

Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas
em Linhas Aéreas Polifásicas e Multiaterradas :
Implementação no PSCAD[®]/EMTDC[™]

Autor : Sandro de Castro Assis

Orientador : Prof. Wallace do Couto Boaventura

Agradecimentos

A Deus pela perseverança e força nos momentos difíceis.

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão da UFMG – LEAT.

Aos amigos e professores Wallace do Couto Boaventura, Ivan José Silva Lopes e José Osvaldo Saldanha Paulino pela convivência e paciência.

Ao engenheiro Elilson Eustáquio Ribeiro pela convivência e amizade, que resultaram em um crescimento profissional.

Aos meus pais, Geraldo Sérgio de Assis e Maria das Graças de Castro e Assis, ao meu irmão Augusto e minha namorada Kenia, pela paciência, companheirismo, amizade e amor dedicado ao longo de todos os anos (razões e alicerces de minha vida).

Aos amigos Fernando Albert, Júnio César, Rodrigo Campana e Thiago Milagres pela amizade e momentos de descontração.

A todos que foram importantes direta ou indiretamente nesta caminhada.

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte financeiro.

Este trabalho é dedicado aos meus pais:
Geraldo Sérgio de Assis e Maria das
Graças de Castro e Assis e à minha avó
Dina

Há um menino
Há um moleque
Morando sempre no meu coração
Toda vez que o adulto balança
Ele vem pra me dar a mão

Há um passado no meu presente
Um sol bem quente lá no meu quintal
Toda vez que a bruxa me assombra
O menino me dá a mão (...)

(Milton Nascimento e Fernando Brant)

Resumo

Este trabalho apresenta a implementação do cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas aéreas polifásicas. Tal implementação é feita utilizando-se um pacote de cálculo de transitórios eletromagnéticos na forma de um componente dedicado.

A metodologia implementada é baseada na teoria proposta por Sune Rusck em 1957 e adaptada por Ivan Lopes em 1990. A teoria de Rusck, que apresenta uma expressão analítica para a tensão induzida em linhas infinitas e sem descontinuidade sobre um solo de resistividade nula, é adaptada para se levar em consideração o fato das linhas serem finitas e possuírem aterramentos. O componente implementado estende a aplicação da metodologia para linhas aéreas multifilares e com aterramentos múltiplos.

São analisados diversos casos teóricos, buscando compreender a influência dos parâmetros da descarga atmosférica e de configurações de multiaterramento na tensão induzida em linhas aéreas multifilares. Os resultados obtidos são comparados com os obtidos por outros autores validando a implementação realizada.

Abstract

This work presents the implementation of lightning induced voltage calculation in multiphase overhead lines. The implementation is done using an electromagnetic transient calculation program as a dedicated component.

The implemented methodology is based on the theory proposed by Sune Rusck in 1957 and adapted by Ivan Lopes in 1990. Rusck's theory, which provides an equation for the lightning induced voltage in infinite overhead lines without discontinuities over a perfect ground, is modified to take into account finite lines with multiple grounding. The implemented component extends the methodology to multiphase overhead lines with multiple grounding.

Theoretical cases are analyzed clarifying the influence of lightning parameters and grounding configuration in induced voltages in multiphase lines. The results are compared to those from other authors validating the implementation.

Índice Analítico

Agradecimentos	i
Resumo	iv
Abstract	v
Índice Analítico	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Motivação	2
1.3 Revisão bibliográfica	3
1.4 Estrutura do texto	6
2 TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	8
2.1 Cálculos da tensão induzida por descargas atmosféricas	8
2.2 Conceitos gerais sobre descargas atmosféricas	9
2.3 Canal de descarga	15
2.4 Teoria de Rusck	16
3 MODELO PARA CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS POLIFÁSICAS BASEADO NA TEORIA DE RUSCK	28
3.1 Introdução	28
3.2 Matriz dos Coeficientes de Reflexão – Linhas Polifásicas	29
3.3 Estrutura do programa implementado	34
4 IMPLEMENTAÇÃO NO PSCAD[®]/EMTDCTM	37
4.1 Definição símbolo e formato dos dados de entrada do componente	40
4.2 Parâmetros das rotinas	43
4.3 Rotinas de cálculo	44
4.4 Interligação do componente com os elementos do circuito	46

5	RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO NO <i>PSCAD</i>[®]/<i>EMTDC</i>TM	47
5.1	Verificação do componente implementado	48
5.2	Resultados comparativos com metodologias propostas por outros autores	52
5.2.1	Comparação com resultados obtidos por Oliveira	52
5.2.2	Comparação com resultados obtidos por Yokoyama	55
5.3	Estudo de caso referente a uma linha constituída por dois condutores	59
5.3.1	Influência do ponto de incidência da descarga	60
5.3.2	Influência do valor de pico da corrente de retorno	61
5.3.3	Influência do tempo de frente e da velocidade da corrente de retorno	61
5.3.4	Influência do comprimento da linha	63
5.3.5	Influência do aterramento	63
5.4	Exemplo de caso referente a uma linha trifásica	65
5.5	Análise dos resultados	68
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	69
6.1	Conclusões e análise dos resultados	69
6.2	Propostas de continuidade	71
	BIBLIOGRAFIA	73
	Anexo A	78
	Anexo B	85

INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a expansão da metodologia de cálculo da tensão induzida em linhas aéreas monofásicas com descontinuidades, apresentadas por Lopes [2], de forma a permitir o cálculo para linhas aéreas polifásicas, considerando os efeitos mútuos das impedâncias da linha, bem como a implementação desta metodologia em um pacote de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

A utilização do pacote de cálculo de transitórios eletromagnéticos busca evitar o desenvolvimento de uma rotina de transitórios específica para esta situação, e possibilitar a difusão e a utilização do modelo por outros usuários, uma vez que o programa escolhido possui uma interface amigável.

A metodologia desenvolvida permite até a sua aplicação em estudos envolvendo linhas polifásicas com aterramentos múltiplos (estudos envolvendo cabo neutro e/ou pára-raios).

Foram implementados componentes no *PSCAD[®]/EMTDCTM* (*Power Systems Computer Aided Design/Transient Analysis for PSCAD Power System*

Simulation) com esta metodologia. Um dos componentes permite simular dois condutores enquanto o outro permite a simulação de três condutores.

1.2 Motivação

A descarga atmosférica, também conhecida como *raio*, consiste em uma grande transferência de cargas elétricas das nuvens para a terra, ou estrutura que se localize entre a nuvem e o solo. Este fenômeno vem ao longo dos anos maravilhando e assustando o homem, devido ao espetáculo proporcionado e pelo seu poder de destruição.

A maioria das descargas atmosféricas tem sua origem nas nuvens de tempestade (Cúmulus nimbus), embora também ocorra durante erupções vulcânicas e tempestades de areia [16].

Até o século XVIII, com as experiências de Franklin, esse fenômeno não havia sido investigado cientificamente, sendo que somente no século XX um estudo sistemático foi realizado.

O efeito destrutivo das descargas atmosféricas pode ser dividido em quatro classes gerais:

- Incêndios florestais;
- Incêndios ou danos físicos causados em edificações;
- Interrupção de serviços públicos – como energia elétrica e sistemas de comunicação;
- Perdas de vidas humanas e de animais.

Embora a incidência direta da descarga em um corpo dissipe uma grande quantidade de energia, os efeitos mais freqüentes para sistemas de distribuição e circuitos de comunicação são associados às descargas indiretas. Conforme será apresentado no Capítulo 2, quando ocorre uma descarga atmosférica temos uma variação de corrente muito rápida (espacial e temporal). Isto faz

com que a descarga atmosférica se torne fonte de distúrbios eletromagnéticos importante, capaz de gerar danos e interferências em sistemas elétricos e eletrônicos.

Devido à introdução de grande quantidade de equipamentos eletrônicos nos últimos anos em todos os setores da sociedade e à adoção de novos critérios para a avaliação da qualidade de energia fornecida, houve um incremento nos estudos relativos à compatibilidade eletromagnética buscando obter maiores informações a respeito das características das sobretensões em redes aéreas.

O cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas consiste em um problema de transitórios eletromagnéticos, sendo que do ponto de vista computacional, o principal ponto a ser trabalhado, a partir da modelagem da descarga, é a interação dos campos eletromagnéticos gerados que se propagam pelo espaço induzindo tensões e correntes na linha [2].

1.3 Revisão bibliográfica

Nesta breve revisão bibliográfica, são apresentados alguns trabalhos que abordam temas relacionados à descarga atmosférica, no que diz respeito à modelagem do canal e modelos de interação dos campos eletromagnéticos.

Na literatura, existem vários trabalhos envolvendo o tema de descargas atmosféricas abrangendo medições, implementações computacionais e proposições de teorias, muitas vezes divergentes. As divergências são tantas que, apesar da reconhecida importância das descargas laterais como fonte de sobretensões induzidas em redes elétricas, não existe uma metodologia de cálculo internacionalmente aceita [10].

Dentre as teorias com boa aceitação, destaca-se a teoria de Rusck. Em 1957, Sune Rusck apresentou uma teoria para cálculo de tensões induzidas [1] por descargas atmosféricas, que sofreu, ao longo dos anos, uma série de questionamentos de outras teorias similares que surgiram. Em 1990,

Fonseca [6] conclui que a teoria mais coerente e consistente é a proposta por Rusck. A teoria de Rusck é adotada pelo IEEE [25] para estudos do desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas.

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido feitas pelo PPGEE/UFMG. Dentre estes trabalhos, Lopes apresentou em sua dissertação de mestrado [2] um trabalho consistente de cálculo de tensão induzida baseado na teoria de Rusck. Este trabalho resultou em um programa de uso dedicado, aplicável a linhas aéreas monofásicas e cabos subterrâneos. Os resultados calculados foram confirmados experimentalmente através de medições realizadas em modelo reduzido por Boaventura [5]. Silva [11] e Oliveira [12] desenvolveram trabalhos em que a teoria de Rusck foi incorporada ao *EMTP (Electromagnetic Transient Program)* e ao *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)*, respectivamente, permitindo o cálculo da tensão induzida para linhas aéreas. Foram injetadas fontes de correntes distribuídas ao longo de toda a linha em estudo. Estas fontes de correntes representam os campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica incidente no solo nas proximidades da linha em estudo. Para isto, é necessário que a linha seja discretizada em trechos de comprimento infinitesimais dx . Os resultados obtidos por ambos comprovaram a viabilidade da metodologia proposta.

Em trabalho similar ao desenvolvido por Silva [11] e Oliveira [12], Thomazella [26] implementou a teoria de Rusck utilizando o *ATP (Alternative Transients Program)* na resolução do transitório e um software dedicado, desenvolvido em Visual Basic, para conexão com o *ATP*.

Em 1994, Paulino [10] apresentou em sua Tese de doutorado uma extensão da teoria de Rusck permitindo o cálculo da tensão induzida considerando linhas aéreas finitas multifilares, com descontinuidades. No cálculo dos transitórios utilizou-se uma rotina baseada no método de treliças, utilizando o algoritmo computacional proposto por Barthold&Carter.

Em sua tese de doutorado, Sartori [28] apresenta uma metodologia de cálculo de distribuição de corrente, campos eletromagnéticos e tensões induzidas em

estruturas atingidas por descargas atmosféricas diretas, permitindo determinar o desempenho geral de SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas).

Ribeiro [27] apresenta uma contribuição ao estudo de campos eletromagnéticos devido às descargas atmosféricas via simulação e medição em modelo reduzido. Foram obtidas equações no domínio do tempo aplicáveis a fontes arbitrárias. Os resultados obtidos através destas equações foram comparados com os resultados obtidos em modelo reduzido, gerando credibilidade ao trabalho.

Carvalho [29] desenvolveu e implementou um sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas, através da obtenção simultânea da forma de onda da tensão induzida em linhas de configurações diferentes. A metodologia utilizada no estudo foi desenvolvida através de modelos reduzidos e posteriormente implementada em escala real. Foram apresentados alguns resultados preliminares de medições realizadas.

Silva Neto [30] estudou as tensões transferidas para a rede de baixa tensão, via transformador, devido a tensões induzidas no primário. Foram utilizados resultados experimentais obtidos em modelos de linhas de distribuição em escala reduzida e medições de tensões induzidas por descargas naturais em uma linha construída para estudo do fenômeno.

Silveira [31] apresenta um estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas, verificando a influência dos principais parâmetros das descargas atmosféricas e da linha na determinação da tensão induzida.

Neste contexto o presente trabalho se insere apresentando um modelo que permite o cálculo da tensão induzida em linhas polifásicas e uma nova plataforma de cálculo.

1.4 Estrutura do texto

Esta dissertação é composta por seis capítulos e dois anexos, descritos sucintamente a seguir :

- O primeiro capítulo, *INTRODUÇÃO*, apresenta o objetivo a ser alcançado, a motivação para o desenvolvimento do estudo e uma breve revisão bibliográfica;
- O segundo capítulo, *TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*, apresenta uma descrição do fenômeno da descarga atmosférica, bem como descreve as bases da teoria de Rusck e apresenta, de forma sucinta, o trabalho de Lopes [2], base do presente trabalho;
- O terceiro capítulo, *MODELO PARA CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS POLIFÁSICAS BASEADO NA TEORIA DE RUSCK*, apresenta as considerações feitas no desenvolvimento do modelo, bem como a estrutura do programa implementado;
- O quarto capítulo, *IMPLEMENTAÇÃO NO PSCAD[®]/EMTDCTM*, apresenta as características básicas do *PSCAD[®]/EMTDCTM* e como ele pode ser utilizado no cálculo de tensões induzidas, apresentado os principais passos e funções utilizadas no desenvolvimento dos componentes.
- O quinto capítulo, *RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO NO PSCAD[®]/EMTDCTM*, apresenta validações do componente implementado com resultados obtidos por outros autores e realiza estudos de casos de uma linha bifásica e uma trifásica, apresentando a ferramenta desenvolvida. Foi realizado um estudo verificando a influência de diversas características da descarga atmosférica e da linha, tais como, amplitude da corrente de retorno, velocidade de propagação da corrente de retorno, posição de incidência da descarga, etc;

- O sexto capítulo, *CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE*, apresenta as conclusões e as propostas de continuidade para trabalhos futuros;
- No *Anexo A* é apresentado o código desenvolvido no *MATLAB*[®], utilizado em estudos de sensibilidade;
- No *Anexo B* é apresentado algumas funções disponíveis para o usuário no *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™], para desenvolvimento de componentes próprios;

2

TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Cálculos da tensão induzida por descargas atmosféricas

Os sistemas elétricos sofrem direta ou indiretamente distúrbios provocados pelas descargas atmosféricas. Dados da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) indicam que, no período de 2001 a 2005, as descargas atmosféricas foram responsáveis por 40% dos desligamentos permanentes não programados. Deste total, 99,9% dos desligamentos ocorreram no sistema de distribuição.

Os distúrbios provocados pelas descargas atmosféricas são normalmente verificados na forma de sobretensões. Uma descarga atmosférica pode atingir diretamente uma linha de transmissão sobre seus condutores, devido a uma falha de blindagem, ou atingir seus cabos pára-raios ocasionando um *back-flashover*, originando uma sobretensão fase-terra.

As descargas indiretas podem ocasionar uma sobretensão, devido ao acoplamento dos campos eletromagnéticos com a linha, gerando tensões induzidas. Estas são causadas por descargas que ocorrem entre nuvens e/ou descargas laterais, que atingem o solo nas proximidades do sistema. Esta forma de interação é a mais importante para os sistemas de distribuição, uma vez que as sobretensões geradas pelas descargas indiretas normalmente ultrapassam o TSIA (Tensão Suportável de Impulso Atmosférico) deste sistema (relativamente baixos, em geral de 95 kV para redes convencionais e 170 kV para redes de TSIA elevado [18]) e não alcançam o TSIA dos sistemas de transmissão.

2.2 Conceitos gerais sobre descargas atmosféricas

As fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as nuvens de tempestade, conhecidas como Cúmulus nimbus, embora seja registrado também descargas em outras situações, tal como erupções vulcânicas e tempestades de areia em desertos. No mundo, existe uma média de 80 descargas atmosféricas por segundo incidindo no solo [16].

A estrutura típica de uma nuvem de tempestade é apresentada na Figura 2-1. A base da nuvem é composta por uma camada de cargas negativas enquanto que as cargas positivas estão dispersas na região superior da mesma. Em regiões inferiores da nuvem, podem ser encontrados alguns pequenos bolsões de cargas positivas. De maneira simplificada, pode-se dizer que a separação de cargas positivas e negativas ocorre devido a deslocamentos de partículas e pequenas gotas d'água para regiões mais altas das nuvens, promovidas por correntes ascendentes de ar, enquanto que as grandes gotas d'água levam as partículas negativas para a base da nuvem.

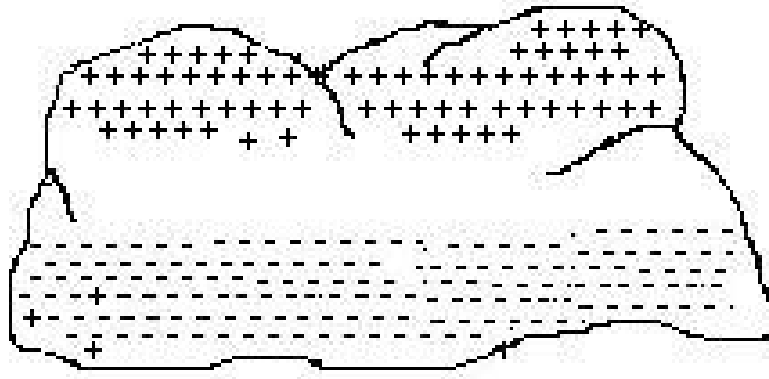


Figura 2-1 – Estrutura típica de uma nuvem de tempestade

A polaridade das correntes de descargas são definidas segundo a polaridade das cargas da nuvem que são transmitidas à terra pelo canal de descarga e podem ser ascendentes ou descendentes, de acordo com a direção de propagação das cargas.

As descargas atmosféricas descendentes de polaridade negativa representam 90% dos casos registrados, sendo os 10% restantes representados pelos demais tipos [12]. Sendo assim, a seguir será descrito o mecanismo de transferência de cargas negativas da nuvem para o solo – *descargas negativas descendentes*.

A base de uma nuvem, carregada negativamente, induz no solo abaixo um acúmulo de cargas positivas, estabelecendo uma enorme diferença de potencial entre nuvem e solo. Quando o gradiente elétrico em determinada região interna à base da nuvem excede a rigidez dielétrica do ar, dá-se origem à descarga atmosférica, a qual é caracterizada por um movimento de cargas em direção à terra por um caminho tortuoso e em passos com comprimento de dezenas de metros ($\approx 50\text{m}$). A cada passo, ocorre uma concentração de cargas negativas no canal, proveniente da base da nuvem. Devido ao “poder das pontas”, o campo elétrico na extremidade inferior do canal fica muito intenso e pode gerar uma nova descarga. Entre cada passo existe uma pausa da ordem de $50\mu\text{s}$. A direção do passo segue aproximadamente a orientação do campo elétrico local, cujo sentido aponta na direção do solo.

À medida que o canal carregado negativamente se aproxima do solo, na região abaixo do canal aumenta a densidade de cargas induzidas positivas e, conseqüentemente, o campo elétrico associado. Quando o canal descendente alcança distâncias de poucas centenas de metros da superfície do solo o campo se torna tão intenso que pode dar origem a descargas ascendentes.

Caso haja uma distância crítica inferior a um determinado limite entre um canal ascendente e um descendente, pode ocorrer uma descarga que os interliga, através de um salto final. Este limite depende da carga acumulada no canal descendente.

No momento que ocorre a conexão do canal entre a nuvem e o solo, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade. Esta onda de corrente é denominada corrente de retorno e se propaga no canal a partir do ponto de conexão, neutralizando as cargas acumuladas no canal de descarga e na nuvem.

O fluxo de corrente pelo canal ionizado de plasma, correspondente ao canal da descarga, gera aquecimento e um efeito luminoso, o relâmpago. O ar próximo ao canal de descarga se expande, em velocidade ultra-sônica, devido ao aquecimento do canal, provocando um deslocamento de uma onda sonora no ar, que pode ser percebido a uma distância da ordem de 10 km. Esta onda sonora é conhecida como trovão.

A Figura 2-2 ilustra o processo de desenvolvimento de uma descarga atmosférica, conforme descrito acima.

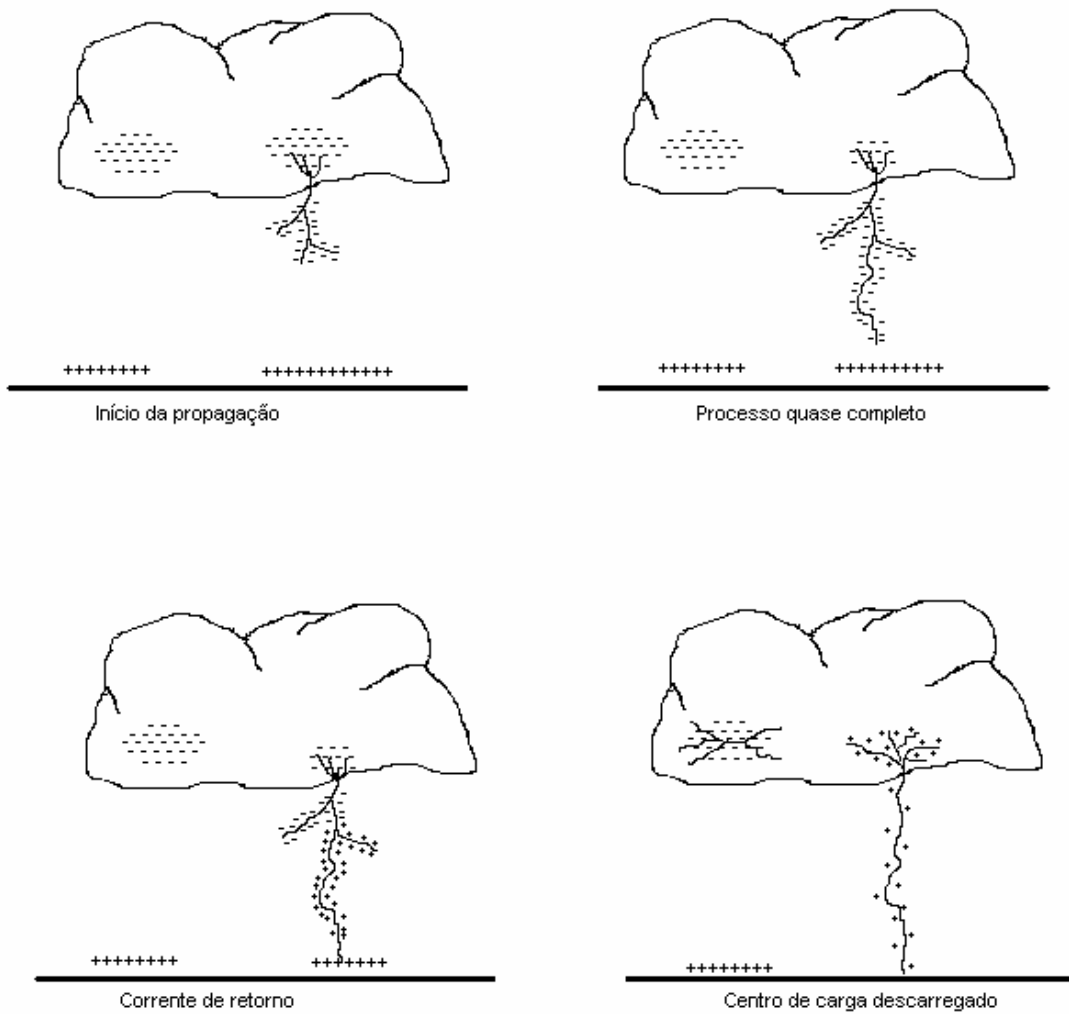


Figura 2-2 – Desenvolvimento de uma descarga atmosférica [7].

