

PAULO CÉSAR ÁLVARES MOTA

UM ESTUDO SOBRE TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Uberlândia
2011

PAULO CÉSAR ÁLVARES MOTA

UM ESTUDO SOBRE TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas de Energia

Orientador:
Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Co-Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Universidade Federal de Uberlândia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Paulo César Álvares Mota

*“Um Estudo Sobre Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em
Linhas de Transmissão”*

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em
02/09/2011 pela Comissão Julgadora:

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D. – UFU
(Orientador)

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. – UFU
(Coorientador)

Prof. José Roberto Camacho, Ph.D. – UFU
Rui Vagner Rodrigues da Silva, Dr. – IFG

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.
Coorientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

M917e Mota, Paulo César Álvares, 1985-
Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em
linhas de transmissão / Paulo César Álvares Mota. - 2011.
103 f. : il.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
Co-orientador: Marcelo Lynce Ribeiro Chaves.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Raio - Teses. 3. Linhas elétricas -
Teses. I. Guimarães, Geraldo Caixeta, 1954- II. Chaves, Marcelo Lynce
Ribeiro, 1951- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Aos meus pais, José e Laura, que sempre me apoiaram em minhas decisões, e à minha noiva, Kamilla Martins, pelo incentivo e carinho em todos os momentos, principalmente quando mais necessitei. Obrigado por tudo.

Resumo

O estudo das descargas atmosféricas bem como das tensões induzidas por elas é de grande importância para projeto de linhas de transmissão. Neste trabalho serão apresentados alguns problemas que o fenômeno pode causar nos sistemas elétricos, em função dos picos de tensão sentidos nos mesmos. Um estudo da caracterização da descarga atmosférica é feito de forma a se familiarizar com o fenômeno precursor das sobretensões induzidas em linhas.

A metodologia clássica, bem como uma nova proposta para estimativa da impedância de surto de torres é apresentada. Na técnica desenvolvida para determinação da impedância de surto é utilizado o Método de Elementos Finitos, implementando-se computacionalmente um modelo da torre de transmissão, fazendo com que o estudo seja simplificado.

Para o cálculo das sobretensões induzidas baseia-se na metodologia clássica desenvolvida por Sune Rusck, a qual é altamente conceituada e utilizada para este tipo de estudo. Com base na teoria de Rusck, um modelo computacional de tensão induzida em linhas de transmissão é implementado em ambiente EMTP/ATPDraw, que é um software livre de taxas e muito utilizado pelo setor elétrico para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia.

A partir do modelo desenvolvido, são obtidos resultados de tensões induzidas os quais são comparados com as medições realizadas por P. P. Barker, a fim de verificação, ajuste e validação do modelo desenvolvido. Além disso, são realizadas análises da propagação da tensão induzida pela linha de transmissão, bem como da influência de alguns parâmetros em sua amplitude e forma de onda.

Abstract

The study of lightning and the resulting induced voltages is very important in the process of designing of transmission lines. In this work it will be presented problems that can be caused by such phenomenon in electrical systems, as a consequence of these voltages peaks. A analysis of the characterization of atmospheric discharge is performed in order to understand causes of induced overvoltages in transmission lines.

Will be presented the classical methodology and a new proposal to estimate the tower surge impedance. In the new developed technique was used the finite element method, to obtain a computational model of the transmission tower, so as to simplify the studies.

For the calculation of induced overvoltages, it was used the classic methodology developed by Sune Rusck, which is highly regarded and used for such propose. Based on the Rusck 's theory, a computational model of induced voltages in transmission lines was implemented in EMTP/ATPDraw environment, which it is a software developed by Hermann W. Dommel, with great application in evaluation of electromagnetic transients in power systems.

From the model developed, results were obtained of induced voltages which are compared with measurements made by P. P. Barker, for checking and adjustment. Furthermore, propagation analysis of induced voltages on transmission lines were made, as well as the influence of some parameters in its amplitude and waveform.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves pela sabedoria e incentivo passados para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Roberto Camacho pelos sábios conselhos.

Aos amigos Afonso B. A. Junior, Elise Saraiva e Jan H. S. Ferraz por estarem sempre presentes quando necessitados.

