMORE; A. ORLANDI, "Lightning Stroke to a Structure Protection System. Part I : Current Distribution Analysis". Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28 - September 1, 1989.
- [5] - M. FELIZIANI; A. ORLANDI, "Lightning Stroke to a Structure Protection System. Part II : Electromagnetic Field Analysis". Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28 - September 1, 1989.
-

- [6] - S. CRISTINA; M. D'AMORE; A. ORLANDI, "The Electromagnetic Environment Lightning in a Structure Struck by Lightning". International Symposium on EMC, Nagoya, Japan, September 8 - 10, 1989, p. 670-675.
- [7] - S. CRISTINA; A. ORLANDI, "Lightning Channel's Influence on Currents and Electromagnetic Fields in a Building Struck by Lightning". Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, DC, USA, August 21 - 23, 1990, p. 338-342.
- [8] - A. ORLANDI; F. SCHIETROMA, "Attenuation by Lightning Protection System of Induced Voltages due to Direct Strikes to a Building". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, no. 1, February, 1996, p. 43-50.
- [9] - FLISOWSKI, Z.; STANCZAK, B.; KUCA, B.; MAZZETTI, C.; ORLANDI, A.; YARMARKIN, M., "Induced Currents and Voltages inside LPS Models due to Lightning Current". 23rd International Conference on Lightning Protection, Italy, September 23 - 27, 1996, p. 527-532, v. 2.
- [10] - SMOLKE, M.; ENGELMANN, E., "Analysis and Simulation of the Magnetic Field in Lightning Current - Carrying Structures". IX International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, August 28 - September 1, 1995, p. 8345-1 8345-4, v. 8.
- [11] - SARTORI, C. A. F.; CARDOSO, J. R., "Evaluation of Electromagnetic Environment around a Structure during a Lightning Stroke". International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, September 13 - 16, 1994, p. 746-749.
- [12] - SARTORI, C. A. F.; CARDOSO, J. R., "Determinação dos Efeitos Resultantes de Descargas Atmosféricas Diretas em Edificações". IV
-

International Seminar on Lightning Protection, São Paulo, Brasil, September 8 - 12, 1997, p. 113-118.

[13] - SARTORI, C. A. F.; CARDOSO, J. R., "Lightning Performance of High and Low Buildings". V International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Brazil, May 17 - 21, 1999, p. 247-250.

[14] - CAIXETA, G. P.; PISSOLATO FILHO, J., "Numerical Simulation of Lightning Stroke on an LPS and the Electromagnetic Field Generated". 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Canada, August 25 - 29, 1997, p. 287-290, v. 5.

[15] - CAIXETA, G. P.; PISSOLATO FILHO, J., "Electromagnetic Fields Generated by Lightning on Protection Structures of Telecommunication Centers". IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Austin - USA, August, 1997.

[16] - CAIXETA, G. P.; PISSOLATO FILHO, J., "Electromagnetic Field Induced in the Interior of a Building by Lightning". 24th International Conference on Lightning Protection, United Kingdom, September 14 - 18, 1998, p. 335-339, v. 1.

[17] - BOAVENTURA, W. C.; PAULINO, J.O.S." Lightning Induced Voltage: a Reduced Model Study". Proceedings of the IASTED International Conference on Power Systems and Engineering, Vancouver, Canada, August 5 - 7, 1992, p. 223-226.

[18] - PAULINO, J.O.S.; BOAVENTURA, W. C.; LOPES, I. J. S." Lightning Induced Voltages on Distribution Lines with Shield Wires: Digital Simulations and Reduced Model Measurements". IX International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, August 28 - September 1, 1995, p. 6718-1 6718-4, v. 6.

