

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

***"Uma Contribuição ao Estudo da Proteção de Redes Elétricas Contra
Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas"***

Este exemplar corresponde à relação final da tese defendida por José Osvaldo S. Paulino
Julgadora em 25 de 01 de 1994
Orientador José Osvaldo S. Paulino

José Osvaldo Saldanha Paulino

Orientador : Prof. Dr. José Pissolato Filho

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

FEVEREIRO 1994

Resumo

O trabalho apresenta uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. A metodologia é baseada na teoria proposta por Sune Rusck em 1957. O programa implementado permite a simulação de redes elétricas de vários fios, com um deles multi-aterrado e considera a presença de pára-raios instalados ao longo das linhas. Uma rotina probabilística permite a simulação da rede, fornecendo dados sobre o desempenho anual da mesma. É apresentada uma comparação entre os resultados obtidos com o programa, com medições reais realizadas em uma linha de distribuição de 10 km de comprimento na África do Sul. É apresentado também um estudo sobre as alternativas de melhoria do desempenho das redes de distribuição brasileiras, considerando-se o nível de isolamento das estruturas, o aterramento do cabo neutro, a adoção de cabos pára-raios e a instalação de pára-raios ao longo das linhas de distribuição.

Abstract

A methodology for lightning induced voltages calculation on distribution lines is presented. It is based on a theory proposed in 1957 by Sune Rusck. The implemented computer program calculates induced voltages on single-phase and multi-phase lines. The expected lightning performance of the line is obtained by a probabilistic routine based on Monte Carlo Method. Comparisons between simulations and actual line measurements in a 10 km distribution line in South Africa are presented. Finally, a study about performance improvement of some brazilian distribution lines, considering insulation levels of structures, neutral grounding, shield wires and surge arresters along the lines, is presented.

Agradecimentos

Ao amigo e professor José Pissolato Filho;

Ao companheiro Glássio;

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da UNICAMP;

Ao amigos do Laboratório de Alta Tensão da UFMG;

Ao Eng. H. Geldenhuys;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais-
FAPEMIG;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-
CAPES;

À minha família.

Dedicada a meus pais: Oswaldo Ferreira Paulino e Maria Haydée Paulino Saldanha e à minha esposa: Maria Luzia Oliveira Paulino.

Sumário

Resumo.	02
Abstract.	03
Agradecimentos.	04
Capítulo I - Introdução.	08
I.1 - Objetivo geral do trabalho.	08
I.2 - Histórico	08
I.2 -Justificativa.	09
I.3 - Objetivos específicos.	11
Capítulo II - Implementação computacional da teoria de Rusck.	13
II.1 - Sobretensões em linhas elétricas provocadas por descargas atmosféricas.	13
II.2 - A teoria de Rusck.	13
II.3 - Principais questionamentos à teoria de Rusck.	16
II.4 - Principal vantagem da teoria de Rusck.	19
II.5 - Aplicação da teoria de Rusck em linhas multifilares e com descontinuidades.	20
II.5.1 - Correntes com forma de onda qualquer.	20
II.5.2 - Linhas finitas.	22
II.5.3 - Ponto de aterramento em uma linha de um fio.	24
II.5.4 - Ponto de aterramento em uma linha de dois fios.	26
II.5.5 - Dispositivos protetores.	29
II.6 - Descrição do programa implementado.	31
Capítulo III - Resultados.	34
III.1 - Comparação de resultados.	34
III.1.1 - Comparação com o método proposto por Nucci.	34
III.1.2 - Comparação com o método proposto por Diendorfer.	40
III.1.3 - Comparação com o método proposto por Chowdhuri.	45
III.1.4 - Comparação com o método proposto por Yokoyama.	49

III.2 - Efeito dos parâmetros da linha e da descarga	57
Capítulo IV - Programa probabilístico para cálculo de desempenho	
de redes.	64
IV.1 - Introdução.	64
IV.2 - Parâmetros das descargas.	65
IV.3 - Programa para cálculo de desempenho de redes.	67
IV.4 - Determinação do número de descargas anuais.	69
IV.5 - Caracterização das descargas.	70
IV.5.1 - O ponto de incidência.	71
IV.5.2 - Os parâmetros das descargas.	72
IV.5.3 - O número de anos de simulação.	73
IV.6 - Entrada / saída de dados.	74
Capítulo V - Comparação com dados experimentais da África do Sul.	74
V.1 - O projeto da África do Sul.	74
V.2 - Resultados das simulações.	77
V.2.1 - Comparações com formas de onda.	77
V.2.2 - Simulações probabilísticas.	81
V.3 - Análise dos resultados.	85
Capítulo VI - Estudo de um caso brasileiro.	87
VI.1 - Descrição de uma rede típica.	87
VI.2 - Simulações.	88
VI.3 - Análise dos resultados.	91
Capítulo VII - Conclusões e propostas de continuidade.	93
Referências Bibliográficas.	95
Nomenclatura.	99

Capítulo I - Introdução

1.1- Objetivo Geral do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é a proposição de uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica considerando a presença de cabos multiaterrados (cabo neutro e cabo pára-raios) e a presença de pára-raios instalados ao longo das linhas.

1.2 - Histórico

Desde 1980 a equipe do Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais vem desenvolvendo estudos na área de proteção de redes elétricas e telefônicas contra os efeitos das descargas atmosféricas. A partir de 1991 estes estudos passaram a ser feitos em conjunto com a equipe do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. A tese aqui apresentada é fruto deste trabalho conjunto.

Em 1981 a Companhia Energética de Minas Gerais S.A.-CEMIG e a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais-EE.UFMG assinaram um Convênio de Cooperação Técnica cujo objetivo principal era o estudo de alternativas para a melhoria do desempenho de redes aéreas de distribuição de energia elétrica frente a descargas atmosféricas. Em 1983 foi defendida uma dissertação de mestrado na EE.UFMG [1] que a partir da análise dos resultados obtidos em um projeto de pesquisas realizado na África do Sul propôs uma elevação do nível de isolamento das estruturas de redes de distribuição para 300 kV. A CEMIG implantou essa solução em algumas redes e os resultados foram compensadores. Após outros estudos conjuntos a CEMIG editou , em 1990, uma norma técnica para a adoção de estruturas de alto nível de isolamento em suas redes de distribuição.

Em 1988 foi assinado entre o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Telecomunicações Brasileiras S.A.-CPqD/TELEBRÁS e a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais um Convênio de Cooperação Técnica para o estudo de técnicas de proteção de redes telefônicas contra os efeitos das descargas atmosféricas. Em 1990 foram defendidas na EE.UFMG três dissertações de mestrado cujos temas foram:

-Cálculo do campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica e da interação deste com uma linha aérea [6];

-Estudo do comportamento de um condutor multiterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas [7];

-Estudo em modelo reduzido da tensão induzida em uma linha aérea por descargas atmosféricas [8].

Em 1992 uma Dissertação de mestrado defendida na EE.UFMG [9] apresentou uma comparação de resultados obtidos em um programa de computador que trabalhava com algoritmos probabilísticos e resultados de medição obtidos em um projeto da África do Sul. A rede considerada nessa dissertação era constituída de apenas um fio e não considerava a presença de cabos aterrados.

Os estudos realizados com a CEMIG e o CPqD/TELEBRÁS não consideraram os efeitos da instalação de cabos aterrados (cabo neutro e cabo pára-raios) nem foi analisada a influência da instalação de pára-raios ao longo das linhas.

Das cinco Dissertações de Mestrado citadas tivemos o privilégio de orientar quatro delas e a Tese aqui apresentada é uma continuação do trabalho anteriormente desenvolvido.

1.3 - Justificativa

Estudos teóricos e experimentais indicam que a maior parte das sobretensões impostas nas redes elétricas por descargas atmosféricas é devida à descargas que caem nas proximidades das redes [1,2].

Existe um certo consenso sobre a metodologia para o cálculo das sobretensões originadas por descargas que caem diretamente sobre a rede elétrica [3]. Entretanto não existe uma metodologia internacionalmente aceita para o cálculo das sobretensões provocadas por descargas laterais (descargas que incidem em pontos ou objetos próximos da rede elétrica) [4].

Em 1957 foi apresentada por Sune Rusck [5] uma teoria para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas. Ao longo dos anos, vários questionamentos foram apresentados a esta teoria e várias outras teorias, algumas derivadas da teoria de Rusck e outras "independentes", foram propostas [4]. As Dissertações de mestrado [6,7,8,9] analisaram várias destas teorias propostas e concluíram que a teoria mais completa e consistente é a proposta por Sune Rusck.

Uma das dificuldades para se verificar a validade da teoria para o cálculo de tensões induzidas é a falta de dados experimentais. Um projeto de pesquisa iniciado em 1978 na África do Sul e ainda em andamento parece ser a fonte de dados mais consistente disponível. Até 1990 os dados publicados sobre esse projeto eram referentes a medições realizadas em uma linha de distribuição sem cabo neutro e sem cabos pára-raios. Em 1990 foi publicado um trabalho com os dados coletados em 11 anos de estudo incluindo dados de medição em uma linha com cabo pára-raios [10]. A partir de um contato pessoal com o Eng. Hendri Geldenhuys, atual coordenador do projeto, tivemos acesso a dados de medição bastante detalhados. Estes dados serão utilizados neste trabalho de tese como fonte de comparação com os dados obtidos com a metodologia de cálculo proposta.

Um dos pesquisadores mais atuantes nessa área de estudos é o Prof. S. Yokoyama, o único até agora a propor uma metodologia capaz de calcular tensões induzidas em redes com cabos aterrados e com pára-raios [11]. Em recente trabalho de sua autoria publicado nos Anais do VIII International Symposium on High Voltage Engineering - ISH em agosto de 1993 o Prof. Yokoyama afirma [12]:

"...little reaserch has been done on surge arrester protection against lightning-induced voltages. In 1958 Rusck investigated this problem, but did not

use the exact lightning-induced voltage in his analysis. Moreover his method could not represent multi-conductor systems..."

Mostraremos, neste trabalho, que a afirmação acima não esta bem fundamentada.

Em trabalho apresentado no I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica, realizado em Belo Horizonte em 1990, o Eng. Hendri Geldenhuys, coordenador do projeto de pesquisas da África do Sul [10], afirma:

"...Much controversy exists about the effect that a shield wire has on the induced surge voltage on a line. This study has evaluated the effect of the shield wire empirically by studing the frequence of surge ocorrence under different configurations of shield wire. This data is, therefore, ideal as a control for theoretical models..."

Usaremos neste trabalho os dados sugeridos no parágrafo acima como dados de controle da metodologia proposta.

Em trabalho publicado em 1990 no IEEE Transactions on Power Delivery um grupo de trabalho do IEEE propõe o seguinte modelo [13]:

"...The Choudhuri induced voltage model is reasonably representative of the voltage induction process. There is no universal agreement that this model is the best one to use, and it will certainly undergo modifications as more data becomes available..."

O modelo proposto pelo Prof. Chowdhuri é um modelo derivado do modelo proposto por Rusck mas o Prof. Chowdhuri afirma que Rusck cometeu alguns erros em sua Tese. Apresentaremos neste trabalho uma comparação dos resultados obtidos pelos dois modelos e veremos que o modelo original de Rusck parece ser mais consistente.

I.4 - Objetivos específicos

Como a teoria de Rusck foi exaustivamente discutida e analisada em [6,7,8,9] apresentaremos no Capítulo II uma descrição sucinta da mesma, ressaltando suas

vantagens e explicitando suas limitações e hipóteses simplificadoras. Apresentaremos também no Capítulo II, a metodologia proposta para a aplicação da teoria de Rusck em linhas multifilares e com descontinuidades ao longo da linha. A metodologia proposta nada mais é do que a implementação computacional da teoria proposta por Rusck em 1957. Apesar do trabalho desenvolvido por Rusck não contemplar explicitamente os casos de linhas multifilares e com várias descontinuidades ao longo das linhas, a base teórica para tal, está contida em sua Tese de Doutorado.

No Capítulo III são apresentados alguns dos resultados obtidos com o programa descrito no Capítulo II e são apresentadas comparações com resultados obtidos por outras metodologias e com resultados obtidos em estudos com a técnica de modelo reduzido.

No Capítulo IV é apresentado o programa probabilístico desenvolvido com o objetivo de simular o desempenho anual de uma determinada rede de distribuição e que será utilizado para que se façam as comparações com os dados de medição do projeto sul-africano.

No Capítulo V são apresentados os resultados das comparações entre os valores obtidos nas simulações computacionais e os valores medidos na África do Sul. É também apresentada uma análise crítica sobre as diferenças obtidas entre valores medidos e calculados.

No Capítulo VI é apresentado um estudo de um caso real. Serão analisadas as alternativas para a melhoria do desempenho de uma rede de distribuição. Serão considerados os efeitos do neutro multiaterrado analisando-se os valores e também o espaçamento entre pontos de aterramento, os efeitos da instalação do neutro acima das fases, funcionando como um cabo pára-raios e o efeito da instalação de pára-raios ao longo das linhas.

No Capítulo VII são apresentados as conclusões deste trabalho e também algumas propostas de continuidade deste estudo.

CAPÍTULO II - Implementação computacional da Teoria de Rusck

II.1 - Sobretensões em linhas elétricas provocadas por descargas atmosféricas

As sobretensões em linhas elétricas, originadas pelas descargas atmosféricas podem ser classificadas em quatro grupos [14]:

- a. Sobretensões originadas por descargas que atingem diretamente as linhas;
- b. Sobretensões induzidas por descargas que caem nas vizinhanças da linha (descargas laterais);
- c. Sobretensões induzidas por descargas entre nuvens e dentro da própria nuvem;
- d. Sobretensões originadas pela presença de nuvens carregadas acima das linhas.

Trataremos neste trabalho apenas as sobretensões do grupo "b", ou seja, tensões induzidas por descargas laterais.

II.2 - A teoria de Rusck

Em 1957, em sua Tese de Doutorado, Sune Rusck propôs uma teoria para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas elétricas [5].

Partindo de uma modelagem para a corrente de retorno, Rusck calcula o campo elétrico originado por esta corrente na superfície do solo e a partir do valor do campo e da configuração de uma linha de transmissão multifilar, a teoria fornece os valores das tensões resultantes nos fios da linha.

Rusck propõe que uma descarga atmosférica com corrente de pico de valor I , em forma de degrau, induz em uma linha, constituída de um fio metálico infinito e sem descontinuidades, uma tensão dada por :

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) \quad (\text{II.1})$$

$$U(x,t) = (30.I.h.\beta) \cdot [(ct-x) / (y^2 + \beta^2 \cdot (ct-x)^2)] \cdot \{1 + [(x + \beta^2 \cdot (ct-x)) / (\beta^2 \cdot c^2 \cdot t^2 + (1 - \beta^2) \cdot (x^2 + y^2))^{1/2}]\} \quad (\text{II.2})$$

$$\beta = v/c = \{1 / [1 + (5 \cdot 10^5 / I)]\}^{1/2} \quad (\text{II.3})$$

$V(x,t)$ - Tensão induzida em um ponto "x" da linha, V;

t - Tempo, s;

c- Velocidade da luz no vácuo, m / s;

v- Velocidade da corrente de retorno, m / s;

I- Valor de pico da corrente de retorno, A;

h- Altura da linha, m;

y- Menor distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga, m;

x- Ponto ao longo da linha, m;

O valor máximo da tensão induzida para $x = 0$ é aproximadamente igual a:

$$V_{\max} = (30.I.h) / y \quad (\text{II.4})$$

A figura II.1 ilustra a expressão apresentada.

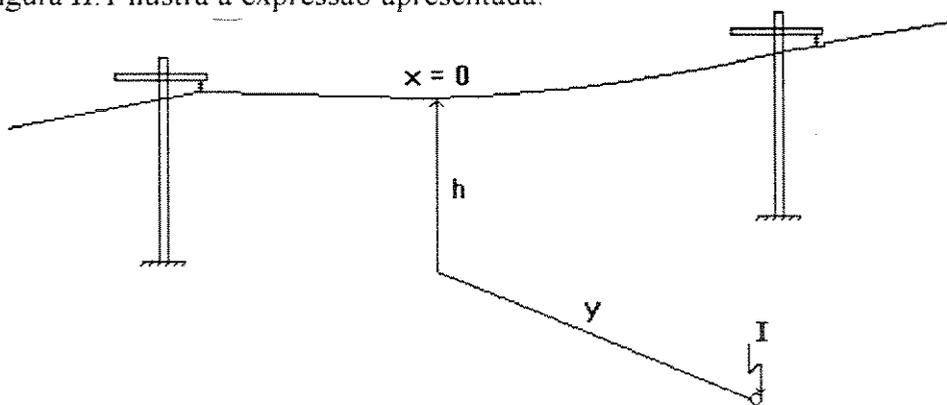


Figura II.1 - Localização da descarga em relação à linha.

As principais restrições da teoria de Rusck são:

- a. Considera apenas os efeitos da corrente de retorno;
- b. A corrente de retorno tem a forma de degrau;
- c. É suposta uma descarga perpendicular ao plano de terra;
- d. É suposto que o solo tem uma resistividade nula;
- e. A teoria prevê que a tensão induzida em um fio, de uma linha multifilar pode ser calculada individualmente para cada fio, desde que todos os fios da linha sejam infinitos e sem descontinuidades.

Com relação à consideração da letra "e" a teoria estabelece que para uma linha de dois fios montados em um mesmo plano vertical, com alturas h_1 e h_2 (figura II.2), as tensões em cada fio são dadas pela expressão de Rusck e as mesmas são diretamente proporcionais às alturas, ou seja:

$$V_1(x,t) / V_2(x,t) = h_1 / h_2 \quad (II.5)$$

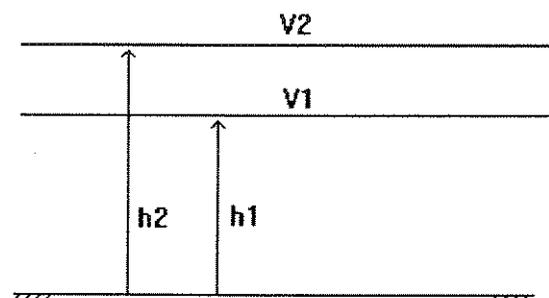


Figura II.2 - Tensões induzidas em uma linha de dois fios.

II.3 - Principais questionamentos à teoria de Rusck

O primeiro questionamento à teoria de Rusck é relativo ao processo empregado no cálculo do campo elétrico criado pela descarga. M. Uman apresenta tal questionamento em [4]. Lorenzato em [6] e mais tarde o próprio M. Uman em [15] demonstram que o cálculo do campo feito por Rusck é coerente.

O segundo questionamento diz respeito ao cálculo da tensão induzida. Chowdhuri em [16] apresenta tal questão e a reforça em [17]. Jakubowski em [18] bem como Lorenzato em [6] demonstram que o questionamento do Prof. Chowdhuri não é procedente.

Outro questionamento apresentado pelo Prof. Chowdhuri [16,17] é de que a teoria de Rusck prevê valores de tensões induzidas para os fios de uma linha multifilar, apenas dependentes da localização geométrica do fio em relação ao ponto de incidência da descarga, ou seja, uma linha de vários fios com a mesma altura e com um pequeno espaçamento horizontal teriam valores de tensões induzidas iguais em cada fio. Medições realizadas com a técnica de modelo reduzido [8,11] bem como medições reais realizadas na África do Sul demonstram que a teoria de Rusck é coerente com resultados experimentais [2].

O maior questionamento apresentado à teoria diz respeito ao fato de a mesma não considerar a resistividade finita do solo. Para o cálculo do campo elétrico criado pela descarga, Rusck supõe um solo de condutividade infinita e isto implica em que o campo no solo é perpendicular à superfície, ou seja, é um campo vertical.

Em 1926 Sommerfeld [19] propôs expressões para o cálculo dos campos elétricos criados por uma antena vertical sobre um solo de condutividade finita. Tais expressões conhecidas como integrais de Sommerfeld só tem solução analítica para casos especiais. A solução mais conhecida é utilizada para o cálculo de campos longe da antena (campos de radiação). Para este caso Sommerfeld demonstra que o campo elétrico perto da antena é um campo praticamente vertical e à medida que nos

afastamos da antena o campo começa a se inclinar na direção de propagação passando a ter uma componente horizontal cada vez mais pronunciada, como visto na fig. II.3.

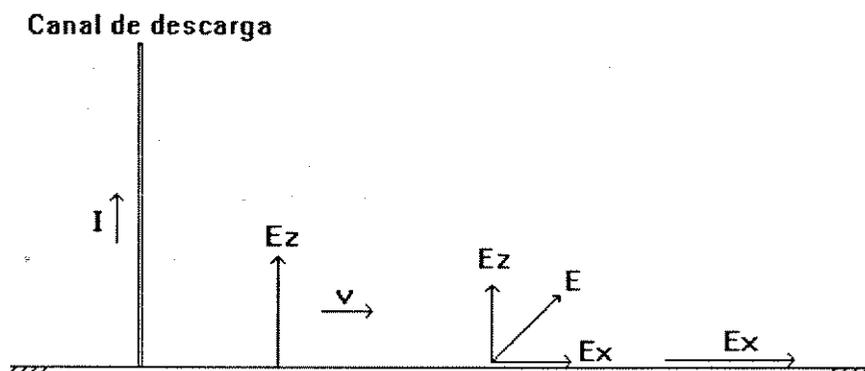


Figura II.3 - Propagação do campo elétrico em um solo real.

Para pontos longe da antena (distâncias maiores que 10 km [4]) Sommerfeld propõe:

$$E_x(j\omega) / E_z(j\omega) = 1 / [(\epsilon_r + \sigma / j.\omega.\epsilon_0)]^{1/2} \quad (\text{II.6})$$

Onde:

E_x - Transformada de Fourier da componente horizontal do campo elétrico;

E_z - Transformada de Fourier da componente vertical do campo elétrico;

ω - Frequência angular (rad / s);

σ - Condutividade do solo ($\Omega.m$);

ϵ_r - Permissividade relativa do solo;

ϵ_0 - Permissividade do vácuo.

Alguns pesquisadores tais como M.Uman [4] e Koga [20] utilizam a expressão (II.6) para o cálculo de campos próximos. Eles utilizam uma proposição similar à de

Rusck para o cálculo do campo vertical perto de uma descarga atmosférica, supondo o solo com uma condutividade infinita. A partir desse valor de campo vertical eles, através da expressão (II-6), calculam o valor da componente horizontal do campo elétrico e com este valor de campo, calculam os valores das tensões induzidas. Evidências experimentais demonstram que apenas descargas que caem próximo às linhas elétricas (menos de 10 km) [2,4] são capazes de induzir tensões consideráveis. A metodologia proposta por Koga e M. Uman está errada, do ponto de vista teórico, pois, utiliza a expressão de Sommerfeld sem obedecer a restrição de validade da mesma e não existem evidências experimentais de que tal teoria estaria correta. Valores medidos de tensões induzidas por descargas reais quando comparados com valores calculados pela metodologia proposta por Uman apresentam diferenças de cerca de 400%, apontadas pelo próprio Uman em [4]:

"The consistent disagreement in the voltages amplitudes between the measured and calculated waveforms can be attributed to an error in the calibration of the voltage measurement or to inaccurate approximations in the Theory....The fact the measured voltage is a factor of about 4 larger even for these cases certainly casts doubt on the calibration..."

Em artigo publicado em 1992 [21] Uman apresenta uma metodologia de cálculo mais aprimorada e as diferenças entre valores medidos e calculados são da ordem de 300%:

"Measured and predicted voltages from the coupling model with measured fields as input show, overall good agreement in wave shape, but the predicted voltages are about a factor of three larger in amplitude..."

Sobre o problema da resistividade do solo Rusck afirma em sua tese:

"A mathematical analysis of the conditions at a lightning stroke wich takes the earth into account is a tremendously difficult problem which, as yet, has not been treated in the literature. Another, and related, case has, however, been solved by Sommerfeld (1926) and consists of a vertical antenna with constant length and sinusoidally varing current . In spite of the difference between these conditions and

those in our case, the qualitative effect of earth resistance ought to be the same in the two cases. The theory of the antenna shows that the earth resistivity will always reduce the field strength and that this influence increases with increasing distance from the antenna and increasing resistivity. The damping effect close to the antenna is, however, small, which favours the assumption that the earth resistivity is zero is a good approximation when calculating the most interesting induced over-voltages near a lightning stroke."

Medições realizadas, utilizando a técnica de modelo reduzido [22,23] sobre um solo real, mostraram que a teoria de Rusck estaria correta. As diferenças entre valores medidos e calculados foram no máximo de 10%.

Pode-se concluir que ainda não está completamente esclarecido o real efeito da resistividade do solo sobre o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas. A comparação de resultados que será apresentada no capítulo V é mais um indício de que a proposição de Rusck está correta.

II-4 - Principal vantagem da teoria de Rusck

Considera-se a principal vantagem da teoria de Rusck o fato dela fornecer uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida.

A maioria dos métodos propostos por outros autores [4,11,20] calculam a tensão induzida a partir do cálculo do campo elétrico que a descarga cria (alguns calculam analiticamente e outros numericamente). Conhecido o valor do campo incidente na linha, os programas fazem a interação desse campo com a linha e calculam a tensão induzida. Esses métodos exigem uma discretização muito grande da linha o que implica na necessidade de grande capacidade de memória e grandes tempos de processamento.

O fato da teoria de Rusck nos fornecer uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida, em qualquer ponto da linha, permite um processamento rápido e só precisamos calcular a tensão nos pontos de interesse. A metodologia das fontes de

compensação descrita a seguir, permite a aplicação da teoria em linhas multifilares e com descontinuidades sem aumentar muito o tempo de processamento e a capacidade de memória. Estas vantagens de tempo de processamento e memória serão muito importantes quando formos fazer simulações probabilísticas nos capítulos IV e V.