Ao Prof. Luigi Vaufrete pela complementação da bibliografia [5] obtida no KTH – Royal Institute of Technology em Estocolmo, Suécia.

À Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia que forneceu todas as condições para o desenvolvimento deste trabalho.

E a todos que de maneira direta ou indireta colaboraram para concretização deste trabalho.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Distribuição de carga nas nuvens e solo.....	13
Figura 2.2 – Perfil de corrente de uma descarga descendente.....	15
Figura 2.3 – Forma de onda da corrente de retorno.....	17
Figura 2.4 – Forma de onda da corrente de retorno obtida a partir do método da dupla exponencial.....	20
Fig. 2.5 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas nuvem-solo para o estado de Minas Gerais. (a) Mapa do nível isoceráunico, (b) Mapa do N_g obtido com contadores de descargas e (c) mapa de densidade de <i>strokes</i> obtido por LLS.....	22
Figura 2.6 – Descarga atmosférica incidindo em uma torre.....	26
Figura 3.1 - Equações para estimação da impedância de surto de torres a partir dos modelos (a) cilíndrico e (b) cônico.....	35
Figura 3.2 – Aproximações para a impedância de surto das torres, adaptada de [25].....	35
Figura 3.3 – Torres de linhas de transmissão utilizadas nos modelos do FLUX3D, (a) Torre de uma LT de circuito simples, e (b) Torre de uma LT de circuito duplo.....	39
Figura 3.4 – Modelo cônico implementado no software FLUX3D.....	42
Figura 3.5- Variação da energia elétrica em torno da superfície do modelo.....	43
Figura 3.6 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.....	44

Figura 3.7 - Distribuição de energia armazenada no modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.....	45
Figura 3.8 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.....	46
Figura 3.9 - Distribuição de energia armazenada no modelo da torre da LT de circuito duplo no FLUX3D.....	46
Figura 3.10 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D para análise da variação da impedância de surto.....	48
Figura 3.11 - Modelo da torre da LT de circuito duplo no FLUX3D para análise da variação da impedância de surto.....	50
Figura 3.12 - Arranjo no EMTP/ATPDRAW do cabo para-raios e torres da linha de transmissão.....	51
Figura 3.13 – Corrente injetada na torre para medição da tensão.....	52
Figura 3.14 – Registro de tensão no ponto da torre em que o isolador da fase mais baixa se conecta, obtido por (a) medição e (b) por simulação no EMTP/ATPDRAW.....	53
Figura 3.15 - Sobretensões registradas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito simples.....	54
Figura 3.16 - Sobretensões registradas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito duplo.....	55
Figura 4.1 – Modelo para cálculo da tensão induzida em linhas de transmissão.....	60

Figura 4.2 – Orientação da linha em relação à descarga.....	64
Figura 4.3 – Modelo desenvolvido no EMTP/ATPDraw, (a) fonte de corrente que reproduz os efeitos da tensão induzida e, (b) sua janela de interação com o usuário.....	74
Figura 4.4 – Onda de tensão induzida produzida pelo modelo desenvolvido.....	77
Figura 5.1 – ConFiguração utilizada por Barker para medição de tensões induzidas.....	79
Figura 5.2 – Medições simultâneas de (a) corrente de retorno e (b) de tensão induzida na linha.....	79
Figura 5.3 – Ondas de tensão induzida resultantes de simulações com varias velocidades da onda de corrente.....	80
Figura 5.4 – Medições da (a) corrente de retorno, da (b) tensão induzida, e (c) respectivo resultado de simulação para um segundo caso de descarga atmosférica.....	81
Figura 5.5 – Medições da (a) corrente de retorno, da (b) tensão induzida, e (c) respectivo resultado de simulação para um terceiro caso de descarga atmosférica.....	82
Figura 5.6 – Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a corrente de retorno conforme as medições das Figuras 5.2, 5.4 e 5.5.....	83
Figura 5.7 - Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a altura da linha.....	84

