

**CÁLCULO DE SOBRETENSÕES EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO
DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS LATERAIS**

Eudes Weber Porto

Belo Horizonte - 1990

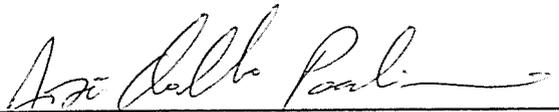
CÁLCULO DE SOBRETENSÕES EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO
DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS LATERAIS

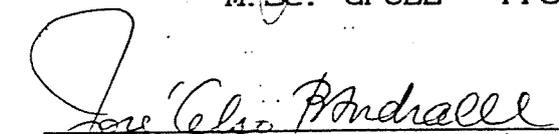
Eng^o Eudes Weber Porto.

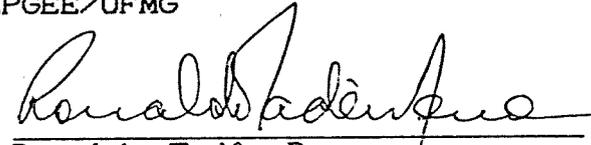
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA,
DESIGNADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS,
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS.

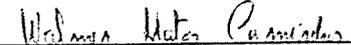
Aprovada em: 22 de fevereiro de 1990

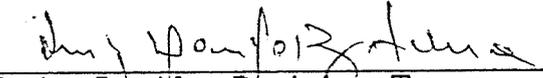
por:


José Osvaldo Saldanha Paulino - Orientador
M.Sc. CPGEE - Prof. CPGEE/UFMG


José Celso Borges de Andrade
D.Ing. - UPS - Toulouse/FRA
Prof. CPGEE/UFMG


Ronaldo Tadêu Pena
Ph.D. - Texas - Austin - EUA
Prof. CPGEE/UFMG


Walmir Matos Caminhas
M.Sc. CPGEE/UFMG
Prof. CGEE/UFMG


Luiz Danilo Barbosa Terra
Ph.D. - Univ. of London - GB
Prof. CPGEE/UFMG

Agradecimentos

- Ao Professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela atenção e orientação dispensada durante a execução desta dissertação.

- Aos meus familiares e à Simone, minha namorada, pelo apoio e incentivo ao trabalho nos momentos fáceis e difíceis.

- Ao colega Glássio Costa de Miranda pelo auxílio prestado no fornecimento das rotinas gráficas utilizadas no programa.

- A todo o pessoal do Laboratório de Extra Alta Tensão da EE-UFMG pelo apoio e incentivo.

- A todos os colegas, professores e amigos do Curso de Engenharia Elétrica da UFMG e do CPGEE, pelo apoio, incentivo e colaboração que souberam prestar de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

- À CAPES - DEMANDA SOCIAL pelo apoio financeiro para desenvolvimento desta dissertação.

A meus pais,
Francisco e Marlene

Sumário

	Páginas
Capítulo 1 - Introdução Geral	01
1.1 - Introdução	02
1.2 - Organização do texto	03
Capítulo 2 - Modelagem Utilizada	05
2.1 - Modelagem da descarga atmosférica	06
2.1.1 - Descargas diretas	10
2.1.2 - Descargas indiretas	13
2.2 - Cálculo do transitório eletromagnético e modelagem de pára-raios	28
Capítulo 3 - Descrição do Sistema Proposto	34
3.1 - A linha de distribuição	35
3.2 - O sistema de proteção	47
Capítulo 4 - Validação do Sistema Desenvolvido	52
4.1 - Introdução	53
4.2 - Primeiro caso - Estudos em uma linha monofásica	54
4.3 - Segundo caso - Simulação de uma linha polifásica	61
4.4 - Terceiro caso - Comparação com medições em modelos reduzidos	64

4.5 - Quarto caso - Estudos em uma linha polifásica com pára-raios	74
Capítulo 5 - Uso do Programa Para Simulação de Transitórios em Linhas de Distribuição	82
5.1 - Descrição das Linhas Estudadas	83
5.2 - Bloco 1 - Simulações sem pára-raios	87
5.3 - Bloco 2 - Simulações com pára-raios no meio da linha	93
5.4 - Bloco 3 - Simulações com pára-raios nos extremos da linha	99
Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões	110
Capítulo 7 - Bibliografia	115

Resumo

As descargas atmosféricas em Linhas de Distribuição de Energia Elétrica Aéreas se dividem basicamente em dois grupos: descargas diretas e descargas indiretas ou laterais. Neste trabalho dá-se ênfase às sobretensões transitórias causadas na linha por descargas indiretas. Foi estudada e implementada uma teoria (teoria de Rusck) que trata de tensões induzidas em linhas aéreas por tais descargas. Esta teoria é aqui apresentada, juntamente com o desenvolvimento de um procedimento para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de distribuição. Com isso, tem-se um pacote computacional que permite analisar os efeitos das descargas em linhas (com diversas configurações - polifásicas) e, também, desenvolver estudos para proteção de linhas aéreas contra descargas indiretas utilizando pára-raios (instalados ao longo da linha). O pacote permite a análise de várias formas de instalação de pára-raios em Linhas de Distribuição. Foram simulados inúmeros casos e aplicações utilizando o programa, visando demonstrar a potencialidade do mesmo.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Introdução

Devido ao grande número de desligamentos das Redes de Distribuição de Energia Elétrica causados por descargas atmosféricas (mais de 20% do total de desligamentos destes sistemas [41]), torna-se necessário fazer estudos visando a proteção destas redes ou linhas de distribuição, contra estes fenômenos atmosféricos.

Os desligamentos em Linhas de Distribuição causados por descargas atmosféricas se dividem em dois blocos: um causado por descargas diretas e outro por descargas indiretas (ou laterais). Daremos ênfase às descargas indiretas pois estas, apesar de causarem sobretensões menos energéticas nas linhas do que as descargas diretas, devido ao seu alto grau de ocorrência, são um sério problema para os sistemas de distribuição. Este problema advem do fato de as sobretensões causadas por descargas indiretas muitas vezes excederem os valores de NBI (Nível Básico de Isolamento) das linhas de distribuição (≈ 90 kV), [42].

As concessionárias de energia elétrica, principalmente no exterior [15], utilizam pára-raios ou centelhadores para proteção de seus sistemas de distribuição. Como não existem critérios claros sobre como empregar estes dispositivos, é necessário desenvolver estudos sobre a sua

utilização de forma a dimensioná-los corretamente.

Nesta dissertação é desenvolvida uma ferramenta computacional para auxiliar a análise da proteção de linhas de distribuição contra descargas atmosféricas laterais, utilizando pára-raios e centelhadores.

1.2 - Organização do texto

No capítulo dois é apresentada uma rápida revisão sobre descargas atmosféricas e a teoria proposta por Rusck [3,4] para análise de sobretensões induzidas em linhas aéreas devidas a descargas laterais, bem como a modelagem para análise de descargas diretas. Uma rápida apresentação do método de Dommel [5,6,7,8,9] para cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos compostos de elementos lineares e não-lineares é também feita neste capítulo.

No capítulo três é descrito um tipo de sistema a ser analisado com o programa e, também, os arranjos de proteção que podem ser utilizados. O dispositivo de proteção enfocado e modelado no programa é o pára-raios de carboneto de silício (SiC) e de óxido de zinco (ZnO).

Nos dois capítulos anteriormente citados são apontados, rapidamente, métodos para analisar sobretensões

causadas por descargas diretas mas, esta dissertação foi direcionada para tratar mais prioritariamente de sobretensões em linhas de distribuição provocadas por descargas atmosféricas laterais, visto que as primeiras já configurariam um outro trabalho.

No quarto capítulo é apresentada uma série de simulações que avaliam a potencialidade do programa desenvolvido. São feitas comparações com simulações e medições realizadas e apresentadas por diferentes autores em diversos trabalhos da bibliografia especializada.

No capítulo cinco é feita uma análise de proteção levando em consideração a alteração de alguns parâmetros do sistema de distribuição. É discutida, então, a contribuição para facilitar a análise, introduzida por este trabalho.

As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no sexto capítulo.

Finalmente, o trabalho se completa com a lista da bibliografia consultada, no capítulo sete.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM

2.1 - Modelagem da Descarga Atmosférica.

As descargas atmosféricas entre uma nuvem e a terra podem ser representadas por uma corrente conhecida na literatura técnica como *corrente de retorno* (Return Stroke). Esta corrente apresenta uma forma de onda do tipo impulsiva como mostrado na figura 2.1.

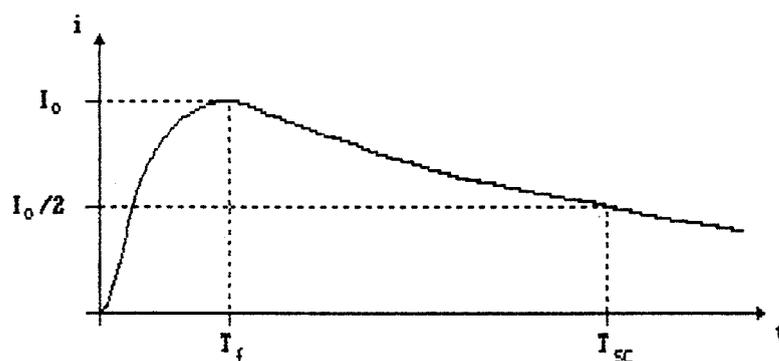


Figura 2.1 - Forma de onda da corrente de retorno

Esta onda de corrente atinge o valor de pico (I_0) com um determinado tempo, denominado tempo de frente (T_f) e cai para metade do valor de pico ($I_0/2$) em um outro tempo chamado tempo de semi-cauda (T_{sc}).

Das medições realizadas, verifica-se que um raio entre terra e nuvem pode apresentar várias descargas

subsequentes que fluem no canal da primeira descarga. Na figura 2.2.1 é mostrado um exemplo da forma de onda da corrente da primeira descarga (a), da segunda (b) e da terceira (c), que são subsequentes no mesmo canal (conforme [1]).

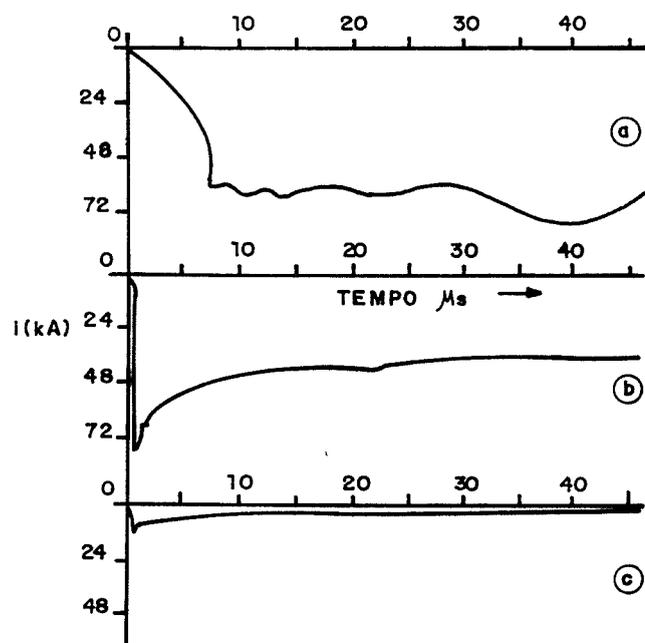


Figura 2.2.1 - Forma de onda da descarga.

a) primeira; b e c) subsequentes.

Alguns autores [02] apresentam a porcentagem de ocorrência de uma ou mais descargas em um mesmo canal, conforme a tabela 2.1

N ^o de Descargas por raio	Frequência de Ocorrência (%)
1	45
2	14
3	9
4	8
5	8
6	4
7	3
8	3
9	2
10 ou mais	4

Tabela 2.1 - Frequência de ocorrência de descargas
em um mesmo canal.

Neste trabalho somente será considerada uma descarga (a primeira), visto que é a de maior probabilidade de ocorrer e a mais severa em termos de corrente (I_0 maior).

Também, de acordo com [2], os valores de pico da corrente de retorno apresentam a seguinte distribuição:

$I_0 > 4 \text{ kA} \rightarrow 89\%$

$I_0 > 20 \text{ kA} \rightarrow 80\%$

$I_0 > 34 \text{ kA} \rightarrow 50\%$

$I_0 > 90 \text{ kA} \rightarrow 5\%$

dados estes retirados da figura 2.2.2, conforme [2].

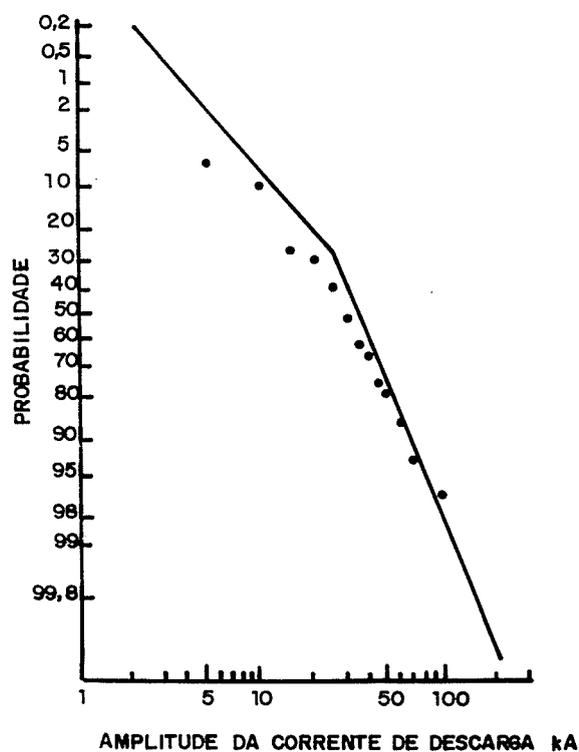


Figura 2.2.2 - Probabilidade dos valores de pico da corrente de retorno.

Ainda de acordo com [2], os valores de T_f e T_{ec} são de alguns micro-segundos e de algumas dezenas de micro-segundos, respectivamente.

Em linhas aéreas de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, as sobretensões causadas por descargas atmosféricas podem ser divididas em dois tipos principais:

- Sobretensões causadas por descargas diretas;
- Sobretensões causadas por descargas indiretas.

2.1.1 - Descargas Diretas:

São consideradas descargas diretas aquelas que caem diretamente em uma das fases da linha, podendo ou não causar disrupção através dos isoladores nos postes, dependendo da intensidade da descarga atmosférica e do Nível Básico de Isolamento para impulso (NBI) da Linha de Distribuição. Estas descargas causam sobretensões na Linha de Distribuição devido à injeção direta de corrente na mesma. Quando não há disrupção, a onda de corrente que atinge o condutor entre dois postes se divide em duas ondas de corrente com direções opostas e, amplitudes máximas iguais à metade da amplitude máxima da onda de corrente que atinge o condutor. Estas duas ondas de corrente viajarão na linha conforme a figura 2.3.

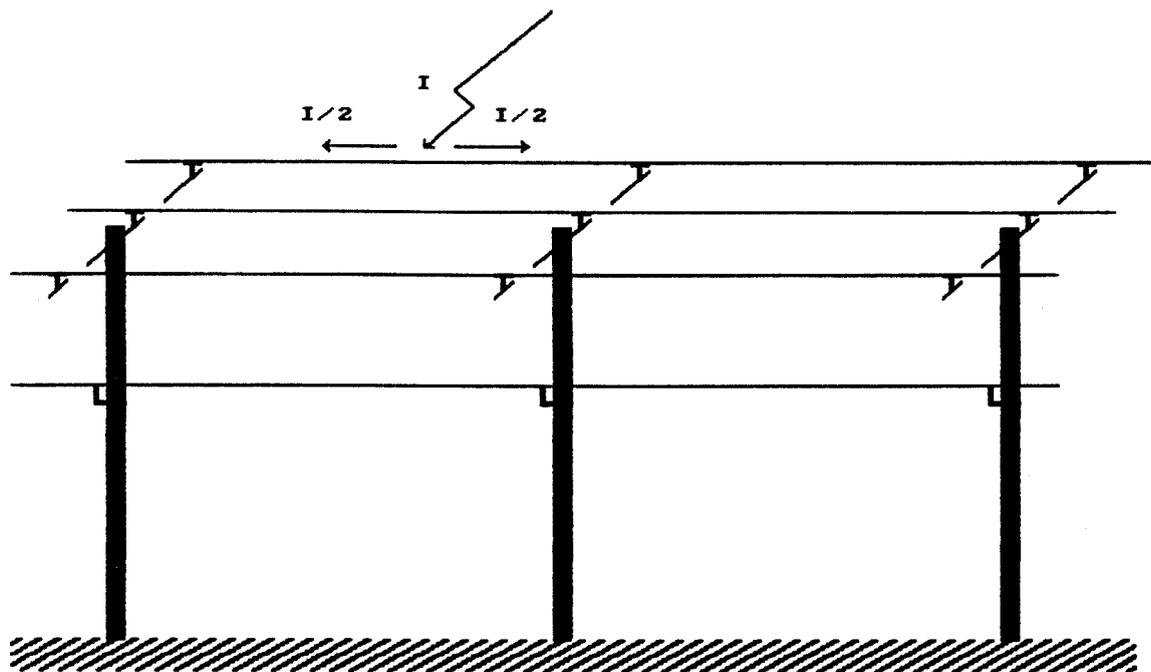


Figura 2.3 - Descarga no vão.

Por outro lado, quando há disrupção através dos isoladores do poste, a onda de corrente se divide em três ondas: duas viajam para os dois lados do condutor atingido e a terceira para o fio neutro. Esta onda que se dirige para o neutro, pode se dividir para os extremos do mesmo se este não estiver aterrado naquele ponto ou, se o neutro for aterrado naquele ponto, se dividir em três ondas: duas que viajam para os extremos do neutro e uma outra que vai para o solo via resistência de aterramento, conforme figura 2.4 a e b, respectivamente.

As amplitudes destas ondas de corrente serão proporcionais à impedância dos cabos e ao valor de R_a (resistência de aterramento do neutro), quando existir.

Neste trabalho, as descargas diretas foram modeladas como fontes que injetam corrente no condutor da Linha de Distribuição no qual cai a descarga. A forma de onda da corrente de descarga (corrente de retorno) utilizada na fonte é apresentada na figura 2.5. Esta forma de onda é uma boa aproximação da onda de impulso de corrente, representativa de uma descarga atmosférica, como foi mostrado na figura 2.1.

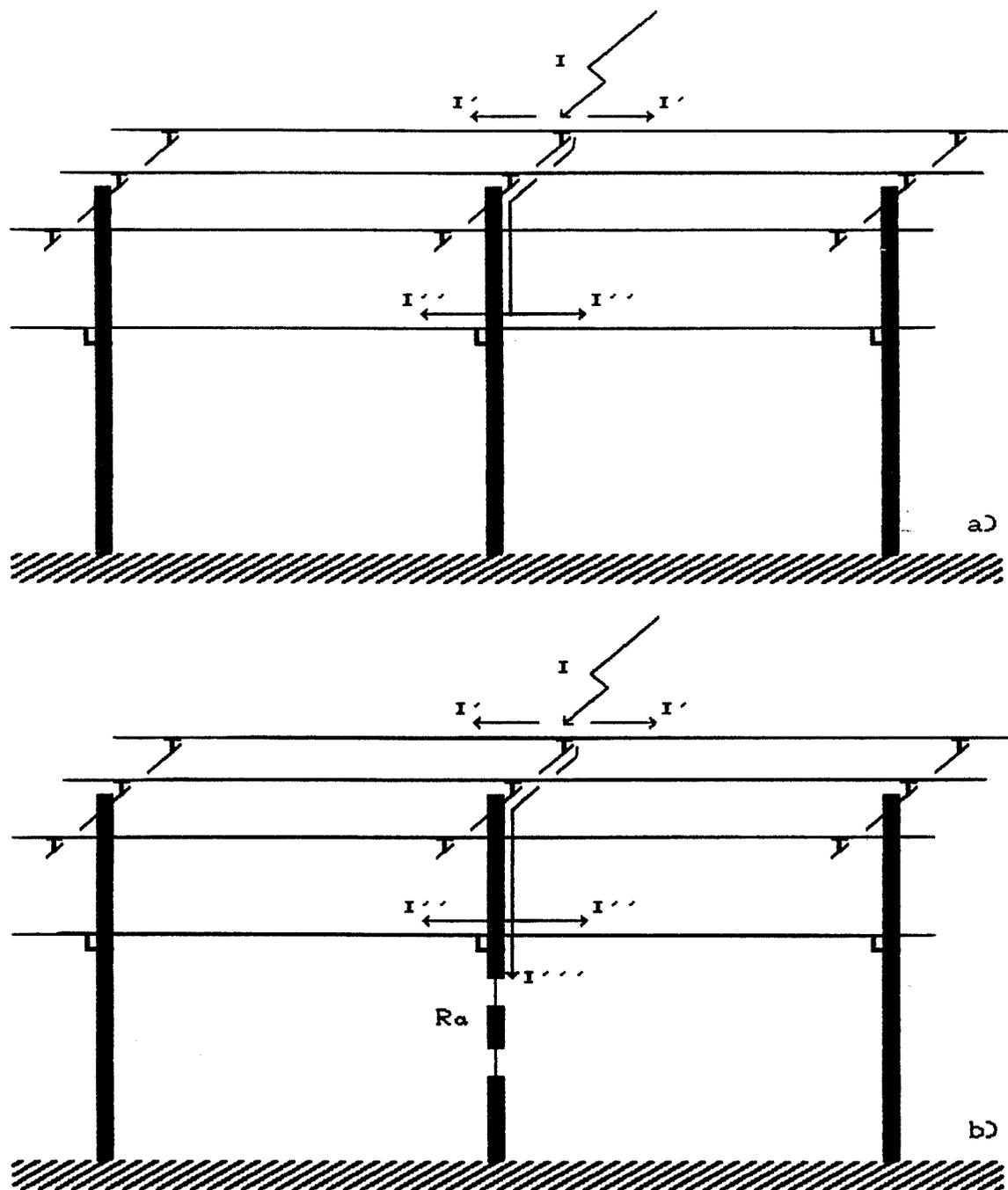


Figura 2.4 - Descarga no poste.

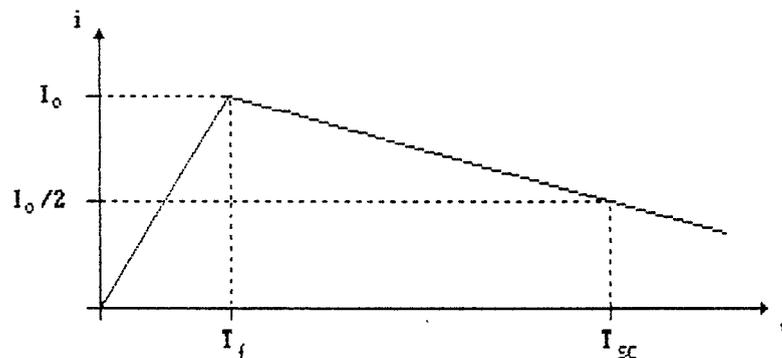


Figura 2.5 - Forma de onda para descarga direta.

2.1.2 - Descargas Indiretas:

As descargas indiretas são aquelas que caem nas proximidades de uma Linha de Distribuição sem atingi-la diretamente, conforme mostrado na figura 2.6. Elas causam sobretensões através de tensões induzidas na Linha de Distribuição. Estas tensões são originadas do campo eletromagnético criado pelas configurações de cargas eletrostáticas e corrente da descarga atmosférica.

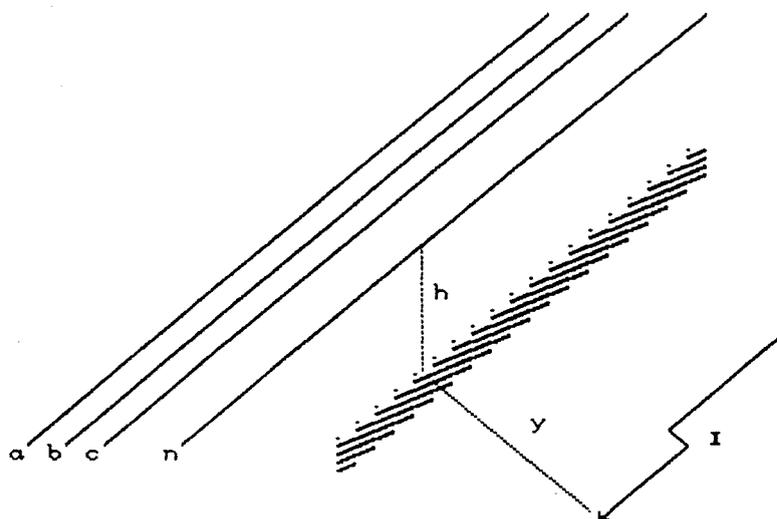


Figura 2.6 - Descarga lateral ou indireta.

