

E-96
STA
1992
T

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de mestrado :

"Estudo da aplicação da teoria de Rusck e de
modelos probabilísticos ao cálculo de tensões
induzidas por descargas atmosféricas"

Engenheiro Robson Portugal Starling
Professor Orientador : José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte
Dezembro de 1992

2004
2000
07

U. F. M. G. - BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA



168589310

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

ROBSON PORTUGAL STARLING

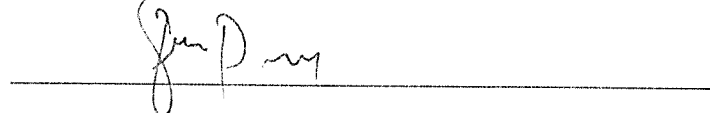
Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em 18 de dezembro de 1992.

por:



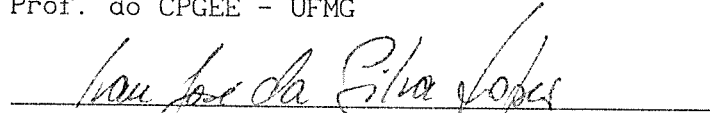
José Osvaldo Saldanha Paulino (Orientador)
M. Sc. CPGEE/UFMG
Prof. do CPGEE - UFMG



José Pissolato Filho
Dr. Ing. UPS/França
Prof. da UNICAMP



Rodney Rezende Saldanha
Dr. INPG/França
Prof. do CPGEE - UFMG



Ivan José da Silva Lopes
M. Sc. CPGEE/UFMG
Prof. do DEE - UFMG

*"Tudo que te vier à mão para fazer, faze-o conforme as tuas
forças, porque não há obra, nem
projetos, nem conhecimento, nem sabedoria alguma"*

Eclesiastes 9:10

*"Se alguém julga saber alguma coisa, com efeito não aprendeu
ainda como convém saber"*

I Coríntios 8:2

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor, meu Deus, de quem provém toda boa dádiva :

Aos meus pais, José Oscar e Eulina, por tudo

Aos meus tios, Levy e Elda, pela generosa acolhida

Ao amigo, Professor José Osvaldo Saldanha Paulino, pela inestimável orientação

Ao Ivan, pelo auxílio durante o desenvolvimento desta dissertação

Aos "meninos da Telebrás" : Almir, Ivan, Paulo e Wallace, pela base de conhecimento

Aos amigos e sócios na HW Informática - HeartWare Ltda., pelo incentivo e tolerância

Aos colegas de curso, aos funcionários do LEAT e do DEE e aos professores pelo agradável convívio e permanente incentivo

RESUMO

Em 1957, Sune Rusck propôs uma expressão para calcular a tensão induzida numa linha infinita e homogênea por uma descarga atmosférica que atinge o solo em sua proximidade. Esta expressão e as suposições feitas para o seu desenvolvimento foram criticadas ao longo dos anos por diversos autores.

Em 1990, Lopes apresentou um algoritmo que extendia a aplicação da expressão proposta por Rusck a linhas finitas e multi-aterradas. Tal algoritmo foi implementado e comparações com medições em modelo reduzido (Boaventura 1990) foram realizadas.

Baseado neste algoritmo e na aplicação do método de Monte Carlo a dados de parâmetros de descargas atmosféricas este trabalho simula o comportamento de uma linha real e compara os resultados obtidos com medições realizadas nesta linha ao longo de dois anos.

Desta forma chega-se a conclusão principal que a teoria proposta por Rusck tem resultados satisfatórios para o cálculo da tensão induzida numa linha por descargas atmosféricas. Além desta conclusão o método e o programa computacional proposto neste trabalho constituem-se em ferramentas válidas no estudo do desempenho de uma linha frente a descargas atmosféricas.

ABSTRACT

In 1957, Sune Rusck proposed an expression to calculate the induced voltage over an infinite line due to a lightning that strikes the ground on its vicinity. This expression and the suppositions made during its development were criticized along the years by many authors.

In 1990, Lopes presented an algorithm that extended the application of Rusck's expression to finite multi-earthed lines. The algorithm was implemented and reduced model measurements comparisons (Boaventura 1990) were done.

Based on this algorithm and on the application of Monte Carlo method to lightning parameters data, this work simulates the behavior of a real line and compares these results with measurements made in this line for two years. This algorithm was implemented and comparisons with reduced model measurements were made.

The main conclusion of this work is that Rusck's theory has satisfactory results for lightning induced voltage calculation. In addition, the method and computer program proposed on this work proved to be valid tools for lightning performance studies.

SUMÁRIO

Introdução	1
Capítulo 1 : Cálculo analítico da tensão induzida	5
Introdução	5
1.1 Teoria de Rusck - Descrição sucinta	6
1.2 Discussão da teoria de Rusck	9
Capítulo 2 : Cálculo numérico da tensão induzida	12
Introdução	12
2.1 Fatores de compensação	13
2.2 Cálculo de transitórios	15
Capítulo 3 : Geração de parâmetros das descargas	18
Introdução	18
3.1 Número anual de descargas para terra	19
3.2 Localização	20
3.3 Parâmetros da corrente de descarga	20
3.3.1 Valor de pico da corrente	20
3.3.2 Velocidade de propagação de corrente	21
3.3.3 Tempo de frente da corrente	21
Capítulo 4 : Dados utilizados nas simulações e testes do método de Monte Carlo	23
Introdução	23
4.1 Dados utilizados nas simulações dos parâmetros das descargas	24
4.2 Testes da geração de parâmetros	28
4.2.1 Números randômicos	28
4.2.2 A posição das descargas	29
4.2.3 Os valores da corrente de pico e do tempo de frente	30
Capítulo 5 : Simulação das medições realizadas na África do Sul	32
Introdução	32
5.1 O projeto NEERI-ESCOM	33
5.2 Simulação e resultados	36
Capítulo 6 : Conclusões e propostas de continuação do trabalho	41
Apêndice 1 : O método de Monte Carlo	44
Apêndice 2 : O programa de computador CORISCO	47
Bibliografia	50

INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas constituem a maior causa individual de desligamentos em redes de distribuição de energia (CEMIG, 1990; Eriksson, 1982). Estas descargas tanto podem atingir diretamente a linha como o solo na sua vizinhança. Apesar das descargas diretas provocarem maiores danos (principalmente nas linhas sem cabo pára-raios), na maioria das vezes causando falhas no isolamento e por conseqüência um desligamento, elas são muito menos freqüentes que as descargas laterais à linha (Uehara, 1968). A influência destas últimas se torna pois, bastante significativa sobre o número de desligamentos da rede de distribuição. Muito embora existam propostas de esquemas de proteção para descargas diretas (Armstrong, 1967; IEEE Task Force, 1969), nenhuma delas é aplicada às redes de distribuição brasileiras.

Além dos danos causados às redes elétricas, são significativos os danos causados às redes de telefonia (cabos, centrais digitais, etc.) e a equipamentos eletrônicos ligados a ambas (rede elétrica e de telefonia).

Quando se busca reduzir os desligamentos causados por descargas atmosféricas é necessário entender corretamente a interação entre descargas laterais e a linha de distribuição. Neste sentido o Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFMG, através do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica vem estudando o assunto através de convênios com a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a Telecomunicações Brasileiras S.A. (TELEBRÁS). Tais convênios geraram vários relatórios técnicos e sete dissertações de mestrado já defendidas. (Paulino, 1985; Barbosa, 1988; Porto, 1990; Boaventura, 1990; Lopes, 1990; Fonseca, 1990; Ferreira, 1990; Santos, 1990)

Das dissertações citadas, três são de especial interesse para o presente trabalho. Elas foram desenvolvidas em convênio com a Telebrás e tinham como objetivo :

- o estudo da descarga atmosférica no que diz respeito às considerações básicas relativas à modelagem do fenômeno, cálculo dos campos eletromagnéticos associados e estabelecimento de modelos de interação dos campos com linhas (Fonseca 1990).
- o estudo das tensões induzidas em linhas partindo-se de um modelo de interação pré-definido, desenvolvimento e implementação de uma metodologia de cálculo dessas tensões induzidas em condutores aéreos e subterrâneos multi-aterrados (Lopes 1990).
- o estudo em modelo reduzido das tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas e o domínio da técnica de medição em modelo reduzido (Boaventura 1990).

Este conjunto de dissertações proporcionou uma base de entendimento do fenômeno de interação descarga-linha, bem como o desenvolvimento de ferramentas de simulação em computador e modelo reduzido.

A partir desta base de conhecimentos desenvolveu-se o presente trabalho, objetivando a comprovação das técnicas anteriormente desenvolvidas através da comparação com dados de campo, uma vez que ainda existem questionamentos quanto à teoria do cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas laterais.

Sucintamente, o trabalho realizado pode ser dividido da seguinte forma :

- Simulação das descargas atmosféricas : é obtida da aplicação do método de Monte Carlo a dados de parâmetros de descargas atmosféricas obtidos de medições e compiladas pelo CIGRÉ (Berger, 1975; Anderson, 1980), de forma a gerar os dados das descargas cuja tensão induzida se quer calcular.
- Cálculo da tensão induzida : é obtido através do algoritmo proposto por

Lopes para um fio finito multi aterrado (Lopes,1990), baseado na expressão da tensão induzida para uma linha infinita proposta por Rusck (Rusck, 1957).

- Comparação de resultados : os dados obtidos destas simulações são então comparados com dados reais de medição, realizadas num projeto sul africano.

Organização do texto :

O capítulo 1 trata do cálculo analítico da tensão induzida, descrevendo a expressão analítica obtida por Rusck (Rusck, 1957) e as hipóteses básicas consideradas para a obtenção desta equação. São também apresentados os principais questionamentos feitos a esta teoria de cálculo de tensão induzida bem como algumas respostas a estes questionamentos propostas em outros trabalhos.

O capítulo 2 trata do algoritmo proposto por Lopes (Lopes, 1990), que estende a expressão obtida por Rusck, de forma a permitir o cálculo de tensões induzidas em linhas finitas e com descontinuidades. Este algoritmo usa um método numérico de cálculo de transitórios eletromagnéticos, implementado por Dommel (Dommel, 1969), aliado à expressão de Rusck.

O capítulo 3 descreve a geração dos parâmetros das descargas através da aplicação do método de Monte Carlo a dados obtidos de medições. Os dados gerados são : localização, número de descargas para terra por ano, valor de corrente de pico e de tempo para atingir o pico (tempo de frente).

O capítulo 4 discute os dados utilizados nas simulações, sua forma de obtenção e sua validade. São também apresentados os testes feitos com a rotina de Monte Carlo para verificação dos dados gerados por esta.

O capítulo 5 descreve as simulações feitas, de forma a comparar os dados

obtidos através do método proposto com dados obtidos em medições numa linha real realizadas na África do Sul. Para uma melhor avaliação dos valores medidos é feita uma descrição do projeto sul africano.

O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e algumas propostas de continuação desta linha de pesquisas.

O apêndice 1 faz uma breve descrição do método de Monte Carlo e de variáveis aleatórias.

