

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Modelagem de Pára-Raios de ZnO para o Cálculo de Tensão Induzida Por Descarga Atmosférica em Redes de Distribuição

por

Leandro Chagas Alves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Prof., Ph.D. Antônio Emílio Angueth de Araújo

Belo Horizonte – MG
18 de agosto de 2010

Dissertação de Mestrado

Modelagem de Pára-Raios de ZnO para o
Cálculo de Tensão Induzida Por Descarga
Atmosférica em Redes de Distribuição

Leandro Chagas Alves

Dedico esta dissertação à toda
minha família. À minha mãe Maria
Aparecida, ao meu pai Vicente
Luiz, ao meu padrasto Manoel, aos
meus irmãos Mary Hellen e Manoel
Filho, à minha esposa Rosevane e
ao meu filho Pedro Henrique, que
ainda está por nascer.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Deus por guiar meus passos nesta jornada de aperfeiçoamento do conhecimento e crescimento pessoal, sem me deixar perder a lealdade, humildade e respeito a todos.

Ao Prof., Ph.D. Antônio Emílio, orientador desta dissertação, por todo os seus ensinamentos, dedicação, sabedoria e compreensão. Além de toda a sua colaboração e bons conselhos seja na vida acadêmica, profissional e principalmente pessoal. Agradeço ainda pela amizade, sem me deixar perder o foco e a qualidade do trabalho.

Ao Prof., Ph.D. João Antônio de Vasconcelos e a todos os amigos do projeto de desenvolvimento e pesquisa ANEEL que foram grandes incentivadores e colaboradores para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas de curso e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, que tenham contribuído direta ou indiretamente para realização e melhoria desta dissertação. A convivência agradável, o auxílio e esclarecimentos que recebi, facilitaram muito a realização desta pesquisa.

A todos os meus familiares e amigos que me incentivaram e apoiaram, mesmo que à distância, com apreço e dedicação nas horas boas ou difíceis.

À minha esposa, Rosevane Rodrigues Alves, por todo cuidado e companheirismo. Sempre ao meu lado, um Pilar, nas dificuldades e alegrias encontradas.

Aos meus anjos da guarda, Tio Nelson e Tia Amélia, que me acolheram como um filho em seu lar, zelando por mim tão bem quanto os meus pais.

Resumo

Atualmente, a competitividade do mercado energético e a atuação dos órgãos reguladores exigem das concessionárias de energia um fornecimento extremamente confiável e que atenda aos limites estabelecidos para os diversos indicadores de qualidade (variações de tensão de curta duração, desequilíbrio de tensão, harmônicos, tensão em regime permanente, etc.). Assim, a eficácia da proteção do sistema contra sobretensões é fundamental para qualquer concessionária que objetive fornecer ao consumidor uma energia dentro dos padrões determinados. Conforme já mostrado por diversos estudos, a sobretensão provocada por descarga atmosférica é o principal causador de problemas nas redes de distribuição. Nos sistemas modernos, a utilização adicional de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido uma boa solução para limitar esses distúrbios, evitando a interrupção da operação, tanto em linhas de distribuição quanto nas linhas de transmissão.

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo de tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição com protetores de ZnO, segundo a teoria de Rusck implementada em programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos (método Rusck-EMTP). A rotina implementada permite a estimativa da tensão induzida em sistemas polifásicos com grande quantidade de estruturas e de pára-raios de ZnO, representados por sua curva $V \times I$.

Para validar os resultados da metodologia implementada, foram realizados testes de cálculo da tensão induzida em uma linha de distribuição, trifásica, variando-se o ponto de incidência da descarga indireta, a quantidade e o posicionamento dos dissipadores surto.

Os resultados mostraram que o programa desenvolvido fornece uma boa estimativa para tensões induzidas em sistemas de distribuição complexos com pára-raios de óxido metálico. Amplia-se dessa forma, a grande potencialidade dos softwares do tipo EMTP.

Abstract

The competitiveness of the energy market and the action of regulatory agencies require, nowadays, from the electric utility an extremely reliable power supply that should comply with several power quality ratings (short-term voltage variation, unbalanced voltage, harmonics, steady state voltage, etc.). Thus an effective surge protection system is fundamental to any utility in order to provide a good power quality. As already shown in many studies, the overvoltage induced by lightning is the main cause of problems in overhead distribution networks. In modern systems, the additional use of zinc oxide (ZnO) lightning arrester has been a good solution to limit these disturbances, avoiding power interruptions in distribution and transmission lines.

This work presents a program to calculate induced voltage by indirect lightning strokes on overhead distribution lines equipped with ZnO arresters. The routine was implemented in a transients program based on the Rusck's theory (Rusck-EMTP Method). The implemented routine allows the estimation of induced voltage in large networks.

To validate the results of the implemented methodology, tests were performed to calculate the induced voltage in a three-phase distribution line, varying the location of indirect lightning stroke, the quantity and the position of the arresters.

The results showed that the developed software provides a good estimate of induced voltages in complex distribution systems equipped with metal oxide arresters. The implemented methodology can, therefore, be considered an enlargement of the potentiality of EMTP-like programs.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Relevância do Tema	11
1.2	Objetivo do Trabalho	12
1.3	Proposta de Desenvolvimento	12
1.4	Estrutura do Trabalho	13
2	Descargas Atmosféricas e Cálculo de Tensão Induzida	14
2.1	Introdução	14
2.2	A Descarga Atmosférica	14
2.3	A Interferência da Descarga Atmosférica nas Linhas Aéreas	15
2.4	O Cálculo da Tensão Induzida	16
2.4.1	Teorias de Cálculo	16
2.4.2	Modelagem da Descarga	17
2.4.3	Acoplamento do Campo entre a Descarga e a Linha	18
2.5	O Método de Rusck	18
2.6	O Método Rusck-EMTP	20
2.7	O Método Rusck-EMTP Bifásico	23
2.8	Algoritmo da Metodologia de Cálculo da Tensão Induzida	27
2.9	Detalhes de Programação da Rotina de Cálculo da Tensão Induzida	28
3	Implementação da Rotina de Cálculo de Tensão Induzida	30
3.1	Introdução	30
3.2	Modelo do Pára-Raios no Programa de Transitórios	31
3.2.1	Modelagem não-linear pelo método da compensação	31
3.3	Influência da Modelagem do Pára-Raios na Estimativa da Tensão Induzida	33

4	Interação do Pára-Raios com o Método Rusck-EMTP	34
4.1	Introdução	34
4.2	Pára-Raios Modelados por uma Resistência Constante	35
4.3	Pára-Raios Modelados por uma Resistência Histórica	37
5	Cálculos de Tensão Induzida em Linhas de Distribuição: influência da presença e modelagem do pára-raios	39
5.1	Introdução	39
5.2	Tensão Induzida em Linha Monofásica	40
5.3	Tensão Induzida em Linha Bifásica	42
5.4	Tensão Induzida em Linha de Distribuição com Pára-Raios de ZnO	45
5.4.1	Proteção contra sobretensão induzida com pára-raios de ZnO - Caso 1	48
5.4.2	Proteção contra sobretensão induzida com pára-raios de ZnO - Caso 2	54
5.5	Método Rusck-EMTP sem o Efeito do Pára-Raios	58
6	Conclusões e Propostas de Continuidade do Trabalho	63
6.1	Conclusões	63
6.2	Propostas de Continuidade do Trabalho	64

Lista de Tabelas

5.1	Coordenadas e resistências de aterramento da linha	50
5.2	Característica do pára-raios de ZnO	51

Lista de Figuras

2.1	Esboço da formação do dipolo na nuvem [3]	15
2.2	Modelagem do canal de retorno utilizado na teoria de Rusck [3]	17
2.3	Circuito para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas	22
2.4	Medição da tensão induzida nas três fases de uma linha de distribuição na África do Sul	24
2.5	Modelo Bifásico Equivalente para cálculo da tensão induzida em linhas de distribuição	25
2.6	Circuito para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas por modelagem bifásica	26
2.7	Fluxograma da rotina de cálculo de tensão induzida	28
3.1	Modelagem de elemento não-linear pelo método da compensação no EMTP	31
3.2	Curva característica de pára-raios de óxido metálico	32
4.1	Circulação de corrente não-conservativa na linha devido ao pára-raios . . .	35
4.2	Modelo Eletrogeométrico para estimativa das descargas indiretas na LD [26]	36
4.3	Fluxograma para cálculo da resistência histórica, $R_{PR}(t - \Delta t)$, do pára-raios no método Rusck-EMTP	38
5.1	Interface gráfica para configuração do método Rusck-EMTP com Pára- Raios de ZnO	40
5.2	Localização da descarga em relação à linha - [16]	40
5.3	Tensão induzida no meio da linha monofásica para $\Delta x = 150$, $\Delta x = 225$ e $\Delta x = 450$ m - por Paulino [16]	41
5.4	Tensão induzida no meio linha monofásica para $\Delta x = 150$, $\Delta x = 225$ e $\Delta x = 450$ m - pela rotina desenvolvida	41

5.5	Linha de distribuição com dois condutores casados na extremidade - [17]	43
5.6	Tensão induzida no meio da linha - por Silva [17]	43
5.7	Tensão induzida no início da linha - por Silva [17]	44
5.8	Tensão induzida no meio da linha - pela rotina desenvolvida	44
5.9	Tensão induzida no início da linha - pela rotina desenvolvida	45
5.10	Configuração para a simulação com pára-raios apresentada por Paulino em [18]	46
5.11	Tensão induzida em linha bifásica com pára-raios em $x=0$ e $R=50\Omega$, Paulino [18]	47
5.12	Tensão induzida em linha bifásica com pára-raios de ZnO em $x=0$ e $R=50\Omega$	47
5.13	Configuração do sistema de distribuição para o primeiro estudo de caso	48
5.14	Forma de onda da corrente utilizada nas simulações [17]	49
5.15	Tensão induzida no poste 1 - Métodos da resistência histórica e média	51
5.16	Tensão induzida no poste 1 - Comparação com a tensão da linha desprotegida	52
5.17	Tensão induzida no poste 7 - Métodos da resistência histórica e média	52
5.18	Tensão induzida no poste 7 - Comparação com a tensão da linha desprotegida	53
5.19	Tensão induzida no poste 25 - Métodos da resistência histórica e média	53
5.20	Tensão induzida no poste 25 - Comparação com a tensão da linha desprotegida	54
5.21	Configuração da rede de distribuição para o segundo estudo de caso	55
5.22	Tensão induzida no poste 1 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2	55
5.23	Tensão induzida no poste 1 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2	56
5.24	Tensão induzida no poste 7 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2	56
5.25	Tensão induzida no poste 7 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2	57
5.26	Tensão induzida no poste 25 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2	57
5.27	Tensão induzida no poste 25 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2	58
5.28	Tensão induzida no poste 1 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios	59
5.29	Tensão induzida no poste 7 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios	59
5.30	Tensão induzida no poste 25 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios	60
5.31	Tensão induzida no poste 1 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($\nu = 120 \text{ m}/\mu\text{s}$)	60

5.32	Tensão induzida no poste 7 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($\nu = 120 \text{ m}/\mu\text{s}$)	61
5.33	Tensão induzida no poste 25 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($\nu = 120 \text{ m}/\mu\text{s}$)	61

Capítulo 1

Introdução

A qualidade da energia fornecida pelas concessionárias é um fator fundamental para o bom desempenho dos sistemas de distribuição e uma garantia de melhor funcionamento dos processos industriais. No atual contexto, as redes de energia elétrica devem garantir a continuidade da oferta da energia e manter a tensão nos barramentos dentro de uma faixa de variação bastante estreita. Assim, a eficácia da proteção do sistema contra sobretensões é fundamental para qualquer concessionária de energia elétrica que objetive fornecer ao consumidor uma energia dentro dos padrões determinados pelas organizações reguladoras [1, 2]. Conforme já mostrado por diversos estudos [3, 4, 5, 6, 7], a sobretensão provocada por descarga atmosférica é o principal causador de problemas nas redes de distribuição. Nos sistemas modernos, a utilização adicional de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) tem sido uma boa solução para limitar as sobretensões, evitando a interrupção da operação, tanto em linhas de distribuição quanto nas linhas de transmissão. Estes dispositivos de óxido metálico já possuem boa relação custo-benefício, concedendo excelente nível de proteção, com pouca interferência harmônica nas formas de onda do sistema.

1.1 Relevância do Tema

Atualmente a competitividade do mercado energético e a atuação dos órgãos reguladores exigem das concessionárias de energia um fornecimento extremamente confiável que atenda aos limites estabelecidos para os diversos indicadores de qualidade (variações de tensão de curta duração, desequilíbrio de tensão, harmônicos, tensão em regime permanente, etc.) [1, 2].

Como a qualidade da energia elétrica é influenciada por surtos atmosféricos, uma solução ideal para as interrupções causadas por sobretensões atmosféricas seria a utilização

de pára-raios de ZnO em todas as estruturas do sistema de alimentação. Como no cenário atual esta opção ainda é, em muitos casos, economicamente inviável, a utilização de uma metodologia de posicionamento otimizado dos pára-raios disponíveis pode ser uma solução adequada. Este foi um dos assuntos que motivaram o início deste trabalho e pode ser visto com mais detalhes em [8, 9].

Apesar de já existirem ferramentas do tipo EMTP (*Electro-Magnetic Transients Program*) consagradas (Microtran, ATPDraw, PSCAD), ainda existe pouco material comercial com módulos e/ou subrotinas que tratem especificamente da simulação de tensões induzidas por descargas atmosféricas incididas indiretamente (lateralmente) às linhas de distribuição. Sendo assim, neste trabalho apresenta-se a implementação de uma ferramenta computacional adequada à simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de distribuição com pára-raios sob a influência de surtos atmosféricos. Para isso, utiliza-se como base os trabalhos de cálculo de transitórios do Prof. Hermann W. Dommel [10, 11], a teoria desenvolvida por Sune Rusck [12] e os diversos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) sobre a implementação dessa teoria em programas de transitórios [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] e [20].

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência do modelo do pára-raios de ZnO no cálculo das tensões provocadas por descargas atmosféricas indiretas. Para isso, foi necessário desenvolver uma rotina computacional que opera segundo a teoria de Rusck em programa do tipo EMTP (método Rusck-EMTP), [16] e [17], para sistemas de distribuição com pára-raios de ZnO. A ferramenta foi implementada de maneira modular para que possa ser utilizada individualmente ou facilmente acoplada à outros softwares.

Como a inclusão de pára-raios no método Rusck-EMTP é, até o momento, muito pouco estudado analisou-se mais do que uma modelagem para esse elemento não-linear a fim de se determinar o modelo que represente satisfatoriamente o seu comportamento com o menor custo computacional possível.

1.3 Proposta de Desenvolvimento

O desenvolvimento do trabalho deu-se através das seguintes etapas:

- etapa de implementação de um programa do tipo EMTP [11] capaz de calcular tensões induzidas em sistemas de distribuição com pára-raios de ZnO;

- etapa da simulação e análise comparativa de tensão induzida em circuitos estudados em trabalhos anteriores de pesquisadores da UFMG;
- etapa das análises dos resultados em uma linha de distribuição para cada um dos itens propostos;
- etapa final, análise conclusiva sobre a eficácia da ferramenta desenvolvida para avaliação da tensão induzida em redes complexas de distribuição de energia elétrica.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de dissertação está estruturado em seis capítulos, dispostos da seguinte maneira:

O capítulo atual, *Introdução*, apresenta a relevância do tema investigado, as motivações, objetivos e etapas de desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

No capítulo 2, *Descargas Atmosféricas e Cálculo de Tensão Induzida*, é feita uma descrição sucinta do fenômeno atmosférico, da teoria de Rusck, e demonstra-se o artifício necessário para implementá-la em um programa de transitórios segundo o método Rusck-EMTP.

O Capítulo 3, *Implementação da Rotina de Cálculo de Tensão Induzida*, descreve como a rotina de cálculo foi implementada e quais recursos computacionais foram utilizados.

No Capítulo 4, *Interação do Pára-Raios com o Método Rusck-EMTP*, é realizada uma análise da influência da modelagem do pára-raios para a estimativa da tensão induzida utilizando-se a teoria de Rusck.

O Capítulo 5, *Cálculos de Tensão Induzida em Linhas de Distribuição: influência da presença e modelagem do pára-raios*, são apresentados os resultados de simulações e análise comparativas com trabalhos anteriores, a fim de validar a metodologia de cálculo desenvolvida neste projeto de pesquisa. Também são realizados testes em uma linha de distribuição trifásica com diferentes configurações de posicionamento e número pára-raios.

O Capítulo 6, *Conclusões e Propostas de Continuidade do Trabalho*, finaliza o texto ressaltando os principais assuntos abordados e conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa. Também são apresentadas as propostas de continuidade do trabalho.

Descargas Atmosféricas e Cálculo de Tensão Induzida

2.1 Introdução

A estimativa das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição é um assunto complexo. Existem diversas teorias que possibilitam este cálculo. A principal variação entre elas está na modelagem da descarga e no cálculo do acoplamento eletromagnético entre o canal de descarga e a linha. Dentre elas, uma que tem mostrado-se muito adequada para a implementação em programas de transitórios do tipo EMTP [11] é a metodologia desenvolvida por Sune Rusck, em seu trabalho de doutorado na década de 1950 [12]. Neste trabalho, aproveitou-se da eficácia desta teoria e dos diversos estudos já realizados por pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] e [20], para criar uma ferramenta adequada para o cálculo da tensão induzida em grandes sistemas de distribuição com a presença de pára-raios de óxido metálico.

2.2 A Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica é um dos fenômenos da natureza que desde os primórdios da humanidade provoca no homem um misto de espanto e admiração. Por muito tempo sua ocorrência esteve ligada à explicações místicas ou religiosas. Este evento natural só começou a ser investigado cientificamente a partir do século XVII com os experimentos de Benjamin Franklin. Porém, só no século XX houve um estudo sistematizado.