A modelagem utilizada no desenvolvimento do programa para tensões induzidas em Linhas de Distribuição por descargas atmosféricas é a proposta por Rusck [3,4], que será apresentada a seguir.

Uma descarga nuvem-terra sempre causa o aparecimento de um campo eletromagnético que se propaga a partir da descarga com a velocidade da luz. Segundo Rusck [3,4], comparando a altura do canal da descarga (alguns quilômetros) com a altura da linha (alguns metros para linhas de distribuição) pode-se considerar o campo eletromagnético criado pela descarga sob a linha, que é a região de interesse, constante e responsável pela indução na linha. O campo eletromagnético pode ser calculado a partir do método

das imagens desde que se assuma que a terra possui resistividade igual a zero. Sendo assim, a terra se torna um plano de simetria de forma que as cargas e correntes acima do mesmo são iguais em magnitude às suas imagens na terra mas, com polaridade e direção opostas respectivamente, conforme mostrado na figura 2.7. Nesta figura os campos ∇V_i e A_i são perpendiculares ao plano de terra.

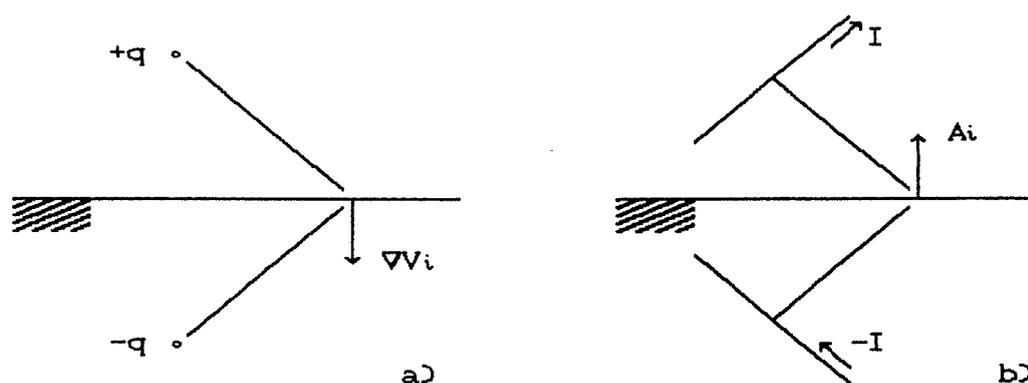


Figura 2.7 - Potenciais: a) escalar; b) vetor.

Assim, o campo elétrico associado com cargas eletrostáticas e correntes em um ponto do espaço, é dado por:

$$E_i = - \nabla V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (01)$$

sendo V_i o potencial escalar e A_i o potencial vetor, originados da descarga atmosférica.

Considerando um sistema de coordenadas onde o plano xy coincide com o plano de terra e o eixo z é perpendicular ao mesmo e, uma linha longa e isolada paralela ao eixo x, com altura h, corrente I_i nos condutores, densidade linear de carga q_i nos condutores da linha e V_i o potencial escalar induzido por uma descarga atmosférica (I_0), conforme figura 2.8, teremos como potencial escalar da linha [3,4]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{i a} \\ V_{i b} \\ V_{i c} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{a a} & K_{a b} & K_{a c} & \dots \\ K_{b a} & K_{b b} & K_{b c} & \dots \\ K_{c a} & K_{c b} & K_{c c} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (02)$$

onde:

$$K_{\nu\nu} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h\nu}{r\nu}$$

$$K_{\nu\mu} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{\nu\mu}}{d_{\nu\mu}}$$

$h\nu$ = altura do condutor ν

$r\nu$ = raio do condutor ν

$d_{\nu\mu}$ = distância entre os condutores ν e μ

$d_{\nu\mu}$ = distância entre o condutor ν e a imagem de μ .

Esta condição de que $[V] = [V_i] + [K][q]$ é válida desde que assumamos que as correntes e cargas na linha não afetam a distribuição de correntes e cargas da descarga [3,4].

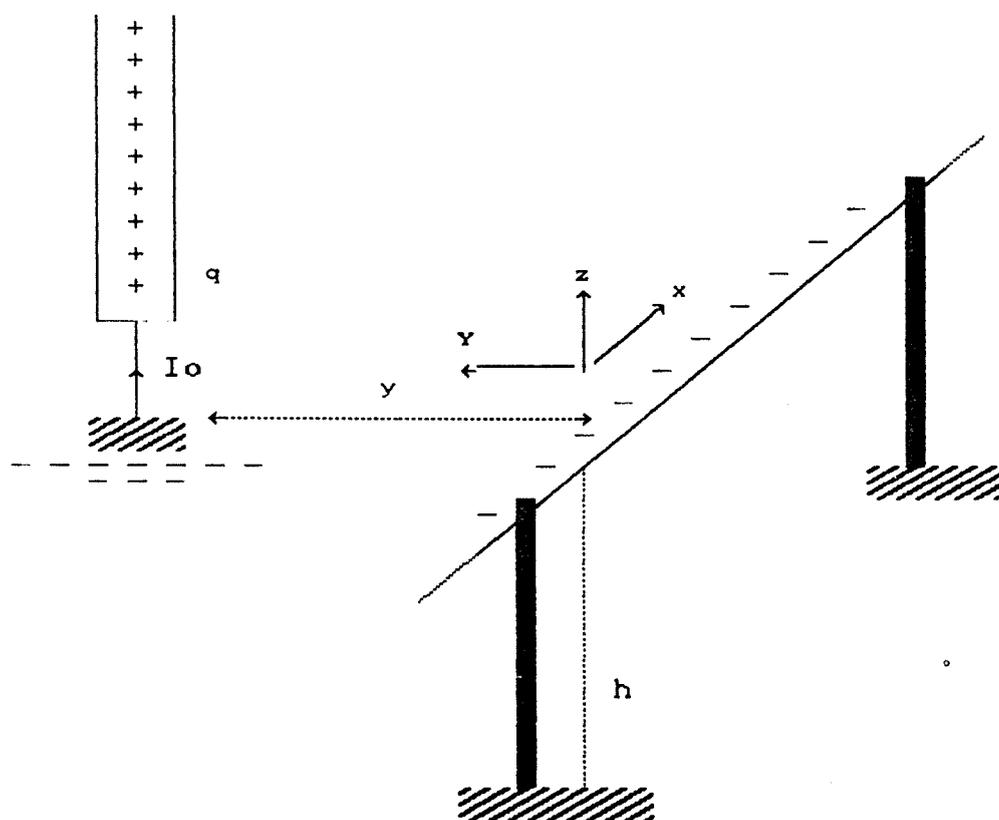


Figura 2.8 - Sistema descarga / linha

Para o potencial vetor na direção x (no condutor), desconsiderando o campo interno no condutor (devido às altas frequências), tem-se:

$$\begin{bmatrix} A_{xa} \\ A_{xb} \\ A_{xc} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} & \dots \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} & \dots \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (03)$$

onde:

$$l_{\nu\nu} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h\nu}{r\nu}$$

$$l_{\nu\mu} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d\nu\mu}{d\nu\mu}$$

Assim o campo na direção x será:

$$[E_x] = - \left[\frac{\partial V}{\partial x} \right] - [1] \left[\frac{\partial I_i}{\partial t} \right] \quad (04)$$

Sendo o condutor com resistividade nula tem-se:

$$\left[\frac{\partial V}{\partial x} \right] = - [1] \left[\frac{\partial I_i}{\partial t} \right] \quad (05)$$

pois $[E_x] = 0$.

Da equação de continuidade, vem:

$$\left[\frac{\partial I}{\partial x} \right] = - \left[\frac{\partial q}{\partial t} \right] \quad (06)$$

Assim a equação (02) fica:

$$[K] \left[\frac{\partial I}{\partial x} \right] = - \left[\frac{\partial V}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} \right] \quad (07)$$

As matrizes $[K]$ e $[1]$ podem ser escritas em função da matriz de impedância de surto do sistema ($[Z]$) como:

$$K = v_0 [Z]$$

$$1 = \frac{1}{v_0} [Z] \quad (08)$$

sendo:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & \dots \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & \dots \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix}$$

com:

$$Z_{\nu\nu} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2h\nu}{r\nu} \cong 60 \ln \frac{2h\nu}{r\nu}$$

$$Z_{\nu\mu} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{d\nu\mu}{d\nu\mu} \cong 60 \ln \frac{d\nu\mu}{d\nu\mu}$$

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \text{velocidade da luz.}$$

Assim, pode-se montar o sistema de equações diferenciais que regem o comportamento dinâmico da linha:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\partial V}{\partial x} \right] = - \frac{1}{v_0} [Z] \left[\frac{\partial I}{\partial t} \right] \\ [Z] \left[\frac{\partial I}{\partial x} \right] = - \frac{1}{v_0} \left[\frac{\partial V}{\partial t} \right] + \frac{1}{v_0} \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} \right] \end{array} \right. \quad (09)$$

Utilizando a transformação abaixo:

$$[V] = [V_1] + [V_2] \quad (10)$$

$$[Z] [I] = [V_1] - [V_2] \quad (11)$$

a equação (09) pode ser escrita como duas equações diferenciais de primeira ordem:

$$\left[\frac{\partial V_1}{\partial x} \right] = - \frac{1}{v_0} \left[\frac{\partial V_1}{\partial t} \right] + \frac{1}{2v_0} \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} \right] \quad (12)$$

$$\left[\frac{\partial V_2}{\partial x} \right] = \frac{1}{v_0} \left[\frac{\partial V_2}{\partial t} \right] - \frac{1}{2v_0} \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} \right] \quad (13)$$

Do sistema matricial acima, tem-se, para um único fio:

$$\frac{\partial V_{1a}}{\partial x} = -\frac{1}{v_0} \frac{\partial V_{1a}}{\partial t} + \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_{1a}}{\partial t} \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_{2a}}{\partial x} = \frac{1}{v_0} \frac{\partial V_{2a}}{\partial t} - \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_{1a}}{\partial t} \quad (15)$$

o que mostra que o potencial escalar induzido em um condutor de uma linha polifásica aérea, não depende dos outros condutores, sendo função apenas do potencial escalar induzido pela descarga.

A resolução das equações (14) e (15) é mostrada abaixo conforme dedução de Rusck [3,4], sendo u uma variável auxiliar na direção de x :

$$V_{1a} = -\frac{1}{2v_0} \int_{-\infty}^x \frac{\partial V_{1a}(u, t - ((x-u)/v_0))}{\partial t} du \quad (16)$$

$$V_{2a} = -\frac{1}{2v_0} \int_x^{\infty} \frac{\partial V_{1a}(u, t - ((u-x)/v_0))}{\partial t} du \quad (17)$$

e o potencial escalar de cada fio fica:

$$V_a = V_{1a} + V_{2a} \quad (18)$$

função de V_i que por sua vez é função do tempo e do espaço.

Agora, a tensão induzida na linha por uma descarga pode ser calculada para cada fio por:

$$U_a = - \int_0^{z=h} E_z dz \quad (19)$$

sendo

$$E_z = - \left[\nabla V_i + \frac{\partial A_i}{\partial t} \right] \quad (20)$$

tem-se:

$$U_a = V_a + h \frac{\partial A_{ia}}{\partial t} \quad (21)$$

Em seu trabalho Rusck [3,4] deduz os potenciais escalar e vetorial como:

$$V_i = 2Z_0 I_0 h \frac{v_0}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{L^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1-(v/v_0)^2)r_0^2}} \right] \quad (22)$$

e

$$h \frac{\partial A_i}{\partial t} = 2Z_0 I_0 h \frac{v}{v_0} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (1-(v/v_0)^2)r_0^2}} \right] \quad (23)$$

onde:

h = altura de um condutor acima da terra;

v = velocidade da corrente de retorno;

v_0 = velocidade da luz;

L = comprimento do canal da descarga;

r_0 = distância entre um ponto na linha e o ponto de incidência da descarga no solo;

t = tempo.

A partir da dedução apresentada, os autores [02,11,12,13,14,15,20,22,23,24,26,27] calculam o transitório nas linhas causado por descargas atmosféricas utilizando o modelo Π para representar a linha. Desta forma, eles calculam as sobretensões (devido à componente escalar) nas linhas a partir da equação abaixo:

$$V = V_i + Kq \quad (24)$$

que é semelhante à equação (02) apresentada anteriormente. Assim, eles modelam a linha como mostrado na figura 2.9 onde V_i é uma fonte de tensão dada pela equação (22) (função de x e t) e q é a carga que aparece na linha devido ao processo de formação da descarga. No instante em que ocorre a descarga, ou seja, tempo igual a zero no processo de simulação, cada capacitor está com uma carga q correspondente a uma tensão (V_c) nos seus terminais igual a $-V_i$. Depois de calculado o transitório devido a estas fontes de tensão (V_i), soma-se nos pontos indicados por setas na figura 2.9 o valor correspondente à componente vetorial da descarga obtendo-se, assim, o valor da tensão induzida na linha pela descarga atmosférica.

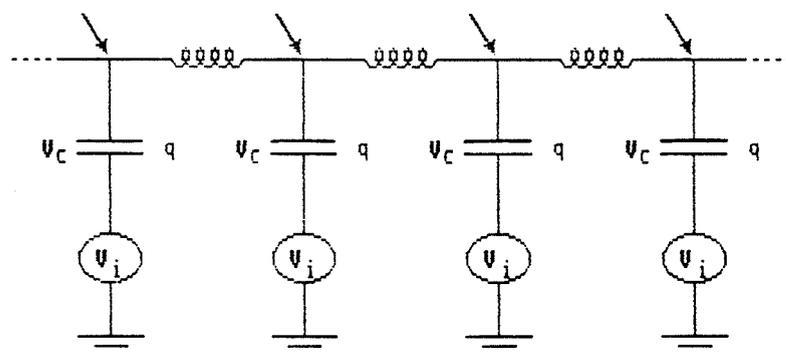


Figura 2.9 - Modelo baseado na equação (24).

Analisando melhor a dedução da teoria de Rusck [3,4], que foi resumidamente apresentada anteriormente, verifica-se que a componente escalar da tensão induzida por descargas em linhas poderia ser modelada, de forma inédita, como fontes de corrente injetadas na linha, a partir das equações (16) e (17), rerepresentadas abaixo. A linha é modelada como proposto por Dommel [5] e será apresentada no item 2.2.

$$V_{1a} = - \frac{1}{2v_0} \int_{-\infty}^x \frac{\partial V_{ia}(u, t - ((x-u)/v_0))}{\partial t} du$$

$$V_{2a} = - \frac{1}{2v_0} \int_x^{\infty} \frac{\partial V_{ia}(u, t - ((u-x)/v_0))}{\partial t} du$$

O significado físico destas duas equações é: Considerando uma linha infinita, deseja-se saber o valor da tensão escalar induzida na linha em um ponto a uma distância x da descarga. A equação (16) representa a contribuição de tensão de todos os pontos da linha de $-\infty$ até o ponto x e, a (17), a contribuição dos pontos de $+\infty$ até o mesmo ponto x . Assim a tensão escalar que aparece no fio em x é $V_a = V_{1a} + V_{2a}$ conforme a equação (18). Se a linha é discretizada em trechos de comprimento Δu , os valores de V_{1a} e V_{2a} podem ser aproximados para cada trecho substituindo a integral por Δu conforme a equação (25) abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{1a} = \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_{1a}}{\partial t} \Delta u \\ V_{2a} = \frac{1}{2v_0} \frac{\partial V_{1a}}{\partial t} \Delta u \end{array} \right. \quad (25)$$

desta forma tem-se fontes de corrente (em função de V_a , visto que a rotina de cálculo de transitórios utilizada é baseado em fontes de corrente) que serão distribuídas ao longo da linha de acordo com a discretização feita, ou seja, em cada trecho tem-se uma fonte, o que implica em uma aproximação das integrais de (16) e (17) após o cálculo do transitório. Verifica-se aqui que quanto maior for a discretização maior será a precisão dos cálculos. Assim as fontes são modeladas, para cada condutor e em cada trecho, como apresentado na

equação (26) abaixo, de acordo com a figura 2.10 (esta equação da fonte de corrente será analisada no próximo capítulo):

$$I(x,t) = \frac{V_a}{Z_{ii} + (N-1)Z_{ij}} \quad (26)$$

onde

$V_a = V_{1a} + V_{2a}$, dado pela equação (25);

Z_{ii} = impedância própria do condutor;

Z_{ij} = impedância mútua entre os condutores i e j ;

N = número de fios do sistema.

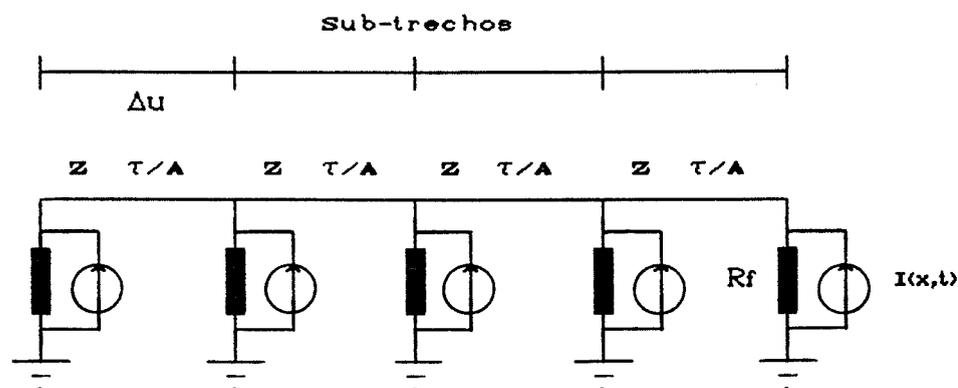


Figura 2.10 - Modelagem das fontes no modelo de linha proposto por Dommel [05].

E, em cada ponto onde se tem uma fonte para a componente escalar, soma-se a componente vetorial da tensão correspondente, após o cálculo do transitório.

No cálculo do transitório com apenas um fio, foi implementada a teoria de Rusck utilizando as duas modelagens de linha, a modelagem por circuitos Π equivalente, tradicional, com fontes de tensão e a modelagem de Dommel [05], com fontes de correntes. Analisando as duas implementações, optamos pela segunda, pelo fato de ser menos complexa a sua implementação, principalmente em sistemas polifásicos, consumir menos memória de computador durante as simulações, ser mais rápido o cálculo computacional (com respeito às duas últimas afirmações, cabe ilustrar que Scuka [27] simula, em um equipamento "VAX780 Computer", casos onde a linha é discretizada em 83 trechos de modelos Π demorando aproximadamente 8 horas e, utilizando o modelo de Dommel com a linha discretizada em 20 trechos, a simulação utilizando um micro-computador tipo "IBM-PC xt" demora alguns minutos) e, também, pelo seu caráter de ineditismo pois não foi encontrado na literatura, nenhum autor que trabalhasse com esta modelagem, todos trabalham com a modelagem para modelo Π de linha.

Assim, com as fontes de corrente injetadas nos condutores das linhas e, somando-se os potenciais vetores, pode-se obter as tensões induzidas nas linhas aéreas por descargas atmosféricas laterais com o programa de cálculo de transitório.

2.2 - Cálculo do Transitório Eletromagnético e Modelagem de Pára-Raios

Para calcular o transitório eletromagnético nas Linhas de Distribuição devido às tensões induzidas por descargas indiretas e às sobretensões causadas por descargas diretas, foi desenvolvido um programa baseado no método de Dommel [5,6,7,8,9]. O programa baseia-se na Teoria das Ondas Viajantes para análise dos elementos com parâmetros distribuídos e na Lei de Integração Trapezoidal para resolver as equações integrais dos elementos com parâmetros concentrados. Para um sistema polifásico, a equação que rege o sistema é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial [e]}{\partial x} = - [l] \frac{\partial [i]}{\partial t} \\ \frac{\partial [i]}{\partial x} = - [c] \frac{\partial [e]}{\partial t} \end{array} \right. \quad (27)$$

onde

[e] = Vetor de tensões de fase;

[i] = Vetor de corrente de fase;

[l] = Matriz de indutância por fase;

[c] = Matriz de capacitância por fase;

Aplicando-se a transformação modal pode-se desacoplar um sistema de M fases e assim, cada fase do sistema pode ser tratada como uma linha monofásica, como proposto por Dommel [5,6] e Naidu [10].

Desta forma, modelando os elementos lineares (linhas, indutâncias e capacitâncias) como fontes de corrente em paralelo com resistências (que são função do intervalo de cálculo Δt e do parâmetro do elemento), pode-se montar o seguinte sistema matricial para o cálculo das tensões nodais do sistema elétrico a ser estudado:

$$[Y] [e(t)] = [i(t)] \quad (28)$$

onde

$[Y]$ = matriz de admitância do sistema (constante para Δt constante);

$[e(t)]$ = Vetor de tensões nodais a ser calculado;

$[i(t)]$ = Vetor de correntes nodais a ser montado a partir das equações dos nós do sistema em cada intervalo de tempo.

Assim, chega-se a um algoritmo para cálculo do transitório:

- 1 → Cálculo do Δt (passo de integração);
- 2 → Montagem de $[Y]$
- 3 → Cálculo das fontes de corrente dos elementos;
- 4 → Montagem de $[i(t)]$
- 5 → Resolução do sistema $[Y] [e(t)] = [i(t)]$;
- 6 → Atualização dos vetores das fontes de corrente dos elementos;
- 7 → Incrementa o contador de tempo e volta ao passo 3, se não tiver excedido o tempo máximo de simulação;
- 8 → Resultados das tensões nodais do sistema em função do tempo.

Quando o sistema elétrico a ser analisado tiver elementos não-lineares (para-raios, "gaps", etc.), a matriz de admitância do sistema ($[Y]$) não é mais constante, podendo ter elementos que são função da corrente, tensão ou tempo e o sistema a ser resolvido é o seguinte:

$$[Y(e, i, t)] [e(t)] = [i(t)] \quad (29)$$

De acordo com Dommel [7,8,9] e Naidu [10], utilizando-se a técnica de compensação pode-se resolver o sistema acima. Esta técnica consiste em retirar da malha e da matriz de admitância (ficando esta constante em todo o tempo) o ramo não-linear, substituindo-o por uma fonte de corrente auxiliar ($i_{pq}(t)$).

O algoritmo para aplicação desta técnica é apresentado abaixo:

- 1 → Cálculo do Δt (passo de integração);
- 2 → Montagem de $[Y]$ sem os elementos não-lineares;
- 3 → Cálculo da impedância Thévenin do sistema vista pelo elemento não-linear;
- 4 → Cálculo das fontes de corrente dos elementos;
- 5 → Montagem de $[i(t)]$
- 6 → Resolução do sistema $[Y] [e^o(t)] = [i(t)]$
 onde $[Y] =$ matriz montada no passo 2
 $[i(t)] =$ vetor de correntes nodais do sistema montado no passo 4
 $[e^o(t)] =$ Vetor de tensões nodais do sistema a ser calculado sem o elemento não-linear;
- 7 → Cálculo da fonte de corrente ($i_{pq}(t)$) que simulará o elemento não-linear:

$i_{pq}(t)$ é calculado pela resolução de duas equações simultâneas:

- Equação linear do sistema:

$$e_p(t) - e_q(t) = e^o_p(t) - e^o_q(t) - Z_i i_{pq}(t)$$

Sendo Z_i impedância Thévenin vista pelo elemento não-linear

- Equação não-linear do sistema:

$$e_p(t) - e_q(t) = f(i_{pq}(t))$$

sendo $f(i_{pq}(t))$ uma função que representa a não-linearidade

utilizando o Método de Newton-Raphson para solução de equações não-lineares, determina-se $i_{pq}(t)$ que satisfaz o sistema de equações acima;

- 8 → Recalcula-se as tensões do sistema a partir da equação abaixo:

$$[e_{pq}(t)] = [e_{pq}^0(t)] - [Z] [i_{pq}(t)]$$

sendo

$[e_{pq}(t)]$ = vetor de tensões nodais do sistema completo

$[Z]$ = matriz de impedância Thévenin do sistema visto pelo elemento não-linear;

- 9 → Atualização dos vetores das fontes de corrente dos elementos;
- 10 → Incrementa o contador de tempo e volta ao passo 4, se não tiver excedido o tempo máximo de simulação;
- 11 → Resultados das tensões nodais do sistema em função do tempo.

Os pára-raios (elementos não lineares) simulados no programa podem ser de dois tipos:

- 1 - Carboneto de Silício (SiC) que é um gap em série com uma resistência não-linear;
- 2 - Óxido de Zinco (ZnO) que é apenas uma resistência não-linear.

A função $f(i_{pq}(t))$ que representa os dois tipos de pára-raios no programa é obtida pelas curvas $V \times I$ dos mesmos, curvas estas que apresentam a forma mostrada na figura 2.11.