O apêndice 2 descreve a utilização do programa de computador no qual foram feitas as simulações apresentadas neste trabalho.

CAPÍTULO 1 CÁLCULO ANALÍTICO DA TENSÃO INDUZIDA

Introdução :

O primeiro cálculo teórico da tensão induzida por uma descarga atmosférica numa linha de transmissão foi feito por K. W. Wagner, em 1908. Desde então vários trabalhos foram desenvolvidos : Bewley, em 1929; Aigner, em 1935; Wagner e McCann, em 1942; Szpor, em 1948; Golde, em 1954 e Lundholm, em 1955 (Rusck, 1957).

Em sua tese de doutorado Sune Rusck (Rusck, 1957) propõe uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida. A teoria proposta por Rusck considera a corrente de retorno, que flui pelo canal da descarga, como a única fonte da tensão induzida numa linha próxima. Além disto, Rusck considera não só o campo elétrico devido à neutralização das cargas depositadas no canal da descarga mas, também, o campo magnético devido à própria corrente de retorno.

1.1 Teoria de Rusck - Descrição sucinta :

De uma forma genérica, pode-se expressar um campo elétrico (\vec{E}_i) como a soma de duas parcelas : uma associada ao potencial elétrico (V_i), chamado aqui de potencial escalar e uma devida ao vetor potencial magnético (\vec{A}_i), ou potencial vetor. Assim :

$$\vec{E}_i = -\vec{\nabla} V_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t}$$

A parcela associada ao potencial escalar é devida ao anulamento progressivo das cargas estáticas armazenadas no canal (figura 1.1). A parcela associada ao potencial vetor é devida à propagação da corrente de retorno pelo canal da descarga. Para o modelo de descarga adotado por Rusck só se tem componentes do potencial vetor perpendiculares à linha, ao passo que o potencial escalar tem componentes na direção do eixo da linha. Desta maneira, Rusck propõe uma forma diferente de se computar o efeito dos dois potenciais na tensão induzida num ponto.

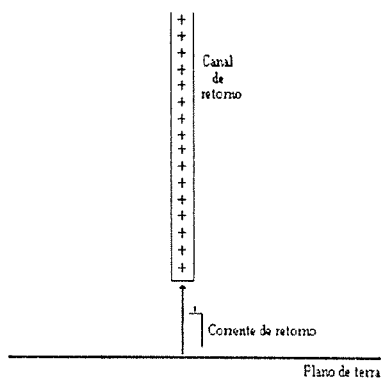


Figura 1.1 - Modelo da descarga atmosférica para o cálculo dos campos eletromagnéticos

A parcela da tensão induzida devida ao potencial escalar num determinado ponto da linha é obtida integrando-se as contribuições de todos os outros pontos da linha (à esquerda e à direita), uma vez que estas contribuições, ao se

propagarem em direção ao ponto onde se observa a tensão induzida, se somam.

De forma diferente do potencial escalar, o potencial vetor deve, segundo Rusck, ser computado apenas no ponto onde se observa a tensão induzida e não integrado ao longo da linha, uma vez que este não se propaga na linha pois só tem componente perpendicular à direção da linha.

Para desenvolver uma expressão analítica para a tensão induzida, Rusck considera algumas simplificações (Rusck, 1957):

- Não são levados em conta o campo elétrico estático devido à presença de carga nas nuvens sobre a linha nem o campo gerado durante o processo de formação do canal, uma vez que a velocidade com que estes fenômenos ocorrem é baixa.

- O canal de descarga é suposto vertical e perpendicular ao solo, estando carregado de maneira uniforme. Esta consideração simplifica enormemente o cálculo analítico do campo eletromagnético. Na média, o canal de descarga pode ser considerado vertical e a variação da densidade de cargas ao longo das primeiras centenas de metros, que são determinantes para o valor de pico e para o tempo de pico da corrente de retorno, não é muito grande (Boaventura 1990).

- Uma vez que a distribuição das cargas depositadas no canal é suposta uniforme, a corrente de retorno (que anula estas cargas) é em forma de degrau. Esta simplificação é necessária à obtenção de uma solução analítica para o problema, além de ser conservativa em seus resultados e permitir, através do princípio da superposição, considerar outras formas de onda para a corrente de retorno.

- O solo é modelado como tendo resistividade nula. Segundo Rusck, esta consideração leva a resultados conservativos pois considera que um solo com condutividade finita atenuaria o campo eletromagnético. Como veremos no item 1.2 esta consideração é bastante polêmica, sendo questionado por diversos autores.

- O campo eletromagnético sob a linha não tem variação significativa do solo até a altura da mesma (em torno de 10m) pois esta é muito pequena se comparada ao comprimento do canal (em torno de 5 km) (Uman 1984).

A partir das considerações anteriores, Rusck aplicou as equações de Maxwell ao modelo e, usando a teoria das imagens, calculou o campo eletromagnético gerado pela descarga, obtendo uma expressão analítica. Conhecido o campo, Rusck obteve uma expressão analítica para a tensão induzida, fazendo a interação do campo com uma linha infinita e homogênea (ou seja, que tenha impedância de surto constante em toda a sua extensão) situada a uma altura qualquer nas proximidades do ponto de incidência da descarga (ver figura 1.1).

A expressão obtida foi :

$$U(x,t) = U_1(x,t) + U_2(x,t) \quad (1.1)$$

onde :

$$U_1(x,t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(V_0 t - x)}{y^2 + \beta^2 (V_0 t - x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (V_0 t - x)}{\sqrt{\beta^2 (V_0 t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2)}} \right] \quad (1.2)$$

$$U_2(x,t) = U_1(-x,t)$$

U_1 é a contribuição para a tensão induzida no ponto x , da porção da linha situada à esquerda de x .

U_2 é a contribuição para a tensão induzida no ponto x , da porção da linha situada à direita de x .

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega$$

I_0 é o valor de pico da corrente de retorno (kA)

h é a altura do condutor (m)

V é a velocidade de propagação da corrente de retorno ($m/\mu s$)

V_0 é a velocidade da luz ($m/\mu s$)

$$\beta = V/V_0$$

x é a distância ao longo da linha entre o ponto onde se deseja calcular a tensão induzida e o ponto da linha mais próximo do ponto de incidência da descarga (m)

y é a menor distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha

μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre (H/m)

ϵ_0 é a permissividade elétrica do espaço livre (F/m)

t é o tempo contado a partir do momento em que tem início a corrente de retorno (μs)

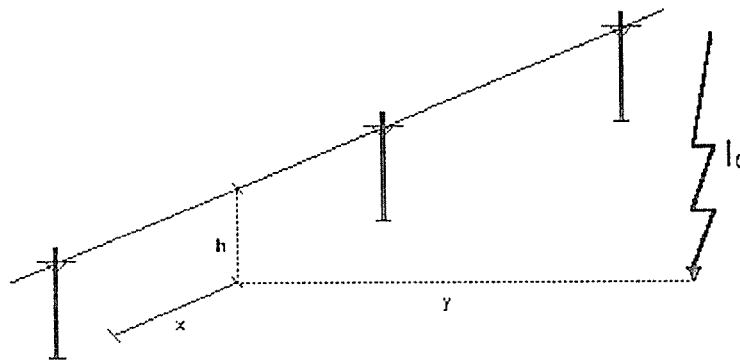


Figura 1.2 - Localização da descarga em relação à linha

1.2 Discussão da teoria de Rusck :

A metodologia e os modelos utilizados por Rusck foram questionados por outros autores nos seguintes aspectos :

- a técnica de cálculo do campo eletromagnético estaria errada pois não

obedeceria à condição de Lorentz. Este questionamento foi levantado por Martin Uman (Master e Uman 1984), uma vez que o cálculo de campo realizado por ele (Master e Uman 1983) não obtinha os mesmos resultados que Rusck para uma mesma fonte de campo.

- o efeito da condutividade finita do solo não seria o de atenuar o valor da tensão induzida. Este questionamento é apresentado por Uman (Master e Uman 1984).

- O modelo de interação campo-linha proposto por Rusck não estaria correto, conforme Chowdhuri (Chowdhuri e Gross 1967; Chowdhuri 1989).

Em sua dissertação de mestrado, Fonseca (Fonseca 1990) faz uma análise comparativa dos métodos de cálculo do campo eletromagnético propostos por Rusck e Uman chegando às seguintes conclusões :

- as duas técnicas de cálculo de campo eletromagnético obedecem às mesmas equações básicas e satisfazem à condição de Lorentz.
- os modelos apresentados para a descarga (Rusck : descarregar um canal previamente carregado negativamente; Uman : carregar um canal inicialmente descarregado através de um degrau de corrente negativa) levam aos mesmos valores de variação no campo eletromagnético. A única diferença existente entre os dois modelos é que o modelo de Rusck apresenta um campo eletrostático inicial devido às cargas inicialmente depositadas no canal da descarga.
- a diferença nos valores de campo obtidos das duas expressões, a partir de uma mesma fonte, encontrada por Uman (Master e Uman 1983), deve-se a dois erros cometidos por Uman em sua dedução. Estes erros foram detectados por Fonseca e reconhecidos por Uman (Uman e Rubinstein 1989).

O questionamento apresentado por Chowdhuri diz respeito à forma proposta por Rusck de se computar as fontes de campo. Segundo Chowdhuri o mesmo tratamento dado ao potencial escalar deve ser dado ao potencial vetor. Em sua dissertação Fonseca analisa este questionamento concluindo estar correto o tratamento dado por Rusck às fontes de campo computadas para a tensão induzida na linha.

Quanto ao efeito da condutividade finita do solo, ainda não se pode afirmar nada com certeza. Medições realizadas por Boaventura (Boaventura 1990) dão indícios de que este efeito não é significativo para linhas próximas (algumas centenas de metros) ao ponto de incidência da descarga atmosférica. Este tópico contudo é extremamente controverso e gera permanente polêmica.

CAPÍTULO 2 CÁLCULO NUMÉRICO DA TENSÃO INDUZIDA

Introdução :

As expressões (1.1) e (1.2) obtidas por Rusck dão o valor da tensão induzida numa linha infinita e homogênea. Apesar de computar todos os efeitos de interação da linha com o campo gerado por uma descarga esta expressão é de pequena aplicação, uma vez que as linhas reais são finitas e apresentam descontinuidades. Desta forma, torna-se necessário acrescentar à expressão de Rusck fatores que compensem a presença de descontinuidades e de terminações na linha. Estes fatores são obtidos pela simples aplicação do teorema da superposição no ponto onde existe a descontinuidade. A aplicação do teorema da superposição pressupõe que o sistema é linear.



2.1 Fatores de Compensação :

Os tipos de descontinuidades aqui analisados são :

- Aterramento num dos extremos de uma linha infinita (fig.2.1-a,b)
- Aterramento num ponto intermediário de uma linha infinita (fig.