A Tabela 1 apresenta dados relativos às descargas atmosféricas negativas descendentes, reunidos por Uman a partir de publicações de vários autores, e reproduzido em [12].

Tabela 1 – Parâmetros Gerais das Descargas Negativas Descendentes [12]

	Mínimo	Médio	Máximo
Formação do Canal de Descargas:			
Propagação passo a passo:			
Comprimento do passo, m	3	50	200
Intervalo de tempo entre passos, μs	30	50	125
Velocidade média de propagação, m/s	1×10^5	$1,5 \times 10^5$	$2,6 \times 10^6$
Carga depositada no canal, C	3	5	20
Propagação contínua:			
Velocidade de propagação, m/s	1×10^6	2×10^6	$2,1 \times 10^7$
Carga depositada no canal, C	0,2	1	6
Corrente de retorno:			
Velocidade de propagação, m/s	2×10^7	8×10^7	$1,6 \times 10^8$
Taxa de subida da corrente, kA/ μs	<1	10	>80
Tempo de pico da corrente, μs	<1	2	30
Valor de pico da corrente, kA		10-20	110
Tempo de semi-cauda da corrente, μs	10	40	250
Carga transferida excluindo a corrente contínua, C	0,2	2,5	20
Comprimento do canal, km	2	5	14
Diâmetro do canal, cm	2	5	200
Descarga atmosférica:			
Número de descargas (inicial mais subseqüentes)	1	3 – 4	26
Intervalo de tempo entre inicial e subseqüentes, ou entre estas na ausência de corrente contínua, ms	3	40	100
Duração da descarga, s	10^{-2}	0,2	2
Carga transferida incluindo a corrente contínua, C	3	25	90

O tempo de frente da onda de corrente de retorno típico é de 1 a 10 μs , enquanto que o tempo de meia-onda está na faixa de 20 a 60 μs , sendo que a amplitude se encontra na faixa de 8 a 110 kA. A velocidade da corrente de retorno está entre 10% a 50% da velocidade da luz. Devido à sua elevada amplitude e baixo tempo de frente, o que nos dá uma elevada taxa de subida, a corrente de retorno pode ser identificada como a principal etapa da descarga atmosférica para o fenômeno da tensão induzida [12].

Em algumas situações, após a ocorrência da corrente de retorno, podem ocorrer novas descargas alimentadas por outros centros de cargas da nuvem. Estas novas descargas, denominadas de subseqüentes, seguem um caminho sem ramificações e com velocidade superior à descarga piloto. As descargas subseqüentes possuem menores amplitudes e menores tempos de frente que a primeira descarga.

A Figura 2-3 apresenta o mapa de densidade de descargas para o estado de Minas Gerais, obtidos por uma rede de contadores da CEMIG num período de 10 anos. Podemos observar que o estado de Minas Gerais possui regiões com densidade de descarga elevada, quando comparada ao resto do Brasil (Figura 2-4). Esta alta densidade se constitui em um problema para as linhas que cortam o estado, contribuindo para desligamentos.

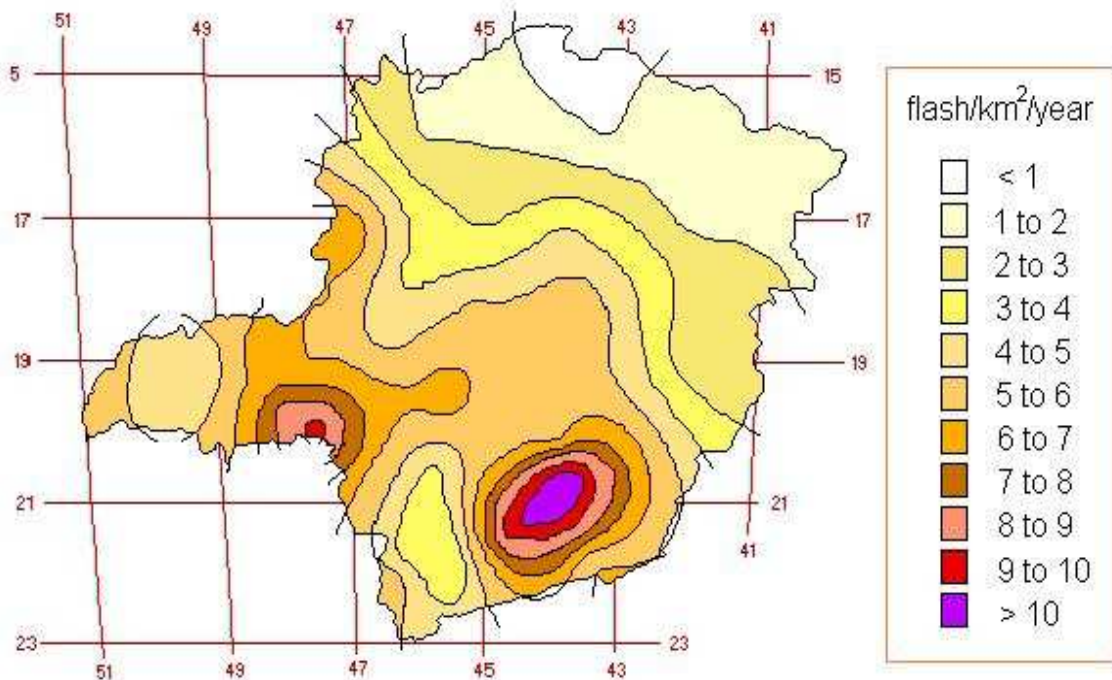


Figura 2-3 - Densidade de descargas atmosféricas obtida pela rede de contadores da CEMIG no período de 1985 a 1995 [17]

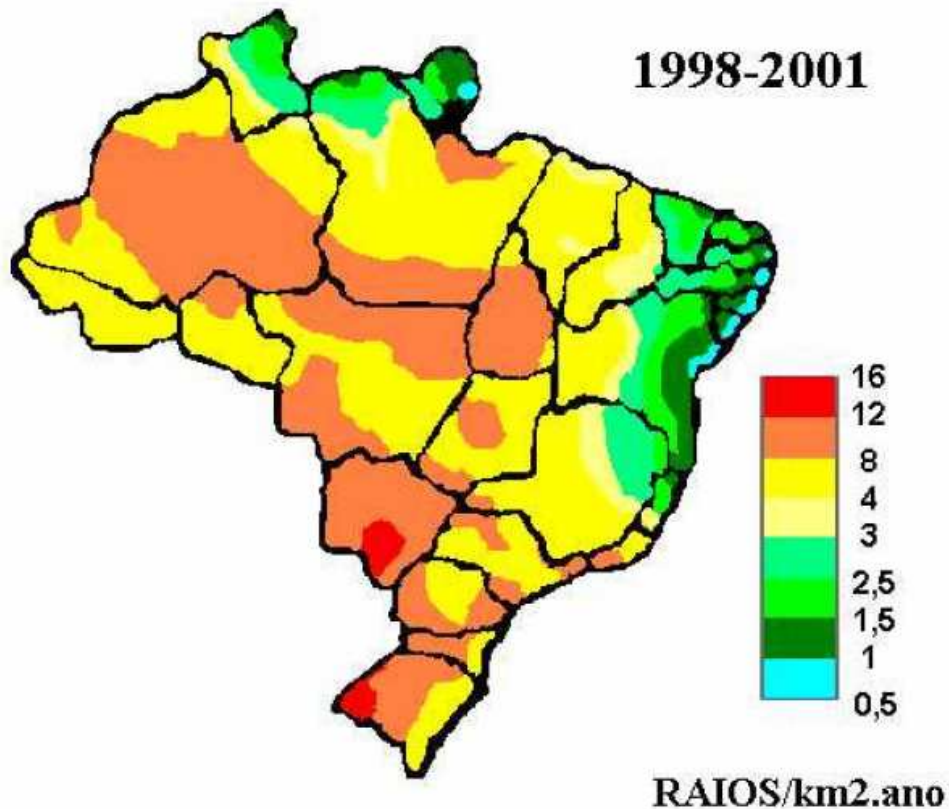


Figura 2-4 - Densidade de descargas atmosféricas para a terra no Brasil – Período de 1998 a 2001 [29]

2.3 Canal de descarga

O canal de descarga é o caminho pelo qual flui a corrente de retorno. Sua modelagem possui fundamental importância para o cálculo da tensão induzida. Em geral, se utilizam dois modelos para representar o canal de descarga e a corrente de retorno:

- Linha de transmissão uniforme e ideal;
- Linha de transmissão não-uniforme e com perdas.

O primeiro modelo considera o canal de descarga como uma linha de transmissão vertical na qual circula uma corrente. As correntes se propagam sem distorções pela linha, que é modelada por uma impedância de surto e uma

velocidade de propagação. Apesar da simplicidade, o modelo apresenta bons resultados [15].

Já o segundo modelo considera o canal como uma linha de transmissão onde a corrente viaja com uma velocidade variável, função do tempo e da posição, possuindo ainda uma atenuação à medida que se propaga na linha.

2.4 Teoria de Rusck

A base da teoria de Rusck é simples, e apesar de existirem teorias similares muito mais complexas, nada indica que seja necessário substituí-la para a maioria dos estudos envolvendo a interação entre a descarga e a linha de transmissão [13].

Em sua tese de Doutorado, publicada em 1957, Sune Rusck apresentou a metodologia para cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas. Partindo-se de considerações feitas para a modelagem da descarga atmosférica, Rusck obteve expressões para os campos eletromagnéticos associados ao fenômeno. Conhecidos os campos, determinou um modelo de interação dos mesmos com o condutor localizado nas proximidades do ponto de incidência da descarga no solo, e obteve uma expressão analítica para a tensão induzida.

As principais considerações feitas por Rusck para o estabelecimento de sua teoria são:

- Distribuição uniforme de cargas no canal ionizado (canal que existe entre a nuvem e o solo no instante anterior à ocorrência da corrente de retorno);
- Considera apenas os efeitos da corrente de retorno, que corresponde à corrente de alta intensidade que se propaga no canal neutralizando as cargas depositadas neste, como a principal causa da tensão induzida;
- A corrente de retorno é considerada em forma de degrau e viaja sem distorções ao longo do canal;

- Incidência da descarga de forma perpendicular ao solo;
- Solo considerado como sendo um condutor perfeito (resistividade nula);
- Utilização do método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético;
- Linha considerada como sendo infinita e sem descontinuidades.

Cálculo da Tensão Induzida

Um campo eletromagnético pode ser escrito como a soma de uma parcela associada ao potencial escalar (V_i), e outro associado ao potencial vetor (\vec{A}):

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

onde:

- ∇V_i Componente originado no potencial escalar (campo elétrico conservativo);
- $\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t}$ Componente originado no potencial vetor magnético (campo elétrico não conservativo).

O campo magnético é obtido a partir do potencial vetor:

$$\vec{H}_i = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}_i$$

Considerando o modelo mencionado para o canal de descarga e a geometria da Figura 2-5, Rusck calcula os valores de V_i e \vec{A}_i como nas equações (1) e (2) mostradas a seguir:

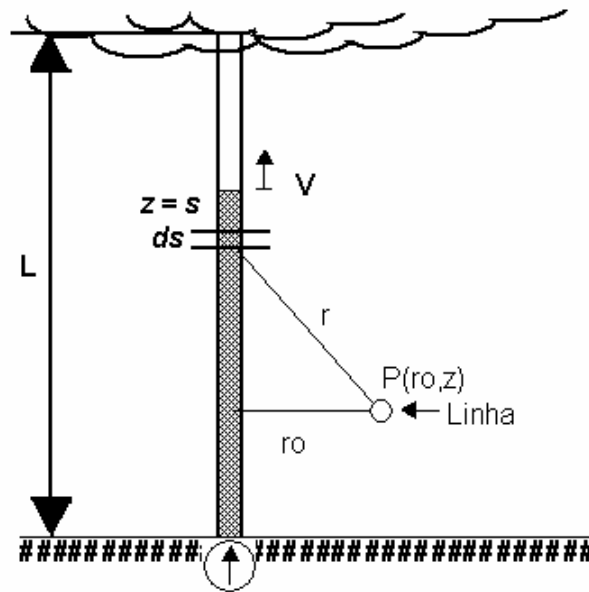


Figura 2-5 – Geometria e parâmetros para cálculo dos campos originados pelo canal de descarga atmosférica [12].

Onde:

- z coordenada do ponto de observação do campo;
- s posição do elemento ds da fonte, a qual coincide com o eixo z ;
- $P(r_0, z)$ ponto da linha onde se deseja calcular o campo;
- r_0 distância entre o ponto da linha onde se calcula o potencial e o ponto do solo atingido pela descarga (m);
- L comprimento do canal de descarga;
- V velocidade de propagação da corrente no canal;
- $I(s, t)$ corrente que viaja pelo canal e que se estabelece como função do processo de anulação da carga $q(s, t)$;
- $q(s, t)$ carga por unidade de comprimento distribuída ao longo do canal de descarga.

$$V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q\left(s, t - \frac{r}{V_0}\right)}{r} ds \quad (1)$$

$$\vec{A}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{I\left(s, t - \frac{r}{V_0}\right)}{r} ds \right) \hat{z} \quad (2)$$

onde :

- V_0 velocidade da luz no vácuo;
- μ_0 permeabilidade magnética do espaço livre;
- ϵ_0 permissividade elétrica do espaço livre;
- t tempo, tomando-se como instante zero o momento que tem início a corrente de retorno;
- Demais variáveis de acordo com a Figura 2-5.

Para $z = 0$, calculando $\vec{\nabla}V_i$ e $\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t}$, considerando $\vec{E}_v = -\vec{\nabla}V_i$ e $\vec{E}_A = -\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t}$,

pode-se chegar às equações (3) e (4), apresentadas abaixo [12]:

$$\vec{E}_v = 2Z_0 I_0 \frac{V_0}{V} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 [(V_0 t)^2 - r_0^2]}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + r_0^2}} \right) \hat{z} \quad (3)$$

$$\vec{E}_A = 2Z_0 I_0 \frac{V_0}{V} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 [(V_0 t)^2 - r_0^2]}} \right) \hat{z} \quad (4)$$

onde Z_0 é a impedância intrínseca do canal de descarga ($\approx 30 \Omega$).

Apesar dos dois componentes do campo elétrico serem perpendiculares ao solo, eles interagem com a linha diferentemente. O componente originado no potencial escalar (campo conservativo) provoca a circulação da corrente na linha, enquanto que o componente originado no potencial vetor (campo elétrico

não conservativo) não provoca a circulação de corrente em uma linha sem descontinuidades da linha para a terra.

O campo magnético em $z = 0$ só possui o componente A_z e é dado por [12]:

$$\vec{H} = \frac{I_0}{2\pi} \left[\frac{1}{r_0} - \frac{\left(1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2\right) r_0}{Vtk + k^2} \right] \hat{\phi}$$

onde:

$$k = \sqrt{(Vtk)^2 + \left(1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2\right) r_0^2}$$

A partir das equações de \vec{E}_A e \vec{E}_V , pode-se obter fórmulas analíticas para a determinação da tensão induzida num ponto qualquer de uma linha unifilar, infinita e sem descontinuidades, conforme apresentado em [2].

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

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) \tag{5}$$

onde:

$V(x,t)$ é a tensão induzida no ponto x da linha;

$U(x,t)$ é o componente da tensão induzida devido à contribuição da indução no trecho de linha à direita do ponto x ;

$U(-x,t)$ é o componente da tensão induzida devido à contribuição da indução no trecho de linha à esquerda do ponto x ;

Sendo que $U(x,t)$ é:

$$U(x,t) = Z_0 I_0 h \beta \frac{(V_0 t - x)}{y^2 + \beta^2 (V_0 t - x)^2} \left(1 + \frac{x + \beta^2 (V_0 t - x)}{\sqrt{\beta^2 (V_0 t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2)}} \right) \quad (6)$$

onde :

- $\beta = \frac{V_0}{V}$;
 - $Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega$ impedância intrínseca do canal de descarga;
 - V_0 velocidade da luz no vácuo (m/μs);
 - V velocidade de propagação da corrente de retorno (m/μs);
 - μ_0 permeabilidade magnética do espaço livre: $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;
 - ϵ_0 permissividade elétrica do espaço livre: $8,85 \times 10^{-12}$ F/m;
 - I_0 valor de pico da corrente de descarga (kA);
 - h altura do condutor (m);
 - x ponto ao longo da linha (m);
 - y menor distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga (m);
 - t tempo, tomando-se como instante zero o momento que tem início a corrente de retorno (μs);
- $$0 \leq t \leq \frac{L}{V} + \frac{\sqrt{L^2 + r_0^2}}{V_0}$$
- L comprimento do canal de descarga (m);
 - r_0 distância entre o ponto da linha onde se calcula o potencial e o ponto do solo atingido pela descarga (m).

Esta expressão foi desenvolvida por Rusck, considerando uma linha infinita e sem descontinuidades, e calcula a tensão induzida em um ponto x , causado por uma descarga atmosférica vertical, com uma corrente de retorno em forma de degrau de amplitude I_0 , atingindo a origem do sistema de coordenadas apresentado na Figura 2-6.

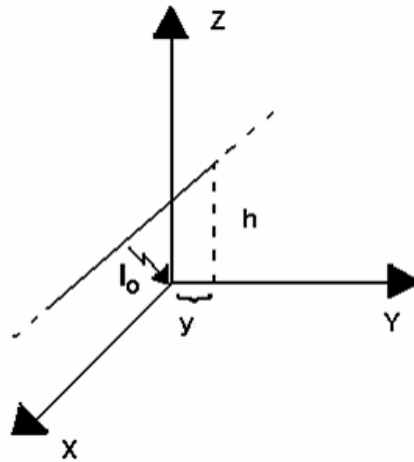


Figura 2-6 – Sistema de coordenadas e arranjo físico considerado.

Linhas Finitas e Com Descontinuidades

A expressão de Rusck para cálculo da tensão induzida é válida para linhas sem descontinuidades, o que implica grande dificuldade para se trabalhar com redes reais utilizando a teoria conforme apresentada. Estas descontinuidades são caracterizadas por:

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

No caso de uma linha finita em uma de suas direções e com uma descontinuidade pode-se adaptar a teoria conforme mostrado por Lopes [2].

A tensão induzida num ponto x é o resultado da soma de duas parcelas, correspondentes às contribuições localizadas à esquerda e à direita do ponto de análise.

Considere uma linha finita, aberta em um ponto x_1 , conforme mostrado na Figura 2-7. Se esta linha fosse infinita a tensão induzida seria:

$$V(x_1, t) = U(x_1, t) + U(-x_1, t)$$



Figura 2-7 – Tensão induzida em uma linha finita.

Como não existe linha à direita do ponto x_1 não há contribuição das cargas localizadas à direita deste ponto. A linha estando aberta em x_1 ocorrerá uma reflexão de onda da tensão decorrente da contribuição das cargas localizadas à esquerda do ponto, sendo a tensão induzida igual ao dobro de $U(-x_1, t)$, ou seja:

$$V(x_1, t) = 2U(-x_1, t)$$

Considerando agora, que ao invés da linha estar aberta em x_1 ela tenha uma descontinuidade para terra (uma resistência R – Figura 2-8). Continuamos não tendo contribuições devido às cargas localizadas à direita do ponto. O termo $U(-x_1, t)$ continua existindo, mas ao se propagar e atingir o ponto x_1 sofre reflexão. Sabemos que o coeficiente de reflexão de uma onda de tensão que se propaga em uma linha com impedância característica Z e encontra uma descontinuidade R é:

$$\Gamma_{ext} = \frac{R - Z}{R + Z}$$

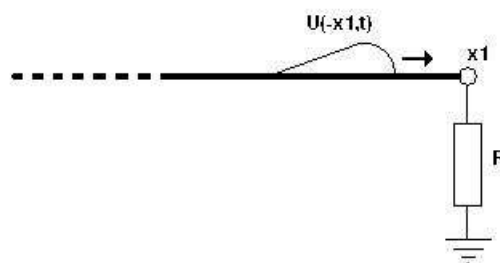


Figura 2-8 – Descontinuidade na extremidade direita de uma linha.

Neste caso a tensão induzida no ponto será:

$$V(x_1, t) = U(-x_1, t) + \Gamma_{ext}U(-x_1, t) \quad (7)$$

Considerando o descrito acima, em uma extremidade de uma linha temos que realizar duas compensações para adaptar a teoria de Rusck e calcular corretamente as tensões induzidas em um ponto de uma linha finita e com descontinuidade. Estas são: o cancelamento das contribuições localizadas à direita do ponto x_1 , e a computação das reflexões das contribuições localizadas à esquerda do ponto. A equação (7) pode ser escrita também da seguinte forma:

$$V(x_1, t) = U(x_1, t) + U(-x_1, t) - U(x_1, t) + \Gamma_{ext}U(-x_1, t) \quad (8)$$

A equação (8), mostra que podemos calcular a tensão induzida no ponto x_1 considerando a metodologia proposta por Rusck e aplicar apenas fatores de correções multiplicados às parcelas já calculadas (-1, Γ) e realizar a soma para determinar a tensão induzida.

Raciocínio análogo pode ser realizado para uma descontinuidade à esquerda da linha.

Considerando agora a Figura 2-9, onde temos um resistor R ligado a uma linha infinita de impedância Z. Caso não existisse o resistor, a tensão induzida no ponto seria a soma das contribuições localizadas à esquerda e a direita do ponto.