Desde então, muitas teorias foram desenvolvidas para explicar este fenômeno intrigante. Atualmente, sabe-se de muitos eventos que contribuem, direta ou indiretamente, na formação da descarga atmosférica. Uma explanação mais detalhada desses eventos

pode ser encontrada em [3, 6, 4].

Basicamente, pode-se dizer que a descarga atmosférica é uma grande transferência de cargas elétricas das nuvens para a Terra - ou estrutura que se interponham entre a nuvem e o solo [3]. O evento mais importante para a formação do fenômeno atmosférico é a separação das cargas positivas e negativas e o deslocamento das partículas positivas leves para regiões mais altas das nuvens, provocado pelas correntes ascendentes de ar. Com isso, forma-se na nuvem um dipolo vertical, que é o elemento que propiciará o desencadeamento de eventos necessários para formação de um canal ionizado por onde se dará a descarga elétrica. A figura 2.1, [3], apresenta um esboço deste cenário.

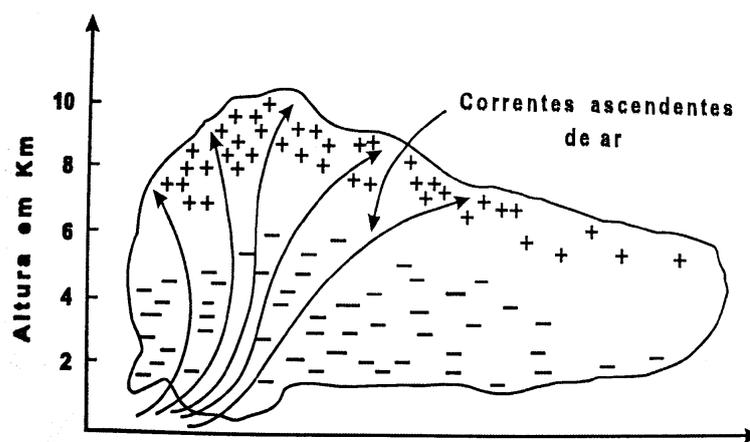


Figura 2.1: Esboço da formação do dipolo na nuvem [3]

2.3 A Interferência da Descarga Atmosférica nas Linhas Aéreas

A interação das descargas atmosféricas com as linhas aéreas se dá principalmente de duas maneiras: Pela incidência direta, atingindo em cheio uma estrutura ou condutor, ou pela incidência indireta, ao cair no solo ou em estruturas na vizinhança do sistema elétrico.

A descarga direta corresponde a uma elevada fonte de corrente transitória sendo injetada na linha. Essa injeção de corrente elevará os níveis de tensão do sistema em função das impedâncias do mesmo.

No caso da descarga indireta também haverá uma elevação na tensão da linha, porém o fenômeno envolvido é bem mais complexo que no caso da incidência direta. Sucintamente, pode-se afirmar que a corrente transitória do canal de descarga gera um campo elétrico que se propaga em direção à linha. Esse campo ao interagir com os condutores induzirá uma elevação da tensão do sistema.

Normalmente, nas linhas de transmissão, devido ao elevado nível de isolamento, apenas as descargas que atingem diretamente são capazes de provocar distúrbios que levam ao desligamento. Já nos sistemas de distribuição, como os níveis básicos de isolamento são bem menores que nos sistemas de transmissão, praticamente todas as descargas diretas provocam desligamentos. As descargas que incidem a vizinhança das linhas de distribuição induzem sobretensões menores que as sobretensões provocadas pelas descargas diretas, porém podem ser elevadas o suficiente para causar distúrbios e/ou desligamentos [5, 7, 6].

Como esse trabalho limita-se ao estudo de linhas de distribuição aéreas, apenas as tensões induzidas por surtos atmosféricos indiretos serão analisadas.

2.4 O Cálculo da Tensão Induzida

Para o caso das descargas indiretas, praticamente só existem três tipos de eventos que induzem tensões nos sistemas aéreos. São eles:

- Descargas nuvem-solo;
- Descargas internas da própria nuvem;
- Descargas entre nuvens.

O Cálculo das tensões induzidas por descargas internas e entre nuvens ainda é um assunto pouco explorado e existem fortes indícios que os seus efeitos não causam grandes prejuízos aos sistemas elétricos [16, 21].

Como existem resultados experimentais que indicam que as tensões induzidas por descargas atmosféricas nuvem-solo são os eventos que ocorrem com maior frequência nos sistemas de distribuição [16, 21, 22], este estudo abrangerá somente o cálculo das tensões induzidas pelas descargas incididas nas proximidades das linhas aéreas.

2.4.1 Teorias de Cálculo

Conforme dito anteriormente, existem diversas teorias que possibilitam o cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas. Mesmo a formação do fenômeno atmosférico sendo um assunto complexo e sujeito à várias controvérsias, a principal variação entre essas teorias está na modelagem da descarga e no cálculo do acoplamento eletromagnético entre o canal de descarga e a linha.

A seguir serão apresentados os pontos mais importantes dessas teorias de cálculo. Uma visão mais aprofundada do assunto pode ser encontrada, por exemplo, em [23, 21, 13, 18].

2.4.2 Modelagem da Descarga

A literatura atual apresenta várias técnicas para representar o canal ionizado pelo qual fluirá a corrente de descarga entre a nuvem e o solo, comumente conhecida como corrente de retorno. Conforme relatado na referência [16], em geral, os trabalhos dos pesquisadores estão em concordância nas seguintes suposições [21, 23]:

- A tensão induzida durante o processo de carregamento e durante o período que antecede o início da descarga é uma tensão praticamente eletrostática;
- As tensões induzidas durante o processo de formação do canal ionizado são de valores desprezíveis quando comparados aos valores de tensões induzidas durante a formação da corrente de retorno;
- A etapa primordial, na definição dos valores e formas de onda das tensões induzidas, é a etapa final da descarga, ou seja, a corrente de retorno.

Os resultados experimentais indicam que estas suposições são coerentes e bastante aceitáveis [23].

A partir dessas considerações, a representação mais comum do canal da descarga atmosférica e da corrente de retorno se dá a através de dois modelos [23, 16]:

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

O primeiro modelo é o mais simples e utilizado pela maior parte dos pesquisadores. Nele, o canal da descarga é considerado uma linha pela qual circula uma corrente. Essa linha possui como parâmetros uma impedância de surto Z e velocidade de propagação ν . A figura 2.2, [3], ilustra a modelagem simplificada para o canal da descarga indireta utilizada por Rusck [12].

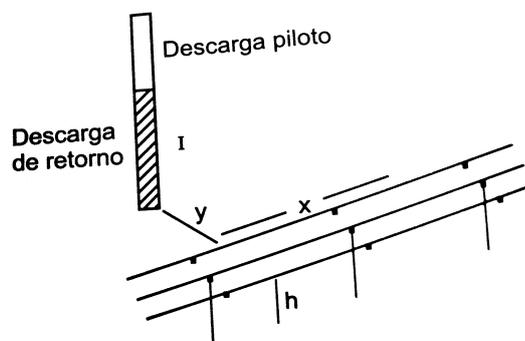


Figura 2.2: Modelagem do canal de retorno utilizado na teoria de Rusck [3]

O modelo não uniforme e com perdas aparenta ser mais completo e coerente com o fenômeno modelado. Nessa categoria, um dos modelos propostos mais aprimorados é o MTL (*Modified Transmission Line*) [24, 25]. Uma observação interessante, mostrada na referência [18], é que a utilização do modelo MTL gera resultados muito semelhantes aos resultados gerados pela utilização do modelo simplificado.

2.4.3 Acoplamento do Campo entre a Descarga e a Linha

O cálculo das tensões induzidas em uma rede aérea é resultado da interação dos campos incidentes com o próprio sistema [16]. Os modelos mais utilizados para o acoplamento entre a descarga atmosférica e a linha são [17]:

- Modelo de Rusck (1957);
- Modelo de Chowdhuri e Gross (1967);
- Modelo de Agrawal, Price e Gurbaxani (1980).

Nestes modelos, a interação entre os campos gerados pela descarga atmosférica e os condutores do sistema elétrico são aproximados por linhas de transmissão. As diferenças entre estes modelos ainda causam muitas discussões e divergências entre os pesquisadores. No modelo de Rusck, os campos são representados por potenciais escalar e vetor; no modelo de Chowdhuri por tensão total e no modelo de Agrawal pela tensão iluminada [16, 17].

Dentre as metodologias citadas, o modelo de Rusck é o que oferece método de cálculo mais simplificado, porém não apresenta nenhum erro ou inconsistência. Por ser baseada em expressões analíticas, ela é uma teoria completa do fenômeno atmosférico bem simples de ser compreendida e de fácil implementação computacional. Apesar de existirem teorias muito mais elaboradas, não há indícios de que ela necessite ser substituída [3, 16].

2.5 O Método de Rusck

A seguir será apresentada uma descrição sucinta da teoria de cálculo de tensão induzida desenvolvida por Sune Rusck na década de 1950, em sua tese de doutorado [12]. Ela oferece expressões analíticas para o cálculo de sobretensões em linhas aéreas infinitas, expressões estas que podem ser modificadas para o tratamento de linhas finitas.

A teoria de Rusck está baseada nas seguintes premissas [3]:

- a existência de um canal de descarga ionizado e carregado, disposto verticalmente sobre o solo, pelo qual propagará a corrente de retorno, em forma de degrau, do solo em direção à nuvem;

- a corrente de retorno como a principal causa da tensão induzida;
- o solo com resistividade nula, utilizando-se o método das imagens para o cálculo dos campos eletromagnéticos; e
- o campo no solo como sendo o mesmo que nos condutores da linha, pois a distância entre os dois é pequena (limitada à poucas dezenas de metro), quando comparada com o comprimento do canal da descarga (que é da ordem de dois quilômetros de altura).

A partir destas considerações e da utilização das equações de Maxwell, em um sistema de coordenadas retangulares "xyz", Rusck obteve expressões analíticas para os campos gerados pela descarga atmosférica na vizinhança da linha. Com essas equações, e com o modelo de canal da corrente de retorno, descrito anteriormente, Rusck obteve um sistema de expressões analíticas para o cálculo da tensão induzida. De maneira genial, e certamente com a concordância de vários pesquisadores, a formulação deduzida por Rusck é evidentemente simples, elegante e completa.

Supondo que, em princípio, o campo eletromagnético na superfície do solo é o responsável pelas tensões induzidas, e que um campo eletromagnético pode ser expresso como um gradiente de potencial e um potencial vetor magnético, Rusck determina o campo elétrico a partir da seguinte equação:

$$E = -\nabla V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t}, \quad (2.1)$$

em que V_i é o potencial escalar, A_i é o vetor potencial magnético e t é o tempo.

Pode-se observar, que a primeira parcela do campo elétrico (∇V_i) é conservativa e a segunda parcela ($\frac{\partial A_i}{\partial t}$) é não-conservativa [17]. Sendo assim, também pode-se expressar o campo elétrico 2.1 como:

$$E = E_c + E_{nc}, \quad (2.2)$$

em que:

$$E_c = -\nabla V_i \quad \text{é o campo elétrico conservativo, e} \quad (2.3)$$

$$E_{nc} = -\frac{\partial A_i}{\partial t} \quad \text{é o campo elétrico não-conservativo.} \quad (2.4)$$

As duas componentes do campo são perpendiculares ao solo e, no entanto, elas interagem com a linha de maneira diferente. A componente deduzida do potencial escalar (campo conservativo) provoca a circulação direta de corrente na linha e a componente

originada no potencial vetor (campo não-conservativo) não provoca a circulação de corrente em uma linha sem descontinuidades. A componente não-conservativa só causará a circulação de corrente na linha nos pontos onde exista alguma ligação para o solo (por exemplo: pontos de aterramento, pára-raios, etc.). Apesar desta conclusão parecer estranha, e ser um dos pontos mais questionados da teoria de Rusck, parece não existir mais dúvidas de que ele estava certo [16].

Considerando-se que a variação do campo elétrico entre a linha e o solo é pequena, Rusck deduz que a tensão induzida em uma linha de transmissão homogênea e infinita é obtida pela multiplicação deste campo pela altura de cada um dos condutores da linha. Deste modo, as tensões induzidas são calculadas utilizando-se as seguintes equações básicas:

$$V(x, t) = U(x, t) + h \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t} \quad \text{e} \quad (2.5)$$

$$U(x, t) = \frac{1}{2\nu_0} \int \frac{\partial V_i}{\partial t} \left(u, t - \frac{|x - u|}{\nu_0} \right) du, \quad (2.6)$$

sendo que $V(x, t)$ é a tensão total induzida no condutor, $U(x, t)$ é a tensão induzida pela componente conservativa do campo, $h \frac{\partial A_i}{\partial t}$ é a tensão induzida pela componente não-conservativa do campo, x é um ponto da linha, t é o tempo, ν_0 é a velocidade da onda no canal de retorno, u é a variável de integração e h é a altura da linha.

A utilização da solução analítica de Rusck para o cálculo da tensão induzida por muito tempo ficou praticamente limitada ao estudo de linhas ideais, infinitas, de geometria simples e sem descontinuidades. Porém, nos últimos anos, foram publicados vários trabalhos de pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sobre a adaptação dessa teoria para o cálculo de tensões induzidas em linhas finitas e com descontinuidades. Dentre eles, destaca-se a metodologia conhecida como método Rusck-EMTP [13, 14, 15].

A próxima seção descreve como a teoria de Rusck foi adaptada para o cálculo de tensão induzida em programas de transitórios do tipo EMTP [11].

2.6 O Método Rusck-EMTP

Nas duas últimas décadas muitos trabalhos foram desenvolvidos por pesquisadores da UFMG sobre a implementação da teoria de Rusck em programas de transitórios, [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19] e [20]. Esses estudos serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho.

Num programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos do tipo EMTP [10, 11] todos os elementos do sistema elétrico são representados a partir de modelos compostos por uma resistência e uma fonte de corrente. A partir disto, Paulino demonstrou em [16] que para

linhas finitas e com descontinuidades (pontos de aterramento e pára-raios) a metodologia proposta por Rusck pode ser implementada em programas de transitórios através da injeção de fontes de corrente distribuídas ao longo da linha aérea de comprimento L , discretizada em segmentos de comprimento ΔL (conforme indicado nas referências [14],[15] e[17]). Essa adaptação é bastante conhecida como método Rusck-EMTP [13, 14, 15].

As expressões de Rusck são computadas por meio das fontes de corrente que representam o efeito do campo elétrico. As partes (a) e (b) da figura 2.3 ilustram tal procedimento. Como as componentes conservativa e não-conservativa do campo, 2.3 e 2.2, se acoplam (interagem) com a linha de maneira distinta, não é possível considerá-la através de uma única fonte de corrente. Para contornar essa dificuldade, foi necessário lançar mão do arranjo da parte (c) da figura 2.3. Esta configuração de fontes foi proposta inicialmente por Boaventura [16, 19]. Como a componente não-conservativa só causa circulação de correntes quando existem ligações da linha para a terra, foi necessário acoplar, no meio da linha discretizada, fontes de correntes em paralelo com a resistência unitária R_b que, através do resistor muito elevado R_a , irá induzir diretamente a tensão provocada pela variação do potencial vetor magnético. Sendo assim, a tensão induzida total em um ponto de injeção de corrente da linha será dada pela queda de tensão no resistor R_a , conforme indica a equação:

$$V_{ind} = V_c - (-V_{nc}) = V_c + V_{nc}. \quad (2.7)$$

A figura 2.3 resume a modelagem da teoria de Rusck no programa de cálculo de transitórios (método Rusck-EMTP). Os parâmetros que ali aparecem são:

ΔL é o comprimento de um vão discretizado da linha;

L é o comprimento da linha;

Z é a impedância característica da linha;

T é o tempo de trânsito da seção de discretização;

I_c é a fonte de corrente relativa à parte conservativa do campo;

I_{nc} é fonte de corrente relativa à parte não-conservativa do campo;

I_{nci} é a fonte de corrente relativa à parte não-conservativa do campo no início da linha;

I_{ncf} é fonte de corrente relativa à parte não-conservativa do campo no final da linha;

R_i é a resistência da extremidade inicial da linha;

R_f é a resistência da extremidade final da linha;

R_a é uma resistência de valor muito elevado;

$R_b = 1\Omega$;

V_c é a tensão induzida relativa à componente conservativa do campo;

V_{nc} é a tensão induzida relativa a componente não-conservativa do campo;
 V_{ind} é a tensão induzida total.