II.5 - Aplicação da teoria de Rusck em linhas multifilares e com descontinuidades

A grande dificuldade para se trabalhar com a expressão de Rusck para o cálculo de tensões induzidas em redes reais é a existência de descontinuidades nas linhas caracterizadas por:

- a. Comprimento finito das linhas;
- b. Presença de condutores aterrados;
- c. Presença de dispositivos protetores;
- d. Presença de equipamentos;
- e. Existência de trechos aéreos e subterrâneos.

A metodologia aqui proposta calcula as tensões induzidas em redes aéreas reais que tenham descontinuidades tais como as das letras "a", "b", "c" e "d", apesar do método permitir facilmente a computação da descontinuidade definida na letra "e" [7].

II.5.1 - Correntes com forma de onda qualquer

A fórmula de Rusck pressupõe uma corrente de descarga em forma de degrau. Para computarmos tensões induzidas por uma corrente de forma de onda qualquer pode-se, supondo-se o sistema como linear, usar-se a integral de Duhamel [24]. Optou-se por aplicar o princípio da integral de Duhamel numericamente, através da substituição da onda de corrente por uma sucessão de degraus defasados no tempo, como ilustrado na figura II.4.

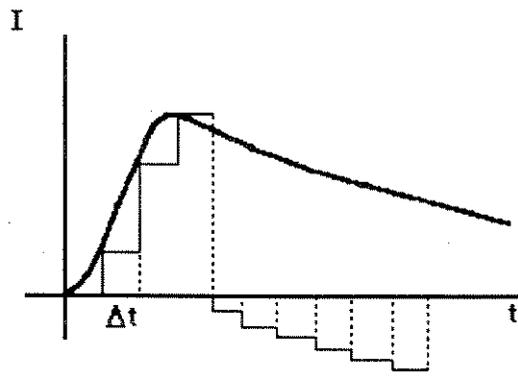
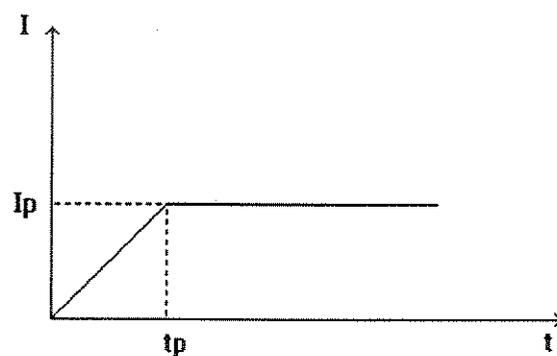


Figura II.4 - Representação da forma de onda da corrente por uma sucessão de degraus.

Cada degrau de corrente origina uma onda de tensão induzida, calculada pela fórmula de Rusck, e a tensão induzida total é dada pela composição das ondas induzidas por cada degrau. No programa computacional implementado, as formas de onda de corrente foram aproximadas por uma onda do tipo da mostrada na figura II.5.



t_p - tempo de pico da corrente I_p - valor de pico da corrente

Figura II.5 - Forma de onda de corrente utilizada no programa.

A metodologia proposta pode ser aplicada a qualquer forma de onda, mas do ponto de vista de tensões induzidas, o tempo pico e o valor de pico da corrente são os parâmetros mais significativos.

II.5.2 - Linhas finitas

A expressão de Rusck para o cálculo da tensão induzida é composta de duas parcelas:

$$V(x_0, t) = U(x_0, t) + U(-x_0, t) \quad (\text{II.7})$$

$V(x_0, t)$ é da tensão induzida no ponto x_0 da linha.

$U(x_0, t)$ é a componente da tensão induzida devido à contribuição das cargas induzidas no trecho de linha à direita do ponto x_0 .

$U(-x_0, t)$ é a componente da tensão induzida devido à contribuição das cargas induzidas no trecho de linha à esquerda do ponto x_0 , figura II.6. Esta interpretação é proposta por Rusck [5].

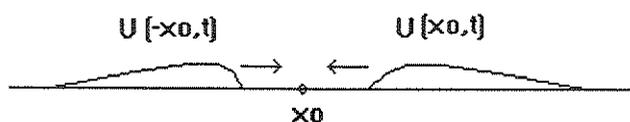


Figura II.6 - Composição da tensão induzida em um ponto da linha.

No caso de uma linha finita em uma de suas direções pode-se adaptar a teoria. Supondo-se uma linha aberta em um ponto x_1 como o mostrado na figura II.7.

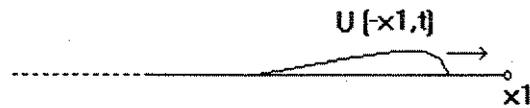


Figura II.7 - Tensão induzida em uma linha finita.

Se a linha fosse infinita ter-se-ia em x_1 :

$$V(x_1, t) = U(x_1, t) + U(-x_1, t) \quad (\text{II.8})$$

Como não existe linha à direita do ponto x_1 não tem-se a contribuição das cargas à direita de x_1 [$U(x_1, t)$] e como a linha está aberta em x_1 as contribuições à esquerda de x_1 [$U(-x_1, t)$] dobram de valor, ou seja, a tensão em x_1 será:

$$V(x_1, t) = 2 \cdot U(-x_1, t) \quad (\text{II-9})$$

Modificando-se o raciocínio acima supondo que a descontinuidade em x_1 será substituída por uma fonte de tensão de compensação. Esta fonte de tensão tem de ter um valor tal que se adicionada à tensão calculada, supondo a linha infinita, resulte no valor correto, ou seja:

$$V(x_1, t) + \Delta V = 2 \cdot U(-x_1, t) \quad (\text{II.10})$$

$$U(x_1, t) + U(-x_1, t) + \Delta V = 2 \cdot U(-x_1, t) \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta V = U(-x_1, t) - U(x_1, t) \quad (\text{II.12})$$

Esta fonte de compensação de valor " ΔV " é aplicada no ponto " x_1 ", mas o seu efeito deve ser propagado para toda a linha, uma vez que a não existência de linha após " x_1 " altera os valores de tensão induzida em todos os pontos da linha.

Desejando-se calcular a tensão em um ponto " x " qualquer, pode-se somar à tensão induzida calculada para o ponto " x ", supondo linha infinita, o valor da fonte de compensação aplicada em x_1 . É importante ressaltar que a tensão da fonte de compensação gasta um certo tempo para "viajar" do ponto x_1 até o ponto " x ", ou seja:

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) + [U(-x_1,t) - U(x_1,t)] \cdot u(t-t_0) \quad (\text{II.13})$$

A função $u(t-t_0)$ é a função degrau unitário:

$$\begin{aligned} u(t-t_0) &= 0 \text{ se } t < t_0 \\ &= 1 \text{ se } t \geq t_0 \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

" t_0 " é o valor do tempo de trânsito entre o ponto " x " e o ponto " x_1 ":

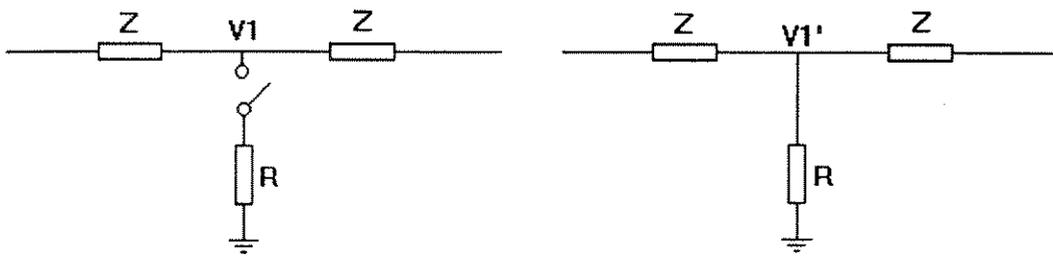
$$t_0 = |x-x_1| / v_0 \quad (\text{II.15})$$

Onde " v_0 " é a velocidade de propagação, que no caso em questão, será tomada como igual à velocidade da luz [25].

A substituição do efeito de uma descontinuidade por uma fonte de tensão de compensação é um procedimento elegante e eficiente, principalmente quando se deseja escrever algoritmos computacionais.

II.5.3 - Ponto de aterramento em uma linha de um fio

Uma vez conhecido o valor da tensão induzida na linha sem o ponto de aterramento, pode-se calcular a tensão com o ponto de aterramento, através da aplicação do teorema de Thévenin.



V_1 - Tensão induzida sem o ponto de aterramento

V_1' - Tensão induzida com o ponto de aterramento

R - Valor da resistência de aterramento

Z - Impedância de surto da linha

Figura II.8 - Circuito equivalente da linha.

Pode-se aplicar o teorema de Thévenin ao circuito da figura II.8:

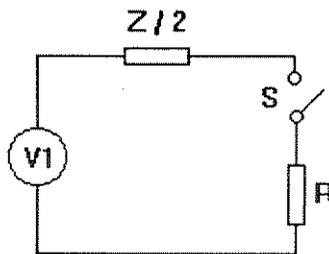


Figura II.9 - Circuito equivalente de Thévenin.

Fechando-se a chave "S" da figura II.9 a corrente que circulará no circuito será:

$$I = V_1 / (Z/2 + R) = 2.V_1 / (Z+2.R) \quad (II.16)$$

A tensão no resistor, que é igual à tensão na linha no ponto de instalação do resistor, será:

$$V_1' = R.I = 2.R.V_1 / (Z+2.R) \quad (\text{II.17})$$

A fonte de compensação equivalente que substituirá o resistor será :

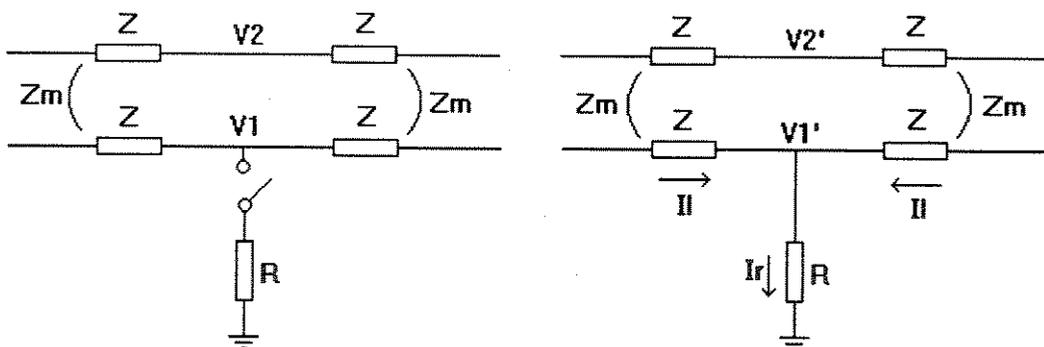
$$V_1 + \Delta V = V_1' \quad (\text{II.18})$$

$$\Delta V = (-Z.V_1) / (Z+2R) \quad (\text{II.19})$$

Do mesmo modo que no caso de uma extremidade de linha, a fonte de compensação que substitui o resistor tem que ter o seu efeito propagado por toda a extensão da linha. O efeito de vários pontos de aterramento em uma linha pode ser computado através da substituição de todos os pontos por fontes de compensação.

1.5.4 - Ponto de aterramento em uma linha de dois fios

Seja o circuito da figura II.10.



Z - Impedância de surto própria

Z_m - Impedância de surto mútua

Figura II.10 - Circuito equivalente para uma linha de dois fios.

Pela teoria de Rusck tem-se:

$$V_1 / V_2 = h_1 / h_2 \quad (\text{II.20})$$

O valor de V_1' já foi calculado:

$$V_1' = 2.R.V_1 / (Z+2.R) \quad (\text{II.21})$$

A corrente I_r que circula no resistor também já foi calculada:

$$I_r = 2.V_1 / (Z+2.R) \quad (\text{II.22})$$

Pela simetria do circuito pode-se afirmar que a corrente que circula no fio 1 devido à presença do resistor é:

$$I_1 = I_r / 2 = V_1 / (Z+2.R) \quad (\text{II.23})$$

Logo, a tensão no fio 2 será:

$$V_2' = V_2 - Z_m.I_1 \quad (\text{II.24})$$

$$V_2' = V_2 - [Z_m / (Z+2.R)].V_1 \quad (\text{II.25})$$

$$V_2' = V_2 - [Z_m / (Z+2.R)].V_2.(h_1/h_2) \quad (\text{II.26})$$

A fonte de compensação será:

$$V_2 + \Delta V = V_2' \quad (\text{II.27})$$

$$\Delta V = -Z_m \cdot I_1 = [-Z_m / (Z+2.R)] \cdot V_1 = [-Z_m / (Z+2.R)] \cdot V_2 \cdot (h_1 / h_2) \quad (\text{II.28})$$

Neste trabalho serão adotadas para o cálculo de Z e Z_m as expressões propostas em [3]:

$$Z = 138 \log (2 \cdot h_1 / r) \quad (\text{II.29})$$

$$Z_m = 69 \log [(4h_1 \cdot h_2 / d^2) + 1] \quad (\text{II.30})$$

A figura II.11 ilustra a expressão acima.

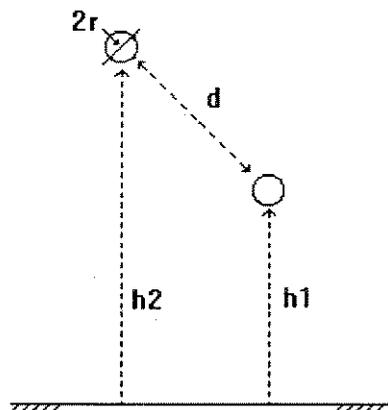


Figura II.11 - Configuração geométrica de uma linha de dois fios.

A dedução da expressão da fonte de compensação foi feita para linhas de impedâncias de surto iguais, porque, usualmente, as diferenças de altura e de diâmetro entre os cabos de uma rede de distribuição são pequenas. No entanto, não se teria nenhuma dificuldade para deduzir a expressão da fonte de compensação para dois fios com impedâncias diferentes e também para sistemas de mais de dois fios.

II.5.5 - Dispositivos protetores

Nesta seção serão analisados pára-raios e centelhadores. Uma das principais características destes protetores é que eles só atuam a partir de um determinado valor de tensão. Na verdade, o valor da tensão de atuação não é fixo, mas sim dado por uma curva tensão-tempo ou por uma curva tensão-corrente. A versão atual do programa implementado, trabalha com um valor de tensão de atuação fixo. Acredita-se que esta simplificação não levará a erros significativos.

Outra característica importante é a tensão residual, ou seja, ao entrar em atuação a corrente que circula no protetor provoca uma queda de tensão no mesmo. Esta queda de tensão não é constante, mas dependente dos valores da corrente e tensão aplicados no protetor. No caso de centelhadores, esta tensão é a queda de tensão no arco e será desprezada. No caso de pára-raios, a queda de tensão não é desprezível devido à presença do resistor não linear. Apesar de sabermos que a tensão residual não é constante, adotou-se neste trabalho, numa primeira abordagem, a hipótese de tensão residual constante, que é uma hipótese conservativa.

Os modelos para os pára-raios e centelhadores são os mostrados na figura II.12.

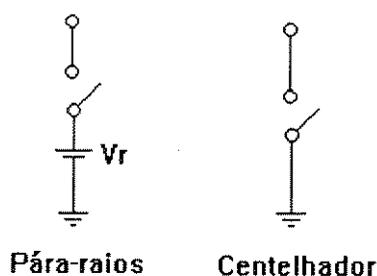


Figura II.12 - Modelos para o pára-raios e o centelhador.

Para se calcular a fonte de compensação, utiliza-se o circuito da figura II.13.

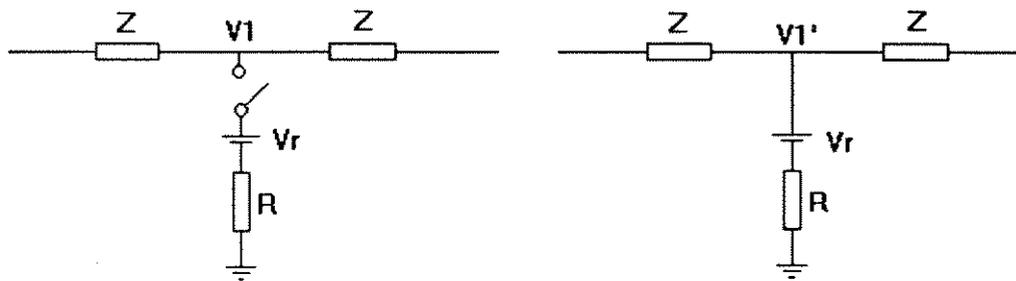


Figura II.13 - Circuito equivalente para a linha com pára-raios.

O circuito de Thévenin equivalente é o mostrado na figura II.14.

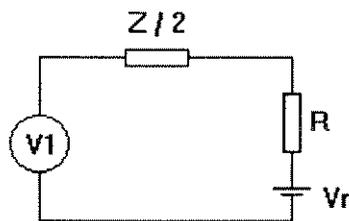


Figura II.14 - Circuito equivalente de Thevenin para a linha com pára-raios.

Tem-se portanto:

$$I = (V_1 - V_r) / [(Z/2) + R] \quad (\text{II.31})$$

$$V_1' = V_r + R.I \quad (\text{II.32})$$

$$V_1 + \Delta V = V_1' \quad (\text{II.33})$$

$$\Delta V = -Z \cdot [(V_1 - V_r) / (Z + 2.R)] \quad (\text{II.34})$$

Até o disparo do pára-raios a tensão é igual a V_1 . Após o disparo, a fonte de compensação é aplicada.

No caso de redes de distribuição de energia elétrica com cabo neutro, o pára-raios é usualmente instalado entre fase e neutro, como mostrado na figura II.15. Neste caso, o pára-raios só irá atuar quando a diferença de tensão $|V_1 - V_2|$ for superior à tensão de disparo.

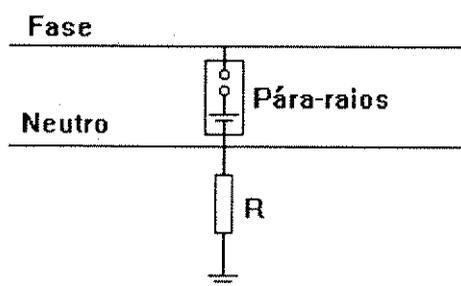


Figura II.15 - Linha de dois fios com pára-raios instalados da fase para o neutro.

II.6 - Descrição do programa implementado

Foi implementado um programa computacional para o cálculo de tensões induzidas utilizando a metodologia das fontes de compensação e a teoria de Rusck. O programa foi implementado em um microcomputador de 16 bits e escrito em Pascal.

Os dados de entrada do programa são:

- Valor de pico da corrente de descarga;
- Tempo de pico da corrente de descarga;
- Localização da descarga em relação à linha;
- Parâmetros da linha;
- Parâmetros dos aterramentos;
- Parâmetros dos protetores.

O primeiro passo do programa é calcular as tensões induzidas através da fórmula de Rusck em todos os pontos onde existem descontinuidades e em pontos onde se deseja conhecer os valores de tensão induzida.

O segundo passo é, a partir do valor dado pela expressão de Rusck conjuntamente com as expressões deduzidas anteriormente, calcular o valor das fontes de compensação. Isto é feito a cada intervalo de processamento.

O terceiro passo é calcular, nas linhas, o transitório provocado pelas fontes de compensação. Para esta etapa foi implementada uma rotina computacional baseada no método das treliças utilizando o algoritmo computacional proposto por Barthold & Carter [25, 26].

O quarto e último passo é adicionar os valores calculados pela expressão de Rusck com os valores de tensão obtidos no cálculo do transitório das fontes de compensação.

O programa se mostrou bastante eficiente, o que viabilizou a utilização do mesmo para estudos de desempenho de redes.

Como dados de saída, o programa fornece os valores das tensões e/ou diferenças de tensões entre os fios, nos pontos previamente escolhidos.

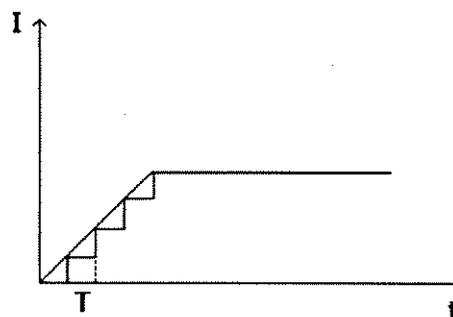
Além dos dados referentes à descarga e à linha, o programa necessita da definição de um intervalo de cálculo. A definição deste intervalo depende basicamente de três fatores:

a- O menor tempo de trânsito entre pontos onde existem descontinuidades ou pontos onde se deseja calcular a tensão induzida;

b- Presença ao longo da linha de elementos reativos (indutores e capacitores). No método para o cálculo de transitórios os elementos reativos são substituídos por linhas de transmissão equivalentes ("stub-lines") o que implica numa escolha adequada do intervalo de cálculo em função dos valores das indutâncias e capacitâncias [26];

c- Número de degraus com os quais será simulada a frente de onda da corrente de descarga atmosférica. Quanto maior o número de degraus, maior será a precisão do

cálculo. O programa utiliza como intervalo entre degraus um número que seja múltiplo inteiro do intervalo de cálculo. A figura II.16 ilustra o exposto.



$$T = N \cdot \Delta t$$

Δt - intervalo de cálculo

N - inteiro ≥ 1

Figura II.16 - Substituição da frente de onda por uma sucessão de degraus.

Capítulo III - Resultados

No item III.1 são apresentadas uma série de comparações entre resultados obtidos com a metodologia proposta nesta tese e os resultados obtidos por outros pesquisadores. São apresentadas comparações com os métodos propostos por Nucci [27], Diendorfer [28], Chowdhuri [17] e Yokoyama [11].

No item III.2 são apresentados alguns resultados obtidos com o programa descrito no capítulo II. A partir de um caso-base são feitas algumas modificações tanto na configuração da linha quanto nos parâmetros da descarga atmosférica. O objetivo deste item é apenas ilustrar a versatilidade do programa implementado.

III.1 - Comparação de resultados

III.1.1 - Comparação com o método proposto por Nucci

Carlo Alberto Nucci et al apresentaram em 1993 [27] uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas, em linhas aéreas, por descargas atmosféricas. A metodologia proposta considera a terra como um condutor perfeito. A modelagem da descarga utiliza o modelo MTL (modified transmission line) [27] no qual o canal de descarga é modelado como uma linha de transmissão na qual o valor de corrente decresce à medida que se propaga pelo canal. A corrente na base do canal é tomada com uma forma de dupla exponencial modificada [27]. A partir desta corrente o valor do campo elétrico é calculado utilizando-se o clássico modelo de dipolos [29]. A interação campo-linha é feita segundo o modelo proposto por Agrawal [30].

Nas figuras III.2 e III.3, são apresentados os resultados obtidos para a seguinte configuração:

Linha:

- comprimento: 1,0 km;
- altura: 10 m;
- terminações: casadas.

Corrente de descarga:

- valor de pico: 12 kA;
- tempo de pico: 1,0 μ s;
- tempo de cauda: 1,4 μ s;
- velocidade da corrente: $0,6 \cdot 10^8$ m/s;
- distância da descarga à linha: 50,0 m.

A figura III.1 Ilustra o exposto.

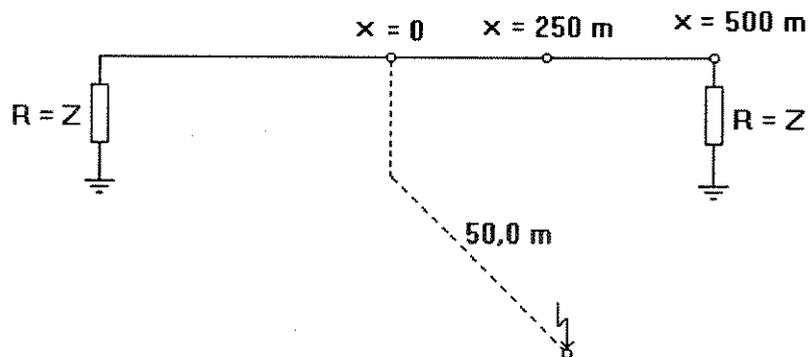
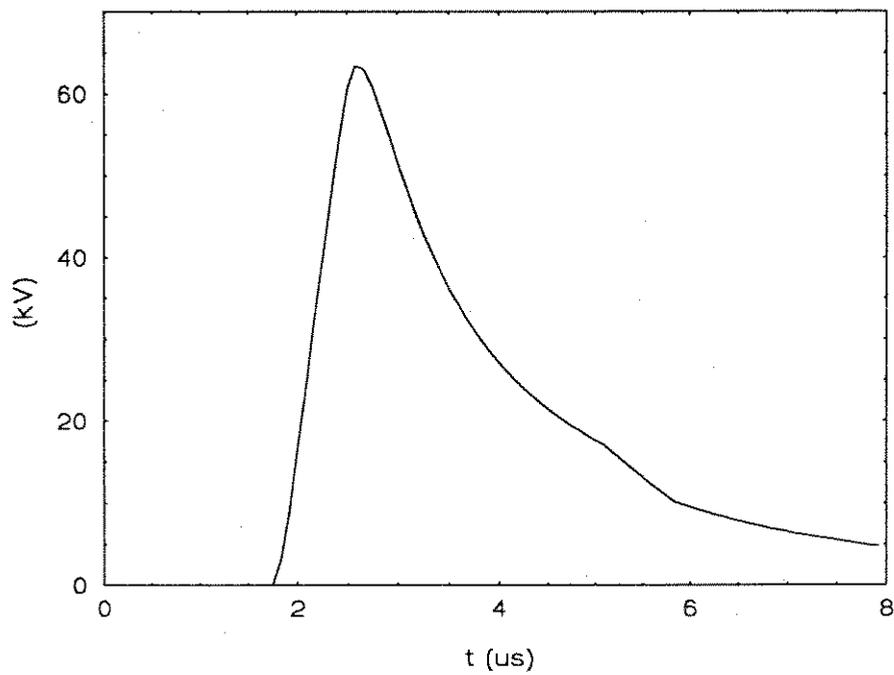
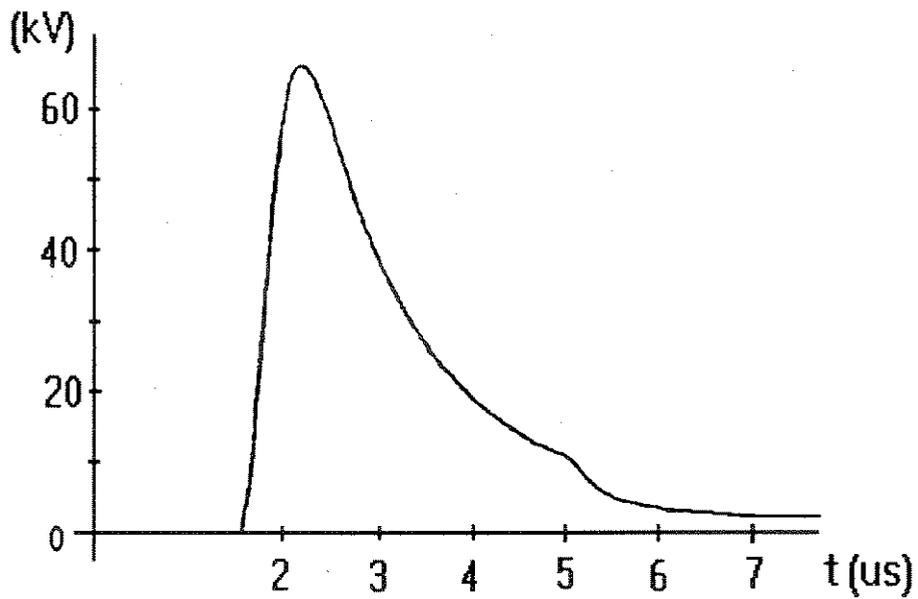


Figura III.1 - Localização da descarga em relação à linha.