Figura 5.8 - Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a distância entre a descarga e a linha.....	85
Figura 5.9 – Registros de tensões na linha de transmissão.....	87
Figura 5.10 – Registros de tensões na torre da linha de transmissão - corrente de retorno de 27 kA.....	88
Figura 5.11 – Registros de tensões na torre da linha de transmissão – Descarga a 110 metros de distância da linha.....	88
Figura 5.12 – Tensão no meio da linha trifásica modelada.....	90
Figura 5.13 – Tensão no meio da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada na fase A.....	90
Figura 5.14 – Tensão no meio da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.....	91
Figura 5.14 – Tensão no início da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.....	92
Figura 5.14 – Tensão no fim da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Qualidade de serviço de linhas de transmissão em função do número de desligamentos.....	27
Tabela 3.1 - Resultados de Energia armazenada e Impedância de Surto nas Três Partes da Torre da LT de Circuito Simples.....	49
Tabela 3.2 - Resultados de Impedância de Surto em Três Partes da Torre da LT de Circuito Duplo.....	50
Tabela 3.3 - Resultados de Sobretensão do Modelo no Software EMTP/ATPDRAW.....	55

Sumário

CAPITULO 1 - Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	1
1.3. Objetivos	6
1.4. Motivação.....	7
1.5. Estrutura da Redação.....	8
CAPITULO 2 - Caracterização das Descargas Atmosféricas e Seus Efeitos nas LT's	11
2.1. Considerações Iniciais.....	11
2.2. Formação de Cargas nas Nuvens	11
2.3. Tipos de Descargas Entre Nuvem e Solo	12
2.4. Formação da Descarga Atmosférica Descendente	14
2.5. Características da Corrente da Descarga	15
2.6. Densidade de Descargas Atmosféricas (Ng).....	19
2.7. Efeitos das Descargas Atmosféricas nas LT's	21
2.8. Elementos que Influenciam nos Estudos Computacionais.....	26
CAPITULO 3 - Cálculo da Impedância de Surto de Torres de LT's.....	30
3.1. Considerações Iniciais.....	30
3.2. Impedância de Surto de Torres de LT's	30
3.3. Metodologia Clássica para Estimação da Impedância de Surto de Torres.....	31
3.4. Método de Elementos Finitos.....	34
3.5. Modelos de Torres e Considerações Sobre o <i>Software</i> FLUX3D.....	36
3.6. Modelos das Torres no FLUX3D.....	39
3.7. Representações da Variação da Impedância de Surto das Torres	47
3.8. Análise dos Resultados de Impedância de Surto Utilizando o <i>Software</i> EMTP/ATPDRAW	50
CAPITULO 4 - Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas Indiretas	56
4.1. Considerações Iniciais.....	56
4.2. A Teoria de Rusck.....	56
4.3. O <i>Software</i> EMTP/ATPDraw.....	66
4.4. O Modelo Desenvolvido	70
CAPITULO 5 – Estudo de Casos Utilizando o Modelo Desenvolvido	77
5.1. Considerações Iniciais.....	77
5.2. Comparação Entre Resultados do Modelo Implementado e Medições.....	77

5.3. Estudo de Caso - Modelo de Linha de Transmissão Monofilar	84
5.4. Estudo de Caso - Modelo de Linha de Transmissão Trifásica	87
CAPITULO 6 – Conclusões.....	92
6.1. Conclusões	92
6.2. Propostas Para Trabalhos Futuros	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

CAPITULO 1 - Introdução

1.1. Considerações Iniciais

As descargas atmosféricas são fenômenos intrigantes, tanto por seu espetáculo luminoso, quanto por sua capacidade de destruição. A incidência de uma descarga atmosférica pode gerar vários efeitos, tais como: incêndios florestais, interrupção no fornecimento de energia, comprometer o funcionamento de equipamentos elétricos, e em casos mais raros causar a morte de pessoas.

Dentre os vários efeitos, esta dissertação irá estudar as sobretensões induzidas pelas descargas atmosféricas em linhas de transmissão (LT's), abordando alguns aspectos sobre este fenômeno.

Em análises de desempenho de LT's frente a descargas atmosféricas, é de extrema importância o estudo das sobretensões induzidas, devido a este ser um fenômeno que deve ser levado em conta na especificação da proteção dos sistemas elétricos, bem como dos equipamentos que o compõe.

Deste modo, serão estudadas nesta dissertação as descargas atmosféricas, o efeito das sobretensões induzidas, e modelos matemáticos e computacionais para verificação do efeito da tensão induzida nas linhas de transmissão.

