

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONDUTOR
MULTI-ATERRADO FRENTE A TENSÕES INDUZIDAS
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

Autor: Ivan José da Silva Lopes

Orientadores: José Osvaldo Saldanha Paulino
Selênio Rocha Silva

Belo Horizonte - 1990.

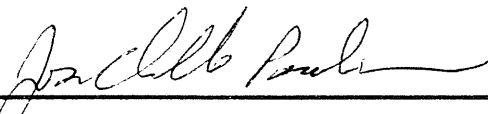
"ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM CONDUTOR MULTI-ATERRADO
FRENTE A TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS."

ENG.º IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES

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

Aprovada em 19 de Junho de 1990.

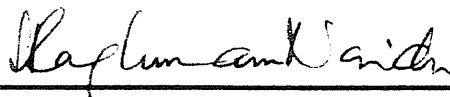
Banca examinadora:



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



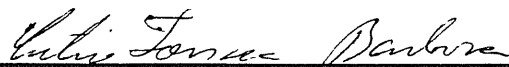
Selênio Rocha Silva (Orientador)
Dr. UFPb - Paraíba/Prof. do CPGEE-UFMG



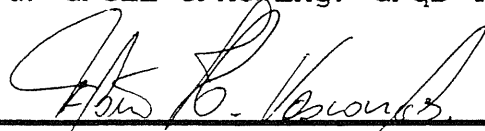
Sreeramulu Raghuram Naidu
Ph.D. Univ. of Liverpool-Inglaterra/Pós-Doutorado
Univ. of British Columbia Canadá/Prof. UFPb-Paraíba



Antônio Roberto Panicalli
Ph.D. Univ. Illinois-USA/Eng.º CPqD-TELEBRÁS



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



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

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela valiosa orientação e permanente incentivo.

Aos colegas e professores do Curso de Pós-Graduação e em especial ao professor Selênio Rocha Silva, Coordenador do Curso.

Ao pessoal do Laboratório de Extra-Alta Tensão que mais de perto acompanhou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao colega Glássio Costa de Miranda pelo grande auxílio prestado no fornecimento das rotinas gráficas.

Aos colegas Almir, Paulo Henrique, Wallace e Eudes pelas enriquecedoras discussões e sugestões sempre valiosas.

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD / TELEBRÁS pelo suporte financeiro capaz de concretizar a realização deste projeto.

Aos meus pais e aos amigos pelo carinho e constante encorajamento.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o aprimoramento de meus conhecimentos.

RESUMO

Este trabalho busca uma metodologia de cálculo capaz de possibilitar o estudo das tensões induzidas por descargas atmosféricas laterais ao longo de uma linha unifilar multi-aterrada possuindo trechos aéreo e subterrâneo.

A metodologia desenvolvida partiu do estudo da teoria proposta por Rusck onde foi obtida uma expressão analítica para a tensão induzida por uma descarga atmosférica num condutor infinito e sem descontinuidades. Desenvolveu-se então uma metodologia de cálculo baseada na substituição das descontinuidades por fontes de corrente equivalentes. Dessa forma, o fenômeno de interação dos campos eletromagnéticos que se propagam pelo espaço e que interagem com a linha em toda sua extensão foi transformado num problema de cálculo de transitórios eletromagnéticos envolvendo fontes localizadas apenas em seus pontos de descontinuidade.

Os resultados obtidos através de simulações realizadas com o programa buscam dar uma idéia, do ponto de vista qualitativo, da eficiência de determinados esquemas de aterramento em se baixar os níveis de tensões induzidas ao longo de uma linha.

ABSTRACT

This work is concerned with the study of lightning induced voltages caused by indirect flashes in multi-earthed single-phase lines consisting of overhead and underground sections.

The developed methodology was based on Rusck's theory for the interaction between lightning electromagnetic fields and an infinite line. The discontinuities of a real line were transformed into sources of currents and its effects were simulated in the electromagnetic transient program implemented in microcomputer. The principle of superposition was used and the induced voltage was obtained.

The simulation results obtained by the program try to show comparatively the effects of multi-earthed arrays of a line in order to reduce lightning induced voltage levels.

SUMÁRIO

	Página
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Estrutura do Trabalho	3
<u>CAPÍTULO 2 - CÁLCULO ANALÍTICO DA TENSÃO INDUZIDA-</u> <u>TEORIA DE RUSCK</u>	6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Considerações Básicas da Teoria de Rusck	8
2.3 - O Potencial Indutor	9
2.4 - O Potencial Escalar Induzido	10
2.5 - A Tensão Induzida	16
<u>CAPÍTULO 3 - DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE COMPENSAÇÃO</u> ...	21
3.1 - Introdução	21
3.2 - Determinação da Tensão Induzida nos Pontos de Descontinuidade da Linha Real	22
3.2.1 - Alteração da Tensão nas Extremidades	23

3.2.2 - Alteração da Tensão num Ponto Intermediário	25
3.2.3 - Análise Qualitativa	26
3.3 - Fatores de Compensação Aplicáveis aos Pontos de Descontinuidade da Linha	28
<u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE CÁLCULO</u>	30
4.1 - Introdução	30
4.2 - Superposição dos Efeitos de Diversas Descontinuidades	31
4.3 - Cálculo da Tensão Transitória de Compensação	33
4.4 - Dedução das Fontes de Compensação	35
4.4.1 - Fontes do Trecho Aéreo	37
4.4.2 - Fontes do Trecho Subterrâneo	40
4.5 - Apresentação do Programa Implementado	45
4.5.1 - Parâmetros da Linha	47
4.5.2 - Pontos de Observação Intermediários	47
4.5.3 - Parâmetros da Descarga	47
4.5.4 - Parâmetros para Simulação	48
4.5.5 - Cálculo da Tensão Induzida e Apresentação de Resultados	49
4.6 - Exemplo de Utilização do Programa	50
4.6.1 - Influência da Distância da Descarga à Linha	54

4.6.2 - Influência do Tempo de Frente da Corrente de Retorno	55
4.6.3 - Influência do Tempo de Pico da Corrente de Retorno	56
4.6.4 - Influência da Velocidade de Propagação da Corrente de Retorno	56
4.6.5 - Influência do Comprimento da Linha	57
4.6.6 - Influência da Resistência Terminal da Linha	58
4.7 . Análise Comparativa dos Resultados Obtidos	61
4.7.1 - Medições em Modelo Reduzido	61
4.7.2 - Resultados Apresentados por Yokoyama	69

<u>CAPÍTULO 5 - ESTIMATIVA DOS PROVÁVEIS COMPORTAMENTOS</u> <u>DAS DIVERSAS CONFIGURAÇÕES DE UMA LINHA</u> <u>EXPOSTA A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</u>	71
5.1 - Introdução	71
5.2 - Descrição do Caso Base para Estudo	72
5.3 - Parâmetros e Localização da Descarga Atmosférica	73
5.4 - Avaliação do Efeito de Aterramentos	75

<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	81
6.1 - Introdução	81
6.2 - Conclusões Finais	81
6.3 - Propostas de Continuidade do Trabalho	83
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	85
<u>APÊNDICE A</u> - Reflexões em uma Descontinuidade	91
<u>APÊNDICE B</u> - Computação dos Transitórios Eletromagnéticos	95

NOMENCLATURA

A seguinte nomenclatura define os símbolos utilizados ao longo deste trabalho. Nos casos em que um símbolo é utilizado localmente para expressar uma outra grandeza, é feita alguma observação no ponto específico do texto. Os números entre parênteses correspondem à seção onde o símbolo é definido ou utilizado pela primeira vez.

A	= potencial vetor. (2.2)
A_i	= potencial vetor do campo indutor. (2.3)
A_x	= potencial vetor na direção do condutor. (2.4)
E	= campo eletromagnético. (2.2)
E_x	= campo na direção do condutor. (2.4)
E_z	= campo na direção vertical. (2.5)
h	= altura do condutor. (2.3)
I	= corrente elétrica. (2.4)
I_o	= valor de pico da corrente de retorno. (2.3)
k	= coeficiente de potencial. (2.4)
L	= comprimento do canal de descarga. (2.3)
l	= indutância. (2.4)
R	= resistor de aterramento da linha. (3.2)
R_e	= resistor de aterramento situado na extremidade da linha. (4.6)
r	= raio do condutor. (2.4)
r_o	= distância entre o ponto no solo atingido pela

- descarga e um ponto da linha. (2.3)
- R_t = resistor de aterramento situado no ponto de transição aéreo/subterrâneo da linha. (5.4)
- t = tempo. (2.3)
- t_f = tempo de frente da corrente de retorno. (4.6)
- u = variável de integração. (2.4)
- $U(x,t)$ = $U_1(x,t) + U_2(x,t)$, tensão induzida num ponto x da linha infinita sem descontinuidades. (2.5)
- $U_1(x,t)$ = somatória de todas as contribuições para a tensão induzida num ponto x da linha infinita sem descontinuidades, localizadas à esquerda do ponto x . (2.5)
- $U_2(x,t)$ = somatória de todas as contribuições para a tensão induzida num ponto x da linha infinita sem descontinuidades, localizadas à direita do ponto x . (2.5)
- $U'(x,t)$ = tensão induzida num ponto x de descontinuidade da linha. (3.2)
- $U^*(x,t)$ = tensão induzida num ponto x do trecho subterrâneo de uma linha. (4.4)
- $U^{\text{Compens.}}$ = fator de compensação para cálculo da tensão induzida num ponto de descontinuidade da linha. (3.2)
- v = velocidade de propagação da corrente de retorno. (2.3)
- v_0 = velocidade da luz. (2.3)

- V = potencial escalar induzido. (2.4)
- V_i = potencial escalar indutor. (2.3)
- $V_1(x,t)$ = somatória de todas as contribuições para o potencial escalar induzido num ponto x de uma linha infinita sem descontinuidades, localizadas à esquerda do ponto x . (2.4)
- $V_2(x,t)$ = somatória de todas as contribuições para o potencial escalar induzido num ponto x de uma linha infinita sem descontinuidades, localizadas à direita do ponto x . (2.4)
- x = coordenada ao longo do eixo da linha. $x=0$ no ponto mais próximo do ponto de incidência da descarga no solo. (2.4)
- y = coordenada horizontal perpendicular ao eixo da linha. $y=0$ no ponto de incidência da descarga. (2.4)
- y_0 = distância no solo entre o ponto de incidência da descarga e a linha. (2.4)
- z = coordenada vertical ao longo do canal de descarga. $z=0$ no nível do solo. (2.4)
- Z = impedância característica da linha. (2.4)
- Z_0 = impedância intrínseca do canal de descarga. (2.3)
- Z_c = impedância característica da linha. (4.6)
- Z_1 = impedância característica do trecho aéreo. (4.4)
- Z_2 = impedância característica do trecho

subterrâneo. (4.4)

β = v/v_0 . (2.3)

Φ = potencial escalar. (2.2)

ϵ_0 = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m - permissividade do espaço livre. (2.3)

μ_0 = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. permeabilidade do espaço livre.
(2.3)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa desenvolvido no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, com o apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD / Telebrás.

Basicamente, o objetivo do projeto era o de se proceder um estudo do fenômeno das tensões induzidas em condutores de energia elétrica e cabos de comunicação provocadas por descargas atmosféricas. Este estudo buscava um melhor entendimento de um fenômeno que, por mais conhecido e estudado ao longo dos tempos, ainda hoje é motivo de constantes discussões devido aos seus diversos pontos de controvérsia.

O prazo pré-estabelecido para o cumprimento das atividades foi de dois anos. Envolveram-se diretamente com o trabalho quatro alunos de Pós-Graduação e um professor orientador. De uma forma geral, as tarefas executadas no período foram o cumprimento dos créditos necessários à elaboração da dissertação de mestrado (1 ano) e a elaboração

de quatro dissertações de mestrado (1 ano) relacionadas com o assunto em questão.

Para uma melhor visualização deste trabalho no contexto do projeto, pode-se apresentar a seguinte estrutura para os quatro trabalhos de dissertação desenvolvidos:

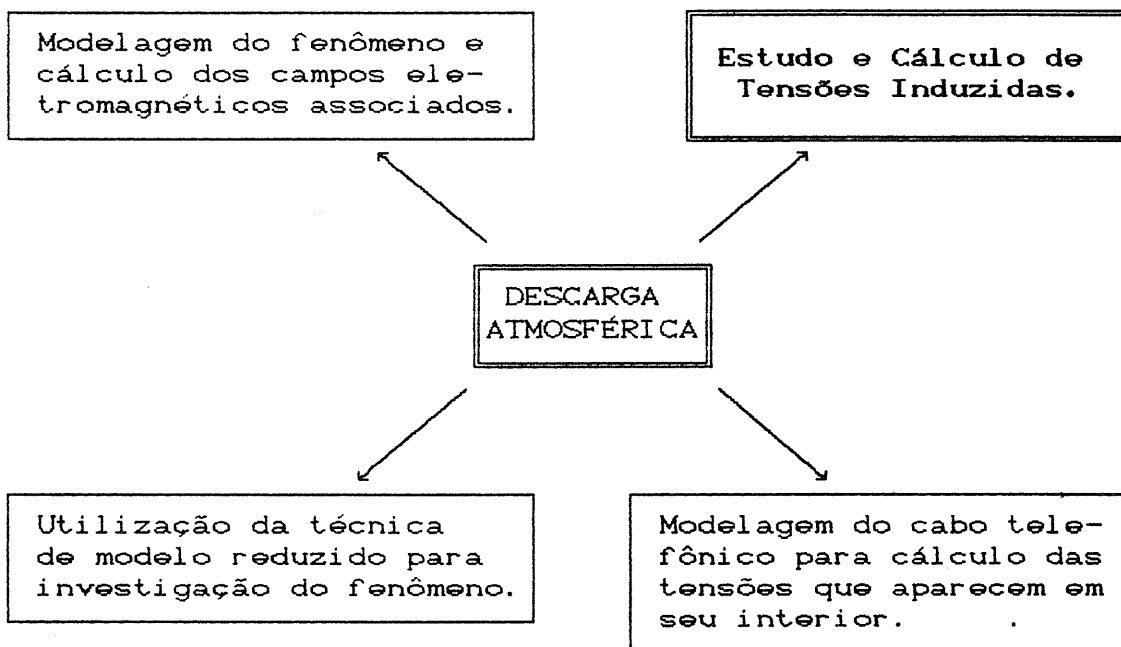
- estudo da descarga atmosférica no que diz respeito às considerações básicas relativas à modelagem do fenômeno, cálculo dos campos eletromagnéticos associados e estabelecimento de modelos de interação dos campos com linhas [25];

- estudo das tensões induzidas em linhas partindo-se de um modelo de interação pré-definido, desenvolvimento e implementação de uma metodologia de cálculo dessas tensões induzidas em condutores aéreos e subterrâneos multi-aterrados;

- estudo em modelo reduzido das tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas, domínio da técnica de medição utilizando modelo reduzido [26];

- estudo e modelagem do cabo telefônico para cálculo das tensões induzidas internamente à sua blindagem [27].

Visto num organograma, o projeto teria as seguintes linhas gerais:



1.2 - Estrutura do trabalho.

O cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas constitui um problema de cálculo de transitórios eletromagnéticos. Existem várias formas de se modelar o fenômeno, assim como de se proceder o cálculo [1, 3, 8, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 22]. Do ponto de vista computacional, o principal ponto a ser trabalhado a partir da modelagem da descarga é a interação dos campos eletromagnéticos gerados que se propagam pelo espaço induzindo tensões e correntes na linha.

Neste trabalho estuda-se o fenômeno das tensões induzidas e estabelece-se uma metodologia de cálculo dessas tensões em condutores multi-aterrados com trechos aéreos e subterrâneos.

No capítulo 2 é apresentada a teoria proposta por Rusck para se obter uma expressão analítica para a tensão induzida por uma descarga atmosférica ao longo de um condutor infinito localizado acima da superfície do solo [1,3].

No capítulo 3 são deduzidas expressões que, partindo-se daquelas a que se chegou no capítulo 2, introduzem correções a serem aplicadas em todos os pontos de descontinuidade dos condutores que constituem as linhas reais, quais sejam: os diversos pontos de aterramento e suas extremidades.

O capítulo 4 tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada para o cálculo da tensão induzida propriamente dita. As correções a serem aplicadas nos pontos de descontinuidade são modeladas como fontes que são injetadas na linha através de um programa de cálculo de transitórios desenvolvido com esta finalidade. Após a apresentação de toda a modelagem e metodologia, são mostradas algumas simulações feitas com o programa onde

avalia-se a influência de diversos parâmetros na tensão induzida.

No capítulo 5 utiliza-se o programa para o estudo do efeito do multi-aterramento ao longo de uma linha telefônica de dimensões típicas, no sentido de se obter menores níveis de tensões induzidas num determinado ponto da mesma. Os resultados ali obtidos procuram dar uma idéia de quanto o programa pode ser útil para análises qualitativas de diversos arranjos de aterramento, buscando fornecer subsídios para a definição de esquemas de proteção de redes telefônicas multi-aterradas.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as conclusões gerais tiradas a partir do trabalho desenvolvido e as diretrizes a serem seguidas para dar continuidade ao mesmo.

CAPÍTULO 2

CÁLCULO ANALÍTICO DA TENSÃO INDUZIDA - TEORIA DE RUSCK

2.1 - Introdução.

Os sistemas elétricos sofrem freqüentes distúrbios provocados por descargas atmosféricas [11]. Estes distúrbios são percebidos em forma de sobretensões. As sobretensões atmosféricas podem ser divididas em três grandes grupos:

- causadas por descargas atmosféricas diretas, ou seja, descargas que atingem diretamente o sistema;

- causadas por descargas atmosféricas que ocorrem entre nuvens e no interior da própria nuvem;

- causadas por descargas atmosféricas laterais, que são aquelas descargas que atingem o solo nas proximidades do sistema.

As descargas diretas correspondem, em última análise, a uma injeção direta de corrente no sistema. Embora seus efeitos sejam os mais intensos, não são objeto do presente estudo.

As descargas entre nuvens e no interior das nuvens, por constituírem um fenômeno de menor interesse para os sistemas elétricos, também não serão analisadas.

As sobretensões causadas por descargas laterais, apesar de menos energéticas que aquelas provocadas pelas descargas diretas, constituem objetivo de estudo neste trabalho, principalmente devido a sua alta frequência de ocorrência. Elas são o resultado da interação entre os campos gerados pela descarga viajando à velocidade da luz e a linha nas proximidades do ponto de incidência.

Este capítulo tem por finalidade apresentar, de maneira sucinta, a teoria proposta por Rusck no desenvolvimento de uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida por uma descarga atmosférica lateral em um condutor infinito, localizado a uma altura h acima do nível do solo [1,3].

Partindo-se de considerações feitas para a modelagem da descarga atmosférica, Rusck obteve expressões para os campos eletromagnéticos associados ao fenômeno. A dedução de tais expressões não faz parte do escopo deste trabalho [25].

Conhecidos os campos, determinou-se um modelo de interação dos mesmos com o condutor localizado nas proximidades do ponto de incidência da descarga no solo e obteve-se uma expressão analítica para a tensão induzida.

2.2 Considerações Básicas da Teoria de Rusck.

As principais considerações feitas por Rusck para o estabelecimento da teoria são [1,3]:

- é suposta uma distribuição uniforme de cargas no canal ionizado (canal que existe entre a nuvem e o solo no instante anterior à ocorrência da corrente de retorno);

- considera-se apenas os efeitos da corrente de retorno, que corresponde à alta corrente que circula entre nuvem e terra nos instantes finais do fenômeno;

- a corrente de retorno é considerada em forma de degrau e viaja sem distorções ao longo do canal;

- é suposta uma descarga incidindo no solo numa direção perpendicular ao mesmo;

- é suposto que o solo possui uma resistividade nula e o método das imagens é utilizado para o cálculo do campo eletromagnético;

- para o cálculo do campo, obedece-se à condição de Lorentz:

$$\nabla \cdot \vec{A} + \frac{1}{v_0^2} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

sendo o campo dado por:

$$E = -\nabla\Phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} .$$

2.3 - O Potencial Indutor.

Para um melhor entendimento da dedução da expressão para a tensão induzida, são apresentadas, a seguir, as expressões para os potenciais escalar e vetor, obtidas a partir da modelagem da descarga.