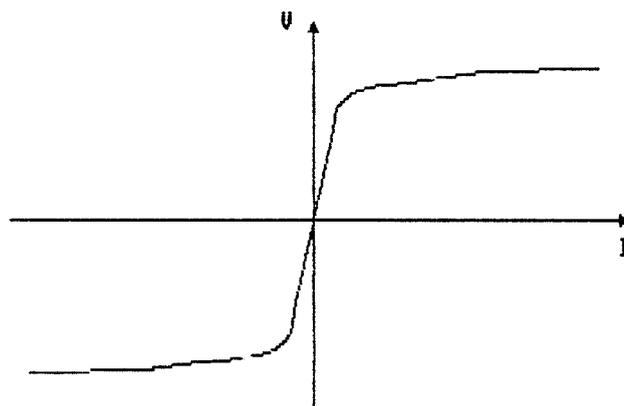


Figura 2.11 - Exemplo de Curva $V \times I$ de pára-raios.

Nestas curvas a parte negativa é simétrica à parte positiva, isto permite o armazenamento apenas do 1º quadrante. No programa, esta curva é representada por segmentos de retas ou por uma função do tipo $I = KV^\alpha$ (conforme Dommel [7,8,9]) onde K e α são constantes que dependem do pára-raio utilizado.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Pretende-se analisar sobretensões transitórias em linhas de Distribuição de Energia Elétrica causadas por descargas atmosféricas, visando o estudo de proteção da linha contra estas sobretensões.

3.1 - A Linha de Distribuição

A linha de distribuição a ser analisada possui quatro fios, sendo três fases e um neutro. Nesta linha, o fio neutro pode ser isolado da terra, aterrado em alguns pontos ou multi-aterrado (aterrado em todos os nós).

A estrutura física desta linha é mostrada na figura 3.1. Pode-se observar que as três fases estão em um plano paralelo à terra a uma altura h_1 em relação à terra e o fio neutro localizado em um ponto abaixo deste plano a uma altura h_2 , próximo ao poste.

O comprimento admissível da linha a ser analisada é um parâmetro limitado principalmente pela memória disponível do computador que será utilizado para cálculo.

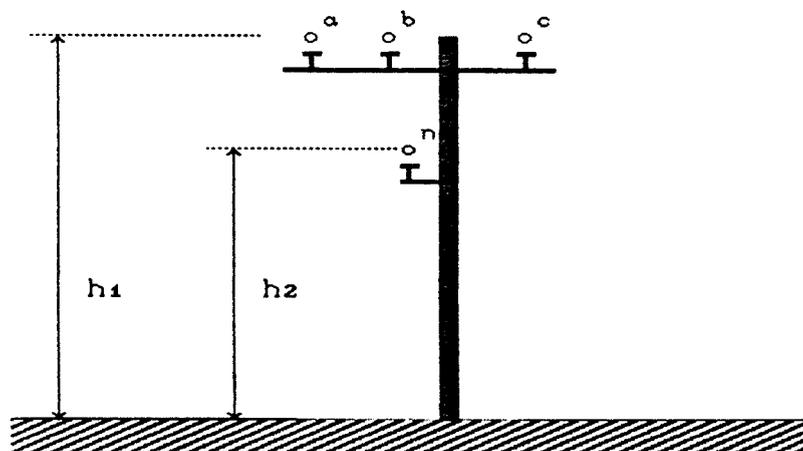


Figura 3.1 - Modelo da linha de distribuição.

A matriz de impedâncias de surto desta linha, como proposto por Dommel [5] é:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (01)$$

com:

$$Z_{ii} = 60 \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

Z_{ii} = impedância própria do condutor i (Z_p)

$$Z_{ij} = Z_{ji} = 60 \ln \frac{d_{ij}}{d_{ij}}$$

Z_{ij} = impedância mútua entre os condutores i e j (Z_m)

h_i = altura do condutor i

r_i = raio do condutor i

d_{ij} = distância entre os condutores i e j

d_{ij}^{\cdot} = distância entre o condutor i e a imagem de j .

É feita uma aproximação da matriz $[Z]$ real, calculada pela formulação acima para que se possa trabalhar a linha como uma linha simétrica. Esta aproximação consiste em fazer com que todas as impedâncias próprias e mútuas sejam iguais entre si, respectivamente. Para isso, faz-se:

$$Z_p = (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} + Z_{nn}) / 4$$

$$Z_m = (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc} + Z_{in}) / 4$$

sendo $Z_{in} = (Z_{an} + Z_{bn} + Z_{cn}) / 3$.

Assim, a matriz $[Z]$ de impedância de surto para este tipo de linha, que será utilizada no programa de cálculo de transitório, será:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \quad (02)$$

Todas estas aproximações, feitas para obter as equações matriciais (01) e (02), são justificadas pelo fato de o cálculo das sobretensões originadas por descargas atmosféricas partirem de dados da descarga que não são precisos nem conhecidos na sua totalidade. Desta forma, não

se justificaria procurar excessiva precisão no cálculo da matriz de impedância de surto, visto que isto aumentaria a complexidade dos cálculos sem, contudo, melhorar a precisão dos resultados, já que as fórmulas aproximadas dão resultados satisfatórios.

Para análise das tensões induzidas na linha por descargas indiretas, para se ter uma boa precisão nos cálculos com a teoria de Rusck como foi implementada, a linha deve ser discretizada em sub-trechos que variam de $Y/2m$ a $2Ym$ (Y = menor distância entre alinha e o ponto de incidência da descarga). O tamanho dos sub-trechos depende do comprimento da linha a ser analisado e dos parâmetros da descarga, tais como velocidade da corrente de retorno e menor distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga. A análise é, também, função do intervalo de tempo (Δt) de cálculo (de integração) utilizado no programa, conforme mostrado por Yokoyama [11].

Em cada ponto da discretização serão colocadas fontes de corrente em cada fio para simular os efeitos da descarga lateral. Estas fontes de corrente serão modeladas como mostrado no diagrama unifilar da figura 3.2.

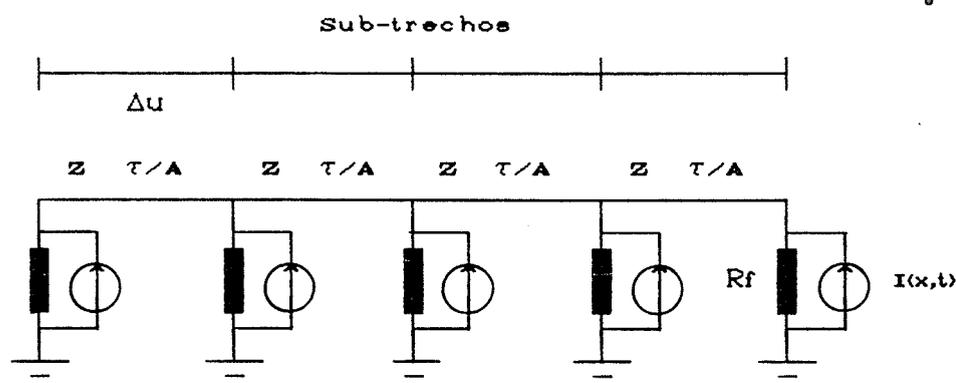


Figura 3.2 - Modelagem das fontes na linha.

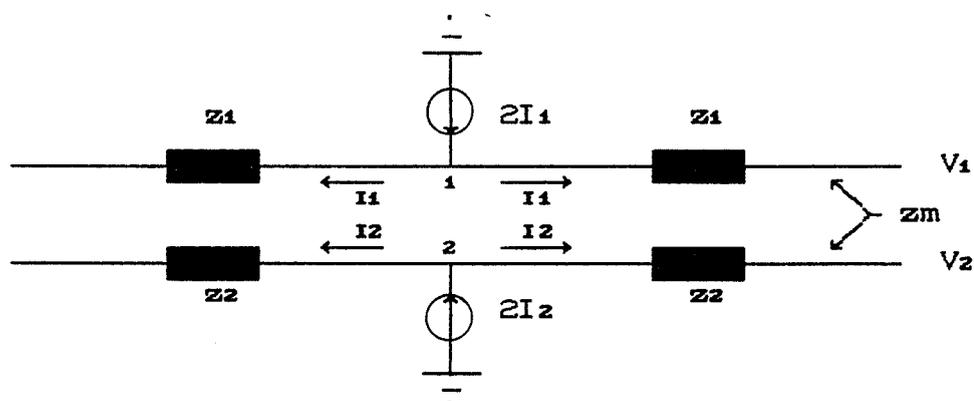
Na figura 3.2, τ é o tempo de trânsito nos fios da linha, A é o número de trechos em que a linha é discretizada e Z é a impedância de surto da linha. Quanto às fontes de corrente, o resistor R_f é da ordem de $10^{10} \Omega$ para não alterar as características da linha (ou seja, apenas é feita uma injeção de corrente na linha sem alterar os seus parâmetros naquele ponto) e o valor de $I(x,t)$ é dado pela equação abaixo (que foi apresentada no capítulo 2):

$$I(x,t) = \frac{V_a}{Z_{ii} + (N-1)Z_{ij}}$$

Esta fonte de corrente (que representa a componente escalar da descarga) é injetada no circuito (linha) durante o cálculo do transitório e, ao final, é somada em cada nó a componente que representa a parte vetorial da descarga,

obtendo-se assim a tensão total induzida na linha.

Cabe aqui justificar o porque do denominador da fórmula utilizada para cálculo da fonte de corrente. No modelo proposto por Rusck [3,4] para uma linha monofásica, tem-se que a tensão induzida na linha é dada pela equação (21) apresentada no capítulo 2. Como o programa de cálculo de transitório trabalha com fontes de corrente, para chegar ao mesmo valor de tensão dado pela equação (21) tem-se que ter um valor de corrente injetado ao longo da linha igual a V_a/Z_{ii} . No que diz respeito a uma linha polifásica, Rusck [3,4] diz que a tensão induzida em um fio não influi na tensão induzida que aparece nos outros fios devido a uma descarga atmosférica e, como o programa leva em conta o acoplamento entre os fios, para obter-se a tensão que Rusck [3,4] propõe tem-se que injetar na linha um valor de corrente que leve em consideração o acoplamento considerado pelo programa. Desta forma, para uma linha de dois fios tem-se:



e o sistema de equações que descreve o circuito é:

$$\begin{cases} V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 = V_{R1} \\ V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 = V_{R2} \end{cases}$$

onde V_{R1} é a tensão induzida em 1 e V_{R2} a tensão induzida em 2 devido a uma descarga atmosférica. Da primeira equação tem-se:

$$I_1 = \frac{V_{R1} - Z_{12}I_2}{Z_{11}}$$

Substituindo I_1 na segunda equação:

$$V_{R1} = Z_{21} \frac{V_{R1} - Z_{12}I_2}{Z_{11}} + I_2 Z_{22}$$

Como a linha é considerada simétrica, $Z_{11} = Z_{22} = Z_p$ e $Z_{12} = Z_{21} = Z_m$ e, devido a Rusck $V_{R1} = V_{R2} = V_R$ tem-se I_2 da equação acima como:

$$I_2 = \frac{V_{R1} (Z_m - Z_p)}{(Z_m^2 - Z_p^2)} = \frac{V_R}{(Z_m + Z_p)}$$

Substituindo I_2 na equação de I_1 temos:

$$I_1 = \frac{V_R}{(Z_m + Z_p)}$$

Assim, verifica-se que para $V_{R1} = V_{R2}$ neste sistema,

simétrico, deve-se ter $I_1 = I_2$.

Para uma linha de três fios, o sistema que rege o circuito é:

$$\begin{cases} V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 = V_{R1} \\ V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + Z_{23}I_3 = V_{R2} \\ V_3 = Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 = V_{R3} \end{cases}$$

Neste sistema $Z_{ii} = Z_p$ e $Z_{ij} = Z_m$ devido às considerações de simetria. Da dedução para 2 fios feita acima tem-se que, devido à simetria do sistema, $I_1 = I_2 = I_3$ para V_{R1} , V_{R2} e V_{R3} .

Desta forma a primeira (ou a segunda ou a terceira) equação do sistema a três fios fica:

$$Z_p I_1 + Z_m I_1 + Z_m I_1 = V_R$$

sendo:

$$I_1 = \frac{V_R}{(Z_p + 2Z_m)}$$

Logo, a partir do que foi mostrado para dois e três fios, pode-se generalizar a forma da fonte de corrente como:

$$I = \frac{V_R}{(Z_p + (N - 1)Z_m)}$$

onde N é o número de fios do sistema.

Esta linha de distribuição descrita pode ser apenas um trecho finito de linha, ou uma linha muito longa que pode ser considerada infinita. Quando a linha é curta, suas extremidades podem ser abertas ou possuírem alguma impedância (resistor) para a terra, como é mostrado na figura 3.3 onde uma extremidade está aberta e a outra terminada por resistores.

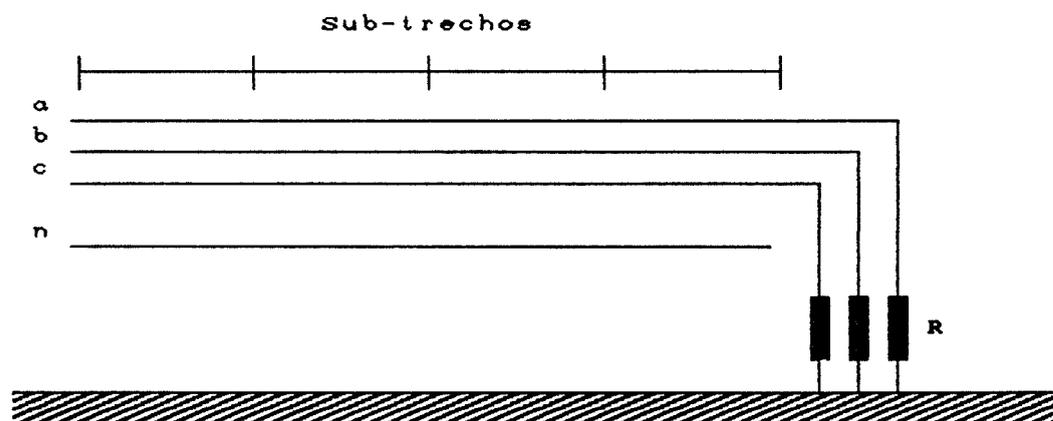


Figura 3.3 - Linha com terminação aberta e com resistor.

Quando a linha é infinita, pode-se analisar somente um trecho próximo à descarga e, nas extremidades deste trecho a ser analisado, a linha será casada, simulando linha infinita ou muito longa, de forma que não tenha reflexões das ondas que atingem estes pontos, conforme mostrado na figura 3.4.a. Na figura 3.4.b é apresentada a associação de resistores (R_c) utilizada para fazer o casamento de

impedância da linha.

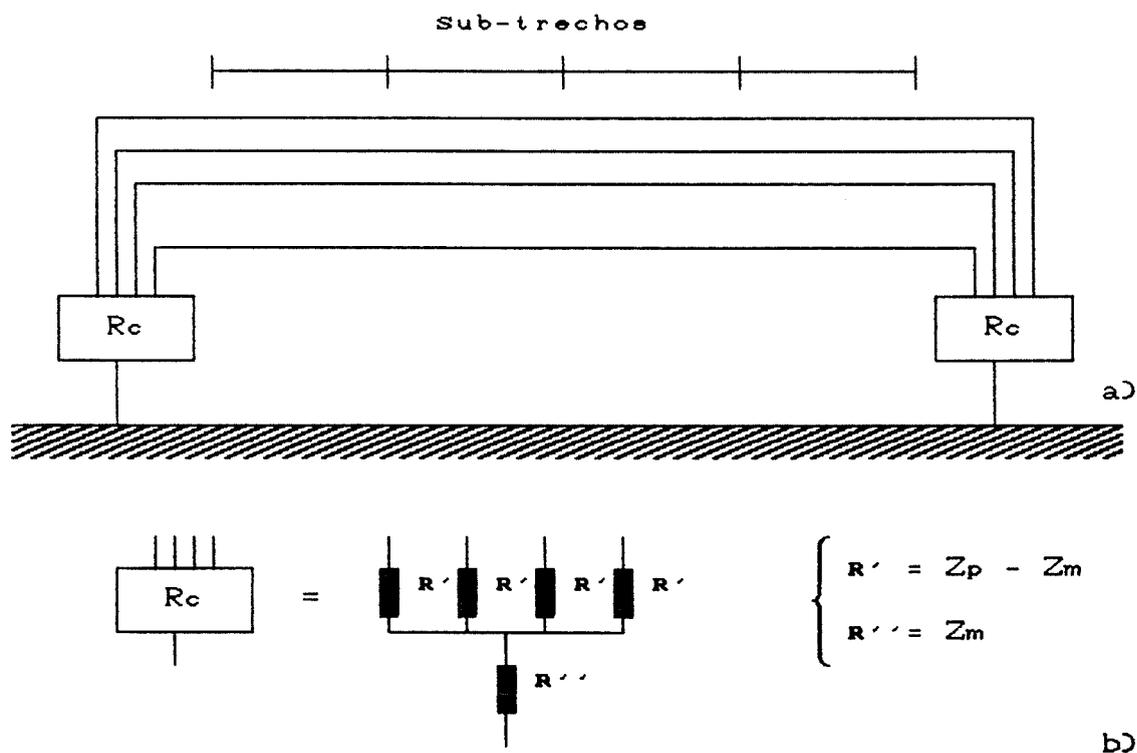


Figura 3.4 - Linha Longa (infinita) casada nos extremos do trecho analisado.

Nos pontos onde existirem descontinuidades no fio neutro (aterramento) serão colocadas fontes de correntes. Estas fontes representam a componente vetorial que é injetada neste fio e que alterará o cálculo do transitório, como mostrado na figura 3.5, para satisfazer as condições da teoria de Rusck [3,4].

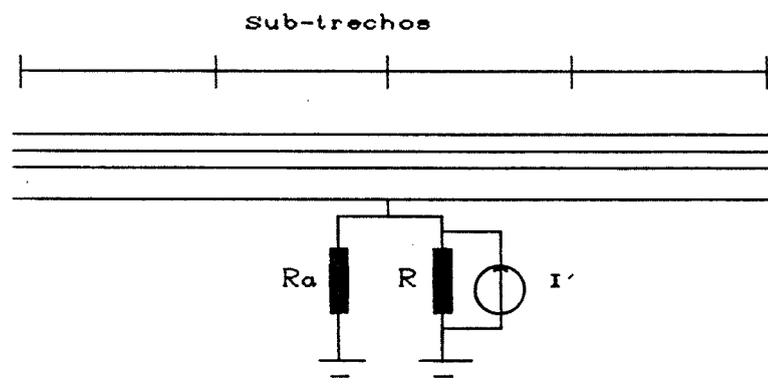


Figura 3.5 Modelagem do resistor de aterramento (R_a).

Na figura 3.5, a fonte de corrente I' , que deve ser colocada no ponto onde o neutro é aterrado com um resistor R_a , tem as seguintes características:

$$R = R_a$$

$$I' = \frac{\frac{\partial A_i}{\partial t}}{R} \quad (03)$$

sendo $\partial A_i / \partial t$ apresentado no capítulo 2 (equação (23)).

No que diz respeito às descargas diretas, não há necessidade de discretização da linha em trechos muito pequenos, apenas injeta-se no fio em que se assume cair a descarga uma fonte de corrente (I'') tipo impulsiva, como mostrado no capítulo 2. O sistema a ser simulado é apresentado na figura 3.6, sendo $R = 10^{10} \Omega$, para não alterar as características da linha.

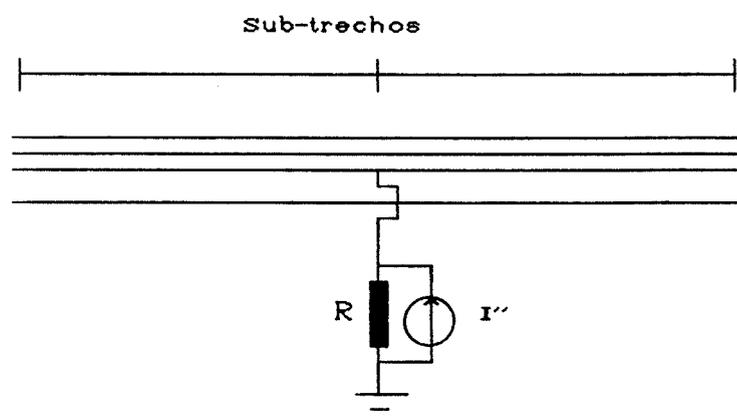


Figura 3.6 - Circuito da linha para simular descargas atmosféricas diretas.

No caso de descarga direta, se o nível básico de isolamento (NBI) da linha for atingido, significa que pode haver ruptura do isolamento do sistema, podendo ocorrer uma disrupção através dos isoladores nos postes (nós) mais próximos.

3.2 - O Sistema de Proteção

Quanto ao sistema de proteção, os dispositivos utilizados nestas linhas de distribuição para proteção de sobretensões causadas por descargas são pára-raios de Óxido de Zinco e Carboneto de Silício, cujas características são mostradas no capítulo 2.

No programa podemos simular pára-raios instalados de duas formas diferentes nas LD's Trifásicas com fio neutro:

- a - Pára-raios das fases para o neutro com este aterrado (figura 3.7.a);

- b - Pára-raios das fases para um único resistor aterrado (figura 3.7.b).

Este trabalho objetiva desenvolver uma ferramenta computacional para estudar o tipo de instalação apresentado no item a.

O tipo do item b foi implementado para que se pudesse testar o programa com um trabalho publicado por Yokoyama [15] e fazer estudos comparativos com o tipo de instalação apresentado no item a. Neste tipo de ligação a linha de distribuição pode ou não ter o fio neutro.

Em todos os casos os pára-raios são analisados em função da tensão existente nos seus terminais, sendo no caso a entre a fase e o neutro, no b entre a fase e o ponto t.

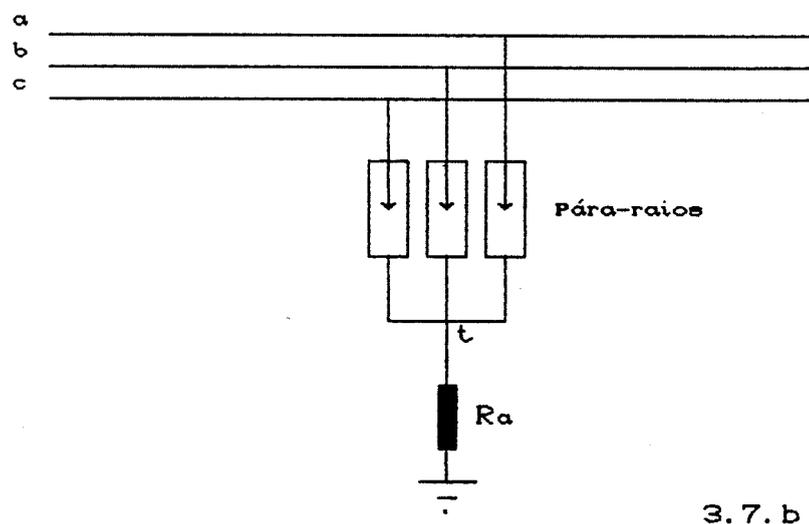
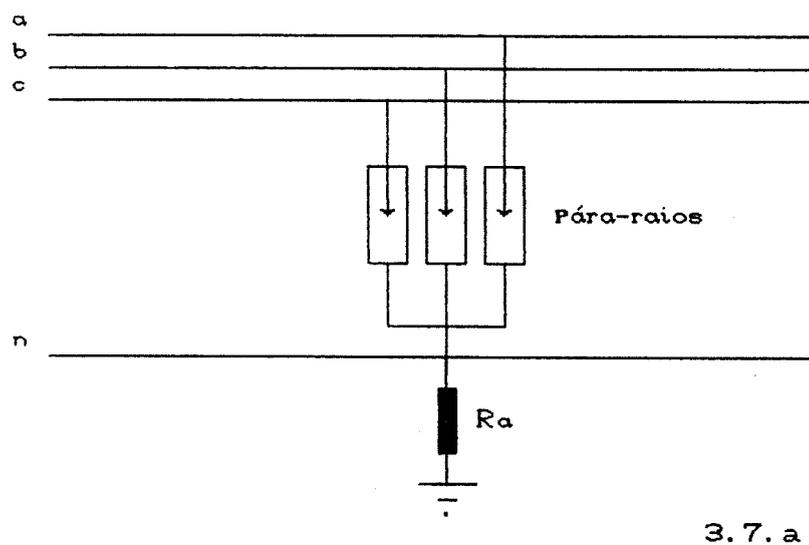


Figura 3.7 - Tipos de Ligação dos pára-raios nas LD's:
 a - Pára-raios ligados entre fases e neutro com este aterrado;
 b - pára-raios ligados entre fases e um resistor de aterramento.