1.2. Revisão Bibliográfica

O fenômeno das descargas atmosféricas bem como as tensões induzidas por elas é um assunto que atrai grande atenção da comunidade científica. Várias pesquisas foram realizadas ao longo do século XX, começo deste século e recentemente, com o avanço nas técnicas de medições de descargas atmosféricas, este assunto vem sendo frequentemente alvo de publicações científicas.

O primeiro grande trabalho sobre tensões induzidas em LT's foi realizado em 1908, por K. W. Wagner [1]. O modelo suposto considera que a tensão induzida na linha é dada pelo campo elétrico originado pelas cargas elétricas presentes na nuvem antes da descarga. Este modelo resultou em uma onda de tensão induzida com tempo de crista e tempo de cauda relativamente longos. Em 1929, Bewley [2] ajustou o modelo de Wagner, fazendo com que estes tempos aumentassem ainda mais.

A base dos modelos de hoje vem da publicação de Wagner e Mccann [3], no ano de 1942. Em sua proposta, a indução de tensão na linha é provocada principalmente pelo campo elétrico gerado no canal de descarga. Nesta abordagem é considerada uma corrente de retorno em forma de degrau, facilitando os cálculos dos valores de tensão induzida.

Em 1954, Golde [4] implementou no modelo de Wagner e Mccann, o decaimento exponencial da corrente de retorno ao longo do tempo, de forma a aproximar o modelo com as características reais do fenômeno.

Uns dos trabalhos com maior aceitação foi o publicado por Sune Rusck [5], em 1957. Baseado na teoria de Wagner e Mccann, Rusck além de considerar a indução devido às cargas no canal de descarga – como nos trabalhos anteriores, ele também levou em conta o fluxo da corrente de retorno pelo canal como componente colaboradora da indução de tensão nas LT's. Realizando algumas considerações e simplificações, como será visto no capítulo 4, Rusck obteve uma expressão simples, porém com resultados satisfatórios para o valor da tensão induzida. Tamanha é sua aceitação que até associações renomadas como o CIGRÉ e o IEEE adotam o método de Rusck para o cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas [6, 7, 8].

Apesar da grande aceitação, até hoje essa teoria é bastante criticada devido às simplificações realizadas, de modo que vários outros trabalhos surgiram

complementando o estudo de Rusck. Entretanto, por sua simplicidade e eficácia, na maioria dos casos não se faz necessário deixar de utilizar o método desenvolvido por Rusck, com exceção de casos particulares, onde se necessite de maiores detalhes do fenômeno. Casos em que se queira analisar a influência da impedância do solo, ou a descontinuidade da LT nas sobretensões induzidas, não se indica a utilização do modelo de Rusck.

Em 1983, Master e Uman [9] implementaram uma metodologia diferente daquela apresentada por Rusck, propondo que a segunda possuía erros conceituais. Entretanto, mais tarde esta contestação foi derrubada, e apesar das diferenças entre os dois métodos, cálculos numéricos comprovaram resultados praticamente idênticos entre eles [10].

Ao longo dos tempos, vários trabalhos baseados na teoria de Rusck foram apresentados [11 - 15]. Normalmente, são propostas mudanças sutis ou implementações utilizando-se métodos numéricos diferenciados. O uso de *software* para cálculo de transitórios eletromagnéticos e simuladores de sistemas elétricos, como programas da série EMTP, foi intensificado de modo a facilitar e otimizar a obtenção dos resultados.

Em 1990, Zeddani e Degauque apresentaram sua pesquisa [16], na qual se considerou a resistividade do solo para o cálculo do campo elétrico produzido por uma descarga atmosférica, implementando-a em ambiente computacional para otimização dos resultados. A partir deste campo se obtém a tensão induzida em um ponto da linha de transmissão.

Em 1992, Cooray publicou seu trabalho [17], no qual ele obteve a expressão para a impedância de superfície do solo, aplicando-a em seus modelos de descargas atmosféricas e verificando o desempenho das linhas de transmissão.