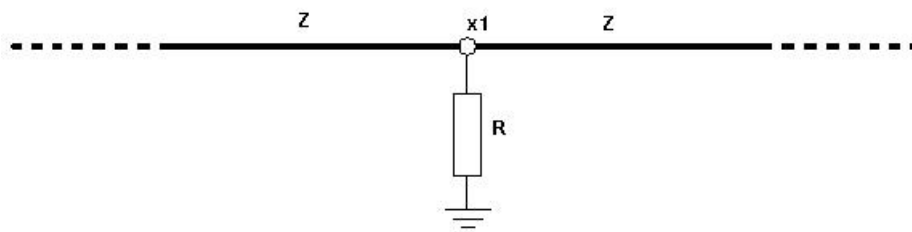


Figura 2-9 – Descontinuidade num ponto intermediário de uma linha.

Devido a presença do resistor, quando as ondas das tensões induzidas atingirem o ponto x_1 da Figura 2-9, ocorrem reflexões e a tensão induzida terá um valor diferente do que o calculado com as equações (5) e (6).

De acordo com a teoria de ondas viajantes, o coeficiente de reflexão das ondas incidentes em uma descontinuidade intermediária, conforme Figura 2-9, tem o valor de :

$$\Gamma_{int} = \frac{R//Z - Z}{R//Z + Z} \quad (9)$$

O símbolo $R//Z$ indica o valor da impedância equivalente entre o paralelo de R e Z .

A parcela de contribuição à direita da linha ao chegar na descontinuidade sofre uma reflexão. O mesmo ocorre com a parcela de contribuição à esquerda do ponto que se propaga. Desta forma, a tensão induzida no ponto x_1 , considerando a equações (5), (9) e a Figura 2-9, será:

$$V(x_1, t) = U(x_1, t) + U(-x_1, t) + \Gamma_{int} [U(x_1, t) + U(-x_1, t)]$$

Até o momento, cada uma das descontinuidades foi tratada como se fosse a única. Em cada uma delas, foi possível obter a tensão induzida considerando as contribuições à esquerda e à direita (calculadas pelas equações (5) e (6)) e os coeficientes de reflexão nas descontinuidades.

Para determinar a tensão induzida em qualquer ponto da linha deve se considerar a propagação das ondas viajantes relativos aos fatores de compensação calculados. Considerando a propagação, pode-se considerar ainda a existência de várias descontinuidades desde que seus efeitos sejam superpostos. Uma forma de se computar as propagações e a superposição de todos os fatores é através de um programa de transitórios eletromagnéticos.

Seguindo a metodologia proposta por Dommel [19], os fatores de compensação podem ser modelados como fontes de correntes que são injetadas nos pontos de descontinuidade da linha, fazendo com que os efeitos causados por uma determinada descontinuidade se propaguem e influenciem o valor da tensão induzida em toda a linha.

Os fatores de compensação para as extremidades direita, esquerda e um ponto intermediário da linha são, respectivamente:

- $U^{Comp_dir} = -U(x_1, t) + \Gamma_{ext} U(-x_1, t)$
- $U^{Comp_esq} = \Gamma_{ext} U(x_1, t) - U(-x_1, t)$
- $U^{Comp_int} = \Gamma_{int} [U(x_1, t) + U(-x_1, t)]$

Deve-se ter fontes de corrente que produzam tais quedas de tensão nos respectivos pontos de descontinuidade, e as suas impedâncias internas devem representar as descontinuidades de forma a produzirem as reflexões das ondas incidentes naqueles pontos. Desta forma, tem-se:

Extremidade direita

$$I = \frac{U^{Comp_dir}}{R // Z} = [-U(x_1, t) + \Gamma_{ext} U(-x_1, t)] \frac{R + Z}{RZ}$$

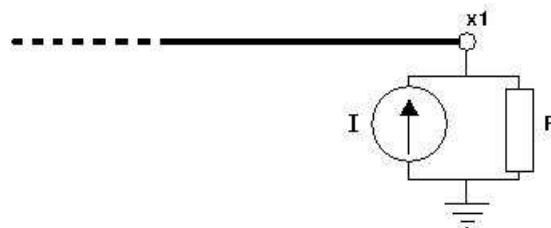


Figura 2-10 – Fonte de compensação injetada na extremidade direita da linha.

Extremidade Esquerda

$$I = \frac{U^{Comp_esq}}{R // Z} = [\Gamma_{ext} U(x_1, t) - U(-x_1, t)] \frac{R + Z}{RZ}$$

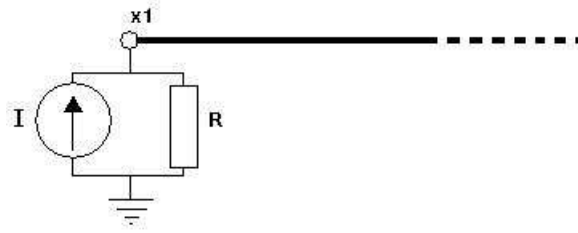


Figura 2-11 – Fonte de compensação injetada na extremidade esquerda da linha.

Ponto intermediário

$$I = \frac{U^{Comp_int}}{R // Z // Z} = \Gamma_{int} [U(x_1, t) + U(-x_1, t)] \frac{2R + Z}{RZ}$$

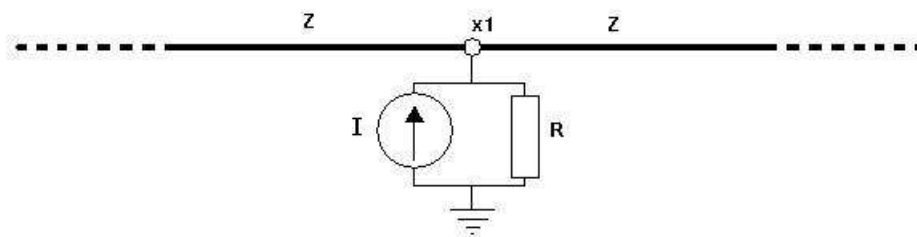


Figura 2-12 – Fonte de compensação injetada em um ponto intermediário da linha.

A tensão induzida em um determinado ponto é igual à soma da tensão de Rusck com a tensão obtida pelo transitório das fontes de compensação (que apresenta os efeitos das discontinuidades).

As considerações feitas para o desenvolvimento do modelo para cálculo de tensão induzida por descargas atmosféricas, em linhas aéreas polifásicas são apresentadas no próximo capítulo.

3

MODELO PARA CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA EM LINHAS AÉREAS POLIFÁSICAS BASEADO NA TEORIA DE RUSCK

3.1 Introdução

Tendo como base o trabalho de Lopes[2], apresentado sucintamente no Capítulo 2, buscou-se possibilidades de se realizar uma adaptação da teoria de Rusck, de forma a permitir o cálculo em linhas aéreas polifásicas considerando condutores multiterrados.

Dentre estas possibilidades, cogitou-se transformar as grandezas acopladas no domínio das fases em grandezas desacopladas modais, sendo cada modo resolvido com as equações desenvolvidas para linhas monofásicas obtidas por Lopes. Porém, a utilização de uma matriz de transformação modal constante,

apenas permite o completo desacoplamento de sistemas particulares, conforme teoria de sistemas lineares [20]. Desta forma, para se obter a tensão induzida devido a descargas atmosféricas continuaríamos a ter que resolver um sistema acoplado.

Passou-se então a trabalhar buscando uma solução considerando o acoplamento do sistema em grandezas de fase. O principal aspecto a ser considerado era o comportamento das ondas de tensão quando houvesse descontinuidades. Na solução de rede de programas computacionais tipo *EMTP/ATP* [14,19], este comportamento é definido considerando a matriz Y_{barra} . Porém, esta matriz não traz consigo informações suficientes para reconhecimento da topologia do sistema em análise (uma vez que já considera soma de admitâncias em cada nó). Esta informação é necessária para a determinação dos coeficientes de reflexão (a propagação da onda nestes programas não considera explicitamente os coeficientes de reflexão).

Desta forma, a matriz Y_{barra} não oferece facilidade para a definição das fontes de correntes a serem injetadas nas descontinuidades (considerando os aspectos apresentados no Capítulo 2).

3.2 Matriz dos Coeficientes de Reflexão – Linhas Polifásicas

De acordo com Zanetta [15], podemos tratar a propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão aérea polifásicas estendendo os conceitos válidos para linhas monofásicas, mediante uma abordagem matricial.

Sendo assim, para linhas polifásicas podemos definir uma matriz de coeficientes de reflexão conforme descrito a seguir. Considerando ondas viajantes do sistema polifásico se deslocando do meio *I* para o meio *II* conforme ilustrado na Figura 3-1.

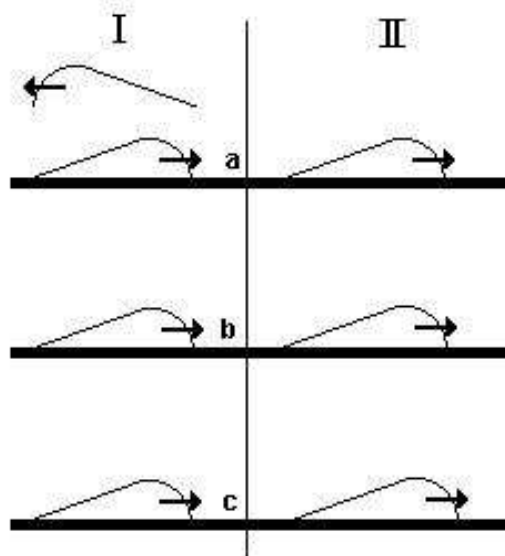


Figura 3-1 – Reflexão e transmissão em descontinuidades de ondas em linhas polifásicas.

Considere :

\tilde{v}_I : vetor de tensões do meio I ;

\tilde{v}_{II} : vetor de tensões do meio II ;

\tilde{v}_i : vetor das ondas de tensões incidentes na descontinuidade;

\tilde{v}_r : vetor das ondas de tensões refletidas na descontinuidade;

\tilde{v}_t : vetor das ondas de tensões transmitidas na descontinuidade;

\tilde{i}_i : vetor das ondas de correntes incidentes na descontinuidade;

\tilde{i}_r : vetor das ondas de correntes refletidas na descontinuidade;

\tilde{i}_t : vetor das ondas de correntes transmitidas na descontinuidade;

\tilde{Z}_I : matriz das impedâncias do meio I ;

\tilde{Z}_{II} : matriz das impedâncias do meio II ;

No ponto de descontinuidade a tensão no lado *I* (soma das ondas incidentes e refletidas) é igual a tensão do lado *II* (onda transmitida), e a corrente no lado *I* é igual à corrente no lado *II* (primeira lei de Kirchoff). Desta forma temos :

$$\begin{aligned} \tilde{v}_I &= \tilde{v}_{II} & \tilde{v}_i + \tilde{v}_r &= \tilde{v}_t \\ \tilde{i}_I &= \tilde{i}_{II} & \tilde{i}_i + \tilde{i}_r &= \tilde{i}_t \end{aligned}$$

A corrente no meio *I* é dada pela soma da corrente incidente mais a refletida, resultando em:

$$\tilde{v}_i - \tilde{v}_r = \tilde{Z}_I (\tilde{i}_i + \tilde{i}_r) = \tilde{Z}_I (\tilde{i}_t) \quad (10)$$

Sabendo que $\tilde{v}_t = \tilde{Z}_{II} (\tilde{i}_t)$, temos:

$$\tilde{v}_i + \tilde{v}_r = \tilde{Z}_{II} (\tilde{i}_t) \quad (11)$$

Somando membro a membro as equações (10) e (11) obtemos:

$$2\tilde{v}_i = (\tilde{Z}_I + \tilde{Z}_{II}) \tilde{i}_t \quad (12)$$

Subtraindo membro a membro as equações (10) de (11) obtemos:

$$2\tilde{v}_r = (\tilde{Z}_{II} - \tilde{Z}_I) \tilde{i}_t \quad (13)$$

Da equação (12) obtemos \tilde{i}_t como sendo:

$$\tilde{i}_t = 2(\tilde{Z}_I + \tilde{Z}_{II})^{-1} \tilde{v}_i$$

Substituindo na equação (13), temos:

$$\tilde{v}_r = (\tilde{Z}_{II} - \tilde{Z}_I)(\tilde{Z}_I + \tilde{Z}_{II})^{-1} \tilde{v}_i$$

Verifica-se que a relação entre os vetores de tensões incidentes e de tensões refletidas é análoga ao caso monofásico. Porém agora falamos em uma matriz dos coeficientes de reflexão:

$$\Gamma_r = (\underline{Z}_{II} - \underline{Z}_I)(\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_I)^{-1}$$

Para o caso de linhas de distribuição as onde as alturas dos condutores e seus diâmetros são pequenos podemos considerar as impedâncias de surtos com diferenças pequenas. Quando consideramos os condutores de uma linha bifásica a uma mesma altura estas impedâncias se tornam iguais. Para este caso, analisemos as seguintes matrizes 2x2:

$$\underline{Z}_I = \begin{bmatrix} Z_{p1} & Z_{m1} \\ Z_{m1} & Z_{p1} \end{bmatrix}$$

$$\underline{Z}_{II} = \begin{bmatrix} Z_{p2} & Z_{m2} \\ Z_{m2} & Z_{p2} \end{bmatrix}$$

A matriz de coeficiente de reflexão para o sistema 2x2 acima é :

$$\Gamma_r = \frac{1}{Z_{p2}^2 + 2Z_{p2}Z_{p1} + Z_{p1}^2 - Z_{m2}^2 - 2Z_{m2}Z_{m1} - Z_{m1}^2} \begin{bmatrix} \varphi_p & \varphi_m \\ \varphi_m & \varphi_p \end{bmatrix}$$

onde :

$$\varphi_p = (Z_{p2} - Z_{p1})(Z_{p2} + Z_{p1}) - (Z_{m2} - Z_{m1})(Z_{m2} + Z_{m1})$$

$$\varphi_m = -(Z_{p2} - Z_{p1})(Z_{m2} + Z_{m1}) + (Z_{m2} - Z_{m1})(Z_{p2} + Z_{p1})$$

Pode ser observado que, se as matrizes \underline{Z}_I e \underline{Z}_{II} forem iguais a matriz de coeficientes de reflexão será nula. Isto indica que não existe mudança de meios e, logo, não se tem onda refletida (casamento de impedâncias). Por outro lado, quanto se $\underline{Z}_{II} \gg \underline{Z}_I$, a matriz de coeficientes nos indica que ocorre reflexão total da onda.

Considerando uma linha bifásica com arranjo de resistências na extremidade direita, conforme apresentado na Figura 3-2, onde R_1 e R_2 são,

respectivamente, as resistências de aterramento dos condutores 1 e 2, R_{12} a resistência entre condutores. Neste caso, a matriz de resistência assume o local da matriz de impedância do meio II . Esta matriz de resistências é definida como :

$$Y_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{12}} & -\frac{1}{R_{12}} \\ -\frac{1}{R_{12}} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{12}} \end{bmatrix}$$

$Z_i = Y_i^{-1}$, sendo que Z_i assume a função de Z_{II} nas fórmulas apresentadas anteriormente.

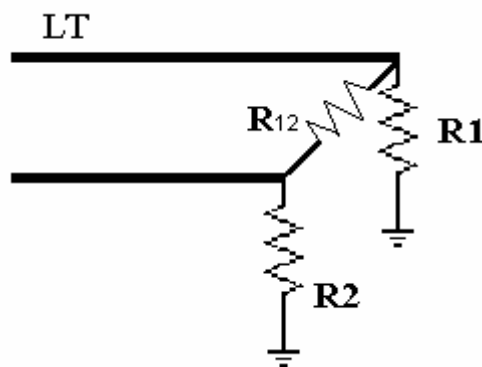


Figura 3-2 – Arranjo de resistências em uma extremidade direita de uma linha bifásica.

A partir da obtenção desta matriz, podemos utilizar as equações desenvolvidas por Lopes [2] e apresentadas no Capítulo 2, tendo em mente agora que todas as operações devem ser realizadas matricialmente. Desta forma, agora temos um vetor de injeção de corrente para determinar a influência das descontinuidades.

A tensão induzida pela descarga atmosférica em um determinado ponto é igual à soma da tensão de Rusck com a tensão obtida pelo transitório causado pela injeção dos vetores de correntes nos pontos de descontinuidades. No caso de terminações resistivas ou descontinuidades em um ponto intermediário, a

matriz de impedância da terminação/descontinuidade é utilizada para o cálculo da matriz dos coeficientes de reflexão.

A teoria de Rusck propõe a distribuição de fontes de correntes que irão representar os campos eletromagnéticos criados pela descarga atmosférica incidente no solo nas proximidades da linha em estudo. Para isto, é necessário que a linha seja discretizada em trechos de comprimento infinitesimais dx . Esta alternativa foi implementada por outros autores [7,11,12,26]. Esta alternativa possui uma desvantagem do ponto de vista computacional. Para aumentar a precisão, necessita-se de uma maior discretização da linha, para que o cálculo das fontes de corrente associadas aos campos seja mais preciso. Porém, esta maior discretização implica maior tempo de processamento e de espaço em memória exigido. Para se agilizar o cálculo, perde-se na precisão dos valores obtidos.

Devemos aqui ressaltar que a utilização das fontes de compensação não exige a discretização da linha aérea em pequenos trechos. Isto se deve ao fato das equações terem sido deduzidas a partir de uma solução analítica de um caso particular, em que os efeitos de propagação e interação dos campos já estão implícitos. Desta forma, as fontes de corrente só são necessárias nos pontos onde houver descontinuidades na linha. O problema de fontes distribuídas uniformemente, é então, transformado em um problema de fontes concentradas, resultando em ganho computacional.

3.3 Estrutura do programa implementado

Inicialmente foi implementada uma versão do programa no *MATLAB*[®], de forma a se realizar testes e verificações de resultados. Estes tinham a função de verificar a eficácia da metodologia e realizar estudos de sensibilidade. Neste programa, a primeira etapa foi calcular a tensão induzida em uma linha, considerando apenas um ponto de descontinuidade, retirando informações da consideração das mútuas e do aterramento, tais como :

- quanto maior a impedância mútua dos condutores, mantendo-se as impedâncias próprias e as resistências dos aterramentos constantes, menores as tensões induzidas;
- o aumento das resistências entre fios tende a aumentar a tensão induzida, em relação ao que seria obtido se não houvesse esta resistência.

Após esta análise, capacitou-se o programa de forma a permitir a simulação de uma linha bifásica possuindo dois vãos. Foram realizados estudos comparativos que demonstraram a coerência dos resultados obtidos com as metodologias propostas/implementadas por outros autores. O código fonte deste programa é apresentado no Anexo A.

Feito isto, partiu-se para a implementação de um modelo a ser incorporado ao *PSCAD[®]/EMTDCTM*. Considerações sobre esta implementação são feitas no Capítulo 4.

O funcionamento geral é o seguinte:

Antes de se iniciar o cálculo, obtém-se os dados da descarga atmosférica e da linha;

Para cada Δt de simulação (durante o ciclo de cálculo):

- A partir dos dados da descarga e da linha calculam-se as tensões induzidas através da fórmula de Rusck em todos os pontos de interesse;
- A partir das tensões obtidas pela expressão de Rusck, calcula-se o vetor de correntes das fontes de compensação e injeta-se as correntes nos pontos de interesse;
- Calcula-se o transitório provocado pelas fontes de compensação. Esta etapa é realizada pelo *PSCAD[®]/EMTDCTM*;
- Somam-se os valores das tensões obtidas pelo transitório das fontes de compensação com os valores das tensões obtidas através da expressão de Rusck.

Estes passos são ilustrados pelo diagrama de blocos abaixo.

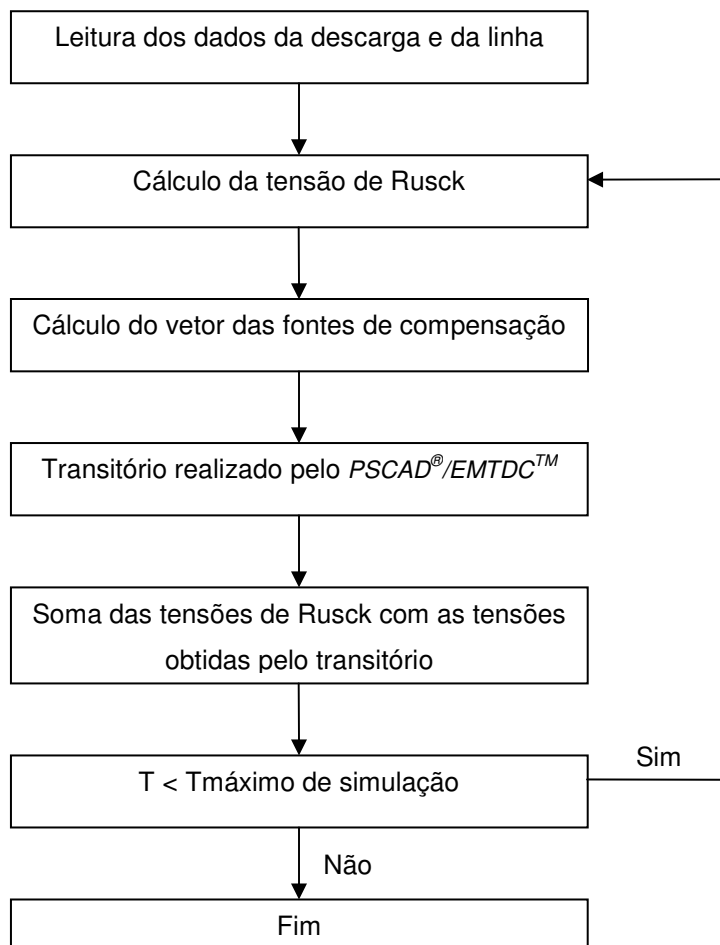


Figura 3-3 – Diagrama de blocos do funcionamento do componente desenvolvido.

No Capítulo 4 são apresentadas características da implementação dos componentes que permitem o cálculo da tensão induzida em linhas aéreas no *PSCAD®/EMTDC™*.

4

IMPLEMENTAÇÃO NO *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™]

Buscando uma maior difusão e utilização da metodologia desenvolvida para cálculo de tensões induzidas devido à descargas atmosféricas em linhas aéreas polifásicas, implementou-se o modelo em um pacote para cálculo de transitórios eletromagnéticos. Neste capítulo serão apresentados detalhes da implementação do modelo utilizando o *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™]. Os modelos implementados se referem a linhas com dois e três fios, não havendo impedimento ou restrição quanto a implementação de mais fios.

Outros pacotes computacionais poderiam ter sido utilizados como o *EMTP* [11] ou o *SPICE* [12]. Estes, por sinal, já foram utilizados em trabalhos anteriores publicados pelo PPGEE para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas. Porém, consideravam maior quantidade de fontes de corrente distribuídas ao longo da linha, enquanto o modelo aqui implementado necessita de fontes de corrente apenas nos pontos de descontinuidades resultando em menor esforço computacional.