2.1-c)

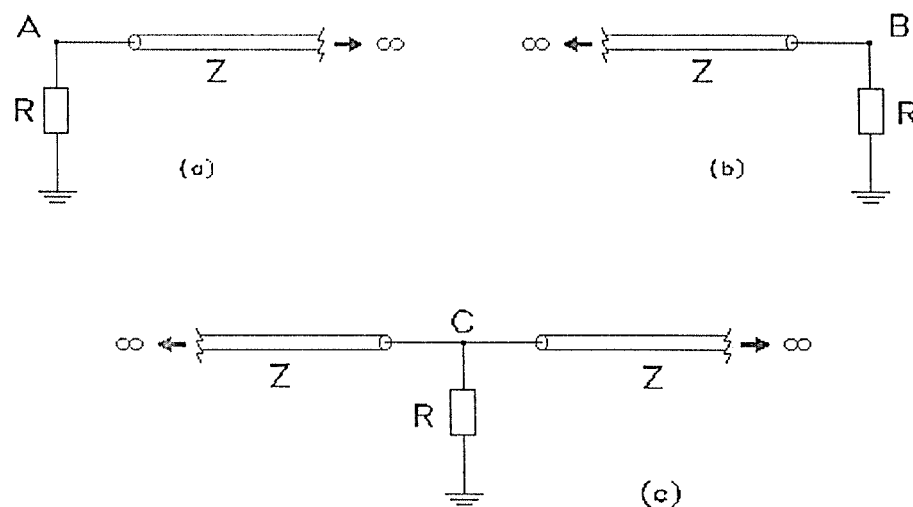


Figura 2.1 - Descontinuidades numa linha infinita :

- (a) e (b) Aterramento nas extremidades
- (c) Aterramento num ponto intermediário

A partir do teorema da superposição pode-se escrever a tensão induzida real (U) num determinado ponto de descontinuidade como a soma da tensão induzida (U_R) no ponto (calculada para uma linha homogênea) com uma tensão de compensação (ΔU) pela existência da descontinuidade neste ponto. Assim :

$$U(x,t) = U_R(x,t) + \Delta U(x,t) \quad (2.1)$$

Utilizando a teoria de ondas viajantes (Bewley 1963) pode-se escrever o valor real da tensão induzida nos pontos de descontinuidade como a soma das tensões

incidentes com as tensões refletidas na descontinuidade. Desta forma, as tensões nos pontos A, B e C da figura (2.1) são :

$$(a) \quad U(x_A, t) = U_2(x_A, t) + k_A U_2(x_A, t) \quad k_A = \frac{R-Z}{R+Z} \quad (2.2)$$

$$(b) \quad U(x_B, t) = U_1(x_B, t) + k_B U_1(x_B, t) \quad k_B = \frac{R-Z}{R+Z} \quad (2.3)$$

$$(c) \quad U(x_C, t) = U_1(x_C, t) + k_{CD} U_1(x_C, t) + U_2(x_C, t) + k_{DC} U_2(x_C, t)$$

$$k_{CD} = k_{DC} = \frac{(R//Z) - Z}{(R//Z) + Z} = k_C$$

$$U(x_C, t) = U_R(x_C, t) + k_C U_R(x_C, t) \quad (2.4)$$

onde :

k_A é o fator de reflexão real para ondas incidindo no ponto A da figura 2.1-a

k_B é o fator de reflexão real para ondas incidindo no ponto A da figura 2.1-b

k_{CD} , k_{DC} ou k_C é o fator de reflexão real para ondas incidindo no ponto C da figura 2.1-c

Reescrevendo a expressão (2.1) em função do fator de compensação :

$$\Delta U(x, t) = U(x, t) - U_R(x, t) \quad (2.5)$$

Aplicando a expressão (2.5) em (2.2), (2.3) e (2.4) obtêm-se as tensões de compensação :

$$(a) \quad \Delta U(x_A, t) = U(x_A, t) - U_R(x_A, t)$$

$$= U_2(x_A, t) + k_A U_2(x_A, t) - U_1(x_A, t) - U_2(x_A, t)$$

$$= k_A U_2(x_A, t) - U_1(x_A, t) \quad (2.6)$$

$$(b) \quad \Delta U(x_B, t) = U(x_B, t) - U_R(x_B, t)$$

$$= U_2(x_B, t) + k_B U_1(x_B, t) - U_1(x_B, t) - U_2(x_B, t)$$

$$= k_B U_1(x, t) - U_2(x_B, t) \quad (2.7)$$

$$(c) \quad \Delta U(x_C, t) = U(x_C, t) - U_R(x_C, t)$$

$$= U_R(x_C, t) + k_C U_R(x_C, t) - U_R(x_C, t)$$

$$= k_C U_R(x_C, t) \quad (2.8)$$

É interessante observar que pode-se atribuir um significado físico às expressões (2.6), (2.7) e (2.8): as expressões referentes a aterramentos nas extremidades retiram da expressão de Rusck a parcela correspondente à existência da linha num dos lados da descontinuidade $[-U_1(x,t)]$ e acrescenta a ela uma parcela referente à reflexão da contribuição da parte da linha existente, no ponto de descontinuidade $[k_A U_2(x,t)]$. No caso de aterramento num ponto intermediário, a compensação se resume a acrescentar à expressão de Rusck as reflexões das componentes na descontinuidade $[k_C U_R(x,t)]$.

As expressões (2.6), (2.7) e (2.8) só permitem calcular a tensão induzida no ponto de descontinuidade, além de não levarem em conta a existência de outras descontinuidades, cujos efeitos se propagam e atingem todos os pontos da linha. Desta forma, as tensões incidentes numa descontinuidade não são apenas referentes às parcelas de Rusck mas também às demais descontinuidades existentes ao longo da linha. Para que os efeitos de todas as descontinuidades possam ser considerados simultaneamente e se possa saber o valor da tensão induzida em qualquer ponto da linha, deve-se utilizar um programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

2.2 Cálculo de Transitórios :

Como foi visto, uma vez obtidas as expressões das fontes de compensação (2.6), (2.7) e (2.8), estas podem ser modeladas de acordo com qualquer método de cálculo de transitórios, desde que o método permita a injeção das fontes de compensação nos pontos de descontinuidade.

Em sua dissertação de mestrado, Lopes (Lopes 1990) implementou os fatores de compensação num programa de cálculo de transitórios baseado no método implementado por Dommel (Dommel 1969, Dommel 1986). Para tanto, modelou as fontes de compensação como fontes de corrente. A impedância interna das fontes, de forma a preservar os fatores de reflexão nos pontos de descontinuidade, deve ser igual

ao valor da descontinuidade que se quer modelar. O valor da corrente injetada produz, no ponto da descontinuidade, a variação de tensão que compense a existência do aterramento naquele ponto.

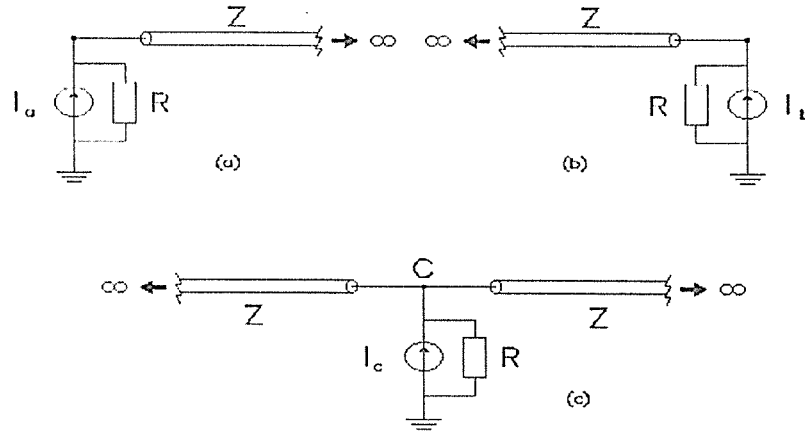


Figura 2.2 - Modelos de fontes de compensação :
 (a) e (b) Para aterramento nas extremidades
 (c) Para aterramento num ponto intermediário

Aplicando o teorema de Norton, as fontes de corrente (figura 2.2) para os fatores de compensação (2.6), (2.7) e (2.8) são :

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad I_A &= \frac{\Delta U(x_A, t)}{(R // Z)} = \left(\frac{R+Z}{R \cdot Z} \right) \left[\left(\frac{R-Z}{R+Z} \right) U_2(x_A, t) - U_1(x_A, t) \right] \\
 &= \left(\frac{R-Z}{R \cdot Z} \right) U_2(x_A, t) - \left(\frac{R+Z}{R \cdot Z} \right) U_1(x_A, t) \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(b)} \quad I_B &= \frac{\Delta U(x_B, t)}{(R // Z)} = \left(\frac{R+Z}{R \cdot Z} \right) \left[\left(\frac{R-Z}{R+Z} \right) U_1(x_B, t) - U_2(x_B, t) \right] \\
 &= \left(\frac{R-Z}{R \cdot Z} \right) U_1(x_B, t) - \left(\frac{R+Z}{R \cdot Z} \right) U_2(x_B, t) \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{(c)} \quad I_C &= \frac{\Delta U(x_C, t)}{(R // Z) // Z} = \left(\frac{2R+Z}{R \cdot Z} \right) \left[\left(-\frac{Z}{2R-Z} \right) U_R(x_C, t) \right] \\
 &= \frac{1}{R} U_R(x_C, t) \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

O algoritmo de cálculo da tensão induzida implementado por Lopes (Lopes, 1990) é o seguinte :

1) A partir da configuração da linha, dos parâmetros e da localização da descarga, calcula-se o valor da expressão (1.1) (que é a equação de Rusck para uma linha infinita e homogênea), nos pontos de interesse.

2) A partir das equações (2.9), (2.10) e (2.11) determinam-se as fontes de compensação a serem injetadas nos pontos de descontinuidade e calcula-se o transitório eletromagnético, obtendo-se nos pontos de interesse a variação da tensão em função das várias fontes de compensação injetadas e das múltiplas reflexões.

3) Soma-se a tensão de compensação (obtida do cálculo do transitório eletromagnético) com a tensão obtida no passo (1) obtendo-se a real tensão induzida na linha.

Uma descrição detalhada desta implementação, além de comparação com simulações em modelo reduzido foi feita por Lopes (Lopes, 1990). O cálculo de transitórios utilizado neste trabalho segue o algoritmo descrito acima, originalmente proposto por Lopes.

CAPÍTULO 3 GERAÇÃO DE PARÂMETROS DAS DESCARGAS

Introdução :

Nos capítulos anteriores foi apresentado um método para determinar a tensão induzida numa linha com descontinuidades. Assim pode-se conhecer a resposta de uma linha com determinada configuração frente a uma descarga cujo ponto de incidência e parâmetros são conhecidos.

Os fatores que determinam as características de uma descarga atmosférica são tão diversos que torna-se difícil representar as descargas por um modelo determinístico. Uma vez que o desempenho da linha é função das descargas que incidem próximas a ela, sua análise de forma determinística também não é possível. Torna-se necessário então estudar-se o desempenho da linha a partir de um modelo probabilístico. O modelo implementado simula o comportamento da linha ao longo de vários anos utilizando o método de Monte Carlo (Apêndice I ; Sobol 1983) para gerar os parâmetros das descargas.