No que diz respeito às descargas indiretas, quando um pára-raios atua, forma-se um caminho na direção vertical entre os extremos do pára-raios, possibilitando a circulação de uma corrente neste caminho provocada pela componente vetorial do campo eletromagnético que existe sob a linha na direção vertical (a tensão vetorial $h\partial A_i/\partial t$ apresentada nas equações do capítulo 2). Esta componente, como já foi visto, não provoca injeção de corrente na linha quando não existe ligação direta entre um fio e a terra ou entre dois fios na vertical, apenas soma-se, ao final do cálculo do transitório, o seu valor de tensão correspondente nos diversos pontos analisados da linha. Quando existe um pára-raio, para a modelagem ficar completa e se computar a contribuição desta componente no cálculo do transitório, deve-se considerar o ramo não-linear (o pára-raios na figura 3.8.a) como um elemento não-linear em série com uma fonte de tensão V_v como mostrado na figura 3.8.b.

A fonte de tensão V_v , que será computada no cálculo do transitório, é função da componente vetorial nos pontos \underline{m} e \underline{n} (extremidades onde o elemento não-linear está ligado) como mostrado na equação abaixo:

$$V_v = - (V_{vm} - V_{vn})$$

sendo que o ponto \underline{m} está a uma altura superior à do ponto \underline{n} ,

em relação à terra e $V_{vm} = h\partial A_i/\partial t$ no ponto \underline{m} e $V_{vn} = h\partial A_i/\partial t$ no ponto \underline{n} .

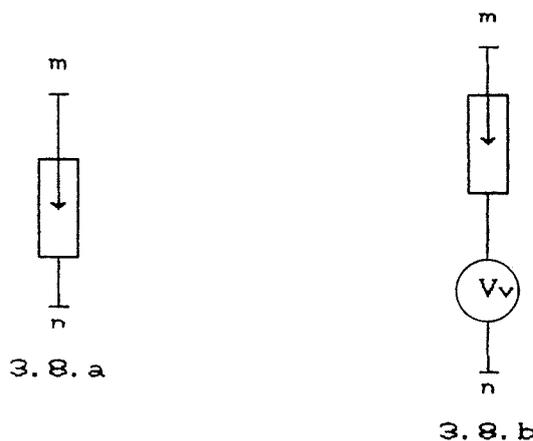


Figura 3.8 - a - Ramo não-linear sem a computar o efeito da componente vetorial;

b - Ramo não-linear computando o efeito da componente vetorial.

Na tabela 3.1 são apresentados os valores de V_v para os pontos \underline{m} e \underline{n} correspondentes aos dois tipos de ligação possíveis dos pára-raios nas linhas de distribuição.

Tipo	Ponto \underline{m}	Ponto \underline{n}
a	$V_{vm} = V_{fase}$	$V_{vn} = V_{vneutro}$
b	$V_{vm} = V_{fase}$	$V_{vn} = V_{vt} = 0$

Tabela 3.1 - Valores de V_v nos pontos \underline{m} e \underline{n} .

..A partir da revisão e da apresentação da modelagem

do sistema, é apresentado no próximo capítulo a simulação de trabalhos publicados em revistas especializadas que tratam sobre o assunto.

CAPÍTULO 4

VALIDAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

4.1 - Introdução

Neste capítulo será apresentada uma série de casos publicados na literatura técnica que tratam de sobretensões induzidas em linhas de Distribuição de Energia Elétrica aéreas, causadas por descargas atmosféricas laterais, com o objetivo de validar o sistema desenvolvido nesta dissertação.

São apresentados quatro casos distintos que estão estritamente ligados com este trabalho. O primeiro trata de tensões induzidas em uma linha monofásica. O segundo é semelhante ao primeiro, sendo a análise feita para um sistema polifásico (a três fios). O terceiro caso trata de uma linha a 2 fios sendo um multi-aterrado. Já no último caso é feita uma análise de tensão induzida em um sistema a três fios com pára-raios distribuídos ao longo da linha.

A partir deste capítulo o programa desenvolvido será referenciado por: CSDDAL - Cálculo de Sobretensões Devido a Descargas Atmosféricas Laterais.

4.2 - Primeiro Caso - Estudos em uma linha monofásica

Yokoyama [11] apresenta um estudo de cálculo de tensão induzida em uma linha com um fio. Os dados do caso base são mostrados abaixo e se referem à figura 4.1.

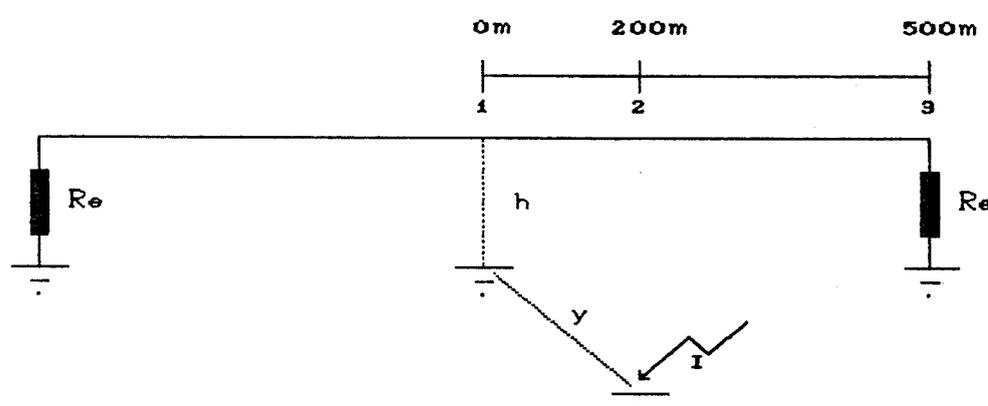
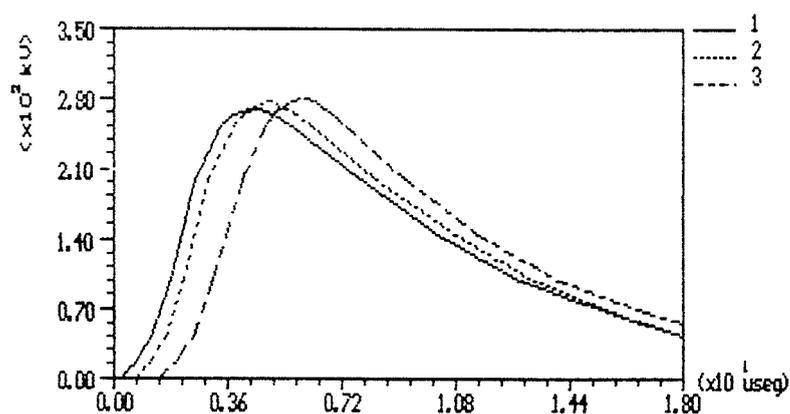


Figura 4.1 - Linha monofásica.

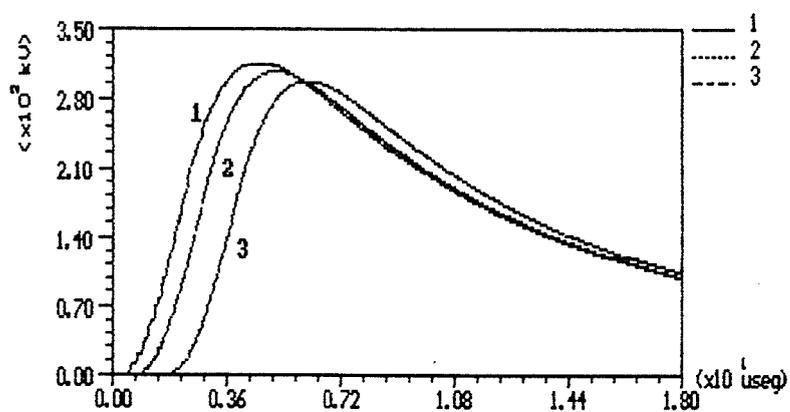
Dados:	Comprimento da linha	: $l = 1000\text{m}$
	Resistência nos extremos	: $R_e = 511\Omega$
	Velocidade da cor. de retorno	: $v = 30\text{m}/\mu\text{s}$
	Distância do ponto de incidência da descarga à linha	: $y = 100\text{m}$
	Tempo de frente da corrente de retorno	: $T_f = 2\mu\text{s}$
	Valor de pico da corrente de retorno	: $I = 100\text{kA}$
	Altura da linha	: $h = 10\text{m}$
	Raio do condutor	: $r = 0,4\text{cm}$
	Como R_e é igual à impedância de surto da linha,	

não há reflexões nas extremidades da mesma.

Na figura 4.2.a vemos a tensão induzida na linha conforme calculado por Yokoyama [11] nos pontos 1,2 e 3 da figura 4.1 para o caso base. Na figura 4.2.b é mostrado o mesmo caso, usando-se o programa CSDDAL. O maior valor de pico é no ponto 1 (figura 4.2.b).



4.2.a

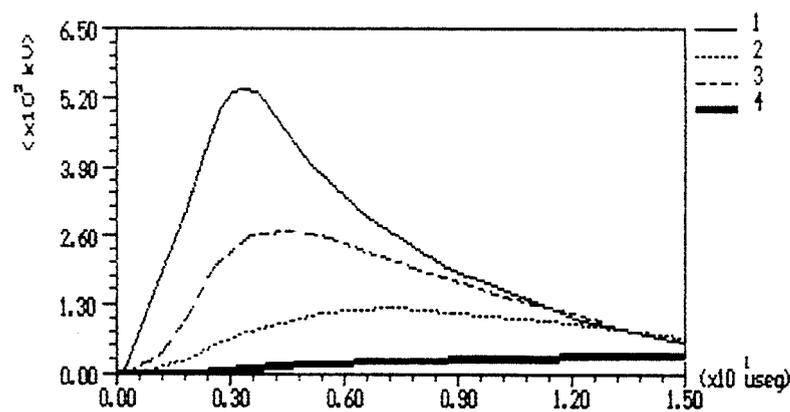


4.2.b

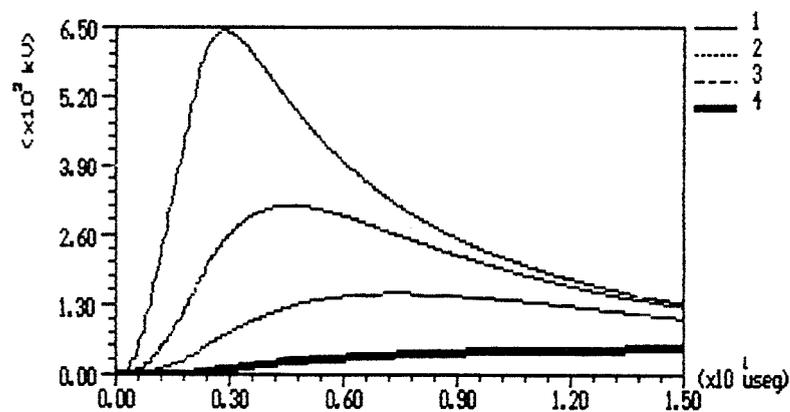
Figura 4.2 - Tensão nos pontos 1,2 e 3 da figura 4.1.

a - Yokoyama; b - CSDDAL.

Na figura 4.3.a Yokoyama [11] faz uma série de simulações comparando o efeito de se variar o ponto de incidência da descarga, afastando-o ou aproximando-o da linha e, na figura 4.3.b é feita a mesma comparação usando o programa CSDDAL. As curvas correspondem a tensão induzida no ponto da linha mais próximo à descarga (ponto 1 da figura 4.1). Quanto menor a distância y maior é a tensão induzida.



4.3.a

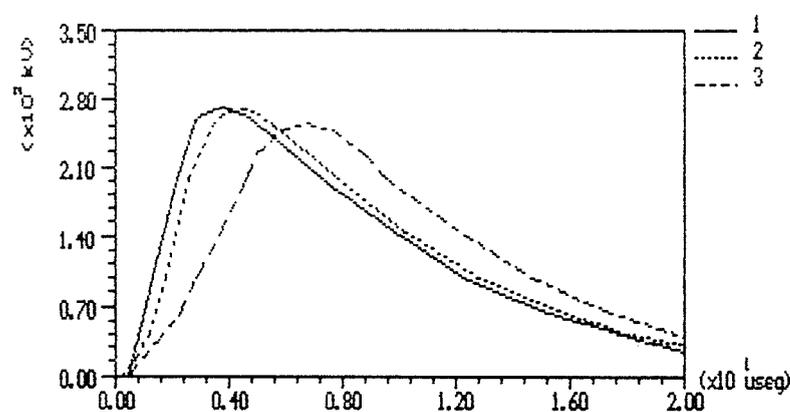


4.3.b

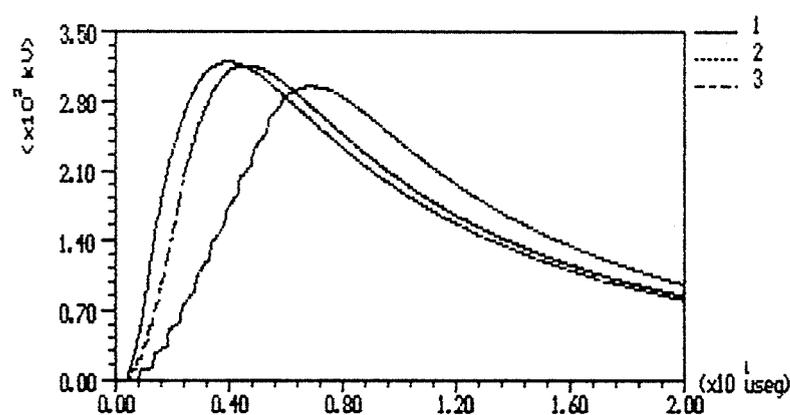
Figura 4.3 - Tensão no ponto 1 da figura 4.1 com:

1 $\rightarrow y=50$ m, 2 $\rightarrow y=100$ m, 3 $\rightarrow y=200$ m, 4 $\rightarrow y=500$ m.

Na figura 4.5.a Yokoyama [111] mostra a alteração na forma de onda da tensão induzida no ponto 1 quando o tempo de frente da corrente de retorno varia e, na figura 4.5.b tem-se o mesmo caso com o programa CSDDAL. Pode-se observar que para tempos de frente menores, o valor e o tempo de pico da onda de tensão induzida são maiores e menores, respectivamente.



4.5.a



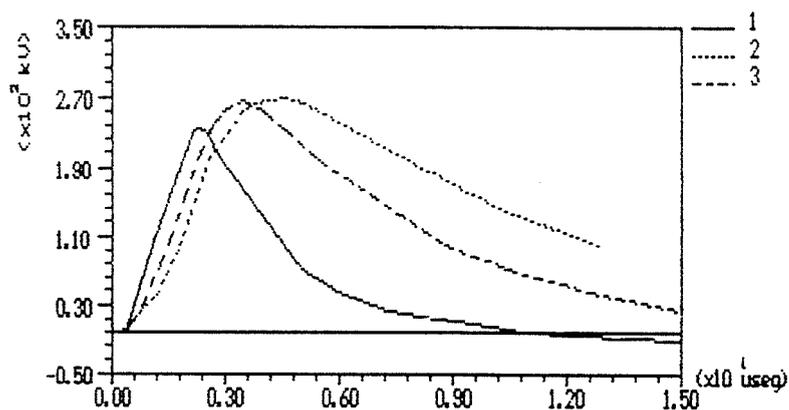
4.5.b

Figura 4.5 - Tensão no ponto 1 da figura 4.1 com:

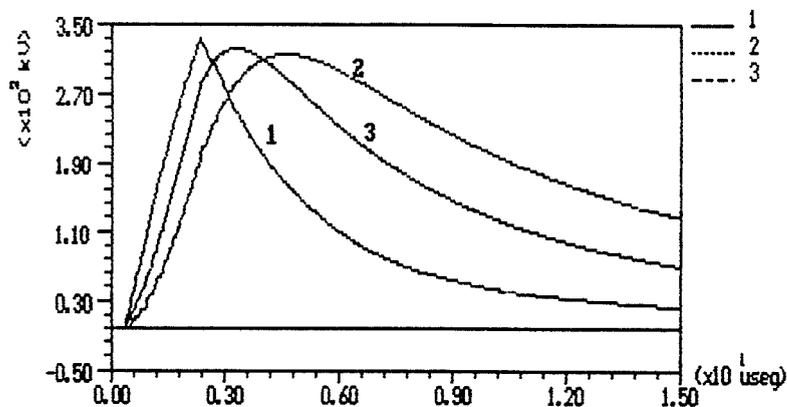
1 $\rightarrow T_f = 1 \mu s$, 2 $\rightarrow T_f = 2 \mu s$, 3 $\rightarrow T_f = 5 \mu s$

a - Yokoyama; b - CSDDAL.

Na figura 4.6.a Yokoyama [11] mostra a variação da forma de onda da tensão induzida no ponto 1 quando a velocidade da corrente de retorno (v) é variada, e na figura 4.6.b tem-se o mesmo fato analisado com o programa CSDDAL. Aqui verifica-se que quanto maior a velocidade menor é o tempo de pico da tensão e maior é o seu valor de pico, de acordo com a figura 4.6.b.



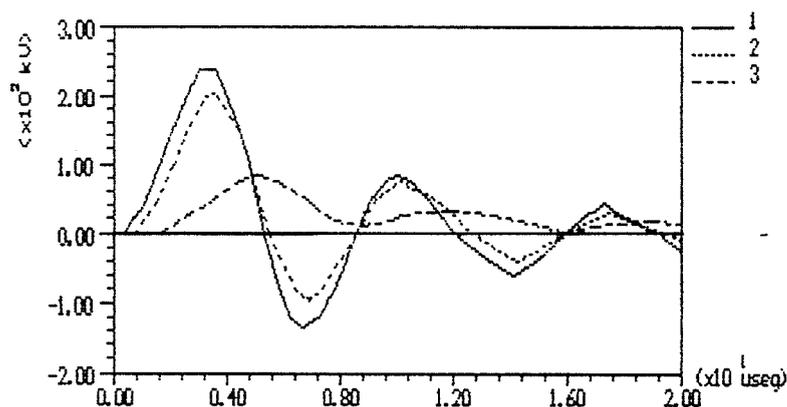
4.6.a



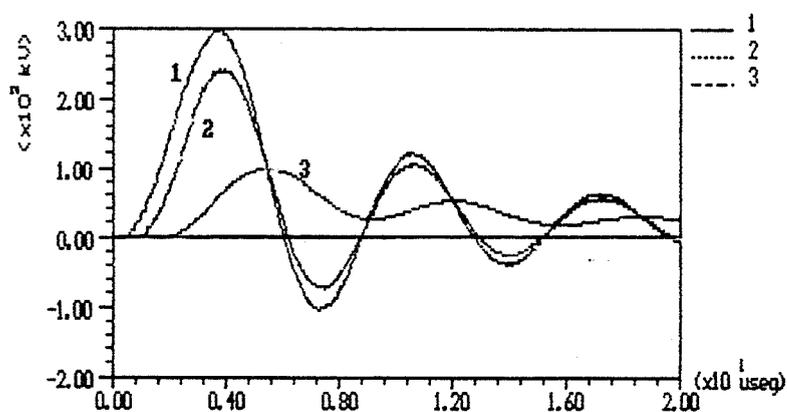
4.6.b

Figura 4.6 - Tensão no ponto 1 da figura 4.1 sendo:
 1- $v=140 \text{ m}/\mu\text{s}$; 2- $v=30 \text{ m}/\mu\text{s}$; 3 - $v=50 \text{ m}/\mu\text{s}$.
 a - Yokoyama; b - CSDDAL.

Finalizando este caso, Yokoyama [11] mostra na figura 4.7.a o efeito na linha quando ao invés de a linha ser casada ($R_e = 511\Omega$) nas extremidades, coloca-se resistores nas mesmas com valor ôhmico diferente do valor da impedância de surto da linha e, na figura 4.7.b tem-se o mesmo caso simulado pelo programa CSDDAL. Nas figuras 4.7.a e 4.7.b $R_e = 100\Omega$ e as curvas representam tensões nos pontos 1, 2 e 3 da figura 4.1.



4.7.a



4.7.b

Figura 4.7 - Tensão em 1, 2 e 3 da figura 4.1 com $R_e = 100\Omega$.

a - Yokoyama; b - CSDDAL.

Observa-se nas simulações deste caso que há uma pequena diferença entre os valores de pico das ondas de tensão induzida calculadas por Yokoyama [11] e as mesmas simuladas com o programa CSDDAL, sendo os valores apresentados aqui um pouco maiores. Esta diferença se dá devido ao fato de Yokoyama [11] calcular a tensão induzida considerando a componente vetorial do campo eletromagnético de forma errônea. Posteriormente Yokoyama reconheceu seu erro, sendo este reconhecimento apresentado em um outro trabalho, referência [13], apresentada na bibliografia desta dissertação. A partir disso, conclui-se que as simulações feitas com o programa CSDDAL estavam corretas, podendo-se basear para esta conclusão nos cálculos apresentados nos casos a seguir e, nas fórmulas apresentadas por Rusck [3,4].

4.3 - Segundo Caso - Simulação de uma linha Polifásica

Neste ítem é apresentado simulações feitas considerando uma linha polifásica com três fios, conforme Yokoyama [13].

O modelo de linha utilizado é mostrado na figura 4.8, sendo a linha casada nos extremos de forma a não existirem reflexões de ondas viajantes nestes pontos.

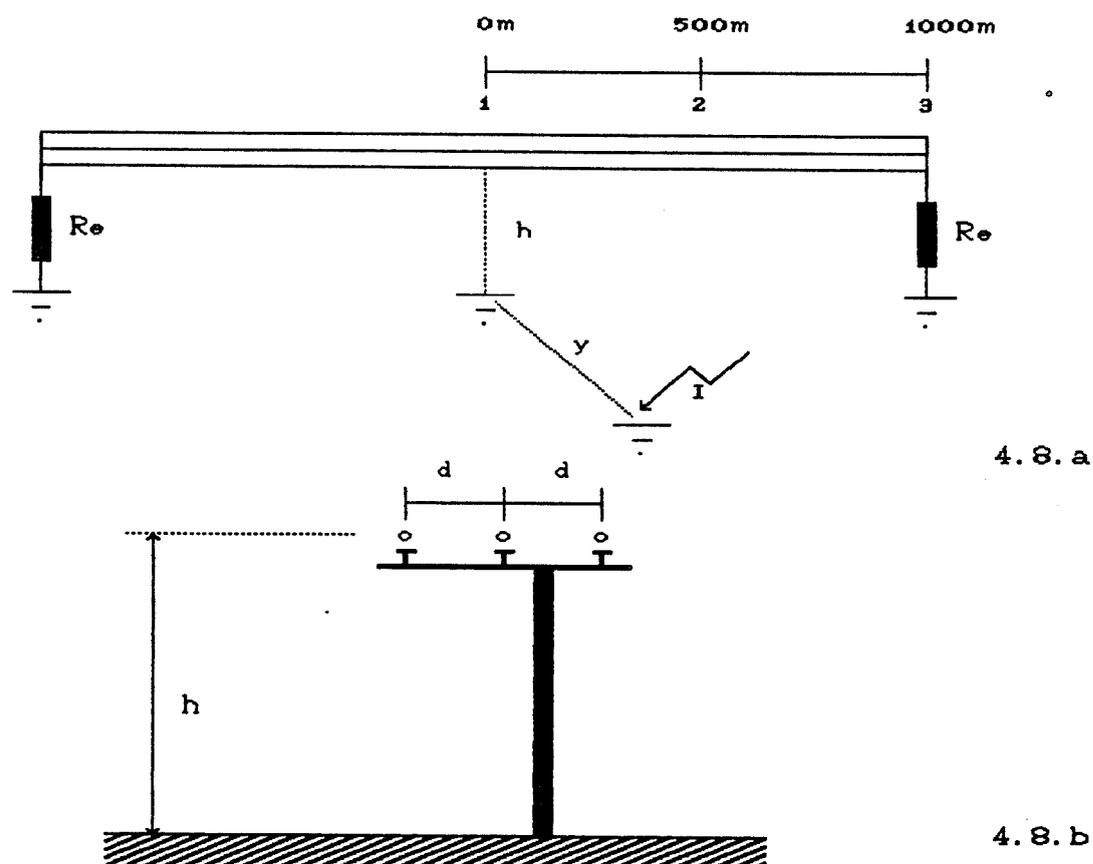
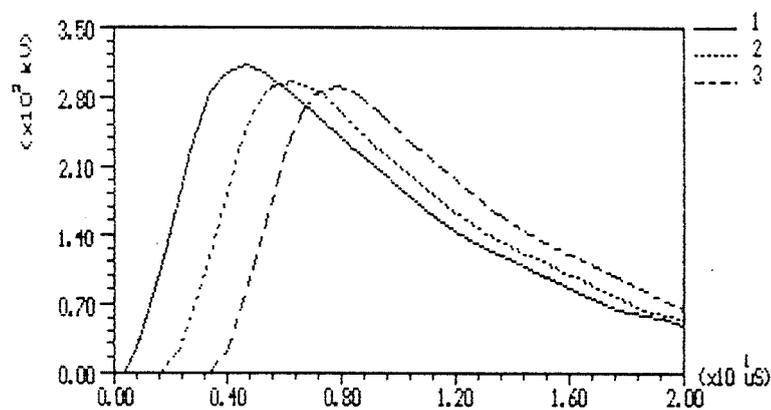


Figura 4.8 - Linha polifásica: a) vista lateral b) vista de perfil.