A figura III.2 apresenta as formas de onda das tensões induzidas calculadas por Nucci e pela metodologia apresentada nesta tese, para $x = 500$ m. A figura III.3 para $x = 250$ m e a figura III.4 para $x = 0$ m.

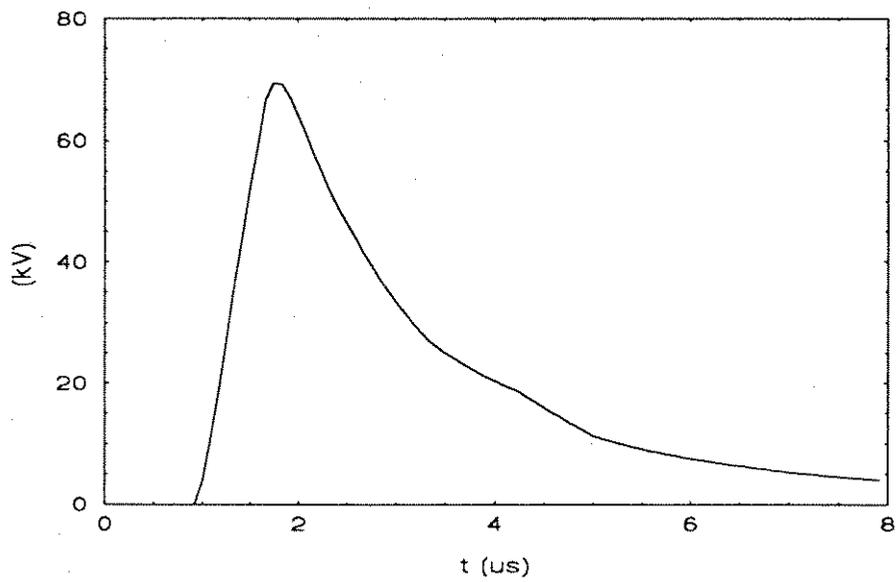


Tese

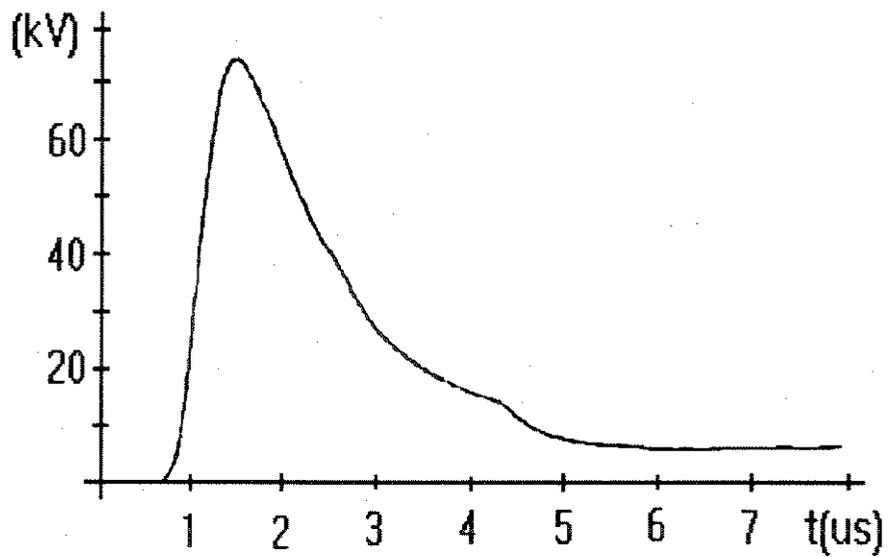


Nucci

Figura III.2 - Valores calculados pelo autor e por Nucci para $x = 500$ m.

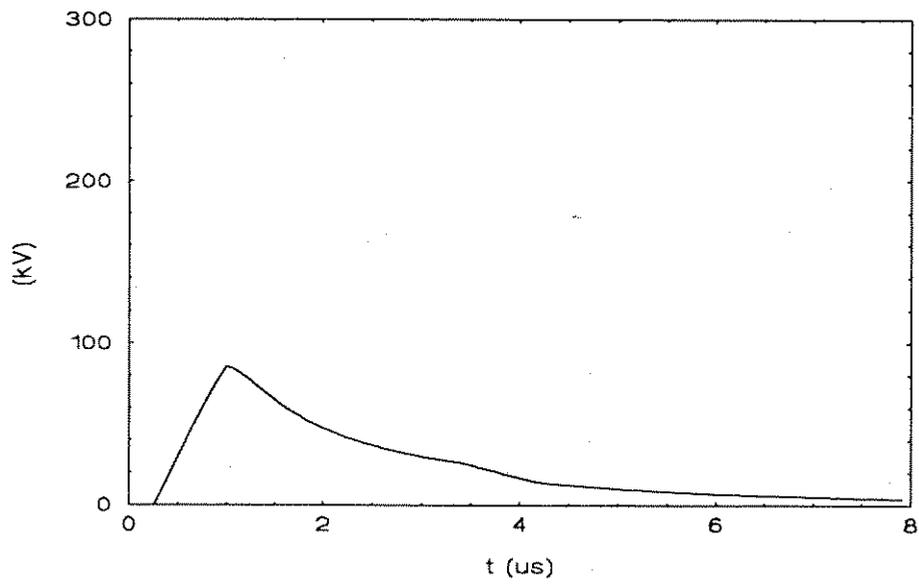


Tese

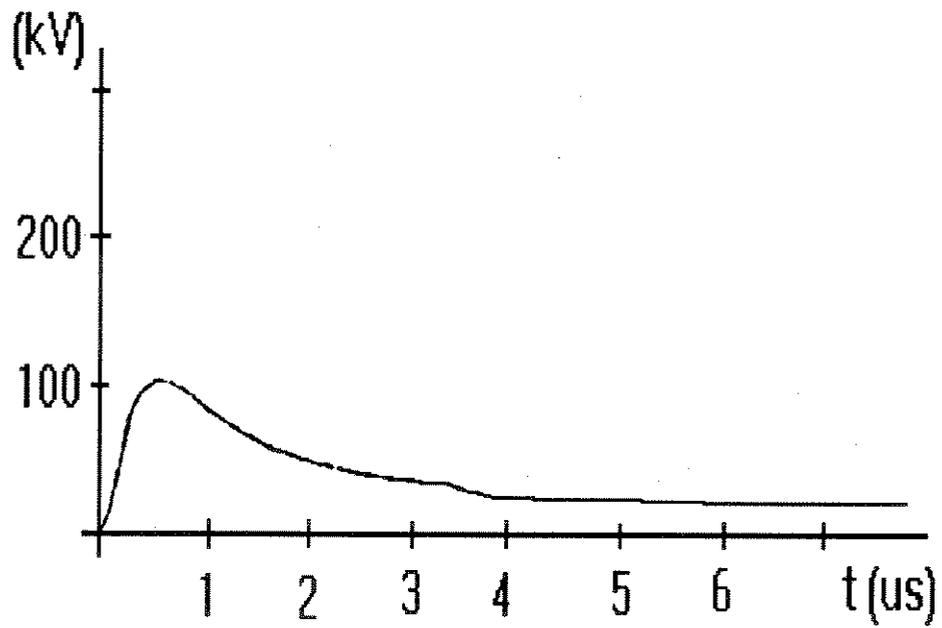


Nucci

Figura III.3 - Valores calculados pelo autor e por Nucci para $x = 250$ m.



Tese

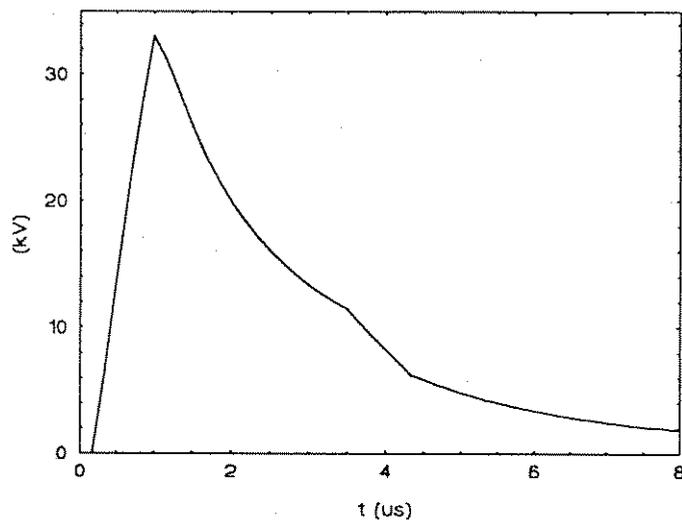


Nucci

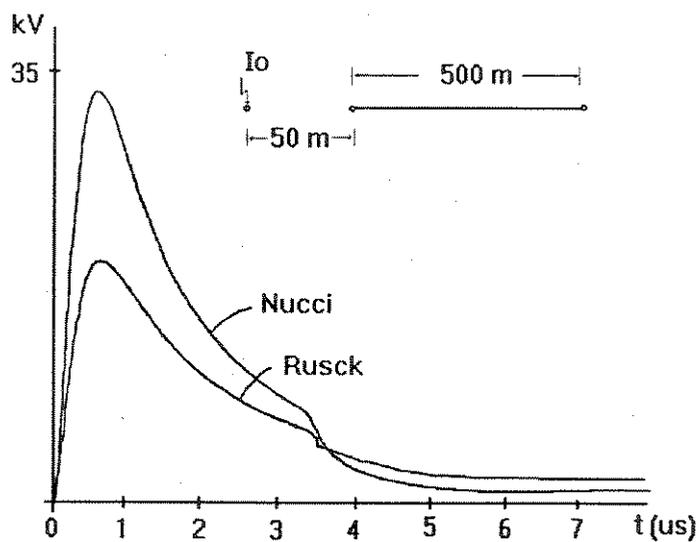
Figura III.4 - Valores calculados pelo autor e por Nucci para $x = 0 \text{ m}$.

A figura III.5 apresenta um outro resultado obtido por Nucci, calculado por sua metodologia, comparado com um resultado obtido pela teoria de Rusck, também calculado por Nucci. A comparação não é boa.

Na mesma figura é apresentado o valor obtido com a metodologia proposta nesta tese. O resultado é bastante parecido com o resultado obtido por Nucci quando este utiliza sua metodologia. O resultado apresentado por Nucci e atribuído à teoria de Rusck parece que não foi calculado de maneira correta.



Tese



Nucci

Figura III.5 - Valores calculados pelo autor e por Nucci.

As diferenças obtidas entre os métodos comparados são pequenas. Acreditamos que as diferenças obtidas são devido às diferentes formas de representar a corrente de descarga. Nucci representa a corrente por uma dupla exponencial e a metodologia aqui proposta representa a corrente como mostrado na figura III.6. O pequeno degrau que aparece na cauda de onda das figuras III.2 a III.5 é devido ao fato da linha ser uma linha finita casada nas extremidades. Se a linha fosse infinita esse degrau não apareceria.

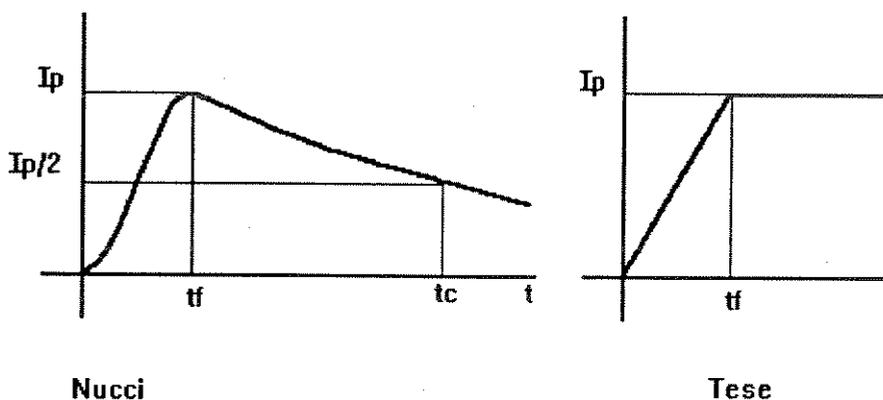


Figura III.6 - Formas de onda da corrente utilizadas por Nucci e pelo autor.

III.1.2 - Comparação com o método proposto por Diendorfer

Gerhard Diendorfer em 1990 [28], apresentou uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas. A metodologia considera a terra como um condutor perfeito. Para a modelagem do canal de descarga é utilizado o modelo TCS (traveling current source) [28] e a corrente de descarga é modelada como uma dupla exponencial modificada [28]. O cálculo do campo é feito pelo método dos dipolos [29] e a interação campo-linha é feita conforme Agrawal [30].

Os resultados apresentados por Diendorfer são para a seguinte configuração:

Linha:

- comprimento: 2,0 km;

- altura: 10 m;
- terminações: casadas.

Corrente de descarga:

Tipo 1:

- valor de pico: 11 kA;
- tempo de pico: 1 μ s;
- tempo de cauda: 30 μ s;
- velocidade da corrente: $1,0 \cdot 10^8$ m/s;
- distância da descarga à linha: "d" m.

Tipo 2:

- valor de pico: 18 kA;
- tempo de pico: 5,0 μ s;
- tempo de cauda: 50 μ s;
- velocidade da corrente: $1,0 \cdot 10^8$ m/s;
- distância da descarga à linha: "d" m.

A figura III.7 ilustra o exposto.

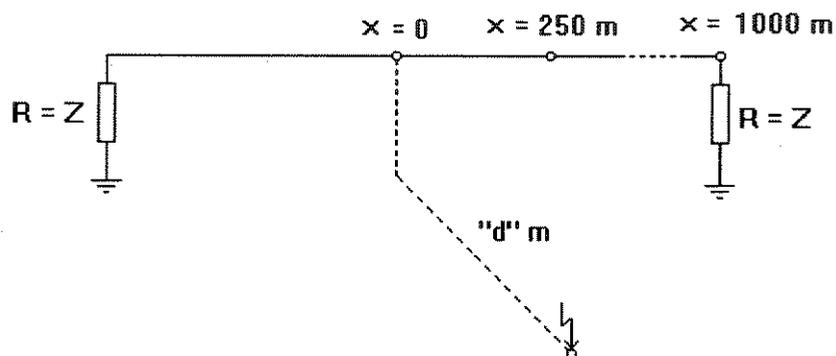
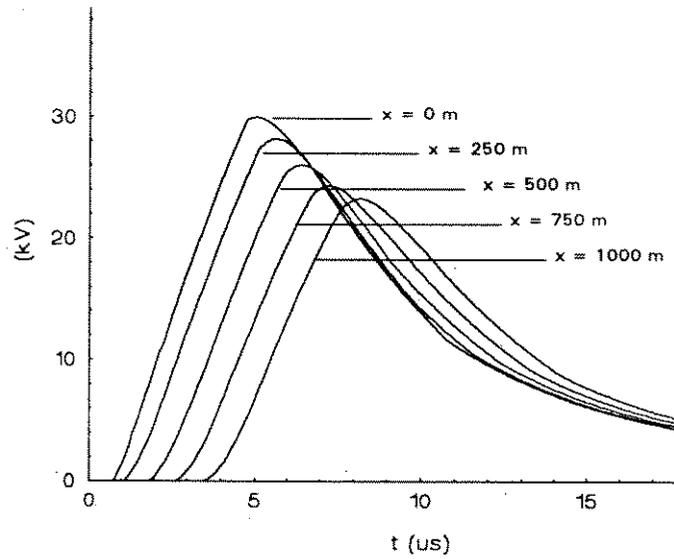
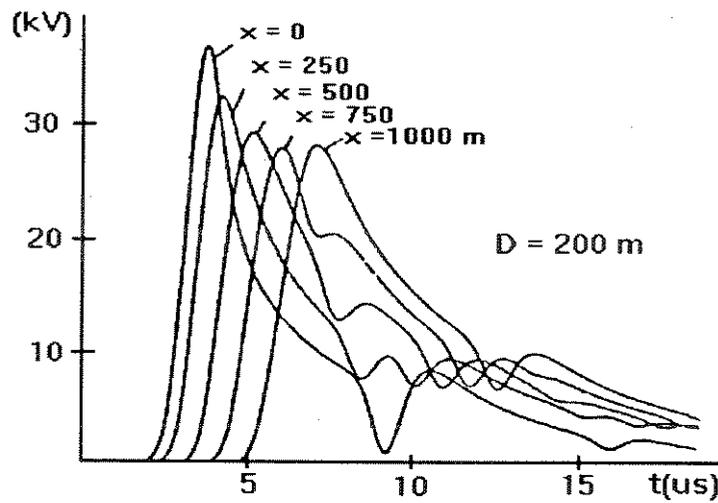


Figura III.7 - Localização da descarga em relação à linha.

A figura III.8 apresenta os resultados obtidos pela metodologia de Diendorfer e pela metodologia proposta nesta tese, para $d = 200$ m, corrente tipo 2 e $x = 0, 250, 500, 750$ e 1000 m.



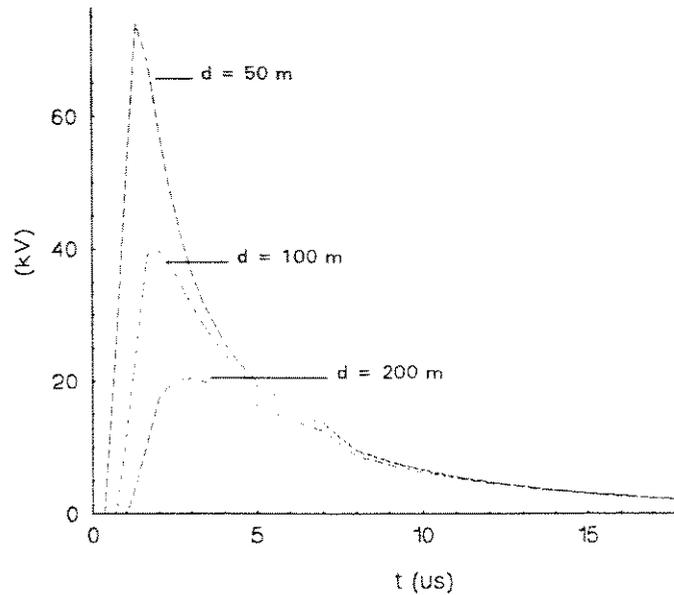
Tese



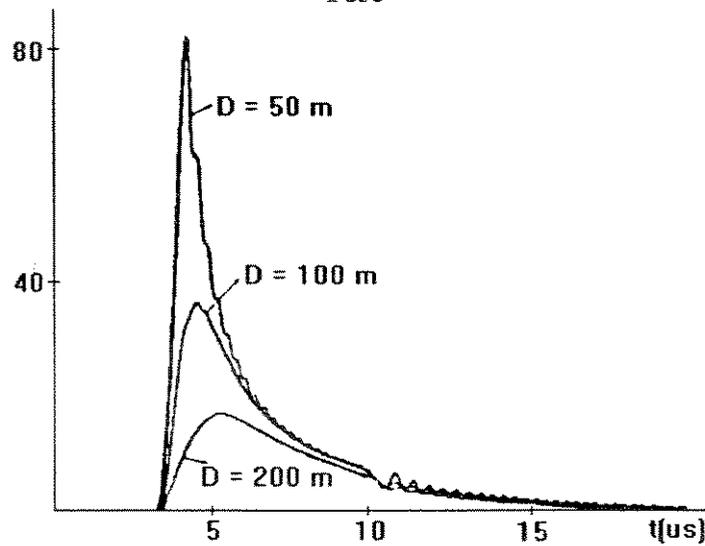
Diendorfer

Figura III.8 - Valores calculados pelo autor e por Diendorfer para $x = 0, 250, 500, 750$ e 1000 m, corrente tipo 2.

A figura III.9 apresenta a comparação para $d = 50, 100$ e 200 m , para a corrente tipo 1 e $x = 0$ m.



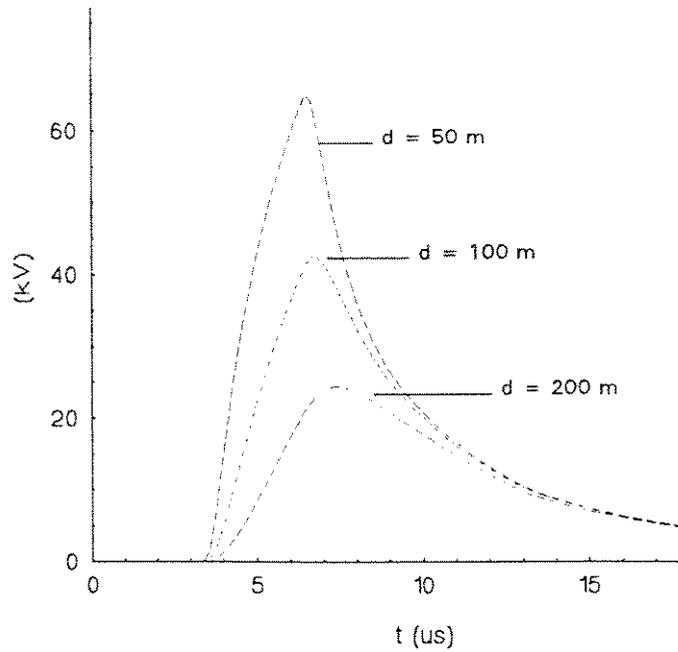
Tese



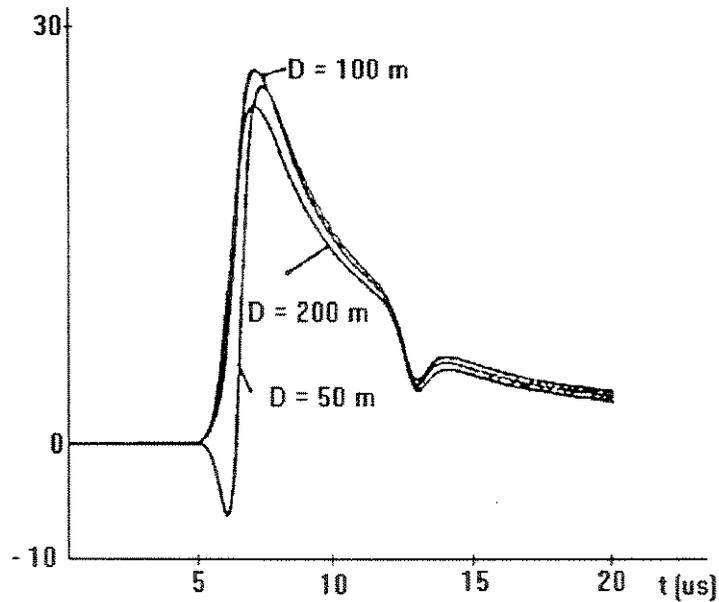
Diendorfer

Figura III.9 - Valores calculados pelo autor e por Diendorfer para $d = 50, 100$ e 200 m, corrente tipo 1.

A figura III.10 apresenta a comparação para $d = 50, 100$ e 200 m, para a corrente tipo 2 e $x = 1000$ m.



Tese



Diendorfer

Figura III.10 - Valores calculados pelo autor e por Diendorfer para $d = 50, 100$ e 200 m, corrente tipo 2, $x = 1000$ m.

Para os casos apresentados nas figuras III.8 e III.9 as duas metodologias não levam a resultados muito diferentes. Para os casos apresentados na figura III.10 as diferenças são bem acentuadas.

Não podemos explicar as diferenças. Os resultados apresentados por Diendorfer são estranhos, pois uma variação no tempo de pico da corrente (de 1 para 5 μs) provoca uma mudança muito acentuada no comportamento da tensão induzida. As curvas da figura III.10 mostram que o valor da tensão induzida praticamente não depende da distância da descarga à linha, o que é um resultado surpreendente. Além disto as curvas da figura III.8 apresentam muitas oscilações, o que é estranho, pois a linha é casada nas extremidades.