São gerados os seguintes parâmetros : número de descargas para terra por ano, localização, valor de pico da corrente, velocidade de propagação e tempo para atingir o pico de corrente.

3.1 Número anual de descargas para terra :

O número de descargas que atingem o solo numa determinada área é dado por :

$$N = N_g.S \quad (3.1)$$

onde :

S : área sob observação (km^2)

N_g : densidade de descargas para terra, medida em descargas por km^2 por ano

A densidade de descargas para terra pode ser medida utilizando-se contadores de descargas ou calculada a partir do nível cerâmico (número de dias de trovoadas ouvidos por ano) da região (Anderson 1980).

De forma a simular a variação climática de ano para ano foi considerado que o número de descargas para terra é uma variável aleatória exponencialmente distribuída em torno da média (ou parâmetro) $N_g.S$ (CEMIG/DEE/FCO 1980). Tal escolha se deve ao fato de não existir nenhum estudo a respeito e esta distribuição ser a que melhor aproxima fenômenos naturais.

O algoritmo para a determinação de N é :

$$\text{Média} = N_g.S$$

$$S = 0$$

$$i = 1$$

Repita

$$Y = -\ln(U_i)$$

$$S = S + Y$$

$$i = i + 1$$

até que $(S \geq \text{Média})$

$$N = N - 1$$

onde U_i é um número aleatório

Conhecido o número de descargas num determinado ano deve-se obter os parâmetros destas descargas.

3.2 Localização :

O ponto de incidência da descarga é tomado aleatoriamente sobre a área de observação. É necessário saber então se a descarga é uma descarga direta ou lateral. Para isto é calculado o raio de atração da linha. Existem basicamente duas formulações para o cálculo do raio de atração (**R**), ambas obtidas de dados de campo :

$$R = 16.03 H^{0.61} \quad (\text{Anderson 1980}) \quad (3.2)$$

$$R = 10.0 I^{0.65} \quad (\text{Anderson 1982}) \quad (3.3)$$

onde :

H é a altura da linha (m)

I é a corrente de retorno da descarga (kA)

Foi utilizada a expressão 3.2, por ser esta a expressão adotada pelo grupo de pesquisas da África do Sul, cujos resultados são reproduzidos neste trabalho.

3.3 Parâmetros da corrente de descarga :

3.3.1 Valor de pico da corrente :

Os valores de pico das correntes de descarga são obtidos da aplicação do método de Monte Carlo (Sobol 1983; Anderson 1961). Conhecendo-se a função distribuição de probabilidades acumulada dos valores de pico da corrente (ou seja, a probabilidade de que a corrente da descarga não exceda um determinado valor) pode-se gerar este parâmetro usando :

$$I_i = f_1(U_i)$$

$$Tf_i = f_{TF}(U_i)$$

onde :

Tf_i é o tempo de frente da i -ésima descarga

f_{TF} é a função distribuição de probabilidade acumulada

U_i é um número aleatório

CAPÍTULO 4

DADOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES E TESTES DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Introdução :

Neste capítulo são apresentados os dados utilizados nas simulações. São feitos testes com a rotina de Monte Carlo para a verificação dos parâmetros gerados por esta e são feitas comparações entre os valores simulados e os medidos.

4.1 Dados utilizados na simulação dos parâmetros das descargas :

Para a simulação dos valores de pico da corrente de retorno das descargas foi utilizada a distribuição acumulada em frequência adotada pelo grupo 33.01 (Descargas Atmosféricas) do CIGRÉ (Anderson, 1980). Esta distribuição é baseada em medição de valores de pico de correntes de descargas descendentes, em estruturas de, no máximo, 60 m de altura. O valor máximo de altura das estruturas de medição é uma tentativa de se reduzir a possibilidade de descargas ascendentes.

A análise dos dados realizada por Eriksson e Popolanski (Anderson, 1980) foi feita sobre o seguinte universo :

- 18 medições na Austrália
- 123 medições na Tcheco-Eslováquia
- 3 medições na Polônia
- 11 medições na África do Sul
- 14 medições na Suécia
- 125 medições na Suíça
- 44 medições nos Estados Unidos

Em função do pequeno universo de amostras sobre o qual se basearam e da discrepância existente entre os resultados, os autores determinam duas retas, como se pode ver na figura 4.1 (traçadas sobre a distribuição dos dados num plano log normal) que se interceptam em 20 kA e que melhor aproximam os dados. Assim, arbitrariamente, determinaram dois regimes : o regime de blindagem (com descargas abaixo de 20 kA) e o regime de "back-flash" (com descargas acima de 20 kA). Dentre os valores medidos nenhum foi menor que 3 kA, nem maior que 200 kA. Existem

também valores obtidos pela CEMIG em sua estação de coleta de descargas da Estação do Cachimbo (Araújo 1990), tendo sido coletadas apenas 25 descargas, das quais apenas 60% são presumidas como descendentes.

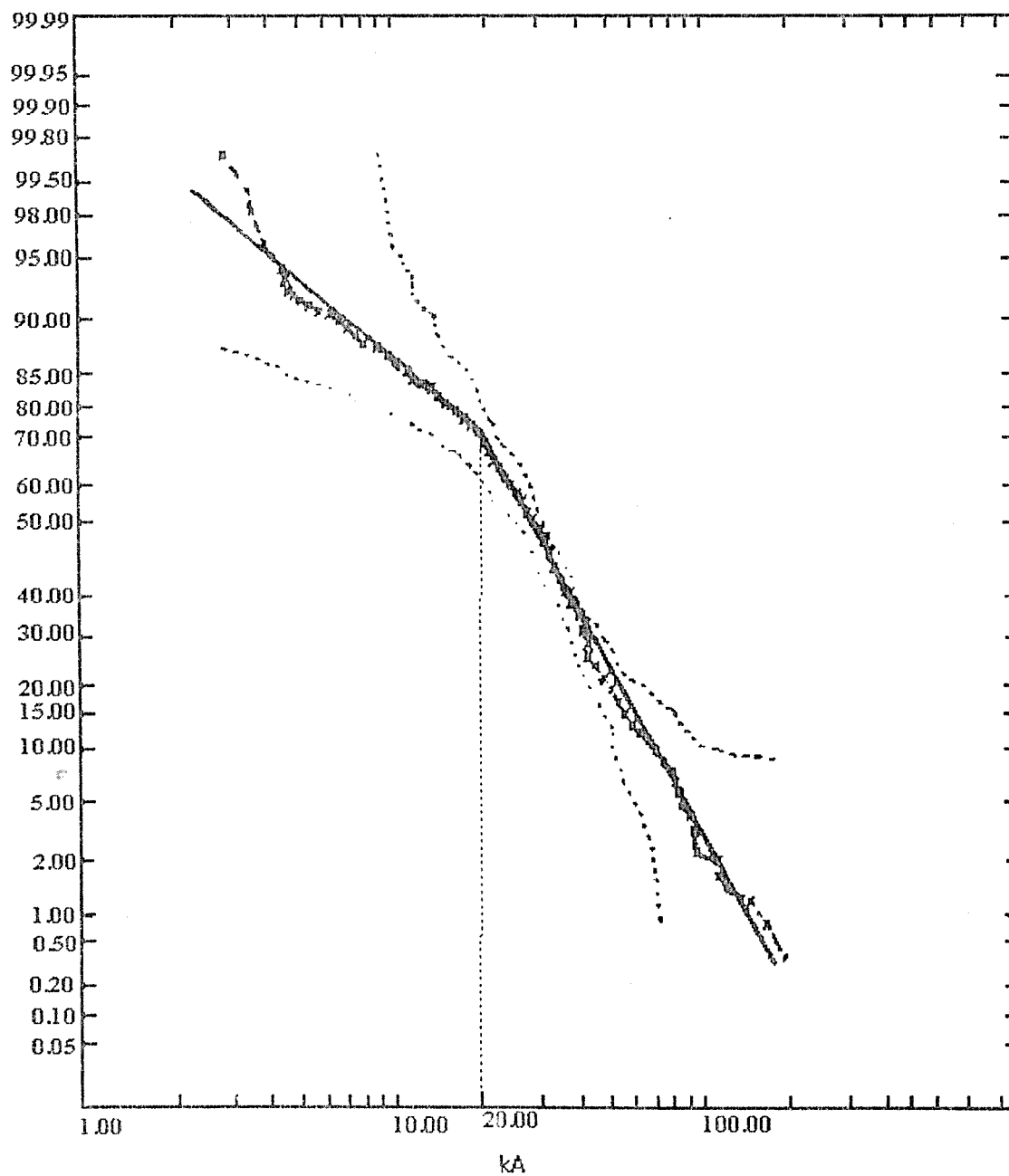


Figura 4.1 - Curvas de corrente recomendadas pelo CIGRÉ

Apesar de terem sido feitas poucas medições (338) e estas estarem espalhadas po todo o mundo, com uma parcela significativa (44%) medida na Europa, esta é a única distribuição em frequência acumulada de valores de pico de corrente disponível na literatura mundial, tendo sido recomendada pelo CIGRÉ.

A CEMIG iniciou em 1974 um projeto de medição de correntes de descargas atmosféricas através de elos magnéticos instalados em torres de suas linhas de transmissão de 138 kV (Araújo, 1990), sendo sua curva de distribuição de frequência acumulada sensivelmente mais alta que a curva do CIGRÉ, apresentando um valor com 50% de probabilidade de ocorrência de 45.5 kA, contra 30 kA apresentado pela curva do CIGRÉ.

A curva de distribuição de frequência acumulada para os tempos de frente das descargas simuladas (tabela 4.1) é a obtida de observações feitas no Monte San Salvatore, na Europa (Berger, 1975). É interessante ressaltar que os valores de tempo de frente foram levantados de medições que correspondem a uma parte daquelas usadas para compor a curva dos valores de pico de corrente, ou seja, as duas curvas foram obtidas de massas de dados diferentes. Além disto, as medições de tempo de frente e valor de pico não são simultâneas. Cada um destes parâmetros foi levantado separadamente. Estas medidas foram analisadas posteriormente pelo grupo 33.01 do CIGRÉ (Anderson, 1980) e apesar de não serem simultâneas com as de valor de pico de corrente, são também recomendadas como padrão.

Tempo de frente (μs)	1	2	3	5	6	7	7.9	8.2	10	11.5	30	40
Probabilidade (%)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	99	100

Tabela 4.1 - Distribuição de frequência acumulada para tempos de frente

O tempo de semi-cauda das descargas foi tomado neste trabalho como um valor constante de $50\mu s$, uma vez que nenhuma observação estatística deste

parâmetro foi encontrada na literatura. Como o objetivo principal das simulações realizadas é obter os valores de pico das tensões induzidas a consideração deste parâmetro como uma constante não conduz a erros significativos para os tempos totais de observação dos fenômenos transitórios escolhidos.