De forma semelhante Zeddani e Degauque, em 1996, Rubinstein [18] implementou computacionalmente o cálculo do campo elétrico de uma descarga,

utilizando a expressão de Cooray para a impedância do solo [17], dando origem a fórmula Cooray-Rubinstein, frequentemente utilizada em cálculos de tensões induzidas em linhas de transmissão. Seu modelo é bastante otimizado, ao passo que esforços computacionais são reduzidos significativamente, se comparado com o modelo de Zeddám e Degauque.

O modelo de Nucci [19, 20] foi desenvolvido com base nas equações eletromagnéticas de Maxwell. Entretanto, para resolução e simplificação das equações resultantes, aplicou-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) ou Método das Diferenças Finitas (MDF), resultando em um equacionamento linearizado do problema.

Recentemente outros trabalhos baseados no MEF foram realizados com resultados satisfatórios [21, 22, 23]. Sua metodologia basicamente é composta pela resolução direta das equações de Maxwell utilizando o MEF. Apesar de não se realizar aproximações na resolução por este método, o esforço computacional exigido na resolução do problema é geralmente bastante elevado em comparação com outros métodos.

O MEF também foi utilizado para cálculo de um parâmetro em especial: a impedância de surto das torres de LT's. Neste trabalho foi proposto uma metodologia baseada na energia elétrica armazenada nas regiões dielétricas próximas a torre, ao passo que a metodologia clássica para tal cálculo utiliza expressões obtidas a partir de modelos geométricos simplificados [25, 26, 27]. Por sua influência na amplitude da tensão induzida, este parâmetro terá abordagem especial no capítulo 3 desta dissertação.

Com o tempo, a tecnologia de medição de descargas atmosféricas foi se aprimorando, e com isto surgiram pesquisas com dados reais, obtidos a partir de medições. Neste contexto, um dos principais trabalhos foi o de Yokoyama [28],

que realizou inúmeros registros simultâneos de descargas atmosféricas e tensões induzidas por elas, em linhas de distribuição do Japão, durante a década de 80.

Em 1996, Barker apresentou seu trabalho sobre medições de tensões induzidas por descargas artificiais [24]. Com um sistema composto por uma rede de distribuição monofásica e foguetes adaptados para provocar descargas atmosféricas nas proximidades desta rede, ele registrou dentre vários parâmetros, as tensões induzidas na linha.

Neste sentido, originaram-se outras pesquisas comparando-se medições e métodos matemáticos [11, 12, 29, 30, 31, 32], com finalidade de validação de tais metodologias.

Apesar de ótimos resultados de parâmetros sobre as tensões induzidas, o método de medições, seja por descargas naturais, ou por descargas artificiais, se torna inviável ao passo que as técnicas e equipamentos necessários para sua realização são normalmente de preços elevados. Além disto, deve-se dispor de uma linha de distribuição ou transmissão para realização das medições.

Deste modo, outra linha de pesquisa adotada foi a de obtenção dos resultados utilizando-se modelos reduzidos. A partir de 1991, trabalhos realizados no Brasil por Piantini [30] apresentaram medições obtidas a partir de modelos reduzidos. Paralelamente a elas, desenvolveram-se modelos matemáticos aliados aos sistemas de proteção, a fim de se comparar medições com o modelo implementado. Além disso, foram verificados os índices de qualidade na continuidade do suprimento de energia elétrica, bem como as influências de parâmetros das tensões induzidas nos resultados.

Vários outros trabalhos utilizando resultados de modelos em escala reduzida foram publicados [11, 12, 31, 32]. Basicamente, estas metodologias compararam medições dos parâmetros da tensão induzida com valores numéricos obtidos da aplicação teoria de Rusck e suas variações.

Uma importante complementação do trabalho de Rusck foi publicada em 1994 por Paulino [33]. A metodologia desenvolvida se baseou na teoria de Rusck acrescentando os efeitos de linhas de transmissão com descontinuidades.