Do cálculo dos campos associados à descarga obtém-se a seguinte expressão para o potencial escalar indutor à altura do condutor:

$$V_i = 2Z_0 I_0 h \frac{v_0}{v} \left\{ \frac{1}{\sqrt{L^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1-\beta^2) r_0^2}} \right\} \quad (2.1)$$

onde:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ - permeabilidade do espaço livre.

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ - permissividade do espaço livre.

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

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

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

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

$v_0 \Rightarrow$ velocidade da luz ($m/\mu s$).

$L \Rightarrow$ comprimento do canal de descarga (m).

$r_0 \Rightarrow$ distância entre o ponto da linha onde se calcula o potencial e o ponto do solo atingido pela descarga (m).

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

$$0 \leq t \leq \frac{L}{v} + \frac{\sqrt{L^2 + r_0^2}}{v_0}$$

$$\beta = v/v_0.$$

Outra expressão obtida a partir da modelagem do fenômeno é a expressão para o potencial vetor produzido pela descarga. Dessa forma, o potencial vetor de um ponto localizado à altura do condutor é:

$$h \frac{\partial \vec{A}_t}{\partial t} = 2Z_0 I_0 h \beta \left\{ \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1-\beta^2) r_0^2}} \right\} \quad (2.2)$$

onde os termos são definidos como na equação (2.1).

2.4 - O Potencial Escalar Induzido.

Um campo eletromagnético pode ser escrito, de maneira geral, como a soma de duas parcelas: uma parcela associada ao potencial escalar V_i e outra associada ao potencial vetor \vec{A}_t . Tem-se então:

$$E_i = - \nabla V_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2.3)$$

Considere um sistema de coordenadas cartesianas xyz orientado de tal forma que o plano xy coincida com a superfície do solo, estando o eixo z orientado positivamente para cima. Considere ainda uma linha localizada na direção paralela ao eixo x consistindo de um único condutor situado a uma distância y_0 do eixo x e a uma altura h acima do solo (fig 2.1).

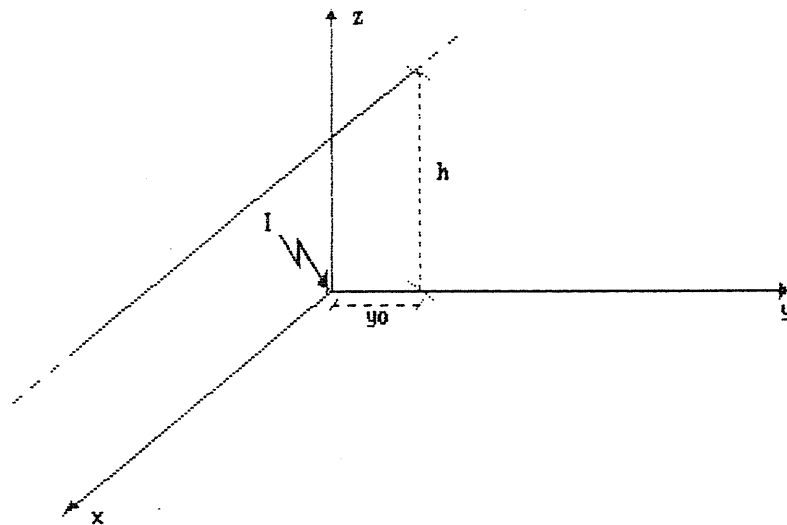


Figura 2.1 - Arranjo físico considerado e sistema de coordenadas correspondente.

São induzidos nesta linha uma corrente I , uma carga q e um potencial escalar V quando uma descarga atmosférica atinge o solo nas suas proximidades. O potencial escalar induzido na superfície do condutor pode ser escrito como:

$$V = V_i + k q \quad (2.4)$$

onde:

$$k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \quad \text{sendo: } h \Rightarrow \text{altura do condutor.}$$

$$r \Rightarrow \text{raio do condutor.}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m.}$$

Uma vez que o potencial indutor \vec{A}_i (calculado a partir do modelo proposto para a descarga no qual o canal é considerado vertical) é perpendicular à linha, pode-se obter o potencial vetor na direção x (partindo-se apenas da corrente no condutor) através da seguinte expressão:

$$A_x = l I \quad (2.5)$$

onde:

$l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r}$, quando despreza-se o campo no interior do condutor, o que é bastante aceitável nas frequências relativamente altas envolvidas.

De (2.3) e (2.5) obtém-se para o campo na superfície do condutor:

$$E_x = - \frac{\partial V}{\partial x} - l \frac{\partial I}{\partial t} \quad (2.6)$$

Desprezando-se a resistividade do condutor:

$$E_x = 0 \quad (2.7)$$

Aplicando (2.7) em (2.6), obtém-se:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = - l \frac{\partial I}{\partial t} \quad (2.8)$$

A equação da continuidade garante que:

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.9)$$

Substituindo (2.4) em (2.9):

$$k \frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial t} \quad (2.10)$$

Reescrevendo-se as expressões para k e l na forma:

$$\begin{cases} k = v_0 Z \\ l = (1/v_0) Z \end{cases} \quad (2.11)$$

onde:

$v_0 \Rightarrow$ velocidade da luz;

$$Z = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2h}{r} = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad (2.12)$$

Substituindo (2.11) em (2.8) e (2.10), obtém-se a corrente e o potencial escalar induzidos na linha a partir da solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{1}{v_0} Z \frac{\partial I}{\partial t} \\ Z \frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{1}{v_0} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{v_0} \frac{\partial V_l}{\partial t} \end{cases} \quad (2.13)$$

Introduz-se então a seguinte notação:

$$V = V_1 + V_2 \quad (2.14)$$

$$Z I = V_1 - V_2 \quad (2.15)$$

Levando (2.14) e (2.15) em (2.13), obtém-se duas equações diferenciais de primeira ordem:

$$\frac{\partial V_1}{\partial x} = -\frac{1}{v_0} \frac{\partial V_1}{\partial t} + \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial V_2}{\partial x} = \frac{1}{v_0} \frac{\partial V_2}{\partial t} - \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad (2.17)$$

As soluções de (2.16) e (2.17) são:

$$V_1 = \frac{1}{2v_0} \int_{u=-\infty}^{u=x} \frac{\partial V_i(u, t - [(x-u)/v_0])}{\partial t} du \quad (2.18)$$

$$V_2 = \frac{1}{2v_0} \int_{u=x}^{u=\infty} \frac{\partial V_i(u, t - [(u-x)/v_0])}{\partial t} du \quad (2.19)$$

Neste ponto torna-se interessante uma análise das expressões (2.18) e (2.19) para que seu sentido físico seja melhor percebido.

Busca-se, nesta seção, uma expressão para o potencial escalar induzido $V(x, t)$ num ponto qualquer do condutor. A solução do sistema de equações (2.13) é, portanto, a solução desejada. Quando a notação da equação (2.14) é apresentada, o que está sendo buscado é a representação do potencial escalar induzido como resultado da soma de duas parcelas: V_1 e V_2 . V_1 representa as contribuições para o potencial escalar induzido, localizadas à esquerda do ponto x . Da mesma forma, V_2 representa as contribuições localizadas à direita deste ponto. Uma vez que o condutor foi considerado infinito, é de se esperar que, de todos os pontos, surjam contribuições que, ao se propagarem, se somem e atinjam o ponto x . Este é o significado dos

limites de integração das equações (2.18) e (2.19).

Passa-se aqui à dedução de expressões para V_1 e V_2 a partir da solução analítica das equações (2.18) e (2.19). Derivando a equação (2.1) com relação a t , fazendo $t=t_0$ e $x=u_0$, tem-se:

$$\frac{\partial V_i(u_0, t_0)}{\partial t} = 2Z_0 I_0 h v_0 \frac{t_0}{\left\{ (v t_0)^2 + (1 - \beta^2) r_0^2 \right\}^{3/2}} \quad (2.20)$$

onde:

$$r_0 = \sqrt{u_0^2 + y^2}$$

Cálculo de V_1 :

De (2.18):

$$V_1 = \frac{1}{2v_0} \int_{u=-\infty}^{u=x} \frac{\partial V_i(u, t - [(x-u)/v_0])}{\partial t} du$$

Fazendo em (2.20):

$$\begin{cases} u_0 = u \\ t_0 = t - [(x-u)/v_0] \end{cases}$$

Resolvendo dessa forma a integral em (2.18),

tem-se:

$$V_1(x, t) = Z_0 I_0 h \beta \left\{ \left[\frac{(v_0 t - x) x - y^2}{[\beta^2 (v_0 t - x)^2 + y^2] \sqrt{x^2 + Ax + B}} \right] + \left[\frac{(v_0 t - x)}{\beta^2 (v_0 t - x)^2 + y^2} \right] \right\} \quad (2.21)$$

onde:

$$A = 2\beta^2(vot-x)$$

$$B = y^2(1-\beta^2) + \beta^2(vot-x)^2$$

Cálculo de V_z :

Fazendo em (2.20):

$$\begin{cases} u_0 = u \\ t_0 = t - [(u-x)/v_0] \end{cases}$$

Resolvendo dessa forma a integral em (2.19),

tem-se:

$$V_z(x,t) = Z_0 I_0 h \beta \left\{ - \left[\frac{(vot+x)x + y^2}{[\beta^2(vot+x)^2 + y^2] \sqrt{x^2 + Cx + D}} \right] + \left[\frac{(vot+x)}{\beta^2(vot+x)^2 + y^2} \right] \right\} \quad (2.22)$$

onde:

$$C = -2\beta^2(vot+x)$$

$$D = y^2(1-\beta^2) + \beta^2(vot+x)^2$$

2.5 - A Tensão Induzida.

Conhecido o potencial escalar induzido, deseja-se agora obter uma expressão para a tensão induzida. Neste momento, um ponto de discussão relativo à interação dos

campos com a linha deve ser entendido.

De acordo com a teoria apresentada por Rusck e defendida neste trabalho, deve ser dado um tratamento à componente vetorial do campo diferente daquele dado à componente escalar apresentado na seção anterior. Alguns pesquisadores discordam e propõem um mesmo modelo para a interação das duas componentes [16,17].

Quando se calcula o campo gerado pela descarga, observa-se que apenas a parcela correspondente ao potencial escalar possui componente na direção da linha, enquanto a parcela correspondente ao potencial vetor é perpendicular à mesma [1,3,25].

Na seção anterior obteve-se uma expressão para o potencial escalar induzido na linha. Tal expressão pressupõe a existência de componentes do potencial escalar indutor ao longo do eixo da linha. Por isso, chegou-se a expressões como (2.18) e (2.19) onde as contribuições existentes ao longo da linha, ao se propagarem, se somam. Isto pode ser visto pelos limites de integração das equações.

Quando se analisa a parcela relativa ao potencial vetor, vê-se que, devido à ausência de componente do mesmo na direção da linha, este não deve ser integrado como feito

com o potencial escalar, mas apenas deve ser somado ponto a ponto ao longo da linha. Dessa forma, o potencial vetor estaria contribuindo para elevar a tensão induzida mas não se propagaria, não devendo ser integrado como o potencial escalar indutor. Essa discussão será melhor entendida na apresentação da metodologia de cálculo proposta no capítulo 3.

A tensão induzida é a tensão que pode ser oscilografada a partir de um divisor de tensão localizado numa posição perpendicular entre o solo e um ponto da linha. Esta tensão é a integral de linha do campo existente entre os pontos de conexão do divisor, ou seja:

$$U = - \int_{z=0}^{z=h} \vec{E}_z \cdot d\vec{z} \quad (2.23)$$

O campo elétrico é composto de uma parcela devida ao campo indutor \vec{E}_i e outra devida às cargas na linha. De (2.23) escreve-se:

$$U = \left[- \int_{z=0}^{z=h} \vec{E}_i \cdot d\vec{z} \right] + k \cdot q \quad (2.24)$$

Substituindo (2.3) e (2.4) em (2.24), tem-se:

$$U = \int_{z=0}^{z=h} \left(\nabla V_i + \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \right) d\vec{z} + k \frac{1}{k} \left[V - V_i \right] \quad (2.25)$$

De onde vem:

$$U = V + h \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2.26)$$

Em (2.26) assumiu-se que $\int_0^h (\partial \vec{A}_i / \partial t) \cdot d\vec{z} = h \cdot (\partial \vec{A}_i / \partial t)$.

Esta consideração é aceitável admitindo-se que entre a altura da linha e o solo, o campo \vec{A}_i gerado pela descarga não sofre variações significativas, podendo ser assumido constante.

A equação (2.26) é, portanto, a equação de definição da tensão induzida. Das considerações feitas no início desta seção, pode-se introduzir a seguinte notação:

$$U_1 = V_1 + \frac{1}{2} h \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2.27)$$

$$U_2 = V_2 + \frac{1}{2} h \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2.28)$$

Esta notação tem como base o raciocínio apresentado na seção anterior, onde são separadas as contribuições localizadas à direita de determinado ponto daquelas localizadas à sua esquerda. A parcela referente ao potencial vetor foi definida de acordo com as considerações feitas no início da seção.

Reescrevendo (2.26) como:

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.29)$$

pode-se também escrever:

$$I = \frac{1}{Z} \left[U_1 - U_2 \right] \quad (2.30)$$

Tomando agora as expressões (2.2), (2.21), (2.22), (2.27) e (2.28), pode-se escrever, após algumas simplificações:

$$U_1(x,t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(v_0 t - x)}{y^2 + \beta^2 (v_0 t - x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (v_0 t - x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2) (x^2 + y^2)}} \right] \quad (2.31)$$

$$U_2(x,t) = U_1(-x,t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(v_0 t + x)}{y^2 + \beta^2 (v_0 t + x)^2} \left[1 + \frac{-x + \beta^2 (v_0 t + x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2) (x^2 + y^2)}} \right] \quad (2.32)$$

As expressões (2.29), (2.31) e (2.32) são as expressões para a tensão induzida num ponto \underline{x} de uma linha infinita sem descontinuidades, causada por uma descarga atmosférica vertical, com uma corrente de retorno em forma de degrau de amplitude I_0 , que atinge a origem do sistema de coordenadas adotado (fig.2.1). Essas expressões compõem o ponto de partida do trabalho e é a partir delas que serão calculadas tensões induzidas numa linha real (finita, apresentando trechos com impedâncias características diferentes, admitindo inclusive um trecho subterrâneo, podendo ser aterrada em diversos pontos).

CAPÍTULO 3

DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE COMPENSAÇÃO

3.1 - Introdução.

No capítulo 2 foi apresentada a modelagem proposta por Rusck para a obtenção de uma expressão analítica para a tensão induzida. Partindo dos potenciais escalar e vetor associados ao fenômeno da descarga atmosférica, Rusck propôs um modelo de interação entre a descarga e a linha e obteve uma expressão para a tensão induzida ($U(x,t)$) em um ponto qualquer da linha (equações (2.29), (2.31) e (2.32)).

Dentre as diversas considerações feitas, admitiu-se que a linha fosse infinita e sem descontinuidades, o que significa uma limitação da utilização direta da expressão obtida quando se analisa uma linha real.

Dessa maneira, torna-se necessário que um fator de correção, aqui chamado fator de compensação, seja aplicado à expressão para se calcular a tensão induzida numa linha real. É objetivo desse capítulo definir os fatores de compensação a serem utilizados.

3.2 - Determinação da Tensão Induzida nos Pontos de Descontinuidade da Linha Real.

O objetivo deste trabalho é avaliar as tensões induzidas em linhas onde existem diversos pontos de descontinuidade, quais sejam: trechos com impedâncias características distintas, como ocorre quando a linha possui um trecho subterrâneo, e também pontos de aterramento ao longo de sua extensão.

Nesta seção serão determinadas as alterações nas expressões para a tensão induzida apenas nos pontos de descontinuidade de uma linha. A forma de se levar em conta a propagação dessas alterações para que os efeitos de diversas descontinuidades sejam superpostos é apresentada no capítulo 4.

Pode-se analisar o problema sob o seguinte aspecto: caso não existissem descontinuidades em determinados pontos, as expressões (2.29), (2.31) e (2.32) poderiam ser calculadas em qualquer ponto da linha, e só isso bastaria para se determinar a tensão induzida. Devido à existência de uma descontinuidade, uma alteração ocorrerá neste ponto. Busca-se, então, expressar essa alteração em função das expressões apresentadas e da própria descontinuidade.

Para melhor entendimento, considera-se dois tipos de descontinuidade: aquelas localizadas nas extremidades da linha e aquelas localizadas em pontos intermediários.

3.2.1 - Alteração da Tensão nas Extremidades.

Conforme a teoria, a tensão induzida num ponto x é resultado da soma de duas parcelas: uma corresponde às contribuições localizadas à esquerda do ponto ($U_1(x,t)$) e a outra, àquelas localizadas à direita ($U_2(x,t)$).

Analisa-se, agora, o que ocorre com a tensão induzida quando a linha não é infinita e possui, em uma de suas extremidades, um resistor de aterramento de valor R , como na figura 3.1.

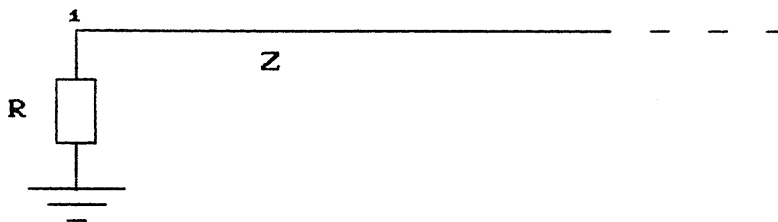


Figura 3.1 - Descontinuidade na extremidade de uma linha.

Caso não existisse essa terminação, a tensão induzida no ponto 1 da figura 3.1 seria: $U(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t)$. Pelas definições de $U_1(x,t)$ e $U_2(x,t)$ do capítulo

anterior, pode-se fazer as seguintes considerações:

- devido ao fato do ponto 1 estar localizado na extremidade esquerda da linha, o termo $U_1(x,t)$ não existirá mais, uma vez que não existem contribuições para a tensão induzida localizadas à esquerda deste ponto;

- o termo $U_2(x,t)$ continuará existindo, mas, neste caso, as contribuições localizadas à direita do ponto 1, ao se propagarem e atingirem essa descontinuidade, sofrem reflexões. Da teoria de ondas viajantes (Apêndice A), sabe-se que o coeficiente de reflexão para uma onda de tensão que se propaga numa linha com impedância característica Z e encontra uma descontinuidade de valor R é $(R-Z)/(R+Z)$.

Tem-se, portanto, duas compensações a serem introduzidas a partir da expressão (2.29): o cancelamento das contribuições localizadas à esquerda do ponto 1 ($-U_1(x,t)$), e as reflexões das contribuições localizadas à sua direita ($(R-Z)/(R+Z) \cdot U_2(x,t)$).

Pode-se, então, expressar a tensão induzida no ponto 1 da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 U'(x,t) &= \underbrace{U^{\text{Rueck}}(x,t)}_{U_1(x,t) + U_2(x,t)} + \underbrace{U^{\text{Compens.}}(x,t)}_{-U_1(x,t) + \left[\frac{R-Z}{R+Z}\right] U_2(x,t)} \\
 U'(x,t) &= \left[\frac{2R}{R+Z}\right] U_2(x,t) \qquad (3.1)
 \end{aligned}$$

Seguindo um raciocínio análogo para um resistor de aterramento localizado na extremidade direita da linha, tem-se:

$$U'(x,t) = \left(\frac{2R}{R+Z} \right) U_1(x,t) \quad (3.2)$$

3.2.2 - Alteração da Tensão num Ponto Intermediário.

Considere um resistor de aterramento R ligado a uma linha infinita de impedância característica Z , como na figura 3.2.

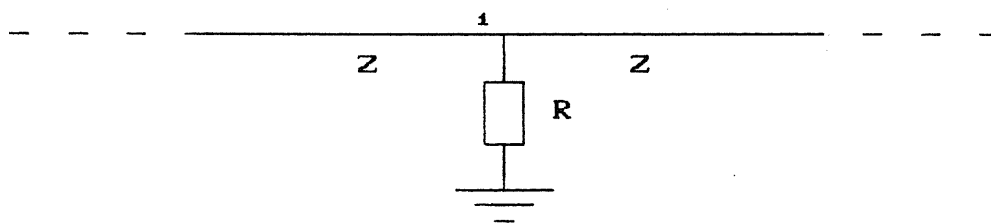


Figura 3.2 - Descontinuidade num ponto intermediário de uma linha.