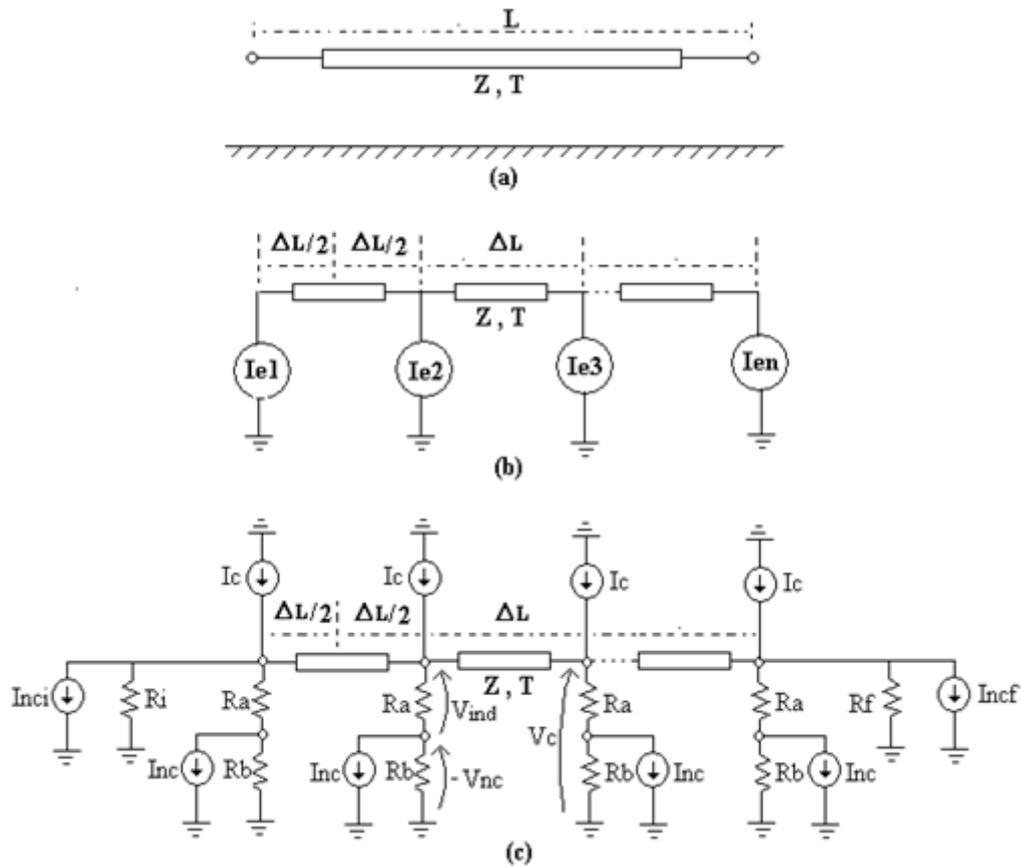


Figura 2.3: Circuito para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas

As equações para o cálculo das fontes de corrente ao longo da linha, a cada passo de tempo da simulação, são derivadas diretamente das equações deduzidas por Rusck e da análise do circuito da parte (c) da figura 2.3.

A fonte de corrente relativa ao campo conservativo nas extremidades da linha é:

$$I_c(x, t) = \frac{1}{\nu_0 Z} \frac{\partial V_i(x, t)}{\partial t} \frac{\Delta x}{2}, \quad (2.8)$$

em que:

$$\frac{\partial V_i(x, t)}{\partial t} = 60 \cdot I(t) \cdot h \cdot \nu \cdot \nu_0 \cdot \frac{t}{p^2}; \quad (2.9)$$

$$p = (\nu t)^2 + \left(1 - \frac{\nu^2}{\nu_0^2}\right) \cdot r^2; \quad (2.10)$$

$$\Delta x = \Delta L;$$

$I(t)$ é a corrente do canal de descarga, degeralizada;

h é a altura da linha;

ν é a velocidade de propagação da corrente de retorno;

ν_0 é a velocidade da luz no vácuo;

Z é a impedância característica da linha;

r é a distância entre o ponto de incidência da descarga até um ponto x na linha.

A fonte de corrente relativa ao campo conservativo no meio da linha é obtida pela equação:

$$I_c(x, t) = \frac{1}{\nu_0 Z} \frac{\partial V_i(x, t)}{\partial t} \Delta x. \quad (2.11)$$

A fonte de corrente relativa ao campo não-conservativo nas extremidades da linha é dada por:

$$I_{nc(\text{extr})}(x, t) = -\frac{1}{R_{\text{extr}}} .h. \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t}, \quad (2.12)$$

sendo:

$$\frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t} = 60 .I(t) .h .\nu .\nu_0 .\frac{t}{p^2} \quad \text{e} \quad (2.13)$$

R_{extr} é a resistência da extremidade inicial ou final da linha.

A fonte de corrente relativa ao campo não-conservativo ao longo da linha é obtida pela equação:

$$I_{nc}(x, t) = -h. \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t}. \quad (2.14)$$

Com o equacionamento aqui descrito é possível calcular a tensão induzida total sem a necessidade de realizar um pós processamento para considerar a influência da componente não-conservativa do campo eletromagnético, produzido pela descarga atmosférica.

2.7 O Método Rusck-EMTP Bifásico

Como já foi mencionado anteriormente, para Rusck, as correntes injetadas na linha, provenientes dos campos elétricos e magnéticos gerados pela descarga, são consideradas proporcionais à sua altura. Nas redes de distribuição, devido o espaçamento entre os condutores ser proporcionalmente muito menor que a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha, as sobretensões induzidas nas três fases serão praticamente as

mesmas, em amplitude, forma e polaridade. Essa afirmação pode ser confirmada através da figura 2.4, da referência [22], e das análises de Silva [15].

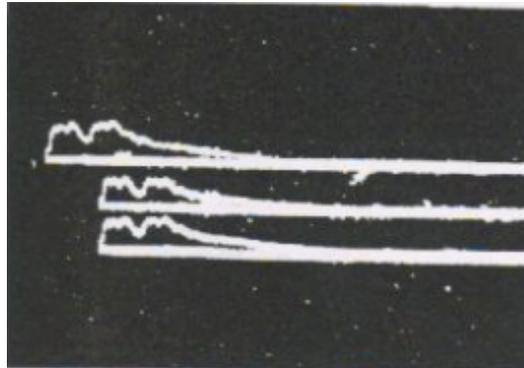


Figura 2.4: Medição da tensão induzida nas três fases de uma linha de distribuição na África do Sul

Baseado nessas observações e em que a parcela de corrente não-conservativa que flui na linha devido ao pára-raios é bem menor que às demais parcelas de corrente, conclui-se que a tensão induzida em uma linha de distribuição trifásica pode ser estimada, com resultados satisfatórios, a partir de um circuito equivalente bifásico. Isto é, calcula-se a tensão fase-neutro do modelo bifásico e a utiliza como a mesma sobretensão das três fases do sistema. Como pode ser visto na figura 2.5, um dos cabos representa o neutro e o outro, um condutor equivalente às três fases do sistema. Uma vez que o cálculo da tensão induzida será realizado em redes de distribuição, em escala real, podendo conter centenas de estruturas, este artifício reduzirá consideravelmente o custo computacional do programa.

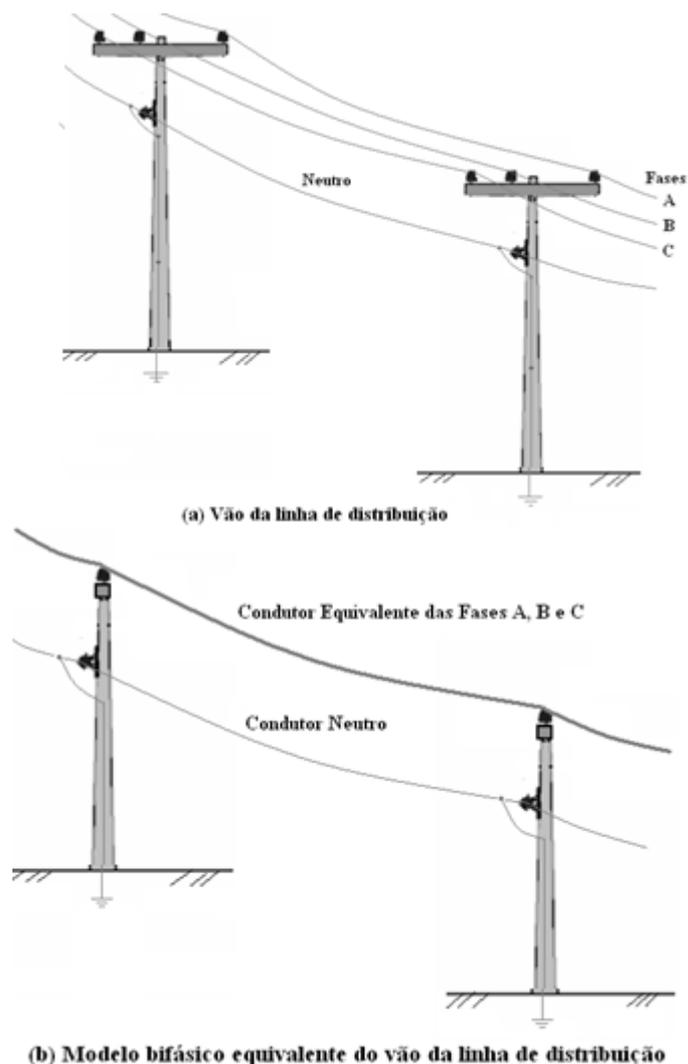


Figura 2.5: Modelo Bifásico Equivalente para cálculo da tensão induzida em linhas de distribuição

O cálculo da tensão induzida utilizando-se o modelo bifásico equivalente segue basicamente os mesmos algoritmos utilizados na modelagem monofásica. Isso porque as correntes injetadas na linha, provenientes dos campos elétricos e magnéticos, são consideradas proporcionais à sua altura [12]. Ou seja, para efeitos práticos, basta representar a linha de distribuição pelos parâmetros eletrogeométricos do equivalente bifásico (fase e neutro), estimar e injetar as suas respectivas correntes induzidas na linha discretizada, e simular o transitório de uma linha bifásica comum. Sendo assim, existirá um arranjo eletrogeométrico apropriado tanto para o condutor-fase quanto para o condutor-neutro [14]. Na figura 2.6 fica evidente que o procedimento é semelhante ao caso monofásico.

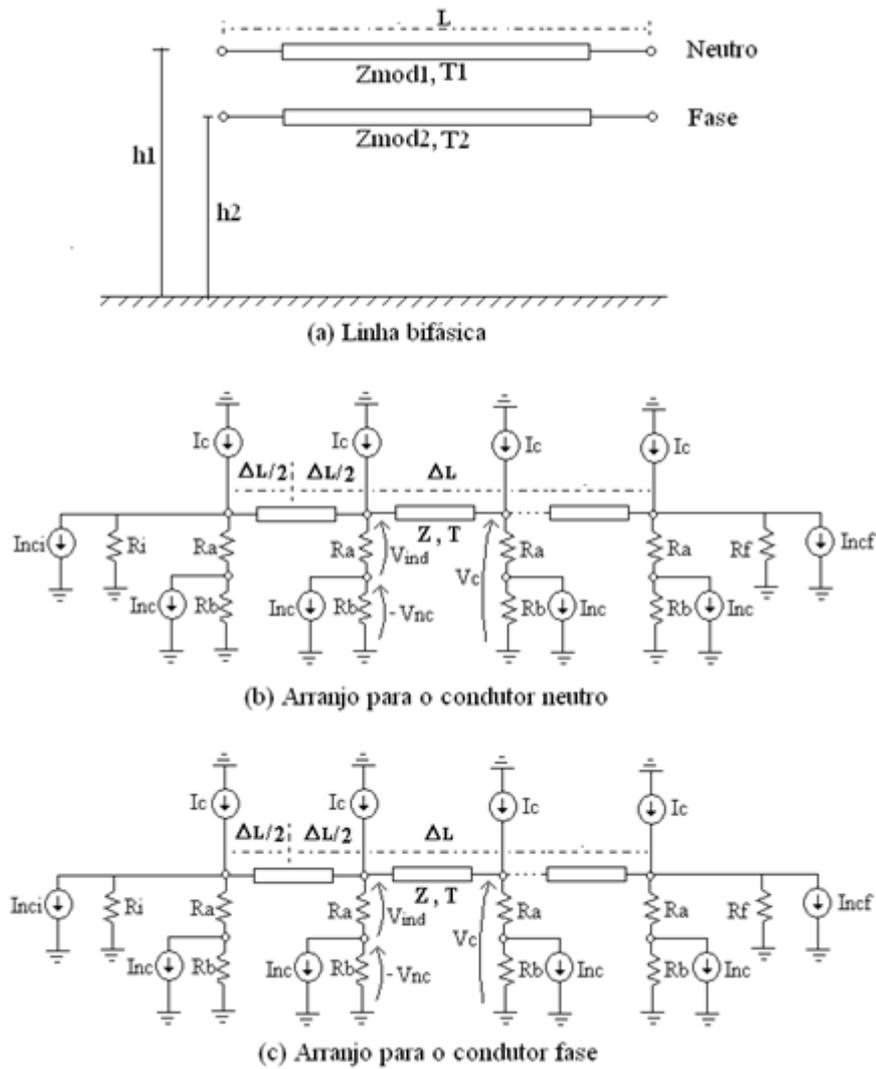


Figura 2.6: Circuito para cálculo da tensão induzida em linhas aéreas por modelagem bifásica

A principal diferença em relação ao arranjo monofásico, é que a modelagem bifásica exige o cálculo da impedância de Thévenin vista de cada um dos pontos de injeção de corrente, criados no processo de discretização da linha bifásica, enquanto no modelo monofásico essa impedância é a própria impedância de surto ou resistência das terminações da linha. O cálculo da matriz de impedâncias de Thévenin é necessário porque o programa recebe os parâmetros modais da linha, o que torna inviável obtê-los diretamente [3].

2.8 Algoritmo da Metodologia de Cálculo da Tensão Induzida

O algoritmo da rotina de cálculo da tensão induzida foi modelado de maneira que permita uma integração relativamente simples em programas do tipo EMTP que disponibilizem interfaces para subrotinas de fontes de corrente com funções definidas pelo usuário. A metodologia, aqui apresentada, está adequada para trabalhar com os principais programas de transitórios existentes no mercado, conforme alguns exemplos mostrados a seguir:

- Microtran: a metodologia pode ser implementada diretamente através da subrotina CONNEC, na linguagem Fortran;
- EMTDC-PSCAD: a metodologia pode ser empregada diretamente através de componente EMTDC e subrotina codificada, na linguagem C ou Fortran;
- Programa EMTP desenvolvido neste trabalho: Função definida por classes em linguagem orientada a objetos, codificada em C++, e por DLLs (Dynamic-Link Library) em qualquer linguagem compatível com C++.

A elaboração do procedimento de cálculo consistiu em pequenas adaptações dos algoritmos dos trabalhos desenvolvidos em [16] e [17], necessárias para a inclusão do pára-raios no método Rusck-EMTP. A figura 2.7 apresenta o fluxograma de interação do programa EMTP com a rotina de tensão induzida.

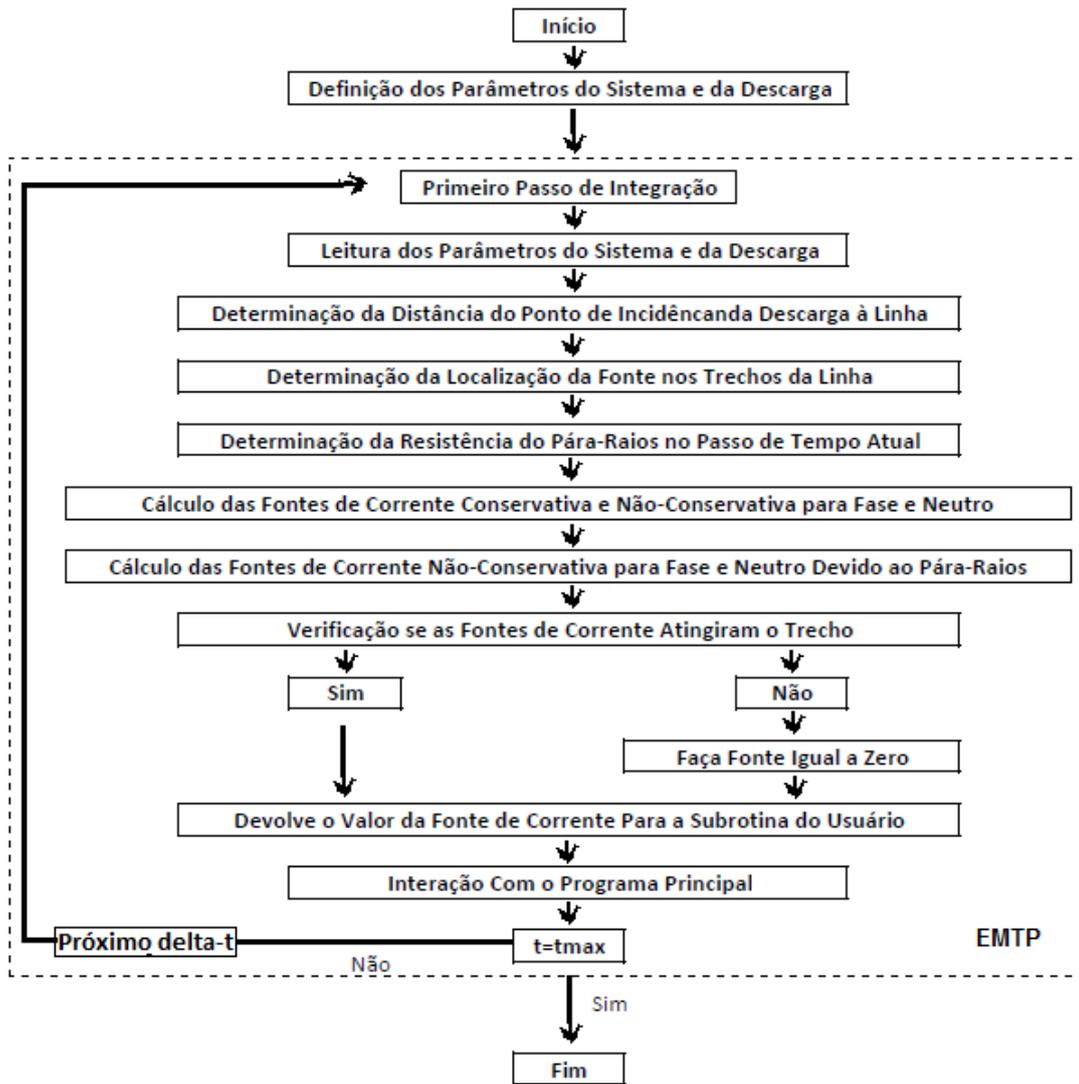


Figura 2.7: Fluxograma da rotina de cálculo de tensão induzida

2.9 Detalhes de Programação da Rotina de Cálculo da Tensão Induzida

Uma vez estabelecido o procedimento para a estimativa da tensão induzida em sistemas de distribuição de energia, neste trabalho de pesquisa, optou-se implementar a ferramenta de cálculo através de classe orientada a objetos na linguagem C++. As principais vantagens desta opção, além da maior familiaridade do autor com a linguagem, deve-se à facilidade de reusabilidade de código e integração direta com o programa principal (cálculo de transitórios).