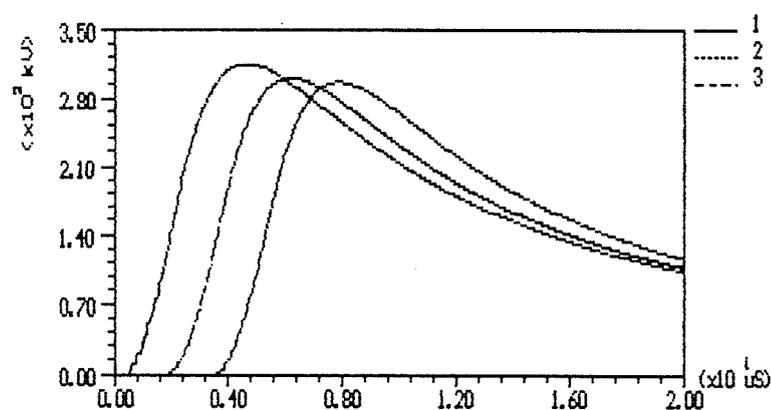
Os dados do sistema simulado são apresentados abaixo:

Comprimento da linha	:	$l = 2000\text{m}$
Resistência nos extremos	:	não refletivo
Velocidade da cor. de retorno	:	$v = 30\text{m}/\mu\text{s}$
Distância mínima do ponto de incidência da descarga à linha	:	$y = 100\text{m}$
Tempo de frente da corrente de retorno	:	$T_f = 2\mu\text{s}$
Valor de pico da corrente de retorno	:	$I = 100\text{kA}$
Altura da linha	:	$h = 10\text{m}$
Raio do condutor	:	$r = 0,4\text{cm}$
Distância entre duas fases adjacentes	:	$d = 0.5\text{m}$

Em seu trabalho Yokoyama [13] simulou o caso apresentado acima, para uma descarga que incide no meio do trecho de 2000m da linha analisada, a uma distância de 100m da mesma. As tensões induzidas calculadas por ele, para os pontos 1,2 e 3, são apresentadas no gráfico da figura 4.9.a. Estas simulações foram repetidas com o CSDDAL e os resultados, praticamente idênticos, são apresentados na figura 4.9.b.



4.9.a



4.9.b

Figura 4.9 - Tensão nos pontos 1,2 e 3 da figura 4.8.a.

a - Yokoyama; b - CSDDAL.

Desta forma comprovou-se a eficiência do programa CSDDAL para calcular tensões induzidas por descargas atmosféricas laterais em linhas aéreas com mais de um fio.

4.4 - Terceiro Caso - Comparação com medições em modelos reduzidos

Neste item são apresentados trabalhos de dois autores, Yokoyama [13,14] e Paulino [17], sobre tensões induzidas em linhas a dois fios podendo um dos fios ser multi-aterrado.

Yokoyama [13,14] simulou uma linha a dois fios de um modelo reduzido construído por ele e verificou que suas simulações representavam suas medições feitas no modelo reduzido. Os dados do modelo reduzido simulado por ele são apresentados abaixo:

Comprimento da linha	:	$l = 5m$
Resistência nos extremos	:	não refletivo
Velocidade da cor. de retorno	:	$v = 39m/\mu s$
Distância mínima do ponto de incidência da descarga à linha	:	$y = 0.4m$
Tempo de frente da corrente de retorno	:	$T_f = 5ns$
Valor de pico da corrente de retorno	:	$I = 47mA$
Altura da linha	:	$h = 0.5m$
Raio do condutor	:	$r = 0,1mm$
Distância entre duas fases	:	

adjacentes : $d = 0.5\text{cm}$

Resistor de aterramento do fio 2: $R_t = 0\Omega$

A figura 4.10 mostra o modelo cujos dados são apresentados acima.

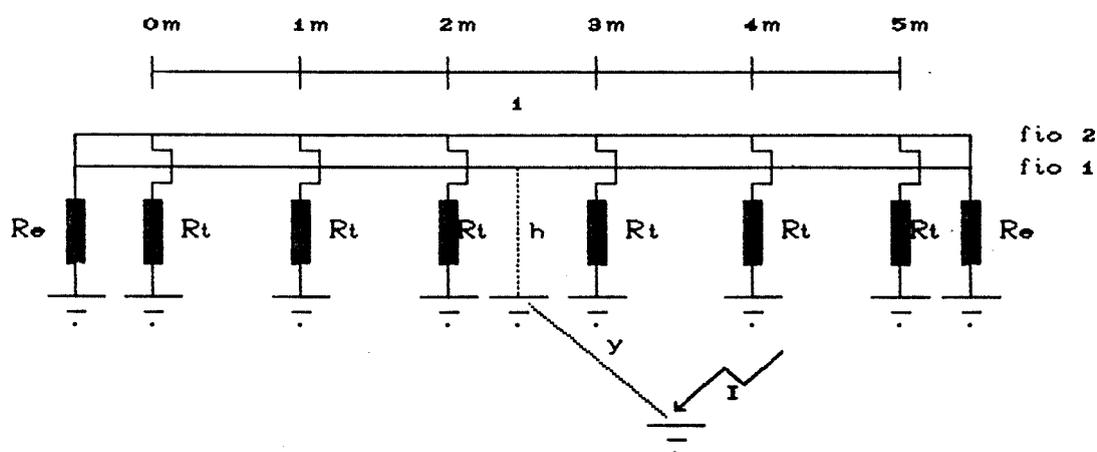


Figura 4.10 - Linha a dois fios sendo um multi-aterrado.

Inicialmente Yokoyama simulou o caso apresentado acima sem o fio 2 e seus respectivos aterramentos, obtendo a curva de tensão induzida no fio 1 no ponto 1 (ponto mais próximo da descarga) que é apresentada na figura 4.11 (curva 3). Também é apresentado na figura 4.11 (curva 2) o resultado da medição em modelo reduzido feita por Yokoyama. E, na curva 1 da mesma figura tem-se o resultado da simulação com o programa CSDDAL.

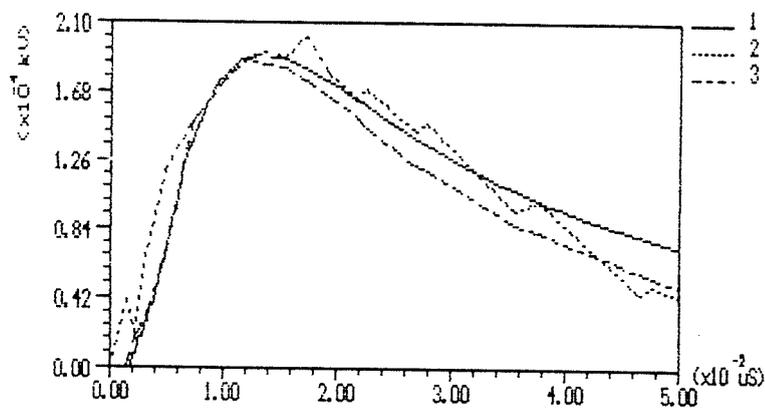


Figura 4.11 - Linha sem o fio 2.

Curva: 1 - Simulação com o CSDDAL

2 - Medição Yokoyama

3 - Simulação Yokoyama.

A seguir Yokoyama [13,14] simulou o mesmo caso, considerando o fio 2 e seus seis pontos de aterramento, verificando o efeito do uso de um cabo aterrado para proteção de uma linha. A curva de tensão no ponto 1 (medida e simulada por ele) é apresentada na figura 4.12 como curvas 2 e 3 respectivamente e, na mesma figura (curva 1) é apresentado o resultado da simulação do mesmo caso com o CSDDAL.

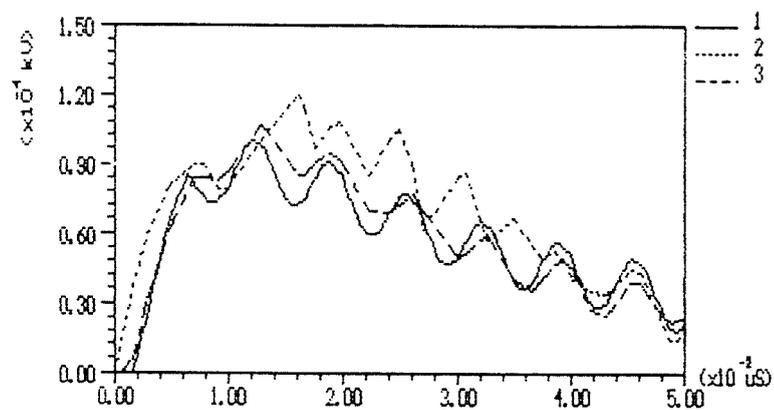


Figura 4.12 - Linha com o fio 2 multi-aterrado.

Curva: 1 - Simulação com o CSDDAL

2 - Medição Yokoyama

3 - Simulação Yokoyama.

Paulino [17], em seu modelo reduzido construído no Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG, simulou uma linha a dois fios com uma descarga caindo nas proximidades, conforme mostrado na figura 4.13.a.

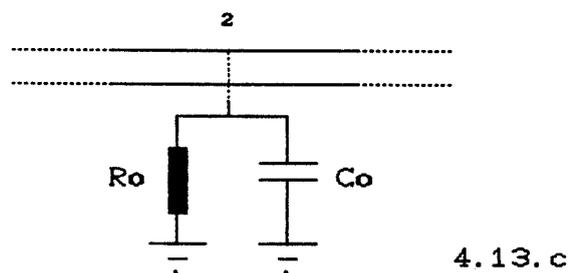
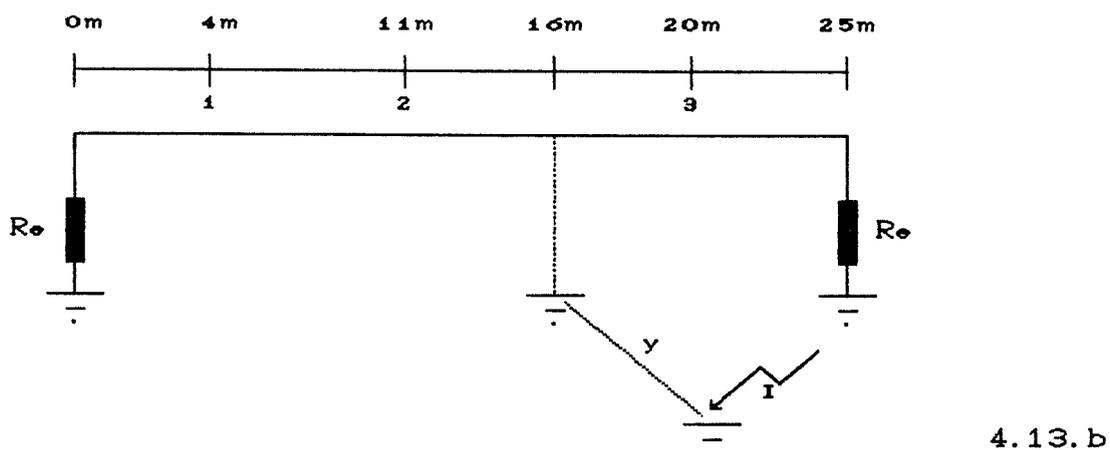
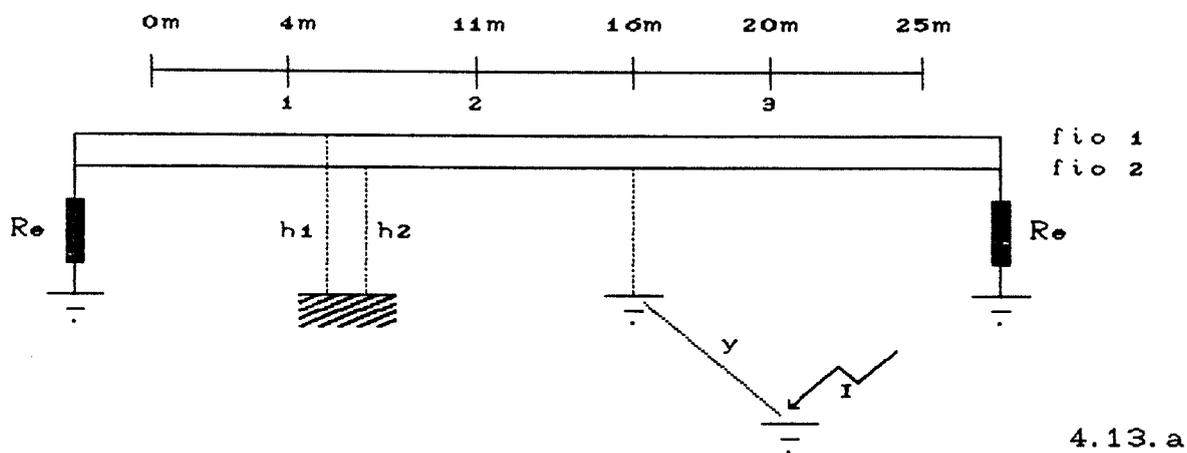


Figura 4.13 - Linha com o fio 2 multi-aterrado.

Na figura 4.13.b tem-se uma visão unifilar do sistema. A descarga cai entre os pontos 2 e 3, as terminações da linha são casadas (não refletivas). Nos pontos 1 e 3 pode

haver aterramento de um dos fios para a terra com resistência de aterramento igual a 0Ω e, a medição da tensão induzida pela descarga é feita em cada um dos fios no ponto 2. Para efeitos de simulação, o equipamento de medição (osciloscópio) foi modelado como um capacitor (C_0) em paralelo com um resistor (R_0) ligados no fio em que se faz a medição, conforme mostrado na figura 4.13.c. A descarga foi simulada com uma cordoalha de cobre vertical a uma distância y da linha com um gerador de degrau ligado na sua extremidade inferior. Abaixo são apresentados os dados referentes ao modelo reduzido e os dados adotados para as simulações.

Comprimento da linha	:	$l = 28m$
Resistência nos extremos	:	não refletivo
Velocidade da cor. de retorno	:	$v = 300m/\mu s$
Distância mínima do ponto de incidência da descarga à linha	:	$y = 4m$
Tempo de frente da corrente de retorno	:	$T_f = 5ns$
Valor de pico da corrente de retorno	:	$I_0 = 185mA$
Altura da linha	:	$h_1 = 1.42m$ $h_2 = 1.32m$
Raio do condutor	:	$r = 0,4mm$
Distância entre duas fases adjacentes	:	$d = 10cm$

Resistor de aterramento do fio 2: $R_t = 0\Omega$

Dados do osciloscópio : $C_o = 20\text{pF}$

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

A seguir são apresentadas 4 situações medidas por Paulino [17] e simuladas com o CSDDAL. Nas figuras 4.14 e 4.15 (curvas 2) são apresentadas as medições de Paulino [17] no ponto 2 nos fios 2 e 1, respectivamente, considerando a linha casada e sem resistores de aterramento. Nas mesmas figuras (curvas 1) tem-se as mesmas situações, simuladas com o programa CSDDAL.

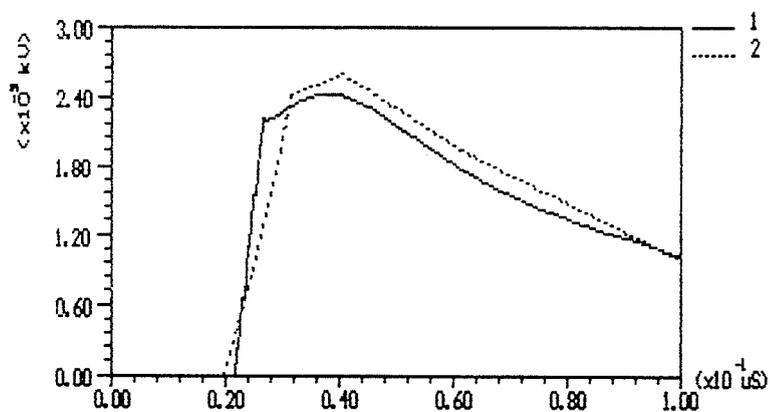


Figura 4.14 - Tensão no fio 2 no ponto 2.

Curva: 1 - Cálculo com o CSDDAL

2 - Medição Paulino.

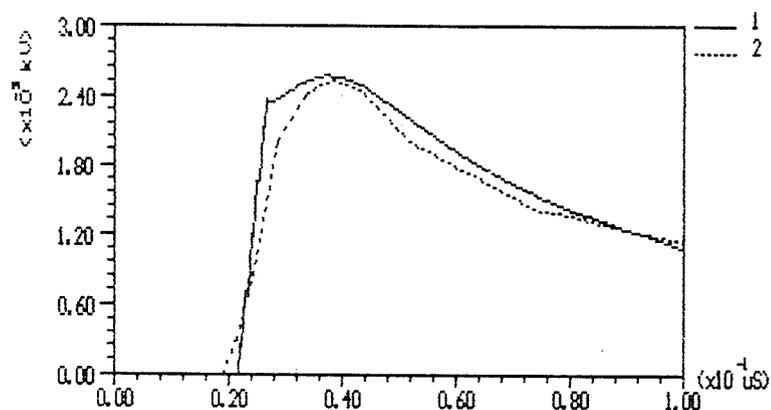


Figura 4.15 - Tensão no fio 1 no ponto 2.

Curva: 1 - Cálculo com o CSDDAL

2 - Medição Paulino.

Nas figuras 4.16 e 4.17 (curvas 2), Paulino [17] apresenta medições no ponto 2 nos fios 2 e 1, respectivamente, com o fio 1 aterrado nos pontos 1 e 3 e as extremidades da linha casada. Também nas figuras 4.16 e 4.17 (curvas 1) são apresentados os mesmos casos simulados com o programa desenvolvido.

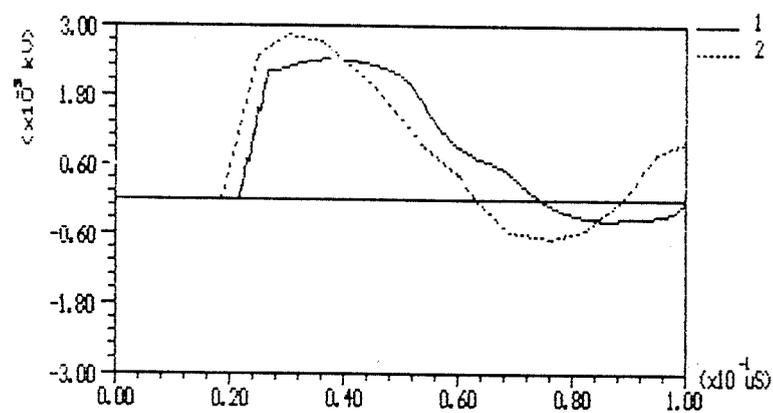


Figura 4.16 - Tensão no fio 2 no ponto 2 com o fio 1 aterrado nos pontos 1 e 3.
Curva: 1 - Cálculo com o CSDDAL
2 - Medição Paulino.

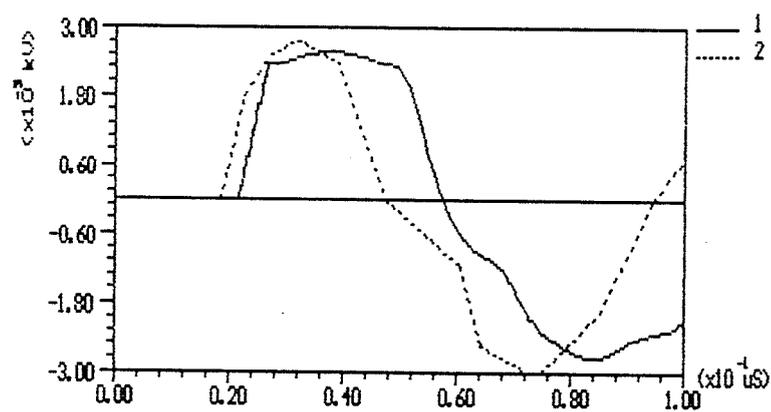


Figura 4.17 - Tensão no fio 1 no ponto 2 com o fio 1 aterrado nos pontos 1 e 3.
Curva: 1 - Cálculo com o CSDDAL
2 - Medição Paulino.

Analisando estes casos verifica-se o efeito de blindagem que um fio multi-aterrado provoca em uma linha aérea, fazendo com que diminua o nível de tensão induzida na linha devido a descargas atmosféricas laterais.

Ainda com referência às curvas do caso apresentado por Paulino [17], a pequena diferença existente entre as curvas medidas e as calculadas deve estar relacionada ao fato de a forma de onda e valor da corrente de descarga não terem sido medidas por Paulino [17] e sim calculadas (tempo de frente da onda de corrente desconhecido devido à falta de ponta de prova para medições de corrente), e, também às medições realizadas com osciloscópio não adequado. Medições recentes (com equipamentos melhores) em modelo reduzido correspondente à dissertação de mestrado do colega de curso Wallace do Couto Boaventura [37], apresentam resultados de simulações mais próximos, indicando que a metodologia de cálculo está correta. Estes resultados serão publicados por Boaventura [37] em sua dissertação. No que diz respeito ao modelo de Rusck [3,4], o colega Almir Félix Lorenzato da Fonseca [38], o discute profundamente em seu trabalho de dissertação (também a ser publicado) e conclui que está correto. Outros detalhes também podem ser vistos nas dissertações dos colegas Ivan José da Silva Lopes [39] e Paulo Henrique de Novais [40], cujos trabalhos estão ligados a estudos de descargas atmosféricas.

4.5 - Quarto Caso - Estudos em uma linha polifásica com pára-raios

Finalizando o capítulo, é apresentada uma série de comparações feitas com o trabalho de Yokoyama [15]. A modelagem aqui adotada é a que mais se aproxima do modelo de Linha de Distribuição sobre o qual é proposto desenvolver um pacote para desenvolver estudos de proteção contra tensões induzidas por descargas laterais. Na figura 4.18 é apresentado o modelo de linha estudado por Yokoyama [15].

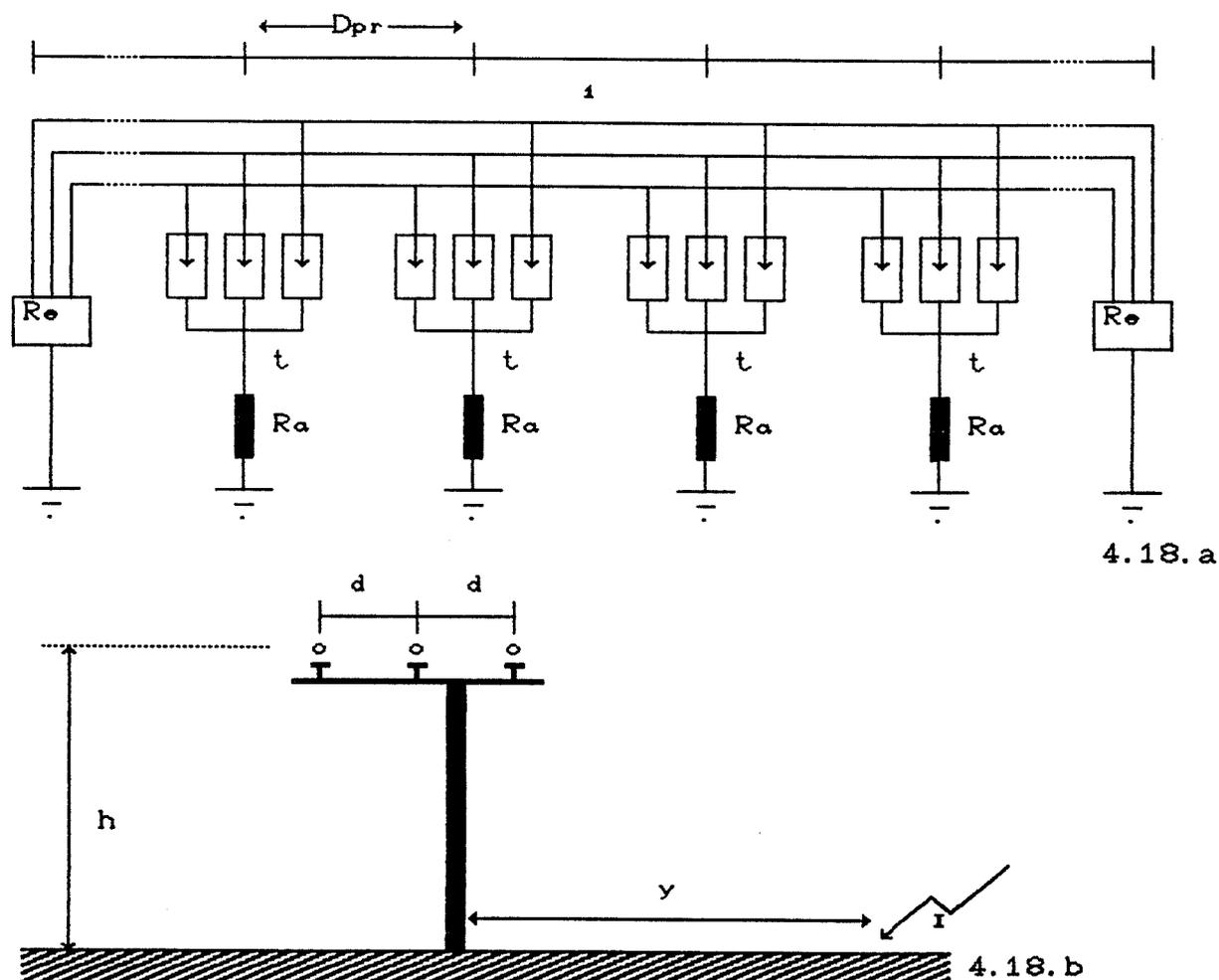


Figura 4.18 - Modelo da linha [15]

Na figura 4.18 vê-se que os três fios estão em um plano paralelo à terra, a uma altura h do solo, os fios externos estão a uma distância d do fio central, a descarga cai a uma distância y em relação ao fio central, os pára-raios são ligados dos fios para um único resistor de aterramento e estão instalados na linha, mantendo uma distância "D_{pr}" de separação entre si. Verifica-se, também, que a descarga cai em um ponto ao longo da linha entre dois pontos com pára-raios instalados.