Dentre os valores medidos pelo grupo 33.01 do CIGRÉ estão também o número de descargas subseqüentes, sendo obtida a sua curva de distribuição de frequência acumulada. Desta forma pode-se simular descargas subseqüentes a partir de uma descarga principal. Os transitórios devidos às descargas subseqüentes são simulados como se fossem de uma descarga isolada, uma vez que ocorrem a intervalos de alguns a algumas dezenas de milissegundos (Anderson, 1980) entre a descarga principal e a primeira subseqüente e entre subseqüentes. Este intervalo é suficiente para que todo o transitório ocorra. Por simplificação, adotou-se para a curva de valores de frequência acumulada de valor pico de corrente a mesma curva das descargas principais, rebaixada em 30%, além do fato de que a corrente das subseqüentes nunca ultrapassa a 70% do valor de pico da corrente da descarga principal. Também para o tempo de frente das descargas subseqüentes a curva adotada foi a mesma das descargas principais só que elevada em 30%, com o mínimo tempo de frente igual a 130% do da descarga principal. Estes valores tem boa concordância com os sugeridos pelo CIGRÉ (Berger, 1975; Anderson, 1980).

A partir destes dados e utilizando-se o método de Monte Carlo (Anderson, 1961; Currie, 1971; Sargent, 1972; Liew, 1982; Sobol, 1983) são gerados os parâmetros das descargas cujo transitório eletromagnético será simulado, de forma a obter o valor de pico da tensão induzida. O apêndice I apresenta de forma sucinta o método de Monte Carlo.

4.2 Testes da geração de parâmetros :

Para analisar a confiabilidade dos parâmetros gerados foram feitos alguns testes. Os parâmetros testados foram : o gerador de números randômicos, a distribuição das descargas na área de observação, os valores de pico de corrente e de tempo de frente

4.2.1. Números randômicos

Na geração de números randômicos foi utilizado o gerador interno (a função Random) da linguagem PASCAL/VS , da IBM. Este gerador necessita de uma semente inicial, a partir da qual é gerada uma seqüência de números aleatórios, entre 0 e 1. Para a geração da semente foi utilizado um gerador pseudo-aleatório, que gera uma seqüência de 2147483647 números diferentes dados por :

$NextSeed = (Seed * 16807) \text{ Mod } 2147483647$ onde mod é o operador de divisão inteira.

Foram realizados dois testes com a função Random. O primeiro foi calcular a média de um conjunto de números gerados. Esta média deve ser igual a 0.5 se os números estiverem igualmente distribuídos na faixa entre 0 e 1. A média obtida dos números gerados foi 5.0040380926693E-01. O outro teste compreende a geração de um conjunto de números aleatórios e sua separação por faixas. Dividindo-se o intervalo que vai de 0 a 1 em 12 faixas, deve-se ter em cada um dos intervalos de 0.1 a 0.9 10% dos números gerados, nos intervalos de 0 a 0.01 e de 0.99 a 1.0 deve-se ter 1% e nos intervalos de 0.01 a 0.1 e 0.9 a 0.99 deve-se ter 9%. O resultado obtido é mostrado na figura 4.2.

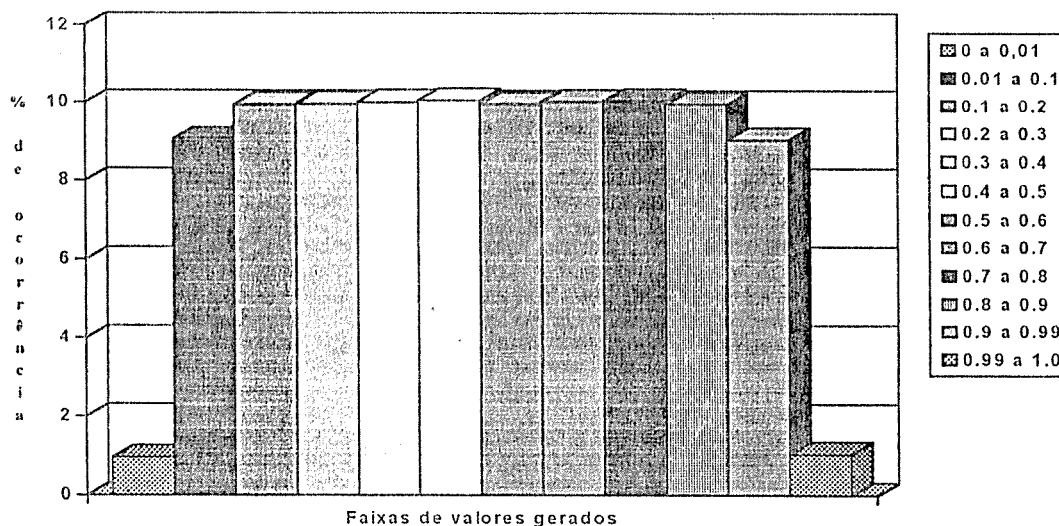


Figura 4.2- Distribuição dos números randômicos gerados

4.2.2. A posição das descargas :

Quando utiliza-se um valor fixo para o raio de atração da linha ou calcula-se seu valor segundo a altura da linha (Eriksson, 1980) determina-se uma sub-área dentro da área de observação, conforme a figura 4.3 .

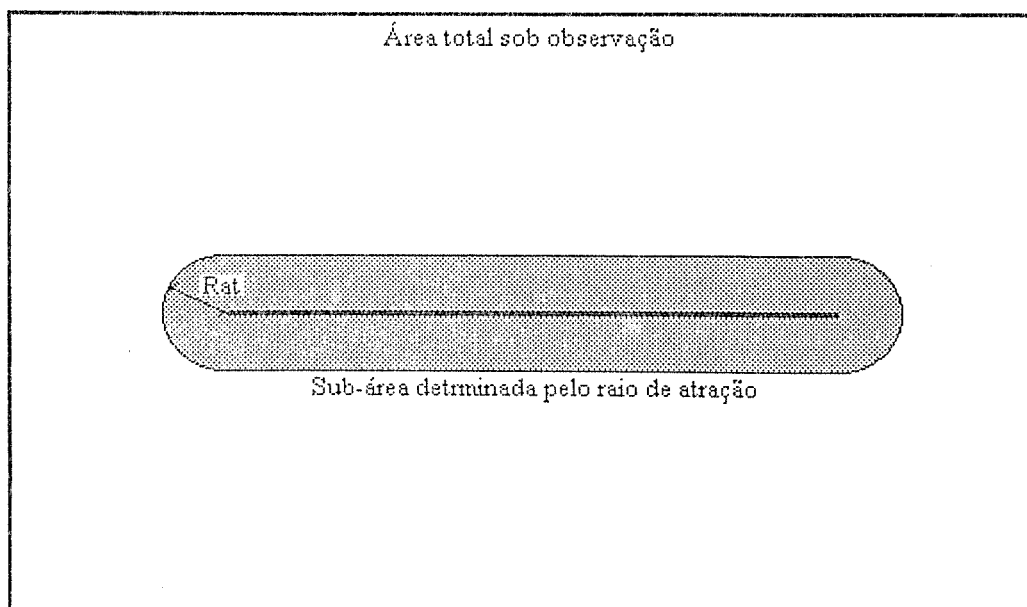


Figura 4.3 - Modelo da área de observação de descargas

Se as descargas estiverem aleatoriamente distribuídas na área S_t pode-se dizer que :

$$\frac{N_d}{N} = \frac{S_a}{S_t}$$

onde :

N_d : número de descargas dentro da sub-área (descargas diretas)

N : número total de descargas simuladas

S_a : sub-área determinada pelo raio de atração da linha

S_t : área de observação

Nas simulações apresentadas neste trabalho, comparando-se a relação de áreas com a relação de descargas foram obtidos erros da ordem de 2%.

4.2.3. Os valores de corrente de pico e tempo de frente :

O teste realizado com estes parâmetros é bastante simples. A partir da massa de dados gerada (valores de tempo de frente e corrente de pico das descargas) foram feitas análises de distribuição em frequência de ocorrência e estas distribuições foram comparadas com aquelas apresentadas pelo CIGRÉ e que serviram de base para a geração dos valores. A comparação obtida dos parâmetros corrente de pico e tempo de frente gerados através do método de Monte Carlo com aquelas a partir das quais foram geradas é apresentada nas figuras 4.4 e 4.5 :

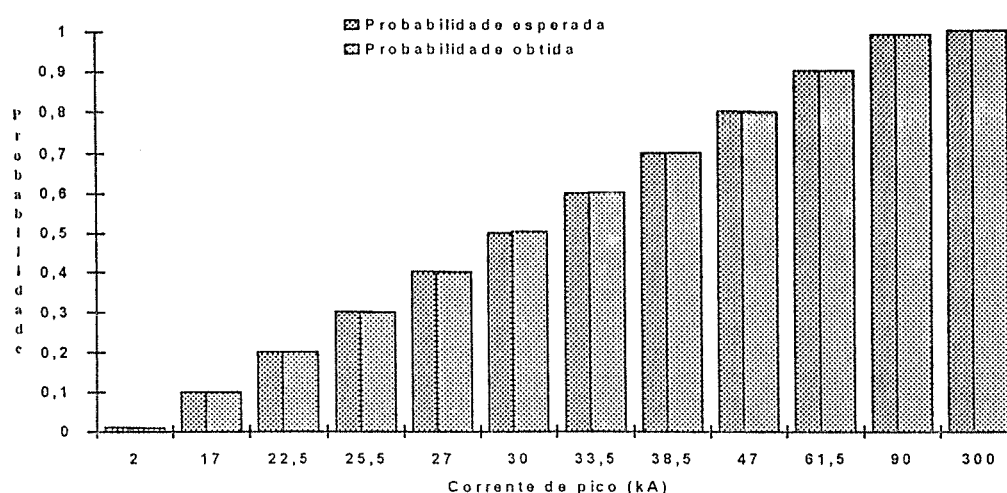


Figura 4.4 - Comparação de valores esperados e obtidos para frequência de ocorrência de correntes de pico

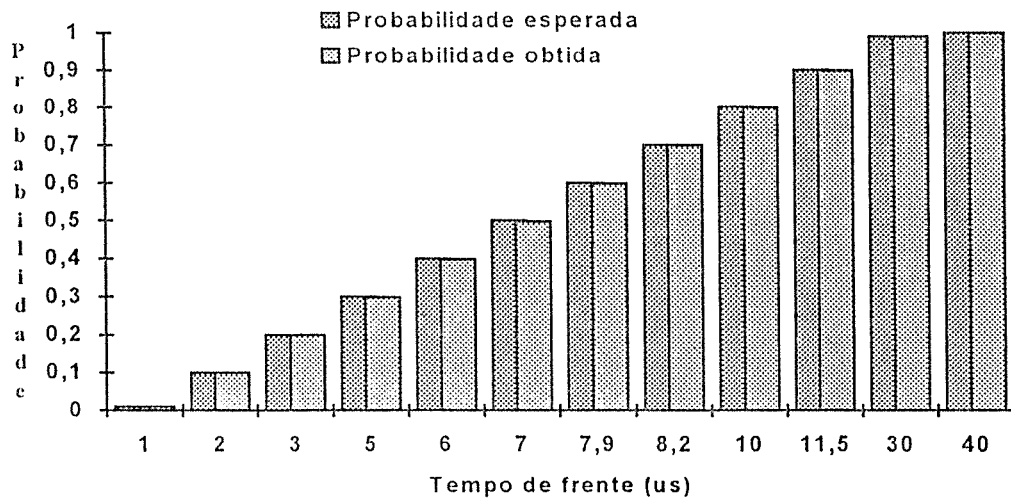


Figura 4.5 - Comparação de valores esperados e obtidos para frequência de ocorrência de tempos de frente

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NA ÁFRICA DO SUL

Introdução :

Para que se possa avaliar a teoria de Rusck no cálculo das tensões induzidas, bem como do pacote computacional desenvolvido neste trabalho, precisa-se fazer uma comparação entre os dados obtidos de simulação e valores medidos.