III.1.3 - Comparação com o método proposto por Chowdhuri

Em 1967, em sua tese de doutorado, P. Chowdhuri apresentou uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas aéreas [16]. A metodologia proposta previa tensões induzidas de vários milhões de volts em uma linha de 10 m de altura. Mais tarde foi detectado um erro de cálculo e em 1990 o Prof. Chowdhuri apresentou em [17] alguns resultados obtidos com a sua teoria corrigida.

O cálculo do campo elétrico feito pelo Prof. Chowdhuri é similar ao feito por Rusck, mas a interação campo-linha é feita de maneira diferente. A forma como Chowdhuri calcula a tensão induzida foi comentada por Jakubowski [18] e por Fonseca [6] e os mesmos apontam alguns erros cometidos na dedução da expressão.

Os casos apresentados em [17] partem da seguinte configuração básica:

Linha:

- comprimento: infinito;
- altura da fase: 10 m;
- altura do condutor aterrado: 13,5 m .

Corrente de descarga:

Tipo 1:

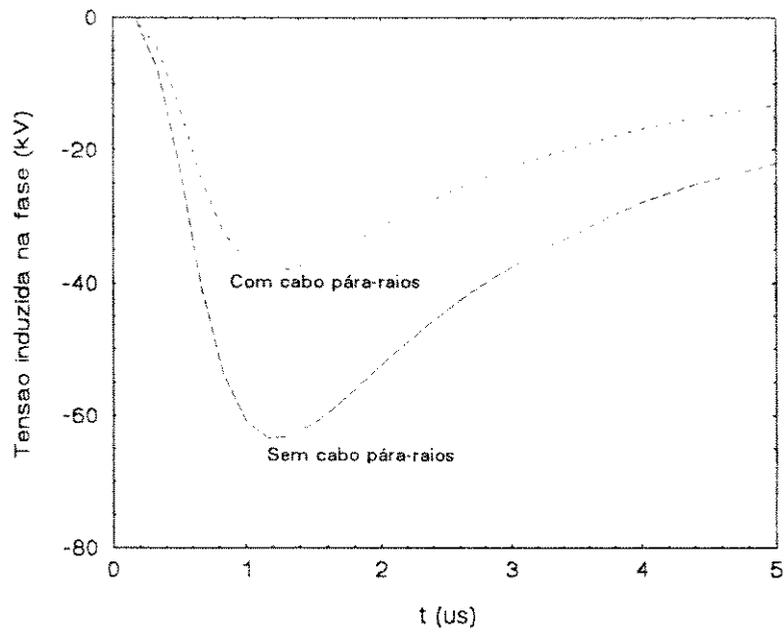
- valor de pico: 5,0 kA;
- tempo de pico: 0,5 μ s;
- tempo de cauda: 50 μ s.
- distância da descarga à linha: 25,0 m.

Tipo 2:

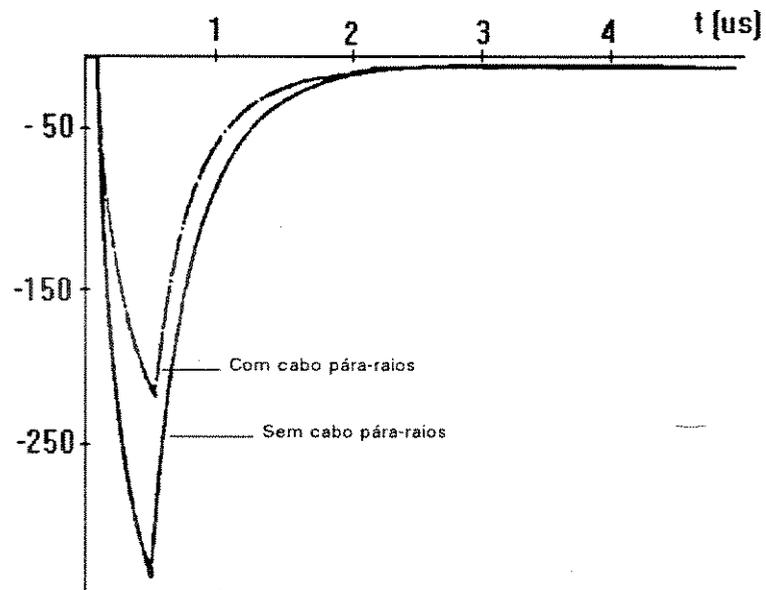
- valor de pico: 5,0 kA;
- tempo de pico: 1,0 μ s;
- tempo de cauda: 50 μ s;
- distância da descarga à linha: 5,0 m.

É importante observar que na teoria do Prof. Chowdhuri, o cabo aterrado é suposto com um potencial de valor igual a zero em todo o seu comprimento, o que é uma hipótese não convencional tendo em vista que o cabo aterrado está, inclusive, acima do cabo fase. Nos resultados apresentados pela metodologia proposta nesta tese, foi suposto que o cabo estava aterrado em apenas um ponto, com uma resistência de valor igual a zero.

A figura III.11 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com a metodologia do Prof. Chowdhuri e os resultados obtidos com a metodologia proposta nesta tese, para corrente tipo 1 e a descarga incidindo a $d = 25$ m da linha. São apresentados os valores de tensão induzida no cabo fase para o caso de linha com e sem cabo pára-raios aterrado com zero ohms.



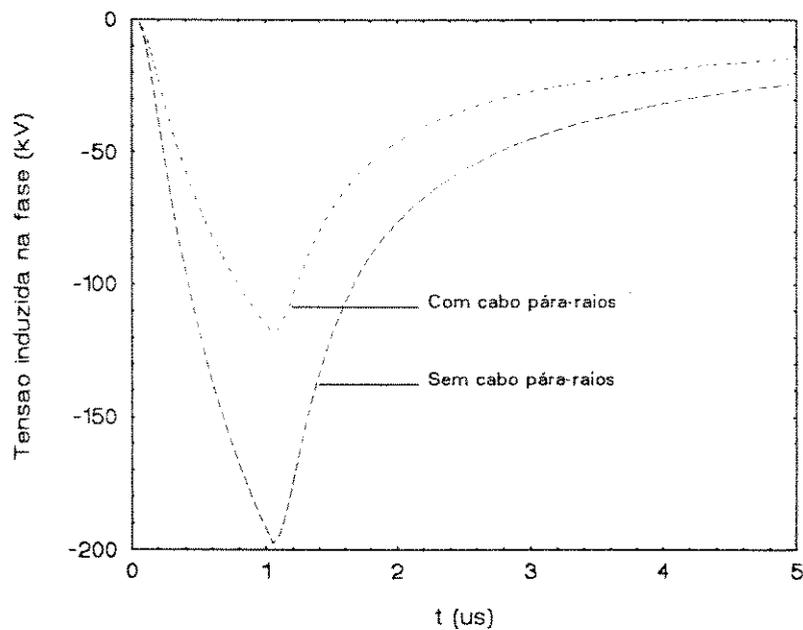
Tese



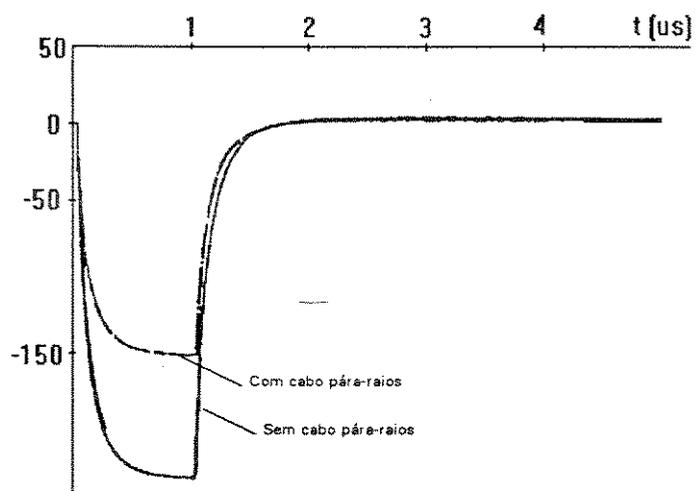
Chowdhuri

Figura III.11 - Valores calculados pelo autor e por Chowdhuri para a corrente tipo 1.

A figura III.12 apresenta a comparação para corrente tipo 2 e a mesma incidindo a $d = 5$ m da linha. São apresentados os valores de tensão induzidas na fase para o caso de linha com e sem cabo pára-raios.



Tese



Chowdhuri

Figura III.12 - Valores obtidos pelo autor e por Chowdhuri para a corrente tipo 2.

As curvas das figuras III.11 e III.12 mostram que o efeito do cabo pára-raios é similar nas duas metodologias. Entretanto os valores calculados diferem da ordem de até 500%. Acreditamos que tais diferenças são devido às incoerências já apontadas na fomulação do Prof. Chowdhuri [6,18].

É importante lembrar que a teoria do Prof. Chowdhuri foi adotada por um grupo de trabalho do IEEE [13].

III.1.4 - Comparação com modelo proposto por Yokoyama

O Prof. S. Yokoyama propôs [11] uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas. As bases do modelo proposto são as mesmas do modelo de Rusck. Rusck fez uma dedução analítica para a expressão da tensão induzida e Yokoyama fez uma implementação numérica. Apesar de Yokoyama afirmar que a teoria de Rusck está errada [12] as duas metodologias chegam a resultados muito parecidos, como será visto a seguir.

As simulações apresentadas são referentes a dois casos:

Caso 1:

Linha:

- comprimento: 2,0 km;
- terminações: casadas;
- altura da fase: 10,0 m;
- altura do cabo pára-raios: 10,5 m;
- raio dos condutores: 0,4 cm;

Corrente de descarga:

- valor de pico: 100 kA;
- tempo de pico: 2,0 μ s;

- tempo de cauda: 78 μ s;
- velocidade da corrente: $0,3 \cdot 10^8$ m/s;
- distância da descarga à linha: 100 m.

Caso 2:

O caso 2 se refere ao cálculo e medições feitas em modelo reduzido.

Linha:

- comprimento: 5,0m;
- terminações: casadas;
- altura da fase : 50 mm;
- altura do cabo pára-raios: 52,5 mm;
- raio dos condutores: 0,1 mm.

Corrente de descarga:

- valor de pico: 47 mA;
- tempo de pico: 5 ns;
- tempo de cauda: 400 ns;
- velocidade da corrente: $0,39 \cdot 10^8$ m/s;
- distância da descarga à linha: 0,4 m.

A figura III.13 ilustra o caso 1 e a figura III.14 os casos 2A (linha sem aterramento) e 2B (linha com aterramento).

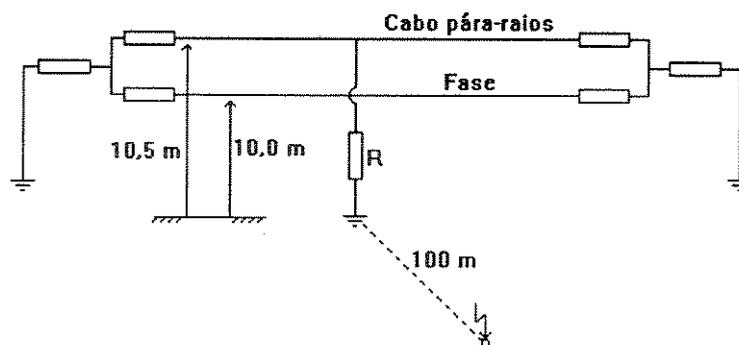
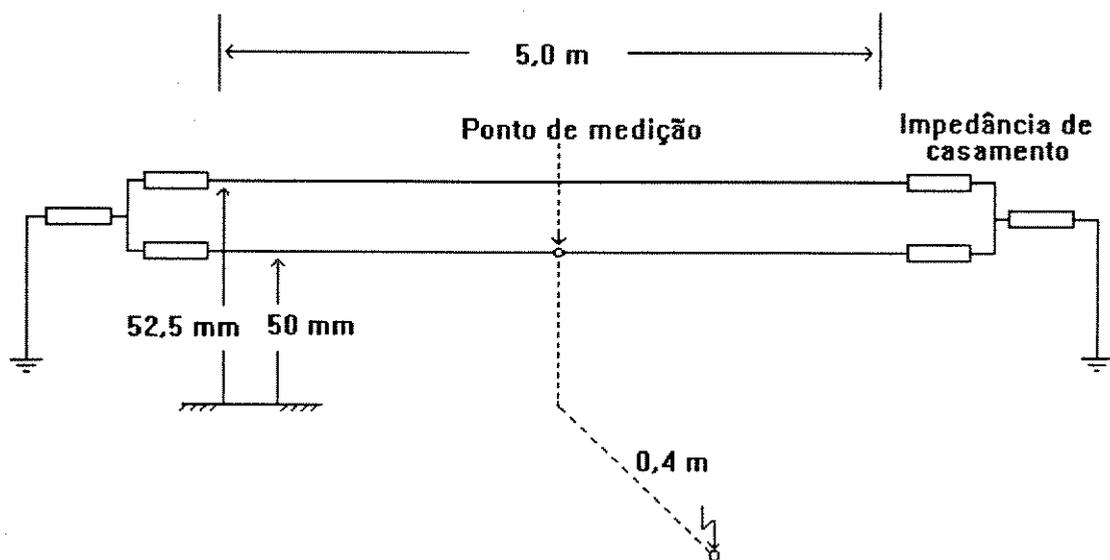
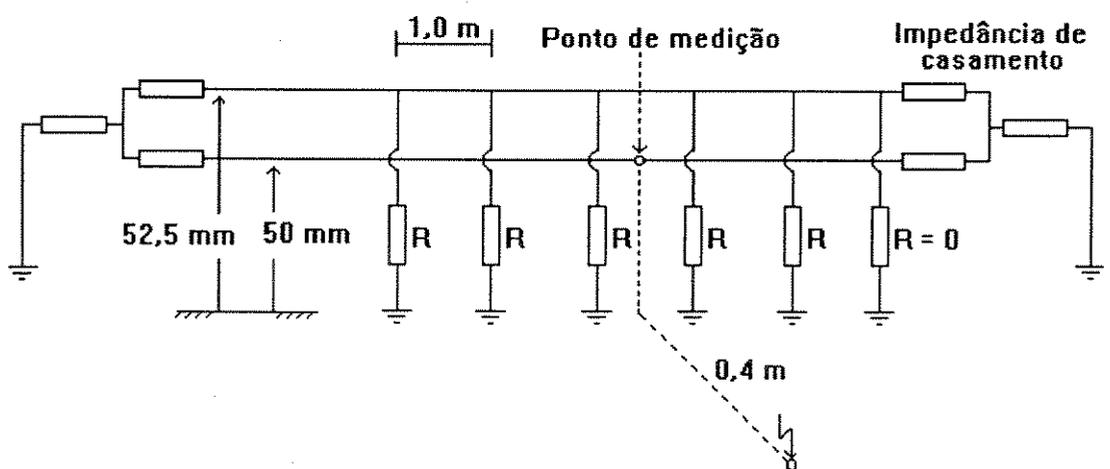


Figura III.13 - Configuração utilizada pelo Prof. Yokoyama - caso 1.



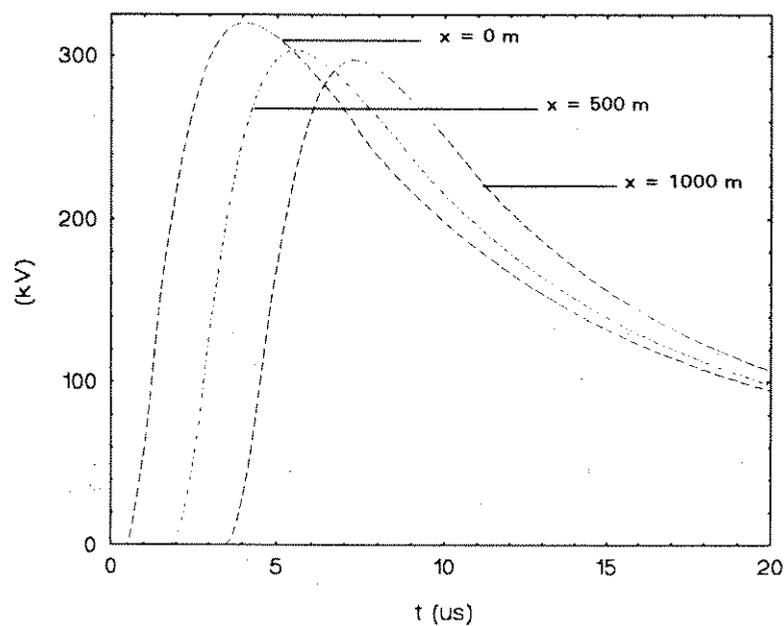
Caso 2A - Linha sem aterramento



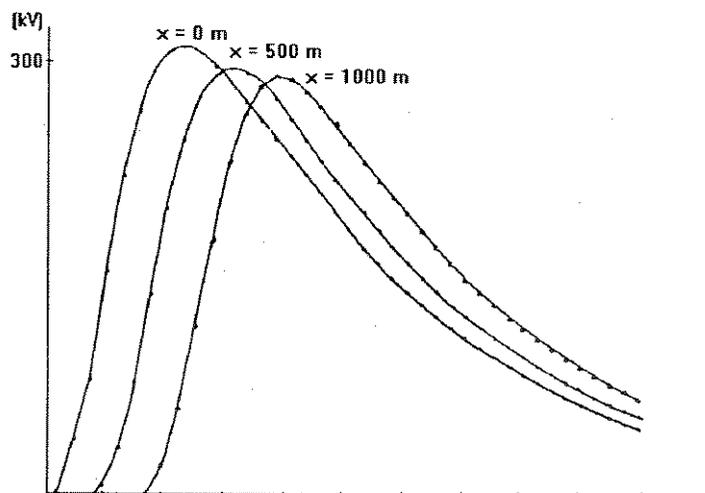
Caso 2B - Linha com aterramento

Figura III.14 - Configuração utilizada pelo Prof. Yokoyama - caso 2.

A figura III.15 apresenta o resultado da comparação entre os resultados obtidos com a metodologia do Prof. Yokoyama e a metodologia proposta nesta tese, para o caso 1, $R \rightarrow \infty$, $x = 0, 500$ e 1000 m.



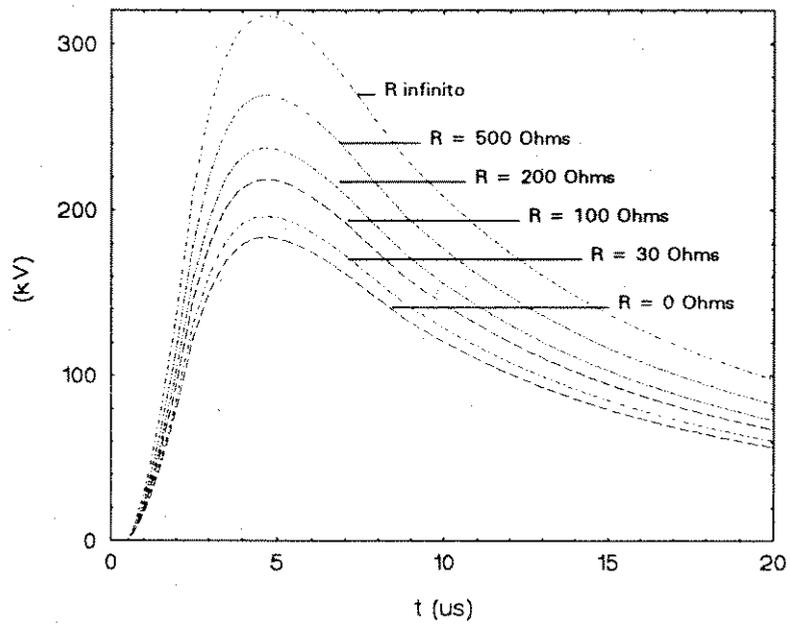
Tese



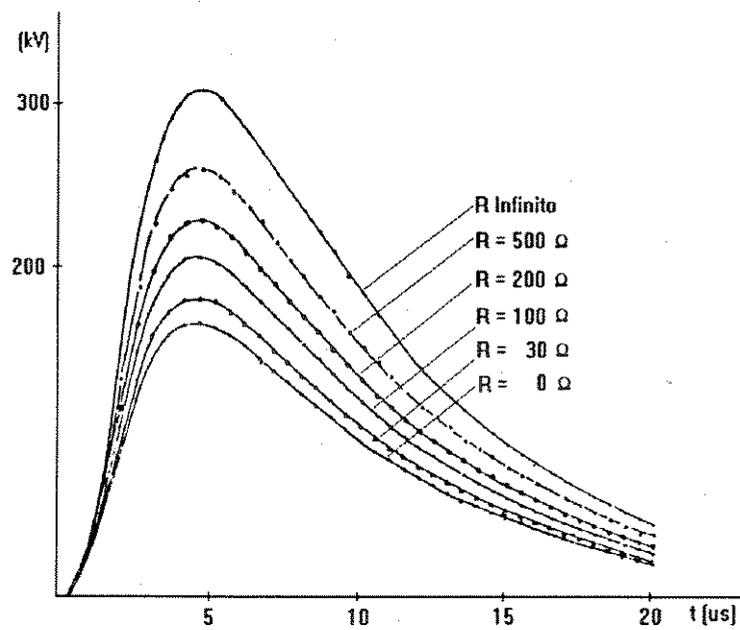
Yokoyama

Figura III.15 - Valores obtidos pelo autor e por Yokoyama para $x = 0, 500$ e 1000 m, caso 1.

A figura III.16 apresenta a comparação para o caso 1, tensão na fase, $R = 0, 30, 100, 200, 500$ e $\infty \Omega$.



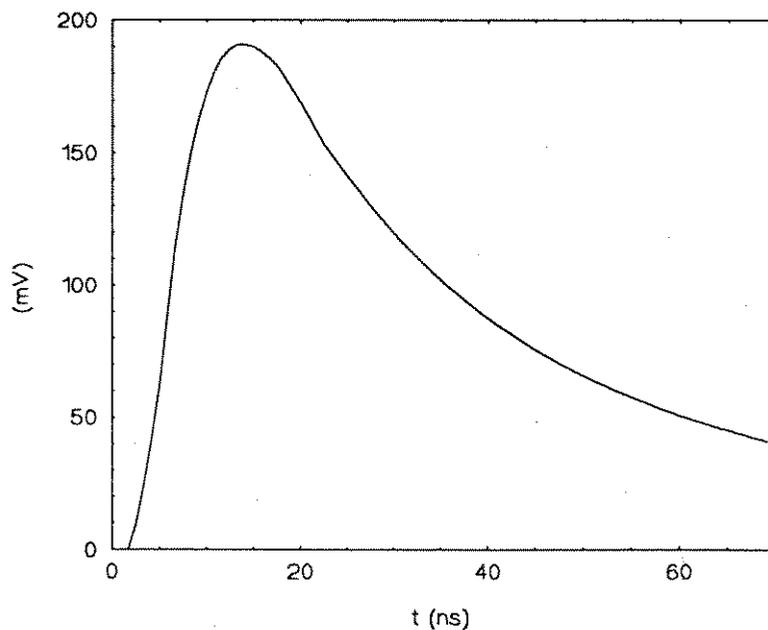
Tese



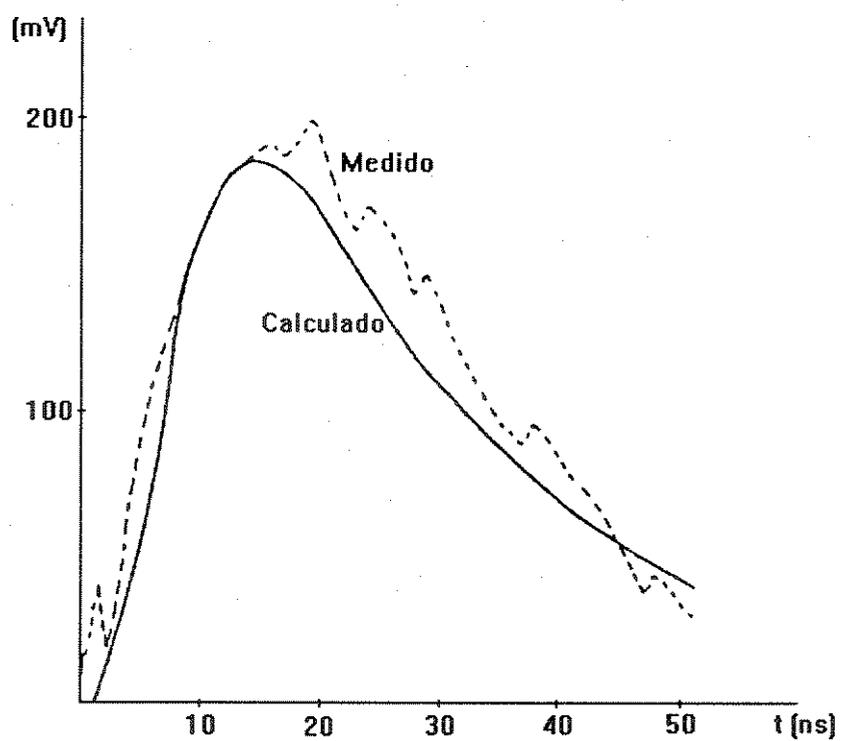
Yokoyama

Figura III.16 - Valores obtidos pelo autor e por Yokoyama para $R = 0, 30, 100, 200, 500$ e $\infty \Omega$, caso 1.

A figura III.17 apresenta a comparação para o caso 2A, tensão na fase.