Inúmeras pesquisas a cerca das tensões induzidas por descargas atmosféricas vem sendo desenvolvidas. Isso se deve ao fato deste assunto ser de grande importância para os sistemas elétricos, além de não se haver uma metodologia totalmente aceita para seu cálculo. Desta forma esta dissertação irá basear-se na teoria de Rusck, implementada no *software* EMTP/ATPDraw, para verificação da variação de alguns parâmetros do fenômeno, bem como a análise da propagação da onda de tensão pela linha de transmissão.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo, no *software* EMTP/ATPDraw, para representação das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas. Em função disto, originam-se objetivos secundários, mas não menos importantes, quais sejam:

- Apresentação dos conceitos sobre a formação e caracterização das descargas atmosféricas;
- Estudo do Método de Elementos Finitos (MEF) e sua aplicação no *software* FLUX3D em estudos eletrostáticos;
- Análise da impedância de surto das torres de LT's;
- Conhecimento da ferramenta EMTP/ATPDraw e de sua sub-rotina MODELS;
- Verificação da propagação da onda de tensão induzida em uma linha de transmissão;
- Análise da influência de alguns parâmetros nas sobretensões induzidas;

Assim, alcançado tais objetivos, pretende-se agregar valor científico ao trabalho no que tange a área de compatibilidade eletromagnética em linhas de transmissões envolvendo descargas atmosféricas.

1.4. Motivação

O estudo das descargas atmosféricas e seus efeitos na rede elétrica são de grande importância para a proteção dos equipamentos elétricos. Este fenômeno pode trazer vários prejuízos, seja diretamente com danos a equipamentos e materiais elétricos ou, indiretamente, em função de uma simples parada no fornecimento de energia.

Apesar de resultar efeitos mais brandos se comparado com sua incidência direta, as descargas que incidem nas proximidades das linhas são as mais sentidas nos sistemas de energia. Isto acontece devido ao fato das descargas indiretas ocorrem com maior frequência. Além disso, as sobretensões induzidas por tais descargas podem alcançar amplitudes elevadas, o que exige cada vez mais atenção para este fenômeno.

Em subestações, por exemplo, uma descarga pode resultar em prejuízo milionário. Equipamentos de alta tensão, como os transformadores de alta potência, chaves seccionadoras, disjuntores, possuem custos elevados, de forma que danos causados em sua isolação podem deixá-los totalmente inoperantes. Para se ter uma ideia, em transformadores de distribuição da CEMIG, em torno de 47% das falhas são provenientes de descargas atmosféricas [32].

Além disso, defeitos em equipamentos importantes da rede básica, levam a parada do sistema, que em casos de cortes prolongados no suprimento da energia de plantas industriais significam a parada da produção e, deste modo, mais prejuízos.

Os desligamentos não programados em redes de distribuição e redes de transmissão até 69 kV tem como principal causa as descargas indiretas [34].

Paradas não programadas em plantas de mineração, por exemplo, podem causar milhões em prejuízos. A produção de uma planta média pode chegar a 2500 toneladas por hora. Com o preço da tonelada de minério girando em torno de US\$200,00 (preço cotado em dezembro de 2010), uma parada do sistema de 5 horas resultaria em um prejuízo imediato de US\$2.500.000,00. Além disso, existem equipamentos que trabalham com o minério em sua forma líquida, em altas temperaturas, de forma que uma parada prolongada pode levar a uma solidificação desta matéria prima dentro do equipamento, comprometendo seu funcionamento e assim exigindo mais tempo para sua manutenção.

Para se evitar tais transtornos, deve-se projetar um sistema de proteção robusto e eficaz, considerando todas as possibilidades de falhas, dentre elas as sobretensões induzidas.

Deste modo, as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas devem ser analisadas, sendo seu estudo de suma importância para dimensionamento correto de sistemas de proteção da rede elétrica.

1.5. Estrutura da Redação

As descargas atmosféricas, bem como um dos seus efeitos nas linhas de transmissão, as sobretensões induzidas, são discutidas em seis capítulos nesta dissertação, abordando alguns aspectos do assunto, os quais foram distribuídos da seguinte forma:

- Capítulo 1, INTRODUÇÃO. Neste capítulo é apresentado o tema em si, bem como alguns conceitos, efeitos e aspectos sobre as descargas atmosféricas e as sobretensões induzidas. A motivação é exposta de forma a justificar o desenvolvimento deste trabalho. A revisão bibliográfica oferece alguns dos trabalhos existentes sobre o tema, abrangendo nomes e literatura importante nesta área. O objetivo visa mostrar alguns dos pontos

que a dissertação tenta alcançar, com finalidade de contribuição científica para o tema apresentado;