O *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™] apresenta uma série de características que facilitam a implementação de componentes desenvolvidos pelo usuário, como será descrito a seguir. Uma vez implementados no *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™], estes componentes são utilizados como qualquer outro componente pertencente ao programa na realização dos cálculos de transitórios.

Todas as discontinuidades são inseridas pelo próprio componente, bem como a descarga atmosférica. Esta é simulada com uma rampa com tempo de frente definido pelo usuário, uma vez que, para tensões induzidas estes são os parâmetros mais significativos. Por isto, a forma de onda da corrente foi aproximada por uma rampa, conforme apresentado na Figura 4-1 [2]. Para se computar a frente de onda, supondo-se o sistema linear, utilizamos o princípio da superposição. Conforme mostrado, são considerados vários degraus defasados no tempo, de forma que a sua soma represente a onda de corrente desejada.

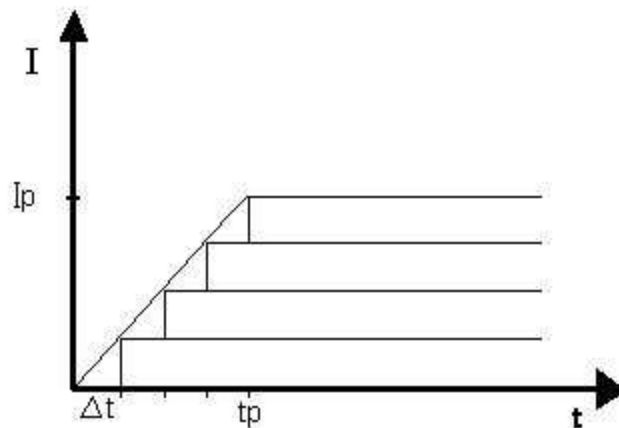


Figura 4-1 – Forma de onda de corrente utilizada.

As informações necessárias para a implementação dos componentes para cálculo das tensões induzidas em linhas aéreas com dois ou três condutores no *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™] foram obtidas nas referências [22,23,24].

As rotinas desenvolvidas pelo usuário podem realizar tarefas fora do ciclo de tempo principal, relativo à resolução das equações nodais do sistema, ou dentro deste. A Figura 4-2 apresenta a estrutura de funcionamento do

PSCAD[®]/*EMTDC*[™]. Existem dois instantes em cada intervalo de cálculo do programa, em que os componentes desenvolvidos pelos usuários podem interagir com o restante do código do *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™]. O primeiro momento ocorre antes da solução das equações de rede (*DSDYN*) e pode ser utilizado para realizar, dentro do *loop* de tempo, alterações no circuito simulado e/ou atualização dos vetores de tensões e correntes necessários à dinâmica dos componentes. O outro momento ocorre após a solução das equações nodais e pode ser utilizado para fins de pós-processamento, sendo denominado *DSOUT*. Estas características se adequam perfeitamente ao buscado para a determinação das tensões induzidas pelas descargas e descrita anteriormente (Figura 3-3). As rotinas devem ser desenvolvidas utilizando a linguagem de programação *Fortran 77* ou *Fortran 90*.

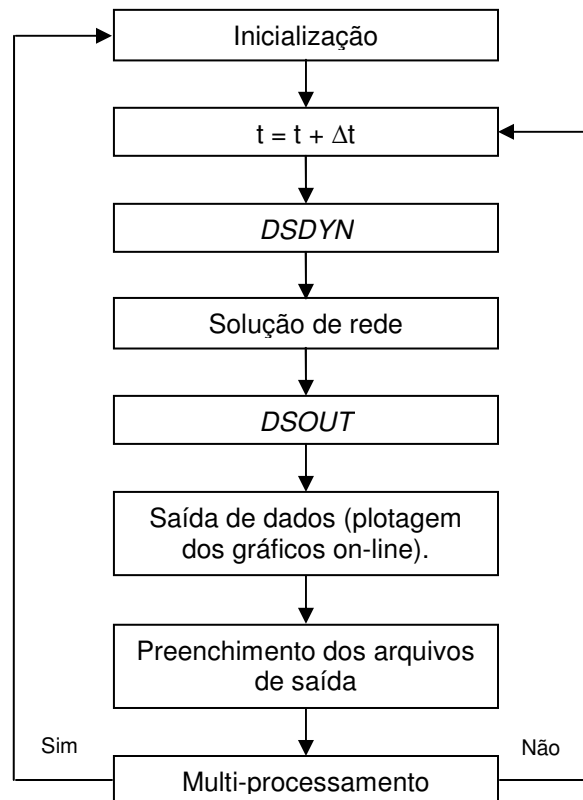


Figura 4-2 – Estrutura do *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™]. Adaptado de [23].

A cada modificação realizada no circuito a ser simulado, o *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™] gera um novo código executável para o caso. Esta característica facilita a inclusão de novos componentes, uma vez que o código a ser utilizado na

simulação é gerado posteriormente, interpretando, também, as rotinas desenvolvidas pelos usuários.

Para a implementação de um componente no *PSCAD[®]/EMTDC[™]* temos os seguintes passos:

- Definição do símbolo e formato dos dados de entrada do componente;
- Definição dos parâmetros a serem utilizados pela rotina do componente;
- Definição das rotinas a serem utilizadas nos cálculos do componente;
- Interligação do componente com os elementos dos circuitos.

A seguir é detalhado cada um destes passos, tendo como exemplo o componente desenvolvido para tensões induzidas em linhas aéreas considerando dois condutores.

4.1 Definição símbolo e formato dos dados de entrada do componente

O componente desenvolvido tem a função de determinar o valor da tensão induzida nos condutores de uma linha aérea. Desta forma é necessário que o símbolo do componente tenha pontos de conexões para os locais de análise. A conexão das resistências de aterramento é realizada internamente pelo código desenvolvido.

O desenvolvimento gráfico do componente é facilitado pela interface gráfica que o *PSCAD[®]/EMTDC[™]* possui, disponibilizando vários recursos. Alguns destes recursos são utilizados, inclusive, para evitar erros dos usuários durante a utilização do componente. Na Figura 4-3 é apresentada uma tela extraída do *PSCAD[®]/EMTDC[™]*, onde é apresentado um módulo de desenvolvimento do componente. Os nós de conexão são apresentados. Os nós com nome *U_1_1*, *U_1_2*, *U_2_1*, *U_2_2*, etc, são conectados às linhas de transmissão e são utilizados para ler os dados das linhas, conectarem as resistências de aterramento de cada condutor e inserir as fontes de compensação. Os nós com nomes *U_11*, *U_12*, *U_21*, etc, são nós de saída de dados. Eles são utilizados

para conectarem os canais de saída do *PSCAD*[®]/*EMTDC*[™]. Estes canais são os componentes que plotam os gráficos obtidos pela rotina desenvolvida. Os nomes destes nós são utilizados pelas rotinas de cálculo, que caracterizam o componente, como variáveis, ficando estes nomes transparentes para o usuário.

Os dados de entrada são passados via uma caixa de diálogo (Figura 4-4). O usuário deve informar nesta os dados referentes à:

Descarga atmosférica:

- Amplitude da descarga (kA)
- Velocidade da corrente de retorno (m/μs)
- Tempo de frente da onda de descarga (μs)

Dados da linha

- Altura do condutor 1 (m)
- Altura do condutor 2 (m)
- Comprimento do vão (m)

Dados relativos entre descarga e linha

- Distância entre a descarga e a linha (m)
- Distância da incidência da descarga em relação ao início da linha (considerando o início da linha o ponto mais à esquerda não o ponto central)

Dados das resistências

- As resistências de aterramento próprias dos fios e resistência entre fios na extremidade esquerda (Ω)
- As resistências de aterramento próprias dos fios e resistência entre fios nos pontos intermediários da linha (Ω)
- As resistências de aterramento próprias dos fios e resistência entre fios na extremidade direita (Ω)

- Adicionalmente, deve-se informar se as extremidades deverão estar casadas. Caso esta opção seja *sim*, a entrada de dados das resistências nas extremidades esquerda e direita será desprezada (a determinação dos fatores associados a estas resistências é realizada internamente) ;

Dado de controle da rotina

- Número de seções em que serão injetadas as fontes de correntes, definido como sendo o número de vãos em análise somado de uma unidade.

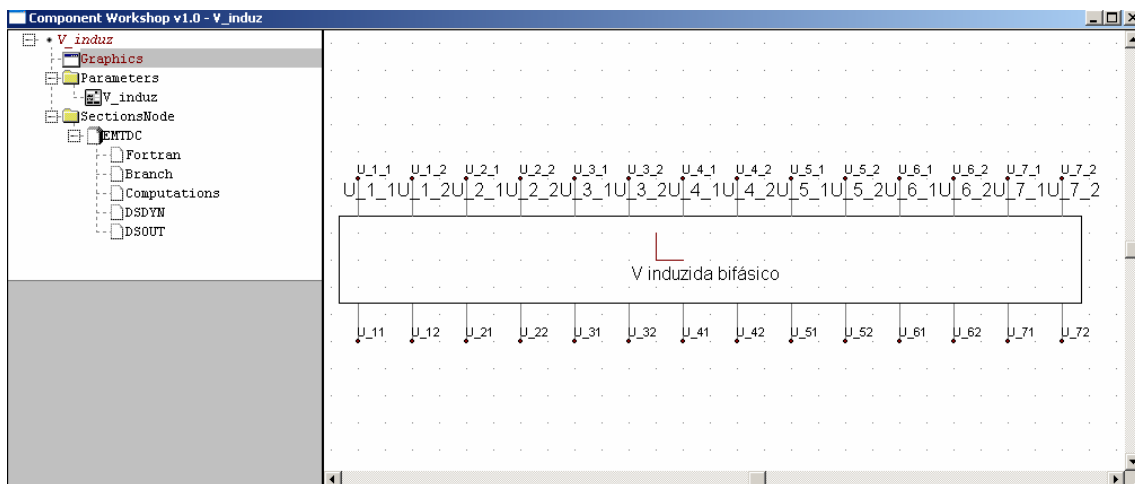


Figura 4-3 – Módulo de desenvolvimento do símbolo do componente.

Parameter	Value	Parameter	Value
Amplitude da Descarga (kA)	100	Aterram. fio 1 na esquerda	513.6
Veloc. corrente retorno (m/us)	30	Aterram. fio 2 na esquerda	510.7
Altura cond. 1 (m)	10.5	Aterram. fio 1 no meio da linha	200
Altura cond. 2 (m)	10	Aterram. fio 2 no meio da linha	1e8
Dist. da descarga e a linha (m)	100	Aterram. fio 1 na direita	513.6
Dist. desc. ao inicio da LT (X(m))	1000	Aterram. fio 2 na direita	510.7
N. de secoes (Nvaos+1)	5	Resist. entre fios na esquerda	222.7
Comprimento de cada vao (m)	500	Resist. entre fios em pts intern.	0
Tempo de frente da onda (us)	2	Resist. entre fios na direita	222.7

Extremidades casadas

Sim

Nao

Figura 4-4 – Caixa de diálogo com a entrada de dados do componente.

4.2 Parâmetros das rotinas

Os parâmetros a serem utilizados pela rotina de cálculo são referentes aos definidos na caixa de diálogo e os obtidos através dos nós do componente. Por exemplo, as impedâncias características próprias e mútuas dos fios são obtidas a partir dos nós de conexão.

O PSCAD[®]/EMTDC[™] é responsável pela conexão dos nós do componente desenvolvido com os demais componentes do sistema simulado, ou seja, a qual nó do circuito de simulação o componente está conectado.

Na utilização da rotina, o programa principal substitui as variáveis U_{1_1} , U_{1_2} , U_{2_1} , U_{2_2} , U_{3_1} , etc, pelos números dos correspondentes nós. Conforme dito anteriormente, a referência a estes nós é feita nas rotinas desenvolvidas por meio das variáveis U_{1_1} , U_{1_2} , U_{2_1} , etc, tornando

transparente para o usuário a conexão do componente com os demais elementos.

4.3 Rotinas de cálculo

A efetiva integração do componente desenvolvido para cálculo da tensão induzida do circuito simulado é feita pelas rotinas implementadas nos campos *DSDYN* e *DSOUT* (Figura 4-2, Figura 4-5). Estas rotinas operam antes de iniciar os cálculos realizados a cada intervalo de tempo Δt e durante o processamento geral do circuito. O código foi escrito na linguagem *Fortran*, e possui as seguintes tarefas principais:

- Fora do ciclo de tempo principal (tempo de simulação nulo – *TIMEZERO*) se realiza as seguintes tarefas:

Habilitação das fontes de correntes de compensação dos nós que efetivamente são utilizados;

Determinação das impedâncias características próprias e mútuas dos condutores da linha. Estas impedâncias são obtidas através da função *GM(NN,NN)*, que é uma função implementada pelo programa principal (PSCAD[®]/EMTDC[™]) e acessível à rotina do usuário. Esta função permite obter a condutância entre dois nós (*NN*). Com esta condutância, determinam-se as impedâncias características através de uma inversão matricial;

Inclusão das resistências de aterramento dos condutores. Estas inclusões são feitas através da função *GEQ(BRN)*, que é uma função implementada pelo programa principal. Esta função permite que se altere a condutância equivalente do ramo identificado por *BRN*.

- Dentro do ciclo de tempo principal (a cada Δt), ou seja, durante o cálculo de transitórios, se realiza as seguintes tarefas:

Calcula-se a tensão de Rusck para cada condutor naquele intervalo de tempo;

Calcula-se a matriz de coeficientes de reflexão utilizando as impedâncias características dos condutores e as resistências de aterramento. Com os coeficientes definidos determinam-se as fontes de compensação a serem injetadas.

Injeta-se as fontes de compensação utilizando a função *CCIN(NN)*. Esta função permite que se injete uma fonte de corrente em um determinado nó;

Retorna ao programa principal para que se resolva o transitório provocado pelas fontes de compensação;

Soma-se a tensão de Rusck em determinado nó com a tensão obtida pelo transitório neste mesmo nó. A função *VDC(NN)* é utilizada para se obter as tensões nodais calculadas pelo programa principal;

Disponibiliza-se o resultado nos nós de saída, para que se possa plotar a tensão resultante.

No Anexo B é apresentado um sumário das principais funções disponibilizadas pelo PSCAD[®]/EMTDC[™], para que os usuários possam desenvolver suas rotinas.

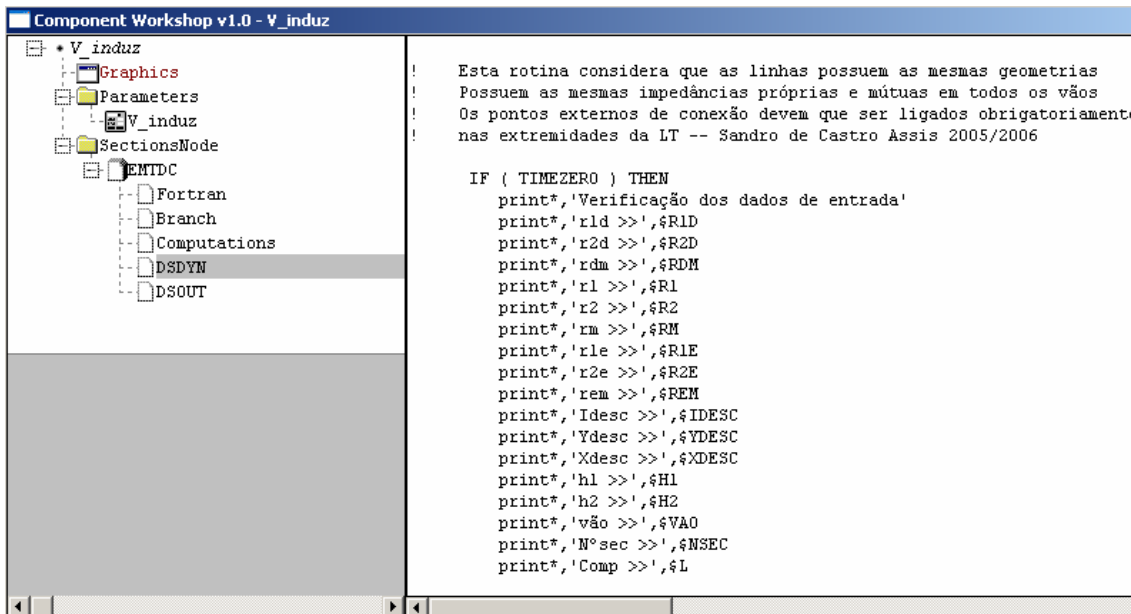


Figura 4-5 – Detalhe dos campos de implementação *DSDYN* e *DSOUT*.

4.4 Interligação do componente com os elementos do circuito

A interligação do componente é feita de maneira similar aos demais componentes presentes no circuito principal. Dependendo do número de vãos que serão simulados estarão disponíveis uma determinada quantidade de terminais de conexões.

5

RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO NO *PSCAD[®]/EMTDCTM*

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos utilizando a metodologia descrita e os componentes implementados para determinação da tensão induzida com dois ou três condutores.

Em todas as simulações realizadas, a linha foi simulada como sendo ideal (sem perdas), considerando o solo com resistividade nula. O *PSCAD[®]/EMTDCTM* possui modelos para linhas que consideram a resistividade. A utilização destes modelos permite considerar a resistividade durante a propagação da onda injetada pelas fontes de compensação. Porém a tensão de Rusck (e conseqüentemente as fontes de compensação), conforme apresentada não considera a resistividade do solo. As tensões induzidas obtidas na utilização da linha considerando a resistividade, desta forma, não estariam coerentes.

A seguir, são apresentados os resultados preliminares comparando a implementação do componente com resultados obtidos utilizando o programa *WinRusck* [32], que implementa a metodologia das fontes de compensação para linhas monofásicas proposta por Lopes [2], e amplamente utilizada com resultados estabelecidos e comprovados teoricamente e experimentalmente [5,10,11].

Após esta análise inicial, que tem o objetivo de checar o componente, serão apresentados :

- resultados comparativos com metodologias propostas por outros autores;
- estudo teórico referente a uma linha constituída por dois condutores;
- exemplo de caso referente a uma linha trifásica.

5.1 Verificação do componente implementado

Neste item, são apresentados resultados obtidos com o componente desenvolvido, para verificação do funcionamento deste, comparando com resultados obtidos utilizando o programa *WinRusck*, que implementa a metodologia das fontes de compensação para linhas monofásicas proposta por Lopes [2].

Para esta avaliação, será utilizado o modelo implementado capaz de simular dois condutores. Um dos condutores da linha não será aterrado. Desta forma, não haverá fontes de compensação a serem injetadas neste condutor. Conforme afirma a teoria de Rusck, o acoplamento entre vários condutores se manifesta apenas a partir do momento em que as correntes originadas pelas tensões induzidas em cada ponto começam a se propagar pela linha. Desta forma, a tensão induzida em si, não sofre influência do acoplamento.

O caso base, ilustrado pela Figura 5-1 e utilizado para as comparações, se trata de uma linha monofásica apresentando as seguintes características :

- Altura do condutor ao solo : $h = 10$ m;
- Diâmetro do condutor : $D = 8$ mm;
- Comprimento da linha : $L = 1000$ m;
- Terminações casadas ($R = Z$)

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base :

- Valor de pico da corrente : $I_p = 30$ kA;
- Velocidade da corrente no canal de descarga : 30 m/ μ s;
- Tempo de frente da corrente : 1 μ s;
- Coordenadas da incidência da descarga : $x = 500$ m e $y = 100$ m;
- Pontos de observações da tensão induzida : $x = 0, 250$ e 500 m;
- Resistividade do solo : nula.

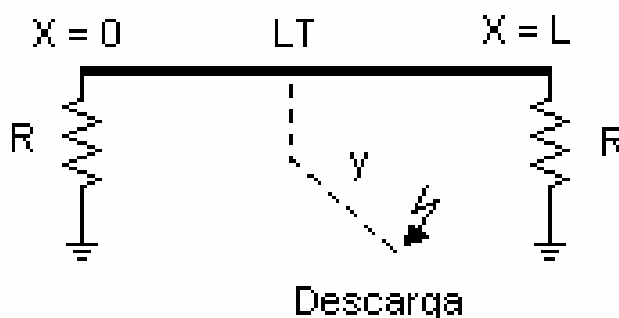


Figura 5-1 – Linha monofásica utilizado para a comparação.

As figuras 5-2 a 5-6 apresentam comparações entre os resultados obtidos utilizando o componente implementado e o resultado gerado pelo *WinRusck*.

A impedância característica do condutor é 511Ω .

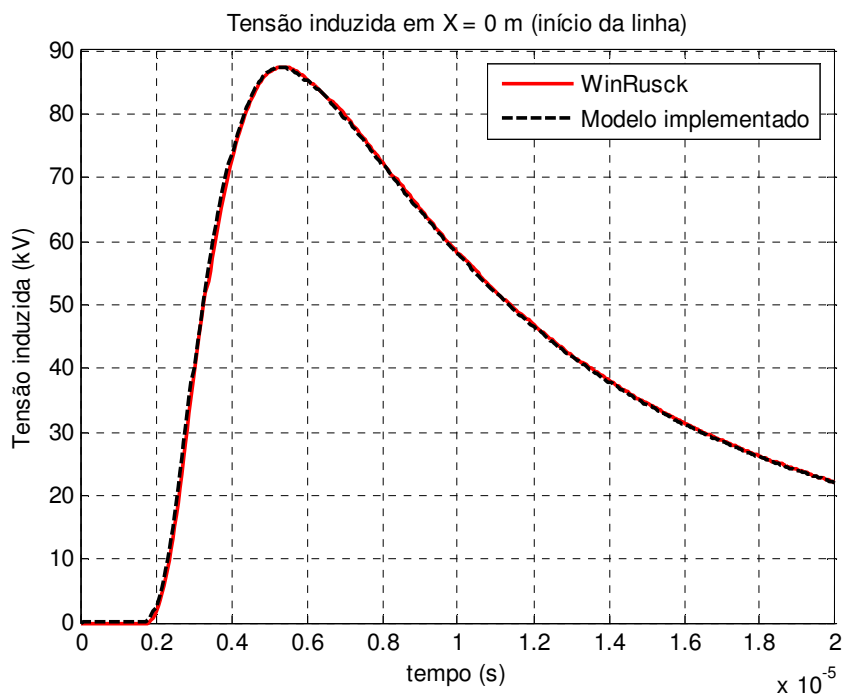


Figura 5-2 – Tensão induzida no início da linha considerando a linha casada.