Seguindo o mesmo raciocínio apresentado anteriormente para a extremidade da linha, pode-se afirmar que, caso não existisse o resistor de aterramento, a tensão induzida no ponto 1 seria a soma das contribuições $U_1(x,t)$ e $U_2(x,t)$.

Considerando-se a presença do resistor, vê-se que, à medida que as contribuições $U_1(x,t)$ e $U_2(x,t)$ atingem o ponto de descontinuidade, ocorrerão reflexões e a tensão

induzida terá um valor diferente daquele previsto inicialmente pelas expressões.

Utilizando-se novamente os conceitos de ondas viajantes, determina-se o coeficiente de reflexão das ondas incidentes na descontinuidade. Seu valor é :

$$\frac{(R//Z) - Z}{(R//Z) + Z} = - \frac{Z}{2R+Z}$$

Obs.: O símbolo $(R//Z)$ significa a impedância equivalente quando se tem a impedância R em paralelo com a impedância Z .

A tensão induzida no ponto 1 será, portanto:

$$U'(x,t) = U^{Rusck}(x,t) + U^{Compens.}(x,t)$$

$$U'(x,t) = \overbrace{U_1(x,t) + U_2(x,t)} + \overbrace{\left[\frac{-Z}{2R+Z} \right] \left[U_1(x,t) + U_2(x,t) \right]}$$

$$U'(x,t) = \left[\frac{2R}{2R+Z} \right] \left[U_1(x,t) + U_2(x,t) \right] \quad (3.3)$$

3.2.3 - Análise Qualitativa.

Para melhor entender os resultados obtidos na última seção, faz-se uma avaliação qualitativa de alguns valores de resistores, analisando as equações (3.1) e (3.3).

Aterrando-se uma das extremidades da linha com um resistor R , como na figura 3.1, tem-se:

$$U'(x,t) = U_z(x,t) \quad \text{se} \quad R=Z \quad (3.4)$$

$$U'(x,t) = 0 \quad \text{se} \quad R=0 \quad (3.5)$$

$$U'(x,t) = 2U_z(x,t) \quad \text{se} \quad R \rightarrow \infty \quad (3.6)$$

Na expressão (3.4) tem-se uma condição onde não ocorrem reflexões das contribuições $U_z(x,t)$ quando estas atingem a descontinuidade. Nesta situação não ocorrem as reflexões porque um resistor de aterramento de valor ôhmico igual à impedância característica da linha não constitui uma descontinuidade para as ondas nele incidentes. Tem-se uma condição de casamento de impedâncias.

Na expressão (3.5) observa-se que um aterramento de valor ôhmico zero anula a tensão induzida no ponto. Este é um fato também explicável pela teoria de ondas viajantes. Aqui um resistor de valor nulo gera um fator de reflexão para a tensão igual -1. Assim, as contribuições incidentes nesta descontinuidade são anuladas e a tensão induzida no ponto é nula.

Por outro lado, na expressão (3.6) tem-se um caso de reflexão total das contribuições $U_z(x,t)$ quando estas atingem a extremidade aberta da linha.

Fazendo uma análise de mesma natureza para um aterramento localizado num ponto intermediário da linha,

pode-se concluir, da equação (3.3):

$$U'(x,t) = 0 \quad \text{se} \quad R=0 \quad (3.7)$$

$$U'(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t) \quad \text{se} \quad R \rightarrow \infty \quad (3.8)$$

A condição expressa na equação (3.7) pode ser entendida de maneira análoga ao que foi feito na expressão (3.5).

Finalmente, para a expressão (3.8) pode-se concluir que não há alteração da tensão induzida prevista por Rusck quando o resistor de aterramento é de valor muito elevado. Neste caso o coeficiente de reflexão para as ondas de tensão incidentes é igual a zero.

3.3 - Fatores de Compensação Aplicáveis aos Pontos de Descontinuidade da Linha.

Os resultados obtidos na seção 3.2 constituem um ponto de grande interesse para a aplicação do método de cálculo da tensão induzida numa linha real que é apresentado no capítulo 4. Um ponto deve estar claro neste momento: uma descontinuidade foi tratada aqui como sendo a única existente ao longo da linha separadamente. Nesta análise não se pode prever o efeito resultante de diversos aterramentos localizados ao longo da linha.

São apresentadas na tabela 3.1 as parcelas a serem somadas à expressão (2.29) para se conhecer a tensão

induzida nas descontinuidades da linha. Isto facilitará a apresentação da metodologia de cálculo no capítulo 4.

Posição do Aterramento	Parcela a ser somada à expressão (2.29)
<i>Extremidade Esquerda</i>	$- U_1(x, t) + \left[\frac{R-Z}{R+Z} \right] U_2(x, t)$
<i>Extremidade Direita</i>	$- U_2(x, t) + \left[\frac{R-Z}{R+Z} \right] U_1(x, t)$
<i>Ponto Intermediário da Linha</i>	$\left[\frac{-Z}{2R+Z} \right] \left\{ U_1(x, t) + U_2(x, t) \right\}$

Tabela 3.1 - Fatores de compensação.

Estas são, portanto, as alterações (compensações) que devem ser aplicadas aos pontos de descontinuidade para se corrigir as expressões apresentadas no capítulo 2.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE CÁLCULO

4.1 - Introdução.

Nos capítulos 2 e 3 foram apresentadas as expressões gerais da tensão induzida, deduzidas para condições particulares de configurações de linhas.

As expressões do capítulo 2 (equações (2.29), (2.31) e (2.32)) são válidas apenas para uma linha infinita e sem descontinuidades. No capítulo 3 considera-se a possibilidade da linha ser finita e possuir descontinuidades. A restrição feita às equações (3.1), (3.2) e (3.3) é que, naquela dedução, considerou-se a existência da descontinuidade como sendo única em cada caso. Dessa forma, tais equações seriam aplicáveis apenas no ponto de descontinuidade, e o efeito de mais de uma descontinuidade na linha não foi previsto.

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma metodologia de cálculo capaz de superar as limitações apresentadas acima quando se deseja conhecer a tensão induzida em um ponto qualquer de uma linha.

4.2 - Superposição dos Efeitos de Diversas Descontinuidades.

A aplicação das expressões (3.1), (3.2) e (3.3), está limitada aos pontos de descontinuidade. Para que se conheça a tensão induzida em um ponto qualquer da linha, a propagação dos fatores de compensação deve ser levada em conta. Torna-se necessário, então, considerar a existência de todas as descontinuidades ao mesmo tempo, de forma que seus efeitos sejam superpostos e a tensão induzida possa ser conhecida em qualquer ponto da linha.

A forma utilizada para se levar em conta a propagação e a superposição de todos os fatores de compensação foi desenvolver um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos. Neste programa, os fatores de compensação são modelados como fontes que são injetadas nos pontos de descontinuidade da linha. Nas próximas seções são apresentadas a metodologia utilizada para o cálculo das tensões induzidas, assim como a modelagem das fontes de compensação.

Com base no que foi dito até agora, pode-se pensar na seguinte metodologia para o cálculo da tensão induzida:

passo 1:

Conhecidos a configuração da linha e os parâmetros

e localização da descarga atmosférica no solo, calcula-se a expressão (2.29) (válida para a linha infinita) em todos os pontos onde é de interesse conhecer a tensão induzida.

passo 2:

A partir da configuração da linha e das expressões (2.31) e (2.32), calcula-se os fatores de compensação a serem aplicados em todos os pontos de descontinuidade.

passo 3:

Modela-se, para o cálculo do transitório, a linha e as fontes de compensação a serem injetadas. As quedas de tensão provocadas na linha pelas fontes são associadas à tensão existente no ponto sem a descontinuidade, e à própria descontinuidade.

passo 4:

Calcula-se o transitório eletromagnético provocado pelas fontes injetadas na linha e obtém-se como resultado a então chamada tensão transitória de compensação em todos os pontos da linha onde é de interesse conhecer a tensão induzida.

passo 5:

Os efeitos de superposição e propagação de todas as descontinuidades da linha são finalmente considerados

quando soma-se os resultados obtidos no passo 1 com aqueles obtidos no passo 4. Tem-se, dessa maneira, a tensão induzida na linha real.

4.3 - Cálculo da Tensão Transitória de Compensação.

Está sendo buscada neste trabalho uma forma de se avaliar as tensões induzidas em linhas bastante diferentes daquela linha idealizada no capítulo 2. Pela metodologia proposta, é a partir da solução analítica, para o caso da linha infinita, que vai-se determinar a tensão induzida numa linha qualquer.

Neste momento, é importante fazer algumas considerações relativas a essa metodologia proposta. Quando se deseja conhecer as tensões e correntes transitórias provocadas por fontes concentradas num ponto específico de um sistema elétrico (por exemplo, uma descarga atmosférica incidindo diretamente numa linha, um transitório de chaveamento no sistema, etc.), métodos clássicos de cálculo de transitórios eletromagnéticos podem ser utilizados. Nesta área, pesquisas vêm sendo feitas no sentido de se obter modelos cada vez mais precisos para os elementos de circuito e os fenômenos envolvidos.

Por outro lado, quando busca-se conhecer tensões

induzidas por descargas atmosféricas, deve-se ter em mente que as fontes de excitação externas ao sistema são os campos eletromagnéticos produzidos pelas descargas. Estes campos se propagam pelo espaço à velocidade da luz, interagindo com a linha. As fontes, neste caso, não são mais concentradas em apenas alguns pontos da linha, são fontes distribuídas por toda sua extensão.

O cálculo da tensão induzida configura, portanto, um problema que, do ponto de vista computacional, é um pouco mais complexo na parte que diz respeito à modelagem das fontes.

Uma maneira de se resolver o problema seria discretizar-se a linha em elementos infinitesimais determinando-se, para cada elemento discretizado, a fonte equivalente a ser injetada no elemento [28]. Esta técnica, embora possua a grande vantagem de se trabalhar diretamente com as expressões de campo deduzidas no processo de modelagem do fenômeno, possui uma desvantagem, do ponto de vista computacional, relativa aos problemas com os quais se depara quando se busca um cálculo otimizado em termos de precisão, memória e tempo de processamento. Do ponto de vista de precisão, necessita-se de uma discretização da linha num número máximo de segmentos porque, dessa forma, o cálculo das fontes associadas aos campos é mais preciso; em

contrapartida, quanto maior a discretização, maior o tempo de processamento e o espaço de memória exigido. Por outro lado, desejando-se um cálculo mais rápido que demande menos memória, deve-se discretizar menos a linha, dividindo-a em elementos de comprimentos maiores, perdendo-se contudo em precisão.

Pela metodologia proposta, uma vez que parte-se da solução analítica de um caso particular, o efeito de propagação e interação dos campos já está implícito na expressão utilizada. Do ponto de vista computacional, nesta metodologia só existem fontes nos pontos de descontinuidade. O mérito aqui está em se transformar um problema de fontes distribuídas uniformemente ao longo de uma linha num problema de fontes concentradas, facilmente resolvido por técnicas de ondas viajantes. Esta é, portanto, a justificativa para se adotar tal metodologia. Uma série de outros detalhes poderão ser percebidos quando da apresentação da implementação dessa metodologia nas seções seguintes.

4.4 - Dedução das Fontes de Compensação.

As fontes de compensação a serem aplicadas no cálculo do transitório têm por finalidade fazer com que os efeitos causados pelas descontinuidades se propaguem e

influenciem o valor da tensão induzida em toda a linha. Implementou-se o método de cálculo de transitórios proposto por Dommel [5,6]. Este método é apresentado no apêndice B.

Partindo-se do tipo de linha que se deseja estudar, podendo compreender um trecho aéreo conectado a um trecho subterrâneo, torna-se interessante apresentar a modelagem das fontes de compensação separadamente. A justificativa para tal distinção é que no trecho subterrâneo considera-se não haver indução, uma vez que partiu-se do pressuposto de que o solo possui resistividade nula. As fontes correspondentes aos pontos de descontinuidade deste trecho não podem, portanto, ser modeladas da mesma forma que são modeladas as fontes localizadas ao longo do trecho aéreo.

Do ponto de vista de implementação computacional, existe uma vantagem em se adotar esta metodologia proposta devido à sua simplicidade. A expressão básica para cálculo da tensão induzida (equação (2.29)) é uma função do tempo. Para ser calculada, deve-se, então, escolher um determinado intervalo de tempo. Por outro lado, o cálculo do transitório é feito em intervalos de tempo fixos que correspondem ao intervalo de integração [5,6]. Uma vez que as expressões para a tensão de compensação são as expressões da tensão induzida na linha infinita, apenas multiplicadas por

coeficientes associados aos fatores de reflexão, determina-se, então, um único intervalo de tempo para cálculo. Fazendo assim, ao se executar o passo 1 da metodologia proposta na seção anterior, basta multiplicar os valores encontrados por coeficientes pré-definidos e já se tem os valores das injeções das fontes na linha.

4.4.1 - Fontes do Trecho Aéreo.

Da dedução das equações (3.1), (3.2) e (3.3), tem-se os seguintes fatores de compensação:

Extremidade Esquerda:

$$U^{\text{Compens.}} = - U_1(x, t) + (R-Z)/(R+Z) \cdot U_2(x, t) \quad (4.1)$$

Extremidade Direita:

$$U^{\text{Compens.}} = (R-Z)/(R+Z) \cdot U_1(x, t) - U_2(x, t) \quad (4.2)$$

Ponto Intermediário:

$$U^{\text{Compens.}} = - (Z/2R+Z) \cdot (U_1(x, t) + U_2(x, t)) \quad (4.3)$$

Deve-se, portanto, criar fontes que produzam tais quedas de tensão nos respectivos pontos de descontinuidade. Pelo método de cálculo de transitórios proposto por Dommel, as fontes devem ser modeladas como fontes de corrente. Deve-se buscar, então, a modelagem de fontes capazes de criar as tensões desejadas nos pontos e, além disso, suas impedâncias internas devem representar as descontinuidades

de tal forma a produzirem as reflexões das ondas incidentes naqueles pontos. Seguindo este princípio, deduz-se:

para a extremidade esquerda:

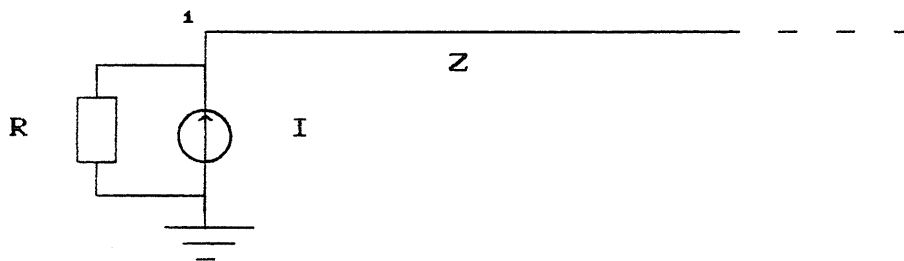


Figura 4.1 - Fonte de compensação injetada na extremidade esquerda da linha.

Para que a tensão no ponto 1 da figura 4.1, causada pela injeção da corrente I, seja o valor expresso pela equação (4.1), deve-se ter:

$$I = \frac{U^{\text{Compens.}}}{R//Z} = \left[-U_1(x,t) + \left(\frac{R-Z}{R+Z} \right) U_2(x,t) \right] \frac{R+Z}{RZ}$$

$$I = - \left(\frac{R+Z}{RZ} \right) U_1(x,t) + \left(\frac{R-Z}{RZ} \right) U_2(x,t) \quad (4.4)$$

para a extremidade direita:

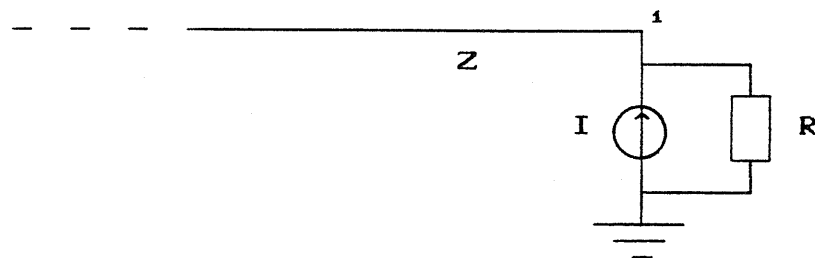


Figura 4.2 - Fonte de compensação injetada na extremidade direita da linha.

Analogamente à extremidade esquerda, deduz-se:

$$I = \left[\frac{R-Z}{RZ} \right] U_1(x,t) - \left[\frac{R+Z}{RZ} \right] U_2(x,t) \quad (4.5)$$

para um ponto intermediário:

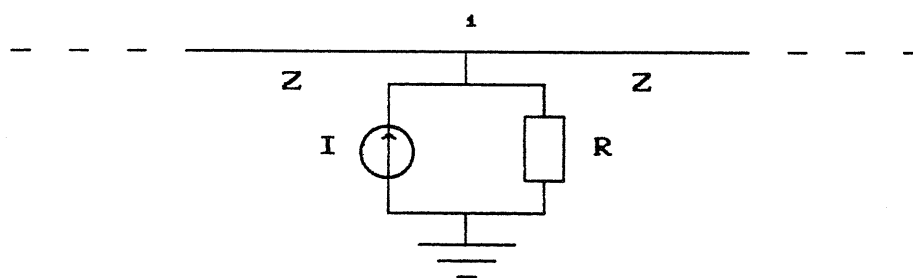


Figura 4.3 - Fonte de compensação injetada num ponto intermediário da linha.

Para que a tensão no ponto 1 da figura 4.3, provocada pela injeção da corrente I, seja o valor expresso na equação (4.3), deve-se ter:

$$I = \frac{U^{\text{Compens.}}}{R/Z/Z} = \left\{ \left[-\frac{Z}{2R+Z} \right] \left[U_1(x,t) + U_2(x,t) \right] \right\} \frac{2R+Z}{RZ}$$

$$I = - \frac{U_1(x,t) + U_2(x,t)}{R} \quad (4.6)$$

As equações (4.4), (4.5) e (4.6) representam, portanto, as expressões para as correntes a serem injetadas em pontos de descontinuidades localizados ao longo do trecho aéreo da linha.

4.4.2 - Fontes do Trecho Subterrâneo.

Para que a dedução das fontes de compensação a serem injetadas em pontos de um trecho subterrâneo seja realizada, considere inicialmente a figura 4.4 que representa uma linha compreendendo um trecho aéreo conectado a um trecho subterrâneo possuindo, no ponto de transição, um resistor de aterramento.

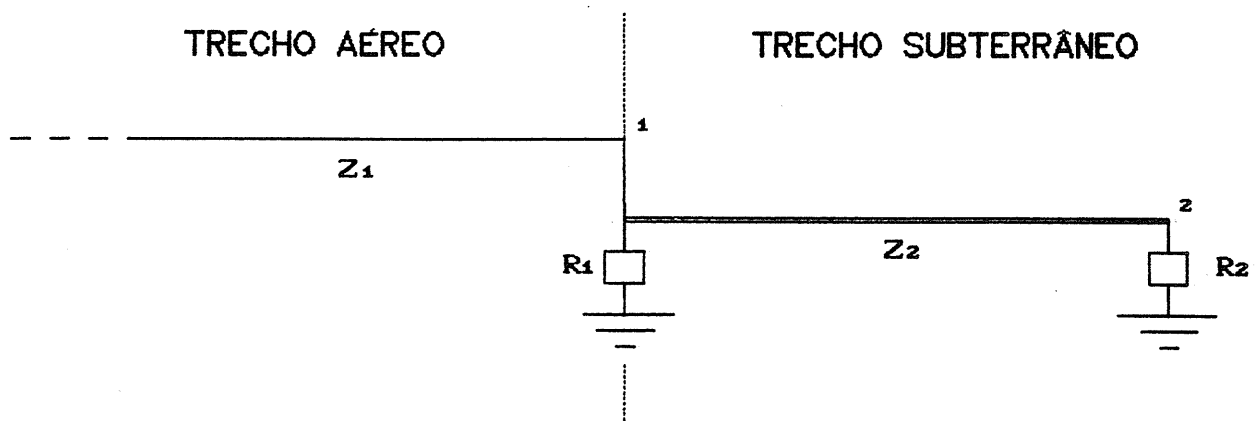


Figura 4.4 - Representação de uma linha possuindo trechos aéreo e subterrâneo.