- Capítulo 2, CARACTERIZAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SEUS EFEITOS NAS LT'S. Este capítulo aborda os conceitos sobre a formação e caracterização das descargas atmosféricas, no sentido de apresentar as variáveis matemáticas e físicas existentes com intuito de embasar os modelos computacionais da descarga atmosférica. Este capítulo também apresenta alguns dos efeitos sentidos nas linhas de transmissão causados pelo fenômeno.
- Capítulo 3, CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE LT'S. Este capítulo dará atenção a um parâmetro às vezes desprezado no estudo do desempenho de linhas de transmissão. Metodologias existentes para a estimação deste parâmetro são apresentadas, além do desenvolvimento um método para encontrar o seu valor. Em parte desta técnica utiliza o MEF – Método de Elementos Finitos, para, além de facilitar os cálculos, tentar se estimar um valor próximo da realidade para casos específicos.
- Capítulo 4, SOBRETENSÕES DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS. Este capítulo aborda a conceitualização sobre as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas. A metodologia clássica desenvolvida por Sune Rusck é apresentada, além da implementação da mesma no programa computacional EMTP/ATPDraw.
- Capítulo 5, ESTUDO DE CASOS UTILIZANDO O MODELO DESENVOLVIDO. Os resultados obtidos a partir da utilização do modelo desenvolvido são apresentados neste capítulo. Para isto foi

modelado um caso de sistema elétrico, e simulado algumas situações para verificação dos efeitos das sobretensões induzidas. Também foi verificado nos resultados de sobretensões as influências que alguns parâmetros envolvidos no fenômeno venham a oferecer.

- Capítulo 6, CONCLUSÕES. Este capítulo destaca os pontos principais da dissertação, bem como a análise dos resultados obtidos. Também são abordadas características para aprimoramento do modelo desenvolvido para implementação futura, como propostas de continuidade do trabalho.
- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. As referências bibliográficas apresentam todos os trabalhos que forneceram subsídio para formulação desta dissertação.

Todos estes aspectos sobre as descargas atmosféricas e as sobretensões induzidas por elas, serão abordados nos capítulos seguintes, de forma a alcançar os objetivos propostos.

CAPITULO 2 - Caracterização das Descargas Atmosféricas e Seus Efeitos nas LT's

2.1. Considerações Iniciais

A avaliação da tensão induzida nas linhas de transmissão é totalmente dependente da incidência de descargas atmosféricas nas proximidades das mesmas. Sendo assim, é importante a compreensão deste fenômeno no que diz respeito à sua formação, propagação e probabilidades de ocorrência, bem como suas características físicas e elétricas. Neste capítulo serão abordados tais aspectos de modo a tornar claro o fenômeno em evidência.

2.2. Formação de Cargas nas Nuvens

As descargas atmosféricas são originadas pelo acúmulo de cargas elétricas nas nuvens. As cargas são formadas pela ação do vento, de modo que seu movimento ascendente proporciona o transporte de cargas positivas para a parte superior da nuvem, e o deslocamento de cargas negativas para a base da mesma. Deste modo, as cargas negativas na base da nuvem induzem o acúmulo de cargas positivas na superfície do solo, o que provoca uma diferença de potencial entre nuvem e solo, Surgindo-se uma diferença de potencial entre nuvem e solo que cria condições propícias à formação da descarga atmosférica.

Ainda é possível o deslocamento de cargas positivas para a base da nuvem e de cargas negativas para seu topo, dependendo isto do sentido do vento e do formato da nuvem. Esta ocorrência possibilita o fenômeno de descargas entre nuvens. No entanto esta situação é pouco frequente se comparado com a situação primeiramente descrita.

A Figura 2.1 mostra a distribuição de cargas mais comum que ocorre no sistema nuvem-solo.