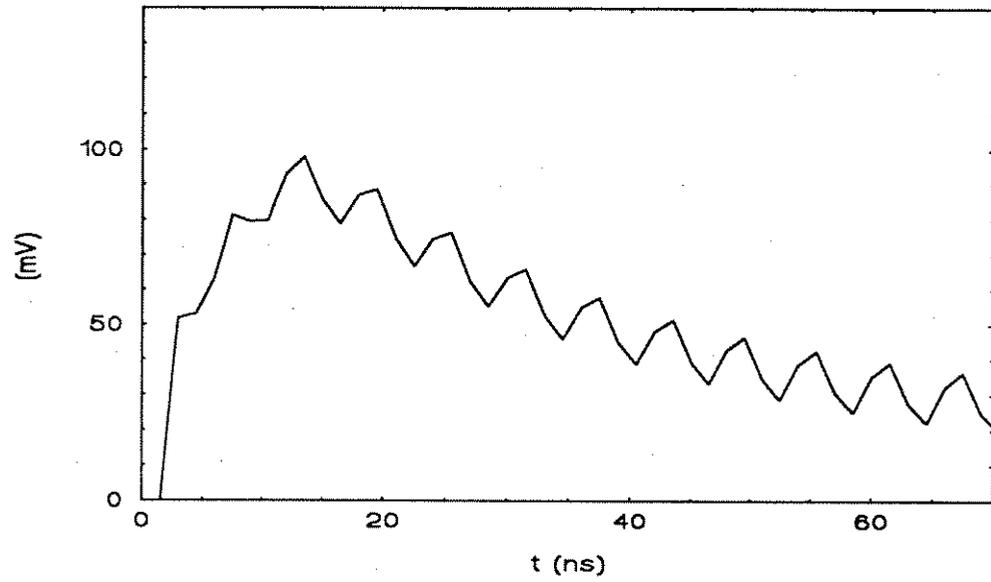
Tese



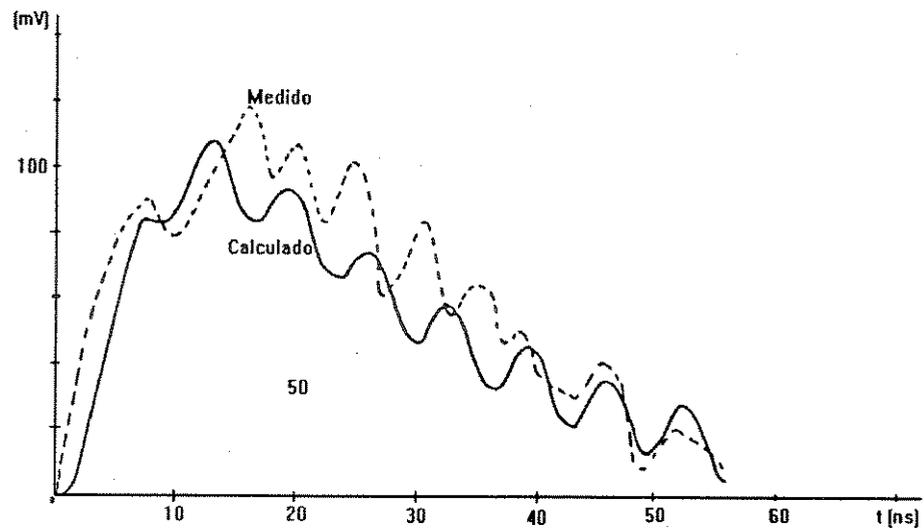
Yokoyama

Figura III.17 - Valores obtidos pelo autor e por Yokoyama, caso 2A.

A figura III.18 apresenta a comparação para o caso 2B, tensão na fase.



Tese



Yokoyama

Figura III.18 - Valores obtidos pelo autor e por Yokoyama , caso 2B.

As diferenças, que são muito pequenas, entre os valores calculados pelas duas metodologias são devidas à maneira de se representar a forma de onda da corrente de descarga, figura III.19.

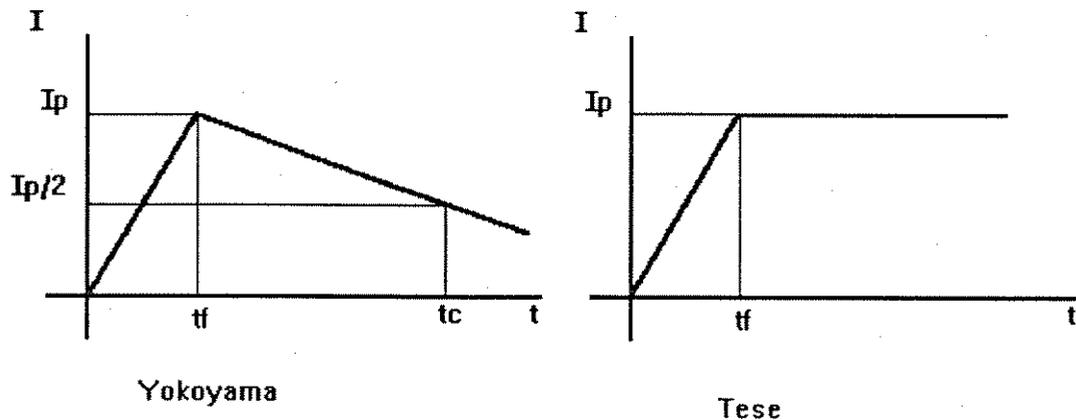


Figura III.19 - Formas de onda da corrente utilizadas por Yokoyama e pelo autor.

As duas teorias levam a resultados similares pois partiram da mesma base teórica (O Prof. Yokoyama certamente não concordaria com esta afirmação!). A metodologia proposta nesta tese tem a vantagem de ser mais simples e necessitar de menores tempo de processamento e capacidade de memória, pois a mesma utiliza como ponto de partida a expressão analítica deduzida por Rusck. A metodologia do Prof. Yokoyama parte dos valores dos campos incidentes na linha e calcula numericamente o valor da tensão induzida. Isto exige uma discretização muito grande da linha, demandando tempo e capacidade de memória. Porto, em sua dissertação de mestrado [31], implementou um programa similar ao do Prof. Yokoyama, obtendo resultados similares. Entretanto, a velocidade de processamento e a capacidade de memória

exigidos desestimularam o prosseguimento do estudo utilizando o método proposto por Yokoyama.

III.2 - Efeito dos parâmetros da linha e da descarga

São apresentados, a seguir, alguns resultados obtidos com o programa implementado.

São analisados a influência de:

- comprimento da linha;
- ponto de incidência da descarga;
- tensão ao longo da linha;
- efeito do aterramento de um dos condutores da linha;
- tempo de pico da corrente de descarga;
- valor de pico da corrente de descarga;
- instalação de pára-raios;
- distância entre os fios da linha.

O caso-base que será analisado tem as seguintes características:

Linha:

- altura do fio 1 (fase): 10 m;
- altura do fio 2 (neutro): 9 m;
- diâmetro dos condutores: 10 mm;
- comprimento da linha: 1,0 km;
- terminações: casadas;
- resistência de aterramento: "R";

Corrente de descarga:

- valor de pico: 100 kA;
- tempo de pico: 1,0 μ s;
- distância da descarga à linha: 100 m;

- velocidade da corrente: $0,3 \cdot 10^8$ m/s;

Pára-raios:

- tensão de disparo: 80 kV;

- tensão residual: 54 kV.

As figuras III.20 e III.21 ilustram o exposto.

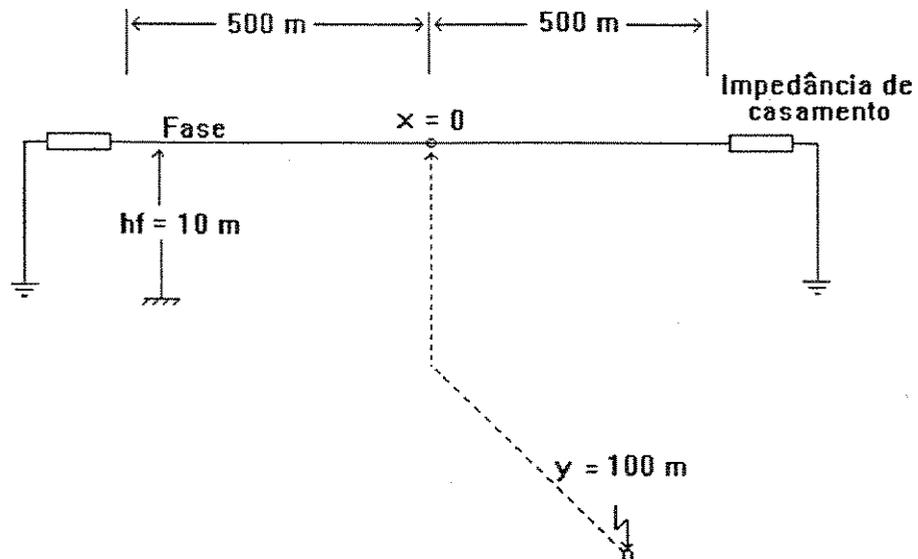


Figura III.20 - Configuração para as simulações apresentadas nas figuras III.22 a III.28.

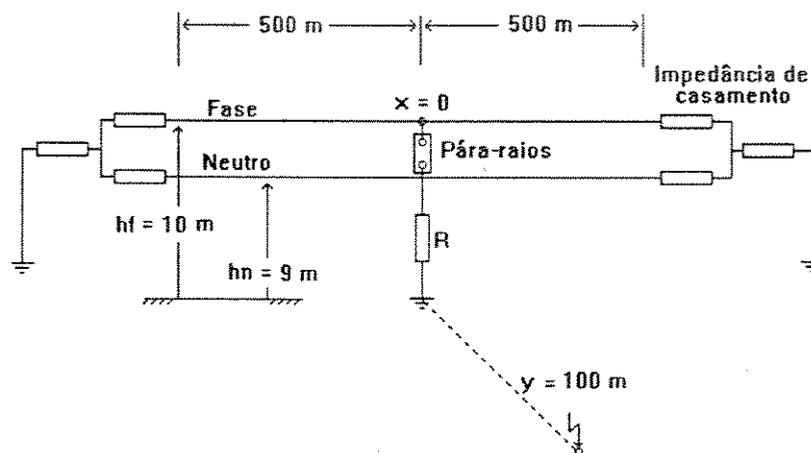


Figura III.21 - Configuração para as simulações apresentadas nas figuras III.29 a III.31.

As figuras III.21 a III.30 apresentam os resultados. As modificações em relação ao caso-base são indicadas na própria figura.

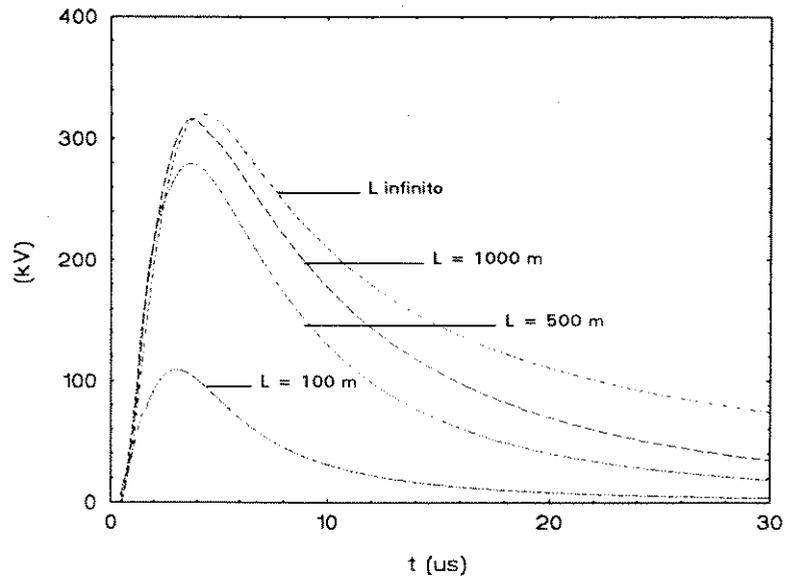


Figura III.22 - Efeito do comprimento da linha
L = 100, 500, 1000 m e infinito.

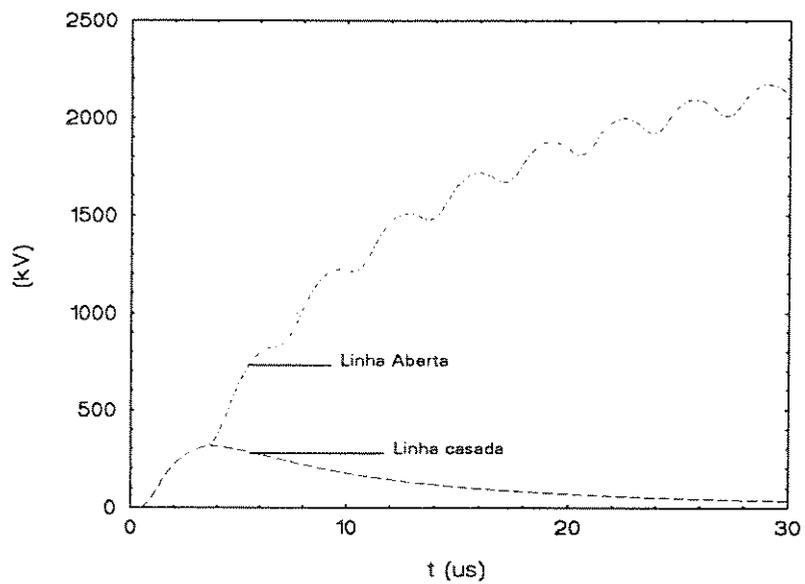


Figura III.23 - Efeito das terminações
Linha casada e linha aberta.

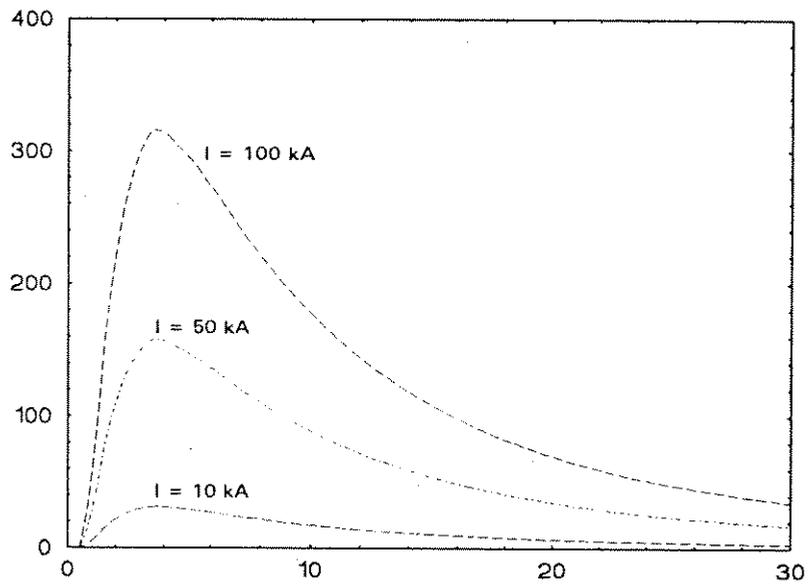


Figura III.24 - Efeito do valor de pico da corrente
 $I = 10, 50, 100 \text{ kA}$.

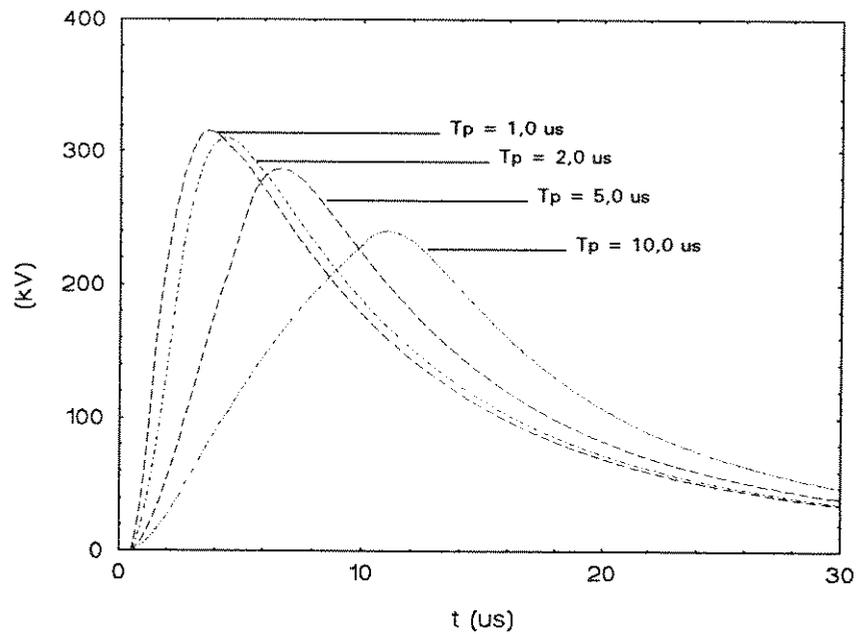


Figura III.25 - Efeito do tempo de pico da corrente
 $t_p = 1, 2, 5, 10 \text{ μs}$

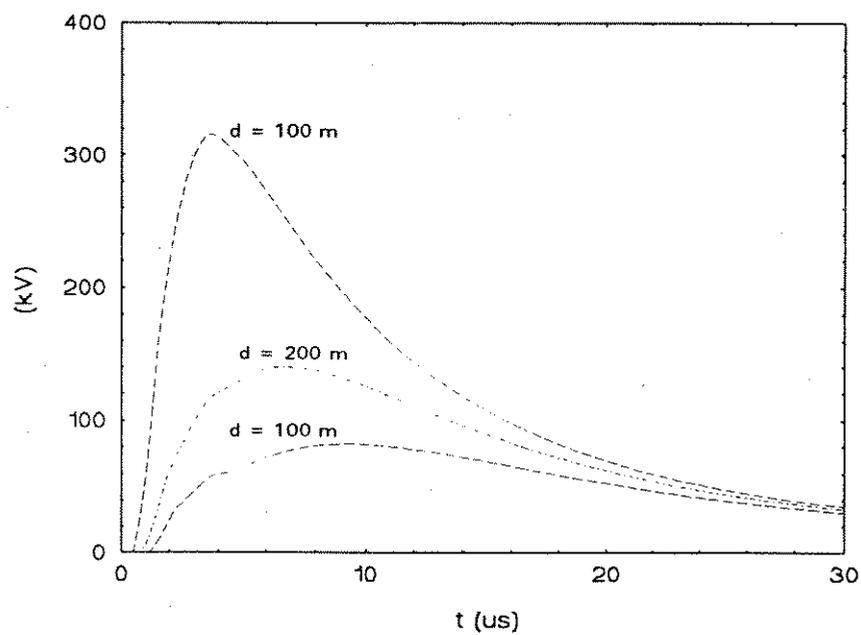


Figura III.26 - Efeito da distância da descarga à linha
 $d = 100, 200, 300\text{ m}$

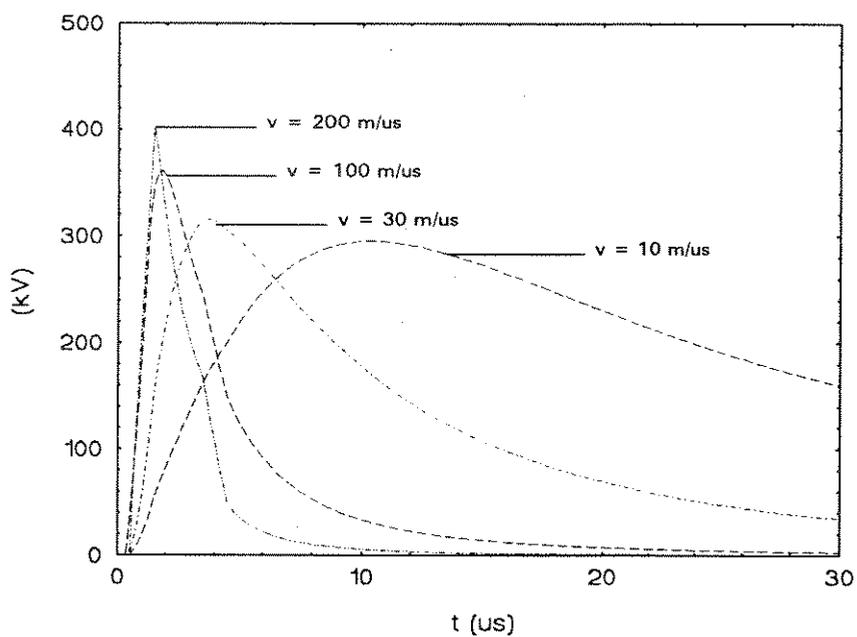


Figura III.27 - Efeito da velocidade da corrente
 $v = 10, 30, 100, 200\text{ m}/\mu\text{s}$

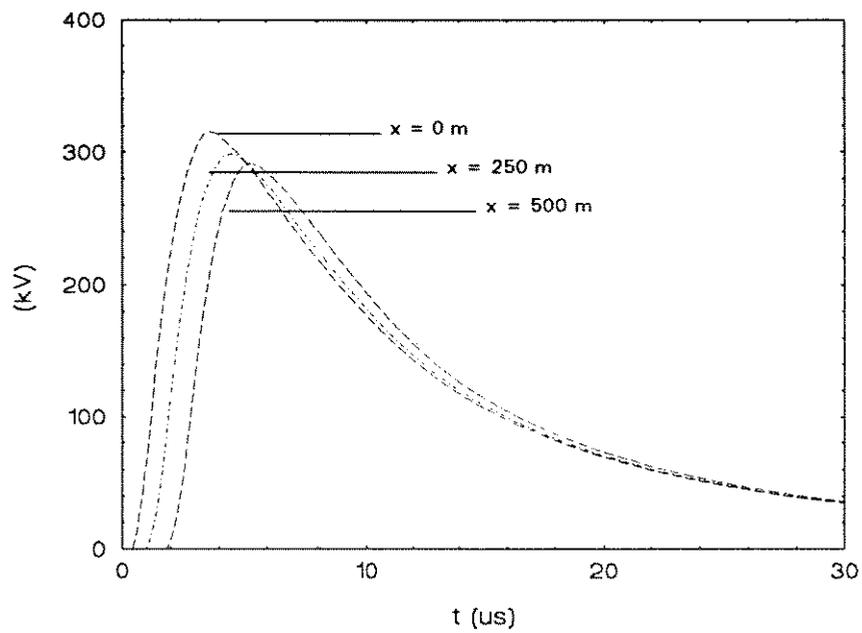


Figura III.28 - Tensão induzida ao longo da linha
 $X = 0, 250, 500$ m

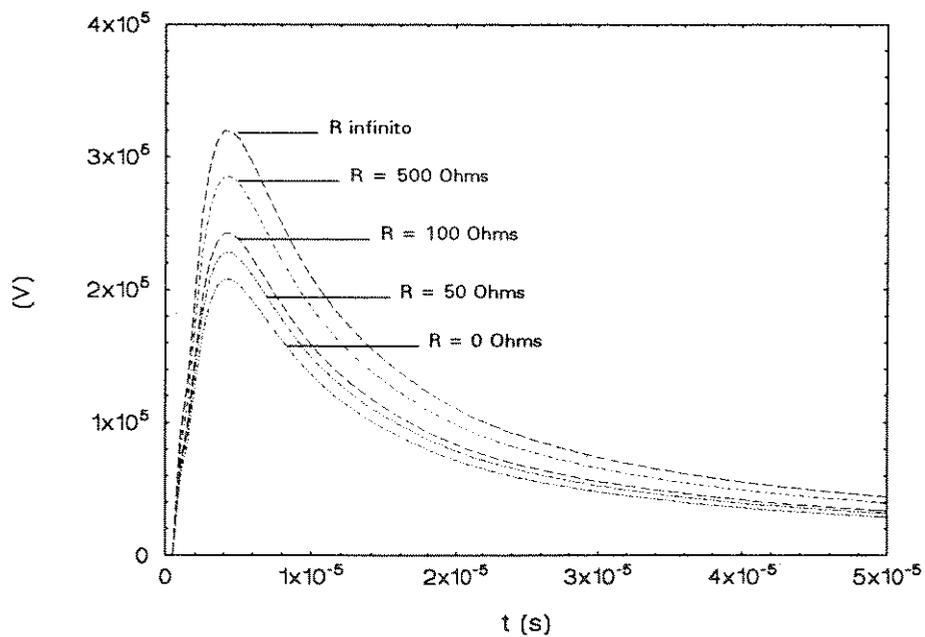


Figura III.29 - Efeito de um ponto de aterramento no neutro
 $X = 0$ m e $R = 0, 50, 100, 500, \infty \Omega$

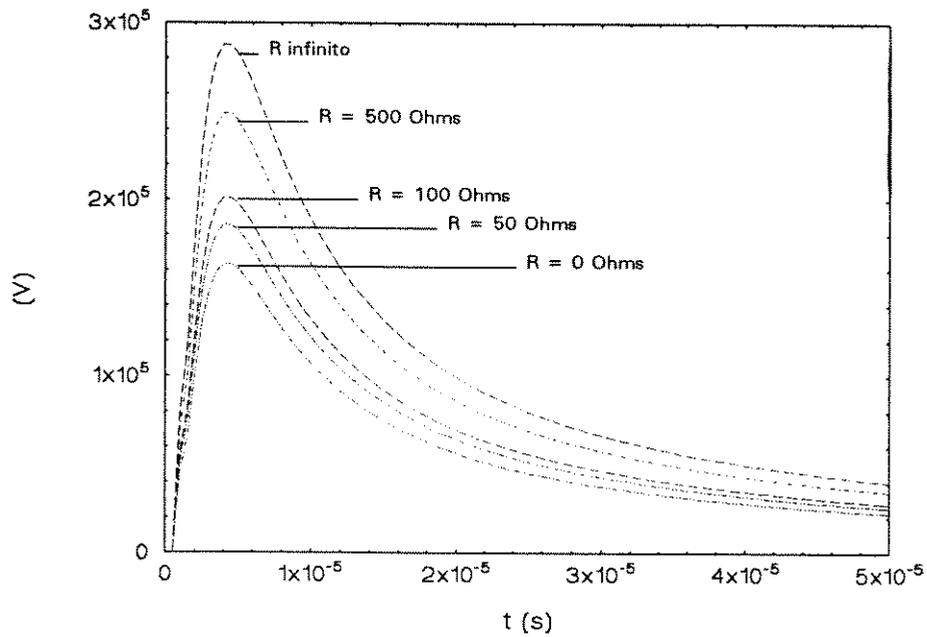


Figura III.30 - Efeito da colocação do neutro acima das fases (cabo pára-raios)

$h_f = 9$ m, $h_n = 10$ m, $R = 0, 50, 100, 500, \infty \Omega$.