Assim como o trecho aéreo, o subterrâneo também pode ser multi-aterrado, como ocorre freqüentemente com um cabo telefônico que tem sua blindagem aterrada em diversos pontos. O aterramento aqui tem por finalidade diminuir os valores das tensões que atingem o ponto 2 da figura 4.4. Este ponto pode corresponder a uma central telefônica ou a algum equipamento sensível às sobretensões atmosféricas.

O procedimento de dedução das fontes de compensação e também de cálculo da tensão induzida neste trecho da linha é um pouco diferente daquele proposto para o trecho aéreo. Lembrando a metodologia proposta na seção 4.2 e considerando-se que não há indução ao longo do trecho subterrâneo, pode-se definir a seguinte metodologia de cálculo da tensão neste trecho da linha:

passo 1:

Conhecidas as posições relativas descarga/linha, calcula-se a expressão (2.29) no ponto de transição (ponto 1 da figura 4.4).

passo 2:

Como não há contribuições para a tensão induzida localizadas à direita deste ponto, deve-se injetar uma fonte de corrente que produza uma tensão que, somada à expressão (2.29), dê como resultado a tensão induzida na

extremidade direita da linha.

Para a linha da figura 4.4 isto seria equivalente a injetar uma fonte de compensação capaz de produzir no ponto 1 uma tensão igual a:

$$U^{\text{Compens.}} = \left\{ \frac{(R_1 // Z_2) - Z_1}{(R_1 // Z_2) + Z_1} \right\} U_1(x, t) - U_2(x, t) \quad (4.7)$$

Modelando a fonte de corrente, tem-se:

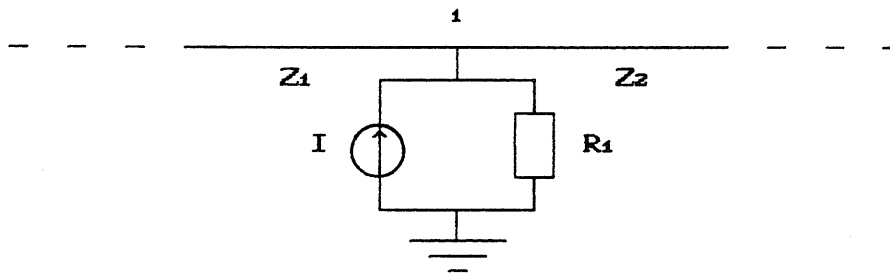


Figura 4.5 – Fonte de compensação injetada no ponto de transição.

O valor da corrente injetada será:

$$I = \frac{U^{\text{Compens.}}}{(R_1 // Z_1 // Z_2)}$$

Após algumas simplificações:

$$I = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 Z_2} - \frac{1}{R_1} \right] U_1(x, t) - \left[\frac{Z_2 + Z_1}{Z_1 Z_2} + \frac{1}{R_1} \right] U_2(x, t) \quad (4.8)$$

passo 3:

A partir do ponto 1, quando se caminha ao longo do

trecho subterrâneo, pode-se imaginar a seguinte situação:

Primeiramente, admite-se que a linha não possua descontinuidades ao longo do trecho subterrâneo. Dessa forma, a tensão induzida em qualquer ponto deste trecho deve ter o mesmo valor da tensão na transição, mas deve estar defasada desta de um tempo relativo ao tempo de trânsito entre a transição e o ponto considerado. Para se obter esta tensão, duas parcelas devem ser somadas: a parcela referente à equação (2.29) aplicada ao ponto de transição e devidamente defasada no tempo, e a parcela relativa à tensão transitória de compensação que aparecerá automaticamente no ponto, devidamente defasada no tempo, através do cálculo do transitório.

Quando o ponto intermediário corresponde a um ponto de descontinuidade, deve-se também injetar neste nó do sistema uma fonte capaz de representar as ondas refletidas na descontinuidade. Esta fonte é deduzida de forma análoga àquela deduzida para um ponto intermediário do trecho aéreo (figura 4.3, equação 4.6). A diferença é que, aqui, para $U_1(x,t)$ e $U_2(x,t)$, as expressões são calculadas para a posição x relativa à transição, mas defasadas de um tempo que corresponde ao tempo de trânsito entre a transição e o ponto considerado.

No ponto intermediário, onde existe um resistor de aterramento de valor R (figura 4.6), tem-se:

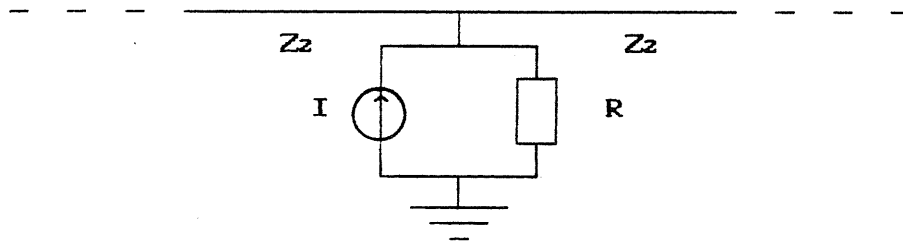


Figura 4.6 - Fonte de compensação injetada num ponto intermediário do trecho subterrâneo.

$$I = - \frac{U_1^*(x,t) + U_2^*(x,t)}{R} \quad (4.9)$$

onde:

$U_1^*(x,t)$ e $U_2^*(x,t)$ correspondem aos valores da tensão induzida no ponto de transição defasados de um tempo igual ao tempo de trânsito correspondente.

Para a extremidade do trecho subterrâneo, calcula-se a expressão (2.29) devidamente defasada e, para as ondas refletidas na descontinuidade, faz-se:

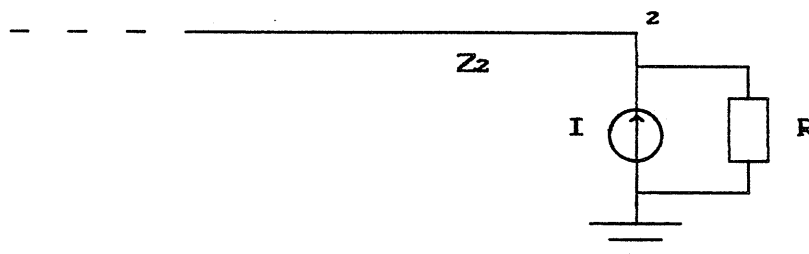


Figura 4.7 - Fonte de compensação injetada na extremidade do trecho subterrâneo.

onde:

$$I = \frac{\left(\frac{R-Z_2}{R+Z_2} \right) \left[U_1^*(x,t) + U_2^*(x,t) \right]}{R/Z_2}$$

Após simplificações:

$$I = \left(\frac{R-Z_2}{RZ_2} \right) \left[U_1^*(x,t) + U_2^*(x,t) \right] \quad (4.10)$$

4.5 - Apresentação do Programa Implementado.

Definida a metodologia de cálculo, implementou-se um programa para microcomputadores de 16 bits, compatíveis com o IBM-PC, em linguagem Pascal. A figura 4.8 constitui um fluxograma resumido do mesmo. Seguem alguns comentários a respeito de cada bloco do fluxograma.

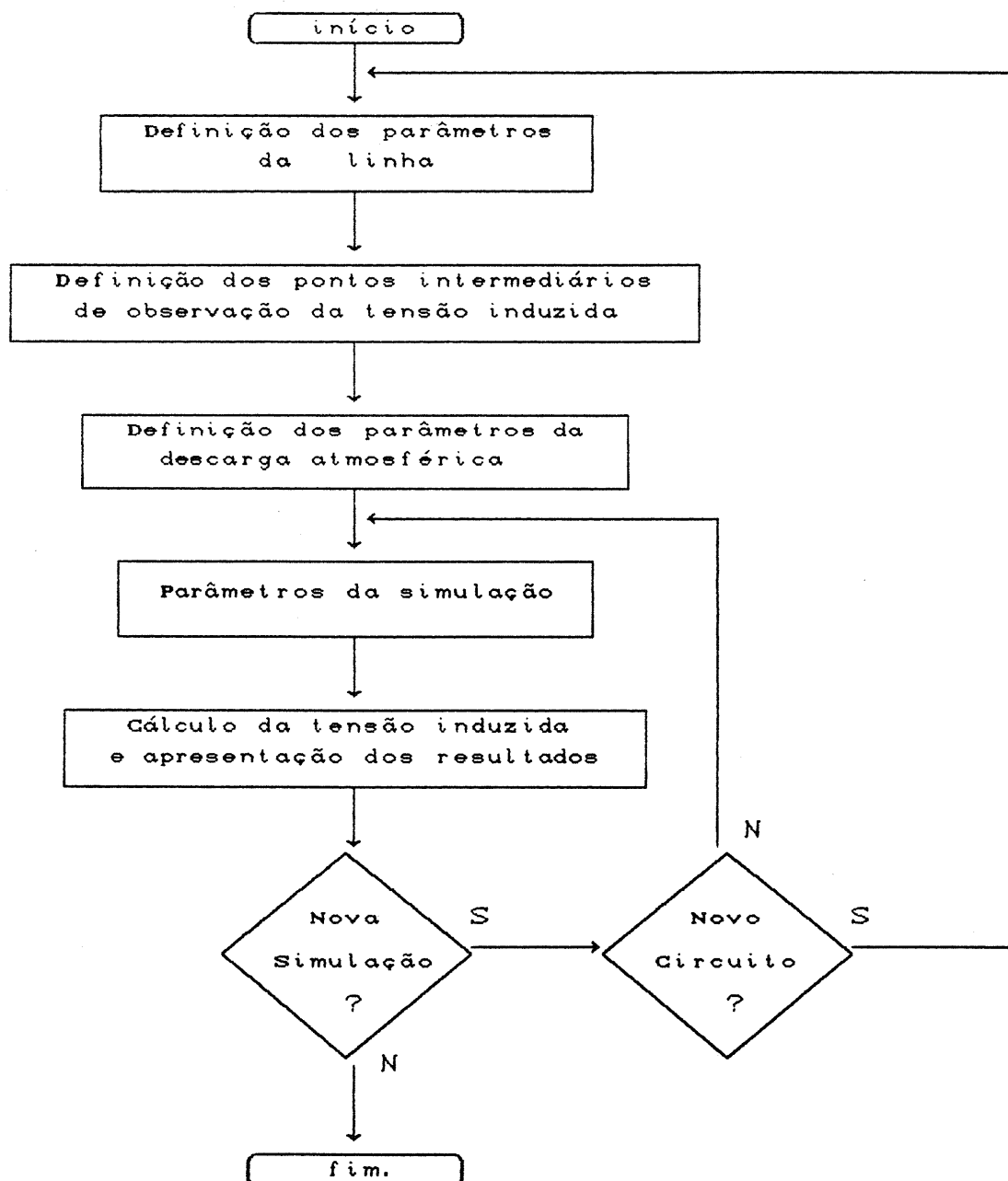


Figura 4.8 - Fluxograma do programa implementado.

4.5.1 - Parâmetros da Linha.

Os parâmetros necessários à simulação são: comprimento dos trechos aéreo e subterrâneo, impedâncias características, altura do trecho aéreo e posição dos aterramentos.

4.5.2 - Pontos de Observação Intermediários.

Os pontos de descontinuidade da linha, incluindo necessariamente o ponto de transição e as extremidades, são pontos onde é necessária a injeção de fontes de compensação. Quando se deseja calcular a tensão induzida num ponto que não constitui uma descontinuidade, deve-se seccionar a linha neste ponto para que aí sejam, automaticamente, realizados os cálculos. Em termos do cálculo do transitório, cria-se apenas um nó adicional no sistema.

4.5.3 - Parâmetros da Descarga.

Devem ser definidos: a localização da descarga no terreno, o valor de pico, a velocidade de propagação e o tempo de frente da corrente de retorno.

Um detalhe importante deve ser observado neste momento com relação ao parâmetro tempo de frente. As

equações até aqui deduzidas partiram da consideração de uma corrente de retorno em forma de degrau. Para que elas possam ser aplicadas para uma corrente cuja forma de onda não é um degrau, faz-se uma aproximação da corrente de retorno que se deseja simular, através da superposição de diversos degraus defasados. Utilizando tal princípio, poderiam ser simuladas descargas com quaisquer tempos de frente e de semi-cauda.

O procedimento para se compor a cauda da onda seria a soma de degraus negativos defasados. Durante o desenvolvimento do programa foram feitas simulações que levaram à conclusão de que a consideração de um tempo de semi-cauda finito produz um efeito de intensidade muito menor que aquele devido ao tempo de frente. Em termos do valor de pico da tensão induzida, o fato de considerar-se um tempo de cauda infinito não leva a diferenças significativas. A explicação para este fato é que as descargas atmosféricas reais possuem tempos de semi-cauda muito maiores que os tempos de frente [10]. Portanto, optou-se por considerar apenas o parâmetro tempo de frente para a composição da forma de onda da corrente.

4.5.4 - Parâmetros para Simulação.

São especificados: tempo de simulação, escala de tensão para saída gráfica, intervalo de integração para

cálculo do transitório, número de degraus para composição da frente de onda da corrente e pontos onde a forma de onda da tensão induzida será apresentada.

4.5.5 - Cálculo da Tensão Induzida / Apresentação de Resultados.

De acordo com a metodologia proposta na seção 4.2, o cálculo da tensão induzida é feito a partir da superposição de duas parcelas: uma é a tensão induzida calculada pela expressão analítica definida no capítulo 2; a outra parcela é a tensão transitória de compensação obtida pelo programa de cálculo do transitório.

As duas parcelas são obtidas passo a passo durante o cálculo do transitório. Este procedimento é bastante simples do ponto de vista computacional, principalmente porque, conforme já foi mencionado em seções anteriores, na modelagem das fontes de compensação utiliza-se a expressão da tensão induzida na linha infinita multiplicada por fatores pré-definidos.

O programa possui uma saída em forma de gráfico de alta resolução podendo apresentar, na versão atual, a tensão induzida em até 6 pontos distintos da linha numa mesma simulação. Os resultados de uma simulação podem ser gravados

em disco para posteriormente serem superpostos a uma nova simulação. Isto permite uma comparação simples entre duas configurações no aparecimento da tensão induzida em um ponto específico da linha.

4.6 - Exemplo de Utilização do Programa.

Nesta seção utiliza-se o programa a título de exemplificação do cálculo. É apresentado um grupo de simulações com a finalidade de fornecer um visão geral da influência dos parâmetros da descarga e configurações de linhas no valor da tensão induzida. Os casos também foram simulados por Yokoyama [18]. São analisadas as influências de: distância da descarga à linha, tempo de frente, valor de pico e velocidade de propagação da corrente de retorno, comprimento da linha e valores dos resistores de aterramento localizados nas terminações da linha.

Considere a figura 4.9 que apresenta uma linha de altura h terminada por resistores de aterramento R_e . Nas suas proximidades, incide uma descarga atmosférica a uma distância y_0 perpendicular ao ponto localizado no centro da linha.

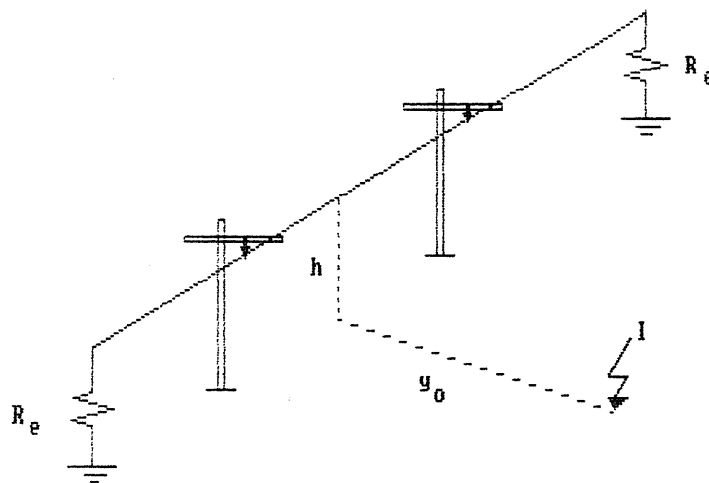


Figura 4.9 - Arranjo base estudado.

Um diagrama esquemático para representar o arranjo é apresentado na figura 4.10.

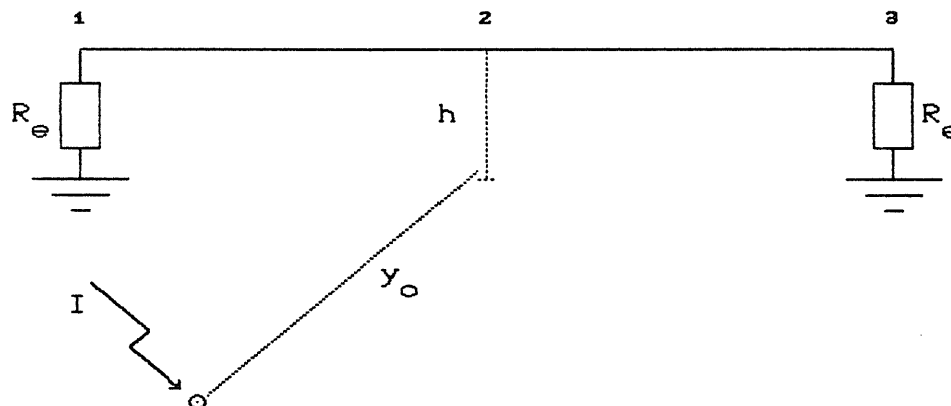


Figura 4.10 - Diagrama esquemático.

Para cálculo da tensão induzida no ponto central da linha, deve-se seccioná-la em duas linhas de comprimentos iguais, criando-se no ponto central um nó onde se calcula a tensão. Tem-se, assim, o seguinte circuito equivalente para

o cálculo do transitório na linha:

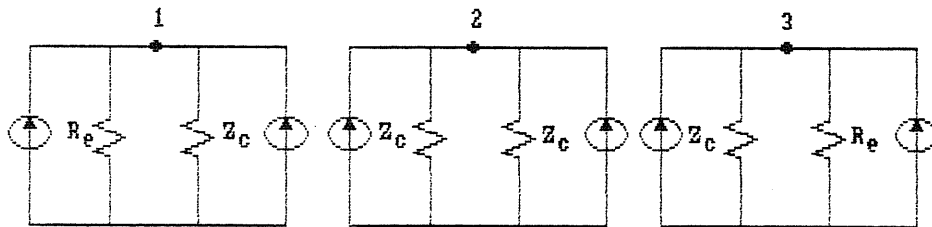


Figura 4.11 - Circuito equivalente para cálculo do transitório.

Considere inicialmente os seguintes

parâmetros:

Descarga Atmosférica:

Valor de pico da corrente : $I_0 = 100 \text{ kA}$.
 Tempo de frente : $t_f = 2 \text{ } \mu\text{s}$.
 Velocidade de propagação : $v = 30 \text{ m}/\mu\text{s}$.
 Distância até o centro da linha : $y_0 = 100 \text{ m}$.

Linha:

Comprimento : 1000 m .
 Altura : $H = 10 \text{ m}$.
 Impedância Característica : $Z_c = 511 \text{ } \Omega$.
 Resistência de aterramento : $R_e = 511 \text{ } \Omega$.

Na figura 4.12 tem-se a tensão induzida nos pontos 1 e 2 do diagrama esquemático.