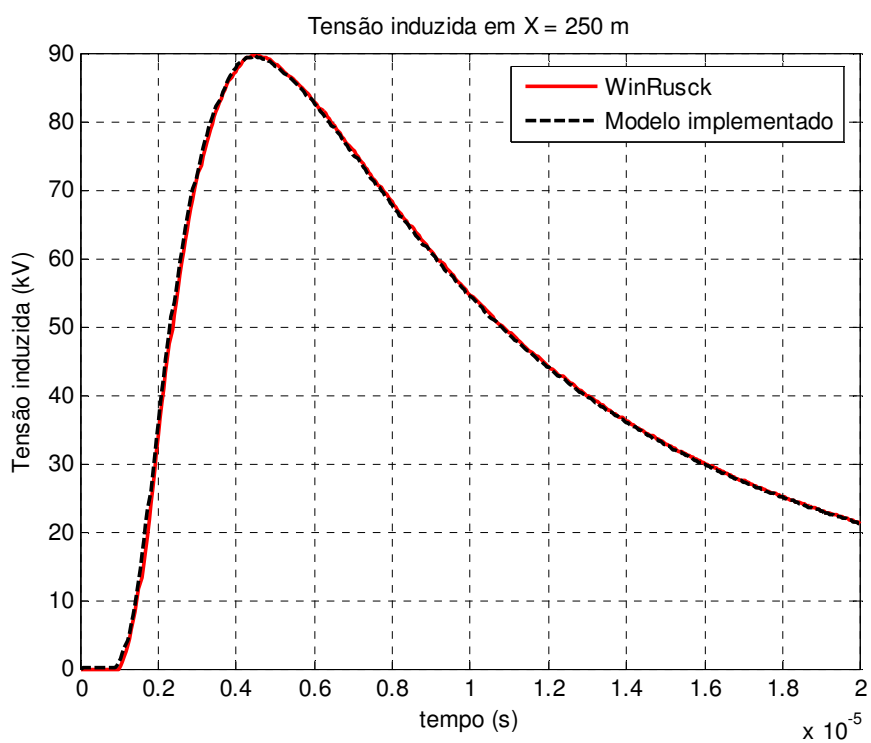


Figura 5-3 – Tensão induzida em X = 250 m (1/4 da linha) considerando a linha casada.

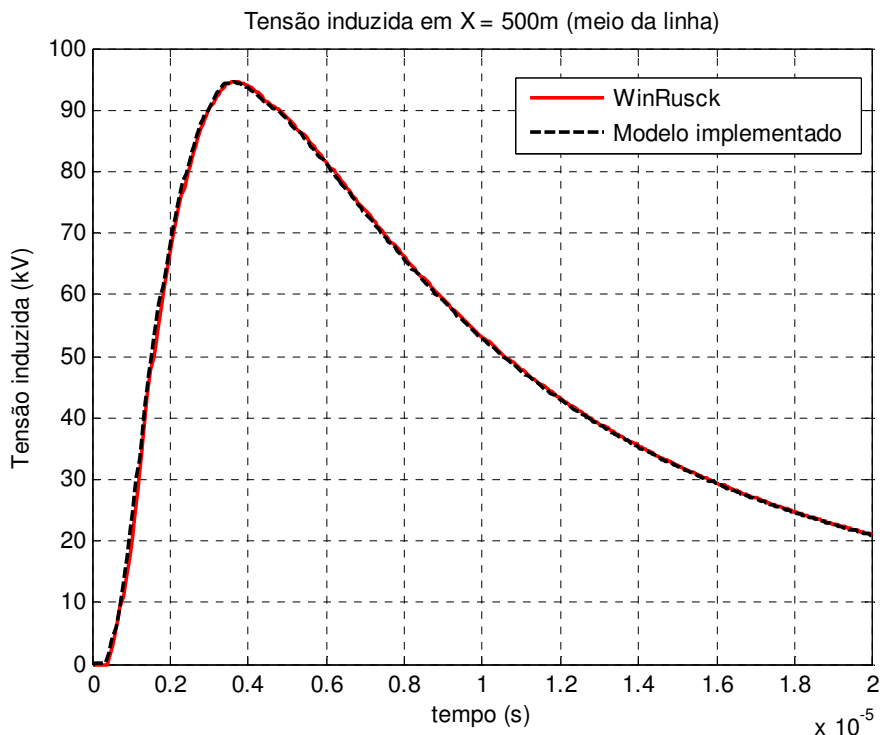


Figura 5-4 – Tensão induzida no meio da linha considerando a linha casada.

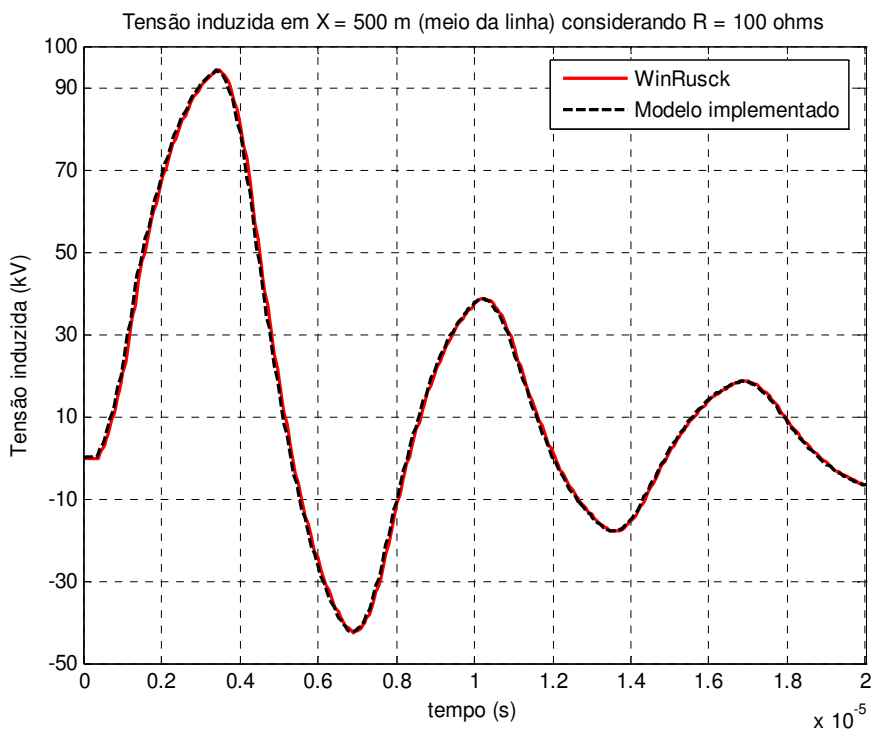


Figura 5-5 – Tensão induzida no meio da linha considerando a linha aterrada com 100Ω nas extremidades.

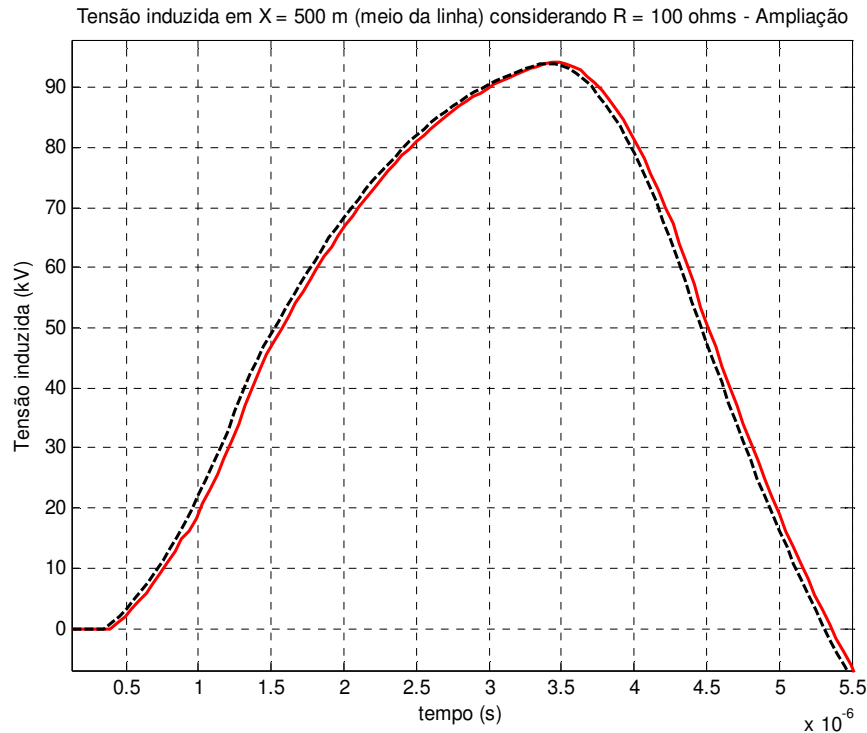


Figura 5-6 – Tensão induzida no meio da linha considerando a linha aterrada com 100Ω nas extremidades – ampliação do primeiro pico.

Conforme pode ser observado, as tensões induzidas obtidas utilizando os dois programas, não apresentam grandes diferenças. Com isto verificamos a concordância do código implementado. As pequenas diferenças são vistas quando ampliamos as curvas (Figura 5-6). Estas ocorrem devido à interpolação do tempo de trânsito realizada pelo *PSCAD[®]/EMTDCTM* e não implementada no *WinRusck*.

5.2 Resultados comparativos com metodologias propostas por outros autores

Neste item, são comparados os resultados obtidos com o componente desenvolvido com os resultados obtidos por Oliveira [12] e por Yokoyama [21], de forma a demonstrar a concordância da metodologia.

5.2.1 Comparação com resultados obtidos por Oliveira

A linha bifásica utilizada neste caso possui as seguintes características:

- Comprimento da linha : $L = 1000$ m;
- Terminações casadas;
- Altura do condutor 1: 10 m;
- Altura do condutor 2: 9 m;
- Diâmetro dos condutores: $D_c = 8,15$ mm;

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base são :

- Valor de pico da corrente: $I_p = 50$ kA;
- Tempo de frente da corrente: $1,0$ μ s;
- Velocidade de propagação da corrente de retorno: 30 m/ μ s;
- Coordenadas da descarga : $x=500$ m ; $y=100$ m;
- Ponto de observação da tensão induzida: $x = 500$ m;

A Figura 5-7 ilustra o caso. A Figura 5-8 apresenta os resultados obtidos por Oliveira e pelo componente implementado.

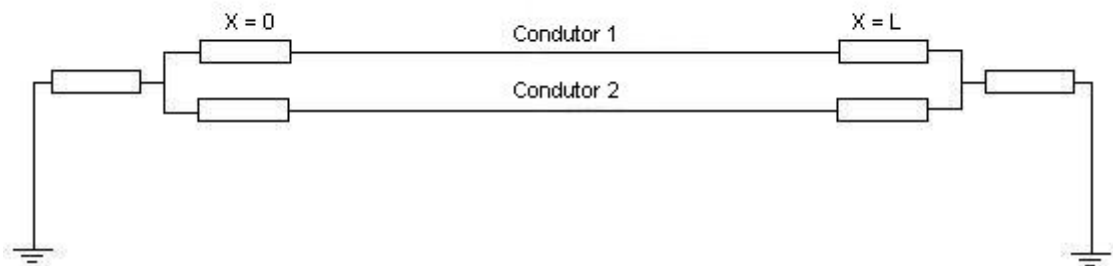
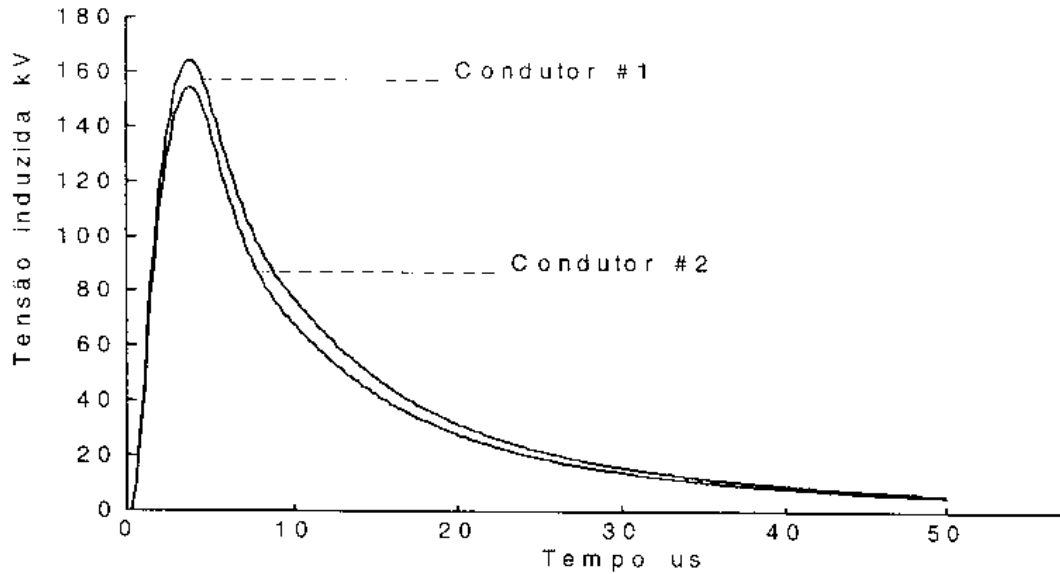
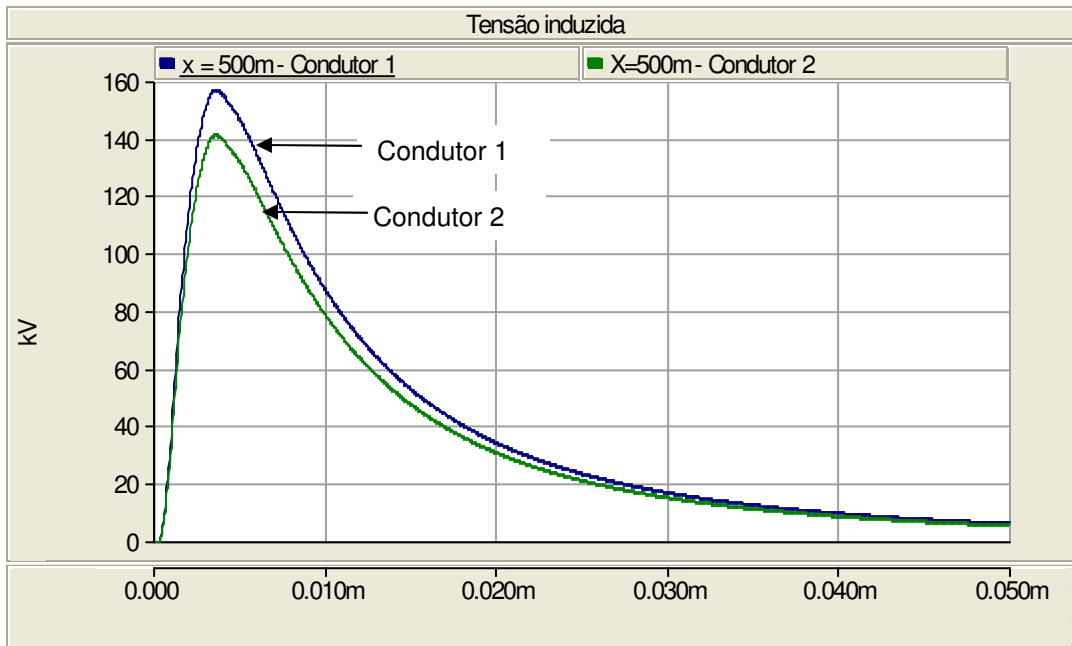


Figura 5-7 – Linha bifásica utilizada por Oliveira.



Oliveira



Modelo proposto

Figura 5-8 – Tensão induzida nos condutores de uma linha bifásica

Conforme pode ser observado, os resultados são bem correlacionados (diferença de 9% na amplitude), sendo que as curvas obtidas pelas duas metodologias possuem a mesma forma. Estas diferenças são creditadas ao fato da metodologia implementada por Oliveira necessitar de segmentar a linha para calcular as fontes de corrente. Neste caso apresentado por Oliveira, a linha esta segmentada em comprimentos de 100m.

5.2.2 Comparação com resultados obtidos por Yokoyama

As simulações apresentadas se referem ao seguinte caso:

Dados da linha :

- Comprimento da linha : $L = 2000$ m;
- Terminações casadas;
- Altura do cabo fase : 10,0 m;
- Altura do cabo pára-raios : 10,5 m;
- Diâmetro dos condutores : 8 mm.

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base :

- Valor de pico : $I_p = 100,0$ kA;
- Velocidade da corrente : 30 m/ μ s;
- Tempo de pico : 2,0 μ s;
- Tempo de cauda : 78,0 μ s;
- Coordenadas da descarga : $x = 0$ m e $y = 100$ m;
- Resistividade do solo : nula.

A Figura 5-9 ilustra o caso apresentado. Conforme pode ser observado nesta figura, Yokoyama considerou o ponto $x = 0$ no meio da linha. Os resultados são apresentados considerando esta convenção. A Figura 5-10 apresenta o resultado da comparação entre os resultados obtidos para o cabo fase, com a metodologia utilizada por Yokoyama e a metodologia aqui implementada. Os resultados são apresentados para pontos de observação em $x = 0$, 500 e 1000 m e considerando uma resistência de aterramento infinita ($R = \infty \Omega$).

A Figura 5-11 apresenta os resultados quando variamos a resistência R , apresentada na Figura 5-9, com os valores de 0, 30, 100, 200, 500 e $\infty \Omega$. As curvas se referem às tensões obtidas no meio da linha ($x = 0$ m).

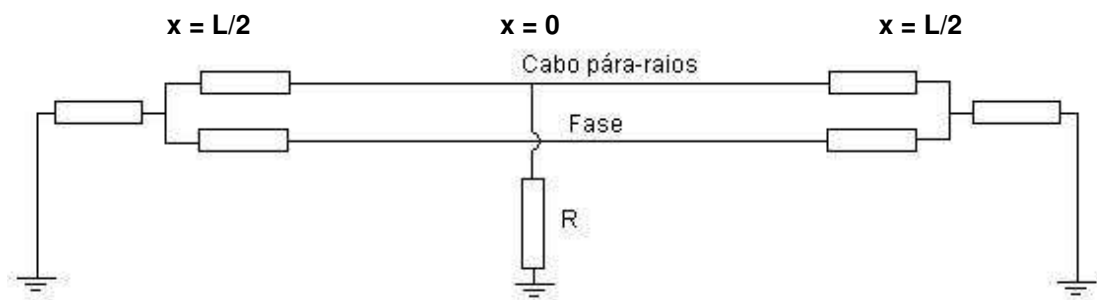
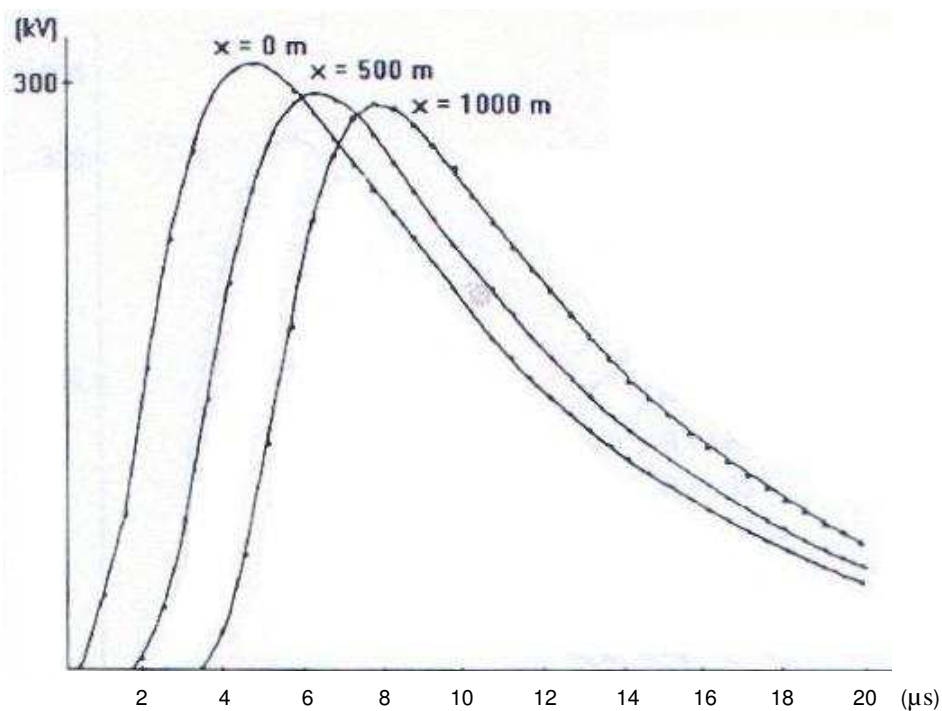
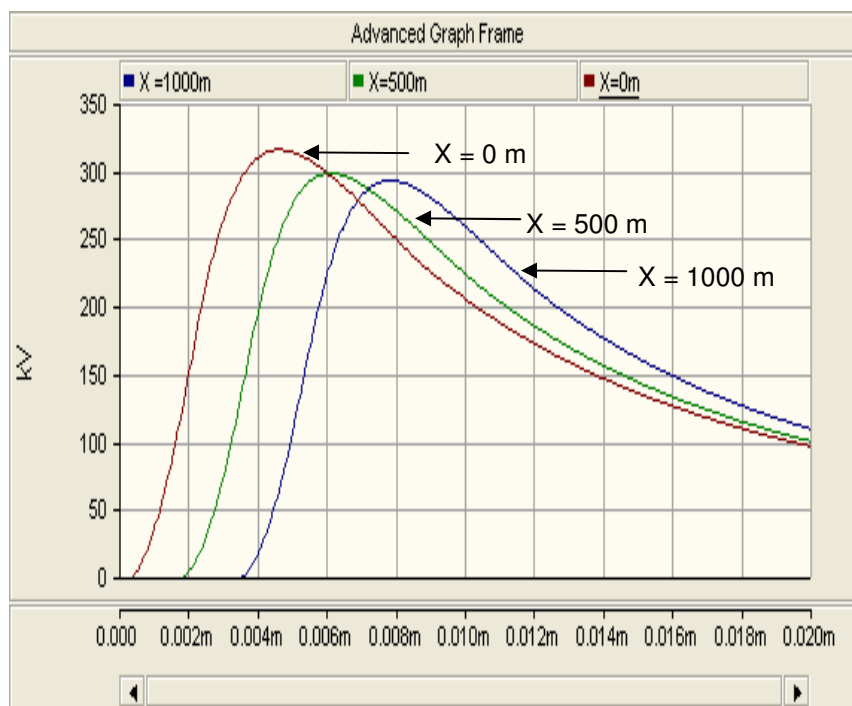


Figura 5-9 – Configuração utilizada por Yokoyama.