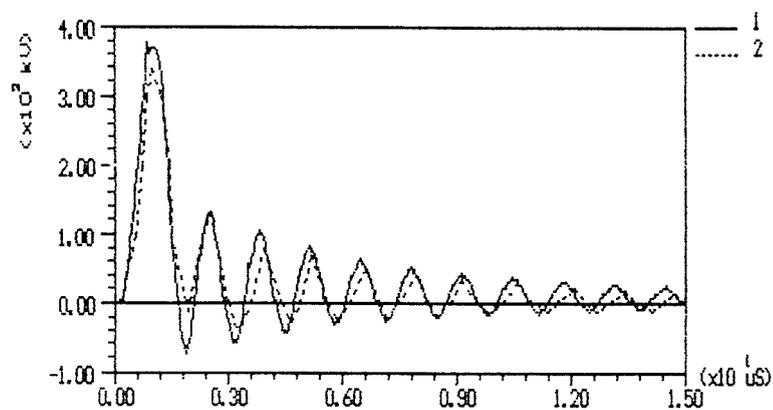
Os dados do sistema simulado são apresentados abaixo:

Comprimento da linha	:	$l = 2000m$ $= 4000m$
Resistência nos extremos	:	não refletivo
Velocidade da cor. de retorno	:	$v = 42m/\mu s$
Distância mínima do ponto de incidência da descarga à linha	:	$y = 50m$ $= 100m$
Tempo de frente da corrente de retorno	:	$T_f = 1\mu s$
Valor de pico da corrente de retorno	:	$I = 100kA$
Altura da linha	:	$h = 10m$
Raio do condutor	:	$r = 4mm$

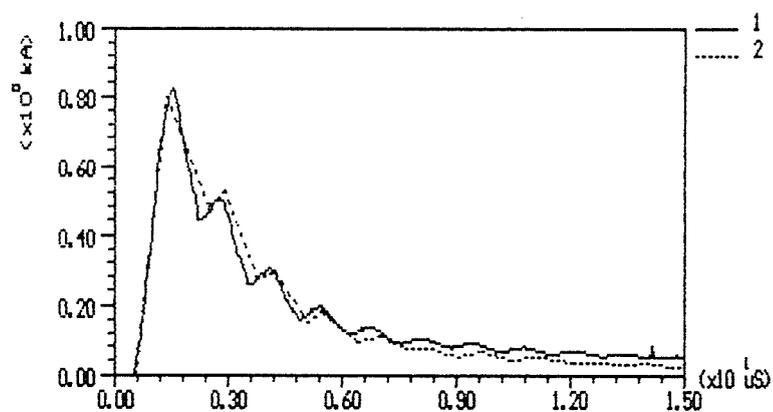
pára-raios está a 800m do início da linha e a descarga cai a 1800m do início da linha, também entre o terceiro e o quarto conjunto de pára-raios.

As simulações feitas apresentam resultados de tensão induzida no fio mais próximo da descarga, no ponto mais próximo desta e, curva de corrente no pára-raio que está ligado no fio acima referido.

Nas figuras 4.20 e 4.21 os parâmetros "Dpr", l e y são Dpr = 200m, l = 2000m e y = 50m e 100m, respectivamente. Ainda com respeito a estas figuras, as que têm índice de curva 2 são as simulações feitas por Yokoyama [15] para tensão induzida no ponto l (figuras 4.20.a e 4.21.a), indicado na figura 4.18.a e, corrente no pára-raios mais próximo da descarga (figuras 4.20.b e 4.21.b). Nas mesmas figuras as que tem índice de curva 1 se referem às mesmas simulações feitas com o CSDDAL.



Tensão - 4.20.a

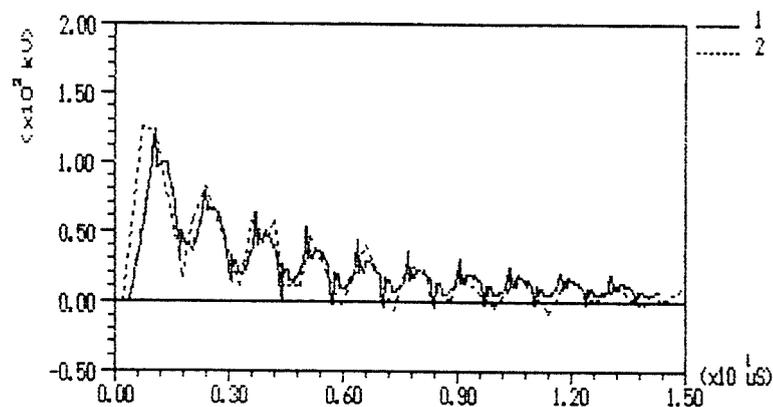


Corrente - 4.20.b

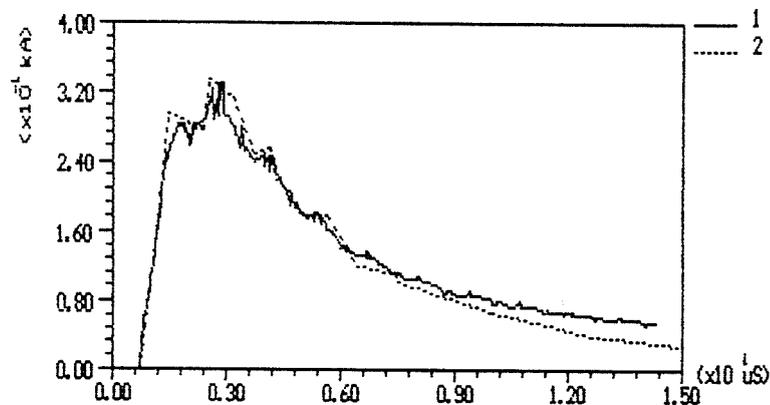
Figura 4.20 - Tensão e corrente para $L = 2000\text{m}$ e $y = 50\text{m}$.

Curva: 1 - Simulação com o CSDDAL.

2 - Simulação Yokoyama.



Tensão - 4.21.a



Corrente - 4.21.b

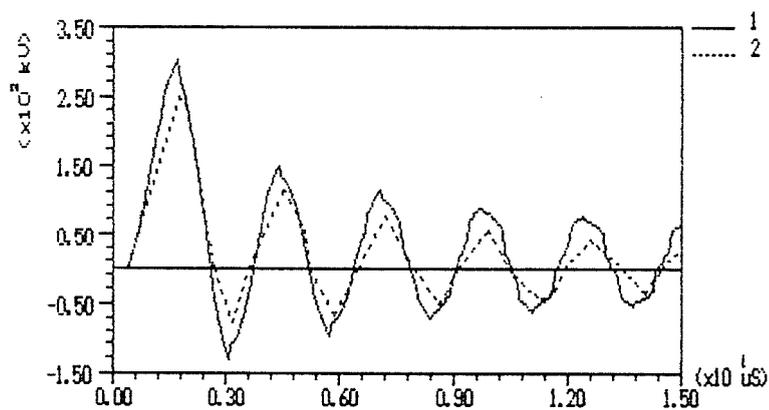
Figura 4.21 - Tensão e corrente para $L = 2000\text{m}$ e $y = 100\text{m}$.

Curva: 1 - Simulação com o CSDDAL

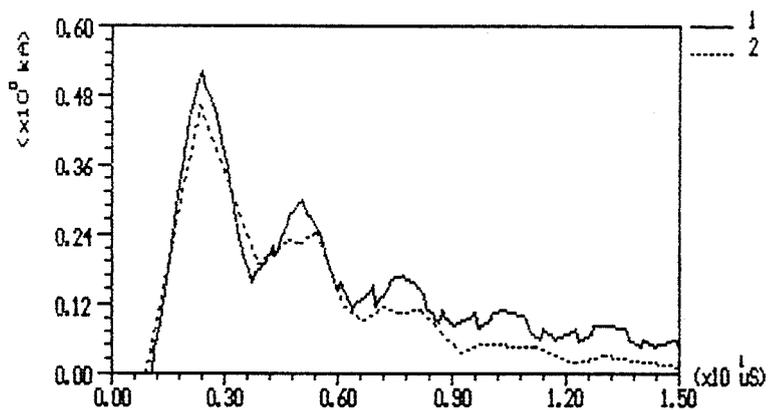
2 - Simulação Yokoyama.

Já na figura 4.22 os parâmetros D_{pr} , l e y do sistema são $D_{pr} = 400\text{m}$, $l = 4000\text{m}$ e $y = 100\text{m}$. Também aqui as figuras com índice de curva 2 se referem a simulações de

tensão induzida no fio e corrente no pára-raio feitas por Yokoyama [15]. E, as figuras com índice de curva 1 se referem às mesmas simulações feitas com o programa CSDDAL.



Tensão - 4.22. a



Corrente - 4.22. b

Figura 4.22 - Tensão e corrente para $L = 4000\text{m}$ e $y = 100\text{m}$.

Curva: 1 - Simulação com o CSDDAL

2 - Simulação Yokoyama.

Finalizada a apresentação de casos da bibliografia, serão apresentados, no próximo capítulo, casos que podem ser estudados no sistema de linhas de distribuição proposto nesta dissertação, visando mostrar a capacidade do programa.

CAPÍTULO 5

USO DO PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DE
TRANSITÓRIOS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 - Descrição das Linhas Estudadas

Neste capítulo são apresentadas algumas simulações visando demonstrar a potencialidade do programa, para auxiliar nos estudos de sobretensões causadas por descargas atmosféricas em Linhas de Distribuição de Energia Elétrica e, estudos de proteção destas contra tais sobretensões.

As simulações são feitas considerando dois tipos de Linhas de Distribuição de Energia Elétrica, uma trifásica a três fios podendo ter pára-raios (PR) ligados das três fases para um resistor de aterramento único (conforme figura 3.7.b) chamada de *linha 1* e, outra trifásica a quatro fios (três fases e um neutro) podendo-se instalar pára-raios das três fases para o neutro sendo, este aterrado (conforme figura 3.7.a), chamada de *linha 2*, conforme figura 5.01.

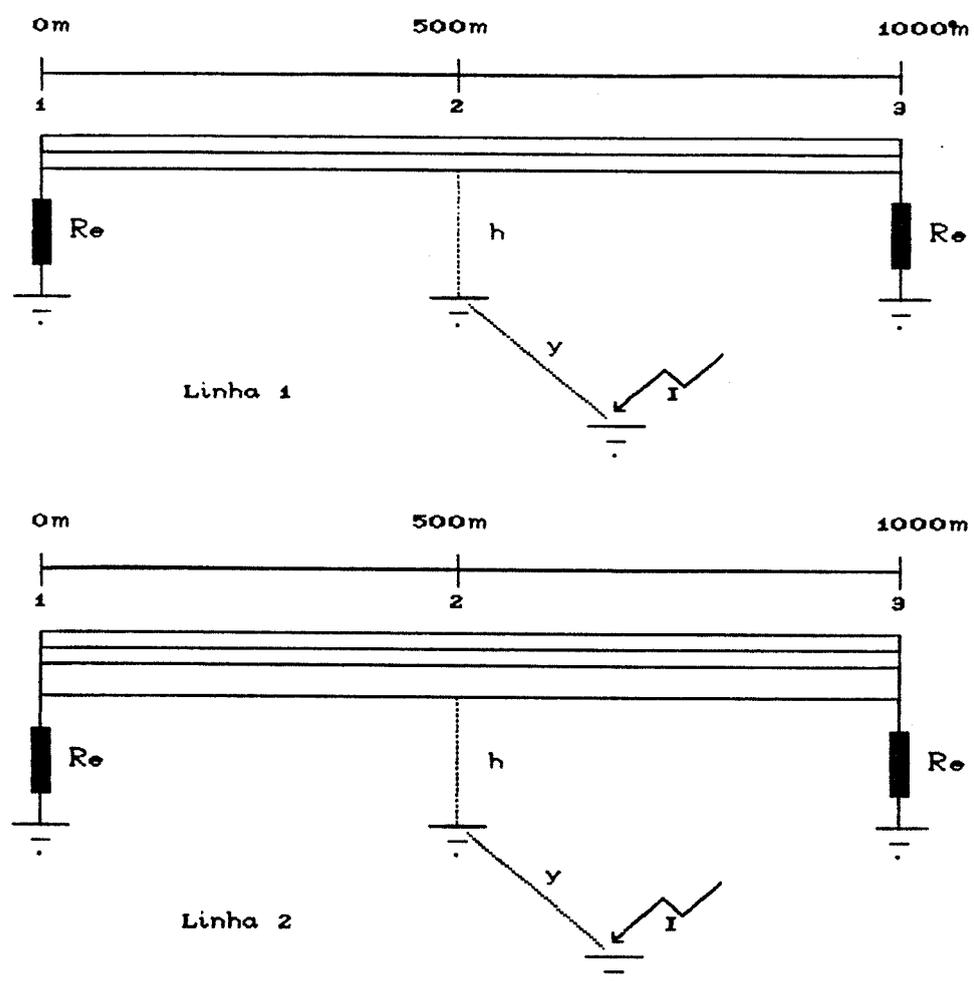


Figura 5.01 - Tipos de linhas.

Os dados para estas simulações são apresentados abaixo:

DADOS	Linha 1	Linha2
Comprimento da linha	$l = 1000\text{m}$	$l = 1000$
Terminações da linha	não refletivo	não refletivo
Altura da linha: Fase a	$h_1 = 10\text{m}$	$h_1 = 10\text{m}$
Fase b	$h_2 = 10\text{m}$	$h_2 = 10\text{m}$
Fase c	$h_3 = 10\text{m}$	$h_3 = 10\text{m}$
Neutro	-----	$h_4 = 9\text{m}$
Raio do condutor	$r = 4\text{mm}$	$r = 4\text{mm}$
Distância entre duas fases adjacentes	$d = 0.6\text{m}$	$d = 0.6\text{m}$
Distância mínima do ponto da descarga à linha	$y = 100\text{m}$	$y = 100\text{m}$
Tempo de frente da corrente de retorno	$T_f = 1\mu\text{s}$ $T_f = 5\mu\text{s}$	$T_f = 1\mu\text{s}$ $T_f = 5\mu\text{s}$
Valor de pico da corrente de retorno	$I_o = 100\text{kA}$	$I_o = 100\text{kA}$
Velocidade da corrente de retorno	$v = 30\text{m}/\mu\text{s}$	$v = 30\text{m}/\mu\text{s}$
Resistor de aterramento dos para-raios	$R_a = 0\Omega$ $R_a = 100\Omega$	$R_a = 0\Omega$ $R_a = 100\Omega$
Tensão de disparo dos para-raios	$V_p = 25\text{kV}$	$V_p = 25\text{kV}$

A curva $V \times I$ dos pára-raios é mostrada na figura 5.02.*

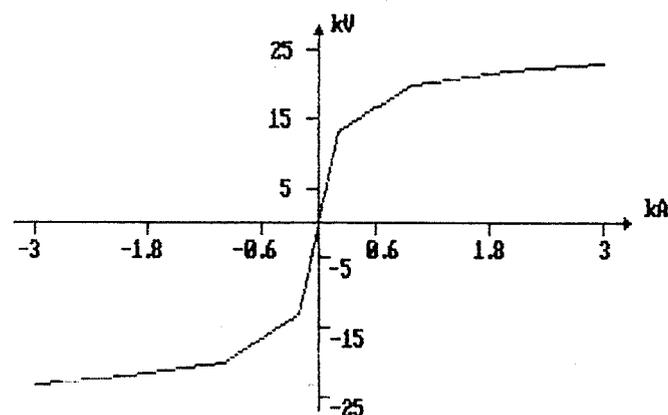


Figura 5.02 - Curva característica dos pára-raios.

São apresentados três blocos de simulações para os dois tipos de linha, no primeiro sobretensões na linha sem pára-raios, o segundo com pára-raios no ponto mais próximo da descarga e, o terceiro, com pára-raios instalados nos extremos das linhas.

Em todos os blocos, as curvas de tensão correspondem ao fio mais próximo da descarga e, as curvas de corrente nos pára-raios se referem àquele mais próximo da descarga.

5.2 - Bloco 1 - Simulações sem pára-raios

As simulações deste bloco estão relacionadas no quadro abaixo:

Simulação	Tipo de Linha	Posição do Pára-raio	Tf (μ s)	Ra (Ω)	Figura	
					Tensão	Corrente
1	1	---	1	--	5.03	-----
2	1	---	5	--	5.04	-----
3	2	---	1	--	5.05	-----
4	2	---	5	--	5.06	-----
5	2	---	1	0	5.07	-----
6	2	---	5	0	5.08	-----
7	2	---	1	100	5.09	-----
8	2	---	5	100	5.10	-----

Nas simulações 5,6,7,8 o resistor de aterramento (R_a) está ligado ao fio neutro no ponto 2 da figura 5.01.

A seguir são apresentadas as figuras correspondentes às simulações deste bloco.

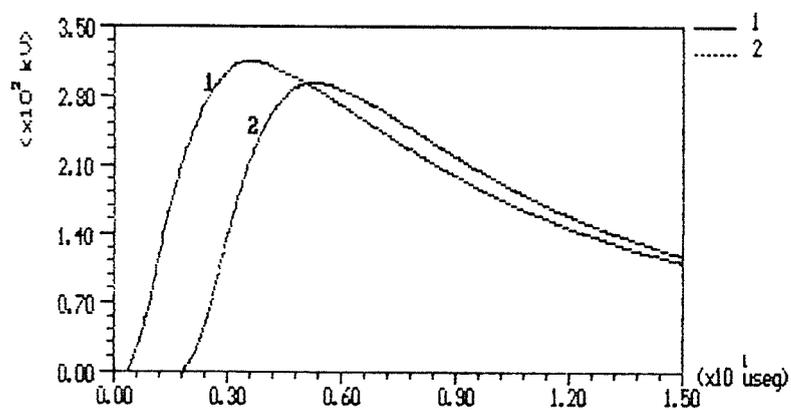


Figura 5.03 - Tensão na linha 1 com $T_f = 1 \mu\text{s}$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0\text{m}$

2 \rightarrow $x = 500\text{m}$.

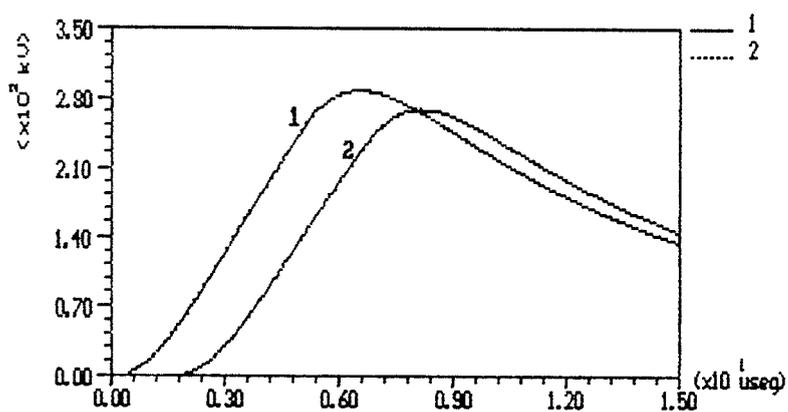


Figura 5.04 - Tensão na linha 1 com $T_f = 5 \mu\text{s}$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0\text{m}$

2 \rightarrow $x = 500\text{m}$.

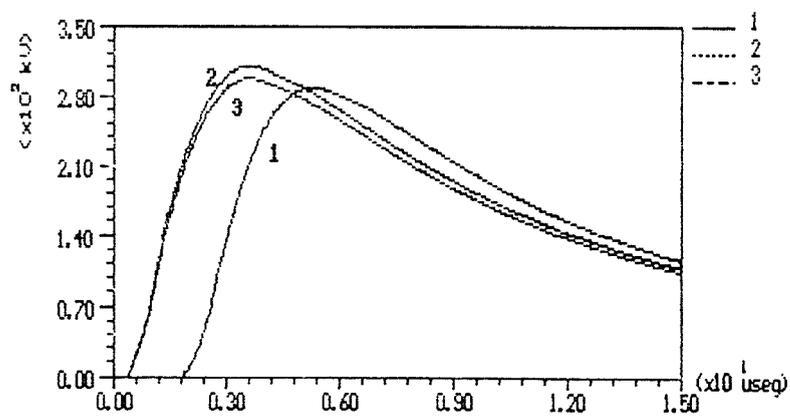


Figura 5.05 - Tensão na linha 2 com $T_f = 1 \mu s$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)

2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)

3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

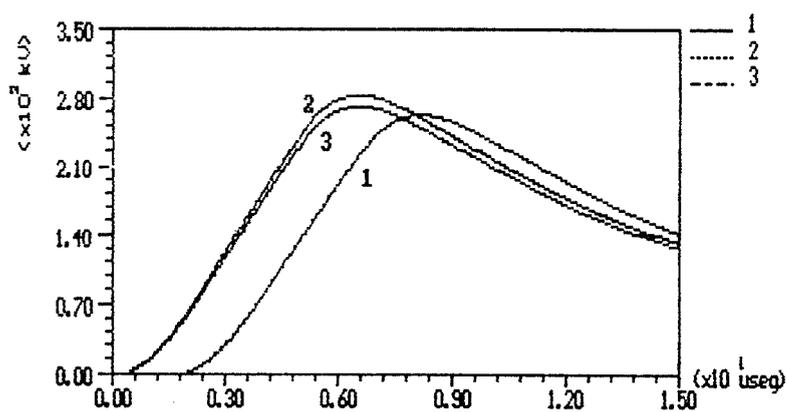


Figura 5.06 - Tensão na linha 2 com $T_f = 5 \mu s$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)

2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)

3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

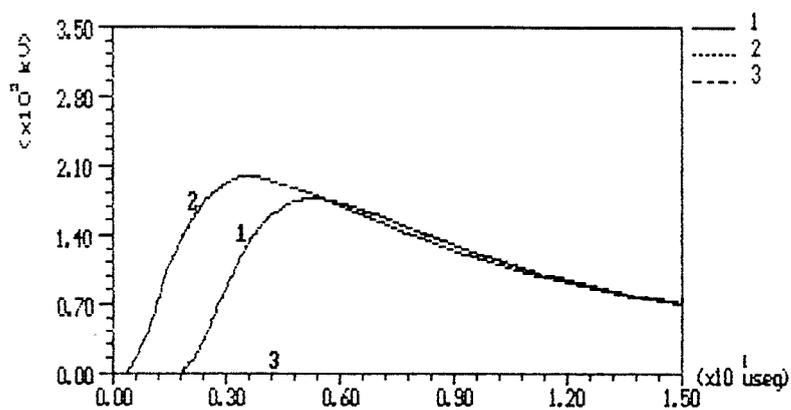


Figura 5.07 - Tensão na linha 2 com $T_f = 1\mu s$ e $R_a = 0\Omega$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)
 2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)
 3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

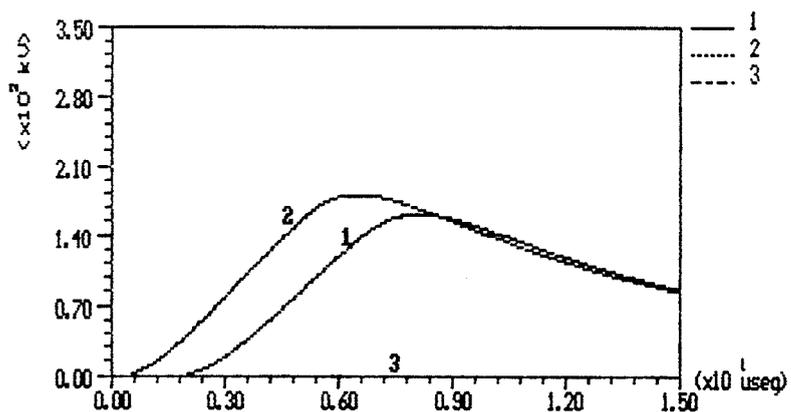


Figura 5.08 - Tensão na linha 2 com $T_f = 5\mu s$ e $R_a = 0\Omega$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)
 2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)
 3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

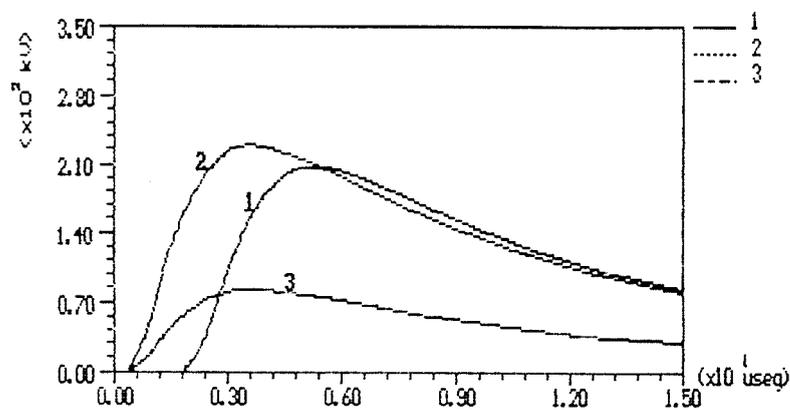


Figura 5.09 - Tensão na linha 2 com $T_f = 1 \mu s$ e $R_a = 100 \Omega$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)

2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)

3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

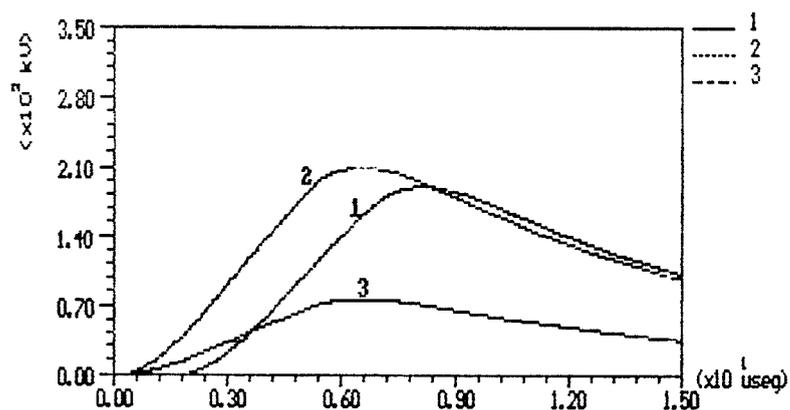


Figura 5.10 - Tensão na linha 2 com $T_f = 5 \mu s$ e $R_a = 100 \Omega$.