O programa desenvolvido atende à todos os requisitos e definições estabelecidos na referência [11]. O formato (interface) dos arquivos de entrada e de saída desse software

segue o mesmo padrão utilizado pelo programa Microtran, o que permite simulações e comparações de resultados com o mesmo arquivo de parâmetros. Maiores detalhes do formato dos arquivos de entrada, podem ser vistos em [17].

Apesar da escolha acima, desde que se mantenha a concordância com as equações e algoritmos do método de cálculo, não há impedimento para que desenvolva-se a rotina em outras plataformas e/ou linguagens de programação.

Implementação da Rotina de Cálculo de Tensão Induzida

3.1 Introdução

Atualmente, os programas de cálculo de transitórios mais utilizados são os do tipo "*Electro-Magnetic Transients Program*" - EMTP. As versões comerciais mais conhecidas deste programa são: Microtran, ATP e PSCAD. Porém, até hoje, nenhuma delas contempla módulos ou subrotinas internas para o cálculo da tensão induzida por descarga atmosférica indireta. O melhor que se tem para implementar um método de tensão induzida, são fontes de corrente calculadas externamente por subrotinas desenvolvidas pelo usuário.

Para realizar o cálculo da tensão induzida nos sistemas de distribuição foi desenvolvido um programa de transitórios, na linguagem C++, baseado nos trabalhos do Prof. Hermann W. Dommel sobre o cálculo de transitórios eletromagnéticos [10, 11].

O programa implementado permite a simulação de sistemas de distribuição com linhas polifásicas, pára-raios de óxido-metálico, capacitores, indutores, resistores, transformadores, etc. A linha pode ser simulada com a representação de todas as estruturas e componentes nos vãos de interesse.

Como o pára-raios é o elemento principal deste trabalho, somente será apresentada a representação deste equipamento. Para uma descrição detalhada da modelagem dos outros componentes no programa (linhas, transformadores, etc.) o leitor pode consultar a referência [11].

3.2 Modelo do Pára-Raios no Programa de Transitórios

Como o pára-raios de óxido de zinco (ZnO) é um dos elementos básicos desse trabalho de pesquisa, é necessário que o programa de cálculo de transitórios utilizado com a sub-rotina de tensão induzida tenha modelos que representem a não-linearidade deste tipo de dispositivo. O aplicativo aqui desenvolvido, incorpora o modelo considerado como um dos mais completos em ferramentas do tipo EMTP, que é o método da compensação [3].

No Capítulo 4, são apresentadas considerações e análise detalhada sobre como o modelo do dissipador de surto de ZnO é tratado no método de cálculo da tensão induzida.

3.2.1 Modelagem não-linear pelo método da compensação

Normalmente, a modelagem mais elaborada de um programa de transitórios para um protetor de óxido de zinco é o que descreve o seu comportamento em função de sua curva tensão versus corrente ($V \times I$). Este modelo considera a característica não-linear do pára-raios e dá à mesma um tratamento matemático adequado.

Existem basicamente dois métodos eficazes para simular o comportamento de elementos não-lineares em programas de cálculo de transitórios no domínio do tempo. São eles o Método do Chaveamento de Componentes (que é um procedimento direto) e o Método da Compensação (que é um procedimento iterativo) [3]. Nesse projeto, optou-se pelo método da compensação.

O método da compensação consiste em simular os elementos não-lineares por fontes de corrente que são injetadas na parte linear da rede elétrica, conforme ilustra a figura 3.1.

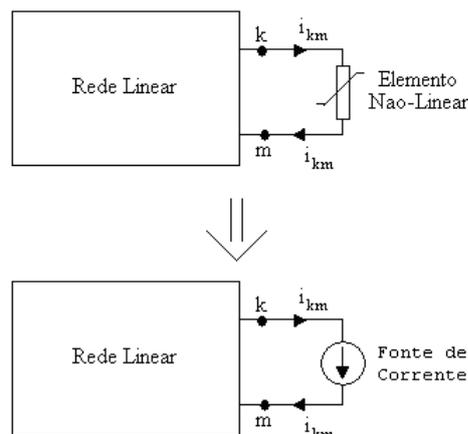


Figura 3.1: Modelagem de elemento não-linear pelo método da compensação no EMTP

A parte linear do sistema é representada por um circuito equivalente de Thévenin visto dos nós k e m . A solução do sistema é obtida pela resolução simultânea das duas equações

matriciais. Elas são dados por:

$$v_{km}(t) = v_{km}^0(t) - R_{th}(t) \cdot i_{km}(t) \quad e \quad (3.1)$$

$$v_{km}(t) = f(i_{km}), \quad (3.2)$$

em que:

$$v_{km}^0(t) = V_{th}(t). \quad (3.3)$$

A ordem do sistema matricial é definida pelo número de elementos não-lineares existentes.

Para resolver simultaneamente o par de equações matriciais 3.1 e 3.2, utilizou-se o método de Newton-Raphson, implementando-se métodos capazes de realizar os seguintes passos:

- Injetando-se uma fonte de corrente unitária do nó m para o nó k e obtendo-se a resistência do circuito equivalente de Thévenin através de $R_{th}(t) = V_k(t) - V_m(t)$;
- Calcula-se a tensão de circuito aberto entre os nós k e m , $V_{km}^0(t)$; Utilizando-se o método iterativo de Newton-Raphson computa-se a raiz da equação não-linear $V_{km}^0(t) - R_{th}(t) \cdot i_{km}(t) - f(i_{km}) = 0$, que é a corrente injetada pelo elemento não-linear ao sistema linear;
- Finalmente simula-se o sistema resultante com a rotina de cálculo de transitórios para circuitos com parâmetros lineares.

A função $f(i_{km})$, no caso do pára-raios de ZnO, é a sua curva $V \times I$. Um esboço com o formato usual desta curva é mostrado na figura 3.2.

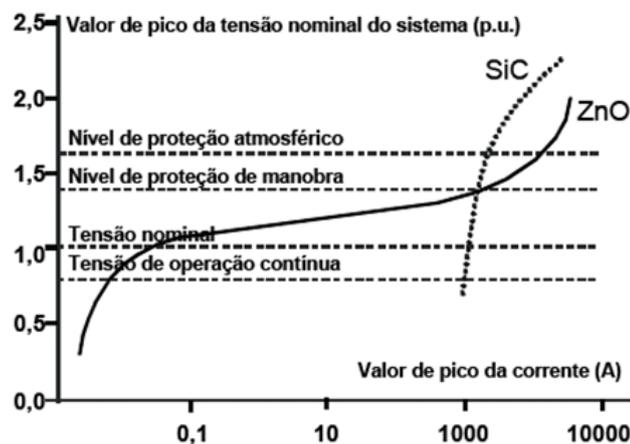


Figura 3.2: Curva característica de pára-raios de óxido metálico

3.3 Influência da Modelagem do Pára-Raios na Estimativa da Tensão Induzida

Conforme dito anteriormente, todo elemento que liga direta ou indiretamente a linha ao solo provocará a circulação de uma corrente proporcional à parcela não-conservativa do campo elétrico criado pela descarga atmosférica. Como o cálculo de tensão induzida em sistemas com pára-raios de ZnO, até o momento, é muito pouco estudado e em geral o custo computacional da simulação de grandes sistemas de distribuição é muito elevado, avalia-se no Capítulo 4 a influência do modelo desses dissipadores de surtos no método Rusck-EMTP e no desempenho global do programa de transitórios.

Interação do Pára-Raios com o Método Rusck-EMTP

4.1 Introdução

Segundo Rusck, e conforme demonstrado em [16], sempre que houver uma descontinuidade na linha, ligação fase-terra ou fase-neutro, haverá circulação de corrente devido à componente não-conservativa do campo eletromagnético gerado pela descarga atmosférica. Sendo assim, quando existir pára-raios entre os condutores fase e neutro ou entre o condutor fase e a terra, uma parcela do campo produzido pelo canal de descarga se acoplará com a linha através do dissipador de surto, conforme ilustrado na figura 4.1. Na presença do pára-raios, esta parcela do campo fará circular pela linha uma parcela de corrente induzida, dada pela equação:

$$I_{nc(PR)}(t) = \frac{V_{th}(t)}{R_{PR}(t)}, \quad (4.1)$$

sendo:

$$V_{th}(t) = V_{nc(PR)}(t) = h_f \cdot \frac{\partial A_{i(f)}(t)}{\partial t} - h_n \cdot \frac{\partial A_{i(n)}(t)}{\partial t}. \quad (4.2)$$

Como pode ser visto na equação 4.1, a resistência instantânea do dissipador de surto foi representada pelo parâmetro $R_{PR}(t)$. Uma vez que se trata de um elemento não-linear é necessário que a cada intervalo de tempo primeiramente saiba-se o valor da sua resistência para depois calcular-se as correntes induzidas totais que circularão pela linha. Essa constatação sugere uma predição da resistência do pára-raios, já que as correntes induzidas são calculadas antes do cálculo do transitório, a cada passo de tempo.

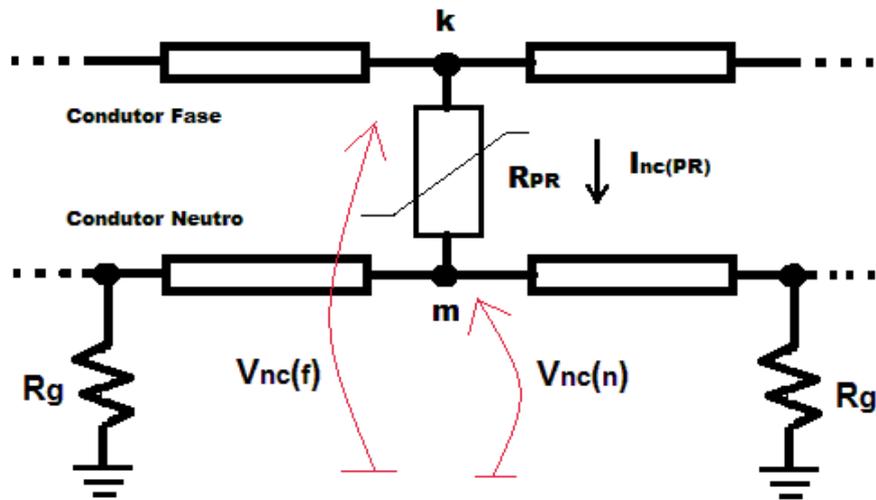


Figura 4.1: Circulação de corrente não-conservativa na linha devido ao pára-raios

Levando-se em consideração a complexidade computacional de todo o processo envolvido, a adição de um procedimento de predição muito elaborado pode inviabilizar a utilização do método Rusck-EMTP em sistemas com grande quantidade de pára-raios. Nas seções a seguir são apresentadas algumas soluções para contornar este problema.

4.2 Pára-Raios Modelados por uma Resistência Constante

A solução mais simples para representar a resistência de um pára-raios de ZnO é considerá-la com valor constante. Isto é, fora do *loop* de tempo (fluxo normal de um programa do tipo EMTP), o elemento de proteção é um resistor de valor fixo, conforme indicado na equação:

$$R_{PR}(t) = R_0, \quad (4.3)$$

em que R_0 , é um valor constante. Uma vez calculadas as correntes induzidas pela subrotina, volta-se a representar a não-linearidade do pára-raios por sua curva $V \times I$, através do método da compensação.

A resistência do protetor, durante o cálculo da tensão induzida, pode ser representada por um valor médio dependente principalmente das condições da descarga atmosférica, dos parâmetros do sistema sob estudo e em função da curva $V \times I$ do pára-raios. A utilização deste artifício basea-se na constatação de Rusck [12] de que as tensões induzidas são

dependentes apenas das alturas dos condutores (geometria) da linha e das características da descarga. Sendo assim, os níveis da tensão induzida em trechos relativamente homogêneos da linha não serão muito diferentes de uma tensão induzida média, obtida a partir das expressões simplificadas de Rusck. Ele também deduziu que existe uma relação entre as tensões induzidas e as alturas dos condutores, dada por:

$$\frac{V_f}{V_n} = \frac{h_f}{h_n}. \quad (4.4)$$

O procedimento sugerido para a estimativa da resistência média do pára-raios, além de valores típicos dos parâmetros da linha e do canal de descarga, utiliza: as equações simplificadas do método de Rusck para as tensões induzidas, dadas por:

$$V_{ind} = \frac{30 \cdot I \cdot h}{d} \left(1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right) \quad e \quad (4.5)$$

o modelo eletrogeométrico [26], ver figura 4.2, para cálculo do raio de atração do condutor e distância mínima para queda da descarga indireta, em função da amplitude da corrente da descarga, obtido através da equações:

$$r_s = 10I_0^{0.65}, \quad (4.6)$$

$$r_g = 0.9r_s \quad e \quad (4.7)$$

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}. \quad (4.8)$$

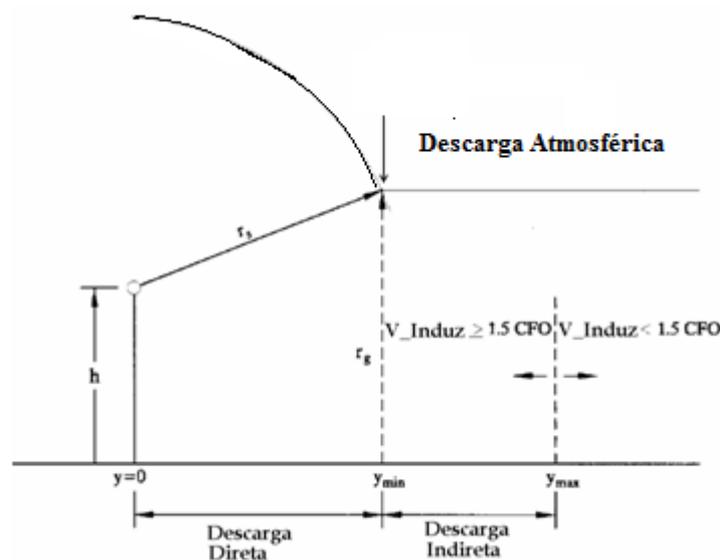


Figura 4.2: Modelo Eletrogeométrico para estimativa das descargas indiretas na LD [26]

Uma vez conhecidos os parâmetros da descarga atmosférica, sugere-se aplicá-los na definição da resistência média do pára-raios, conforme os passos a seguir:

1. Baseando-se na geometria das estruturas da linha, definir as alturas médias dos condutores neutro (h_n) e fase equivalente (h_f);
2. Utilizando-se a equação 4.5, calcular a tensão induzida no condutor fase (V_f);
3. Através da equação 4.4, calcular tensão induzida no condutor neutro (V_n);
4. Determinar a queda de tensão induzida no pára-raios;
5. Determinar a resistência do pára-raios para cada ponto de sua curva $V \times I$ ($R = \frac{V}{I}$);
6. Finalmente, por interpolação linear, utilizando-se a tensão calculada no passo 4, determinar o valor da resistência $R_{PR}(t) = R_0$.

Com tal procedimento, espera-se que a tensão induzida calculada apresente um valor próximo da realidade do fenômeno.

4.3 Pára-Raios Modelados por uma Resistência Histórica

Uma solução um pouco mais elaborada para representar a resistência de um pára-raios de ZnO é estimá-la por seu valor histórico. Isto é, o valor da resistência atual no método Rusck-EMTP será igual ao valor da relação entre o par tensão-corrente calculada pelo programa de transitório no passo de tempo anterior. A consideração da resistência com atraso no tempo está explícita na equação:

$$R_{PR}(t) = \begin{cases} R_0 & \text{se } t = 0 \\ R_{PR}(t - \Delta t) & \text{se } t \leq 0 \end{cases}, \quad (4.9)$$

onde:

$R_{PR}(t)$ é a resistência não-linear do dissipador de surto de ZnO;

R_0 é uma resistência de valor muito elevado, para representar o instante anterior ao início da atuação do pára-raios;

Δt é o intervalo de integração do programa de transitórios.

A justificativa para a utilização desta solução baseia-se na variação relativamente suave da curva $V \times I$ do dissipador de surto de óxido de zinco 3.2, [21],[27] e [28]. Desde que seja escolhido um passo de tempo (Δt) adequado para o cálculo do transitório, espera-se que o valor da resistência atual, seja bem próximo do seu valor anterior. A Figura 4.3 demonstra o procedimento adotado.