Yokoyama



Modelo proposto

Figura 5-10 – Valores obtidos por Yokoyama e pelo programa implementado para $x = 0$, 500 e 1000m.

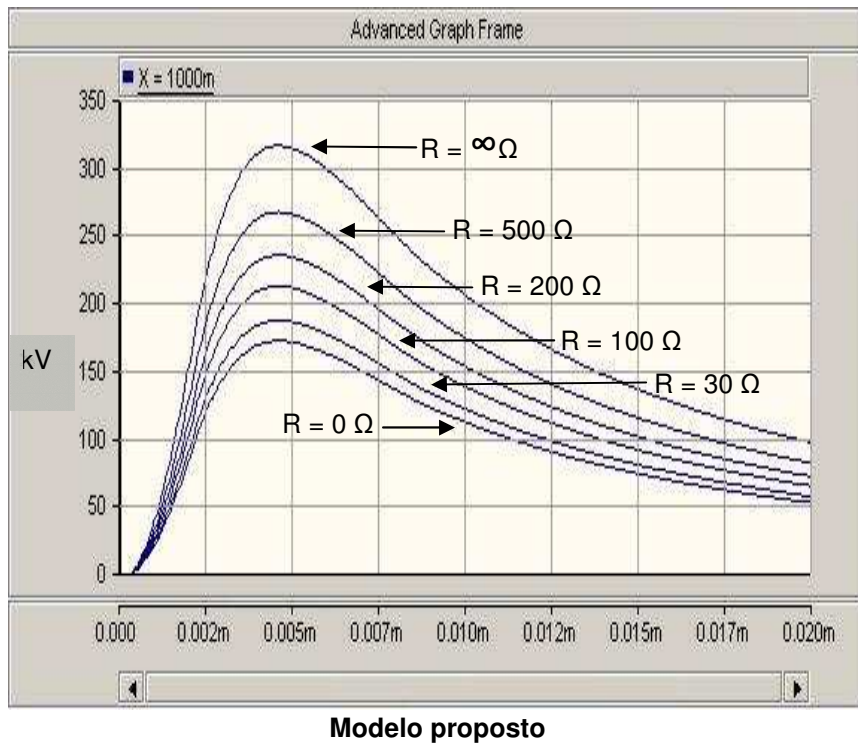
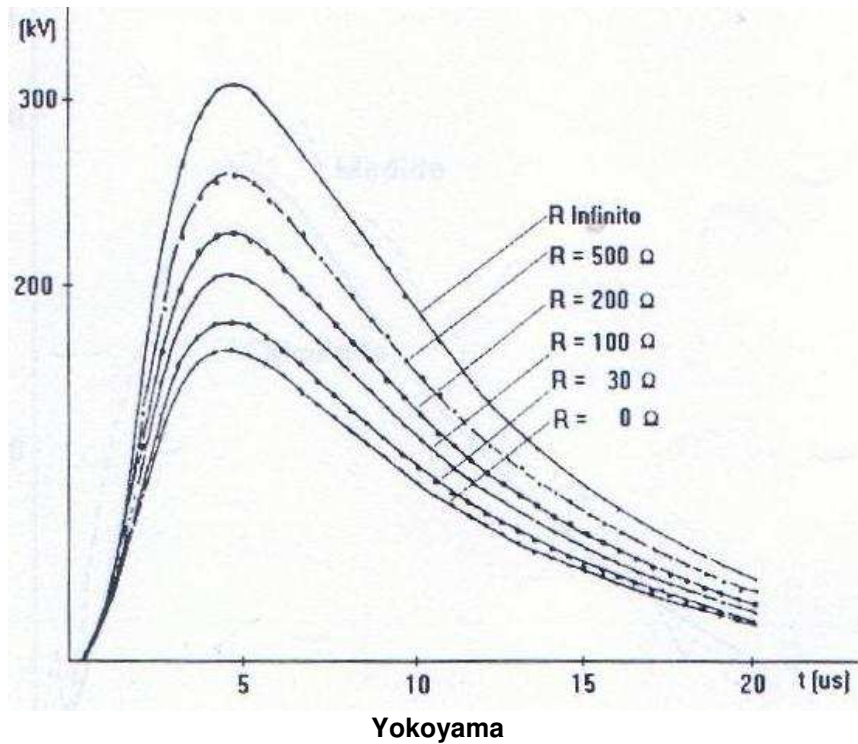


Figura 5-11 – Valores obtidos por Yokoyama e pelo programa implementado para $R = 0, 30, 100, 200, 500$ e $\infty \Omega$ e $x = 0m$.

Os resultados são muito similares (diferenças de 3,5%). Conforme apresentado em [10], a metodologia de Yokoyama também tem como base teórica a

formulação proposta por Rusck. O modelo aqui utilizado tem a vantagem de ser simples e de necessitar pequenos tempos de processamento.

5.3 Estudo de caso referente a uma linha constituída por dois condutores

Para realizar este estudo teórico iremos considerar uma linha bifásica. A Figura 5-12 ilustra o caso analisado. O caso base possui os seguintes parâmetros:

Dados da linha :

- Comprimento da linha : $L = 1800$ m;
- Terminações casadas;
- Altura do cabo fase : 10,0 m;
- Altura do cabo pára-raios : 11 m;
- Diâmetro dos condutores : 27 mm;
- Resistência de aterramento do condutor 1, nos pontos intermediários : Infinito

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base :

- Valor de pico : $I_p = 100,0$ kA;
- Velocidade da corrente : 30 m/ μ s;
- Tempo de pico : 2,0 μ s;
- Coordenadas da descarga : $x = 900$ m e $y = 100$ m;
- Resistividade do solo : nula.

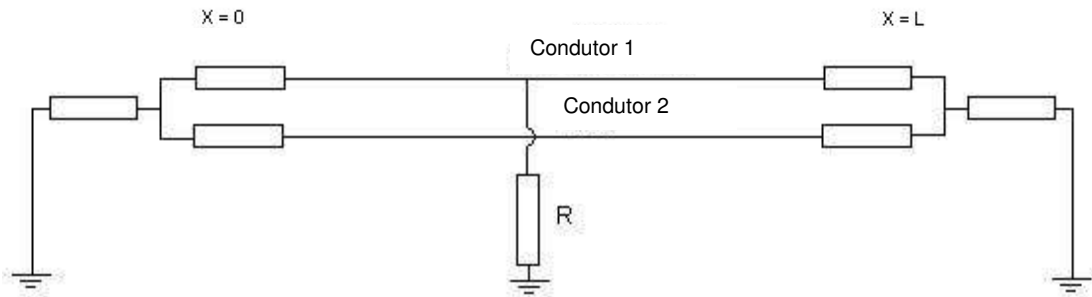


Figura 5-12 – Configuração utilizada no estudo teórico da linha bifásica.

5.3.1 Influência do ponto de incidência da descarga

A Figura 5-13 apresenta as tensões induzidas no condutor 2, quando a distância entre a descarga e a linha é de 100 m, 200 m e 300 m. As tensões apresentadas se referem ao meio da linha.

Podemos observar um decréscimo do valor de pico da tensão induzida à medida que a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha aumenta. Isto ocorre devido a menor interação entre os campos gerados pela descarga com a linha, à medida que aumenta a distância.

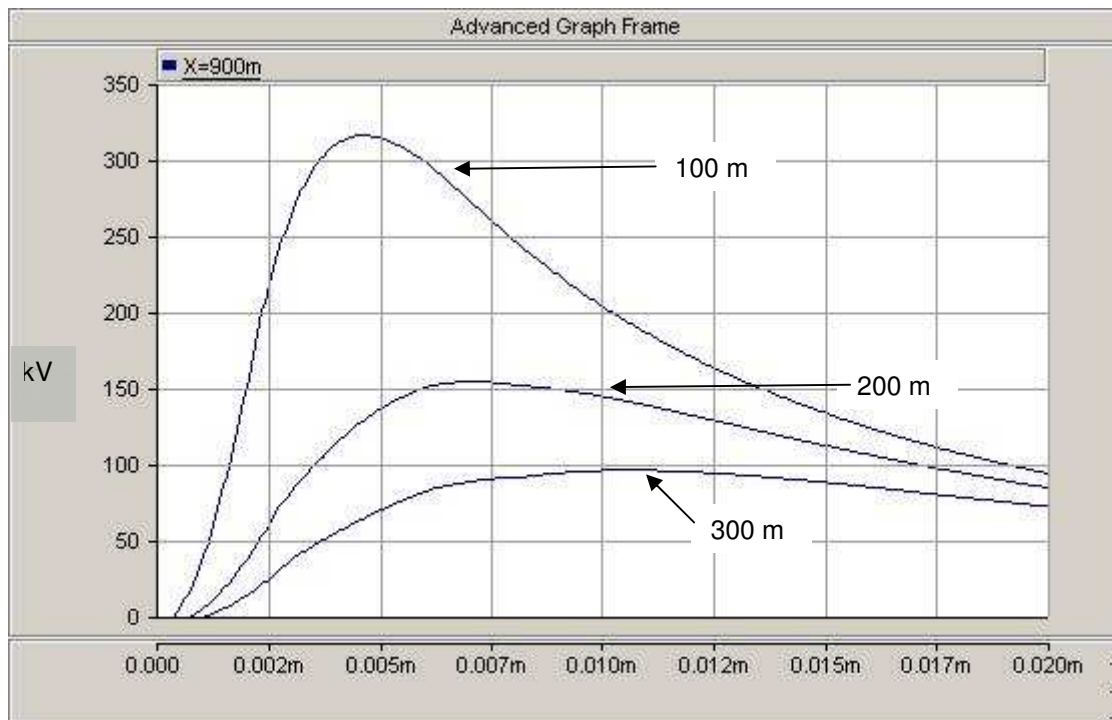


Figura 5-13 – Influência da distância da descarga atmosférica à linha.

5.3.2 Influência do valor de pico da corrente de retorno

O valor máximo da tensão induzida é diretamente proporcional ao valor de pico da corrente de retorno, conforme mostram as equações de Rusck, apresentadas no Capítulo 2.

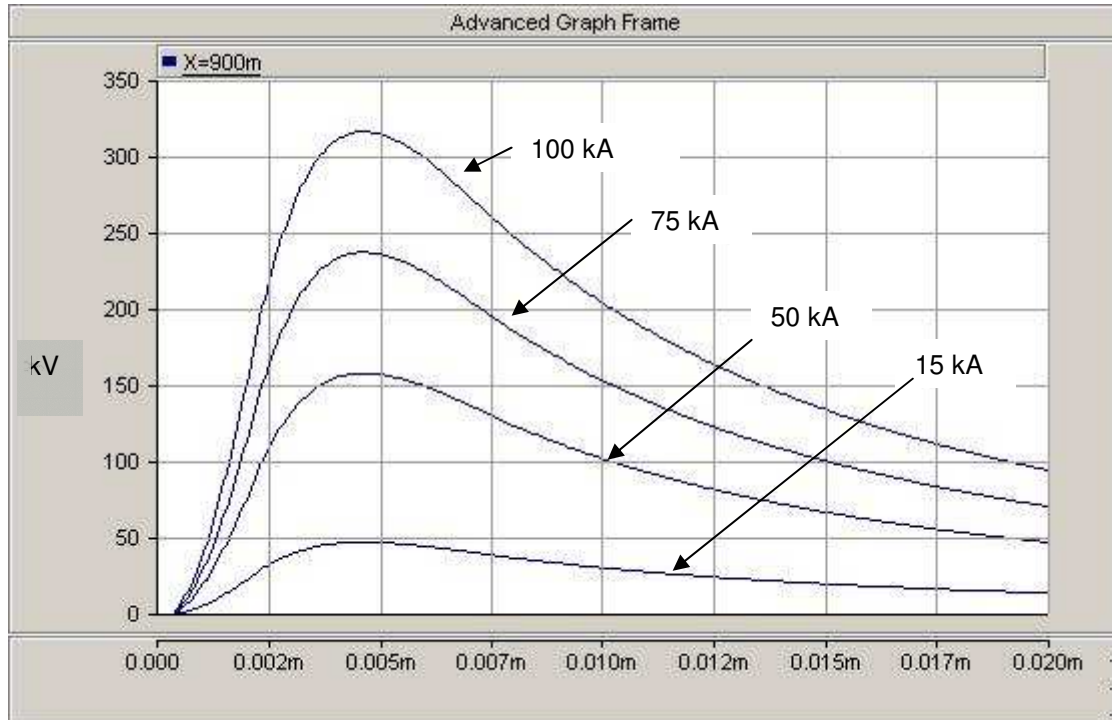


Figura 5-14 – Influência do valor de pico da corrente de retorno.

5.3.3 Influência do tempo de frente e da velocidade da corrente de retorno

Conforme apresentado na Figura 5-15, quanto maior o tempo de frente da corrente de retorno menor a tensão induzida. Este comportamento se justifica, uma vez que o aumento do tempo de frente, mantendo a amplitude da corrente fixa, diminui a taxa de variação da corrente e do campo associado a esta. Podemos observar ainda, que para pequeno tempo de frente, não ocorrem variações significativas na amplitude da tensão induzida.

Observando a Figura 5-16, vemos que o aumento na velocidade de propagação da corrente de retorno faz com que a onda de tensão induzida seja mais íngreme (tenha um menor tempo de frente). O fenômeno da tensão

induzida se processa de forma mais rápida. Isto ocorre devido ao menor intervalo de tempo em que ocorre a variação do campo eletromagnético.

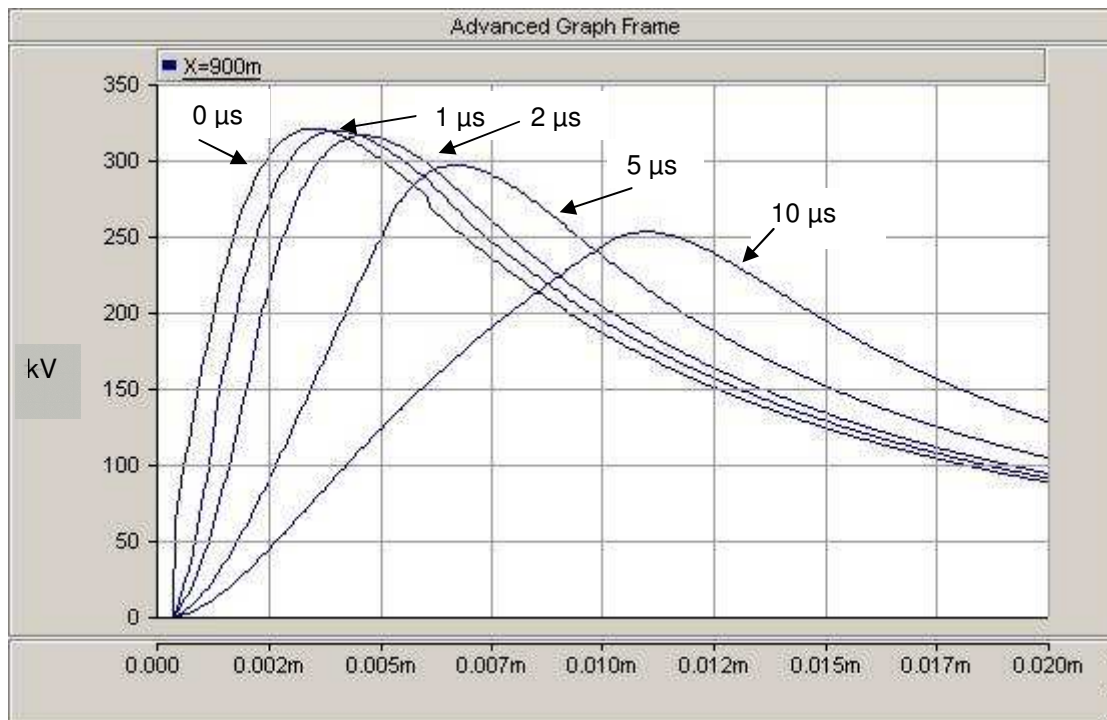


Figura 5-15 – Influência do tempo de frente da corrente de retorno.

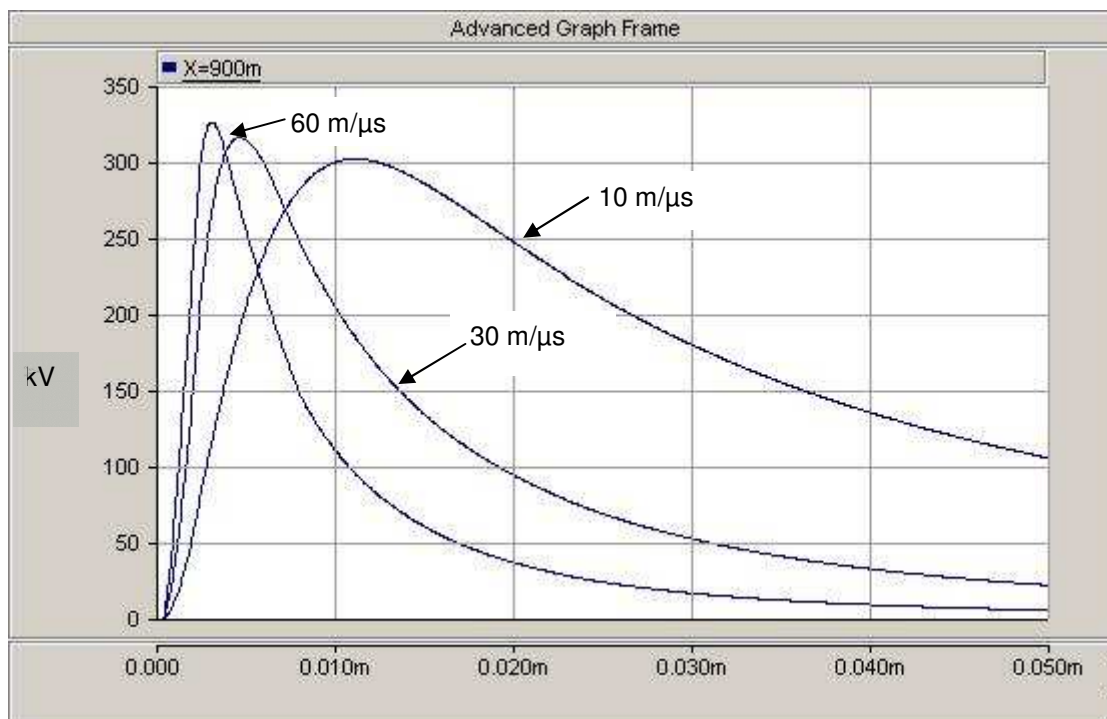


Figura 5-16 – Influência da velocidade de propagação da corrente de retorno.

5.3.4 Influência do comprimento da linha

De acordo com a Figura 5-17, para maiores comprimentos de linha, as contribuições originadas em pontos remotos da mesma são de intensidades menores e levam mais tempo para atingirem o ponto próximo da descarga. Essas contribuições não causam uma elevação significativa do valor máximo da tensão induzida.

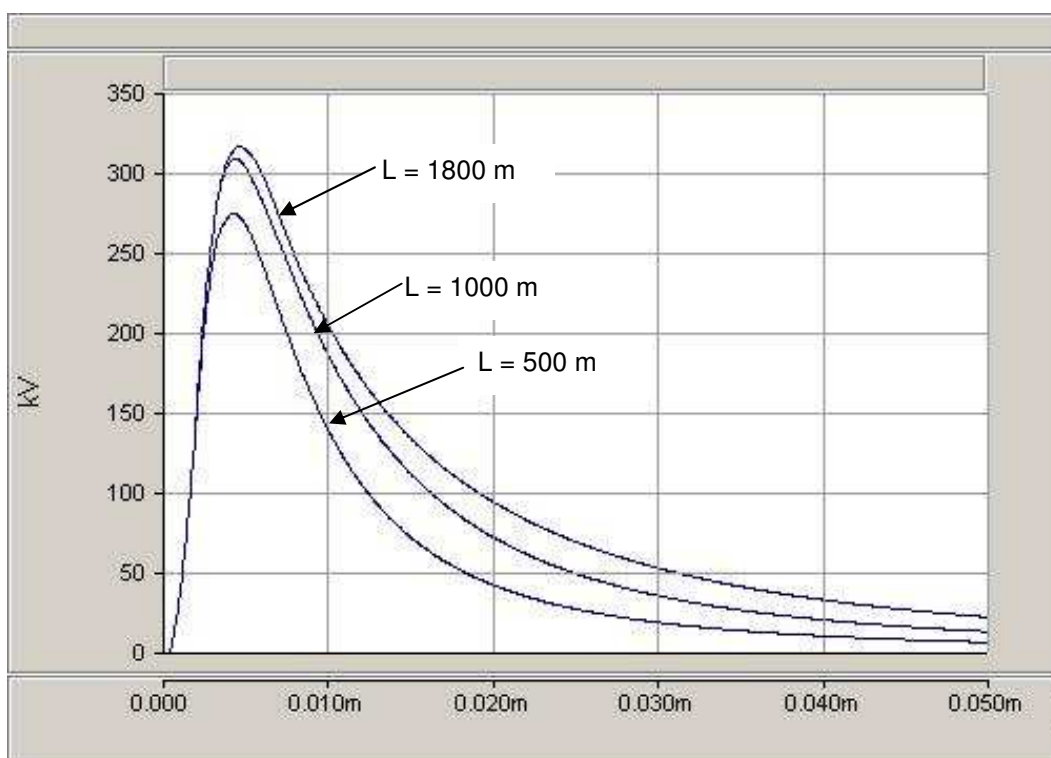


Figura 5-17 – Influência do comprimento da linha.

Até aqui, os resultados qualitativos obtidos para o caso bifásico foram os mesmos que se teria se fosse analisado um caso monofásico, de forma a permitir extrapolar este comportamento para casos polifásicos em geral.

5.3.5 Influência do aterramento

Conforme pode ser observado na Figura 5-18, à medida que consideramos a presença de aterramento ao longo do condutor 1 (neutro multiaterrado) a tensão induzida no condutor 2 se reduz. Quando consideramos as descontinuidades para a terra, temos a influência do campo não conservativo

provocando circulação de corrente no condutor que possui aterramento. Devido ao acoplamento entre os dois condutores, a tensão induzida no condutor 2 sofre uma redução.