A principal fonte de dados de medição de tensão induzida em linhas aéreas conhecida na literatura mundial é o projeto de pesquisa desenvolvido na África do Sul, com medições realizadas numa linha experimental de aproximadamente 10 km.

Neste capítulo é descrito o projeto realizado na África do Sul e são apresentados os resultados da comparação das simulações realizadas no presente trabalho e as medições realizadas na África do Sul.

5.1 O Projeto NEERI-ESCOM :

A linha experimental a partir da qual se levantaram os dados medidos de tensão induzida faz parte de um projeto de estudos desenvolvido na África do Sul pelo NEERI (National Electrical Engineering Research Institute) e a ESCOM (Electricity Supply Commission), tendo sido iniciado em 1978 e ainda em curso (Eriksson, 1980; Eriksson 1982; Geldenhuys, 1990).

A linha experimental foi construída na região do Transval, onde a altitude média em relação ao nível do mar é de 1500 m, sendo o terreno levemente ondulado. A linha construída segue os padrões de linha rural de 11 kV sul africanos :

- postes de madeira tratada
- isoladores de porcelana tipo pino
- configuração horizontal dos condutores
- cruzetas de madeira
- braçadeiras de ferro galvanizado

A linha tem 9950 m de extensão, sendo construída na direção Leste-Oeste. Na extremidade ocidental os cabos fase são aterrados. A extremidade oriental termina num centelhador com tensão de disparo de 200 kV.

Existem duas estações de registro de dados ao longo da linha. Uma, chamada NEERI, está a 4300 m da extremidade ocidental e tem como principal objetivo estudar as formas de onda das tensões induzidas e sua relação com descargas próximas. A outra fica na extremidade Leste e tem como objetivo a medição das correntes na linha e nos pára-raios (instalados numa fase posterior do projeto). Os dados usados no presente trabalho foram obtidos na estação NEERI. As medições foram feitas através de um divisor de tensão capacitivo, com banda de passagem de 15

simulada como resistência nula, uma vez que não existem dados a respeito deste valor.

Estação chuvosa	Linha trifásica Lado Leste aberto	Cabo pára-raios e aterramento	60 Hz	Pára-raios
78/79 79/80	Lado Oeste aterrado NBI : 500 kV	Não	Não	Não
80/81 81/82	Lado Oeste aterrado NBI : 500 kV	Não	Não	SiC distanciados de 1 km
82/83 83/84	Alimentado via cabo NBI : 500 kV	Não	Sim	SiC e ZnO distanciados de 1 km
84/85	Lado Oeste aterrado NBI : 500 kV	Sim, aterrado nos extremos	Não	Não
85/86 86/87	Alimentado via cabo NBI : 300 kV	Não	Sim	Nos extremos e no centro da linha
87/88	Alimentado via cabo Lado Oeste aterrado via capacitor de 2.0 uF	Sim, aterrado a cada 900 m	Sim	No extremo Oeste
87/88 88/89		Sim, aterrado a cada 300 m	Sim	No extremo Oeste
88/89		Sim, aterrado a cada poste	Sim	No extremo Oeste
90/91			Sim	No extremo Oeste e no centro da linha. Pára-raios só nas fases

Tabela 5.1 - Configurações da linha experimental do projeto NEERI-ESCOM

5.2 Simulação e Resultados :

Uma vez testada a geração de parâmetros, são geradas as descargas cujo transitório eletromagnético será simulado, através da implementação do modelo de Rusck anteriormente apresentada, de forma a obter o valor de pico da tensão induzida por estas descargas.

O critério adotado para a determinação do número de anos (e por consequência, do número de descargas) a serem simulados foi o de obter precisão nos dados gerados acima de 95%. Foram considerados para isto o teste dos parâmetros gerados e da relação entre áreas, sendo que só quando o maior erro dentre estes dois testes fosse menor que 5% a simulação era interrompida. Observou-se que sempre o teste de relação de áreas era o determinante e que para a precisão desejada, para a área simulada, o tempo necessário era de aproximadamente 300 anos. Assim, foram simuladas descargas equivalentes a 300 anos reais, dos quais foi obtida a média para dois anos, que é o período de observação da África do Sul.

Para determinar a área de observação em torno da linha utilizou-se uma expressão simplificada, proposta por Rusck (Rusck, 1957), para o cálculo do valor de pico da tensão induzida, que é :

$$U_{max} = 30I_0 \frac{h}{y} \quad (5.1)$$

levando-se em conta que a mínima tensão para a qual o sistema de registro da África do Sul é acionado é 12 kV e considerando-se uma corrente de retorno com pelo menos 10% de probabilidade de ocorrência (135 kA). Foi, então, considerada uma área de observação de (6000 x 13950)m² tendo sido utilizada para cálculo do raio de atração a expressão (3.2), que é a expressão recomendada por Eriksson, um dos responsáveis pelo projeto sul africano.

O modelo de linha utilizado tem as mesmas medidas apresentadas na figura

4.1 e o aterramento na extremidade ocidental foi considerado como perfeito (resistência de aterramento zero). A densidade de descargas para terra utilizada foi de 13 descargas por km² por ano que é a média acumulada dos dois primeiros anos de medição na África do Sul. Não foram simuladas descargas subsequentes, uma vez que os dados apresentados pelo grupo sul africano se refere apenas às descargas principais. Os resultados obtidos desta simulação são apresentados na tabela 5.2 e na figura 5.2 :

Tensão Induzida (kV)	Número de descargas cuja tensão induzida é superior a um dado valor	
	Valor medido	Valor calculado
12	281	305
20	192	164
30	122	102
40	100	75
50	76	59
60	62	44
70	53	34
80	38	27
90	32	21
100	27	16
150	7	6
200	5	2
250	2	1
300	1	1

Tabela 5.2 - Comparação de resultados de simulação e medição

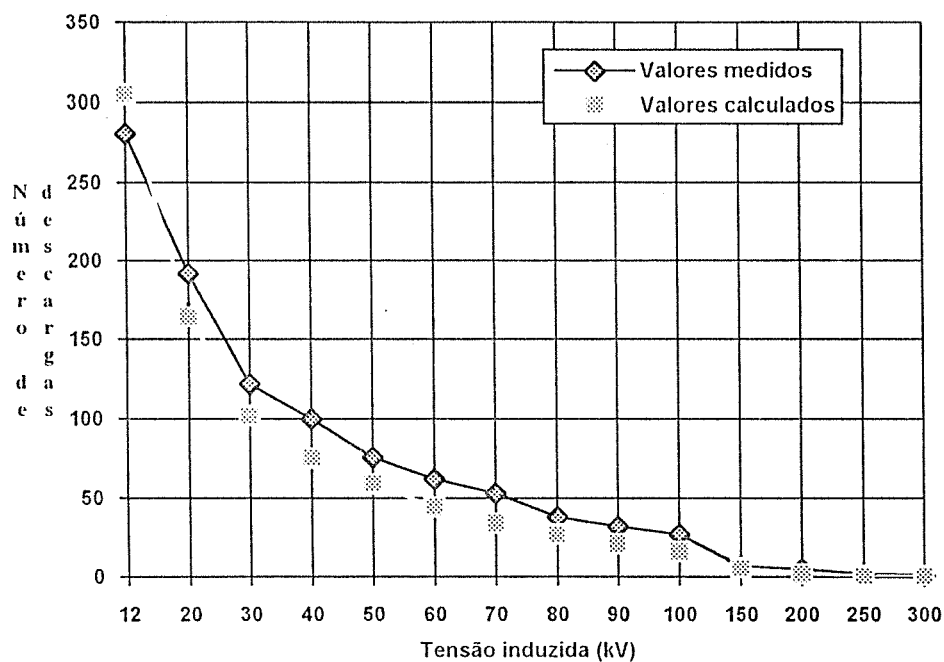


Figura 5.2 - Curva de comparação de resultados de simulação e medição

O grupo de trabalho da África do Sul apresenta em seu trabalho uma simulação, também usando o método de Monte Carlo. Seus resultados são apresentados a seguir, na tabela 5.3 e na figura 5.3, em comparação com os obtidos neste trabalho e em medição.

Tensão Induzida (kV)	Número de descargas cuja tensão induzida é superior a um dado valor			
	Valor medido	Valor calculado África do Sul para h = 8 m	Valor calculado África do Sul para h = 15 m	Valor calculado neste trabalho
12	281	159	363	305
20	192	88	190	164
30	122	51	121	102
40	100	41	81	75
50	76	28	66	59
60	62	22	55	44
70	53	16	40	34
80	38	15	31	27
90	32	12	28	21
100	27	8	24	16
150	7	4	10	6
200	5	0	5	2
250	2	0	2	1
300	1	0	0	1

Tabela 5.3 - Comparação das simulações realizadas na África do Sul com as deste trabalho