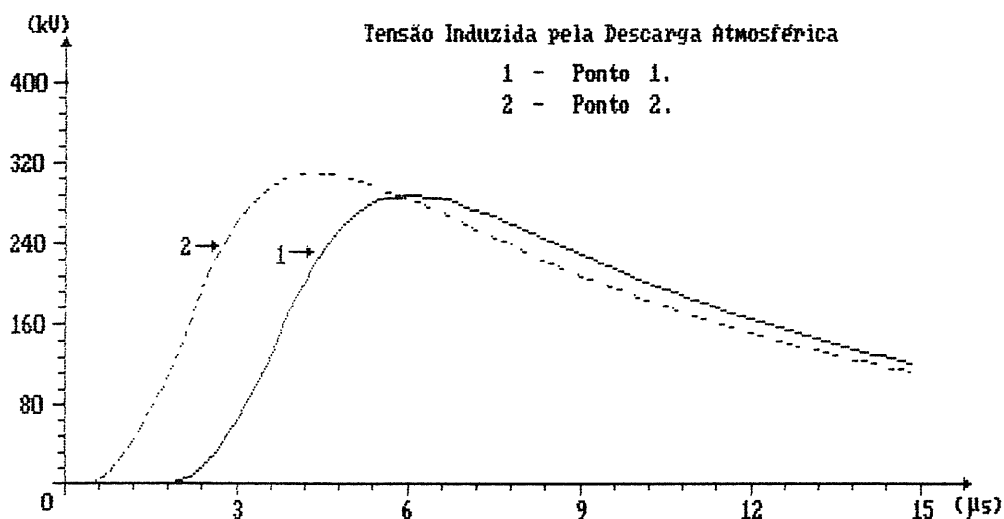


Figura 4.12 - Exemplo Representativo da Tensão Induzida em Dois Pontos da Linha.

Pode-se observar através da simulação que a tensão induzida é de maior intensidade no ponto da linha localizado mais próximo do ponto de incidência da descarga no solo. Além disso, vê-se que, pela geometria do problema, é induzida tensão na linha primeiramente no ponto mais próximo da descarga e posteriormente num ponto mais distante. Este fato está associado com o tempo de propagação do campo pelo espaço desde a descarga até os pontos de observação da tensão induzida.

4.6.1 - Influência da Distância da Descarga à Linha.

A figura 4.13 apresenta a tensão induzida no ponto central da linha quando a distância da descarga a esta é de 50, 100, 200 e 500 metros. Os demais parâmetros foram mantidos como aqueles do caso base.

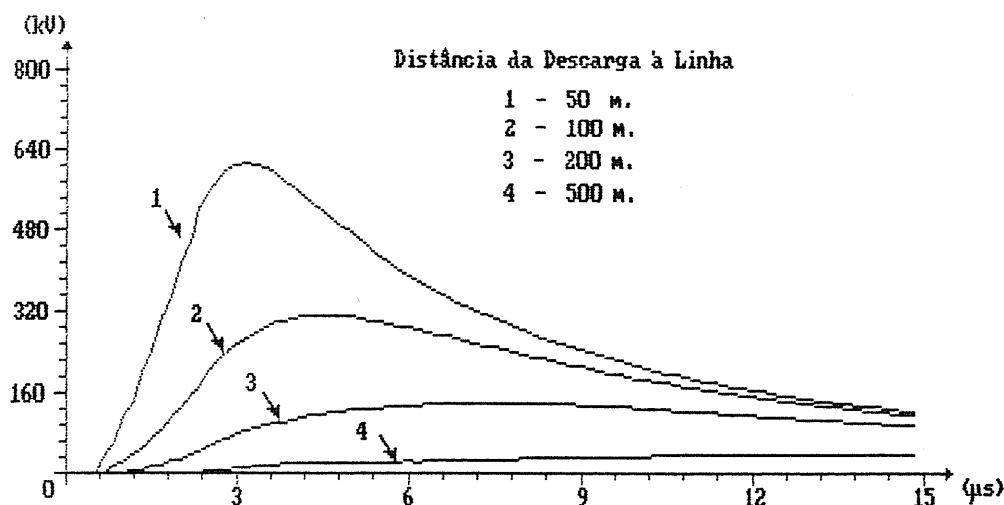


Figura 4.13 - Influência da distância entre o ponto de incidência da descarga no solo e a linha. (Tensão induzida no centro da linha).

Nota-se, a partir dessas simulações, uma tendência à diminuição do valor de pico da tensão induzida na linha à medida que aumenta-se a distância entre esta e o ponto de incidência da descarga no solo. Justifica-se este comportamento pelas menores intensidades dos campos gerados pela descarga em pontos mais afastados da linha.

4.6.2 - Influência do Tempo de Frente da Corrente de Retorno.

Partindo-se inicialmente do caso base, calcula-se a tensão induzida no ponto central da linha para correntes de retorno cujos tempos de frente são de 1, 2 e 5 μs . Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.14.

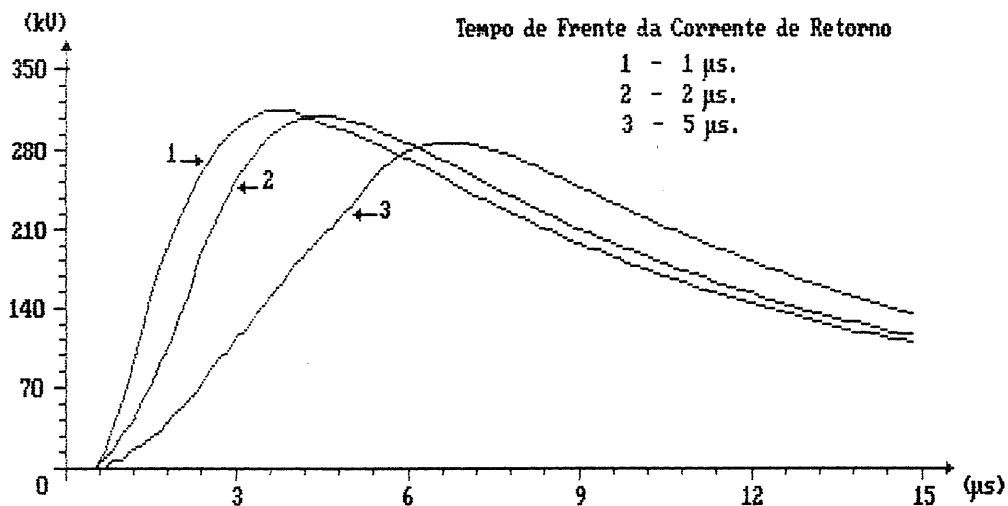


Figura 4.14 - Influência do tempo de frente da corrente de retorno. (Tensão induzida no centro da linha).

Estas simulações mostram que à medida que se aumenta o tempo de frente da corrente de retorno, o fenômeno da tensão induzida se torna mais lento e menos intenso. Esta tendência está associada à variação do campo que acompanha a variação da corrente de retorno.

4.6.3 - Influência do Valor de Pico da Corrente de Retorno.

O valor de pico da corrente de retorno é um parâmetro diretamente proporcional ao valor máximo da tensão induzida. Esta conclusão pode ser tirada diretamente a partir das expressões deduzidas no capítulo 2.

4.6.4 - Influência da Velocidade de Propagação da Corrente de Retorno de Retorno.

Voltando novamente ao caso base, obtém-se os seguintes resultados para a tensão induzida no ponto central da linha para velocidades de propagação da corrente de retorno de 30, 50 e 140 m/ μ s:

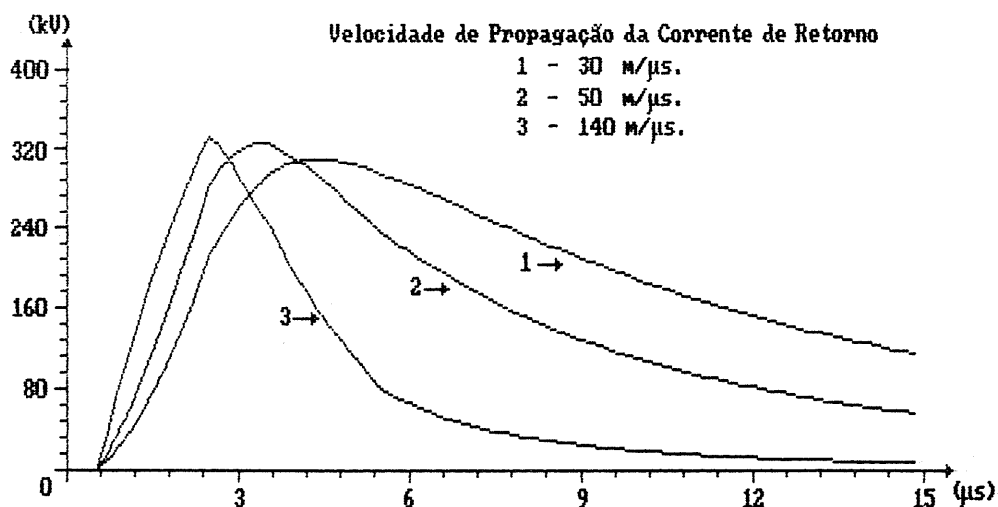


Figura 4.15 - Influência da velocidade de propagação da corrente de retorno. (Tensão induzida no centro da linha).

Observa-se pelos resultados que um aumento na velocidade de propagação da corrente de retorno faz com que o fenômeno da tensão induzida tenha uma menor duração. Para se compreender este comportamento, deve-se lembrar que quanto maior a velocidade de propagação da corrente de retorno, mais curto será o intervalo de tempo no qual ocorrem variações do campo eletromagnético e menor será a duração do fenômeno da tensão induzida.

4.6.5 - Influência do Comprimento da Linha.

Estas simulações foram feitas para a descarga (com os mesmos parâmetros do caso base) incidindo sempre a 100 metros de distância da linha e numa posição perpendicular ao ponto central da linha. Os valores da tensão induzida no ponto central da linha são apresentados na figura 4.16.

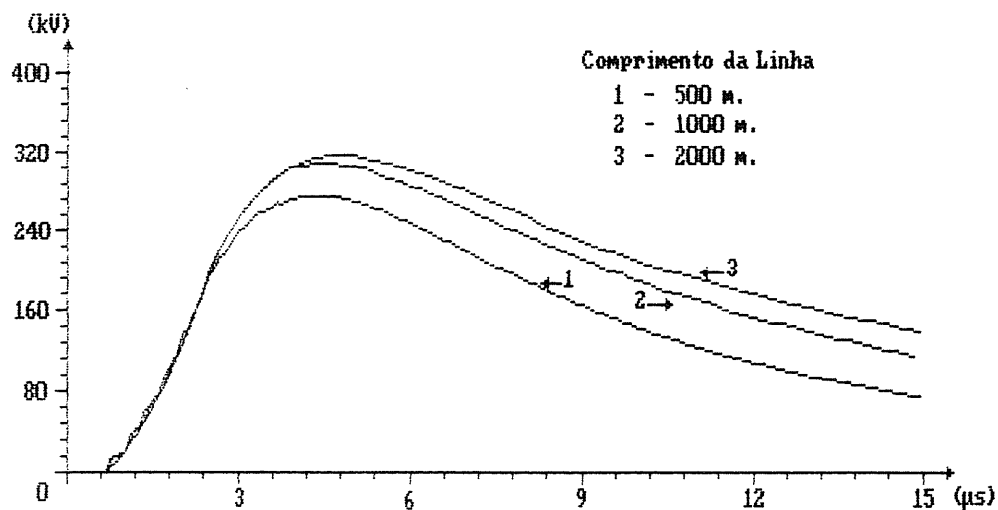


Figura 4.16 - Influência do comprimento da linha
(Tensão induzida no centro da linha).

Os resultados aqui obtidos mostram que, para maiores comprimentos de linha, as contribuições originadas em pontos remotos da mesma são de intensidades menores e levam mais tempo para atingirem o ponto mais próximo da descarga. Estas contribuições não causam portanto uma elevação significativa do valor máximo da tensão induzida.

4.6.6 - Influência da Resistência Terminal da Linha.

As simulações da figura 4.17 foram feitas para os parâmetros do caso base alterando-se os valores da resistência terminal da linha. São apresentadas as tensões induzidas nos pontos 1 e 2 do diagrama esquemático para linhas cujos resistores de aterramento são 10, 30, 100 e

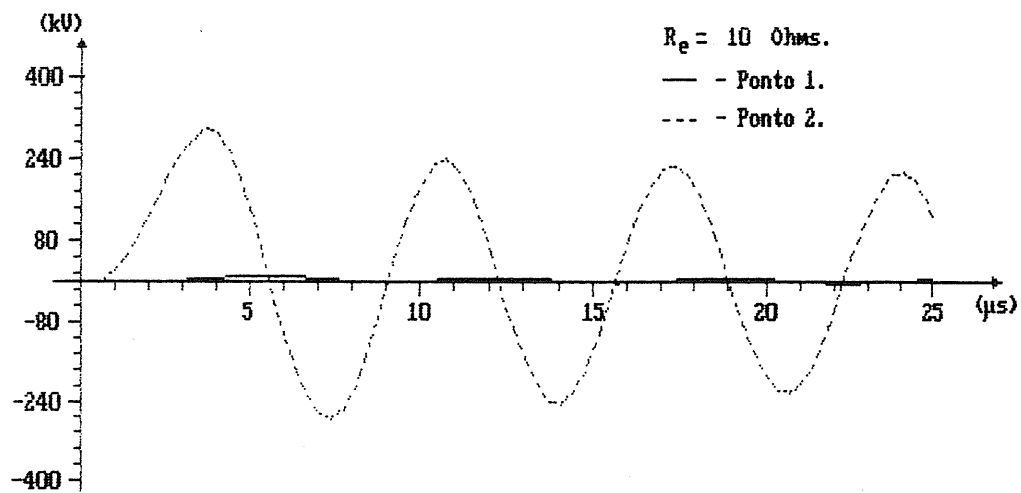
$1 \times 10^9 \Omega.$


Figura 4.17-a - Tensão induzida na linha aterrada nas extremidades.

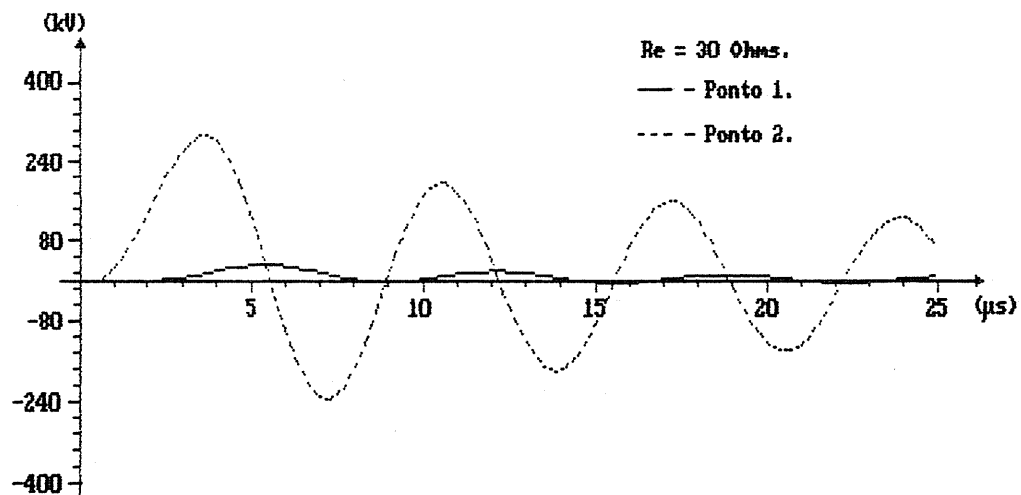


Figura 4.17-b - Tensão induzida na linha aterrada nas extremidades.

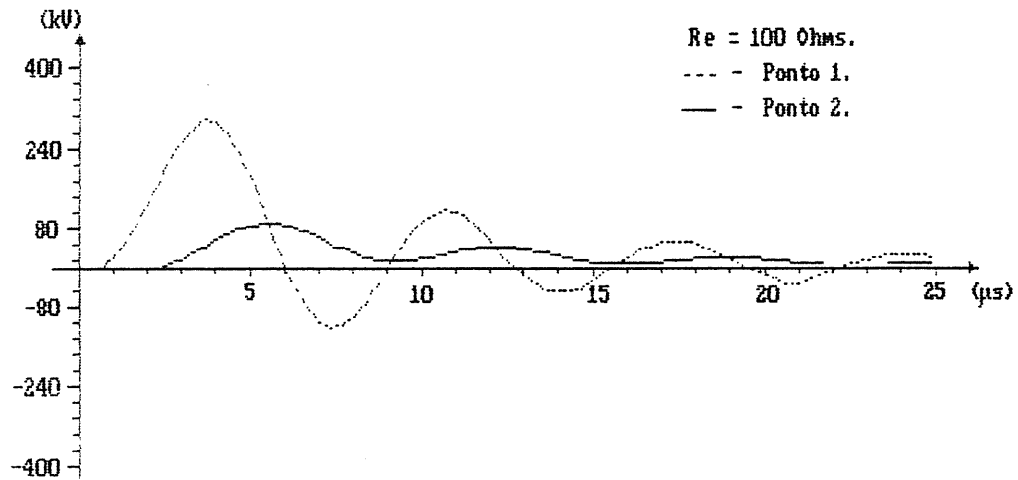


Figura 4.17-c - Tensão induzida na linha aterrada nas extremidades.

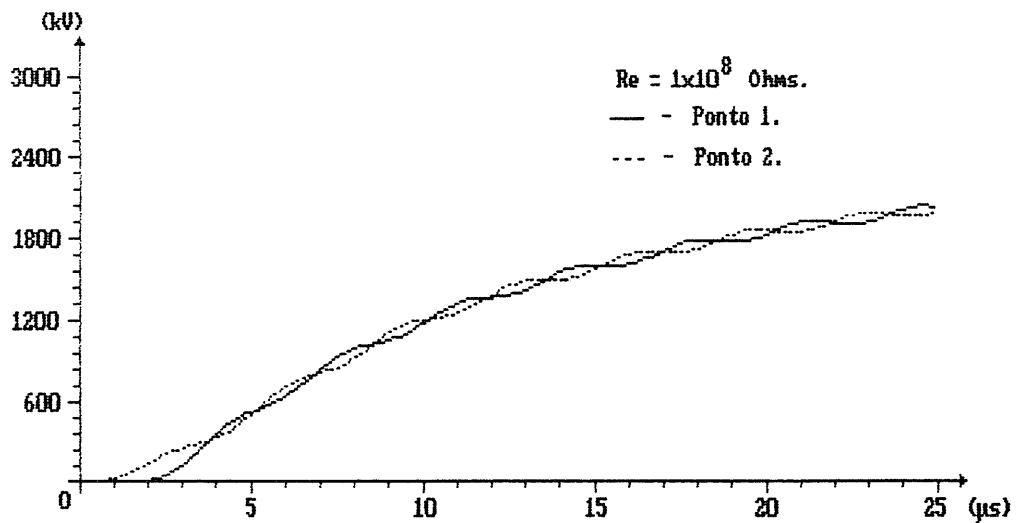


Figura 4.17-d - Tensão induzida na linha aterrada nas extremidades.

Observa-se com estas simulações que quanto menor for o valor ôhmico dos aterramentos colocados nas

extremidades da linha menores serão os valores das tensões induzidas nesta, principalmente nos pontos onde os aterramentos são feitos.

As simulações aqui apresentadas servem, pois, como ponto de partida para que se possa garantir a validade da metodologia implementada.

4.7 - Análise Comparativa dos Resultados Obtidos.

Nesta seção compara-se os resultados de algumas simulações realizadas com o programa implementado com trabalhos desenvolvidos por outros autores.

4.7.1 - Medições em Modelo Reduzido.

Conforme mencionado na introdução, a investigação do fenômeno da tensão induzida utilizando técnicas de modelo reduzido constituiu uma das dissertações elaboradas no âmbito do projeto no qual se insere este trabalho [26].

Construiu-se naquele trabalho um modelo reduzido em escala 1:200 para estudo do fenômeno. Buscou-se então uma modelagem para a corrente de retorno, o plano de terra e a linha de energia. Maiores detalhes sobre a utilização dessa técnica de modelo reduzido são encontradas no referido

trabalho.

A figura 4.18 apresenta um diagrama esquemático de uma montagem em modelo reduzido onde foram realizadas medições de tensão induzida. O capacitor C (20 pF) representa a capacitância de entrada do osciloscópio conectado àquele ponto da linha para medição.