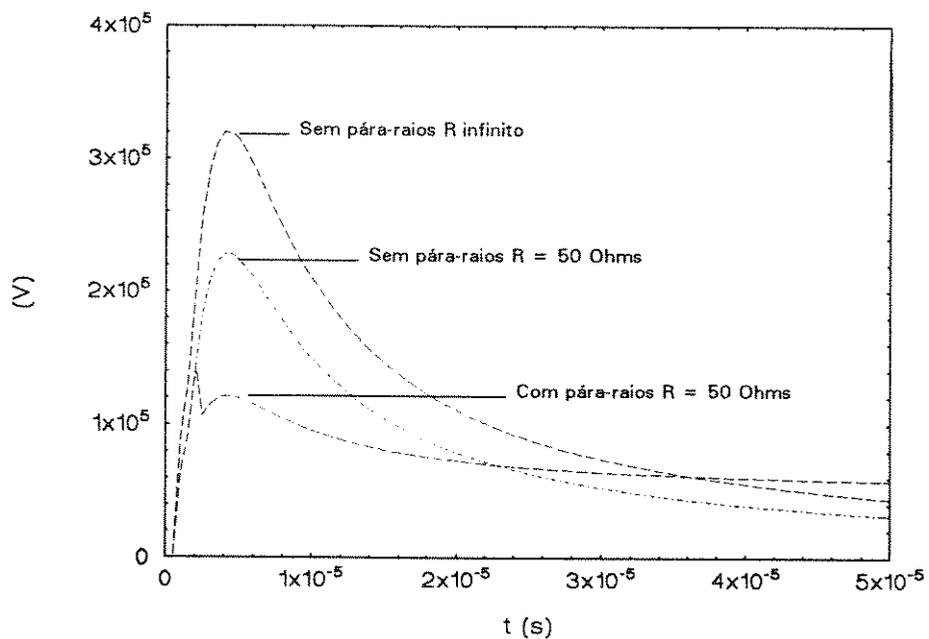


Figura III.31 - Efeito da instalação de um pára-raios $X = 0$, $R = 50 \Omega$

Capítulo IV - Programa probabilístico para cálculo de desempenho de redes

IV.1 - Introdução

J.G. Anderson [32] propôs uma metodologia baseada no Método de Monte Carlo, para o cálculo de desempenho de redes elétricas frente a descargas atmosféricas. Esta técnica, desde então, é exaustivamente utilizada para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão de alta e extra alta tensão.

Em 1980 [33] a equipe da África do Sul adaptou essa técnica para o cálculo de desempenho de redes de distribuição, com o objetivo de comparar uma metodologia de cálculo, proposta por eles e baseada na teoria de Rusck, com os resultados experimentais obtidos em uma linha de distribuição de 10 km de comprimento. Os resultados da comparação apresentaram erros da ordem de 100% [33].

Desde 1987 o autor desta tese vem tentando implementar um programa baseado na técnica proposta por Anderson para confrontar os dados medidos na África do Sul com dados calculados pela teoria de Rusck. Até 1990 os resultados sempre foram muito ruins, obtendo-se erros inaceitáveis. Em 1990 Starling [9], em uma dissertação de mestrado, utilizando um programa implementado por Lopes [7], obteve bons resultados. A comparação foi feita com os dados de medição obtidos na África do Sul durante os dois primeiros anos do projeto e eram referentes a uma linha de 10 km de comprimento com apenas condutores fase e com uma extremidade aberta e outra extremidade aterrada. A metodologia proposta por Starling não permitia a simulação de linhas multifilares e o tempo de processamento e capacidade de memória exigidos eram extremamente grandes (cerca de 20 horas de CPU-IBM 4341).

Apesar destas desvantagens o resultado obtido foi bom e serviu de incentivo para tentarmos a realização do trabalho aqui apresentado.

A adaptação do trabalho proposto por Anderson para redes de distribuição consiste na inclusão de uma rotina para cálculo de tensões induzidas. Isto se deve ao

fato de que em linhas de alta tensão o enfoque é dado aos efeitos das descargas diretas, uma vez que devido ao elevado valor do NBI (Nível Básico de Isolamento) das redes de alta tensão, as tensões induzidas não provocam sobretensões superiores ao valor do NBI das linhas.

O método proposto por Anderson foi utilizado, pelo autor, para a implementação de um programa probabilístico para cálculo de desempenho de redes de distribuição que, mesmo tendo apresentado erros muito elevados quando comparado com os valores medidos na África do Sul, foi adotado pela Companhia Energética de Minas Gerais SA-CEMIG [34]. Os erros que tal programa apresentou foram devidos à uma adaptação errônea da teoria de Rusck para linhas multifilares e não devido à rotina probabilística. Descreve-se a seguir a metodologia utilizada em 1987 que é a mesma adotada nesta tese.

IV.2 - Parâmetros das descargas

Um dado extremamente importante para a utilização do método proposto por Anderson é o conhecimento das funções distribuição de probabilidades dos parâmetros das descargas atmosféricas. Para o cálculo de tensões induzidas os parâmetros mais importantes são o tempo de pico, o valor de pico da corrente, o número de descargas subsequentes e os parâmetros das descargas subsequentes.

Vários levantamentos estatísticos, baseados em medições foram propostos. O grupo de medições mais consistente foi o feito por Berger no Monte Salvatore, na fronteira da Itália com a Suíça [14]. Os dados utilizados nessa tese são os propostos em [32] e que são uma média dos valores medidos ao redor do mundo. O ideal seria utilizar-se dados medidos na África do Sul para a execução da comparação no capítulo V e dados brasileiros para as simulações apresentadas no capítulo VI. Apesar de, tanto na África do Sul como no Brasil estarem, sendo realizadas medições de parâmetros de descargas atmosféricas [33], os dados obtidos ainda não são suficientes para a composição de uma distribuição estatística.

Alguns questionamentos já foram apresentados a respeito da forma como tais dados foram obtidos. Rüdénberg em [37] questiona o fato dos valores terem sido obtidos em medições efetuadas em torres elevadas, pois a maioria das medições utilizaram torres de altura próxima de 60 m. Rüdénberg alega que a torre influenciaria o fenômeno da descarga atmosférica de modo a alterar o valor e a forma de onda, ou seja, uma descarga que incide diretamente no solo teria valores diferentes caso incidisse numa torre de 60 m de altura. Na falta de outros dados utilizaremos os dados internacionalmente aceitos.

A tabela IV.1 e a figura IV.1 mostram os dados que serão utilizados neste estudo (apenas correntes de polaridade negativa).

Frequência (%)	Número de componentes	Valor de pico (kA)		Tempo de pico (μ s)	
		Primeira descarga	Subsequente	Primeira descarga	Subsequente
1	1	4	1	1	0,2
10	1	12	5	2	0,4
20	1	19	8	3	0,6
30	1	25	10	5	1,0
40	1	30	12	6	1,2
50	1	34	13	7	1,4
60	2	39	15	8	1,6
70	4	43	17	8	1,6
80	5	50	20	10	2,0
90	7	66	26	11	2,3
99	8	102	40	30	6,0
100	15	200	80	40	8,0

Tabela IV.1 - Funções Distribuição de Probabilidades dos parâmetros da descarga atmosférica.

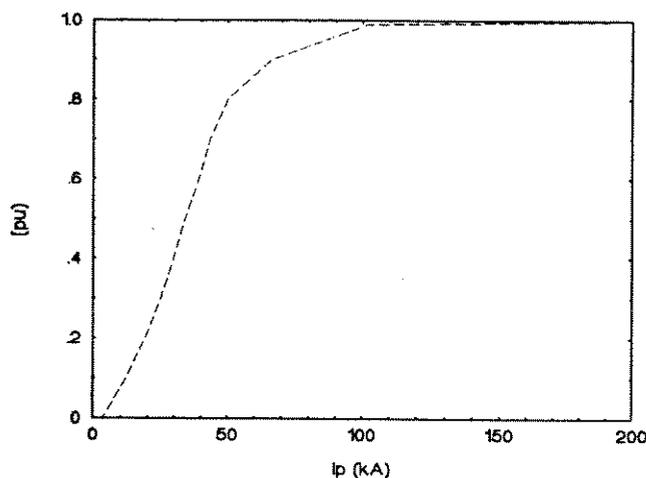


Figura IV.1 - Curva Função Distribuição de Probabilidade para o valor de pico da primeira descarga.

IV.3 - Programa para cálculo de desempenho de redes

O programa computacional descrito no Capítulo II permite que, a partir do conhecimento dos parâmetros da descarga atmosférica, da localização da descarga em relação a linha e dos parâmetros da linha, se calculem os valores das tensões induzidas ao longo da linha. A determinação do desempenho de uma determinada linha de distribuição frente a descargas atmosféricas, significa neste estudo, a determinação do número de sobretensões acima do nível de isolamento da linha, em um determinado período de tempo. A partir desse número é possível estimar o número de desligamentos nesta linha no período de tempo estipulado. A idéia básica do programa implementado é, a partir da configuração da linha, estimar o número médio de desligamentos anuais da referida linha.

Conforme dado no item II.2 o valor máximo da tensão induzida é aproximadamente igual a:

$$V = 30.I.h / y \quad (IV.1)$$

Para que uma sobretensão exceda um certo valor, por exemplo o nível de isolamento V_0 , para uma corrente de valor I_0 , é necessário que Y seja menor que:

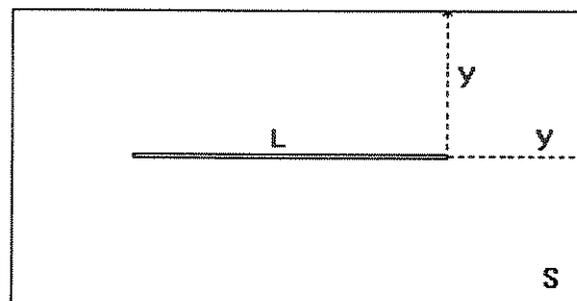
$$y \leq 30 \cdot I_0 \cdot h / V_0 \quad (\text{IV.2})$$

Na tabela IV.1 vemos que correntes de descarga com valor de pico acima de 100 kA tem apenas 1% de probabilidade de ocorrência.

Assim, se uma linha de 10 m de altura, tem um nível de isolamento de 100 kV, a distância máxima para a ocorrência de uma sobretensão acima de 100 kV é:

$$100 = 30 \cdot 100 \cdot 10 / y \quad \text{ou:} \quad y = 300 \text{ m} \quad (\text{IV.3})$$

Compondo-se esta distância com o comprimento da linha, pode-se definir uma área "s", mostrada na figura IV.2.



L - Comprimento da linha

y - Distância de interesse

Figura IV.2 - Área de interesse.

Somente descargas que caírem dentro da área "s" tem probabilidade diferente de zero de provocar uma sobretensão induzida de valor acima do nível de isolamento da linha.

A partir da área "s" e da densidade de descargas para a terra, é possível a determinação do número de descargas que caem na área "s" por ano. A partir do nível cerâmico de uma dada região, ou a partir de medições diretas, é possível a determinação da densidade anual de descargas para a terra [14].

Se fosse possível determinar a localização de cada descarga e os principais parâmetros da mesma, a partir do programa descrito no Capítulo II, seria possível calcular os valores de tensão induzida e fazer uma estimativa bastante razoável do número de desligamentos anuais da rede de distribuição. Esta determinação não pode ser feita de maneira determinística, mas através de uma abordagem probabilística [32].

Foram desenvolvidos algoritmos que geram sequências de descargas, localizam aleatoriamente o ponto de incidência de cada uma delas e a partir das distribuições estatísticas de dados experimentais, atribuem valores para o valor de pico e o tempo de pico da corrente. A seguir são descritos os algoritmos implementados.

IV.4 - Determinação do número de descargas anuais

A partir da densidade de descargas para a terra e a partir da área "s" de influência da linha, determinada no item IV.3, calcula-se o número de descargas anuais com probabilidade de originar uma sobretensão acima do nível pré-estabelecido.

Sabemos que toda estrutura elevada tem o "poder de atrair descargas atmosféricas" [14]. Isso significa que descargas que iriam cair muito próximo da rede, serão "atraídas" pela linha e se tornarão uma descarga direta. O raio de atração da linha foi tomado como o proposto em [10] e dado por:

$$r_a = 14.h^{0,6} \quad (IV.4)$$

Para uma linha de 10 m de altura, teremos $r_a = 50$ m, ou seja, toda descarga que incidir a menos de 50 m da linha será considerada como uma descarga direta. A figura IV.3 ilustra o exposto.

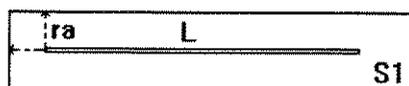


Figura IV.3 - Área de interesse para descargas diretas.

Todos os raios que caírem dentro da área "s₁" serão considerados descargas diretas.

IV.5 - Caracterização das descargas

Uma vez estabelecido o número de descargas anuais, resta caracterizar os parâmetros de cada uma delas. Neste caso, os parâmetros são:

- A localização do ponto de incidência da descarga em relação à linha;
- O valor de pico da primeira descarga;
- O tempo de pico da primeira descarga;
- O número de descargas subsequentes;
- O valor de pico e o tempo de pico para cada descarga subsequente.

IV.5.1 - O ponto de incidência

Considerando-se que não exista nenhuma preferência para a localização do ponto de incidência, pode-se pensar em atribuir uma localização aleatória a este ponto. O algoritmo computacional implementado gera uma sequência aleatória para as coordenadas do ponto de incidência, ponto esse localizado na área "s". Se o ponto for dentro da área "s₁" a descarga será considerada como uma descarga direta, Fig.IV.4.

A geração aleatória dos pontos de incidência é feita por meio de um gerador de números aleatórios que gera números entre 0 e 1 [38].

Adotando-se um sistema de coordenadas como o mostrado na figura IV.4, pode-se definir os valores X_{\max} e Y_{\max} .

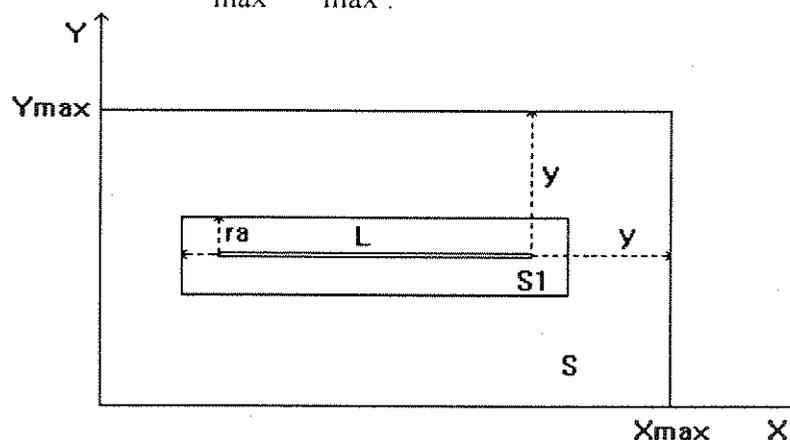


Figura IV.4 - Áreas de interesse.

As coordenadas do ponto de incidência de uma descarga serão dadas por:

$$X = X_{\max} \cdot NA(1) \quad (IV.5)$$

$$Y = Y_{\max} \cdot NA(2) \quad (IV.6)$$

NA(1) e NA(2) são dois números aleatórios entre 0 e 1, o que garante que os valores "X" e "Y" sempre estarão dentro da área "s".

IV.5.2 - Os parâmetros das descargas

De posse da função distribuição de probabilidade para o valor de pico da primeira descarga, o algoritmo implementado permite gerar os valores dos parâmetros da descarga. O método consiste basicamente na geração de um número aleatório, NA, entre 0 e 1 e a partir do valor deste número aplicado no eixo das ordenadas da curva 1 da figura IV.1, obter o valor de pico da corrente [32]. Isto significa que os parâmetros das descargas são selecionados de forma aleatória, de suas distribuições probabilísticas. Os demais parâmetros são determinados da mesma forma. A figura IV.5 ilustra o exposto.

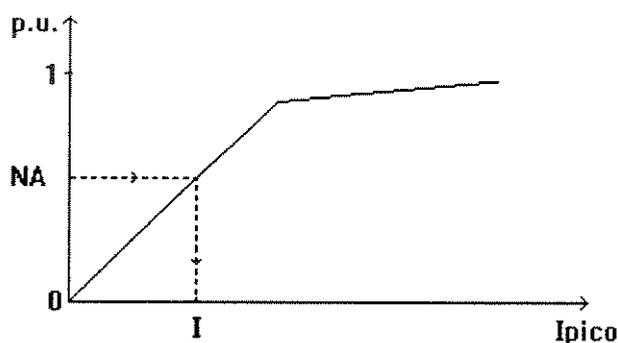


Figura IV.5 - Determinação do valor de pico da primeira descarga.

Neste estudo considera-se que o valor de pico da corrente e o tempo de pico são variáveis aleatórias não correlacionadas. Apesar de ser bastante lógico supor uma correlação entre tempo e valor de pico, os dados obtidos nas medições realizadas até hoje não permitem estabelecer, com segurança, uma correlação [14].

IV.5.3 - O número de anos de simulação

O método apresentado é tanto mais preciso quanto maior for o número de descargas simuladas [32]. O número total de descargas simuladas é função do número de descargas anuais e do número de anos de simulação. A experiência adquirida na utilização do programa indica que um período de simulação de cerca de 50 anos é suficiente para a simulação de linhas em regiões com densidade de descargas de cerca de 5 descargas por quilômetro quadrado por ano. O programa simula o número de anos escolhido e apresenta como resultado valores médios anuais.

IV.6 - Entrada / Saída de dados

O programa foi implementado em uma estação de trabalho HP e tem como entrada de dados :

- a- Densidade anual de descargas para a terra;
- b- Parâmetros da linha;
- c- Parâmetros dos aterramentos;
- d- Parâmetros dos protetores;
- e- Valor mínimo de tensão induzida a ser computado;
- f- Período de simulação (anos).

Como dados de saída, o programa apresenta os valores médios anuais de tensões induzidas, acima de valores previamente estabelecidos e o número anual de descargas diretas na linha. São apresentados os valores de tensão de cada fio para a terra e também as diferenças de tensão entre os fios da linha simulada.

Capítulo V - Comparação com dados experimentais da África do Sul

V.1 - O projeto da África do Sul

O fraco desempenho das redes de distribuição rurais, conjuntamente com uma elevada taxa de falhas de pára-raios e transformadores, deu início, na África do Sul, a um projeto de pesquisas em 1972 [33]. Foi construída uma linha de distribuição de 10 km de comprimento onde, ao longo dos anos, foram efetuadas uma série de medições de sobretensões impostas por descargas atmosféricas. Medidores foram instalados em alguns pontos da linha e equipamento fotográfico e de filmagem foram instalados nas proximidades da linha. O projeto, ainda em andamento, é financiado pela ESKON (maior concessionária de energia elétrica da África do Sul) e pelo CSIR (espécie de CNPq sul-africano) [10].

H. Geldenhuys apresenta em [10] um boa e sucinta descrição do projeto e dos resultados obtidos. O texto a seguir é uma tradução livre dos comentários do Eng. Geldenhuys, atual coordenador do projeto de pesquisas:

"... Uma linha de 10 km de comprimento foi construída e monitorada sob diferentes condições durante sucessivas estações chuvosas, que duram de outubro a abril. A linha experimental é uma linha de postes de madeira de aproximadamente 8 metros de altura, com cruzetas horizontais e condutores fase espaçados de 1.05 m. Um cabo de aterramento foi enterrado junto à base de cada poste quando da instalação dos postes. Um cabo pára-raios foi instalado na linha em uma das etapas do projeto a uma altura de 9,27 m (1,27 acima das fases). Para o aterramento do cabo pára-raios foi utilizado o cabo de aterramento enterrado junto à base do poste. Durante os dois primeiros anos de operação (1978 a 1980) a linha foi utilizada desenergizada e uma das extremidades da mesma foi aterrada com um baixo valor de resistência (2 Ohms) e a outra extremidade foi deixada em aberto. Esta primeira fase do projeto visava o estudo das tensões induzidas e o estudo das descargas diretas. Nessa fase do projeto a linha tinha uma tensão suportável de

impulso atmosférico de valor superior a 500 kV. De 1982 a 1987 foram feitas uma série de experiências com pára-raios, tanto convencionais quanto de óxido de zinco. Concentrou-se muita atenção nos valores de corrente que circulavam pelo pára-raios. As experiências com cabos pára-raios foram iniciadas em 1987. Inicialmente o cabo pára-raios foi aterrado a cada 9 postes (900 m), depois a cada 3 postes (300 m) e finalmente em todo poste (100 m). A principal ênfase deste estudo foi sobre o efeito do cabo pára-raios no valor das tensões induzidas. O valor médio da resistência de aterramento dos postes era igual a 100 Ohms e o valor suportável de tensão de impulso atmosférico das estruturas (onda de polaridade negativa) era igual a 150 kV. Para a medição das tensões induzidas foi instalada uma central de medição localizada a 4,5 km do início da linha.

Durante os 11 anos de estudos, 81 descargas diretas foram medidas e 2015 sobretensões induzidas foram registradas. A densidade média de descargas para a terra, medida com um contador CIGRÊ 10 kHz, foi de 6,74 descargas por quilômetro quadrado por ano com uma média de 65 tempestades por ano ...".

Os dados apresentados na ref. [10] são curvas "ajustadas" a partir dos valores medidos. Em contato pessoal com o Eng. Geldenhuys, obteve-se acesso aos dados efetivamente medidos e os mesmos são apresentados a seguir. Os dados foram normalizados para uma linha de comprimento igual a 1,0 km e uma densidade de descargas para a terra de 1,0 descarga por quilômetro quadrado por ano.

A figuras V.1 e V.2 apresentam os dados relativos ao período 1978 / 80, onde a linha não tinha cabo pára-raios e tinha uma extremidade aberta e outra extremidade aterrada. A figura V.1 apresenta os valores de tensão induzida pela primeira descarga e a figura V.2 apresenta os valores de tensão induzida pela primeira descarga e pelas descargas subsequentes. Estas curvas apresentam dados referentes a 281 medições.

A figura V.3 apresenta os dados obtidos no período 1987 / 89 quando foi instalado um cabo pára-raios na linha. São apresentados os valores de tensão induzida nas fases para o caso do cabo pára-raios aterrado com distância entre pontos de aterramento de 900 m (65 medições).

As fases continuaram abertas em uma das extremidades da linha e aterradas na outra extremidade.

Pode-se notar que o número de medições no caso da linha sem cabo pára-raios é bem maior, o que em princípio, significa que esses dados são mais confiáveis que os dados obtidos nas medições com cabo pára-raios.

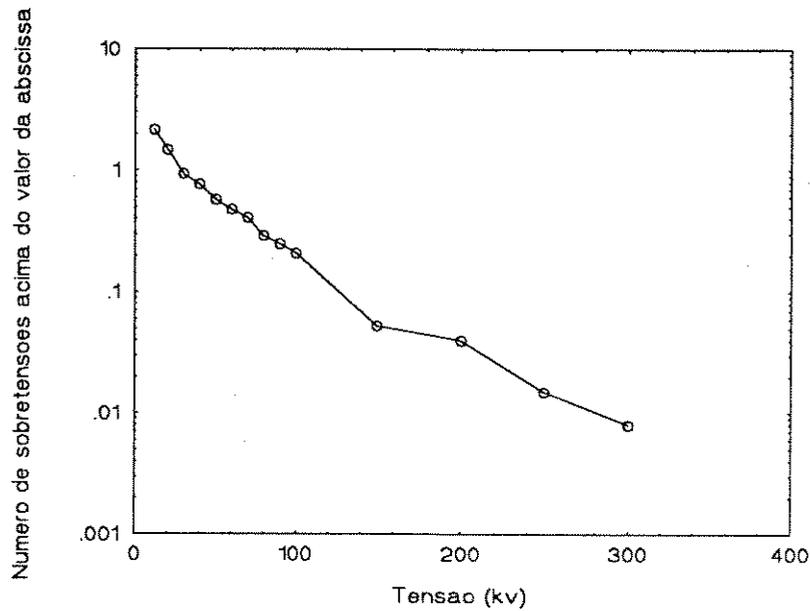


Figura V.1 - Tensões induzidas pela primeira descarga.

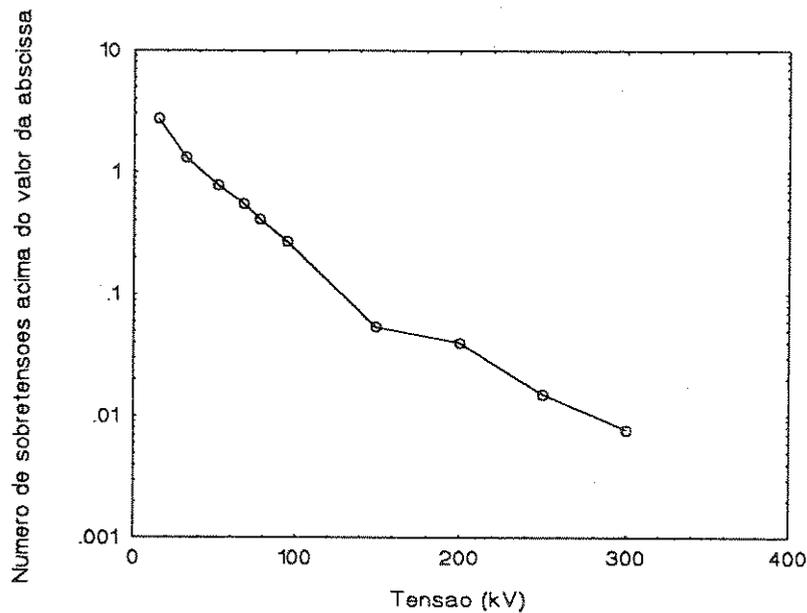


Figura V.2 - Tensões induzidas pela primeira descarga e pelas descargas subsequentes.