- [19] - ISHII, M.; MICHISHITA, K.; HONGO, Y., "Experimental Study of Lightning-Induced Voltage on an Overhead Wire over Lossy Ground". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, no. 1, February, 1999, p. 39-45.
- [20] - PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.. "Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Linhas com Diferentes Configurações". IIº Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão, 15-18 Junho, Belo Horizonte, Brasil, 1997, p. 184-192.
- [21] - PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.. "Currents Induced on Grounding Conductors due to Lightning Discharges Close to Overhead Distribution Lines". International Conference on Grounding and Earthing, April 12 - 16, Belo Horizonte, Brasil, 1998, p. 107-112.
- [22] - NUCCI, C. A.; PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.. "Lightning-Induced Voltages on Distribution Overhead Lines: Comparison Between Experimental Results from a Reduced-Scale Model and Most Recent Approaches". 24th International Conference on Lightning Protection, United Kingdom, September 14 - 18, 1998, p. 314-320, v. 1.
- [23] - MATSUMOTO, T.; SAWAI, K.; KUOKAWA, M.. "Artificial Lightning Current Distribution in a Model Miniature Building". IX International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, August 28 - September 1, 1995, p. 6779-1 6779-4, v. 6.
- [24] - MAZZETTI, C.; FLISOWSKI, Z.; KUCA, B.; STANCZAK, B.; YARMARKIN, M.. "Secondary Discharge Effects of Lightning Stroke Current due to its Coupling with Installations of Protected Structures". IX International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, August 28 - September 1, 1995, p. 6797-1 6797-4, v. 6.
-

- [25] - LOPES, I. J. S., "Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas", Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [26] - RUSCK, S., "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks", Doctor's Thesis, Trans. of Royal Institute of Technology Stockolm, 1957.
- [27] - UMAN, M. A., "Natural Lightning", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, May/June, 1994.
- [28] - BOAVENTURA, W. C., "Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido", Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [29] - GALVAN, A.; COORAY, V.; SCUKA, V., "Interaction of Electromagnetic Fields from Cloud and Ground Lightning Flashes with an Artificial Low-Voltage Power Installation". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, no. 3, August, 1999, p. 250-257.
- [30] - SILFVERSKIOLD, S.; THOTTAPPILLIL, M. Ye; COORAY, V.; SCUKA, V., "Induced Voltage in a Low-Voltage Power Installation Network due to Lightning Electromagnetic Fields: An Experimental Study". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 41, no. 3, August, 1999, p. 265-271.
- [31] - D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; FILHO, J. A.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. O., "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão", Editora Universitária Federal Fluminense, 1987.
-

- [32] - BERGER, G., "Lightning Phenomena", III Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 5 - 9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.
- [33] - TRIGINELLI, W. A. C.; CARVALHO, A. M.; DINIZ, J. H.; CHERCHIGLIA, L. C. L., "Descargas Atmosféricas Principais Parâmetros Aplicáveis a Estudos de Engenharia", III Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 5 - 9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.
- [34] - UMAN, M. A., "Lightning", Dover Publications, Inc., New York, 1984.
- [35] - 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 do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [36] - KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.. "High-Voltage Engineering", Pergamon Press, Toronto, 1984.
- [37] - KRAUS, J.D.; CARVER, K.R.. "Eletromagnetismo", Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- [38] - KOHLER, W.. "Measurement and Calculation of Low Frequency Electric and Magnetic Fields". IX International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, August 28 - September 1, 1995, p. 8338-1 8338-4, v. 8.
- [39] - KOHLER, W.. "Calibration of Low Frequency Electric and Magnetic Field Probes". International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Italy, September 17 - 20, 1996, p. 399-404, v. 1.
- [40] - PÉREZ, H.; MIMG, Y.; COORAY, G. V.; SCUKA, V., "Response of a Low Voltage Power Installation Network to the EM-Fields Generated by a
-

TEM-Field Simulation Antenna and Natural Lightning EMP". International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy, September 13 - 16, 1994, p. 676-681, v. 4.

[41] - DURRIS, L.; QUERI, J. L.; SELTNER, P.; GOIFFON, R.; BRISSAUD, M.; GONNARD, P., "SYMPA: A Complete and Reliable Solution to Control External Lightning Protection Systems". 24th International Conference on Lightning Protection, United Kingdom, September 14 - 18, 1998, p. 929-933, v. 2.

[42] - ORLANDI, A.; MAZZETTI, C.; YARMARKIN, M.; FLISOWSKI, Z.; KUCA, B.. "Shielding Properties of Lightning Protection Systems under LEMP". 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Canada, August 25 - 29, 1997, p. 283-286, v. 5.

[43] – OLIVEIRA, T. A. S. e PAULINO, J.O.S.. "Cálculo de Tensões Induzidas em Linhas Aéreas Utilizando o PSPICE". Artigo submetido ao III^o Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão, a realizar-se de 04 a 07 Junho de 2000, Campina Grande, Brasil.