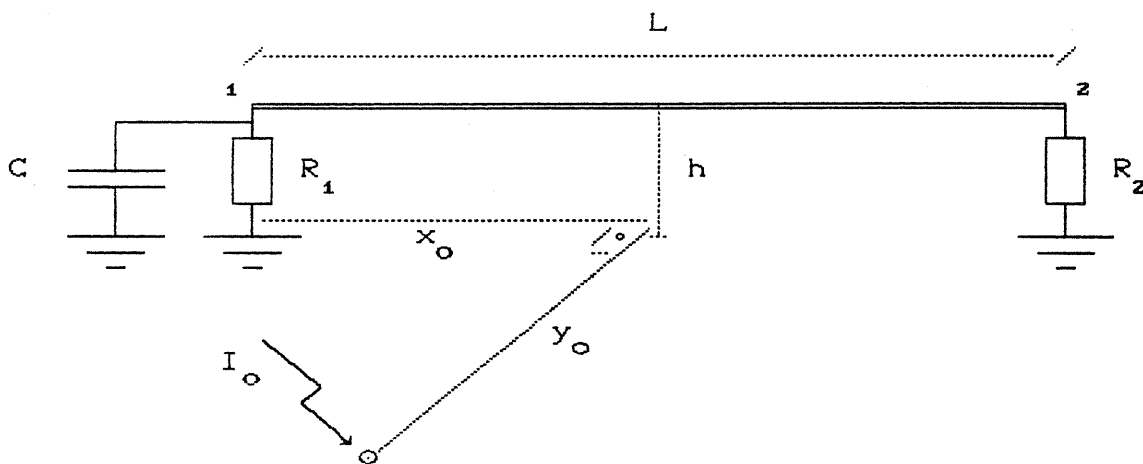


Figura 4.18 - Diagrama esquemático.

Dados da Linha:

Comprimento (L)..... = 5,5 m.
 Altura (h)..... = 0,05 m.
 Impedância Característica (Z_c)..... = 370 Ω .

Dados da Descarga Atmosférica:

Valor de Pico da Corrente de Retorno..... = 36 mA.
 Tempo de Frente da Corrente de Retorno..... = 12 ns.
 Velocidade de Propagação da Corrente de Retorno = 35,84 m/ μ s.
 Localização..... $\left\{ \begin{array}{l} x_0 = 3,20 \text{ m.} \\ y_0 = 0,68 \text{ m.} \end{array} \right.$

Em escala real, os dados correspondentes seriam:

<u>Linha:</u>	<u>Descarga Atmosférica:</u>
L = 1100 m	t_f = 2,4 μ s
h = 10 m	v = 35,84 m/ μ s
Z_c = 370 Ω	{ x_o = 640 m
	{ y_o = 136 m

Ao parâmetro valor de pico da corrente de retorno não é necessário aplicar o mesmo fator de escala 200. Um valor típico para a corrente de retorno em termos reais [10] poderia ser obtido aplicando-se, por exemplo, o fator 1×10^6 . Assim teríamos uma corrente de 36 kA de valor de pico.

Nas figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 tem-se a comparação entre as medições realizadas e as simulações feitas com o programa para diferentes terminações da linha.

Com relação às simulações, cabem duas observações: utilizou-se a forma alternativa de modelagem do capacitor (apêndice B), na qual ele é tratado como um "stub line". Os valores da impedância característica e tempo de trânsito do "stub line" utilizados nestes casos foram: $Z = 55 \Omega$, $\tau = 1,1$ ns. A simulação de uma capacitância através do "stub line" se mostrou bastante prática porque aproveitou-se o trecho subterrâneo da linha para simular seu efeito de carga. Dessa forma evitou-se a dedução de uma fonte de compensação específica para este caso.

As discrepâncias encontradas entre as formas de onda apresentadas estão associadas principalmente ao fato de se ter considerado a onda de corrente como tendo um tempo de cauda infinito, o que não corresponde à realidade. Para uma melhor concordância entre valores medidos e calculados bastaria se considerar o tempo de cauda da onda de corrente medida, o que não foi feito neste trabalho por opção (Capítulo 4). É importante frizar que este fato não constitui uma limitação ao método desenvolvido.

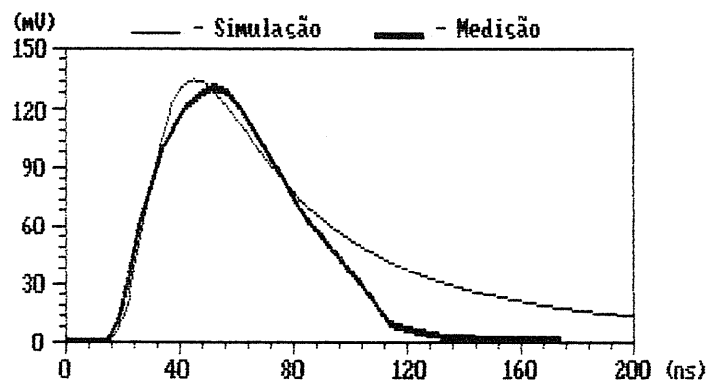


Figura 4.19 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no ponto 1. ($R_1 = \infty$, $R_2 = 370 \Omega$)

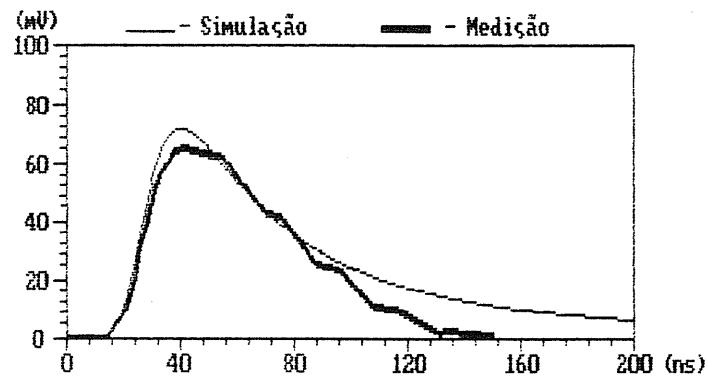


Figura 4.20 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no ponto 1. ($R_1 = 370 \Omega$, $R_2 = 370 \Omega$)

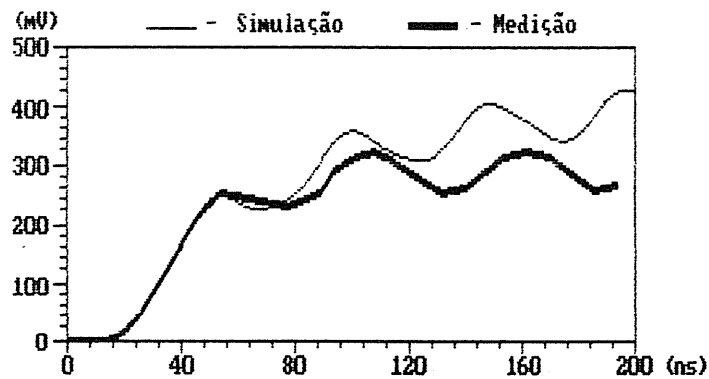


Figura 4.21 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no ponto 1. ($R_1 = \infty$, $R_2 = \infty$)

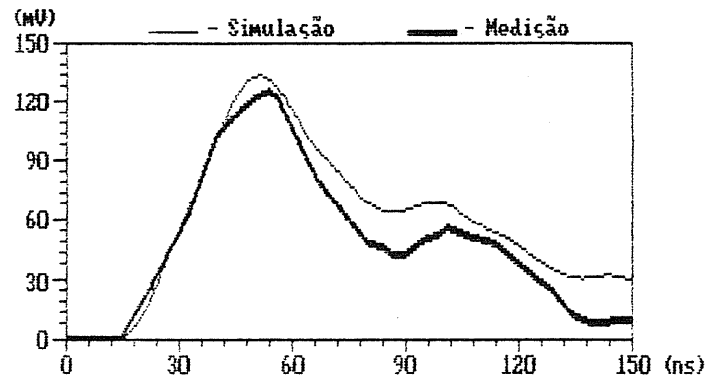


Figura 4.22 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no ponto 1. ($R_1 = 370 \Omega$, $R_2 = \infty$)

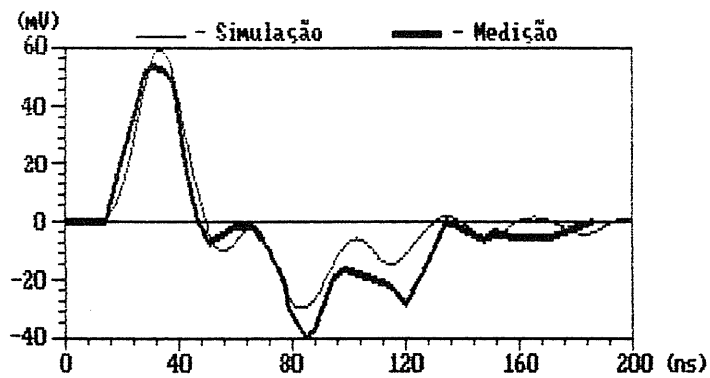


Figura 4.23 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no ponto 1. ($R_1 = 370 \Omega$, $R_2 = 0 \Omega$)

A figura 4.24 corresponde à outra montagem feita em modelo reduzido. Neste caso a linha possui um trecho subterrâneo constituído por um cabo coaxial com o condutor externo diretamente em contato com o plano de terra.

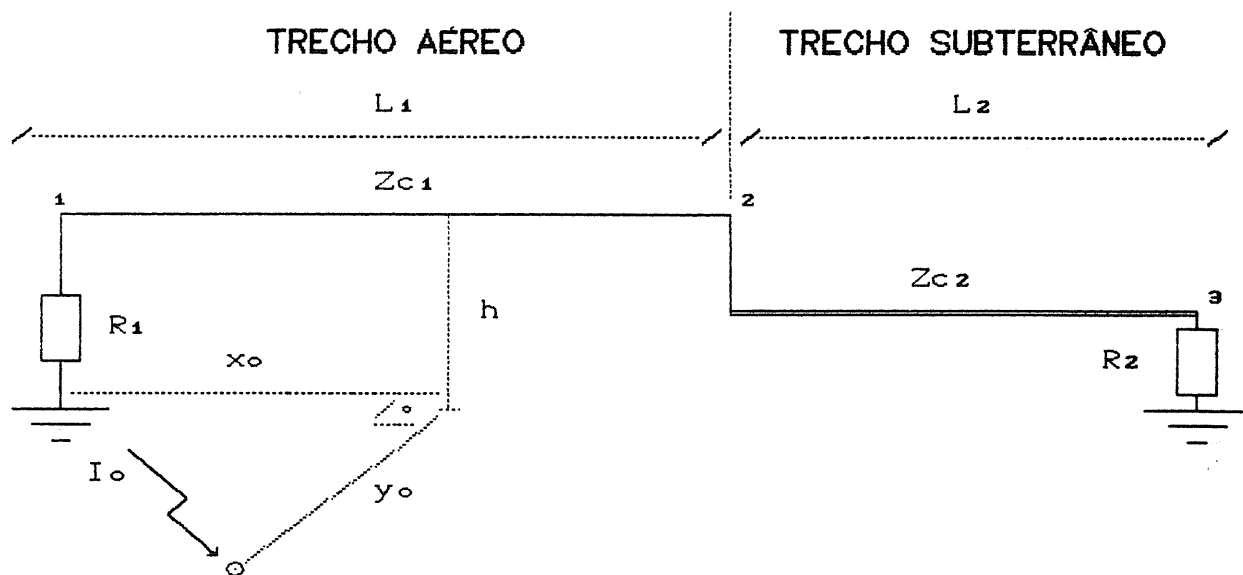


Figura 4.24 - Diagrama esquemático da linha em estudo.

Dados da Linha:

Comprimentos	$\left\{ \begin{array}{l} L_1 = 4,5 \text{ m.} \\ L_2 = 1,2 \text{ m.} \end{array} \right.$
Altura do trecho aéreo	$h = 0,05 \text{ m.}$
Impedâncias características	$\left\{ \begin{array}{l} Z_{c1} = 370 \ \Omega. \\ Z_{c2} = 50 \ \Omega. \end{array} \right.$
Terminações	$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = 50 \ \Omega. \\ R_2 = \infty. \end{array} \right.$

Dados da Descarga Atmosférica:

Valor de Pico da Corrente de Retorno.....	$=37 \text{ mA.}$
Tempo de Frente da Corrente de Retorno.....	$=25 \text{ ns.}$
Velocidade de Propagação da Corrente de Retorno.....	$=35,84 \text{ m}/\mu\text{s.}$
Localização.....	$\left\{ \begin{array}{l} x_0 = 2,45 \text{ m.} \\ y_0 = 0,61 \text{ m.} \end{array} \right.$

Em escala real, os dados correspondentes seriam:

<u>Linha:</u>	<u>Descarga Atmosférica:</u>
L1 = 900 m	I _o = 37 kA
L2 = 240 m	t _f = 5,0 μs
h = 10 m	v = 35,84 m/μs
Z _{c1} = 370 Ω	x _o = 400 m
Z _{c2} = 50 Ω	y _o = 122 m
R1 = 50 Ω	
R2 = ∞	

A figura 4.25 apresenta uma comparação entre os valores da tensão induzida medidos e calculados no ponto correspondente à extremidade do trecho subterrâneo da linha.

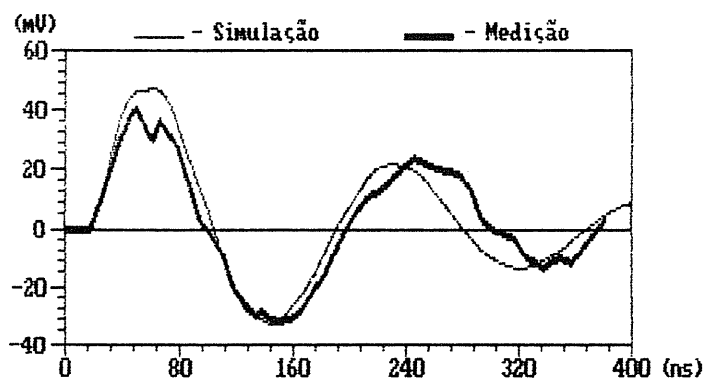


Figura 4.25 - Comparação entre Simulação e Medição em Modelo Reduzido. Tensão Induzida no Ponto 3.

Para esta simulação não foi considerada a capacitância de entrada do osciloscópio (Fig. 4.24)

Estas simulações mostram, portanto, que a metodologia desenvolvida leva a resultados bastante aceitáveis comparados às medições realizadas.

4.7.2 - Resultados Apresentados por Yokoyama.

Faz-se, neste ponto, uma comparação entre um caso de medição e simulação publicado por Yokoyama [20] e a simulação feita com o programa desenvolvido neste trabalho. Basicamente, a medição consistia também em um arranjo em modelo reduzido em escala 1:200. As condições para simulação foram as seguintes (Fig. 4.26):

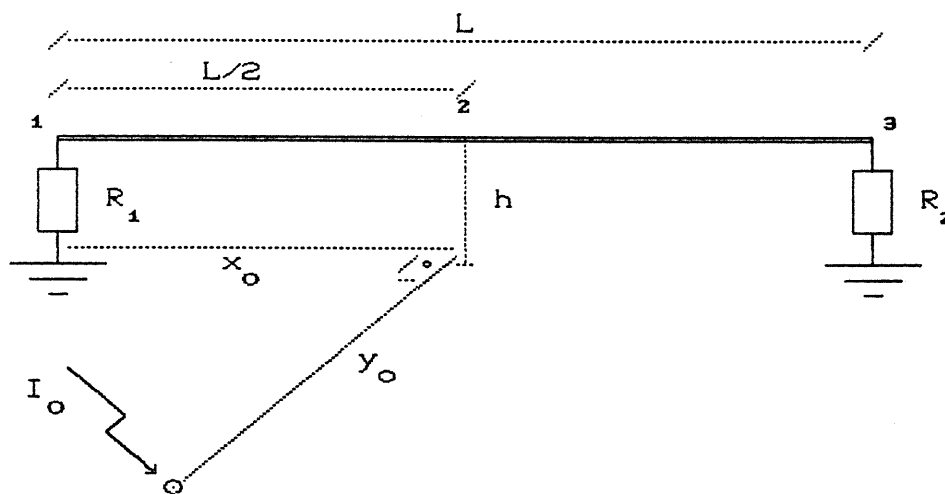


Figura 4.26 - Diagrama esquemático.

Dados da Linha:

Comprimento (L)..... = 5,0 m.
 Altura (h)..... = 0,05 m.
 Impedância Característica (Z_c)..... = 414,5 Ω .
 Terminações = $R_1=R_2= 414,5 \Omega$.

Dados da Descarga Atmosférica:

Valor de Pico da Corrente de Retorno.....=47 mA.

Tempo de Frente da Corrente de Retorno.....=5 ns.

Velocidade de Propagação da Corrente de Retorno =39 m/ μ s.

Localização..... $\left\{ \begin{array}{l} x_0 = 2,5 \text{ m.} \\ y_0 = 0,4 \text{ m.} \end{array} \right.$

Os resultados obtidos são apresentados a seguir na figura 4.27.

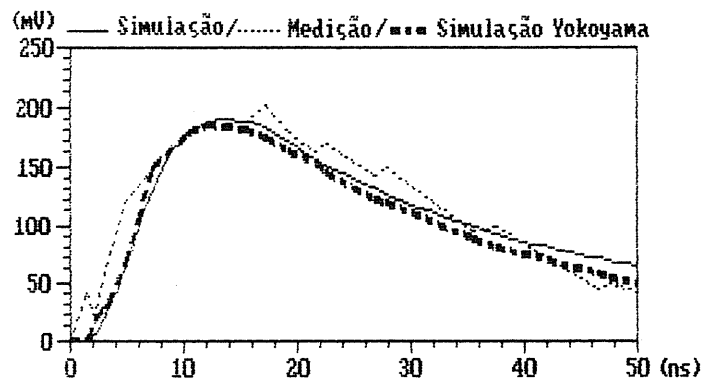


Figura 4.27 - Comparação entre Simulação e Artigo Publicado por Yokoyama [20]. Tensão Induzida no Ponto 2.

Tomando-se, então, como correta a implementação, o próximo passo é a utilização do programa para o estudo do comportamento das diferentes configurações de uma linha multi-aterrada frente às tensões induzidas por descargas atmosféricas. Este é o assunto tratado no capítulo 5.

CAPÍTULO 5

ESTIMATIVA DOS PROVÁVEIS COMPORTAMENTOS
DAS DIVERSAS CONFIGURAÇÕES DE UMA LINHA
EXPOSTA A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

5.1 - Introdução.

Este capítulo tem por finalidade estudar o efeito do multi-aterramento, no sentido de se obter menores níveis de tensões induzidas ao longo da blindagem de um cabo.

Estuda-se uma linha telefônica de dimensões típicas, compreendendo um trecho aéreo conectado a um trecho subterrâneo onde, conforme capítulo 4, considera-se não haver indução. Partindo-se de uma configuração da linha definida como base, estabelece-se o ponto ao longo de uma reta paralela à linha onde a incidência de uma descarga atmosférica seria crítica, causando o maior valor da tensão induzida num determinado ponto. Em seguida, calcula-se a tensão induzida na blindagem considerando-se a mesma localização da descarga no terreno, alterando-se, neste caso, a configuração da linha através de diversas combinações entre valores ôhmicos e distâncias entre aterramentos.

Os resultados aqui obtidos buscam dar uma idéia, do ponto de vista qualitativo, da eficácia de determinados arranjos de multi-aterramento, no sentido de se minimizar as tensões induzidas na blindagem dos cabos telefônicos. Estes resultados têm por finalidade fornecer subsídios para a determinação de esquemas de proteção de redes telefônicas multi-aterradas.

5.2 - Descrição do Caso Base para Estudo.

A configuração básica da linha tomada para estudo consiste de um condutor de impedância característica 480Ω , comprimento de 1500 metros, localizado a uma altura de 6 metros acima do solo, conectado a um cabo subterrâneo de impedância característica 100Ω e comprimento de 500 metros. Considera-se a existência de dois pontos de aterramento: o primeiro de 480Ω , conectado à extremidade do trecho aéreo, e o outro de 5Ω , conectado à extremidade do trecho subterrâneo.

Para análise do caso base, o aterramento do trecho aéreo tem por finalidade estabelecer uma condição de casamento de impedâncias, eliminando as reflexões que poderiam surgir neste ponto. O valor do aterramento do trecho subterrâneo é o valor estabelecido por norma para o aterramento da blindagem dos cabos nas centrais telefônicas.