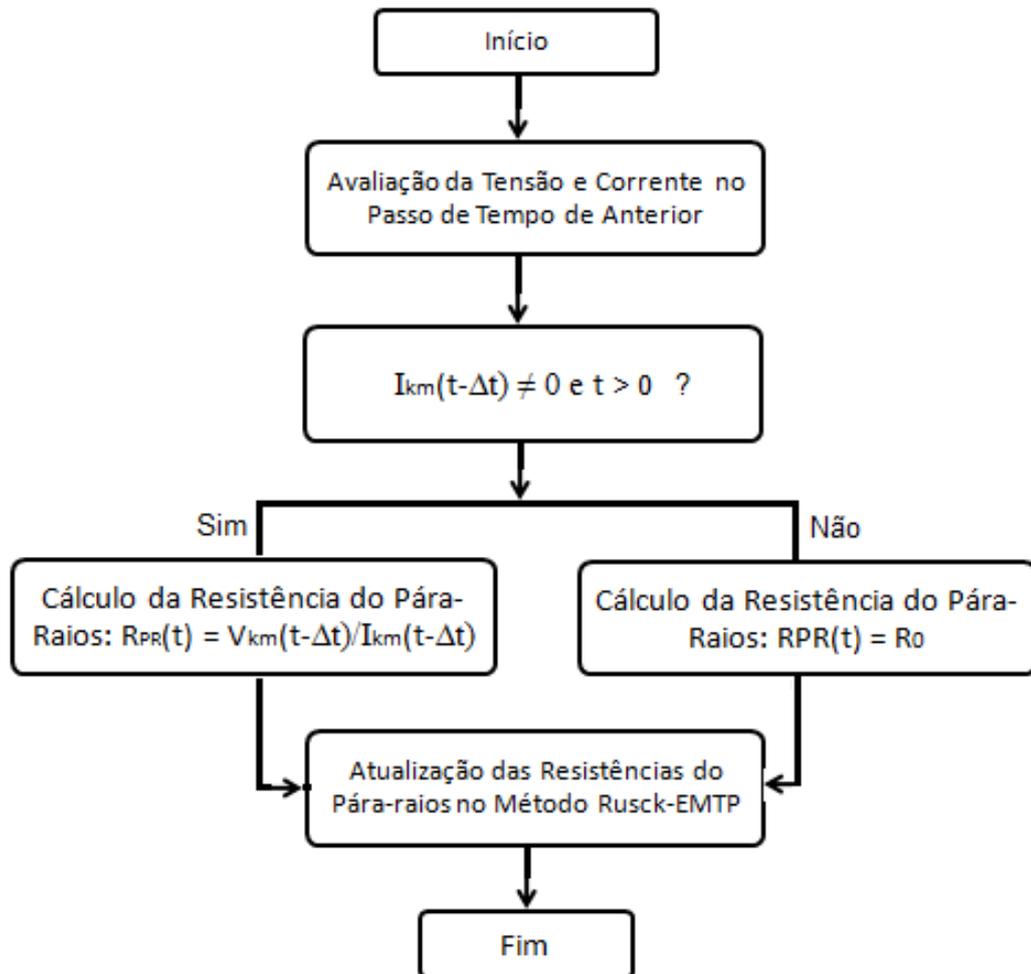


Figura 4.3: Fluxograma para cálculo da resistência histórica, $R_{PR}(t - \Delta t)$, do pára-raios no método Rusck-EMTP

Os resultados das simulações para verificação da eficácia e aplicabilidade dos procedimentos propostos serão apresentados e analisados no Capítulo 5.

Cálculos de Tensão Induzida em Linhas de Distribuição: influência da presença e modelagem do pára-raios

5.1 Introdução

A fim de validar os resultados gerados pelo programa implementado serão apresentados nas seções seguintes resultados de simulações da incidência indireta de descargas atmosféricas em linhas de distribuição de energia elétrica (LD), protegidas por pára-raios de óxido de zinco (ZnO).

Como o método Rusck-EMTP já foi bastante estudado por pesquisadores da UFMG, e teve sua eficácia comprovada através de diversas simulações e medições em modelos de escala reduzida [16], [17] e [19], julgou-se necessário apenas realizar análises comparativas com simulações já realizadas em alguns desses estudos.

Para facilitar o cálculo da tensão induzida para uma mesma LD com diferentes configurações do posicionamento dos pára-raios, ponto de incidência da descarga, etc., foi desenvolvida uma interface gráfica, ver figura 5.1, para a definição das características do surto e da metodologia de cálculo.



Figura 5.1: Interface gráfica para configuração do método Rusck-EMTP com Pára-Raios de ZnO

5.2 Tensão Induzida em Linha Monofásica

Para validar os resultados do programa no cálculo das tensões provocadas por surto atmosférico em linhas monofásicas será apresentada a comparação dos valores encontrados na simulação de um estudo de caso realizado por Paulino em [16]. Neste teste, foi avaliada a influência do valor do intervalo de discretização espacial (Δx) no cálculo da tensão induzida.

A configuração do caso analisado está mostrado na figura 5.2.

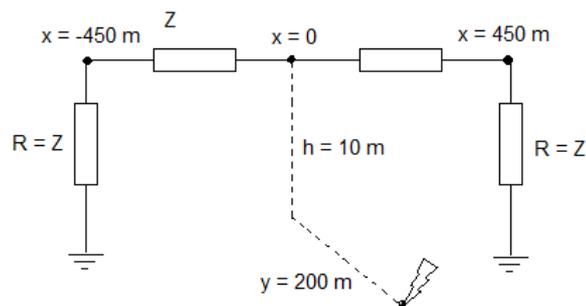


Figura 5.2: Localização da descarga em relação à linha - [16]

Os parâmetros da descarga atmosférica básica são:

- Valor de pico da corrente - $I_0 = 50$ kA;
- Forma de onda da corrente - degrau;
- Distância da descarga à linha - $y = 200$ m;

- Localização da descarga ao longo da linha - $x = 0$ m;
- Velocidade de propagação da corrente - $\nu = 30$ m/ μ s.

Os resultados apresentados na referência [16] e pela rotina desenvolvida estão mostrados, respectivamente, nas figuras 5.3 e 5.4. Os gráficos destas figuras mostram claramente que os valores encontrados pelas duas ferramentas são praticamente os mesmos.

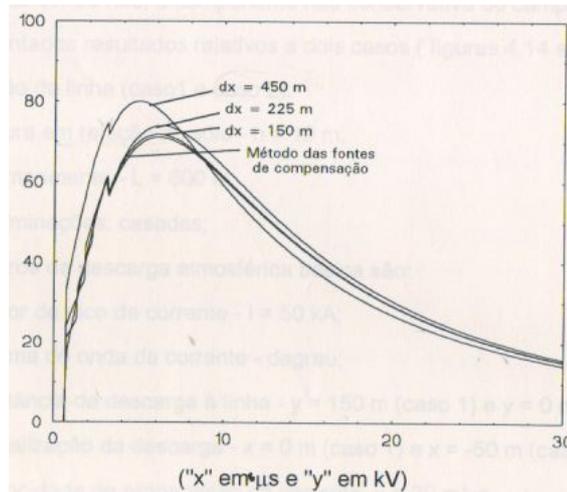


Figura 5.3: Tensão induzida no meio da linha monofásica para $\Delta x = 150$, $\Delta x = 225$ e $\Delta x = 450$ m - por Paulino [16]

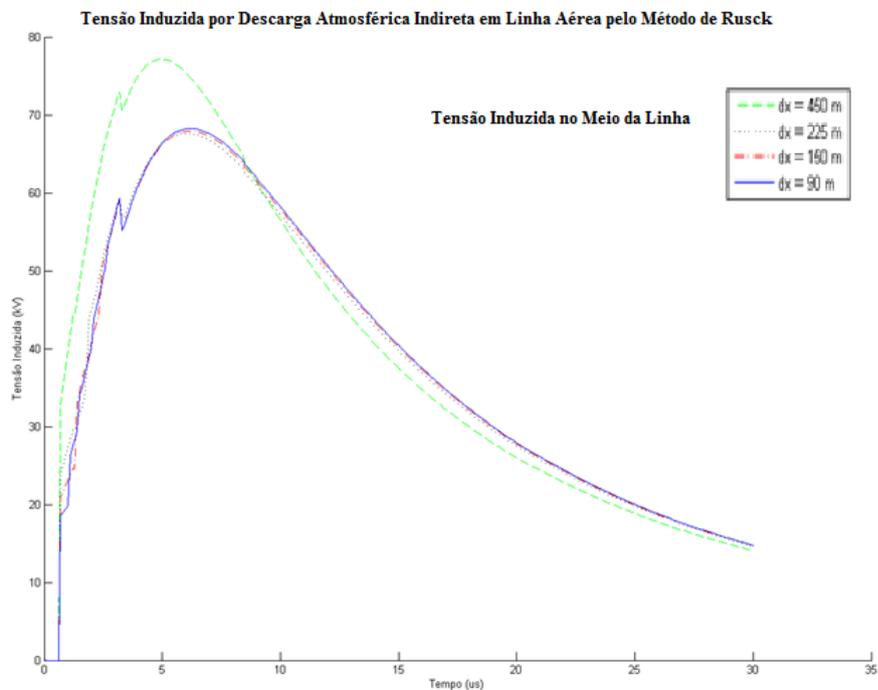


Figura 5.4: Tensão induzida no meio linha monofásica para $\Delta x = 150$, $\Delta x = 225$ e $\Delta x = 450$ m - pela rotina desenvolvida

5.3 Tensão Induzida em Linha Bifásica

A validação dos resultados gerados pelo programa para um sistema polifásico foi realizada através da comparação dos valores gerados no estudo de caso analisado por Silva em [17]. No teste em questão, foi realizado o cálculo da tensão induzida em uma linha de distribuição com dois condutores, dispostos verticalmente entre si, com extremidades casadas por impedância.

O esquema da configuração analisada está ilustrado na figura 5.5. A característica da rede e da descarga atmosférica são:

- Comprimento da linha - $L = 1$ km;
- Classe de tensão - 15kV;
- Altura do condutor fase - $h_f = 10$ m;
- Altura do condutor neutro - $h_n = 9$ m;
- Impedância de surto modal da fase - $Z_f = 510 \Omega$;
- Impedância de surto modal do neutro: $Z_n = 500 \Omega$;
- Aterramento das extremidades: linha casada;
- Comprimento dos vãos de discretização da linha: $\Delta x = 100$ m;
- Pico de Corrente do canal de descarga: $I_0 = 40$ kA;
- Velocidade de propagação da corrente no canal de descarga: $\nu = 30$ m/ μ s;
- Ponto de incidência da descarga: $x_d = 500$ m e $y_d = 100$ m;
- Resistividade do solo: nula (solo ideal);
- Tempo de frente da onda de corrente: 1 μ s;
- Tempo de cauda da onda de corrente: 50 μ .

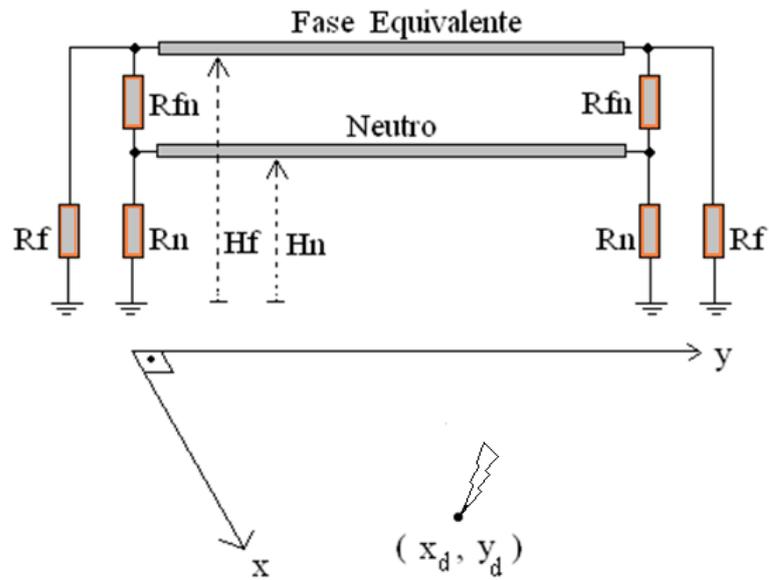


Figura 5.5: Linha de distribuição com dois condutores casados na extremidade - [17]

Os gráficos da simulação realizada na referência [17] para a tensão induzida no meio e início da LD estão reproduzidos, respectivamente, nas figuras 5.6 e 5.7.

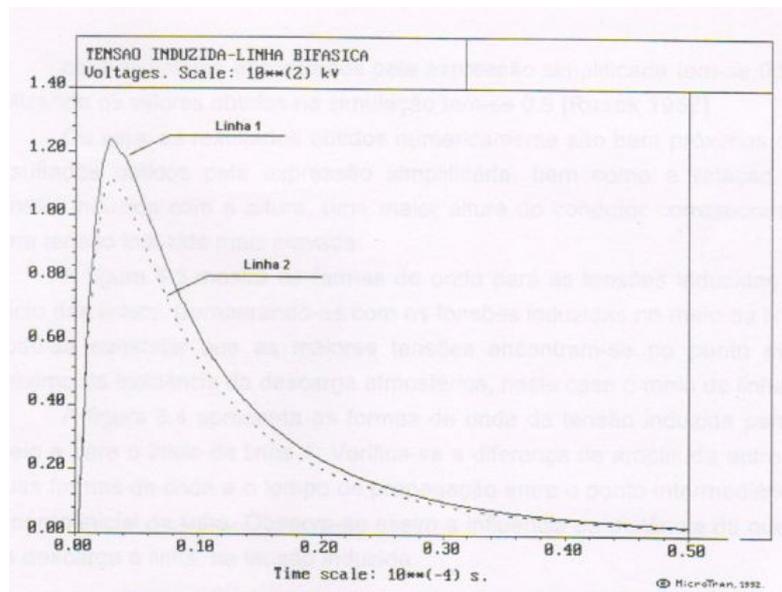


Figura 5.6: Tensão induzida no meio da linha - por Silva [17]

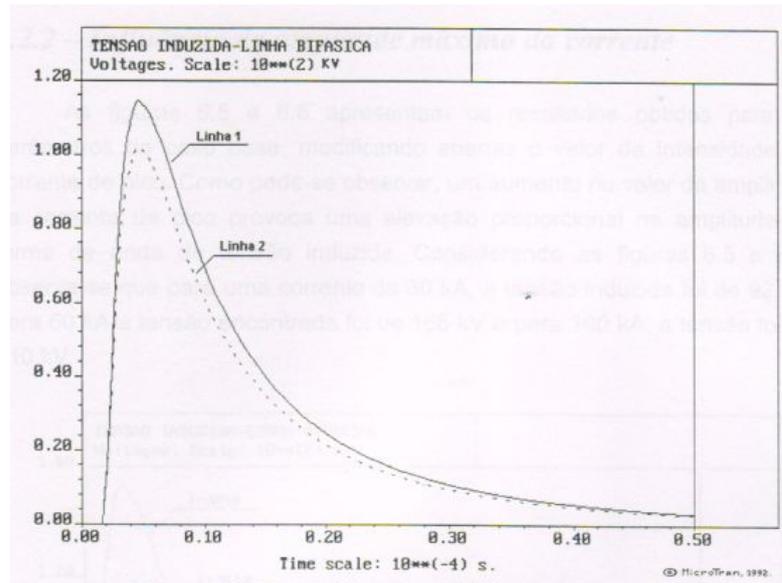


Figura 5.7: Tensão induzida no início da linha - por Silva [17]

Como pode-se observar nas figuras 5.8 e 5.9, os gráficos mostram claramente a coerência dos resultados encontrados com os resultados esperados. Sendo assim, está comprovado que ferramenta produzida está de acordo com as premissas da teoria de Rusck.

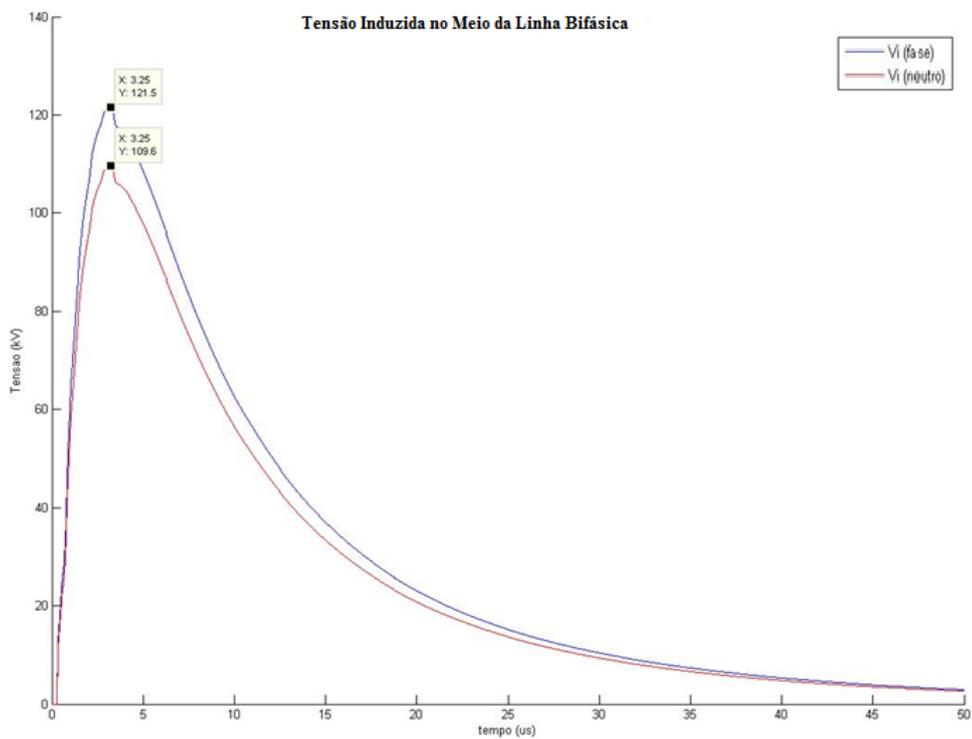


Figura 5.8: Tensão induzida no meio da linha - pela rotina desenvolvida

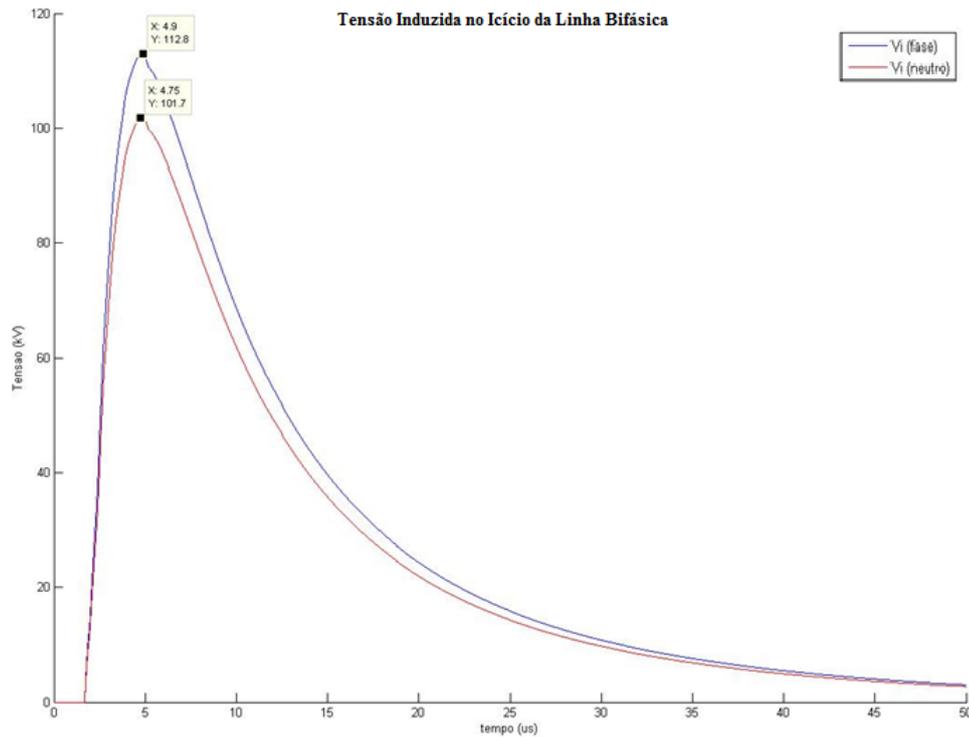


Figura 5.9: Tensão induzida no início da linha - pela rotina desenvolvida

5.4 Tensão Induzida em Linha de Distribuição com Pára-Raios de ZnO

Para uma análise qualitativa da rotina de cálculo em redes com pára-raios, simulou-se o caso analisado por Paulino em [18], conforme descrito na figura 5.10. Os parâmetros do sistema são:

- Comprimento da linha - L : 1 km;
- Altura do condutor fase - h_f : 10 m;
- Altura do condutor neutro - h_n : 9 m;
- Aterramento das extremidades: linha casada;
- Pico de Corrente do canal de descarga: $I_0 = 100$ kA;
- Velocidade de propagação da corrente no canal de descarga: $\nu = 30$ m/ μ s;
- Ponto de incidência da descarga: $x_d = 0$ m e $y_d = 100$ m;
- Resistividade do solo: nula (solo ideal);

- Tempo de frente da onda de corrente: $1 \mu\text{s}$;
- Tempo de cauda da onda de corrente: $50 \mu\text{s}$.
- Tensão de disparo do pára-raios: 80 kV.
- Tensão residual do pára-raios: 54 kV.

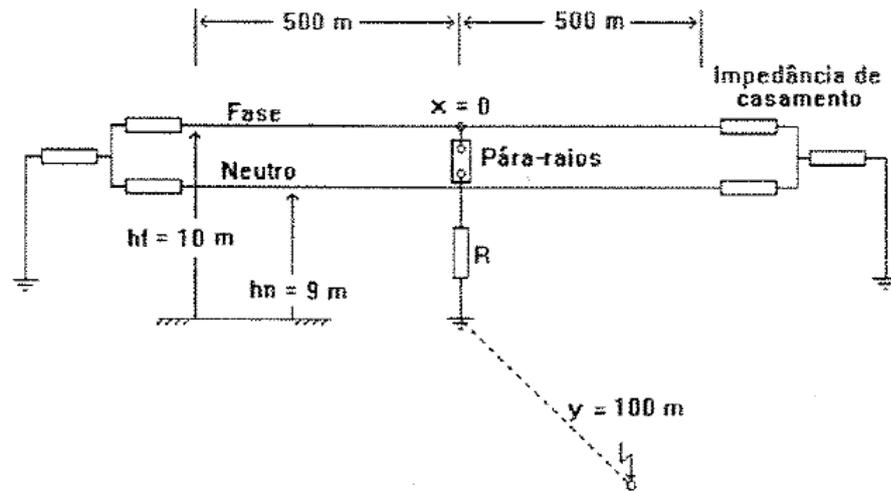


Figura 5.10: Configuração para a simulação com pára-raios apresentada por Paulino em [18]

Os resultados apresentados na referência [18] estão ilustrados na figura 5.11, onde foi avaliado o efeito da instalação do pára-raios nas coordenadas $x = 0$ e $y = 0$, com uma resistência aterramento de 50Ω . A figura 5.12 mostra o gráfico da tensão induzida gerado pelo programa desenvolvido na linha com um pára-raios de ZnO, também localizado nas coordenadas $x = 0$ e $y = 0$, e com a mesma resistência de aterramento. A comparação dos resultados mostram que os valores produzidos pela rotina implementada também são coerentes. A principal diferença se refere aos modelos de pára-raios utilizado por cada autor. Aqui representou o dissipador de surto por sua curva $V \times I$ e em [18] representou-se o protetor por uma fonte de tensão controlada por tensão (modelo da chave).

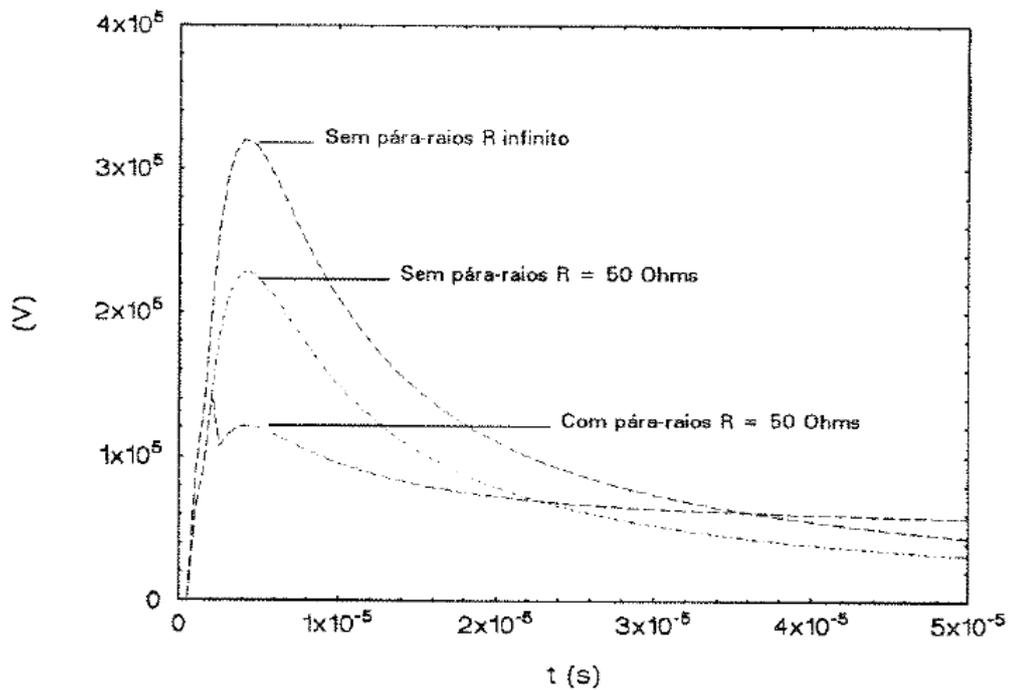


Figura 5.11: Tensão induzida em linha bifásica com pára-raios em $x=0$ e $R=50\Omega$, Paulino [18]

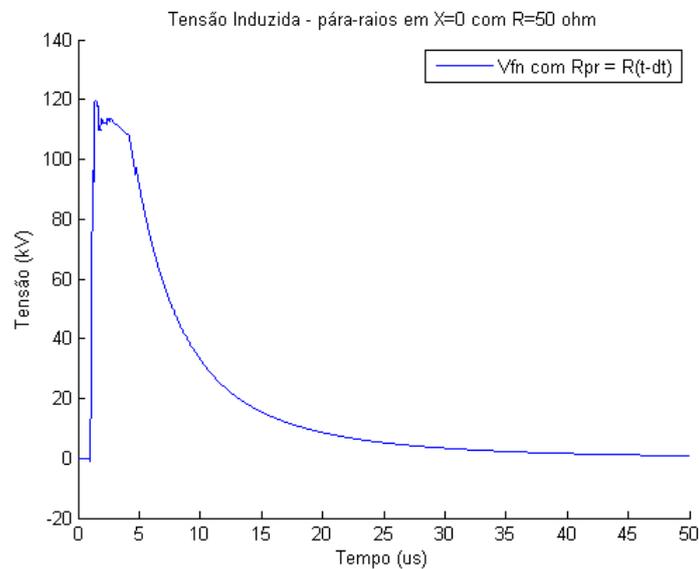


Figura 5.12: Tensão induzida em linha bifásica com pára-raios de ZnO em $x=0$ e $R=50\Omega$

Tendo validado a ferramenta desenvolvida, a utilização do procedimento Rusck-EMTP com Pára-Raios de ZnO será demonstrada na análise de tensões induzidas em redes de distribuição aéreas. A partir de dois casos base, serão avaliados:

- Influência do modelo do pára-raios no método de tensão induzida;

- Eficiência do pára-raios de ZnO na mitigação das sobretensões provocadas pelo surto atmosférico;
- Influência da resistência de aterramento do condutor neutro.

5.4.1 Proteção contra sobretensão induzida com pára-raios de ZnO - Caso 1

O cenário para o primeiro estudo de caso (Caso 1) está ilustrada na figura 5.13. Nela são evidenciadas a localização da linha, o ponto de incidência da descarga atmosférica e o posicionamento do conjunto de pára-raios.

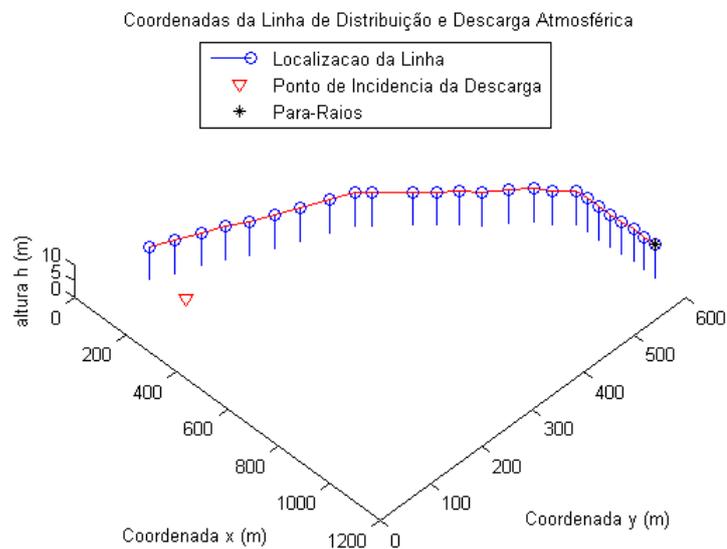


Figura 5.13: Configuração do sistema de distribuição para o primeiro estudo de caso

A linha implementada possui características semelhantes às de um alimentador típico, localizado no interior do estado de Minas Gerais [8]. Os parâmetros utilizados no Caso 1 são:

- Comprimento da linha - $L = 1113.1$ m;
- Classe de tensão - 15 kV;
- número de fases - $n_f = 3$;
- Altura dos condutores fase - $h_f = 8.4$ m;
- Distância horizontal entre fases - $d_f = 0.7$ m;
- Altura do condutor neutro - $h_n = 7.2$ m;

- Bitola do condutor: 1/0;
- Tipo do condutor: ACSR;
- Aterramento das extremidades: linha aberta nas extremidades, com condutor neutro multiterrado;
- Pico de Corrente do canal de descarga: $I_0 = 31$ kA;
- Polaridade da Corrente do canal de descarga: negativa;
- Velocidade de propagação da corrente no canal de descarga: $\nu = 30$ m/ μ s;
- Ponto de incidência da descarga: $x_d = 222$ m e $y_d = 108$ m;
- Tempo de frente da onda de corrente: 1.2 μ s;
- Tempo de cauda da onda de corrente: 50 μ .

A forma de onda da corrente adotada nos testes está ilustrada na figura 5.14. As coordenadas e a resistência média de aterramento de cada uma das estruturas do alimentador estão dispostas na tabela 5.1. Já a curva característica do pára-raios é apresentada na tabela 5.2, [28, 27].

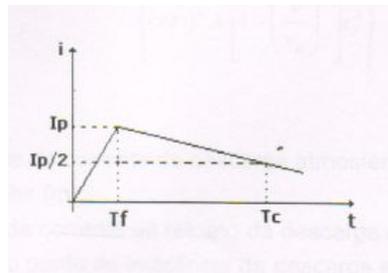


Figura 5.14: Forma de onda da corrente utilizada nas simulações [17]

Tabela 5.1: Coordenadas e resistências de aterramento da linha

Parâmetros da linha			
Poste	Coord. x (m)	Coord. y (m)	$R_{\text{aterramento}} (\Omega)$
1	99	99	45
2	131	132	45
3	163	168	45
4	195	201	45
5	228	230	45
6	260	263	45
7	292	299	45
8	325	339	45
9	357	373	30
10	389	389	30
11	469	431	30
12	515	454	30
13	560	477	30
14	606	498	30
15	651	527	30
16	697	553	30
17	742	569	30
18	788	592	30
19	830	593	30
20	873	594	30
21	916	594	30
22	958	596	30
23	1001	598	30
24	1044	597	30
25	1086	597	30

Tabela 5.2: Característica do pára-raios de ZnO

Curva $V \times I$ do dispositivo	
Corrente (A)	Tensão (V)
0	0
200	16700
400	20800
480	22000
600	22900
800	25500
1500	26900
3000	28200
5000	29400
10000	31400
15000	33500
20000	35200
40000	40400

As figuras 5.15 e 5.16 mostram a tensão induzida entre os condutores fase e neutro no poste número 1 da LD. A figura 5.15 mostra um comparativo entre os dois procedimentos de modelagem da resistência do pára-raios. Enquanto a figura 5.16 exibe a comparação entre os níveis de tensão da linha com e sem a presença de dissipador de surto. O gráfico superior da figura 5.16 exibe a tensão induzida na linha com pára-raios, já o gráfico inferior da figura 5.16 apresenta a tensão induzida na linha quando não há protetor contra surto.

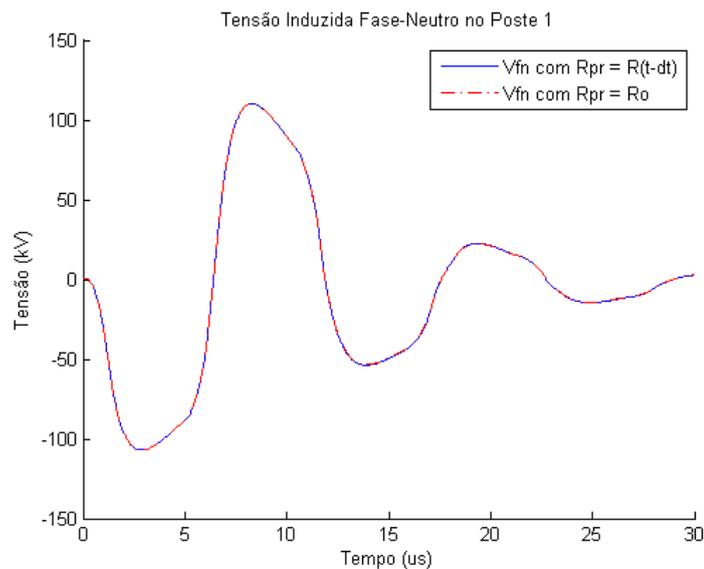


Figura 5.15: Tensão induzida no poste 1 - Métodos da resistência histórica e média

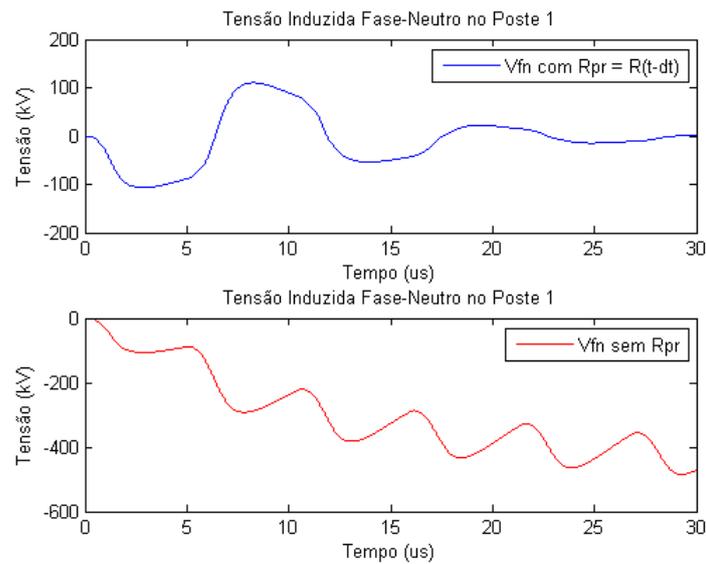


Figura 5.16: Tensão induzida no poste 1 - Comparação com a tensão da linha desprotegida

Cabe ressaltar que as oscilações nos gráficos dessas figuras são provocadas pelas reflexões sucessivas nas extremidades da linha. Não utilizou-se o artifício do casamento da linha por impedância porque nas extremidades de um sistema de distribuição, normalmente, existem transformadores, ou cargas predominantemente indutivas. Como em frequências elevadas, esses elementos também possuem impedâncias com valores elevados, optou-se representar o início e o final do sistema por circuitos abertos.

As figuras 5.17 e 5.18 mostram a tensão induzida entre os condutores fase e neutro no poste número 7 da LD.