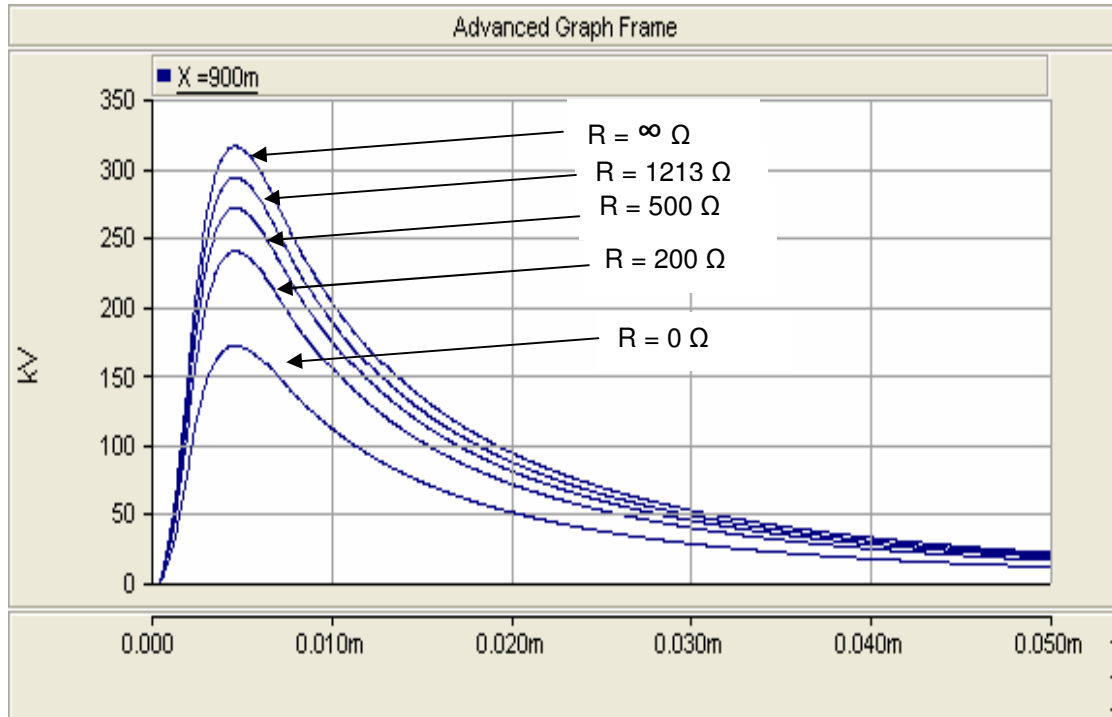


Figura 5-18 – Tensão induzida no condutor 2, variando a resistência de aterramento.

Considerando o condutor 1 da Figura 5-12 como sendo o cabo neutro multiaterrado, na Figura 5-19 é apresentada a tensão fase-neutro. As tensões são apresentadas considerando a variação das resistências de aterramento.

De modo geral, à medida que se diminui o valor da resistência de aterramento, aumenta-se a tensão fase-neutro. Isto ocorre porque o potencial do condutor 1 tende para o potencial da terra.

É possível observar que existe um valor de resistência onde a diferença de tensão induzida entre os condutores é praticamente zero. Isto ocorre porque estamos considerando o neutro acima do cabo fase. Conforme nos mostram as equações de Rusck, a tensão induzida é diretamente proporcional à altura, se considerarmos os cabos como sendo isolados. A medida que o cabo mais elevado passa a ser multiaterrado, o potencial neste tende para o potencial de terra (nulo) à medida que a resistência diminui. Após um determinado valor de

resistência a tensão no condutor mais elevado passa a ser menor que o do condutor mais baixo. Neste ponto a tensão fase-neutro é nula. Para o caso considerado este ponto ocorre quando a resistência de aterramento é de 1213 Ω .

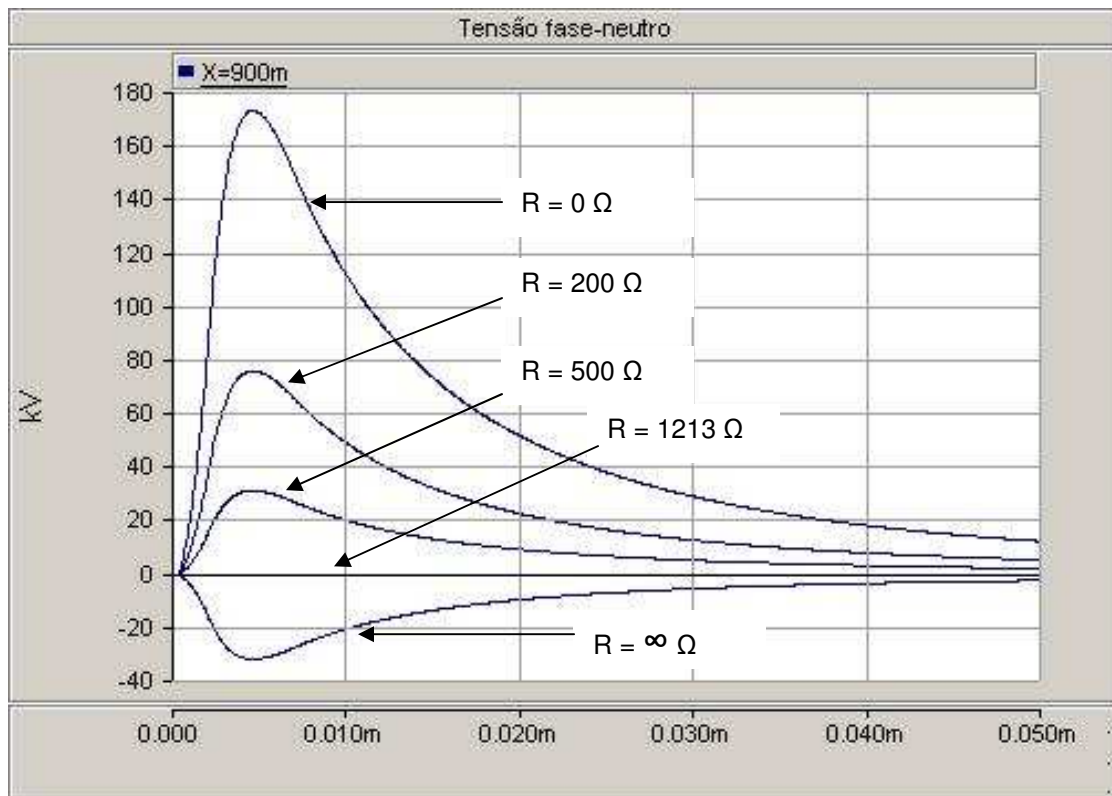


Figura 5-19 – Diferença de tensão entre o condutor 2 e o condutor 1.

5.4 Exemplo de caso referente a uma linha trifásica

Neste tópico é apresentado um exemplo de caso utilizando o componente desenvolvido que permite simular três condutores. Para isto será considerada uma linha de 1500 m de comprimento, casada nas extremidades. O casamento é feito alterando as condutâncias nos nós terminais da linha. O caso base possui os seguintes parâmetros:

Dados da linha :

- Comprimento da linha : L = 1500 m;
- Comprimento de cada vão : 250 m;
- Terminações casadas;

- Altura do cabo condutor 1 : 11 m;
- Altura do cabo condutor 2 : 10 m;
- Altura do cabo condutor 3 : 9 m;
- Diâmetro dos condutores : 16 mm;

Os parâmetros da descarga atmosférica para o caso base :

- Valor de pico : $I_p = 100,0$ kA;
- Velocidade da corrente : 30 m/ μ s;
- Tempo de pico : 2,0 μ s;
- Coordenadas da descarga : $x = 750$ m e $y = 100$ m;
- Resistividade do solo : nula.

A Figura 5-20 ilustra o caso analisado. O condutor 1 se trata de um cabo pára-raios, enquanto que o condutor 3 se trata de um neutro. Estes dois condutores são aterrados a cada 2 vãos. Os valores das resistências de aterramento considerados para cada um dos condutores são apresentados nas figuras 5-21 a 5-23 seguir.

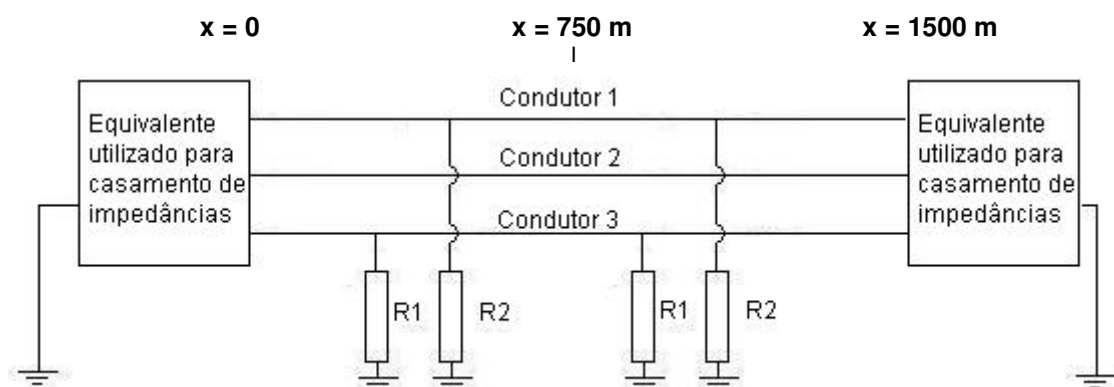


Figura 5-20 – Configuração utilizada no estudo teórico da linha bifásica.

Conforme pode ser observado nas figuras 5-21 a 5-23, quando se considera o cabo pára-raios aterrado (condutor 1) a tensão induzida no condutor 2 sofre uma diminuição no seu valor de pico. Se for considerado também a presença do cabo neutro (condutor 3) aterrado, observa-se uma nova diminuição na amplitude da tensão induzida no condutor 2 (Figura 5-23). Conforme pode ser observado, a presença deste segundo cabo aterrado não resulta em grande

diminuição no valor da tensão induzida no condutor 2, em relação a presença de apenas o condutor 1 aterrado.

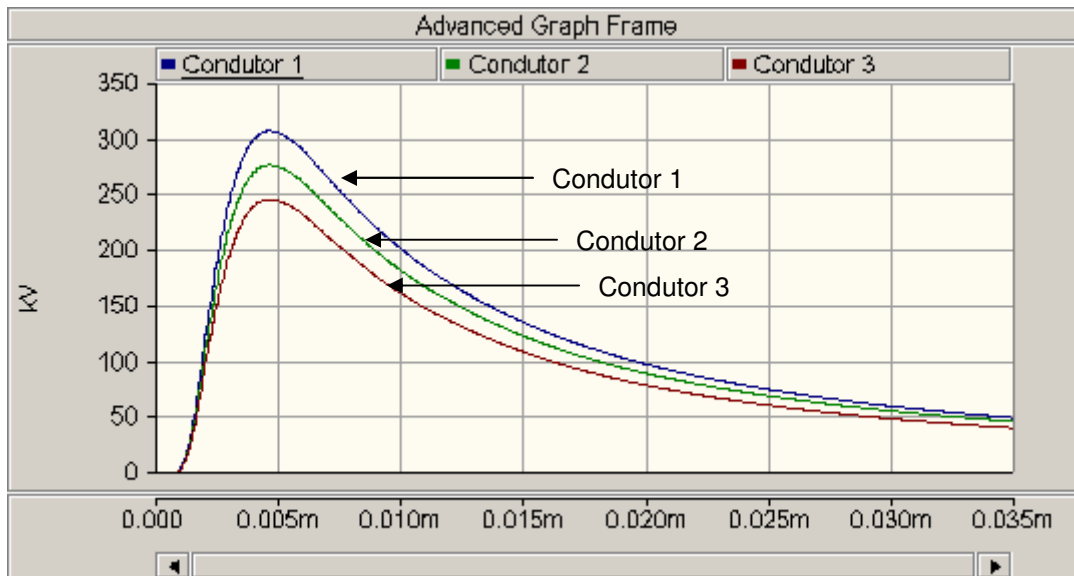


Figura 5-21 – Sobretensão nos condutores, em $X = 500$ m, considerando os condutores isolados ($R = \infty \Omega$).

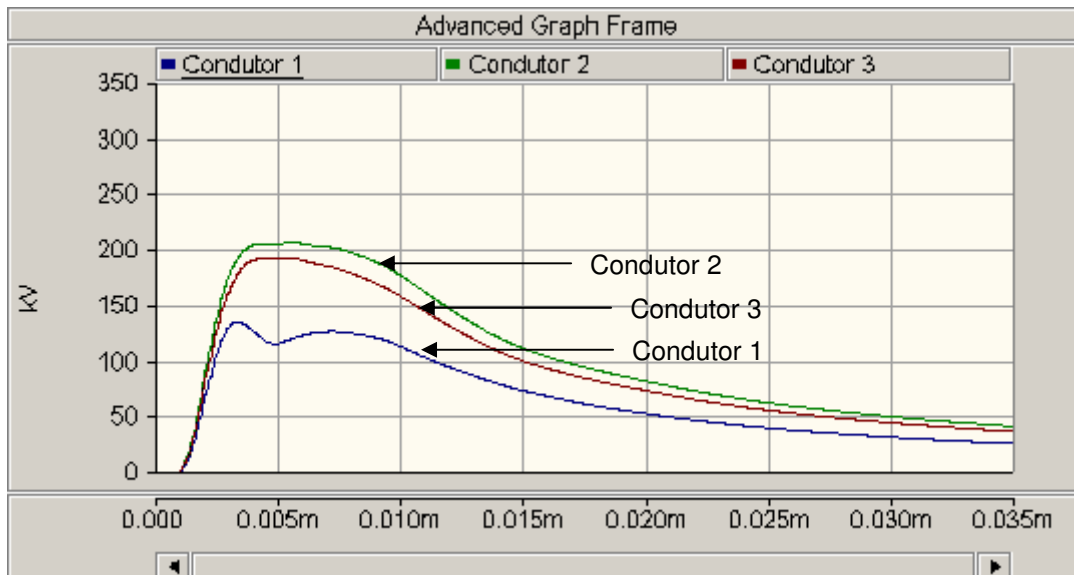


Figura 5-22 – Sobretensão nos condutores, em $X = 500$ m, considerando o condutor 1 aterrado a cada dois vãos com uma resistência de 300Ω .

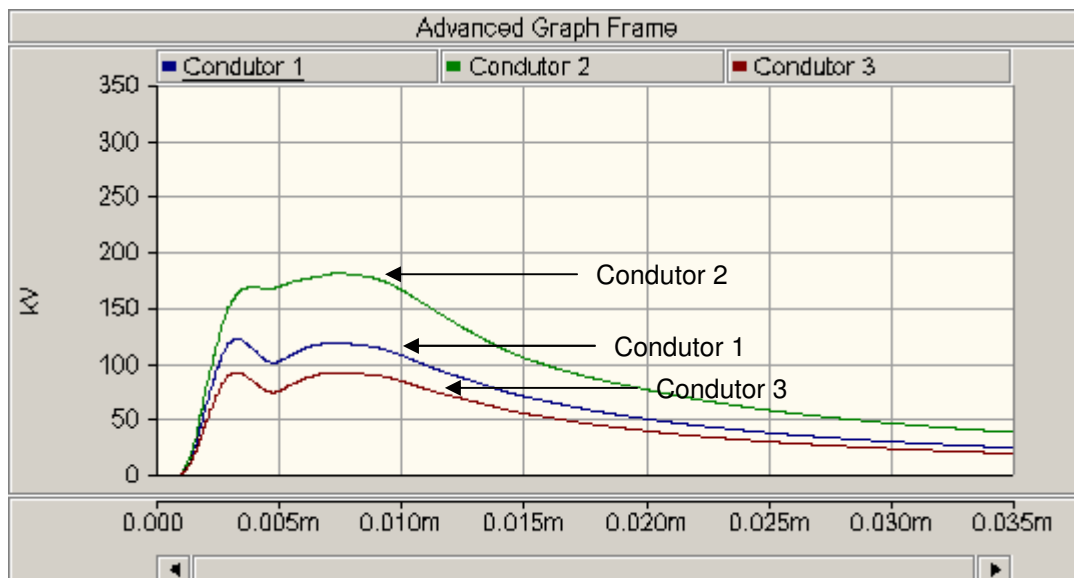


Figura 5-23 – Sobretensão nos condutores, em $X = 500$ m, considerando o condutor 1 e o condutor 2 aterrados a cada dois vãos com uma resistência de 300Ω .

5.5 Análise dos resultados

Após as análises e comparações realizadas neste capítulo foi verificado o correto funcionamento dos componentes implementados, validando a metodologia desenvolvida.

Dentre os estudos e análises que os modelos desenvolvidos permitem, se destaca a possibilidade de determinar o valor dos aterramentos das linhas que reduzem a diferença da tensão induzida por descarga atmosférica entre dois condutores.

6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 Conclusões e análise dos resultados

De acordo com o apresentado nos capítulos anteriores, pode-se concluir que o objetivo básico do trabalho foi alcançado. Conseguiu-se a expansão da metodologia de cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas polifásicas, utilizando fontes de compensação nas discontinuidades e a implementação desta metodologia em um pacote de cálculo de transitórios eletromagnéticos – O *PSCAD[®]/EMTDCTM*.

O *PSCAD[®]/EMTDCTM* se mostrou adequado para a implementação do modelo, devido a sua estrutura na criação do componente. Os componentes criados utilizam o limite dos nós permitidos para a versão de estudante. Componentes para maior número de condutores podem ser criados sem maiores dificuldades.

Esta implementação possibilitou o estudo de tensões induzidas em linhas aéreas com dois e três condutores e resultados interessantes, tal como a obtenção de uma resistência de aterramento onde a diferença de tensão induzida entre dois condutores é nula. A obtenção desta diferença de tensão nula (ou muito baixa) implica um melhoramento do desempenho de linhas de distribuição, uma vez que a diferença entre tensões fase-neutro que causam desligamentos destas linhas. Este fato tem que ser um pouco mais explorado e verificado experimentalmente através de simulações analógicas, via modelo reduzidos.

Nas comparações efetuadas, os resultados obtidos apresentaram concordâncias com os resultados apresentados na literatura, permitindo validar o modelo desenvolvido.

Uma vantagem no trabalho apresentado é a não necessidade de segmentação da linha em análise, o que resulta em ganho de tempo de processamento e memória de armazenamento, sem implicar em perda de precisão.

Pelo apresentado, a tensão induzida na linha é diretamente proporcional ao valor de pico da corrente de retorno. Fica evidente a influência da distância do ponto de incidência da descarga atmosférica nos valores das tensões induzidas. Quanto maior a proximidade do ponto de incidência maior será o valor da tensão induzida.

Quanto maior o tempo de frente da corrente de retorno menor a tensão induzida. Este comportamento possui variações significativas para maiores tempos de frente, da ordem de alguns microssegundos. Para poucos microssegundos as maiores alterações se observam na taxa de crescimento da tensão induzida.

A velocidade de propagação da corrente de retorno no canal de descarga tem influência na amplitude da forma de onda. O aumento da velocidade de propagação tende a aumentar a amplitude da tensão induzida e faz com que esta possua um menor tempo de frente e de cauda.

A variação do comprimento da linha apresenta diferenças na amplitude, devido à quantidade de carga acumulada em pontos distantes.

Já a presença de um fio aterrado reduz a tensão induzida neste condutor e nos demais próximos. A tensão induzida será menor tanto quanto menor for a resistência de aterramento. Porém, a diminuição desta resistência não implica na diminuição da tensão entre os condutores.

Por fim, destaca-se que a incorporação da rotina em um programa comercial de simulação de transitórios eletromagnéticos constitui-se em um importante passo para a aplicação da metodologia em toda a área de sistema de energia, possibilitando a futura utilização de outros componentes já implementados no programa.

6.2 Propostas de continuidade

Para permitir uma maior quantidade de estudos, o modelo desenvolvido deve ser capacitado de forma a permitir a simulação de pára-raios. Isto pode ser feito, de maneira relativamente fácil, se o desenvolvimento for feito em malha aberta, tendo um erro ocasionado por um atraso de um passo de cálculo. Esta alternativa resulta em uma aproximação boa para simulações que sejam realizadas com passos de cálculos pequenos.

Fica ainda como proposta de continuidade a alteração da forma de entrada de dados dos componentes desenvolvidos, de forma a permitir simulações probabilísticas. O *PSCAD[®]/EMTDCTM* possui componentes que realizam a escolha aleatória de valores numéricos dentro de uma faixa especificada pelo usuário. Uma alteração da forma de entrada dos parâmetros do componente (amplitude da descarga, tempo de frente, posição de incidência, etc), para que estes sejam feitos por nós no componente (e não através de caixa de diálogos), bem como um tratamento dos dados após as simulações, de forma a

apresentar resultados significativos que permitam análises, torna a ferramenta mais poderosa.

Outro fato a ser trabalhado é a consideração da resistividade do solo na tensão induzida. O *PSCAD[®]/EMTDCTM* possui modelos para linhas que consideram a resistividade. A utilização destes modelos permite considerar a resistividade durante a propagação da onda injetada pelas fontes de compensação. Porém a tensão de Rusck, conforme apresentada, não considera a resistividade do solo. Desde que se altere a tensão de Rusck para considerar este fator o modelo é facilmente adaptado.

Por fim, fica como proposta de continuidade o estudo de como tratar a tensão induzida para linhas que possuam ramais ou derivações. Basicamente deve-se determinar como será a compensação nas extremidades dos trechos das linhas que sejam comuns. O sistema de coordenadas também deverá possuir atenção especial.