A figura 5.1 constitui o diagrama esquemático para o arranjo estudado no caso base.

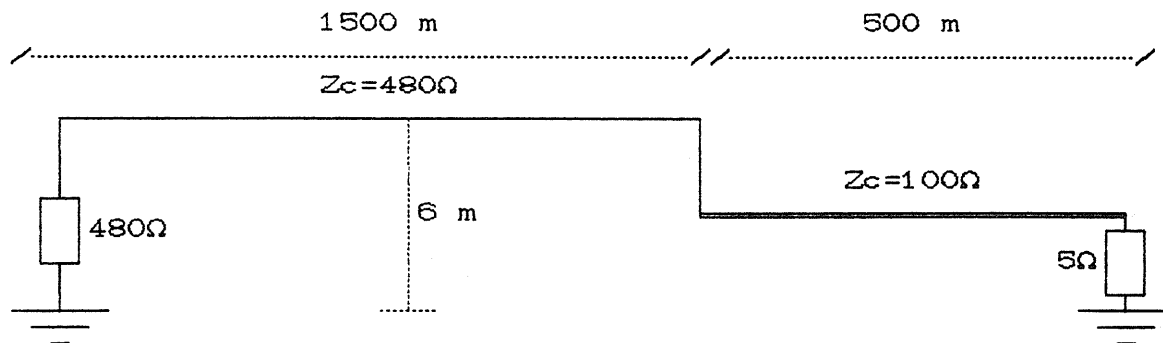


Figura 5.1 - Diagrama esquemático da linha em estudo.

5.3 - Parâmetros e Localização da Descarga Atmosférica.

Foram definidos, para as simulações, os seguintes parâmetros para a corrente de retorno da descarga:

Valor de pico : 80 kA. (10%)

Tempo de frente : 2 μ s. (90%)

Velocidade de propagação : 30 m/ μ s. (arbitrário)

Estes parâmetros foram escolhidos de forma tal a se analisar uma descarga que, de acordo com os dados estatísticos encontrados na bibliografia [10], representasse uma condição que, embora não fosse representativa de uma descarga típica, possuísse uma probabilidade de ocorrência real na prática. Esta é, portanto, uma descarga com um conteúdo energético acima dos valores médios encontrados, mas possível de ser encontrada na realidade. Os valores

entre parênteses representam a probabilidade de ocorrência daqueles parâmetros. Arbitrou-se um valor admissível para a velocidade de propagação uma vez que não existe um consenso quanto à relação entre este parâmetro e os demais parâmetros da descarga.

Após definidos os parâmetros da descarga necessários ao cálculo da tensão induzida, o segundo passo é a determinação do ponto de incidência no solo. Inicialmente, foi definida a distância entre a descarga e a linha. Arbitrou-se, então, a distância de 100 metros. Esta é uma distância aceitável, tendo como base o raio de atração (distância mínima a partir da qual a descarga incidiria diretamente na linha) que é algo em torno de algumas dezenas de metros para a linha em estudo. Definida a distância perpendicular, buscou-se o ponto ao longo de uma reta paralela à linha e distante desta de 100 metros, onde a descarga atmosférica considerada provocaria a maior tensão induzida na extremidade do trecho subterrâneo. Esta preocupação vem do fato de que este ponto na extremidade do trecho subterrâneo corresponde, por exemplo, a um ponto onde pode estar instalada uma central telefônica que possui equipamentos sensíveis às sobretensões atmosféricas.

Após realizadas algumas simulações, chegou-se à conclusão de que o ponto crítico para a incidência da

descarga, ao longo de uma reta distante 100 metros da linha e paralela a esta, é o ponto localizado na altura do ponto médio do trecho aéreo. A figura 5.2 apresenta os resultados das simulações para a descarga incidindo em 3 pontos diferentes. O ponto tomado como referência para representar as distâncias é aquele localizado na extremidade mais à esquerda da linha.

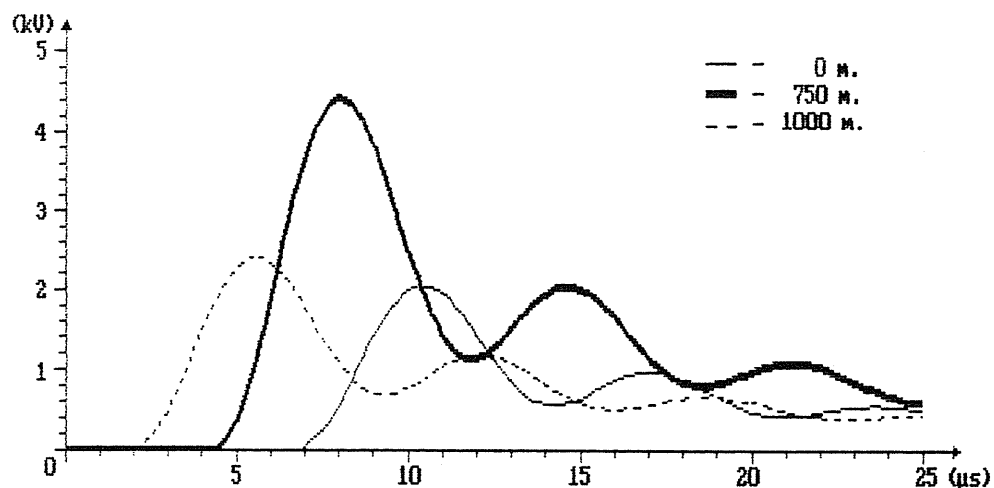


Figura 5.2 - Tensão induzida na blindagem de um cabo telefônico, numa central, para diferentes pontos de incidência da descarga no solo.

5.4 - Avaliação do efeito de aterramentos.

A tabela 5.1 é o resultado de um grupo de simulações onde aterrou-se a blindagem ao longo do trecho aéreo a cada 300 metros, desde o ponto de transição aéreo/subterrâneo, variando-se apenas o seu valor ôhmico.

Com estas simulações, pode-se avaliar a redução do valor de pico da tensão induzida na blindagem do cabo, na central telefônica a partir do valor dos aterramentos. Em todas as simulações manteve-se constantes os parâmetros da descarga atmosférica anteriormente definidos, assim como sua localização no solo.

R (OHM)	V _{PICO} (VOLT)
Caso Base	4500
500	2100
300	1600
100	700
30	310
15	240

Tabela 5.1 - Avaliação do efeito do multi-aterramento ao longo do trecho aéreo no valor da tensão induzida na blindagem do cabo, na central telefônica.

É importante mencionar que estes resultados são válidos para a descarga atmosférica considerada. Cabe lembrar que as fontes de excitação externas são os campos eletromagnéticos que se propagam pelo espaço à velocidade da luz. O ponto do espaço onde estes campos são gerados (o ponto de incidência da descarga no solo) é, portanto, um fator determinante na composição da tensão induzida.

São analisados, a seguir, outros esquemas de aterramento. Na figura 5.3, existem apenas dois pontos de aterramento como no caso base: apenas as extremidades da linha são aterradas. O valor do aterramento no trecho subterrâneo é mantido em 5Ω . Na extremidade do trecho aéreo, faz-se um aterramento de 1Ω . Embora tal aterramento seja difícil de se obter na prática, esta simulação serve apenas para mostrar que um aterramento localizado naquela posição, por menor que seja seu valor ôhmico, não será efetivo a ponto de baixar o valor da tensão induzida na extremidade do trecho subterrâneo. Pode-se pensar, assim, numa distância de proteção efetiva, ou seja, uma distância entre o equipamento que se deseja proteger e um ponto da linha a partir da qual não será necessário o aterramento da linha, uma vez que não se conseguirá uma diminuição da tensão induzida no ponto em questão.

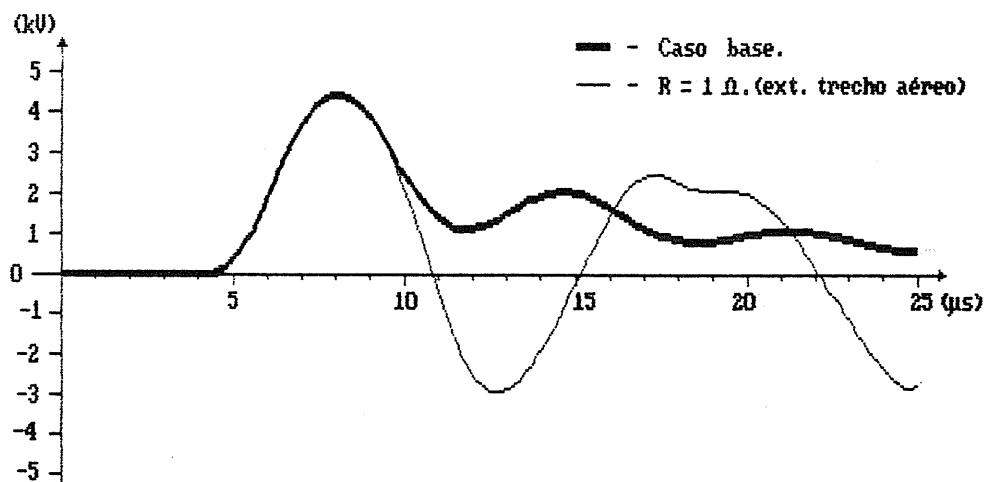


Figura 5.3 - Distância efetiva de proteção.

Na figura 5.4 são apresentados os resultados das simulações feitas para a linha configurada com apenas uma modificação relativa ao caso base: um aterramento adicional (R_t) no ponto de transição da linha, de aérea para subterrânea. Os resultados obtidos mostram o quanto um aterramento neste ponto pode ser efetivo no sentido de se baixar a tensão induzida na outra extremidade do trecho subterrâneo.

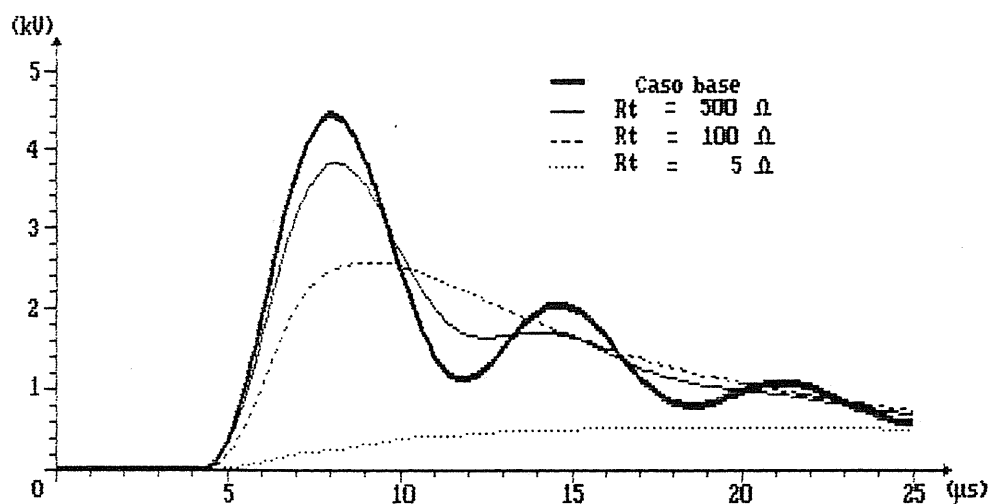


Figura 5.4 - Efeito do aterramento no ponto de transição sobre a tensão induzida na extremidade do trecho subterrâneo.

Finalizando, a figura 5.5 apresenta as tensões induzidas na extremidade do trecho subterrâneo para a linha possuindo aterramentos (R) apenas ao longo deste trecho. Os aterramentos foram dispostos, a partir do ponto de

transição, a cada 100 metros. Os resultados obtidos dão uma idéia do quanto cada valor ôhmico pode ser efetivo na redução da tensão induzida no ponto em questão.

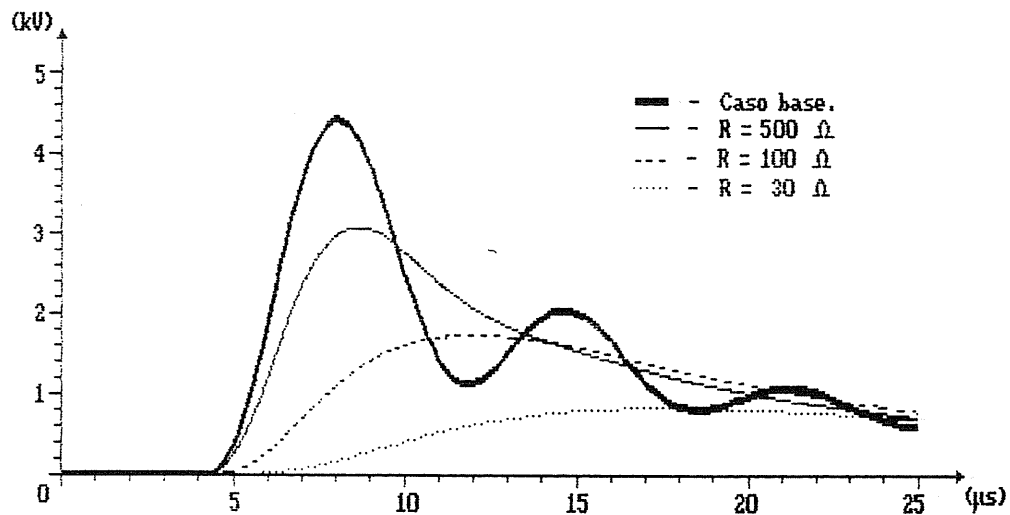


Figura 5.5 - Efeito do multi-aterramento no trecho subterrâneo.

Estes grupos de simulações, embora não sejam suficientes para se chegar a resultados conclusivos, servem para mostrar a potencialidade do programa em se estudar as tensões induzidas. A dificuldade em se definir critérios a partir destas simulações está ligada, principalmente, ao fato dos parâmetros e da localização de uma descarga atmosférica real no solo variarem sobre uma ampla faixa de valores. Para que se pudesse estabelecer critérios, seria necessário um tratamento probabilístico ao programa, variando os parâmetros e a localização da descarga. Também

deveria ser feita uma análise de outros fatores como nível ceráunico, alterações de relevo, existência de edificações nas proximidades da rede, etc. Dessa forma, as conclusões quanto ao critério de aterramento poderiam ser tiradas a partir de dados não tão determinísticos como os utilizados nestas simulações.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 - Introdução.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais relativas ao trabalho desenvolvido. São também apresentadas propostas de continuação, para que se possa estender as conclusões iniciais tiradas a partir da utilização do programa no capítulo 5 a um universo mais amplo.

6.2 - Conclusões Finais.

Conforme mencionado no início do texto, este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa que busca aprimorar os conhecimentos na área das descargas atmosféricas. É um trabalho que, por si só, não teria maior consistência se questões básicas relativas ao fenômeno não fossem respondidas.

O fato de se adotar uma modelagem já conhecida para a descarga atmosférica não significa que questionamentos profundos não tenham sido feitos durante o desenvolvimento de todo o trabalho. As conclusões a que se

chegou a partir dos outros trabalhos desenvolvidos no projeto vêm fortalecer a idéia de que a modelagem aqui utilizada, a partir de suas considerações iniciais, leva a resultados perfeitamente aceitáveis.

Com relação à metodologia utilizada para o cálculo, cabe mencionar que é extremamente potente. Após demandar um certo esforço para se chegar às expressões analíticas para a tensão induzida, implementou-se uma metodologia simples, do ponto de vista computacional, e se chegou a uma ferramenta igualmente simples de ser utilizada. Caso, futuramente, se chegue a modelos mais complexos para representar o fenômeno da descarga atmosférica, a adaptação desta ferramenta, aqui desenvolvida, para novos modelos não será inviabilizada. Será necessário apenas outro esforço para se chegar a novas expressões analíticas para a tensão induzida, ou tomar como base para o cálculo das fontes de compensação a solução numérica da tensão induzida numa linha infinita e sem descontinuidades.

A utilização do programa para o estudo do comportamento de um condutor multi-aterrado, no sentido de se tirar conclusões genéricas e se definir critérios de proteção para uma rede telefônica, demanda um estudo mais detalhado, tentando-se estabelecer condições típicas para serem estudadas.

De maneira global, pode-se afirmar que a contribuição deste trabalho para o projeto como um todo e para estudos de tensões induzidas em geral, é o domínio de uma técnica de cálculo das tensões induzidas bastante simples, rápido e preciso, admitindo-se as considerações feitas quando do estabelecimento do fenômeno.

6.3 - Propostas de Continuidade do Trabalho.

Podem ser estabelecidas duas linhas a serem seguidas para a evolução natural do trabalho. Uma delas seria a extensão dessa metodologia para o cálculo de tensões induzidas em sistemas mais complexos, tais como: sistemas multifilares (por exemplo, um cabo telefônico com vários pares telefônicos em seu interior), sistemas constituídos de protetores contra sobretensões, sistemas ramificados, etc. Isto possibilitaria avaliar os esforços eletromagnéticos causados pelas descargas atmosféricas em todos os pontos de uma rede telefônica real.

A outra linha de estudo para prosseguimento deste trabalho seria voltada para um tratamento probabilístico ao programa. Poderiam ser implementados algoritmos baseados no método de Monte Carlo que, partindo de curvas de distribuição estatística de dados experimentais, definissem os parâmetros da descarga atmosférica necessários ao cálculo

e estabelecessem, aleatoriamente, seu ponto de incidência no solo. Com um tratamento desse tipo, poderiam ser simuladas as mais diversas situações, para que as conclusões tiradas quanto a um determinado arranjo de aterramentos fossem mais gerais que aquelas tiradas no final do capítulo 5. Do ponto de vista de resultados práticos, um programa desse tipo poderia estimar, por exemplo, quantas vezes por ano um determinado esquema de aterramento "permitiria" que as tensões induzidas numa central telefônica atingissem um determinado valor. A análise poderia ser feita, ainda, para regiões com diferentes níveis cerâmicos, para linhas com diversos graus de exposição às tensões induzidas por descargas atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - RUSCK, S., "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks.", Doctor's Thesis, Trans. of Royal Institute of Technology Stockholm, No. 120, 1958.
- [2] - GOLDE, R. H., "Lightning - Vol.1 - Physics of Lightning .", Academic Press, London, 1977.
- [3] - GOLDE, R. H., "Lightning - Vol.2 - Lightning Protection.", Academic Press, London, 1977.
- [4] - BARTHOLD, L. O.; CARTER, G. K., "Digital Traveling-wave Solutions - I - Single-phase Equivalents.", AIEE Transactions, pp. 812-820, December 1961.
- [5] - DOMMEL, H. W., "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multi-phase Networks.", IEEE Transactions on PAS, Vol.PAS-88, No. 4, pp. 388-399, April 1969.
- [6] - DOMMEL, H. W., "Electromagnetic Transients Program - Reference Manual", EMTP Theory Book, August 1986.

- [7] - NAIDU, S. R. , "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.", Co-Edição Eletrobrás/UFPb, 1985.
- [8] - GOLDE, R.H. , "Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightning Strokes"., AIEE Transactions, Vol. 73, pp. 437-447, June 1954.
- [9] - RUSCK, S. , "Lightning Over-Voltages and Over-Voltage Protection in Low Voltage Networks.", ASEA Journal, Vol. 31, No. 6, pp. 75-82, 1958.
- [10] - ANDERSON, R.B.; ERIKSON, A. J., "Lightning Parameters for Engineering Application.", Electra, No.69, pp. 65-102, 1980.
- [11] - RAGALLER, K., "Surges in High-Voltage Networks.", Plenumm Press, 1980.
- [12] - LIEW, A. C.; HALDAR, M. K., "Validation of Rusck's Scalar and Vector Potencial Expressions Due to a Return Stroke in a Lightning Channel.", IEE Proceedings, Vol. 134, Pt. C, No. 5, pp. 366-367, September 1987.