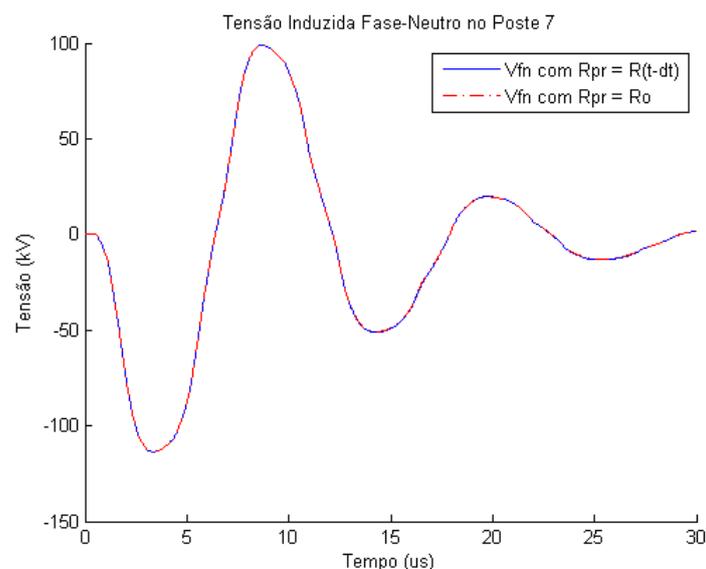


Figura 5.17: Tensão induzida no poste 7 - Métodos da resistência histórica e média

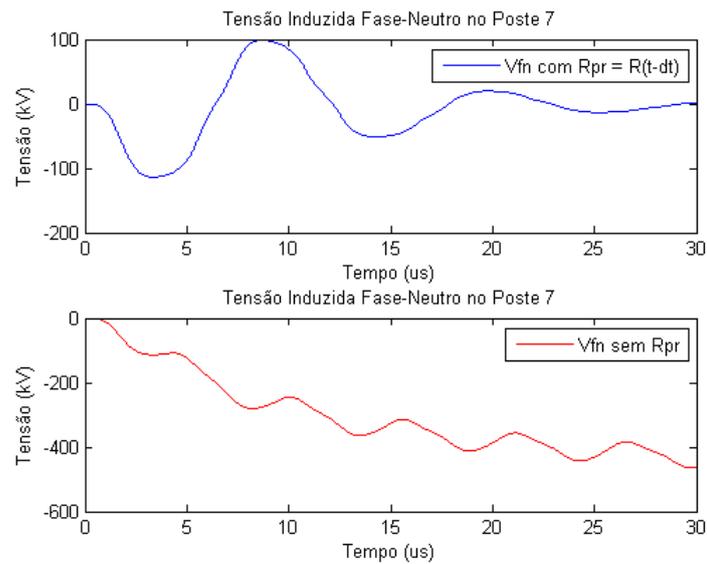


Figura 5.18: Tensão induzida no poste 7 - Comparação com a tensão da linha desprotegida

Finalmente, as figuras 5.19 e 5.20 exibem a tensão induzida entre os condutores fase e neutro no poste número 25 da LD. Esta é a única posição da linha que possui pára-raios.

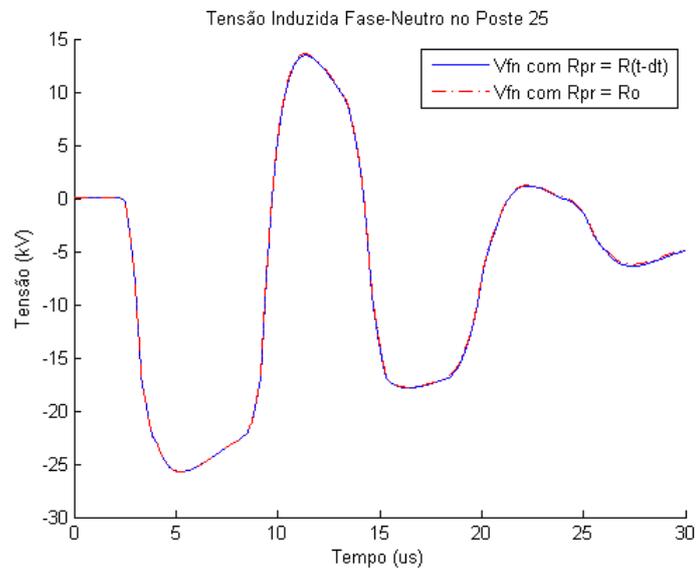


Figura 5.19: Tensão induzida no poste 25 - Métodos da resistência histórica e média

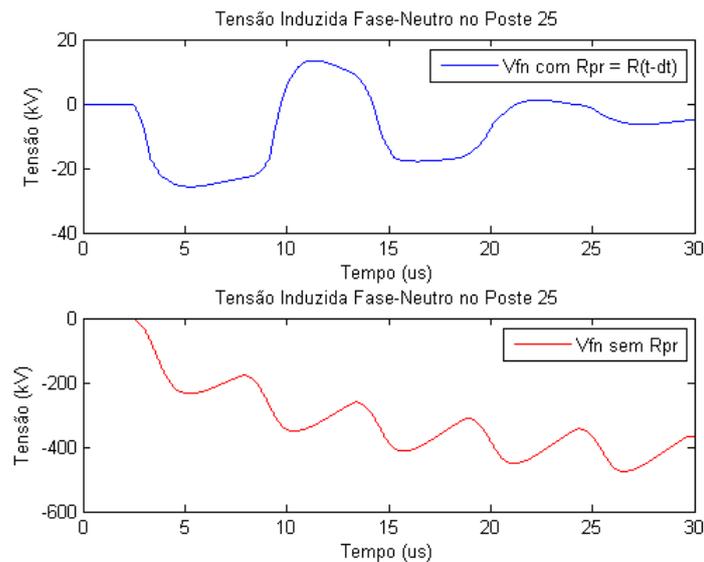


Figura 5.20: Tensão induzida no poste 25 - Comparação com a tensão da linha desprotegida

A comparação entre as duas técnicas para a avaliação de um elemento não-linear no método Rusck-EMTP mostra que o uso da resistência média fornece resultados relativamente próximos dos valores gerados pelo uso da resistência histórica, conforme demonstrado nas figuras 5.15, 5.17 e 5.19. Outro fato importante, é que apesar de fornecer resultados menos precisos, o algoritmo simplificado também gera uma boa estimativa da tensão induzida. Sendo assim, nos casos onde o tempo de simulação seja crucial, o uso do modelo simplificado não comprometerá significativamente os resultados simulados.

Através da avaliação das figuras 5.18 e 5.20, evidenciou-se a eficiência do uso de dispositivos de óxido metálico na mitigação de surtos atmosféricos indiretos. Porém, também fica claro na figura 5.15 que a metodologia tradicional de utilizar pára-raios somente nas proximidades de equipamentos importantes da rede (transformadores, banco de capacitores, etc.), na maioria das vezes, não é suficiente para limitar as sobretensões atmosféricas à níveis aceitáveis e, conseqüentemente, garantir os indicadores de qualidade de energia dentro dos padrões adequados.

5.4.2 Proteção contra sobretensão induzida com pára-raios de ZnO - Caso 2

O esquema para o segundo estudo de caso (Caso 2) está ilustrada na figura 5.21, em que são evidenciadas a localização da linha, o ponto de incidência da descarga atmosférica e o posicionamento do conjunto de pára-raios. O sistema possui os mesmos parâmetros eletrogeométricos do Caso 1. As principais diferenças referem-se à localização da descarga ($x_d = 800$ e $y_d = 500$ m) e à configuração dos pára-raios.

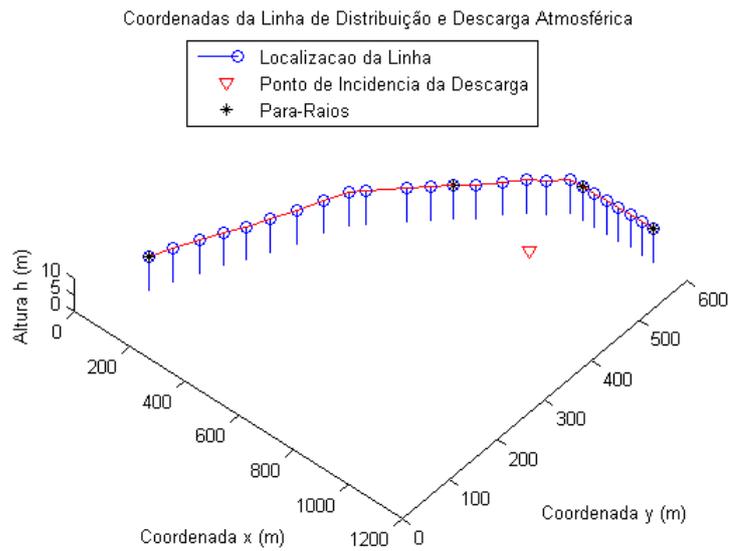


Figura 5.21: Configuração da rede de distribuição para o segundo estudo de caso

Foram utilizados quatro pára-raios posicionados nas estruturas 1, 13, 19 e 25. Os resultados estão apresentados nas figuras 5.22 a 5.27.

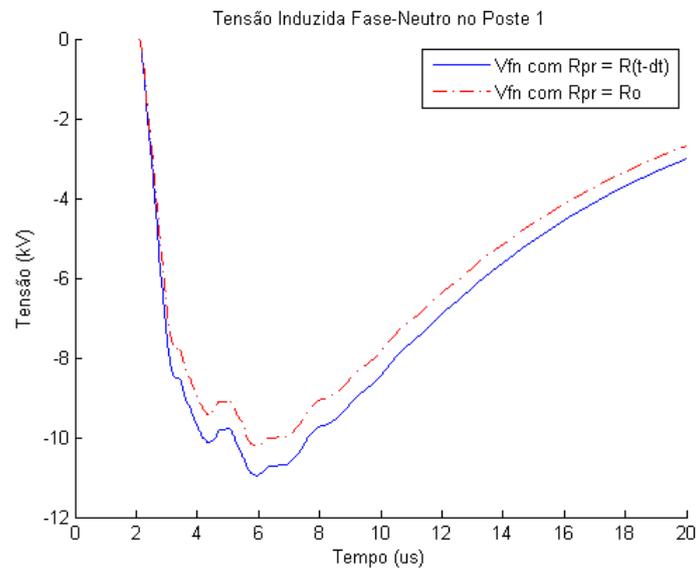


Figura 5.22: Tensão induzida no poste 1 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2

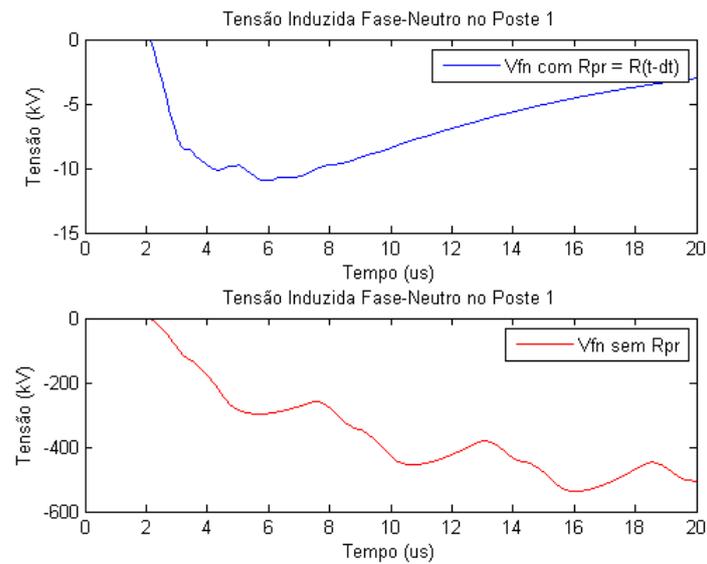


Figura 5.23: Tensão induzida no poste 1 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2

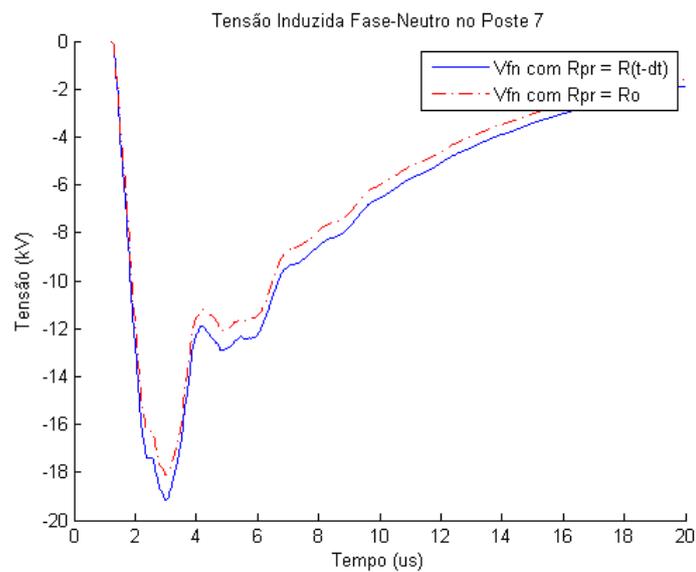


Figura 5.24: Tensão induzida no poste 7 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2

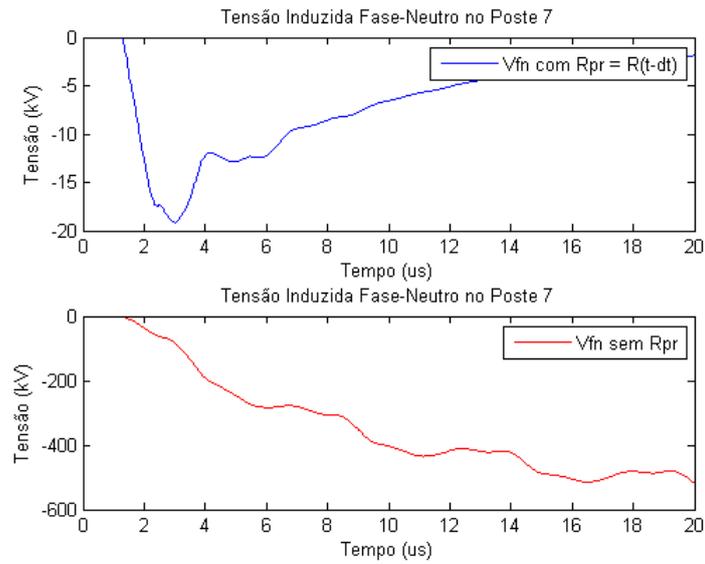


Figura 5.25: Tensão induzida no poste 7 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2

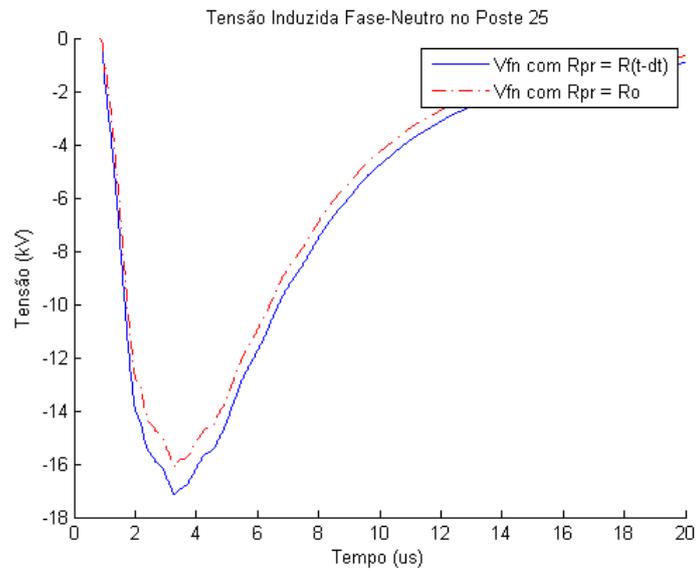


Figura 5.26: Tensão induzida no poste 25 - Métodos da resistência histórica e média - Caso 2

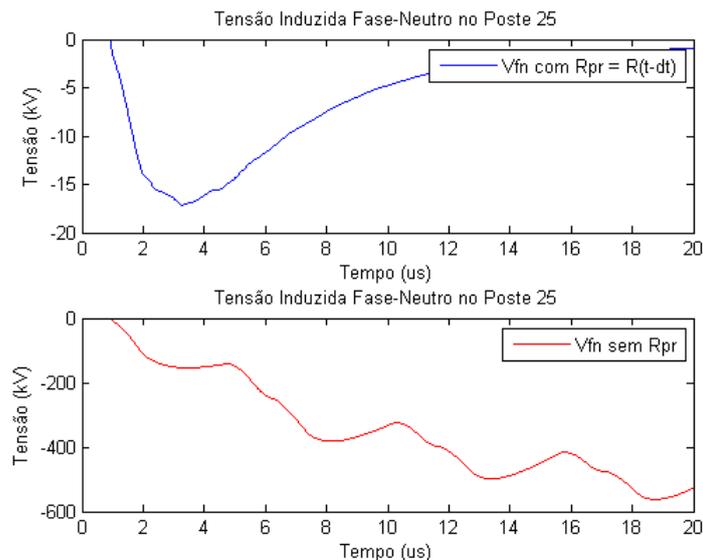


Figura 5.27: Tensão induzida no poste 25 - Comparação com a tensão da linha desprotegida - Caso 2

A partir dos resultados apresentados, pôde-se verificar que a configuração implementada foi suficiente para proteger o sistema, e comprovar que a rotina de cálculo desenvolvida está adequada para simular as sobrecargas, causadas pelas descargas atmosféricas, em redes de distribuição com pára-raios de óxido metálico.

5.5 Método Rusck-EMTP sem o Efeito do Pára-Raios

Para verificar a influência de se calcular a tensão induzida numa linha de distribuição com o método Rusck-EMTP tradicional ([14], ([15], [17])), sem considerar o efeito do pára-raios, utilizou-se o Caso 2 da seção anterior como base. O sistema foi simulado novamente sem a injeção das correntes não-conservativas do elemento não-linear, considerando-se apenas o efeito dos outros dispositivos do modelo de Rusck que ligam os condutores à terra ou ao condutor neutro.