BIBLIOGRAFIA

- 1 Rusck, S., Induced Lighting Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks, Doctor's Thesis, Trans. Of Royal Institute of Technology, Stockolm, 1957;
- 2 Lopes, I. J. S., Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado Frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- 3 Naidu, S. R., Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Editora GRAFSET, Campina Grande, Brasil, 1985;
- 4 Greenwood, A., Electrical Transients in Power Systems, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991;
- 5 Boaventura, W.C., Estudos da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- 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, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;

- 7 Porto, E. W., Cálculo de Sobretensões em Linhas de Distribuição Devido a Descargas Atmosféricas Laterais, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 1990;
- 8 D’Ajuz, A., Fonseca, C. S., Carvalho, F. M., Filho, J. A., Dias, L.E.N; Pereira, M. P., Esmeraldo, P. C. V., Vaisman, R., Frontini, S., Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, Editora Universitária Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil, 1987;
- 9 Araújo, E. A. A., Paulino, J. O. S., Silva, J. P., Lightning Induced Voltage Calculation in Multi-Conductor Transmission Lines: EMTP Simulations, 12th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG, 25-28 October, Sapporo, Japan, 1999;
- 10 Paulino, J. O. S., Uma Contribuição ao Estudo da Proteção de Redes Elétricas Contra Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, 1994;
- 11 Silva, J. P., Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001;
- 12 Oliveira, T. A. S., Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica em Linhas Aéreas de Energia e Cabos Telefônicos: Uma Abordagem pela Teoria de Circuitos, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001;

- 13 Araújo, E. A. A., Washington L. A. Neves, Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005;
- 14 Alternative Transients Rule Book, Leven, Bélgica, 1987;
- 15 Zanetta Júnior, L. C., Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, Editora da Universidade de São Paulo, 2003;
- 16 Visacro, S. F., Schroeder, M. A. O., Soares, A., Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia, Livro em Fase de Edição, 2001;
- 17 Dias, R. N., Mesquita C. R., Visacro, S. F., Cazetta A., Análise de Incidência de Descargas Atmosféricas Nuvem-Solo Negativas no Estado de Minas Gerais – SNPTEE 2005;
- 18 Ávila, A. F., Lopes, I. J.S, Miranda, G. C., Análise de Desempenho de Redes de Distribuição Aéreas Rurais Frente a Descargas Atmosféricas Através do Sistema de Localização de Tempestades – Uma Nova Ferramenta de Engenharia - Estudo de Caso – VI SBQEE – 2005;
- 19 DOMMEL, Hermann W., Electromagnetic transients program reference manual (EMTP theory book). Vancouver/Canadá: Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, 1986;
- 20 CHEN, C. T., Linear System Theory and Design. Oxford University Press, 1999;
- 21 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 – conforme citado em [10];

- 22 User's Guide – on the use of PSCAD – Manitoba HVDC – Research Centre;
- 23 User's Guide – A Comprehensive Resource for EMTDC – Manitoba HVDC – Research Centre;
- 24 Help On Line do PSCAD/ EMTDC – Versão V3.0.3 – 2000;
- 25 IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines – IEEE Std 1410TM – 2004;
- 26 Thomazella, R., Implementação Computacional Para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição, Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial), Universidade Federal Paulista, 2004;
- 27 Ribeiro, E.J., Uma Contribuição ao Estudo dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2005;
- 28 Sartori, C.A.F., Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética em Estruturas Atingidas por Descargas Atmosféricas, Tese (Doutorado em Engenharia de Eletricidade), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999;
- 29 Carvalho, T. O., Desenvolvimento de Sistemas Para Estudo de Tensão Induzidas em Linhas de Média Tensão por Descargas Atmosféricas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004;
- 30 Silva Neto, A., Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão, Dissertação (Mestrado em

Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004;

- 31 Silveira, F. H., Aplicação de um Modelo Para Cálculo de Tensão Induzida Por Descarga Atmosférica, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001;
- 32 Relatório Técnico nº 13 - A Influência de descargas atmosféricas indiretas sobre sistemas de telecomunicações e o efeito de proteção proporcionado por sistemas de aterramento - Programa Computacional Para Cálculo de Tensões Induzidas em Cabos Telefônicos. Rel.13.04/2004 DEE.FCO.CPqD-22p, Abril de 2004.

Anexo A

Neste anexo é apresentado as rotinas utilizadas em teste no Matlab[®]. Este código permite analisar a tensão induzida em linha bifásica dois vãos, considerando aterramento nas terminações laterais e no meio da linha. No final são apresentados alguns resultados obtidos com este código (considerando a situação apresentada no Item 5.2.2 do Capítulo 5).

Rotina Principal

```
%%%% Sandro de Castro Assis
%%%% Mestrado em Eng. Elétrica - Compatibilidade Eletromagnética
%%%% PPGEE - UFMG - Setembro de 2005
%%%% Implementação das equações de Rusck com Transitórios Eletromagnéticos

clc;
close all;
clear all;

% Dados de entrada
% Constantes
uo=4*pi*1e-7;      % permeabilidade do espaço livre
eo=8.85e-12;      % permissividade do espaço livre
Zo=(4*pi)^-1*(uo/eo)^.5; % impedância intrínseca do canal de descarga
vo=300;           % velocidade da luz em m/us

% Dados da corrente de descarga
Idesc=input('Entre com o valor de pico da corrente de descarga (kA)');
v=input('Entre com a velocidade de propagação da corrente de retorno (m/us)');
L=input('Entre com o comprimento do canal de descarga (m)');
ydesc=input('Entre com a distância entre o ponto de queda do raio e a linha (m)');
tf=input('Entre com o tempo de frente da corrente de descarga (us)');

% Pontos de observação da descarga (metros)
p1=-1000;
p2=0;
p3=1000;

% Dados dos condutores
h1=input('Entre com a altura do condutor da linha 1 (m)');
h2=input('Entre com a altura do condutor linha 2 (m)');
```

Anexo A

```
Zc1=input('Entre com a impedância de surto da linha 1 (ohms)');
Zc2=input('Entre com a impedância de surto da linha 2 (ohms)');
Zcm=input('Entre com a impedância de surto mútua entre os condutores da linha 1 e 2 (ohms)');

Zc=[Zc1 Zcm;Zcm Zc2];

% Dados das resistências de aterramento
R1e=input('Entre com a resistência terminal da esquerda da linha 1 (ohms) ');
R2e=input('Entre com a resistência terminal da esquerda da linha 2 (ohms) ');
R1m=input('Entre com a resistência terminal do meio da linha 1 (ohms) ');
R2m=input('Entre com a resistência terminal do meio da linha 2 (ohms) ');
R1d=input('Entre com a resistência terminal da direita da linha 1 (ohms) ');
R2d=input('Entre com a resistência terminal da direita da linha 2 (ohms) ');
Rme=input('Entre com a resistência mutua no terminal da esquerda (ohms) ');
Rmm=input('Entre com a resistência mutua no terminal do meio (ohms) ');
Rmd=input('Entre com a resistência mutua no terminal da direita (ohms) ');
Re=[R1e Rme;Rme R2e];
Rm=[R1m Rmm;Rmm R2m];
Rd=[R1d Rmd;Rmd R2d];

%Referências de tempo
dt=input('Entre com o passo de cálculo (us)');
tmax=input('Entre com o tempo de simulação (us)');
tau=(abs(p1)/300); % comprimento da seção / 300 m/us --> us
n=round(tau/dt); % N° inteiro referente a posição no vetor, considerando o dt -> utilizado no calculo de transitórios.

tau0=(abs(p1)/300);
tau1=(abs(p1)/300);
n0=round(tau0/dt);
n1=round(tau1/dt);

t=dt:dt:tmax;
nrampa=round(tf/dt);
if nrampa==0,
    nrampa=1;
end

% Valores de seqüência zero e positiva
Y=inv(Zc);
Q=[1 1;1 -1];
Zs=inv(Q)*Zc*Q;
Z0=Zs(1,1);
Z1=Zs(2,2);
Y0=1/Z0;
Y1=1/Z1;
Yp=Y(1,1);
Ym=Y(1,2);

%Inicialização
V1_total=zeros(1,length(t));
V2_total=zeros(1,length(t));
```

```

V3_total=zeros(1,length(t));
V4_total=zeros(1,length(t));
V5_total=zeros(1,length(t));
V6_total=zeros(1,length(t));

ICOR=zeros(1,length(t));
ICORT=zeros(1,length(t));

y=ydesc;
for ii=1:nrampa,
    aa=ii
    Io=Idesc/nrampa;
    taux=ii*dt;
    fontes_compensacao; % Rotina que calcula as fontes de compensação e as tensões de Rusck
    transi;             % Rotina responsável pelo cálculo de transitórios
    soma_contribuicoes; % Rotina que soma as tensões de Rusck com as tensões obtidas pelo transitório
end

figure(1)
plot(t,V1_total,'r',t,V2_total,'g');
title('Extremidade esquerda da linha');
grid;
figure(2)
plot(t,V3_total,'b',t,V4_total,'m');
title('Meio da linha');
grid;
figure(3)
plot(t,V5_total,'k',t,V6_total,'y');
title('Extremidade direita da linha');
grid;
figure (4)
plot(t,V1_total,'r',t,V2_total,'g',t,V3_total,'b',t,V4_total,'m',t,V5_total,'k',t,V6_total,'y');
title('Todas as discontinuidades da linha');
grid;
pause(0.01);

```

Rotina fontes compensacao

```

% Calculos
for ii=1:3,
    if ii==1,
        x=p1;
    elseif ii==2
        x=p2;
    else x=p3;
    end
    B=v/vo;
    ta=(y^2+x^2)^.5/vo;
    kk=0;
    for i=1:length(t),

```


Anexo A

```
if t(i)>=ta+taux
    % Tensão induzida à esquerda do ponto para uma linha infinita
    x1=x;
    t(i)=t(i)-taux;
    U1_rusck1(i)=Zo*Io*h1*B*((vo*t(i)-x1)/(y^2+(B^2)*(vo*t(i)-x1)^2))*(1+(x1+(B^2)*
(vo*t(i)-x1))/((B^2)*(vo*t(i))^2+(1-(B^2))*((x1^2)+(y^2)))^0.5));
    U1_rusck2(i)=Zo*Io*h2*B*((vo*t(i)-x1)/(y^2+(B^2)*(vo*t(i)-x1)^2))*(1+(x1+(B^2)*
(vo*t(i)-x1))/((B^2)*(vo*t(i))^2+(1-(B^2))*((x1^2)+(y^2)))^0.5));
    % Tensão induzida à direita do ponto para uma linha infinita
    x2=-x;
    U2_rusck1(i)=Zo*Io*h1*B*((vo*t(i)-x2)/(y^2+(B^2)*(vo*t(i)-x2)^2))*(1+(x2+(B^2)*
(vo*t(i)-x2))/((B^2)*(vo*t(i))^2+(1-(B^2))*((x2^2)+(y^2)))^0.5));
    U2_rusck2(i)=Zo*Io*h2*B*((vo*t(i)-x2)/(y^2+(B^2)*(vo*t(i)-x2)^2))*(1+(x2+(B^2)*
(vo*t(i)-x2))/((B^2)*(vo*t(i))^2+(1-(B^2))*((x2^2)+(y^2)))^0.5));
    t(i)=t(i)+taux;
else
    U1_rusck1(i)=0;
    U1_rusck2(i)=0;
    U2_rusck1(i)=0;
    U2_rusck2(i)=0;
end
end;
if ii==1,
    U_rusck1_p1=U1_rusck1+U2_rusck1; % Vetor da tensão de Rusck na linha 1
    U_rusck2_p1=U1_rusck2+U2_rusck2; % Vetor da tensão de Rusck na linha 2
    U_rusck_p1=[U_rusck1_p1;U_rusck2_p1];
    U1_rusck_p1=[U1_rusck1;U1_rusck2];
    U2_rusck_p1=[U2_rusck1;U2_rusck2];
    I=(inv(Re)+inv(Zc))*(-U1_rusck_p1+(Re-Zc)*inv((Re+Zc))*U2_rusck_p1);
    I1=I(1,:);
    I2=I(2,:);
elseif ii==2
    U_rusck1_p2=U1_rusck1+U2_rusck1; % Vetor da tensão de Rusck na linha 1
    U_rusck2_p2=U1_rusck2+U2_rusck2; % Vetor da tensão de Rusck na linha 2
    U_rusck_p2=[U_rusck1_p1;U_rusck2_p1];
    U1_rusck_p2=[U1_rusck1;U1_rusck2];
    U2_rusck_p2=[U2_rusck1;U2_rusck2];
    I=(inv(Rm)+inv(Zc)+inv(Zc))*(-Zc*inv(2*Rm+Zc)*(U1_rusck_p2+U2_rusck_p2));
    I3=I(1,:);
    I4=I(2,:);
else
    U_rusck1_p3=U1_rusck1+U2_rusck1; % Vetor da tensão de Rusck na linha 1
    U_rusck2_p3=U1_rusck2+U2_rusck2; % Vetor da tensão de Rusck na linha 2
    U_rusck_p3=[U_rusck1_p1;U_rusck2_p1];
    U1_rusck_p3=[U1_rusck1;U1_rusck2];
    U2_rusck_p3=[U2_rusck1;U2_rusck2];
    I=(inv(Rd)+inv(Zc))*(-U2_rusck_p3+(Rd-Zc)*inv((Rd+Zc))*U1_rusck_p3);
    I5=I(1,:);
    I6=I(2,:);
end
end
```

Rotina Transi

```

Y = zeros(6,6);
Y(1:2,1:2) = inv(Zc)+inv(Re);
Y(3:4,3:4) = 2*inv(Zc)+inv(Rm);
Y(5:6,5:6) = inv(Zc)+inv(Rd);

Q=[1 1 0 0 0 0 ;
   1 -1 0 0 0 0 ;
   0 0 1 1 0 0 ;
   0 0 1 -1 0 0 ;
   0 0 0 0 1 1 ;
   0 0 0 0 1 -1];

% Alocação e inicialização dos vetores de corrente e tensão
% Seção 1 da Linha
Ik0_1=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Ik1_1=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Im0_1=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Im1_1=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Ikm0_1=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Ikm1_1=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Imk0_1=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Imk1_1=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
% Seção 2 da Linha
Ik0_2=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Ik1_2=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Im0_2=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Im1_2=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Ikm0_2=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Ikm1_2=zeros(1,length(t)+2*n+n1);
Imk0_2=zeros(1,length(t)+2*n+n0);
Imk1_2=zeros(1,length(t)+2*n+n1);

V=zeros(6,length(t)+2*n);
Vs=zeros(6,length(t)+2*n);

% Loop de cálculo dos transitórios
for i=2*n:length(t)+2*n-1, % REALIZAR A MUDANÇA FASE <---> SEQ

    If=Q*[Ik0_1(1,i-n0);Ik1_1(1,i-n1);Im0_1(1,i-n0)+Ik0_2(1,i-n0);Im1_1(1,i-n1)+Ik1_2(1,i-n1);Im0_2(1,i-n0);Im1_2(1,i-
n1)];

    Iinj=[If(1,1)+I1(i-2*n+1);
          If(2,1)+I2(i-2*n+1);
          If(3,1)+I3(i-2*n+1);
          If(4,1)+I4(i-2*n+1);
          If(5,1)+I5(i-2*n+1);
          If(6,1)+I6(i-2*n+1)];

```

```

V(:,i)=inv(Y)*Iinj;
Vs=inv(Q)*V(:,i);
%Seção 1 da Linha
%linha entre os nós K e M - seq. zero
Ikm0_1(i)= Vs(1,1)/Z0 - Ik0_1(i-n0);
Imk0_1(i)= Vs(3,1)/Z0 - Im0_1(i-n0);
Ik0_1(i) = Vs(3,1)/Z0 + Imk0_1(i);
Im0_1(i) = Vs(1,1)/Z0 + Ikm0_1(i);
%linha entre os nós K e M - seq. positiva
Ikm1_1(i)= Vs(2,1)/Z1 - Ik1_1(i-n1);
Imk1_1(i)= Vs(4,1)/Z1 - Im1_1(i-n1);
Ik1_1(i) = Vs(4,1)/Z1 + Imk1_1(i);
Im1_1(i) = Vs(2,1)/Z1 + Ikm1_1(i);
%Seção 2 da Linha
%linha entre os nós K e M - seq. zero
Ikm0_2(i)= Vs(3,1)/Z0 - Ik0_2(i-n0);
Imk0_2(i)= Vs(5,1)/Z0 - Im0_2(i-n0);
Ik0_2(i) = Vs(5,1)/Z0 + Imk0_2(i);
Im0_2(i) = Vs(3,1)/Z0 + Ikm0_2(i);
%linha entre os nós K e M - seq. positiva
Ikm1_2(i)= Vs(4,1)/Z1 - Ik1_2(i-n1);
Imk1_2(i)= Vs(6,1)/Z1 - Im1_2(i-n1);
Ik1_2(i) = Vs(6,1)/Z1 + Imk1_2(i);
Im1_2(i) = Vs(4,1)/Z1 + Ikm1_2(i);
end

```

Rotina soma contribuicoes

% Determina a tensão induzida somando a tensão de Rusck com o transitório
 % calculado com as fntes de compensação.

```

V1=V(1,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck1_p1;
V2=V(2,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck2_p1;
V3=V(3,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck1_p2;
V4=V(4,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck2_p2;
V5=V(5,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck1_p3;
V6=V(6,2*n:length(t)+2*n-1)+U_rusck2_p3;

```

```

ICOR=U_rusck2_p1;
ICORT=ICORT+ICOR;

```

```

V1_total=V1_total+V1;
V2_total=V2_total+V2;
V3_total=V3_total+V3;
V4_total=V4_total+V4;
V5_total=V5_total+V5;
V6_total=V6_total+V6;

```

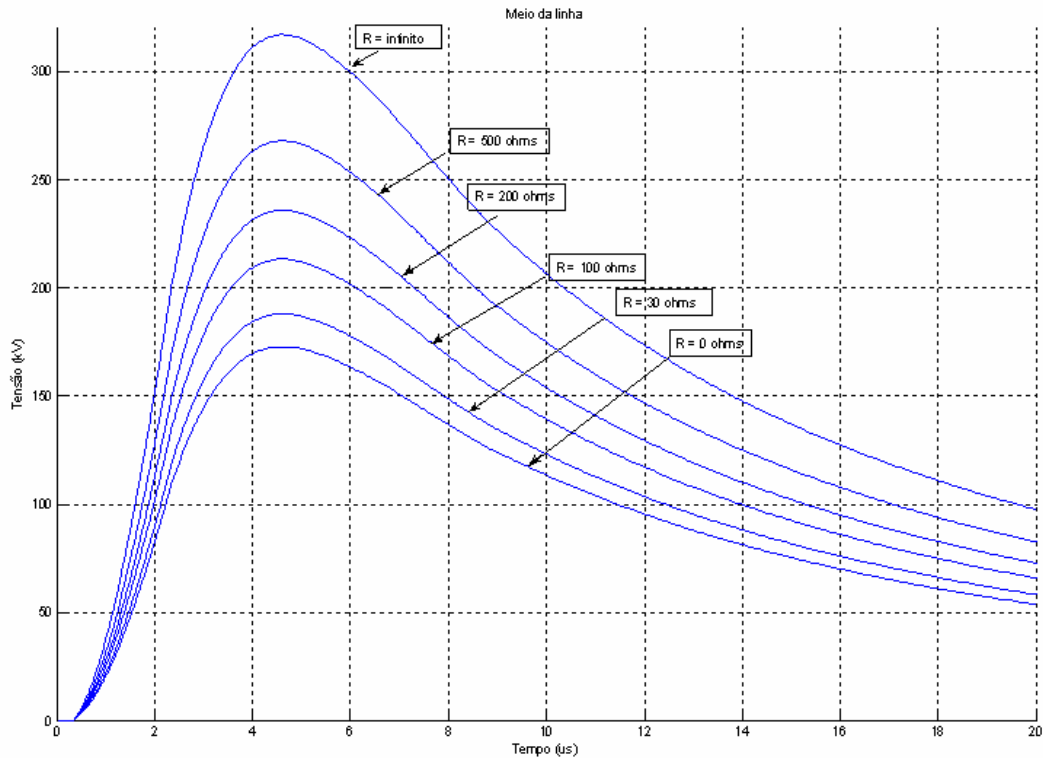


Figura A1 – Valores obtidos pelo autor e por Yokoyama para $R = 0, 30 \Omega, 100 \Omega, 200 \Omega, 500 \Omega$ e $\infty \Omega$.

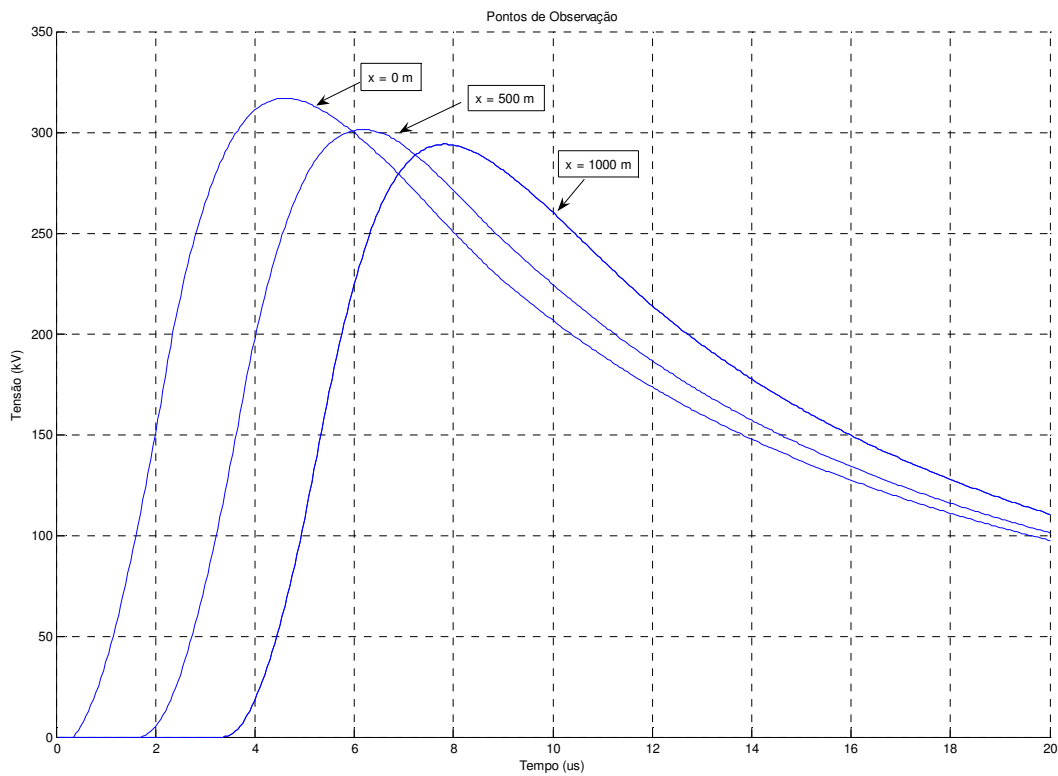


Figura A2 – Valores das tensões induzidas obtidos pelo autor e por Yokoyama ao longo da linha.

Anexo B

Será apresentado neste anexo, algumas das principais funções disponíveis no *PSCAD®/EMTDC™* para desenvolvimento de componentes pelos usuários. Estas funções são apresentadas apenas como forma de ilustrar como pode-se utilizar esta ferramenta no desenvolvimento de uma solução de problema específico.

Função	Tipo	Descrição
CCIN(*, *)	Real	Injeta um valor de corrente em nó
GGIN(*, *)	Real	Seta um valor de condutância da fonte de Norton inserida com o CCIN
VDC(*, *)	Real	Retorna o valor de tensão em um nó específico
GM(*, *, *)	Real	Acesso à matriz de condutância do sistema em estudo
CBR(*, *)	Real	Retorna a corrente em um ramo
EBR(*, *)	Real	Retorna a queda de tensão em um ramo
GEQ(*, *)	Real	Inserir uma condutância equivalente em determinado ramo
TIME	Real	Tempo corrente de simulação, em segundos
DELT	Real	Passo de cálculo, em segundos
TIMEZERO	booleana	Verdadeiro para tempo nulo
FIRSTSTEP	booleana	Verdadeiro para o início do cálculo.
LASTSTEP	booleana	Verdadeiro para o último passo de simulação