Curva: 1 \rightarrow $x = 0m$ (fase)

2 \rightarrow $x = 500m$ (fase)

3 \rightarrow $x = 500m$ (neutro).

Analisando as curvas das simulações deste bloco pode-se tirar algumas conclusões preliminares que são apresentadas abaixo:

- Aumentar o tempo de frente da onda de corrente corresponde a um atraso do tempo de pico da onda de tensão induzida e diminuição do valor de pico desta tensão;

- a tensão induzida que aparece no fio neutro (isolado) é um pouco menor (valor de pico) do que a que aparece no fio fase (linha 2). Isto ocorre devido ao fato de o fio neutro estar a uma altura inferior à da fase;

- quando o fio neutro é aterrado, verifica-se que a tensão induzida que aparece na fase atinge um valor de pico menor do que quando o neutro está isolado;

- quanto menor é o valor ôhmico do resistor de aterramento do neutro, menor é o valor de pico da tensão induzida nas fases;

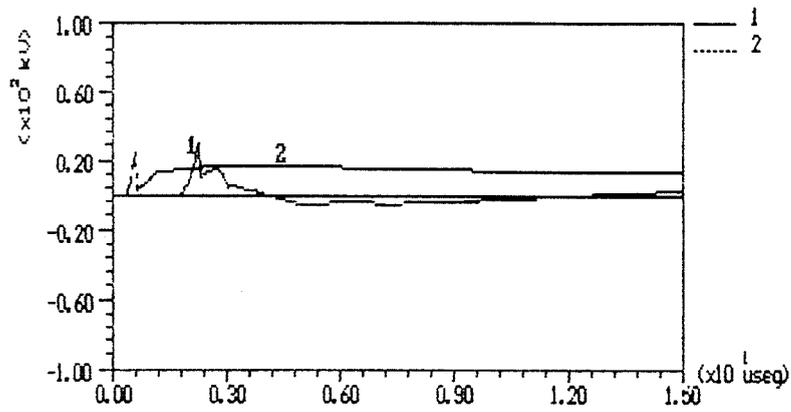
- quanto menor é o valor ôhmico do resistor de aterramento do neutro, maior é o valor da diferença de tensão entre fase e neutro.

5.2 - Bloco 3 - Simulações com pára-raios no meio da linha

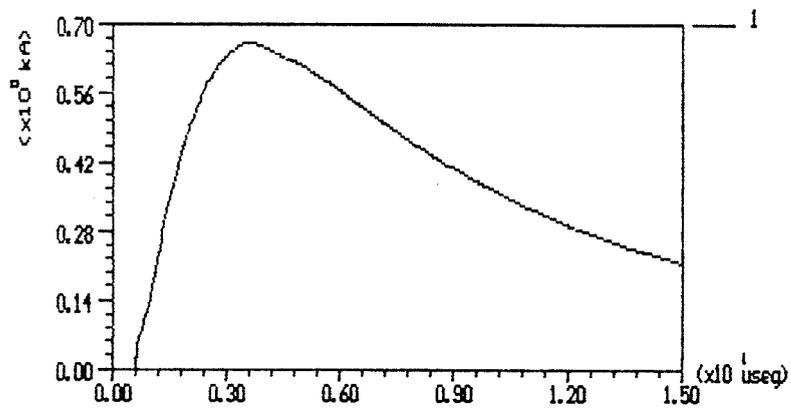
As simulações deste bloco estão relacionadas no quadro abaixo:

Simulação	Tipo de Linha	Posição do Pára-raio	Tf (μ s)	Ra (Ω)	Figura	
					Tensão	Corrente
9	1	2	1	0	5.11.a	5.11.b
10	2	2	1	0	5.12.a	5.12.b
11	1	2	1	100	5.13.a	5.13.b
12	2	2	1	100	5.14.a	5.14.b

A seguir serão apresentadas as figuras correspondentes às simulações deste bloco.



5.11.a - Tensão na linha



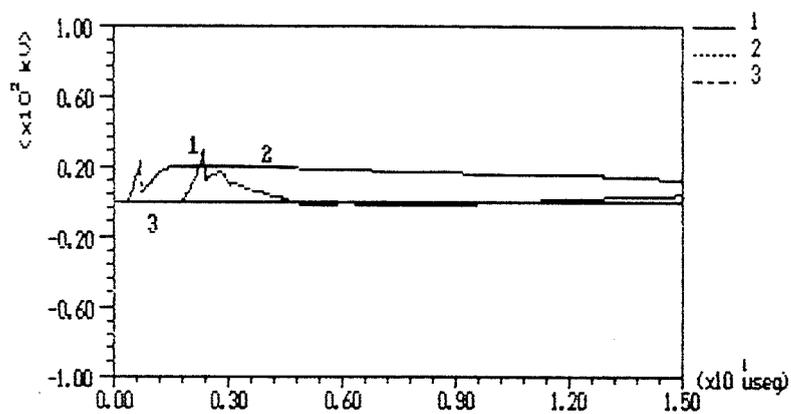
5.11.b - Corrente no PR

Figura 5.11 - Linha 1 com PR em $x = 500\text{m}$ e $R_a = 0\Omega$.

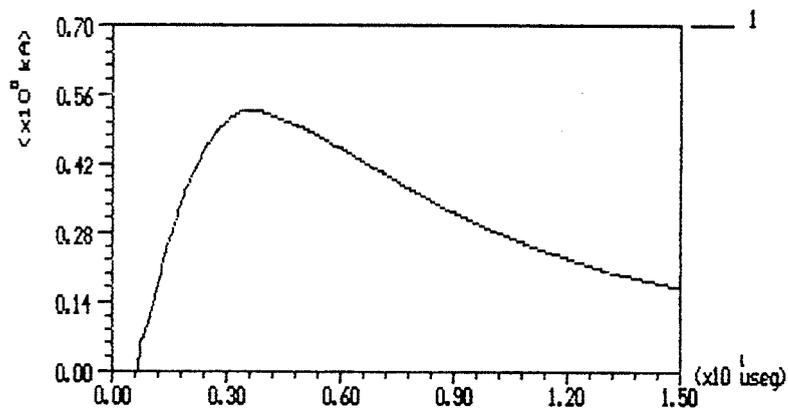
Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$

2 $\rightarrow x = 500\text{m}$

b) 1 $\rightarrow x = 500\text{m}$.



5.12.a - Tensão na linha



5.12.b - Corrente no PR

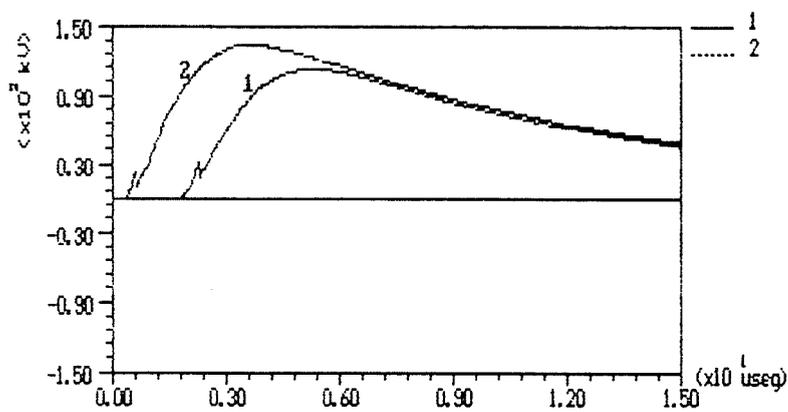
Figura 5.12 - Linha 2 com PR em $x = 500\text{m}$ e $R_a = 0\Omega$.

Curva: a) 1 \rightarrow $x = 0\text{m}$ (fase)

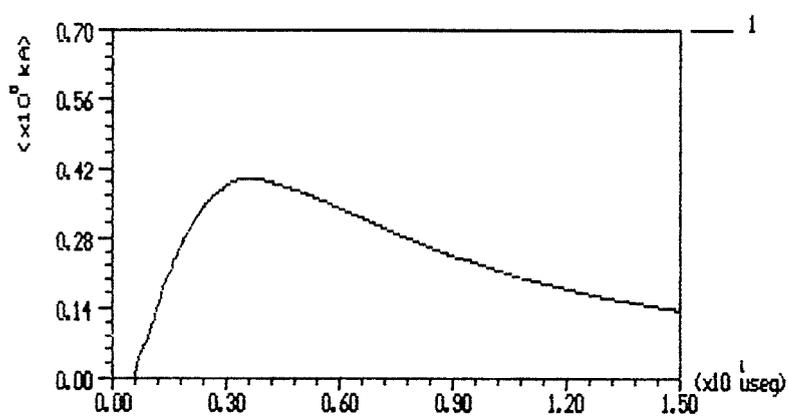
2 \rightarrow $x = 500\text{m}$ (fase)

3 \rightarrow $x = 500\text{m}$ (neutro)

b) 1 \rightarrow $x = 500\text{m}$.

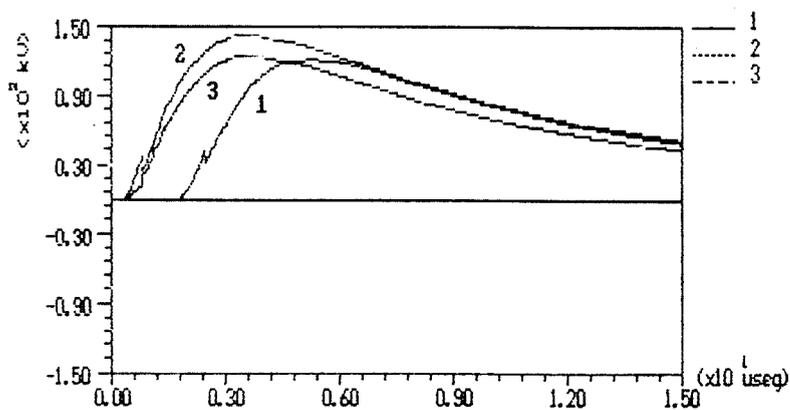


5.13.a - Tensão na linha

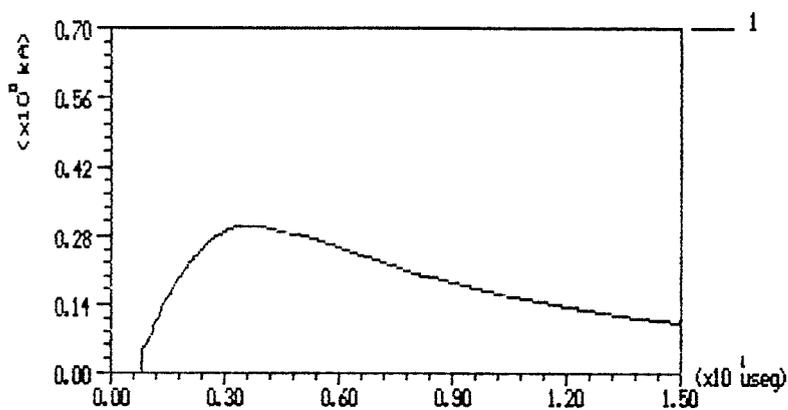


5.13.b - Corrente no PR

Figura 5.13 - Linha 1 com PR em $x = 500\text{m}$ e $R_a = 100\Omega$.Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$ 2 $\rightarrow x = 500\text{m}$ b) 1 $\rightarrow x = 500\text{m}$.



5.14.a - Tensão na linha



5.14.b - Corrente no PR

Figura 5.14 - Linha 2 com PR em $x = 500\text{m}$ e $R_a = 100\Omega$.

- Curva: a) 1 \rightarrow $x = 0\text{m}$ (fase)
 2 \rightarrow $x = 500\text{m}$ (fase)
 3 \rightarrow $x = 500\text{m}$ (neutro)
 b) 1 \rightarrow $x = 500\text{m}$.

Pode-se tirar as seguintes conclusões deste bloco de simulações:

- Quanto menor for o resistor de aterramento dos pára-raios (e neutro), menor será o valor da tensão induzida nas fases e neutro;

- a diferença de potencial entre fase e neutro (valores de pico) se mantem a mesma, para os casos simulados, independente do resistor de aterramento do neutro;

- para esta disposição de pára-raios, praticamente, não há diferença entre o valor de tensão na linha para a configuração de *linha 1* e *2*, para o mesmo valor de resistor de aterramento;

- comparando as curvas de corrente nos pára-raios verifica-se que o tipo de ligação da linha *2* apresenta menores valores de corrente do que os do tipo de linha *1*;

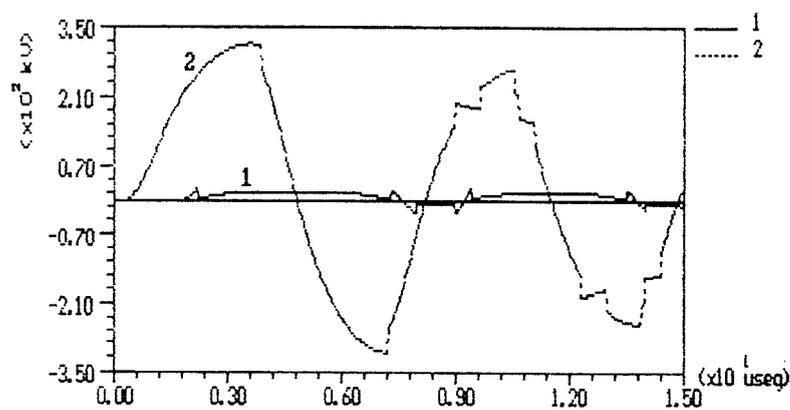
- verifica-se que quanto maior é o valor ôhmico do resistor de aterramento menores são os valores de pico da corrente nos pára-raios.

5.4 - Bloco 3 - Simulações com pára-raios nos extremos da linha

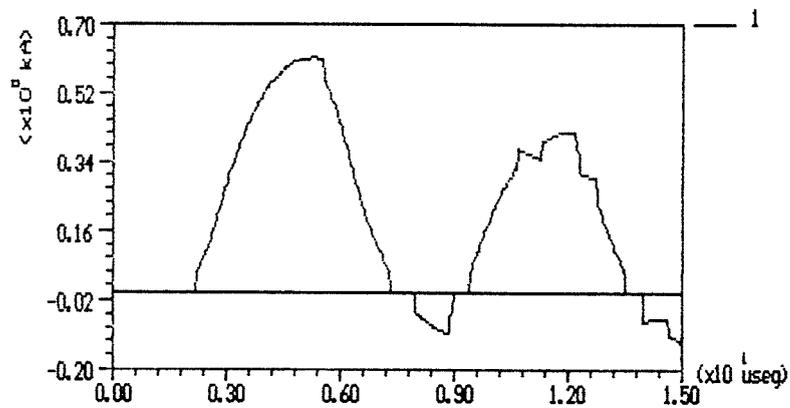
As simulações deste bloco estão relacionadas no quadro abaixo:

Simulação	Tipo de Linha	Posição do Pára-raio	Tf (μ s)	Ra (Ω)	Figura	
					Tensão	Corrente
13	1	1 e 3	1	0	5.15.a	5.15.b
14	1	1 e 3	5	0	5.16.a	5.16.b
15	2	1 e 3	1	0	5.17.a	5.17.b
16	2	1 e 3	5	0	5.18.a	5.18.b
17	1	1 e 3	1	100	5.19.a	5.19.b
18	1	1 e 3	5	100	5.20.a	5.20.b
19	2	1 e 3	1	100	5.21.a	5.21.b
20	2	1 e 3	5	100	5.22.a	5.22.b

A seguir são apresentadas as figuras correspondentes às simulações deste bloco.



5.15.a - Tensão na linha



5.15.b - Corrente no PR

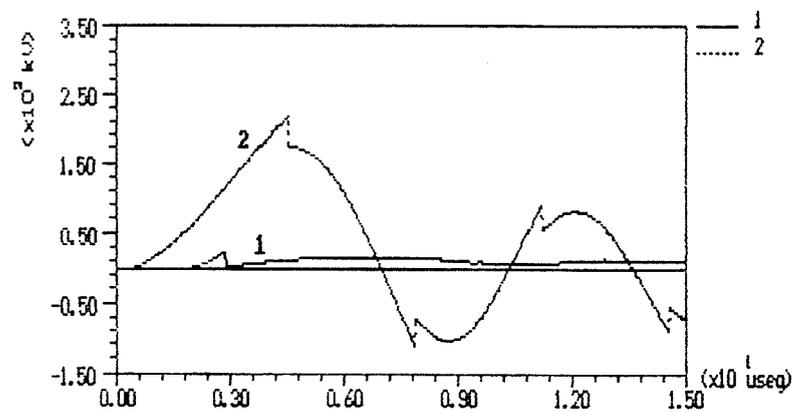
Figura 5.15 - Linha 1 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$

com $T_f = 1\mu\text{s}$ e $R_a = 0\Omega$.

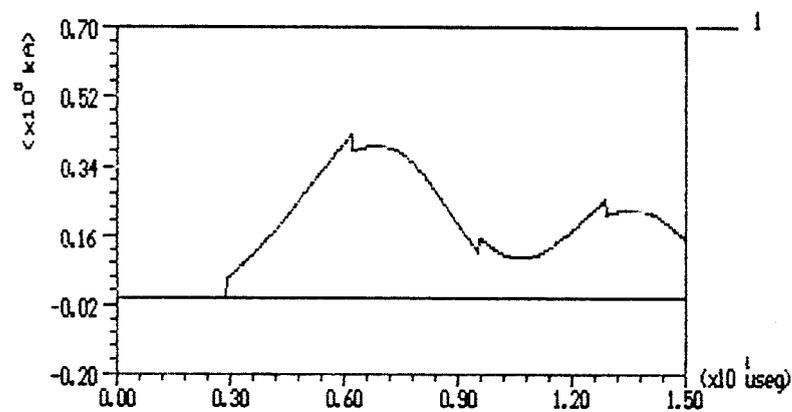
Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$

2 $\rightarrow x = 500\text{m}$

b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



5.16.a - Tensão na linha



5.16.b - Corrente no PR

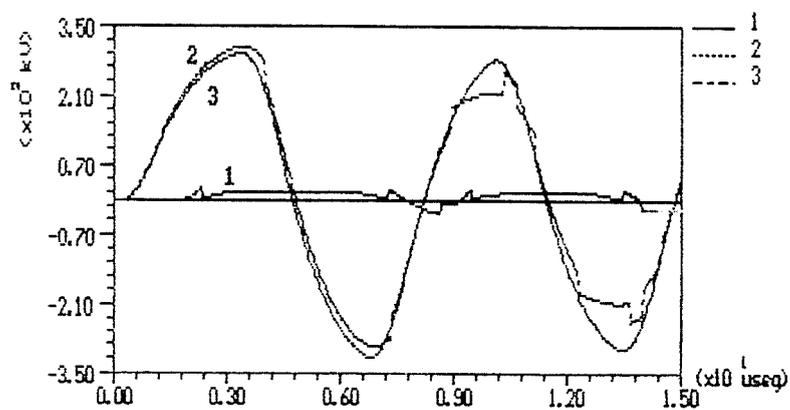
Figura 5.16 - Linha 1 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$

com $T_f = 5\mu\text{s}$ e $R_a = 0\Omega$.

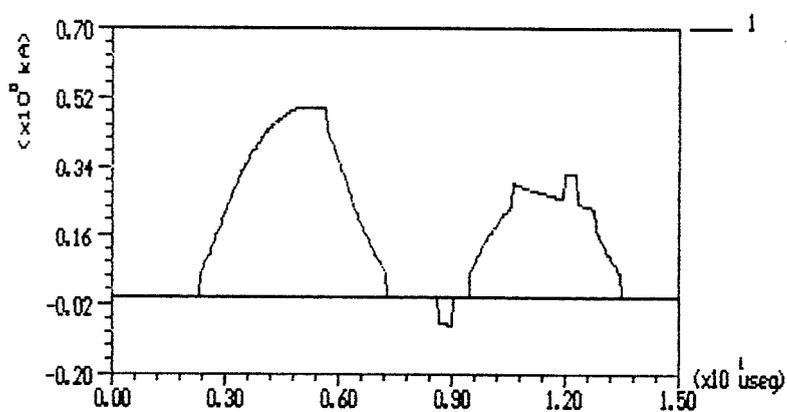
Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$

2 $\rightarrow x = 500\text{m}$

b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



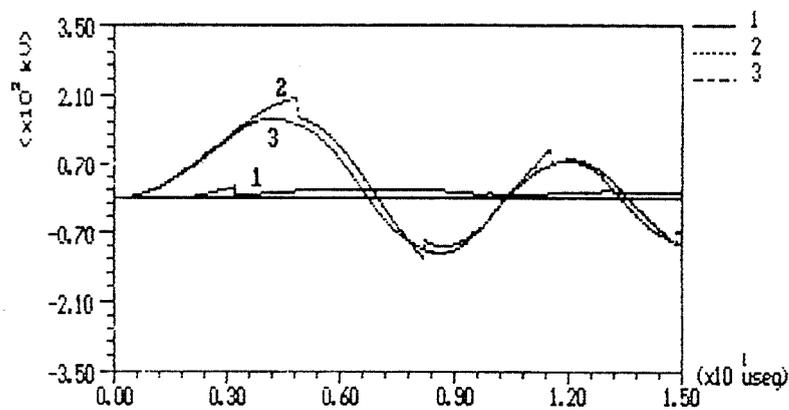
5.17.a - Tensão na linha



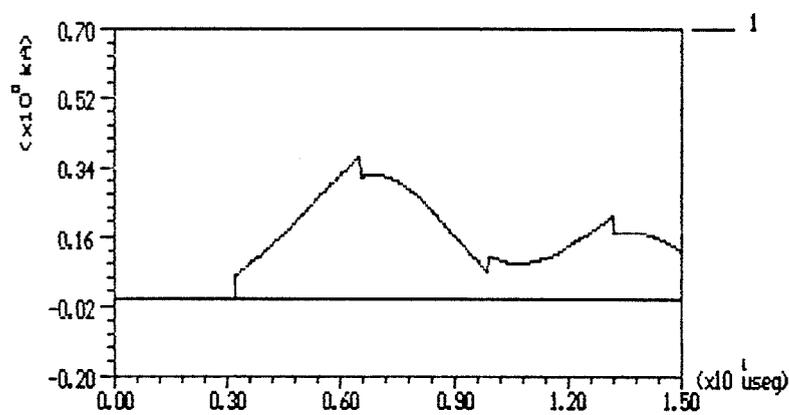
5.17.b - Corrente no PR

Figura 5.17 - Linha 2 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$
com $T_f = 1\mu\text{s}$ e $R_a = 0\Omega$.

Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$ (fase)
2 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (fase)
3 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (neutro)
b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



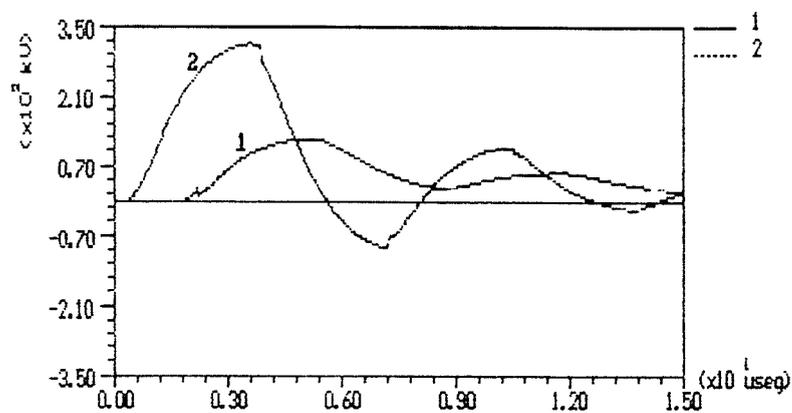
5.18.a - Tensão na linha.



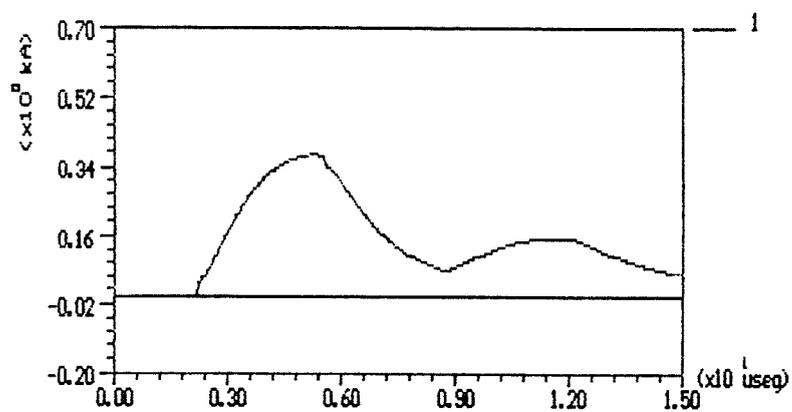
5.18.b - Corrente no PR

Figura 5.18 - Linha 2 com PR em $x = 0m$ e em $x = 1000m$
com $T_f = 5\mu s$ e $R_a = 0\Omega$.

Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0m$ (fase)
2 $\rightarrow x = 500m$ (fase)
3 $\rightarrow x = 500m$ (neutro)
b) 1 $\rightarrow x = 0m$.



5.19.a - Tensão na linha



5.19.b - Corrente no PR

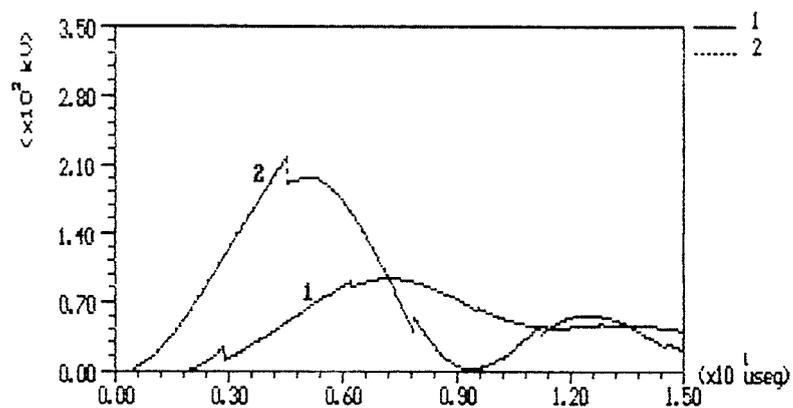
Figura 5.19 - Linha 1 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$

com $T_f = 1\mu\text{s}$ e $R_a = 100\Omega$.

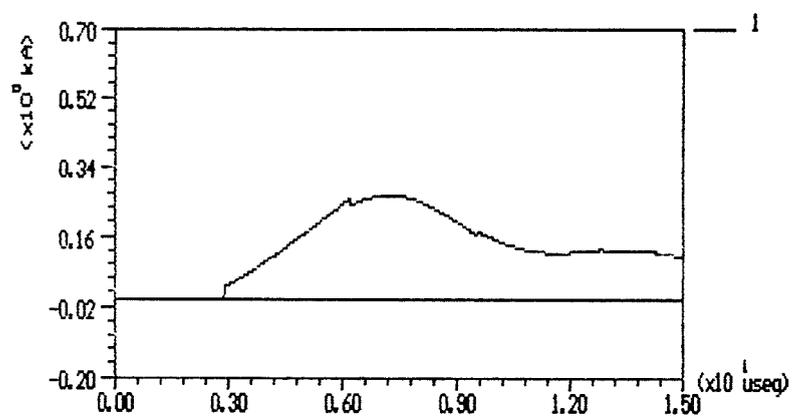
Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$

2 $\rightarrow x = 500\text{m}$

b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



5.20.a - Tensão na linha



5.20.b - Corrente no PR

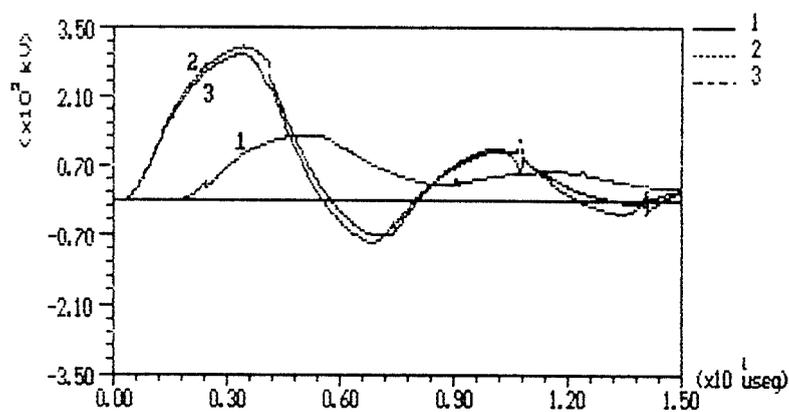
Figura 5.20 - Linha 1 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$

com $T_f = 5\mu\text{s}$ e $R_a = 100\Omega$.

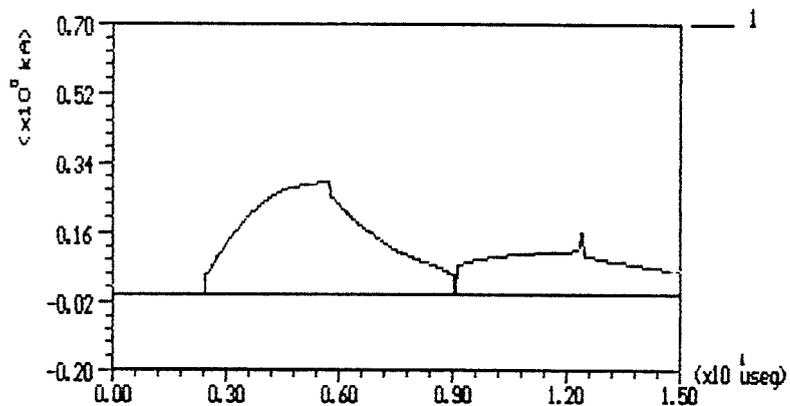
Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$

2 $\rightarrow x = 500\text{m}$

b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



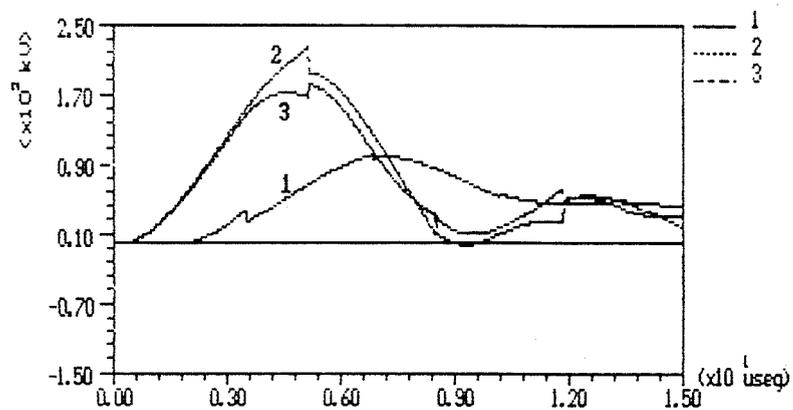
5.21.a - Tensão na linha



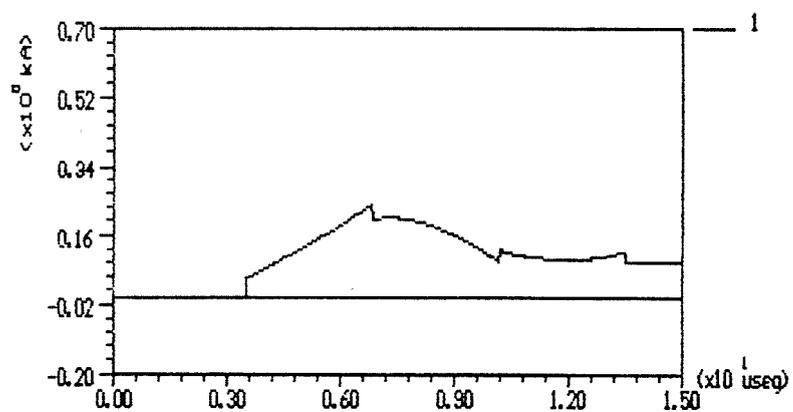
5.21.b - Corrente no PR

Figura 5.21 - Linha 2 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$
com $T_f = 1\mu\text{s}$ e $R_a = 100\Omega$.

Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$ (fase)
2 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (fase)
3 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (neutro)
b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.



5.22.a - Tensão na linha



5.22.b - Corrente no PR

Figura 5.22 - Linha 2 com PR em $x = 0\text{m}$ e em $x = 1000\text{m}$
com $T_f = 5\mu\text{s}$ e $R_a = 100\Omega$.

Curva: a) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$ (fase)
2 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (fase)
3 $\rightarrow x = 500\text{m}$ (neutro)
b) 1 $\rightarrow x = 0\text{m}$.

A seguir são apresentadas as conclusões tiradas deste bloco de simulações:

- Da mesma forma que no bloco 1, aqui também quando se aumenta T_f o valor de pico da tensão induzida diminui e o tempo de pico aumenta;

- quanto menor for o resistor de aterramento do neutro menor será o valor de tensão nas fases nos pontos de alocação dos pára-raios;

- com resistores de aterramento maiores, tem-se o valor de tensão no ponto mais próximo à descarga ($x = 500m$) amortecendo mais rapidamente;

- a diferença de tensão entre fase e neutro (valores de pico) se mantem quando se varia o valor do resistor de aterramento do neutro (para os casos aqui simulados com a linha 2);

- o tipo de linha 2 apresenta menores valores de corrente nos pára-raios do que o tipo de linha 1;

- quanto maiores são os valores dos resistores de aterramento, menores são os valores de corrente que flui nos pára-raios;

- para T_f maiores, os pára-raios demoram mais tempo para atuarem e, os valores de pico de corrente são menores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Foi estudada uma teoria que trata dos efeitos causados em uma linha de distribuição por descargas atmosféricas que caem nas suas proximidades. A partir destes estudos esta teoria foi implementada em um programa para cálculo de transitórios eletromagnéticos em linhas, visando ter em mãos uma ferramenta que auxiliasse em estudos de sobretensões em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas laterais e, proteção daquelas linhas contra estas descargas.

Cabe aqui ressaltar a forma como foi implementada a teoria de descargas. Os efeitos das descargas laterais em linhas foram todas modeladas como fontes de corrente e/ou tensão, sendo isto de grande valia, pois a partir desta modelagem pode-se utilizar qualquer programa para cálculo de transitórios para analisar as sobretensões nas linhas devido a estas descargas.

Outro ponto a ressaltar é o fato de que todos os autores que utilizam esta teoria de tensão induzida em linhas, por descargas laterais [03, 04, 17, 22, 33], resolvem as equações integrais (16) e (17) do capítulo 2 analiticamente. Com isto, as equações analíticas obtidas descrevem as sobretensões em linhas infinitas e sem descontinuidades. Através de superposição de resultados eles chegaram a resultados de sobretensões em linhas finitas e com

descontinuidades, causadas por descargas laterais. De forma inédita, neste trabalho estas integrais foram resolvidas numericamente, através de fontes de corrente que são distribuídas ao longo da linha (a solução é obtida através da discretização da linha), calculando o transitório que ocorre em linhas finitas e com descontinuidades.

As simulações feitas no capítulo quatro, visando validar o programa desenvolvido, demonstraram a grande gama de estudos que podem ser feitos utilizando o programa, pois não estamos restritos a simulações de 3 ou 4 fios. Podemos simular linhas N fios. As únicas restrições são a memória disponível e a consideração de que a linha tem que ser tratada como simétrica.

No capítulo cinco pode-se sentir a capacidade do programa no auxílio de estudos comparativos de sistemas semelhantes que possuem algumas características diferentes, que são enumeradas abaixo:

- O fato da linha de distribuição ter ou não o fio neutro;

- caso a linha de distribuição tenha o fio neutro, pode-se estudar os efeitos deste em relação às tensões

induzidas nas fases, levando-se em conta o fato de ele ser aterrado ou isolado;

- desenvolver estudos sobre efeito de aterramento do neutro, tais como, valores de resistores de aterramento e distância entre dois pontos de aterramento (valores ótimos que consideram os dois parâmetros);

- no que diz respeito aos equipamentos de proteção (pára-raios), podem ser feitos estudos sobre a melhor forma de instalação (se das fases para um único ponto de aterramento ou se das fases para o fio neutro);

- pode-se estudar a influência do valor ôhmico de aterramento dos pára-raios;

- pode-se estudar o efeito da forma de instalação do pára-raios na corrente que flui pelo mesmo (uma análise preliminar das simulações do capítulo cinco indica que a instalação de pára-raios das fases para o neutro implica em um menor desgaste do pára-raio quando este atua, uma vez que ele drena menos corrente);

- pode-se desenvolver estudos para se determinar a distância de instalação de pára-raios e valores de aterramento dos mesmos, visando conseguir uma proteção

efetiva da linha de distribuição.

Para que se tenha resultados mais confiáveis é necessário que se façam estudos destes itens, levando-se em consideração um estudo probabilístico das descargas atmosféricas no que diz respeito à amplitude da corrente de retorno e posição relativa da descarga à linha.

Enfim, conclui-se que foi desenvolvida uma boa ferramenta de cálculo para estudos dos efeitos de descargas laterais em linhas de distribuição de energia elétrica aéreas.

Quanto a sugestões para trabalhos futuros, seria interessante a implementação de rotinas que tratem sobre disrupção em gaps de ar e em isoladores. Este fenômeno é fundamental para a análise de descargas atmosféricas que caem diretamente sobre a linha de distribuição.

Um outro ponto importante seria a implementação deste trabalho como um sub-programa de um pacote computacional mais completo onde os parâmetros das descargas atmosféricas fossem tratados probabilisticamente.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFIA

- [01] - ANDERSON, R. B. & ERIKSSON, A. J. ; "Lightning Parameters For Engineering Applications"; Electra N^o 69, pág. 65-102, 1980.
- [02] - ERIKSSON, A. J. , STRINGFELLOW, M. F. and MEAL, D. V. ; "Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines"; IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol PAS-101, N^o 4 April 1982, pág 960-968.
- [03] - RUSCK, S. ; "Protection of Distribution Lines", LIGHTNING, Vol. 2 Capítulo 23 , Gold, R. H., Academic Press, 1977.
- [04] - RUSCK, S. ; "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines With Special Reference To The Overvoltages Protection Of Low-Voltage Networks", K. Tec. Högsk. Handl. 120, 1958.
- [05] - DOMMEL, H. W. ; " Digital Computer Solution Of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol PAS-88 N^o4 April 1969.
- [06] - DOMMEL, H. W. , MEYER, W. S. ; "Computation of Electromagnetic Transients ", Proceedings of The

IEEE, July 1974.

- [07] - DOMMEL, H. W.; "Nonlinear And Time-Varying Elements in Digital Simulation Of Electromagnetic Transients ", IEEE Trans Power App. Sys. Vol PAS-90, pp 2561 - 2567, Nov/Dec. 1971.

- [08] - DOMMEL, H. W.; Electromagnetic Transients Program Reference Manual - EMTP Theory Book), August 1986.

- [09] - DOMMEL, H. W.; "Line Constants of Overhead Lines and Underground Cables. (Notes used for Course E.E. 553 at the University of British Columbia). May 1978.

- [10] - NAIDU, S. R.; Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de potência. Co-Edição Eletrobrás/UFPb Editora Grafset 1985.

- [11] - YOKOYAMA, S.; "Numerical Analysis of Induced Lightning Surges", Paper N^o A 78 123-2, IEEE PES Winter Meeting, New York, February 1978.

- [12] - YOKOYAMA, S.; "Numerical Analysis of Earth Wires For Induced Lightnings Surges", IEE PROC. Vol 127,

Pt. C, N^o 1, January 1980.

- [13] - YOKOYAMA, S.; "Calculation of Lightning - Induced Voltages on Overhead Multi-Conductor Systems", IEEE Trans. on Power App. and Sys., Vol PAS-103, N^o 1, January 1984.
- [14] - YOKOYAMA, S., YAMAMOTO, K. and KINOSHITA, H.; "Analogue Simulation of Lightning Induced Voltages and Its Application for Analysis of Overhead-Ground - Wire Effects", IEE PROC., Vol 132, Pt. C, N^o 4, July 1985.
- [15] - YOKOYAMA, S.; "Distribution Surge Arrester Behavior Due To Lightning Induced Voltages", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol PWRD-1, N^o 1, January 1986.
- [16] - YOKOYAMA, S., MIYAKE, K., MITANI, H. and YAMAZAKI, N.; "Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines", IEEE Trans. on Power Sys., Vol PWRD-1, N^o 2, April 1986.
- [17] - PAULINO, J.O.S., SÁ, T.L. e SANTOS, I.M.; "Tensões Induzidas Em Redes Aéreas Devido a Descargas Atmosféricas", Relatório Contrato TELEBRAS/EE

UFMG /FCO.

- [18] - YOKOYAMA,S. , MIYAKE,K. , MITANI,H. and TAKANISHI,A. ;
"Simultaneous Measurement of Lightning Induced
Voltage With Associated Stroke Currents", IEEE
Trans. PAS-102, N^o 8, August 1983.
- [19] - JAKUBOWSKI,J.L. ; "Base de Calcul De La Composante
Magnetique De La Tension Induite Par La Foudre",
Archwm Electrotech, Vol 23, 1974, pp 1023-1035.
- [20] - MASTER,M. J. and UMAN,M. A. ; " Lightning Induced
Voltages on Power Lines: Theory", IEEE Trans.,
Vol PAS-103, September 1984, pp 2502-2518.
2502-2518.
- [21] - MASTER,M. J. and UMAN,M. A. ; " Lightning Induced
Voltages on Power Lines: Experiment", IEEE
Trans., Vol PAS-103, September 1984, pp
2519-2529.
- [22] - CHOWDHURI,P. and GROSS,E. T. B. ; "Voltages Induced on
Overhead Multi-Conductor Lines By Lightning
Strokes", PROC. IEE, Vol. 116, N^o 4, April 1969.
- [23] - CHOWDHURI,P. ; " Analysis of Lightning Induced

- Voltages on Overhead Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, N^o 1, January 1989.
- [24] - LIEW, A. C. and MAR, S. C.; "Extension of The Chowdhuri-Gross Model For Lightning Induced Voltage on Overhead Lines", IEEE Trans. on Power Sys., Vol. PWRD-1, N^o 2, April 1986.
- [25] - LIEW, A. C. and HALDAR, M. K.; "Validation of Rusck's Scalar and Vector Potencial Expressions Due To A Return Stroke In A Lightning Channel", IEE PROC., Vol. 134, Pt. C, N^o 5, September 1987.
- [26] - LIEW, A. C. and HALDAR, M. K.; "Alternative Solution For The Chowdhuri-Gross Model of Lightning Induced Voltages On Power Lines", IEE PROC., Vol. 135, Pt. C, N^o 4, July 1988.
- [27] - SCUKA, V.; "Induced Effects of Lightnings Electromagnetic Pulses", I International Seminarium on Lightning and Lightning Protection - (I SIPDA - São Paulo) November 1988.
- [28] - MILLARD, D. P., MELIPOULOS, A. P. S. COKKINIDES, G. J.; "Parametric Analysis of EMP Induced Overvoltages on Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery,

Vol. 3, N^o 3, July 1988.

- [29] - DE LA ROSA, F., VALDIVIA, R., PEREZ, H. and LOSA, J.;
"Discussion About The Inducing Effects of
Lightning In An Experimental Line In Mexico",
IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, N^o 3, July
1988.
- [30] - FONSECA, J. R. and BRAGA, R. A.; "Proteção de Linhas de
Subtransmissão e Distribuição A Descargas
Atmosféricas", Curso: Descargas Atmosféricas Em
Linhas de Transmissão e Subestações. Cap. 5,
Abril 1986 - São Paulo.
- [31] - SCHEI, A. and HUSE, J.; " Currents Through Surge
Arrester Due To Lightning With Main Reference To
Distribution Systems", ELECTRA N^o 58.
- [32] - CEMIG: " Estação de Pesquisa de Descargas
Atmosféricas - Projeto Cachimbo", IX Seminário
Nacional de Produção e Transmissão de Energia
Elétrica, Belo Horizonte, Outubro 1987.
- [33] - PEDERSEN, A.; "Protetion of Low Voltage Equipment
and Systems Against Lightning", Electric Power
Engineering Department - Technical University of

Denmark, November 1988.

- [34] - SCHMIDT, W., MEPPÉLINK, J., RICHTER, B., FESER, K., KEHL, L. and QIU, D.; "Behaviour of M.O. - Surge Arrester Blocks To Fast Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, N^o 1, January 1989.
- [35] - LEWIS, W. W.; The Protection of Transmission Systems Against Lightning; Dover Publications, Inc - New York 1965.
- [36] - RAGALLER, K.; Surges In High Voltage Networks, Plenum Press, New York 1980.
- [37] - BOAVENTURA, W. C.; "Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido", Dissertação a ser publicada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG em 1990.
- [38] - FONSECA, A. F. L.; "Cálculo do Campo Eletromagnético e Análise da Tensão Induzida em Linhas Aéreas Devido a Descargas Atmosféricas" Dissertação a ser publicada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG em 1990.

- [39] - LOPES, I. J. S.; "Estudo do Comportamento de Um Condutor Multi-Aterrado Frente a Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas" Dissertação a ser publicada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG em 1990.
- [40] - NOVAIS, P. H.; "Tensão Induzida em um Cabo Telefônico Por Corrente Circulando na Sua Blindagem" Dissertação a ser publicada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG em 1990.
- [41] - ARAÚJO, R. L., ALMEIDA, M. A., CHERCHIGLIA, L. C. L.: "Análise de 16 Anos de Observação do Desempenho das LT's do Sistema CEMIG Sob Ação de Descargas Atmosféricas", IX Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, M.G., Brasil, 1987.
- [42] - ERIKSON, A. J., and MEAL, D. V.; "Lightning Performance and Overvoltage Surge Studies on a Rural Distribution Line", IEE PROC., Vol. 129, Pt. C, N^o 2, March 1982.