As figuras de número 5.28 a 5.30 exibem os gráficos das tensões geradas pelo surto atmosférico. O gráfico em linha sólida da figura 5.28 exhibe a tensão induzida na linha considerando o efeito do pára-raios no cálculo das correntes não-conservativas, modelado por resistência histórica. A oscilografia em traço e ponto mostra a tensão induzida utilizando-se a modelagem do pára-raios por resistência constante para consideração das fontes de corrente não-conservativas. Já no gráfico pontilhado da 5.28 este efeito não é computado. Análise semelhante vale para as figuras 5.29 e 5.30.

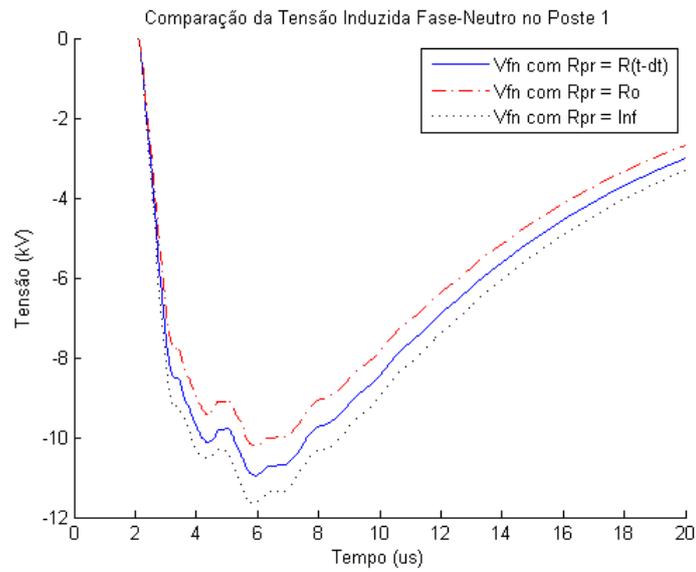


Figura 5.28: Tensão induzida no poste 1 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios

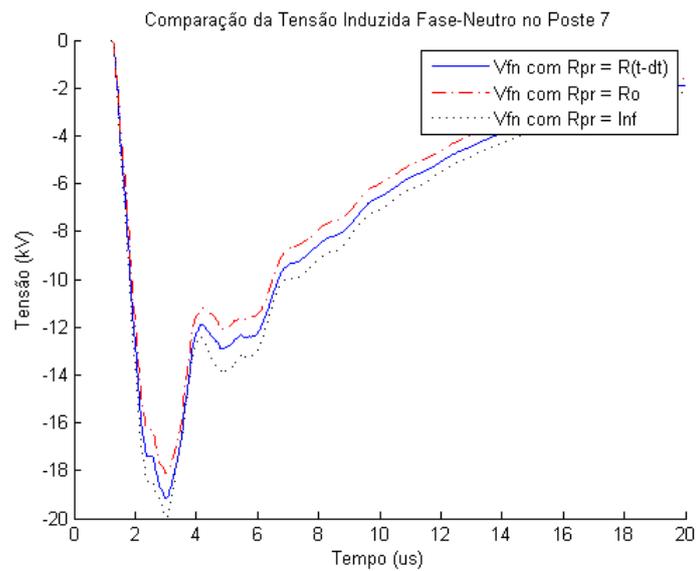


Figura 5.29: Tensão induzida no poste 7 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios

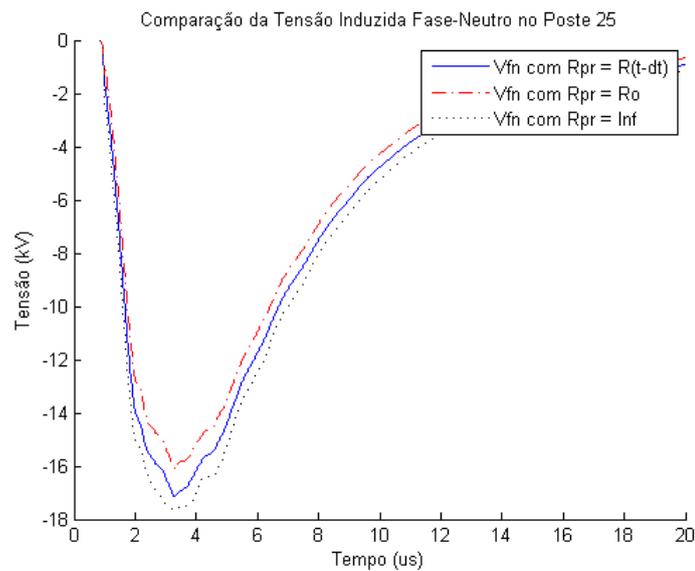


Figura 5.30: Tensão induzida no poste 25 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios

Para verificar a influência da variação da velocidade da corrente no canal de retorno, calculou-se novamente a tensão induzida na mesma situação anterior. A única alteração foi a velocidade da corrente de $30 \text{ m}/\mu\text{s}$ para $120 \text{ m}/\mu\text{s}$. Os gráfico resultantes estão apresentados nas figuras 5.31 a 5.33. Para esse caso, as diferenças das amplitudes das sobretensões atmosféricas na simulação sem o efeito da pára-raios no método Rusck-EMTP foram cerca de 20 % maiores que as do método implementado.

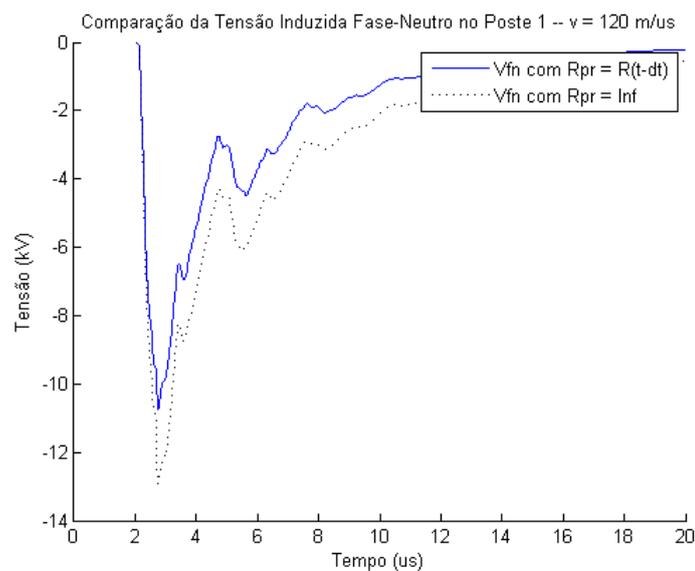


Figura 5.31: Tensão induzida no poste 1 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($\nu = 120 \text{ m}/\mu\text{s}$)

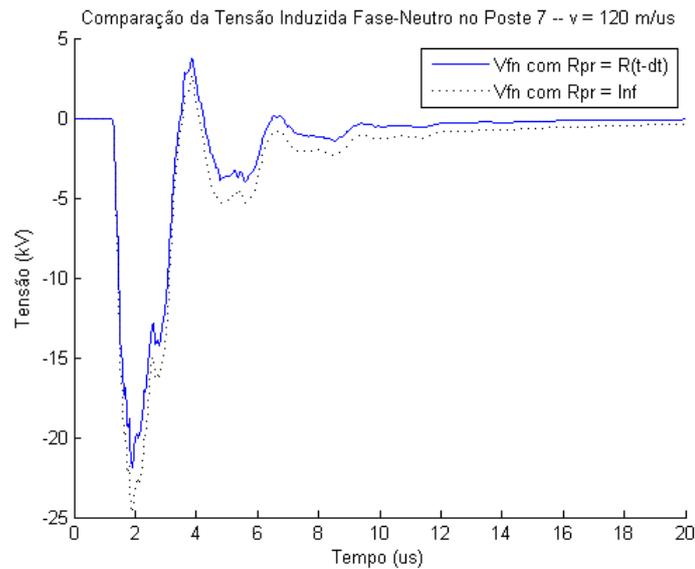


Figura 5.32: Tensão induzida no poste 7 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($v = 120 \text{ m/us}$)

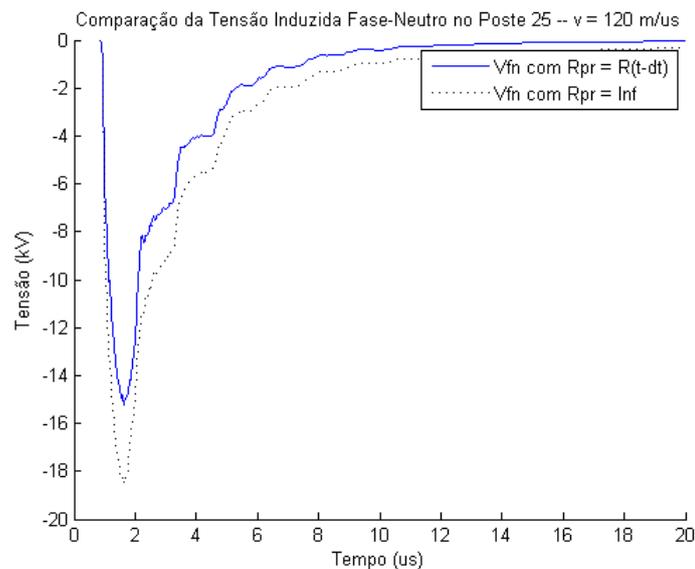


Figura 5.33: Tensão induzida no poste 25 - Método Rusck-EMTP sem o efeito do pára-raios ($v = 120 \text{ m/us}$)

A comparação dos resultados mostra que a utilização de uma metodologia de cálculo de tensão induzida que não leva em consideração a componente não-conservativa do campo no pára-raios gera valores sobredimensionados da sobretensão atmosférica. No caso de projetos de proteção e/ou melhoria de desempenho da rede, isto pode significar desperdício de recursos.

Em face do exposto, conclui-se que o desenvolvimento da modelagem do pára-raios para o cálculo das fontes de corrente relativas ao campo elétrico não-conservativo representa um avanço considerável na metodologia implementada em [17], e conseqüentemente nos projetos de melhoria de desempenho dos sistemas de distribuição frente a distúrbios atmosféricos.

Conclusões e Propostas de Continuidade do Trabalho

6.1 Conclusões

Nos dias atuais, a competitividade do mercado energético e a atuação das agências reguladoras exigem das concessionárias de energia elétrica um fornecimento adequado aos padrões de qualidade. É sabido que grande parte dos problemas das redes de distribuição são causados por surtos atmosféricos. Uma boa solução para contornar este obstáculo é a utilização de pára-raios de óxido de zinco (ZnO). Isto porque estes dispositivos já possuem uma boa relação custo-benefício, oferecendo excelente nível de proteção com pouca interferência harmônica nas formas de onda do sistema.

A partir do conteúdo apresentado pode-se concluir que o objetivo principal deste trabalho, desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo da tensão induzida por descargas atmosféricas em sistemas de distribuição com pára-raios de ZnO, foi atingido. O programa implementado está em concordância com a teoria de Rusck e é capaz de simular transitórios eletromagnéticos em sistemas polifásicos complexos, com grande parte dos dispositivos que podem ser representados em um programa do tipo EMTP.

Foram apresentadas duas soluções para incluir o comportamento não-linear dos dissipadores de surto no método Rusck-EMTP tradicional. Uma modelagem baseada no valor histórico da resistência do pára-raios e outra modelagem, mais simplificada, baseada no valor médio da tensão induzida e da curva $V \times I$ do dispositivo. O procedimento simplificado apesar de fornecer resultados menos precisos, ainda mostrou-se aplicável na estimativa da tensão induzida, e conseqüentemente pode ser utilizada em análises qualitativas, ou em aplicações onde o tempo de processamento seja crucial.

Finalmente, os resultados dos casos estudados mostraram que o software implementado

também fornece boa estimativa das tensões induzidas por descargas atmosféricas quando os sistemas de distribuição estão equipados com pára-raios de óxido metálico. A ferramenta de cálculo apresentada é um ítem facilitador para o desenvolvimento dos projetos de melhoria de desempenho das linhas de distribuição, frente a distúrbios atmosféricos. Ampliando dessa forma, a grande potencialidade dos softwares do tipo EMTP.

6.2 Propostas de Continuidade do Trabalho

Como proposta de continuidade dos trabalhos realizados, sugere-se:

- Realizar em laboratório a implementação dos casos estudados neste trabalho em modelo de escala reduzida;
- Utilizar uma estação experimental de medição de descargas atmosféricas, equipada com pára-raios de ZnO, para verificar a precisão dos resultados gerados pelo programa de cálculo de tensão induzida;
- Por meio de parceria da Universidade Federal de Minas Gerais com outra instituição, incluir definitivamente o módulo de tensão induzida em uma ferramenta comercial existente. Ou até mesmo, desenvolver uma nova versão EMTP comercial que contemple o método de Rusck.

Artigos Publicados

- L.C. Alves, M.B. Martins, F.B. Teixeira, J.C.R. Lopes, G.V.D. Barbosa, S.R. Abreu, A.E.A. de Araújo, S.L. de Senna, J.A. Vasconcelos, *Metodologia para Posicionamento Ótimo de Pára-Raios em Linhas de Distribuição de Energia Elétrica*. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, 2007 XII ERIAC.
- L.C. Alves, A.E.A. Araújo, G.C. Miranda, *Afundamentos de Tensão Provocados por Descargas Atmosféricas Indiretas*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2008.

Referências Bibliográficas

- [1] R.C. Dugan et. al., *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill. 2nd Edition, 2002.
- [2] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press. 2000.
- [3] A.E.A Araújo, W.L.A. Alves, *Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia*. Belo Horizonte, Editora UFMG. Ed. 1, 2001.
- [4] IEEE-EEI LINE OUTAGES COMMITTEE, Report of Joint IEEE-EEI Subject Committee on EHV Line Outages. Trans. IEEE, 86, p. 547, 1967.
- [5] A.M. Carvalho et. al., *Tecnologias para análise e melhoria de desempenho de instalações de transmissão frente a descargas atmosféricas*. In. INTERNATIONAL SEMINAR ON LIGHTNING PROTECTION, IV. São Paulo/Brazil, 1997.
- [6] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [7] R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.
- [8] L.C. Alves, M.B. Martins, F.B. Teixeira, J.C.R. Lopes, G.V.D. Barbosa, S.R. Abreu, A.E.A. de Araújo, S.L. de Senna, J.A. Vasconcelos, *Metodologia para Posicionamento Ótimo de Pára-Raios em Linhas de Distribuição de Energia Elétrica*. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, 2007 XII ERIAC.
- [9] L.C. Alves, A.E.A. Araújo, G.C. Miranda, *Afundamentos de Tensão Provocados por Descargas Atmosféricas Indiretas*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2008.

- [10] H.W. Dommel, *Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88, pp. 388-399, April 1969.
- [11] H.W. Dommel, *Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Electro-magnetic Transients Program Reference Manual, Bonneville Power Administration - Portland - OR, August 1986.
- [12] S. Rusck, *Induced Lightning Over-Voltages on Power-Transmission Lines with Special Reference to The Over-Voltage Protection of Low-Voltage Networks*. Trans. of Royal Institute of Technology Stockolm. N°120, 1957.
- [13] J.O.S. Paulino, A.E.A. Araújo, G.C. Miranda, *Lightning Induced Voltage Calculation in Lossy Transmission Lines*. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 34, N°5, September 1998.
- [14] A.E.A. Araújo, J.O.S. Paulino, J.P. Silva, H.W. Dommel, *Calculation of lightning-induced voltage with RUSCK's method in EMTP. Part I: Comparison with measurements and Agrawal's coupling model*. Electric Power Systems Research. Vol. 60, September 2001.
- [15] J.P. Silva, A.E.A. Araújo, J.O.S. Paulino, *Calculation of lightning-induced voltage with RUSCK's method in EMTP. Part II: effects of lightning parameter variations*. Electric Power Systems Research. Vol. 61, December 2001.
- [16] J.O.S. Paulino, *Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes Elétricas: Implementação da teoria de Rusck no EMTP; Estudo da influência das perdas na linha..* Exame de classificação para carga de professor da Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte, 1994.
- [17] J.P. Silva, *Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Tese de Doutorado, N°17, 2001.
- [18] J.O.S. Paulino, *Uma Contribuição ao Estudo da Proteção de Redes Elétricas Contra Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- [19] W.C. Boaventura, *Estudo da tensão induzida em linhas aéreas por descargas atmosféricas utilizando técnicas de modelo reduzido*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, N°69, 1990.

- [20] I.J.S. Lopes, *Estudo do comportamento de um condutor multiaterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, N°67, 1990.
- [21] R.W. Golde, *Lightning Protection - Volume 2*. London, Academic Press Inc. Ltd. Ed. 1997.
- [22] A.J. Eriksson, M.F. Stringfellow, D.V. Meal, *Lightning - Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101, April 1982.
- [23] M.J. Master, M.A. Uman, *Lightning induced voltages on power lines: Theory*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 103, N°9, p. 2502-2518, September 1984.
- [24] C.A. Nucci, F. Rachidi, M.V. Ianoz, C. Mazzetti, *Lightning-induced voltages on overhead lines*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 35, N°1, p. 75-86, February 1993.
- [25] G. Diendorfer, *Induced voltage on overhead lines due to nearby lightning*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 12, N°4, p. 292-299, November 1990.
- [26] IEEE STD1410, *IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*. IEEE Transactions on Magnetics. 2004.
- [27] IEEE STDC62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*. IEEE Standard. 1997.
- [28] D.W. Durbak, *Surge Arrester Modeling*. Power Engineering Society Winter Meeting. Vol. 2, January 2001.