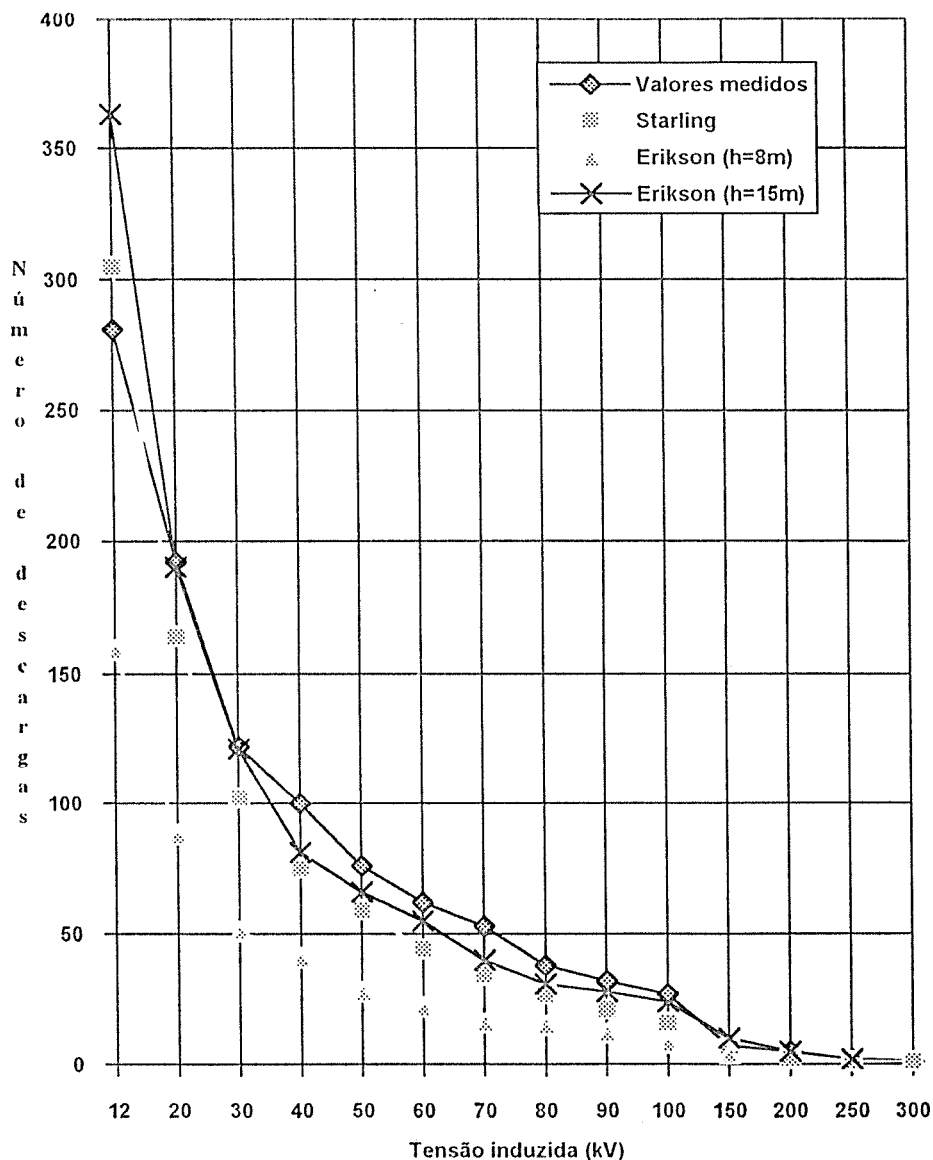


Figura 5.3 - Comparação das simulações realizadas na África do Sul com as deste trabalho

Em cada simulação, para se obter resultados como os apresentados na figura 5.2 e tabela 5.2 são gastas aproximadamente 25 horas de processamento numa CPU IBM 4341. Não se deve levar, contudo, tal tempo em consideração para comparação com outros métodos ou outros sistemas computacionais uma vez que a configuração da CPU disponível é extremamente limitada, não sendo perfeitamente adequada para simulações intensivamente numéricas como as realizadas neste trabalho. A impossibilidade de se utilizar recursos computacionais mais potentes impediu a

realização de um maior número de simulações, levando apenas àquelas necessárias à validação do método aqui apresentado.

BIBLIOTECA
DA
ESCOLA DE ENGENHARIA - UFMG

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

A comparação entre os dados de campo e aqueles obtidos pela metodologia proposta para o cálculo de tensões induzidas conduz a resultados satisfatórios, apesar das imprecisões existentes nos dados disponíveis. Existem inúmeras imprecisões nos dados utilizados, já comentadas, tais como :

- . Não simultaneidade das medições de valor de pico e tempo de frente : as curvas de tempo de frente e corrente de pico foram obtidas em lugares e épocas diferentes. Estes parâmetros não foram medidos simultaneamente.
- . Diversidade dos sistemas e métodos de medição utilizados
- . Distribuição geográfica das medições
- . Dificuldade na discriminação entre descargas ascendentes e descendentes
- . Pequeno intervalo de tempo de medição (2 anos), para cada configuração, na linha experimental sul africana

Desta forma pode-se concluir que a utilização do modelo proposto por Rusck para o cálculo da tensão induzida e o estudo do desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas próximas é satisfatório.

Com relação aos questionamentos referentes à resistividade do solo, nenhuma resposta conclusiva foi obtida. A comparação entre as curvas de dados medidos e simulados **constituem um forte indício** de que o fato do modelo de Rusck considerar o solo como um condutor perfeito não leva a erros significativos para descargas próximas à linha (algumas centenas de metros). Contudo, em função das várias imprecisões embutidas nos dados dos parâmetros das descargas e nas

medições sul africanas não é possível determinar com exatidão a fonte das discrepâncias entre valores medidos e calculados. Assim, não se pode afirmar que a diferença entre os resultados simulados e medidos está nos parâmetros, nem nos valores medidos na África do Sul, tão pouco na teoria de Rusck e em sua implementação aqui apresentada. Conforme os resultados apresentados nos testes realizados no capítulo 4 pode-se garantir que os parâmetros gerados nestas simulação correspondem às curvas recomendadas na literatura internacional como padrão. É importante ressaltar que os resultados obtidos das simulações serão tão mais precisos quanto o forem os dados utilizados na simulação. A utilização de curvas de parâmetros relativos à área em estudos é extremamente importante na precisão dos resultados obtidos.

Considera-se que o objetivo deste trabalho foi alcançado uma vez que este conseguiu apresentar a teoria de Rusck como uma ferramenta de engenharia eficaz no cálculo das tensões induzidas. O método de fontes de compensação apresentado neste trabalho e originalmente proposto por Lopes (Lopes, 1990) mostra-se extremamente atraente para implementação de outros tipos de descontinuidade tais como centelhadores e pára-raios, o que ampliaria a aplicabilidade do método ora apresentado.

Como continuidade natural do desenvolvimento deste trabalho propomos a sua utilização, aliado a métodos de otimização, na determinação de valores e distâncias para aterramento de sistemas com múltiplos pontos de aterramento, em função de valores econômicos de resistência. Para tanto a implementação dos programas resultantes desta dissertação em computadores capacitados a processamentos intensivamente numéricos é imprescindível.

Uma linha de pesquisa bastante interessante é a extensão do algoritmo apresentado para um sistema multi-filar, com a inclusão de não-linearidades (centelhadores e pára-raios) e ramais na linha em estudos. Em sua dissertação Porto

(Porto, 1990) apresenta o cálculo de tensão induzida em sistemas multi-filares multi-aterrados com não-linearidades utilizando um outro algoritmo para a implementação da expressão proposta por Rusck.

Como continuidade das pesquisas na área de tensões induzidas por descargas atmosféricas propõe-se a avaliação quantitativa do efeito da resistividade do solo através de medições em modelo reduzido e em escala real. Uma outra importante sugestão é a medição simultânea de parâmetros de descargas atmosféricas e da tensão induzida causada por estas. A obtenção simultânea dos parâmetros de uma descarga e da tensão induzida por esta é decisiva na determinação da correção dos modelos de interação descarga-linha.

É objetivo de estudos do grupo de pesquisa em descargas atmosféricas a determinação da real influência da resistividade do solo no fenômeno das tensões induzidas.

Apêndice I O Método de Monte Carlo

Introdução :

Este apêndice visa descrever de forma sucinta método de Monte Carlo. As etapas de desenvolvimento matemático não serão apresentadas, ficando na bibliografia citada a sua apresentação completa.

Apesar de sua aplicação ser bastante ampla o método em si é bastante simples e se baseia essencialmente na simulação de variáveis aleatórias.

O método foi apresentado originalmente em 1949, embora o seu princípio já fosse conhecido há muito tempo, sendo utilizado no tratamento de dados de amostras aleatórias. Sua aplicação em larga escala só aconteceu após o aparecimento dos primeiros computadores, uma vez que sem estes o volume de cálculo envolvido na simulação de variáveis aleatórias tornava a utilização do método inviável.

Apesar de muitos acreditarem, o nome Monte Carlo não vem da aplicação deste método ao jogo de roleta e sim do fato desta ser um dos dispositivos mecânicos mais simples capazes de gerar números aleatórios e ser encontrada em abundância naquele principado.

Variáveis aleatórias discretas :

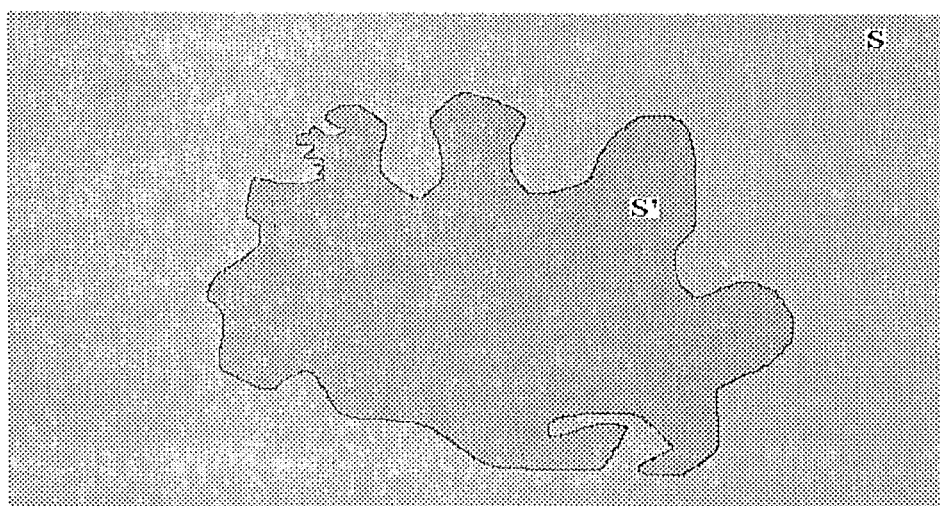
Define-se como "variável aleatória discreta" a variável que, não assumindo necessariamente um valor preciso, pode assumir diversos valores, cada um com uma certa probabilidade de ocorrência. Desta forma, mesmo conhecendo a probabilidade associada a cada valor possível de uma variável aleatória não se pode prever exatamente o valor que ela assumirá numa experiência, embora possa ser previsto o caráter de seu comportamento numa série de experiências, com precisão tão maior

quanto mais longa for a série de simulações desta variável.

Assim, pode-se ver claramente a correção do modelo de variáveis aleatórias dado aos parâmetros das descargas atmosféricas e também da necessidade de uma base de dados estatisticamente correta, ou seja, que descreva corretamente o caráter do comportamento destas descargas para a área em observação. É interessante ainda observar que apesar de os parâmetros das descargas serem variáveis aleatórias contínuas, seus parâmetros são determinados como de uma variável discreta, em função das condições de medição e tratamento do dados. Para minimizar esta discrepância foi feita uma interpolação linear entre os valores discretos tabelados, obtendo-se uma variável "aproximadamente contínua".

Um Exemplo :

O exemplo mais clássico de utilização de variáveis aleatórias é a determinação da área de uma figura. Seja :



onde :
S é a área total sob observação
S' é a área que se quer determinar

Se são distribuídos aleatoriamente N pontos sobre a área S, considerando que N' pontos estão contidos em S', é intuitivo que :

$$\frac{N'}{N} = \frac{S'}{S} \quad \text{ou} \quad S' = \frac{N'}{N} S$$

É interessante observar que a precisão na determinação de S' será influenciada pelo número de pontos e pela uniformidade de sua distribuição sobre S .

Assim vê-se que o algoritmo do método é extremamente simples, limitando-se em geral a um número N de simulações independentes de uma mesma experiência e a obtenção de uma certa média dos resultados destas experiências. Por causa desta particularidade o método também é chamado de método das provas estatísticas.