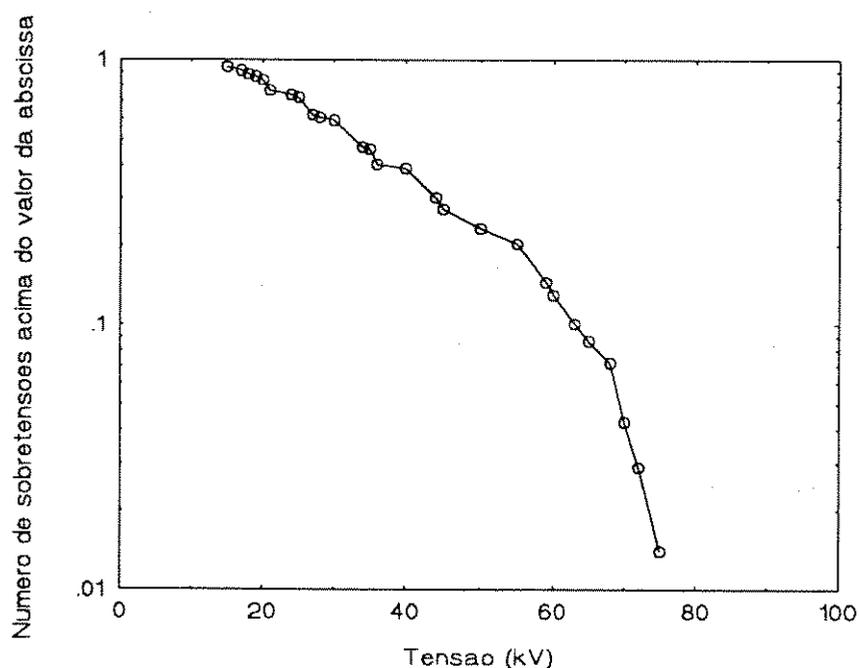


Figura V.3 - Tensões induzidas pela primeira descarga na linha com cabo pára-raios.

Para os casos apresentados nas figuras V.1, V.2 e V.3 o número de descargas diretas foi de 0,11 descargas por ano.

Um dado importante foi a determinação experimental do raio de atração da linha que foi de 50 metros [16].

V.2 - Resultados das simulações

V.2.1 - Comparação com formas de onda

Além dos dados estatísticos sobre os valores de tensão induzida, foram obtidos através do Eng. Geldenhuys, dois oscilogramas com formas de onda de tensões induzidas na linha experimental. Nada se conhece sobre os parâmetros das descargas que induziram tais tensões, a não ser a localização das descargas em relação a linha. Um dos oscilogramas é de uma descarga que incidiu perto da extremidade aterrada da

linha (figura V.4) e o outro é de uma descarga que incidiu perto da extremidade aberta da linha (figura V.4).

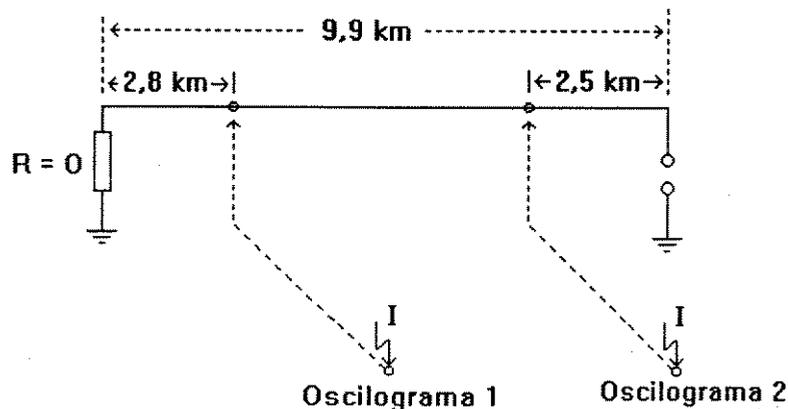


Figura V.4 - Localização das descargas em relação à linha.

As simulações computacionais foram feitas utilizando-se os seguintes parâmetros para as correntes de descarga atmosférica:

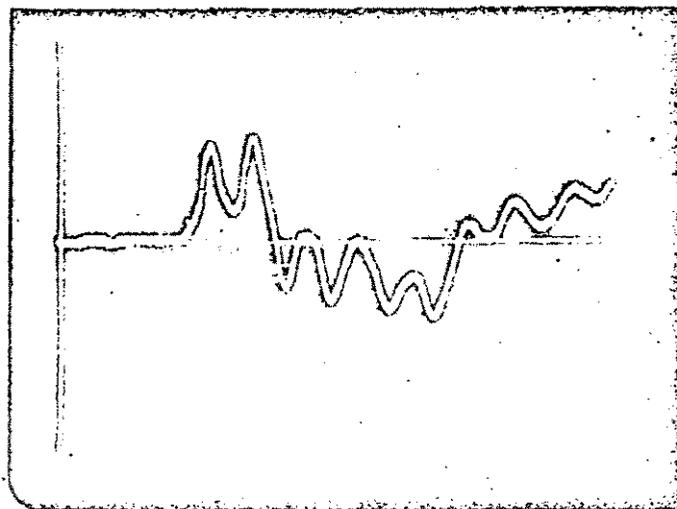
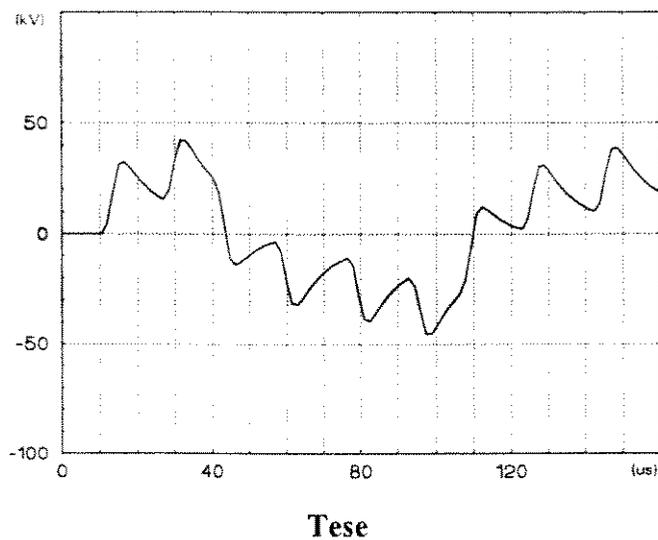
Oscilograma 1:

- valor de pico: 34 kA;
- tempo de pico: 3,0 μ s;
- velocidade da corrente: 70 m/ μ s;
- distância da descarga à linha: 250 m;

Oscilograma 2:

- valor de pico: 34 kA;
- tempo de pico: 3,0 μ s;
- velocidade da corrente: 70 m/ μ s;
- distância da descarga à linha: 500 m.

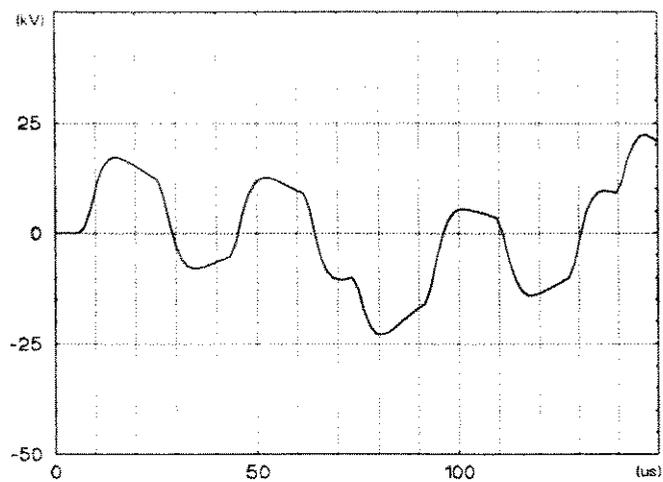
Os resultados das simulações, bem como os oscilogramas medidos são apresentados nas figuras V.5 e V.6.



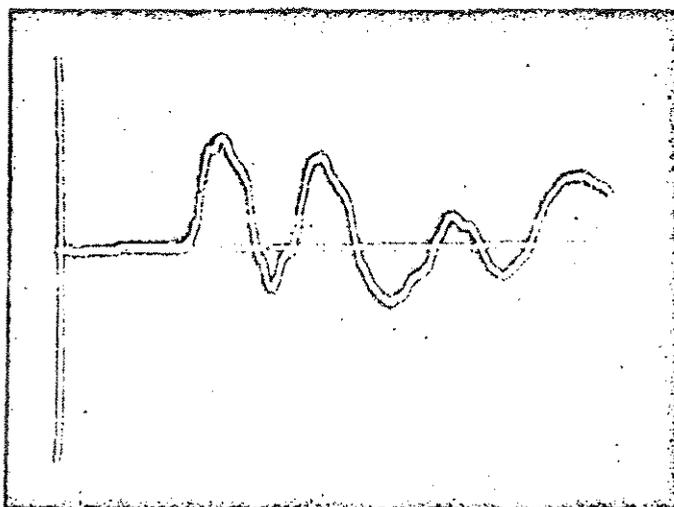
200 us/div

Oscilograma 1

Figura V.5 - Valores medidos e calculados, oscilograma 1.



Tese



200 us sweep

Oscilograma 2

Figura V.6 - Valores medidos e calculados, oscilograma 2.

As diferenças entre as formas de onda medidas e calculadas são devido ao não conhecimento dos parâmetros das descargas. Além disto o programa computacional utilizado não considera as perdas na linha. Podendo-se notar que as formas de onda medidas são atenuadas ao longo do tempo o que não acontece com as formas de onda calculadas.

Apesar dos parâmetros das descargas terem sido estimados, considerou-se satisfatório o resultado obtido nas comparações.

V.2.2 - Simulações probabilísticas

Utilizando o programa descrito no capítulo III foram realizadas algumas simulações com o objetivo de confrontar os resultados obtidos nas simulações com os valores medidos. Foram utilizadas as curvas de distribuição de probabilidade apresentadas no capítulo IV, os dados da linha da África do Sul, a densidade de descargas medida e o raio de atração também medido:

-Densidade de descargas para a terra : $N_g = 6,5$ descargas / km^2 / ano;

-Raio de atração da linha: 50 m.

Foram simulados 50 anos, com um intervalo de cálculo de $0,25 \mu\text{s}$, e as curvas apresentam valores médios anuais, normalizados para 1,0 km de linha e uma densidade igual a 1,0 descarga / km^2 / ano. A figura V.7 apresenta a comparação entre valores calculados e medidos para o caso da linha sem cabo pára-raios e para apenas a primeira descarga e a figura V.8 apresenta os resultados para a primeira descarga e para as descargas subsequentes. A figura V.9 apresenta a comparação para o caso da linha com cabo pára-raios.

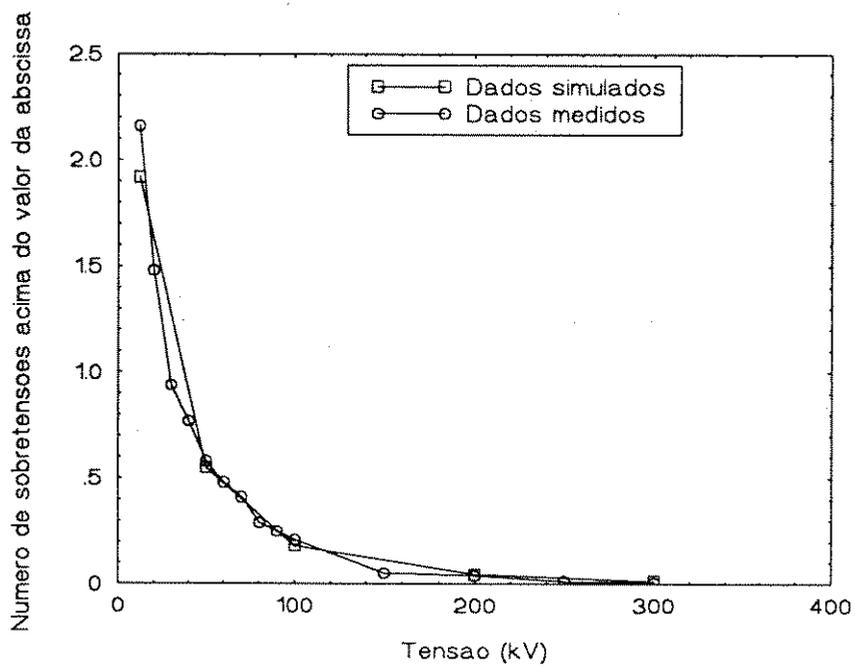


Figura V.7 - Valores medidos e calculados para a primeira descarga.

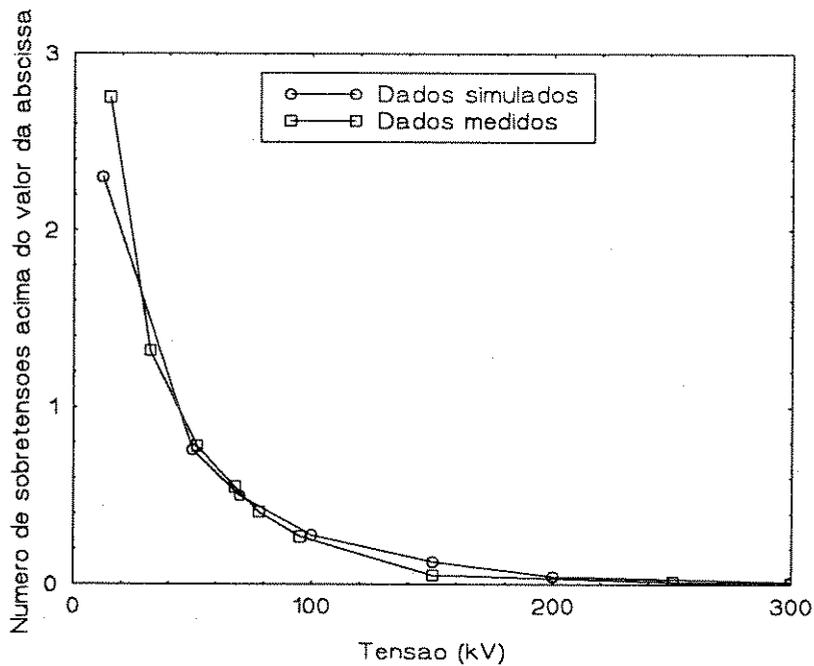


Figura V.8 - Valores medidos e calculados para a primeira descarga e para as descargas subsequentes.

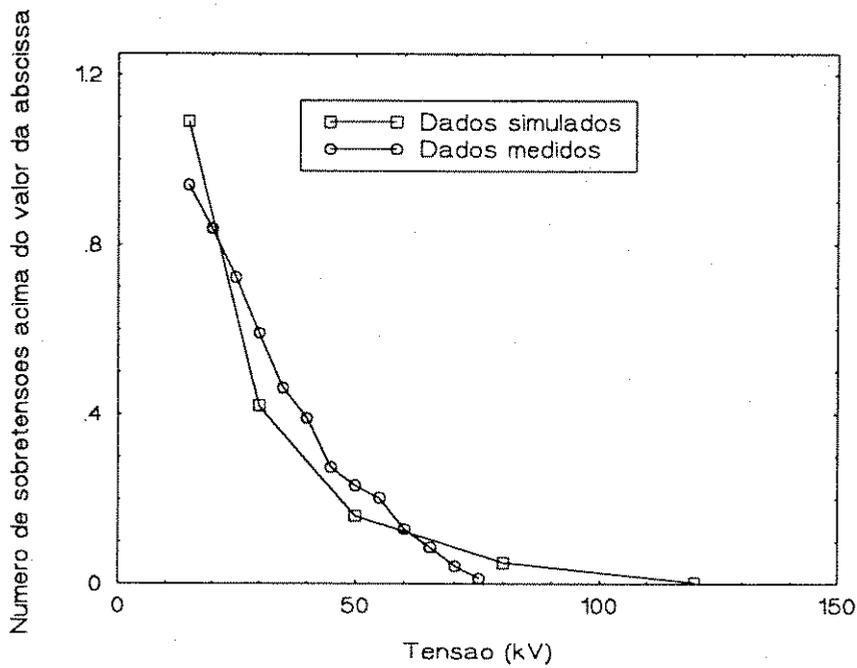


Figura V.9 - Valores medidos e calculados para a linha com cabo pára-raios.

A seguir nas figuras V.10, V.11 e V.12 são apresentados os mesmos resultados das curvas V.7, V.8 e V.9 mas com uma escala logarítmica no eixo "y" para que as diferenças fiquem bem acentuadas.

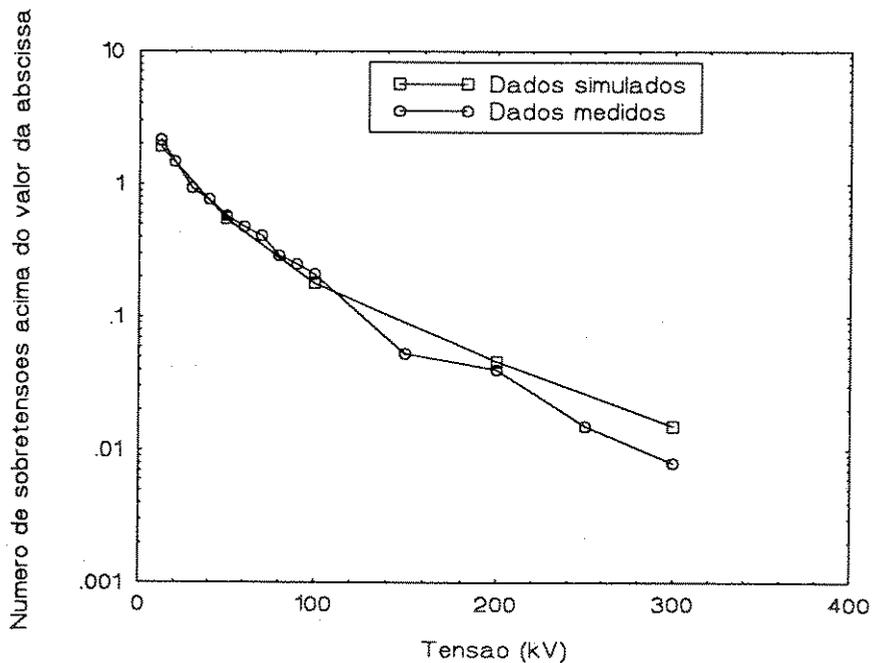


Figura V.10 - Valores medidos e calculados para primeira descarga.

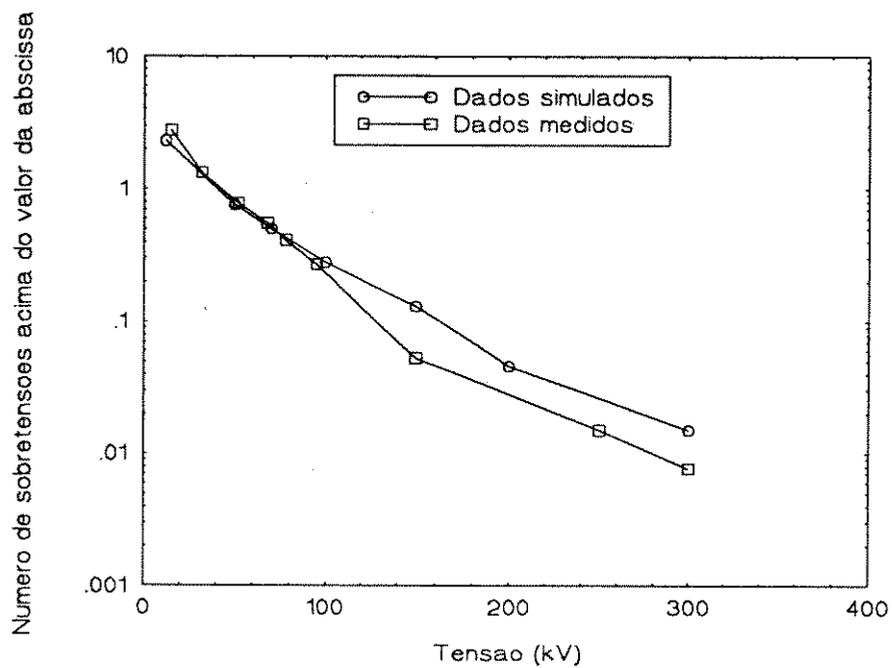


Figura V.11 - Valores medidos e calculados para a primeira descarga e para as descargas subsequentes.

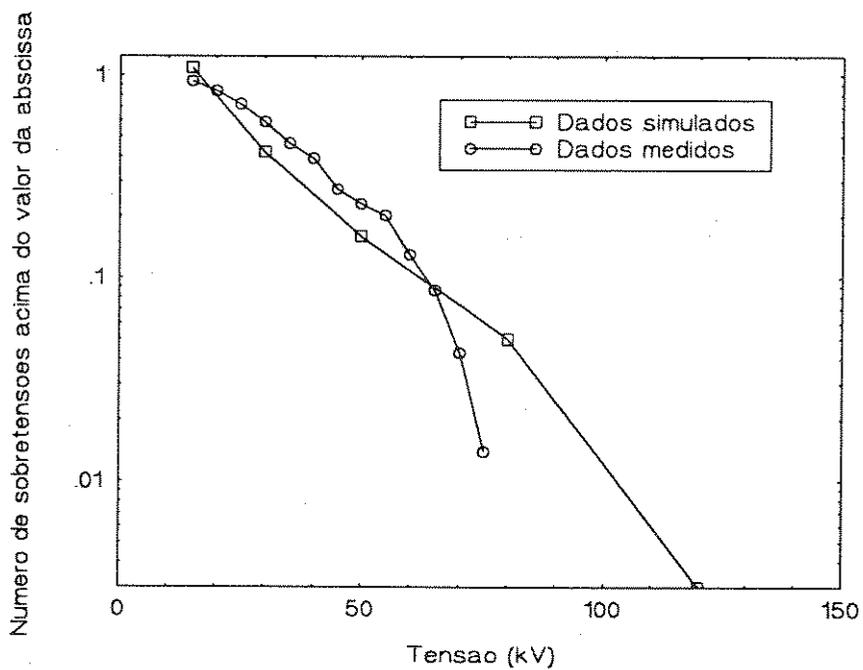


Figura V.12 - Valores medidos e calculados para a linha com cabo pára-raios.

V.3 - Análise dos resultados

A comparação apresentada nas figuras V.10 e V.11 é muito boa. As diferenças entre valores calculados e medidos são bem pequenas, podendo-se considerá-las desprezíveis lembrando-se que aqui se faz uma simulação probabilística onde são utilizados dados sobre os parâmetros das descargas atmosféricas que são uma média de valores obtidos ao redor do mundo.

A comparação apresentada na figura V.12 já não é tão boa. Isto talvez possa ser explicado pelo fato de que o número de medições realizadas na linha com cabo pára-raios foi relativamente pequeno o que talvez torne este dado um pouco menos preciso.

Outro fator a ser considerado diz respeito ao valor da tensão suportável de impulso atmosférico da estrutura utilizada na África do Sul. A ref [10] afirma que o NBI (nível básico de isolamento) é de 150 kV a seco e para onda de polaridade negativa. A ref. [1] afirma que sob chuva tem-se uma redução apreciável no valor do NBI da estrutura (60% em alguns casos). Além disto a ref. [1] também apresenta um resultado experimental onde uma estrutura, similar à estrutura utilizada pela África do Sul, que nos ensaios a seco e com onda de polaridade negativa apresentou NBI de valor igual a 150 kV e nos ensaios sob chuva e com onda de polaridade positiva apresentou NBI de valor igual a 95 kV. É importante observar que cerca de 95% das tensões induzidas medidas na linha foram de polaridade positiva [33].

Outro fator interessante é que o valor de tensão suportável pela estrutura é determinado em laboratório com uma onda de tensão normalizada ($1,2 \times 50 \mu\text{s}$) que é uma onda representativa das tensões impostas à linha por descargas diretas. Conforme relatado em [33], as tensões induzidas tem a frente de onda muito mais lenta que as tensões impostas pelas descargas diretas chegando, às vezes, a frentes de onda de mais de $20 \mu\text{s}$. A ref. [1] afirma que a tensão suportável é tanto menor quanto maior for o valor da frente de onda.

Pode-se afirmar que provavelmente as estruturas da linha experimental suportem apenas tensões inferiores a 95 kV (ondas de tensão induzida, polaridade positiva e sob

chuva). Se isto for verdadeiro pode-se garantir que nenhuma tensão induzida de valor acima de 95 kV seria medida na linha pois a mesma sempre provocaria uma disrupção em uma das estruturas da linha.

Podemos notar que as maiores diferenças entre valores calculados e medidos (figura V.12) são para os valores de tensão nas proximidades de 90 kV.

Outro fator que deve ser considerado é o efeito corona nos condutores da linha. Nas simulações apresentadas não se considerou o aparecimento de corona. O efeito principal do corona seria o de aumentar o diâmetro equivalente dos condutores da linha o que levaria a um aumento do fator de acoplamento (Z_m/Z) entre os condutores o que por sua vez levaria a um aumento do efeito de blindagem do cabo pára-raios. Entretanto, como pode ser visto na figura V.9, os maiores valores de tensão induzida são da ordem de 100 kV e conforme dado em [3], para o caso do condutor utilizado nas simulações, as tensões de início de corona seriam da ordem de 120 kV. Entretanto, o efeito corona deve ser estudado em maior profundidade pois as curvas dadas em [3] são para tensões originadas em descargas diretas e conforme visto anteriormente, as tensões induzidas tem a frente de onda muito mais lenta que as tensões impostas pelas descargas diretas.