- [13] - UMAN, M. A., "Lightning.", Dover Publications, Inc.,
New York, 1984.
- [14] - UMAN, M. A.; MASTER, M. J., " Lightning Induced
Voltages on Power Lines: Theory", IEEE Transactions
on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9,
pp. 2502-2518, September 1984.
- [15] - UMAN, M. A.; MASTER, M. J., " Lightning Induced
Voltages on Power Lines: Experiment", IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.
PAS-103, No. 9, pp. 2519-2529, September 1984.
- [16] - CHOWDHURI, P.; GROSS, E. T. B., "Voltage Surges
Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes.",
Proc. IEE, Vol. 114, No. 12, pp. 1899-1907, December
1967.
- [17] - CHOWDHURI, P., "Analysis of Lightning Induced
Voltages on Overhead Lines.", IEEE Transactions on
Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 479-492, January
1989.
- [18] - YOKOYAMA, S., "Numerical Analysis of Induced
Lightning Surges.", IEEE Conference Paper No. A.
78-123-2, IEEE Winter Meeting, January 1978.

- [19] - YOKOYAMA, S., "Calculation of Lightning Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems.", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, No. 1, pp. 100-108, January 1984.
- [20] - YOKOYAMA, S.; YAMAMOTO, K.; KINOSHITA, H., "Analogue Simulation of Lightning Induced Voltages and its Application for Analysis of Overhead-Ground-Wire Effects.", IEE Proceedings, Vol.132, Pt.C, No. 4, pp. 208-216, July 1985.
- [21] - KOGA, H.; MOTOMITSU, T.; TAGUCHI, M., "Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines.", The Transactions of the IECE of Japan., Vol.E 62, No.4, pp. 216-223, April 1979.
- [22] - AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. H., "Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-22, No.2, pp. 119-129, May 1980.
- [23] - RUBINSTEIN, M.; TZENG, A. Y.; UMAN, M. A.; MEDELIUS,

P.J.; THOMSON, E. M., "An Experimental Test of a Theory of Lightning Induced Voltages on a Overhead Wire.", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.31, No.4, pp. 376-383, November 1989.

[24] - RUBINSTEIN, M.; UMAN, M. A., "Methods for Calculating the Electromagnetic Fields from a Known Source Distribution: Application to Lightning.", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 31, No. 2, pp. 183-189, May 1989.

[25] - FONSECA, A. F. L., "Cálculo Analítico do Campo Eletromagnético e da Resposta Transitória de uma Linha Unifilar Infinita devido à Incidência de uma Descarga Atmosférica sobre um Solo de Resistividade Nula.", Dissertação de Mestrado No.66 Curso de Pos-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.

[26] - BOAVENTURA, W. C., " Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido.", Dissertação de Mestrado No. 69 - Curso de Pos-Graduação em Engenharia Eletrica da UFMG , 1990.

- [27] - FERREIRA, P. H. N., "Tensão Induzida em um Cabo Telefônico por Corrente Circulando na sua Blindagem.", Dissertação de Mestrado No. 68- Curso de Pos-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.
- [28] - PORTO, E. W., "Calculo de Sobretensões em Linhas de Distribuição Devido a Descargas Atmosféricas Laterais.", Dissertação de Mestrado No. 62 - Curso de Pos-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 1990.

APÊNDICE A

Reflexões em uma Descontinuidade.

Qualquer distúrbio numa linha de transmissão dá origem a ondas viajantes que se propagam no sentido de suas extremidades, onde são refletidas e refratadas (transmitidas). Trata-se, aqui, da obtenção dos fatores de reflexão e refração dessas ondas.

Comportamento da Onda em uma Descontinuidade.

Entende-se por descontinuidade um ponto de transição no qual há uma súbita mudança nos parâmetros do circuito. Quando uma onda viajante encontra uma descontinuidade, uma parte da onda é refletida e a outra parte é transmitida para os outros braços do circuito. Chama-se de incidente à onda que vai de encontro à descontinuidade. Após a onda incidente atingir a descontinuidade, tem-se as ondas refletida e transmitida.

Seja uma linha de transmissão terminada em uma impedância $Z(s)$, como na figura A1. Tomando-se o ponto de descontinuidade como a origem em $x=0$, pode-se representar uma onda progressiva de tensão aproximando-se dessa descontinuidade, como:

$$E_i(x,s) = A_1(s) \cdot e^{-sx/v}$$

onde: s é a variável de Laplace: $\zeta + j\omega$;

v é a velocidade de propagação da onda na linha.

Essa onda de tensão é acompanhada por uma onda de corrente

$$I_i(x,s) = \frac{A_1(s)}{Z} \cdot e^{-sx/v}$$

onde: Z é a impedância característica da linha.

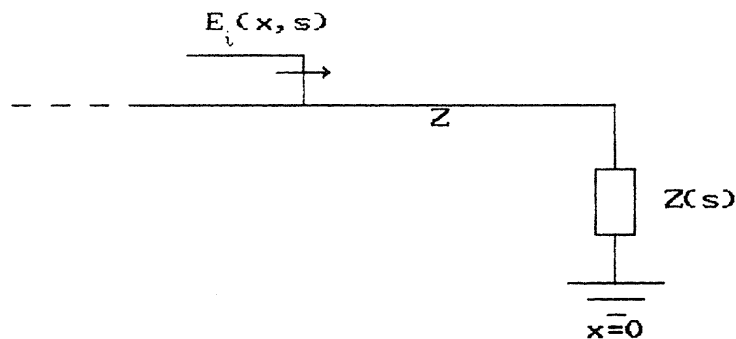


Figura A1 - Descontinuidade na extremidade de uma linha.

A onda de tensão refletida é uma onda regressiva dada por:

$$E_r(x,s) = A_2(s) \cdot e^{sx/v}$$

A onda de corrente associada é:

$$I_r(x,s) = - \frac{A_2(s)}{Z} \cdot e^{sx/v}$$

Em $x=0$, tem-se:

$$E_i(0,s) = A_1(s) \quad , \quad I_i(0,s) = \frac{A_1(s)}{Z}$$

$$E_r(0,s) = A_2(s) \quad , \quad I_r(0,s) = \frac{A_2(s)}{Z}$$

Por superposição, a soma das ondas incidentes e refletidas corresponde à tensão e corrente total na

descontinuidade. Isto é:

$$E_o(0,s) = E_i(0,s) + E_r(0,s) , \text{ ou}$$

$$E_o(0,s) = A_1(s) + A_2(s)$$

$$I_o(0,s) = I_i(0,s) + I_r(0,s) , \text{ ou}$$

$$I_o(0,s) = \{A_1(s) - A_2(s)\}/Z$$

A partir da condição de contorno $E_o(0,s) = Z(s) \cdot I_o(0,s)$,
tem-se:

$$A_1(s) + A_2(s) = \frac{Z(s)}{Z} \cdot \{A_1(s) - A_2(s)\}$$

ou

$$A_2(s) = \frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \cdot A_1(s)$$

Portanto,

$$A_1(s) + A_2(s) = \left\{ 1 + \frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \right\} \cdot A_1(s)$$

$$A_1(s) + A_2(s) = 2 \cdot \frac{Z(s)}{Z(s)+Z} \cdot A_1(s)$$

Resumindo, tem-se:

Ondas Incidentes:

$$E_i(x,s) = A_1(s) \cdot e^{-sx/v}$$

$$I_i(x,s) = \frac{A_1(s)}{Z} \cdot e^{-sx/v}$$

Ondas Refletidas:

$$E_r(x,s) = \frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \cdot A_1(s) \cdot e^{sx/v}$$

$$I_r(x,s) = \frac{-1}{Z} \cdot \left\{ \frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \right\} \cdot A_1(s) \cdot e^{sx/v}$$

A tensão e corrente totais em $x=0$ são dadas por

$$E_o(0,s) = 2 \cdot \frac{Z(s)}{Z(s)+Z} \cdot A_1(s)$$

$$I_o(0,s) = 2 \cdot \frac{Z}{Z(s)+Z} \cdot \frac{A_1(s)}{Z}$$

Os coeficientes $\left\{ \frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \right\}$ e $\left\{ \frac{2 \cdot Z(s)}{Z(s)+Z} \right\}$ são coeficientes de reflexão e refração da tensão. Correspondentemente, os coeficientes $\left\{ -\frac{Z(s)-Z}{Z(s)+Z} \right\}$ e $\left\{ \frac{2 \cdot Z}{Z(s)+Z} \right\}$ são os coeficientes de reflexão e refração da corrente.

APÊNDICE B

Computação dos Transitórios Eletromagnéticos.

Neste apêndice é apresentada a metodologia de cálculo dos transitórios eletromagnéticos implementada no presente trabalho. São modelados apenas aqueles elementos de circuito necessários às simulações feitas no trabalho (linhas monofásicas, capacitores e resistores).

Basicamente, a metodologia de cálculo consiste em um procedimento passo a passo ao longo do eixo do tempo, a partir de um intervalo de tempo Δt pré-fixado. O objetivo é a obtenção das tensões em todos os nós de um determinado sistema. O método de cálculo utilizado é o método proposto por Dommel. Baseia-se na Lei de Integração Trapezoidal para a resolução das equações diferenciais dos elementos com parâmetros concentrados, e no Método das Ondas Viajantes para elementos com parâmetros distribuídos.

Modelagem dos Elementos de Circuito.

Linhas Monofásicas sem Perdas.

Para uma linha de capacitância "c" e indutância "l" por unidade de comprimento, tem-se num ponto genérico x:

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial e}{\partial x} &= l \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\
 -\frac{\partial i}{\partial x} &= c \cdot \frac{\partial e}{\partial t}
 \end{aligned}
 \tag{B.1}$$

A solução geral do sistema de equações diferenciais (B.1) é dada por:

$$i(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \tag{B.2}$$

$$e(x,t) = Z \cdot f_1(x-vt) - Z \cdot f_2(x+vt)$$

ou

$$e(x,t) + Z \cdot i(x,t) = 2 \cdot Z \cdot f_1(x-vt) \tag{B.3}$$

$$e(x,t) - Z \cdot i(x,t) = -2 \cdot Z \cdot f_2(x+vt)$$

onde:

Z - impedância característica da linha;

v - velocidade de propagação da onda.

Se os argumentos $(x-vt)$ e $(x+vt)$ do sistema de equações (B.3) são constantes, ou seja, se o referencial for fixado juntamente com a onda que se propaga na linha, os termos $[e(x,t) - Z \cdot i(x,t)]$ e $[e(x,t) + Z \cdot i(x,t)]$ serão constantes. Seja " τ " o tempo de trânsito entre o terminal "k" e o terminal "m" de uma linha. O valor de $[e(x,t) + Z \cdot i(x,t)]$, no suposto referencial, no terminal "k", no instante $(t-\tau)$ será igual ao valor encontrado no terminal "m" no

instante (t) . Ou seja, a onda viaja do terminal "k" ao terminal "m" em um tempo " τ " (fig. B1).

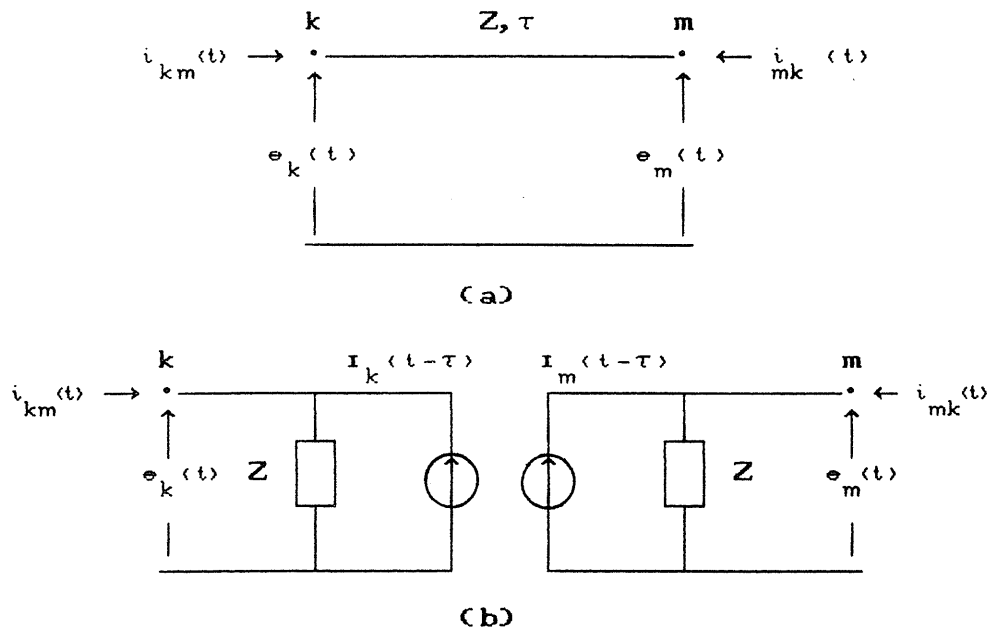


Figura B1 - Linha sem perdas
a) Circuito elétrico
b) Circuito equivalente

Portanto:

$$\left[e(x, t_0) + Z \cdot i(x, t_0) \right]_k = \left[e(x, t) + Z \cdot i(x, t) \right]_m \quad (\text{B. 4})$$

$$e_k(t_0) + Z \cdot i_{km}(t_0) = e_m(t) + Z \cdot \left[-i_{mk}(t) \right]$$

onde:

$$t_0 = (t - \tau).$$

O sinal negativo em $[-i_{mk}(t)]$ é devido à convenção da direção da corrente em um nó do circuito. Da equação

(B.4) tem-se:

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z} e_m(t) - i_{km}(t-\tau) - \frac{1}{Z} e_k(t-\tau) \quad (\text{B.5})$$

ou

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} e_m(t) &= i_{mk}(t) + I_m(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) &= i_{km}(t-\tau) + \frac{1}{Z} e_k(t-\tau) \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Igualmente pode-se mostrar que:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} e_k(t) &= i_{km}(t) + I_k(t-\tau) \\ I_k(t-\tau) &= i_{mk}(t-\tau) + \frac{1}{Z} e_m(t-\tau) \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

A figura B1 é obtida a partir das equações (B.6) e (B.7).

Resistores.

Para o resistor R da figura B2 pode-se escrever:

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R} e_{km}(t) \quad (\text{B.8})$$

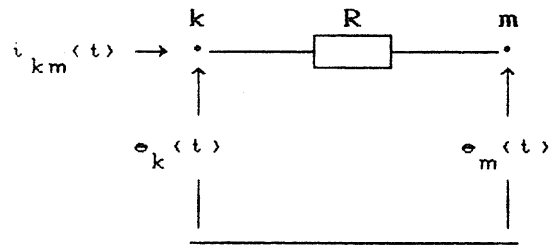


Figura B2 - Resistor: Circuito equivalente

Capacitores.

Para o capacitor C da figura B3, escreve-se:

$$i_{km}(t) = C \cdot \frac{d}{dt} e_{km}(t)$$

(B.9)

$$de_{km}(t) = \frac{1}{C} \cdot i_{km}(t) dt$$

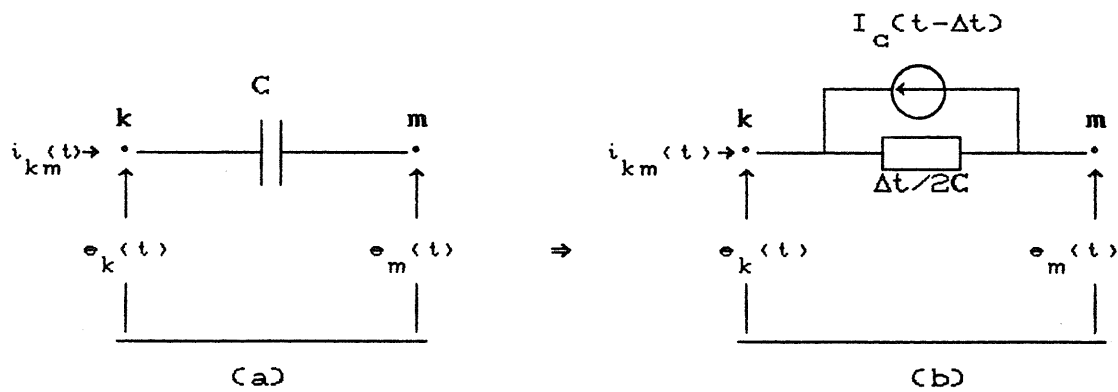


Figura B3 - Capacitor.
 (a) Circuito elétrico
 (b) Circuito equivalente

Utilizando a Regra de Integração Trapezoidal na equação (B.9), tem-se:

$$\int_{t-\Delta t}^t de_{km}(t) = \int_{t-\Delta t}^t \frac{1}{C} i_{km}(t) dt \quad (B.10)$$

$$e_{km}(t) - e_{km}(t-\Delta t) = \frac{1}{C} \cdot \frac{\Delta t}{2} \left[i_{km}(t) - i_{km}(t-\Delta t) \right]$$

Da equação (B.10), tem-se:

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} \cdot e_{km}(t) - I_c(t-\Delta t) \quad (B.11)$$

$$I_c(t-\Delta t) = \frac{2C}{\Delta t} \cdot e_{km}(t-\Delta t) + i_{km}(t-\Delta t)$$

A equação (B.11) sugere o circuito equivalente mostrado na figura B3. O erro cometido a partir da integração numérica e da ordem de $\Delta t^3/3$.

Existe uma forma alternativa de se modelar um capacitor para o cálculo do transitório eletromagnético. Considere a linha da figura B4 de impedância característica Z terminada pelo capacitor C .

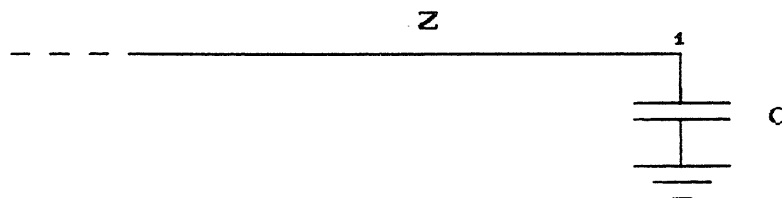


Figura B4 - Linha terminada por um capacitor.

Pode-se simular a resposta transitória do capacitor na extremidade, substituindo-o por uma linha de transmissão, tendo uma das extremidades conectadas àquele ponto do circuito, e a outra extremidade aberta. Esta linha é denominada "stub line". A impedância característica e o comprimento do "stub line" são definidos a partir da constante de tempo envolvida no processo de carga do capacitor [4]. A precisão dessa aproximação depende do comprimento do "stub line" utilizado.

Sejam τ_e e Z_e o tempo de trânsito e a impedância característica do "stub line". Para a determinação de τ_e , faz-se:

$$3.Z.C = 20 \tau_e$$

→

$$\tau_e = 3/20 . Z.C$$

A impedância característica é obtida da seguinte forma:

$$Z_e = \tau_e / C$$

Metodologia de Cálculo.

A partir da modelagem dos elementos descritos e da configuração do sistema a ser analisado, pode-se montar o seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \end{bmatrix} \quad (B.9)$$

onde:

[Y] : matriz admitância do sistema;
 [e(t)] : vetor de tensões a serem calculadas;
 [i(t)] : vetor de correntes do sistema, montado a partir das equações dos nós e calculado a cada passo de tempo (igual ao passo de integração Δt).

Para a obtenção do vetor de correntes do sistema é necessário conhecer os valores de tensão e corrente no nó inicial ("k") e nó final ("m") dois tempos de transito τ atrás, ou seja, $(t-2\tau)$.

Se o passo de tempo (Δt) for constante, a matriz [Y] será sempre constante durante o intervalo de cálculo.

Com isto, chega-se ao seguinte algoritmo básico para a resolução de um sistema genérico:

- 1 → Define-se o passo de integração Δt e o tempo total de simulação. Um bom valor para Δt é algo em torno de 10% a 20% do tempo de trânsito da menor linha modelada.
- 2 → Monta-se a matriz [Y].
- 3 → Determina-se todos os valores iniciais das fontes de corrente (I_k , I_m e I_c).
- 4 → Monta-se o vetor de correntes nos nós : [i(t)].
- 5 → Resolve-se o sistema [Y] . [e(t)] = [i(t)].

6 → Calcula-se o vetor de correntes de linha.

7 → Volta-se ao passo 4 até que o instante de simulação coincida com o tempo total de simulação pré-estabelecido.

Este é portanto, o algoritmo básico implementado para a computação dos transitórios. A modelagem dos demais elementos lineares e não-lineares de circuito, assim como sua extensão para sistemas polifásicos pode ser encontrada em referências apresentadas no final deste trabalho [5,6,7].