Pode-se assumir que o erro inerente ao método de Monte Carlo é proporcional a $\sqrt{\frac{D}{N}}$, onde D é uma dada constante, função do método utilizado na simulação das variáveis aleatórias e N é o número de simulações de uma mesma variável. Desta forma, obter precisões muito elevadas utilizando-se o método de Monte Carlo tem um custo computacional muito grande, ficando o método restrito a aplicações onde a precisão se situe entre 5% a 10%.

Apêndice II

O programa de computador CORISCO

Introdução :

Este apêndice visa descrever de forma sucinta o programa de computador no qual foram implementados a geração de parâmetros de descargas e o cálculo da tensão induzida numa linha próxima.

O programa foi implementado em linguagem PASCAL, padrão ISO, e compilado através do compilador PASCAL-VS, da IBM. Sua implementação em outros compiladores é bastante simples desde que estes suportem o padrão ISO. Em função do tempo necessário para completar uma simulação o programa é capaz de executá-la em etapas, informando ao final de cada etapa o tempo total de simulação.

São apresentados os arquivos de entrada e saída utilizados na simulação dos resultados de medição obtidos pela equipe da África do Sul. Estes arquivos são do tipo texto.

Nos arquivos de entrada, as linhas de cabeçalho (destacadas em **negrito**) devem existir obrigatoriamente para que o programa localize e entenda os dados que as seguem. Os comentários (destacados em *itálico*) são opcionais.

Arquivo de entrada :

```

{----- Dados da linha -----}
{ Comprimento (m) | Altura (m) | Tensao de trigger (kV) | Impedancia (Ohm) }
  9950           7.795           12           500
{----- Dados dos aterramentos -----}
1           {Numero de aterramentos}
0.0  0.0    {Posicao (m, a partir da ext. esq.) e valor do aterramento (Ohm)}
{----- Pontos de observacao da tensao induzida -----}
1           {Numero de pontos de observação da tensão induzida}
4950       {Posicao (m, a partir da ext. esq.)}
{----- Dados para simulacao das descargas -----}
{ Ng | Faixa lat. | Faixa ext. | Anos |Formula raio de atracao| Raio de at. (m)}
  13   3000       2000       300       1           {Quando necessário}
{Veloc. fixa| Listar dados desc. |Simular Subs.|Calcular Trans. |Gravar tensoes}
  N           N           N           S           S
0.0  300 {Delta T e tempo total de simulacao, em us   Se Dt = 0 então Dt = 1/40 do maior tempo de transito }
0.0     {Velocidade da corrente de retorno (m/us), caso seja considerada fixa}

```

O dado "tensão de trigger" corresponde à tensão abaixo da qual não serão calculados os transitórios das descargas. Uma vez gerados os parâmetros de uma descarga a tensão por ela induzida é calculada através de uma fórmula simplificada (equação 5.1) e caso ela não exceda a tensão de trigger, seu transitório não é simulado.

O dado "fórmula raio de atração" corresponde a :

1 - equação 3.2

2 - equação 3.3

3 - valor fixo, fornecido no campo seguinte

Arquivo de saída :

RESUMO DOS DADOS DA SIMULACAO :

```

-----
MEDIA DE DESCARGAS POR km2 POR ANO      : xx.xx
TEMPO DE OBSERVACAO                      : xxx Anos
FAIXA DE OBSERVACAO TRANSVERSAL         : xxxx m
FAIXA DE OBSERVACAO NOS EXTREMOS        : xxxx m
COMPRIMENTO DA LINHA EM ESTUDOS         : xxxx m
DESCARGAS POR ANO                       : xxxx.xx
ALTURA DA LINHA EM ESTUDOS             : xx.xx m
IMPEDANCIA DE SURTO DA LINHA EM ESTUDOS : xxx Ohm
Step de tempo utilizado                  : xx.xxxx us
Velocidade da corrente de retorno como funcao do valor de pico da corrente

```

```

MEDIA ANUAL : xxxx.xx Descargas
Total de Descargas Principais Simuladas : xxxxxx
Total de Descargas Subsequentes Simuladas : xxxxxx
Numero de descargas laterais com tensao abaixo de xx.xx kV : xxxxx
Numero de descargas laterais com tensao acima de xx.xx kV : xxxxx
Numero de descargas diretas              : xxxxx

```

```

NO | 10| 20| 30| 40| 50| 60| 70| 80| 90|100|150|200|250|300|
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
x |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

```

```

Simulacao iniciada em xx/xx/xx as xx:xx horas
Simulacao terminada em xx/xx/xx as xx:xx horas
Tempo de CPU usado nesta secao : xxxxx segundos
Tempo de CPU usado na simulacao : xxxxx segundos
Relacao de areas      :
Relacao de descargas  :
Erro de relacao       :

```

A tabela apresentada tem na primeira linha valores de tensão induzida. Nas demais linhas, que correspondem aos nós de observação de tensão e aos aterramentos, tem-se o número de descargas que excederam o valor de tensão induzida correspondente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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
Vol. PAS-91 - No. 4 - July/August 1972
pp 1651 a 1656
- Anderson, R. B. ; Eriksson, A. J.
"Lightning Parameters for Engineering Application"
Electra
No. 69 - 1980
pp 65 a 102
- Araújo, R. L.; Diniz, J. H.; Cherchiglia, L. C.; Erikson, A. J.; Geldenhuys, H. J.
"Applied Lightning Resarch in an Inter-Tropical Mountainous Area"
The First International Conference on Power Distribution (I SIDEE)
Belo Horizonte - Novembro 1990
- Armstrong, H. R. ; Stoelling, H. O. ; Veverka, E. F.
"Impulse Studies on Distribution Line Construction"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-86 - No. 2 - February 1967
pp. 206 a 213
- Barbosa, Célio Fonseca
"Indução Magnética de Linhas de Energia Elétrica em Linhas de Telecomunicações"
Dissertação de Mestrado No. 50 - 1988
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
- Berger, K. ; Anderson, R. B. ; Kröninger, H.
"Parameters of Lightning Flashes"
Electra
No. 41 - July 1975
pp 23 a 37
- Bewley, L. V.
"Traveling Waves in Transmission Systems"
Dover Publications - New York - 1963
- Boaventura, Wallace do Couto
"Estudo da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido"
Dissertação de Mestrado No. 69 - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
- CEMIG
"Relatório Anual de Desligamentos" 1989

CEMIG/DEE/FCO

Projeto de Pesquisa :

"Um Tratamento Probabilístico para a Influência das Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição.

Parte I : Geração e Caracterização das Descargas"

Fundação Christiano Ottoni - Belo Horizonte - 1984

Chowdhuri, P. ; Gross, E. T. B.

"Voltage Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes"

IEE Proceedings

Vol. 114 - No. 12 - December 1967

Chowdhuri, P.

"Analysis of Lightning Induced Voltages on Overhead Lines"

IEEE Transactions on Power Delivery

Vol. PWRD-04 - No. 4 - January 1989

pp 479 a 492

Currie, J. R. ; Choy, L. A. ; Darveniza, M.

"Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-90 - No. 5 - September/October 1971

pp 2305 a 2312

Dommel, H. W.

"Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-phase Networks"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-88 - No. 4 - April 1969

pp. 388 a 399

Dommel, H. W.

"Electromagnetic Transients Program - Reference Manual (EMTP Theory Book)"
The University of British Columbia - August 1986

Eriksson, A. J. ; Meal, D. V.

"Lightning Performance and Overvoltage Surge on a Rural Distribution Line (Final Draft)"

National Electrical Engineering Research Institute

CSIR Special Report - ELEK 202

Pretoria - South Africa - July 1980

Eriksson, A. J. ; Stringfellow, M. F. ; Meal, D. V.

"Lightning Induced Overvoltages on Overhead Transmission Lines"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems

Vol. PAS-101 - No. 4 - April 1982

pp. 960 a 968

Ferreira, Paulo Henrique Novais
"Tensão Induzida em Cabos Telefônicos por Correntes Circulando na sua Blindagem"
Dissertação de Mestrado No. 68 - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Fonseca, Almir Félix Lorenzato da
"Cálculo do Campo Eletromagnético e Análise da Tensão Induzida em Linhas Aéreas
Devido a Descargas Atmosféricas"
Dissertação de Mestrado No. 66 - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Geldenhuis, H. J. ; Gaunt, C. T.
"Insulation Coordination of rural Distribution Lines"
The First International Conference on Power Distribution (I SIDEE)
Belo Horizonte - Novembro 1990

IEEE Task Force
"Investigation and Evaluation of Lightning Protective Methods for Distribution
Circuits"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-88 - No. - August 1969

Liew, A. C. ; Darveniza, M.
"Calculation of the Lightning Performance of Unshielded Transmission Lines"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-101 - No. 6 - June 1982
pp 1471 a 1482

Lopes, Ivan José da Silva
"Estudo do Comportamento de um Condutor Multi-aterrado frente a Tensões
Induzidas por Descargas Atmosféricas"
Dissertação de Mestrado No. 67 - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Master, M. J. ; Uman, M. A.
"Lightning Induced Voltages on Power Lines : Theory"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-103 - No. 9 - September 1984
pp 2502 a 2518

Master, M. J. ; Uman, M. A.
"Transient Electric and Magnetic Fields Associated with Establishing a Finite
Electrostatic Dipole"
American Journal of Physics
Vol. 51 - No. 2 - February 1983

Paulino, José Osvaldo Saldanha
"Influências de Curto Circuito nas Redes de Distribuição nas Redes Telefônicas em
Uso Mútuo de Posteação"
Dissertação de Mestrado No. 39 - 1985
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Porto, Eudes Weber
"Cálculo de Sobretensões em Linhas de Distribuição Devido a Descargas Atmosféricas
Laterais"
Dissertação de Mestrado No. - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Rusck, Sune
"Induced Lightning Over-voltages on Power-Transmission Lines with Special
Reference to the Over-voltage Protection of Low-voltage Networks"
Doctoral Thesis
Transactions of Royal Institute of Technology - Stockolm
No. 120 - 1958

Santos, Ildeu Marques dos
"Modelamento e Cálculo de Indução Magnética na Linha de Energia Elétrica em Linha
Telefônica"
Dissertação de Mestrado No. 74 - 1990
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais

Sargent, M. A.
"The Frequency Distribution of Current Magnitudes of Lightning Strokes to Tall
Structures"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-91 - No. 5 - September/October 1972
pp 2224 a 2229

Sobol, I.
"O Método de Monte Carlo"
Iniciação na Matemática
Editora MIR - Moscou - 1983

Uehara, Ken ; Ohwa, Genichi
"Investigation of Lightning Damages on Distribution Lines"
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
Vol. PAS-87 - No. 4 - April 1968
pp. 1018 a 1025

Umam, Martin A.
"Lightning"
Dover Publications, Inc. - New York - 1984

Uman, M. A. ; Rubinstein, M.
"Methods for Calculating the Electromagnetic Fields From a Known Source
Distribution : Application to Lightning"
IEEE Transactions on Magnetic Compatibility
Vol. EMC-31 - No. 2 - May 1989
pp 183 a 189