Capítulo VI - Estudo de um caso brasileiro

A seguir será analisado um caso típico brasileiro. Serão feitas algumas alterações na linha de distribuição e a melhoria do desempenho da mesma será analisada. O objetivo principal desse capítulo é demonstrar a versatilidade do programa implementado.

Utilizaremos como caso-base uma rede de distribuição rural da Companhia Energética de Minas Gerais S.A. - CEMIG. A partir da configuração típica da rede, são feitas algumas alterações e os ganhos de desempenho são analisados.

As alternativas técnicas para a melhoria da proteção contra sobretensões e conseqüentemente para a melhoria do desempenho das redes são [39]:

- Valor do NBI das estruturas da linha;
- Distância entre pontos de aterramento;
- Valor das resistências de aterramento;
- Distância entre pára-raios ao longo da linha;
- Distância fase-neutro;
- Instalação de cabos pára-raios.

VI.1 - Descrição de uma rede típica

Uma rede típica de distribuição rural da CEMIG possui as seguintes características básicas [39]:

- Altura das fases igual a 8,2 m;
- Altura do neutro igual a 7,2 m;
- Neutro aterrado a cada 300 m com uma resistência de aterramento de 300 Ω ;
- Transformadores e conseqüentemente pára-raios a cada 1000 m;
- Pára-raios instalado da fase para o neutro e aterrado com uma resistência de aterramento igual a 100 Ω , tensão de disparo do pára-raios igual a 80 kV e tensão residual igual a 54 kV;

VI.2- Simulações

Foram analisados e simulados os 4 casos descritos a seguir:

Caso 1 (rede típica da CEMIG):

.Neutro aterrado a cada 300 m com resistência de 300 Ω e altura de 7,2 m;

.Fase a 8,2 m de altura;

.Pára-raios a cada 1000 m e aterrado com resistência de 100 Ω ;

Caso 2 (redução do valor da resistência de aterramento do neutro):

.Neutro aterrado a cada 300 m com resistência de **100 Ω** e altura de 7,2 m;

.Fase a 8,2 m de altura;

.Pára-raios a cada 1000 m e aterrado com resistência de 100 Ω ;

Caso 3 (redução do valor da distância entre pára-raios):

.Neutro aterrado a cada 300 m com resistência de **100 Ω** e altura de 7,2 m;

.Fase a 8,2 m de altura;

.Pára-raios a cada **300 m** e aterrado com resistência de 100 Ω .

Caso 4 (linha com o neutro funcionando como cabo pára-raios):

.Neutro aterrado a cada 300 m com resistência de 300 Ω e altura de **8,2 m**;

.Fase a **7,2 m** de altura;

.Pára-raios a cada 1000 m e aterrado com resistência de 100 Ω ;

Para todos os casos foi adotada uma linha de 1,0 km de comprimento instalada em uma região com uma densidade de descargas para a terra de 1,0 descargas por quilômetro quadrado por ano.

As figuras VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4 apresentam os valores das tensões induzidas no cabo neutro, no cabo fase e a diferença de tensão entre fase e neutro. Para todos os casos simulados o número de descargas diretas foi igual a 0,1 descargas por ano.

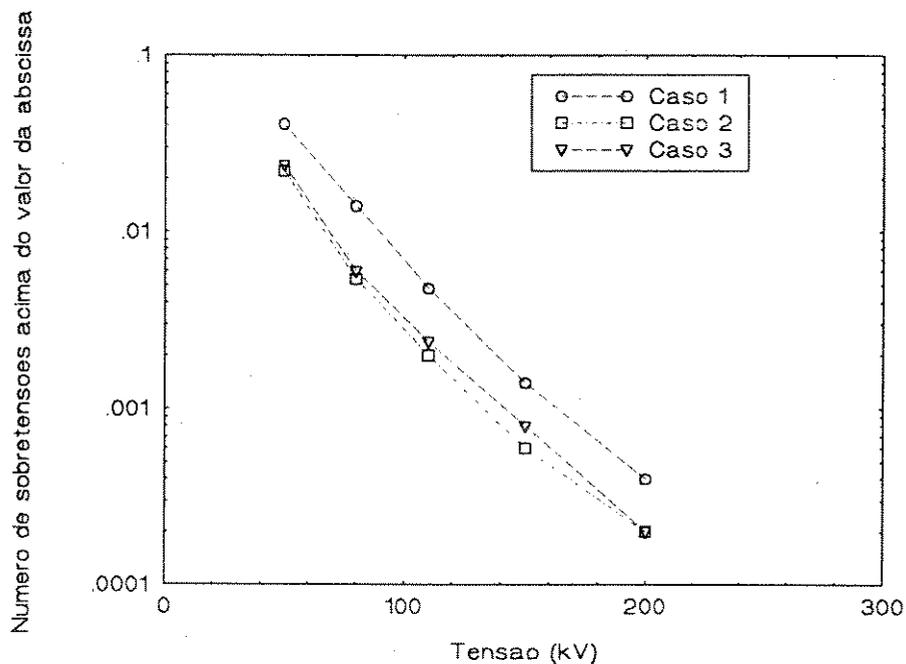


Figura VI.1 - Tensões induzidas no cabo neutro.

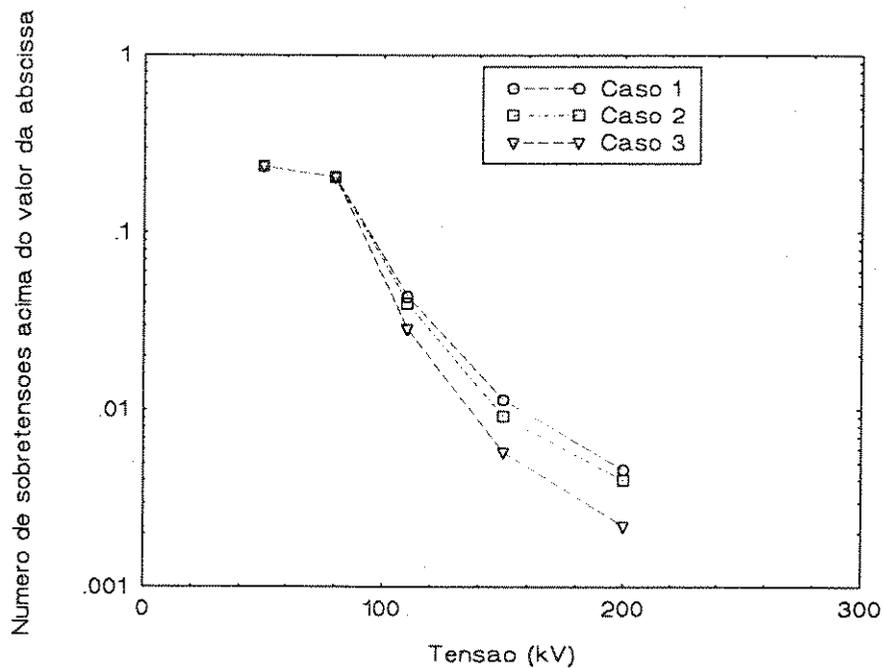


Figura VI.2 - Tensões induzidas na fase.

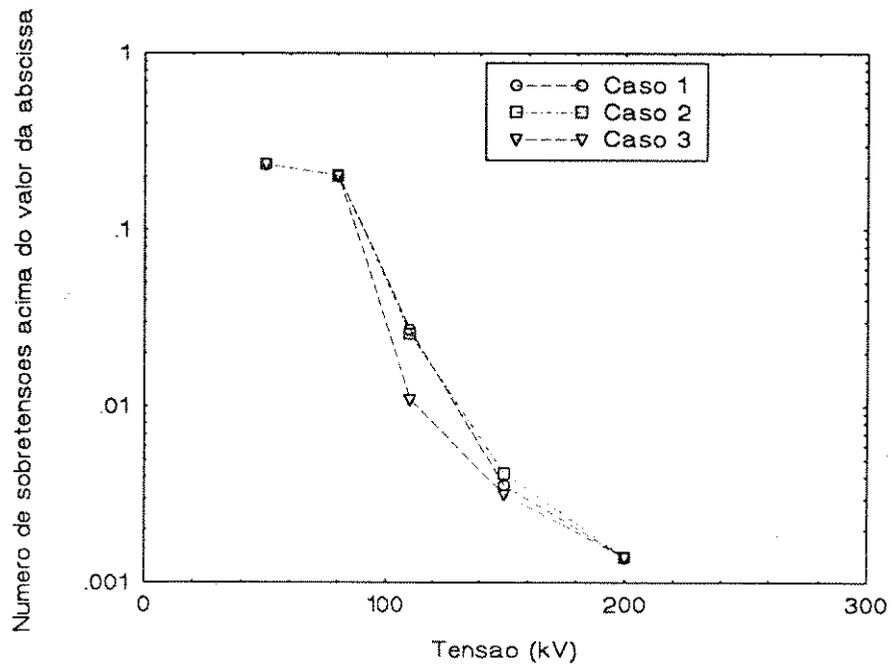


Figura VI.3 - Diferença de tensão fase-neutro.

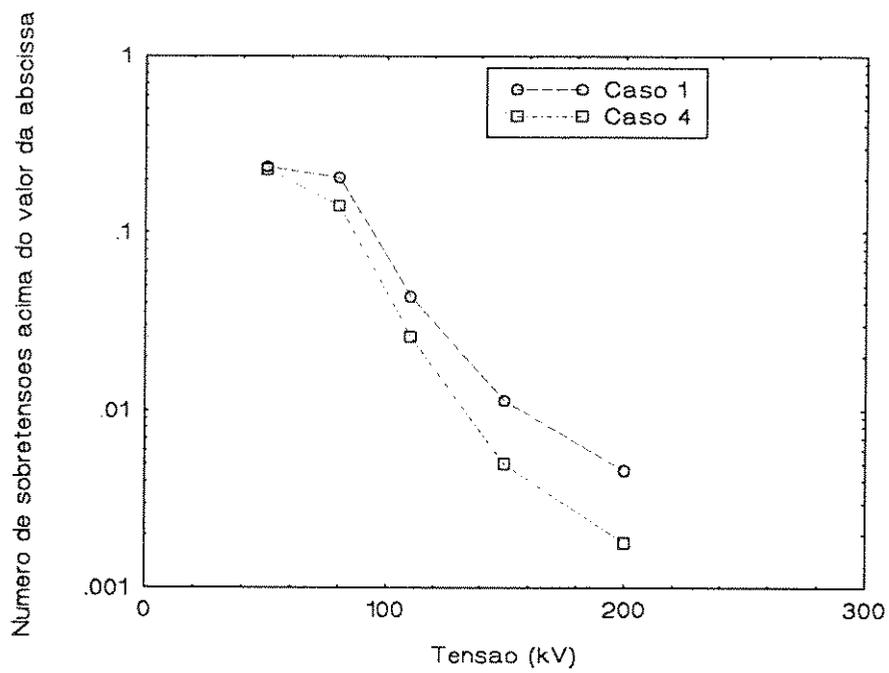


Figura VI.4 - Tensões induzidas na fase com o neutro acima da fase.

VI.3- Análise dos resultados

Com relação aos valores de tensões induzidas no neutro, a figura VI.1 mostra que quanto menor o valor da resistência de aterramento, bem como menor o espaçamento entre aterramentos, menores serão os valores de tensões induzidas. Como no Brasil o neutro é, via de regra, utilizado como cabo terra, a redução dos valores de resistência de aterramento e da distância entre pontos de aterramento é uma medida importante.

Com relação aos valores das tensões induzidas nas fases e também às diferenças de tensão fase-neutro, as figuras VI.2 e VI.3 mostram, que os ganhos obtidos com a redução do valor da resistência de aterramento, com a redução do espaçamento entre pontos de aterramento e com a redução da distância entre pára-raios, são ganhos relativamente pequenos.

Considerando-se que toda sobretensão de valor acima do valor do NBI das estruturas provoca uma disrupção e conseqüentemente um desligamento da rede de distribuição, podemos concluir, pela análise das figuras VI.2 e VI.3, que a solução de maior ganho é a de aumentar o valor do NBI das estruturas. As curvas mostram que uma estrutura de NBI igual a 200 kV suportaria praticamente todos os valores das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas. Em redes com NBI igual ou superior a 200 kV somente as descargas diretas irão provocar desligamentos.

A instalação do neutro acima das fases, atuando como um cabo pára-raios, proporciona um ganho de desempenho razoável (figura VI.4), mas esta é uma alternativa bem mais complexa do ponto de vista operacional do que a elevação do valor do NBI das estruturas. A instalação do neutro acima das fases poderia proporcionar alguma proteção contra os efeitos das descargas diretas. A referência [10] conclui que esta proteção contra descargas diretas só seria efetiva se:

$$\text{NBI} / R < 20 \quad (\text{VI.1})$$

NBI em kV e R em Ohms.

Onde R é o valor da resistência de aterramento do neutro.

Para uma estrutura de NBI igual a 300 kV isto significa uma resistência de aterramento de no máximo 15Ω , o que é um valor economicamente impraticável [40]. As referências [41,42] chegam à conclusão de que o neutro funcionando como cabo pára-raios é uma medida efetiva e economicamente viável. Acredita-se que este assunto merece ser estudado com bastante critério.

Capítulo VII - Conclusões e propostas de continuidade

O trabalho apresentado propõe uma metodologia computacional para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. A metodologia permite o estudo de redes aéreas multifilares com a presença de cabos multiaterrados e pára-raios instalados ao longo das linhas. As comparações efetuadas com resultados experimentais obtidos em laboratório e resultados obtidos em medições reais demonstram que a metodologia proposta é aceitável.

Pela primeira vez foram apresentados resultados probabilísticos obtidos com um programa para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas que considera a existência de cabos aterrados.

A Tese demonstra que uma das melhores teorias já propostas para o cálculo de tensões induzidas em redes aéreas e a teoria proposta por Sune Rusck em 1957.

O programa computacional implementado é de fácil utilização, não alocando memória e tempo de processamento excessivos.

Apesar da metodologia proposta ter sido utilizada para o cálculo de tensões induzidas em redes aéreas de distribuição de energia elétrica a mesma pode ser aplicada a qualquer tipo de circuito aéreo, como por exemplo: redes telefônicas e redes elétricas de baixa tensão.

A análise das alternativas para a melhoria do desempenho das redes de distribuição brasileiras, apresentada no capítulo VI demonstra a versatilidade da metodologia proposta.

O trabalho apresentado faz parte de um ciclo de estudos iniciado em 1982.

Como propostas de continuidade desde estudo tem-se:

- Implantação da metodologia proposta em algum pacote computacional, tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program). Acredita-se que tal implantação não é

muito difícil e o fato de se poder utilizar um pacote computacional bastante elaborado, permitirá a simulação de redes mais complexas, podendo-se inclusive estudar fenômenos não lineares tais como o efeito corona e a dependência dos parâmetros da linha com a frequência;

- Estudos teóricos e experimentais com o objetivo de explicar a real influência do valor da resistividade do solo no mecanismo de indução;

- Extensão da metodologia proposta para redes com ramais e derivações;

- Utilização da metodologia proposta para o estudo das sobretensões induzidas em redes de baixa tensão. Este é um problema bastante sério, hoje em dia, devido à maior suscetibilidade dos eletrodomésticos e dos equipamentos eletrônicos em geral à sobretensões;

- Estudo das alternativas de proteção das redes de distribuição contra descargas diretas.

Referências Bibliográficas

(Confome NBR 6023-Agosto/1989)

- 1- ARAÚJO, A.E.A.. *Melhoria do desempenho de estruturas de linhas elétricas de distribuição frente a descargas atmosféricas*. Belo Horizonte: UFMG, 1983. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1983.
- 2-ERIKSSON, A.J., STRINGFELLOW, M.F., MEAL, D.V.. Lightning induced overvoltages on overhead transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 4, p.960-968, April 1982.
- 3-*Transmission line reference book - 345 kV and above*. 2.ed., Projeto UHV, Electrical Power Research Institute, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, California, 1982, Editor: J.J. Laforest.
- 4-MASTER, M.J.;UMAN, M.A.. Lightning induced voltages on power lines: Theory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, n. 9, p. 2502-2518, September 1984.
- 5-RUSCK, S.. *Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to over-voltage protection of low voltage networks*. Stockolm: Royal Institute of Technology, 1957, 1v. Ph.D. Thesis. Royal Institute of Technology, 1957.
- 6-FONSECA, A.F.L.. *Cálculo analítico do campo eletromagnético e da resposta transitória de uma linha unifilar infinita devido à incidência de uma descarga atmosférica sobre um solo de resistividade nula*. Belo Horizonte: UFMG, 1990. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.
- 7-LOPES, I.J.S.. *Estudo do comportamento de um condutor multiaterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas*. Belo Horizonte: UFMG, 1990. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.
- 8- BOAVENTURA, W.C.. *Estudo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas utilizando técnicas de modelo reduzido*. Belo Horizonte: UFMG, 1990. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.
- 9- STARLING, R.P.. *Estudo da aplicação da teoria de Rusck e de modelos probabilísticos ao cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas*. Belo Horizonte: UFMG, 1990. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.

- 10-GELDENHUYS, H.J.. Insulation co-ordination of rural distribution lines. in: *Proceedings of the First International Conference on Power Distribution* Patrocinio CODI (ELETROBRÁS)-IEEE, Belo Horizonte, 1990.
- 11-YOKOYAMA, S.. Calculation of lightning-induced voltages on overhead multiconductor systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, n. 1, p. 100-108, January 1984.
- 12-HASHIMOTO, Y.; YOKOYAMA, S.; MORROKA, Y.. Analogue simulation for lightning-induced overvoltages on power distribution lines using a scale model. in: *Proceedings of the VIII International Symposium on High Voltage Engineering*, Japan, August 23-27, 1993, p. 393-396, paper 76-02, v.3.
- 13-WORKING GROUP REPORT. Calculating the lightning performance of distribution lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, p. 1408-1417, July 1990.
- 14-GOLDE, R.H.. *Lightning - v.2 - Lightning protection*, Academic Press, London, 1977.
- 15-RUBINSTEIN, M.; UMAN, M.A.. Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: Application to lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 31, n. 2, p. 183-189, May 1989.
- 16-CHOWDHURI, P.; GROSS, E.T.B.. Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes. in: *Proceedings of the IEE*, v. 114, n. 12, p. 1899-1907, December 1967.
- 17-CHOWDHURI, P.. Lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 658-667, April 1990.
- 18-JAKUBOWSKI, J.L.. Base de calcul de la composante magnétique de la tension induite par la foudre. *Archivum Elektrotechniki*, v. 23, p. 1023-1035, 1974.
- 19-STRATON, J. A.. *Electromagnetic Theory*. McGraw-Hill Book Company, New York and London, 1941.
- 20-KOGA, H.; MOTOMITSU, T.; TAGUCHI, M.. Lightning surge waves induced on overhead lines. *The Transactions of the IEE of Japan*, v. E62, n. 4, p. 216-223, April 1979.
- 21-GEORGIADIS, N.; RUBINSTEIN, M.; UMAN, M.A.; MEDELIUS, P.J.; THOMSON, E.M.. Lightning-induced voltages at both ends of a 448 m

- power distribution line. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 34, n. 4, p. 451-460, November 1992.
- 22-PAULINO, J.O.S.; TEIXEIRA, T.L.S.; SANTOS, I.M.. Simulação de indução de descargas atmosféricas em redes telefônicas. in: *Anais do II Encontro Nacional Sobre Proteção Elétrica*, Brasília-DF, 10-11 de dezembro de 1986, 13 páginas.
- 23-PAULINO, J.O.S.; LOPES, I.J.; BOAVENTURA, W.C.; STARLING, R.P.; PISSOLATO FILHO, J.. Validation of Rusck's theory for the lightning induced voltage calculation on distribution lines. in: *Proceedings of the VIII International Symposium on High Voltage Engineering*, Japan, August 23-27, 1993, p.261-264, paper 76-05, v.4.
- 24-GREENWOOD, A.. *Electrical transients in power systems*. John Wiley & Sons-Inc., New york, 1992.
- 25-NAIDU, S.R.. *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. Coedição Eletrobrás-UFPb, 1985.
- 26-BARTHOLD, L.O.; CARTER, G. K.. Digital traveling wave solutions-I-single phase equivalents. *AIEE Transactions*, p. 812-820, December 1961.
- 27-NUCCI, C.A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M.V.; MAZZETTI, C.. Lightning-induced voltages on overhead lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 35, n. 1, p. 75-86, February 1993.
- 28-DIENDORFER, G.. Induced voltage on an overhead line due to nearby lightning. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 12, n. 4, p. 292-299, November 1990.
- 29-KRAUS, J.D.; CARVER, K.R.. *Eletromagnetismo*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1978.
- 30-AGRAWAL, A.K.; PRICE, H.J., GURBAXARI, S.H.. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, v.22, n. 2, p. 119-129, May 1980.
- 31-PORTO, E.W.. *Cálculo de sobretensões em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas laterais*. Belo Horizonte: UFMG, 1990. 1v. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.
- 32-ANDERSON, J.G.. Monte Carlo simulation of the lightning performance of overhead shielding networks of high voltage stations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 91, n. 4, p. 1651-1656, July/August 1972.

- 33-ERIKSSON, A.J.; MEAL, D.V.. *Lightning performance and overvoltage surge on a rural distribution line (Final draft)*. CSIR Special Report - ELK 202, National Electrical Engineering Institute, South Africa, July 1980.
- 34-BRANDÃO, C.A.L.; PAULINO, J.O.S.; BARBOSA, M.H.; LOPES, I.J.. Lightning performance simulation program for distribution lines. in: *Proceedings of the First International Conference on Power Distribution*, Promoção CODI (ELETROBRÁS)-IEEE, Belo Horizonte, 1990.
- 35-ANDERSON, R.B.; ERIKSSON, A.J.. Lightning parameters for engineering application. *Electra*, v. 69, p. 65-102, 1980.
- 36-ARAÚJO, R.L.; DINIZ, J.H.; CHERCHIGLIA, L.C.; ERIKSSON, A.J.; GELDNHUYS, H.J.. Applied lightning research in an inter-tropical mountainous area. in: *Proceedings of the First International Conference on Power Distribution*, Promoção CODI (ELETROBRÁS)-IEEE, Belo Horizonte, 1990.
- 37-RÜDENBERG, R.. *Electrical shock waves in power systems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1968.
- 38-PRESS, W.H.; VETTERLING, W.T.; TEUKOLSKY, A.; FLANNERY, P.. *Numerical recipes in Pascal*. Cambridge University Press, 1986.
- 39-TASK FORCE. Investigation and evaluation of lightning protective methods for distribution circuits. Part I: Model study and analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 88, n. 8, p. 1232-1238, August 1969.
- 40-YOKOYAMA, S.; ASAKAWA, A.. Experimental study of response of power distribution lines to direct lightning hits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, October 1989.

Nomenclatura

V - Volts.

A - Ampères.

Ω - Ohms.

m - Metros.

s - Segundos.

rad - Radianos.

$V(x,t)$ - Tensão induzida, V.

t - Tempo, s.

c - Velocidade da luz no vácuo, m/s.

v - Velocidade da corrente de retorno, m/s.

I - Valor de pico da corrente de descarga, A.

h - Altura, m.

y - Menor distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha, m.

x - Ponto ao longo da linha, m.

β - Relação entre a velocidade da corrente de retorno e a velocidade da luz no vácuo.

U - Componente da tensão induzida, V.

V_{\max} - Valor máximo da tensão induzida, V.

h_1 - Altura do fio 1, m.

h_2 - Altura do fio 2, m.

E_z - Componente vertical do campo elétrico, V/m.

E_x - Componente horizontal do campo Elétrico, V/m.

j - Operador complexo.

ω - Frequência angular, rad/s.

ϵ_r - Permissividade relativa.

ϵ_0 - Permissividade do vácuo.

σ - Condutividade do solo, $1/\Omega.m$.

I_p - Valor de pico da corrente, A.

t_p - Tempo de pico da corrente, s.

Δt - Intervalo de cálculo, s.

ΔV - Valor da fonte de compensação, V.

x_0 - Ponto na linha.

x_1 - Ponto na linha.

u - Função degrau unitário.

t_0 - Tempo de trânsito, s.

v_0 - Velocidade de propagação na linha, m/s.
 V_1 - Tensão induzida no fio 1, V.
 V_2 - Tensão induzida no fio 2, V.
 R - Resistência de aterramento, Ω .
 Z - Impedância de surto da linha, Ω .
 S - Chave.
 Z_m - Impedância mútua de surto, Ω .
 V_1' - Tensão induzida no fio 1 com aterramento no fio 1, V.
 V_2' - Tensão induzida no fio 2 com aterramento no fio 1, V.
 I_r - Corrente no aterramento, A.
 I_l - Corrente na linha, A.
 r - Raio do fio, m.
 d - Distância entre os fios, m.
 V_r - Tensão residual do pára-raios, V.
 T - Comprimento do degrau, s.
 N - Número inteiro maior ou igual a 1.
 t_c - Tempo de cauda, s.
 L - Comprimento da linha, m.
 h_f - Altura do cabo fase, m.
 h_n - Altura do cabo neutro, m.
 V_0 - Nível de isolamento da linha, V.
 s - Área de interesse, m^2 .
 r_a - Raio de atração da linha, m.
 s_1 - Área de interesse para descargas diretas, m^2 .
 X_{max} - Valor máximo de x, m.
 Y_{max} - Valor máximo de y, m.
 N_a - Número aleatório.
 pu - Por unidade.
 NBI - Nível básico de isolamento, V.
 \log - Logaritmo base 10.