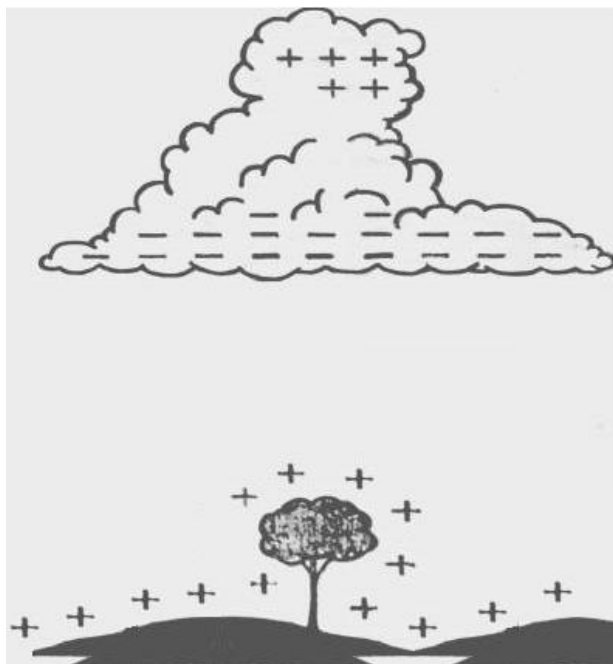


Figura 2.1 - Distribuição de carga nas nuvens e solo

2.3. Tipos de Descargas Entre Nuvem e Solo

Apesar da grande quantidade de descargas que incidem no solo, seu número é pequeno se comparado com o número de descargas ocorrentes entre duas nuvens ou dentro de uma mesma nuvem. Segundo o estudo de Prentice e MacKerras [4] a relação entre estas duas grandezas é dada por:

$$\frac{D_c}{D_g} = 4,11 + 2,11 \cdot \cos(3 \cdot LAT), 0 \leq LAT \leq 60^\circ \quad (2.1)$$

Sendo:

D_c - quantidade de descargas entre nuvens;

D_g - quantidade de descargas entre nuvem e solo;

LAT – latitude (Graus).

Nota-se a influência da latitude do local analisado, sendo que próximo aos trópicos o número de descargas entre nuvem e solo é menor se comparado com esse mesmo número nas proximidades das regiões polares.

As descargas atmosféricas também são classificadas de acordo com seu sentido de propagação e com a polaridade das cargas da nuvem [4, 11, 12, 13, 14, 15]. Com base nisto, as descargas podem ser classificadas em quatro grupos, quais sejam:

- Descendentes positivas, as quais se caracterizam por uma descarga que se forma a partir das cargas positivas da nuvem seguindo em direção do solo;
- Descendentes negativas, as quais se caracterizam por uma descarga que se forma a partir das cargas negativas da nuvem seguindo em direção do solo. Neste tipo o solo passa a apresentar cargas positivas em sua superfície;
- Ascendentes positivas, caracterizadas por descargas que se formam a partir das cargas negativas do solo em direção às cargas positivas da nuvem;
- Ascendentes negativas, caracterizadas por descargas que se formam a partir das cargas positivas do solo em direção às cargas negativas da nuvem. Neste tipo o solo passa a apresentar cargas positivas em sua superfície.

Comumente as descargas descendentes incidem em estruturas mais baixas, com algumas dezenas de metros (como linhas de transmissão), enquanto descargas ascendentes estão associadas a estruturas muito altas. Sabe-se também que, por meio dos vários registros de medições, cerca de 90% das descargas são negativas [36], e que a maior parte que ocorre entre nuvem e solo é do tipo descendente, sendo deste modo a descarga descendente negativa a mais comum. Em vista disto, este tipo de descarga terá maior atenção neste trabalho.

2.4. Formação da Descarga Atmosférica Descendente

O estudo em questão irá considerar somente as descargas descendentes negativas, por serem estas as descargas que ocorrem com maior frequência, como dito anteriormente. Este tipo de descarga será utilizado para estudo das sobretensões induzidas nas linhas de transmissão.

A descarga atmosférica se forma a partir do momento em que o campo elétrico provocado pelas cargas da nuvem se eleva e rompe a rigidez dielétrica do ar, a qual pode variar de 1 a 3 MV/m dependendo das condições do ambiente, como umidade e poluição do ar [37]. Deste modo é formado um canal condutor ionizado chamado de canal de descarga. Uma vez formado, o canal de descarga é o caminho de uma intensa corrente, nomeada corrente de retorno, a qual assume valores em média de 30 kA, mas podendo chegar a 300kA.

Após o término da corrente de retorno, podem acontecer impulsos subsequentes, de menores intensidades, pelo canal ainda ionizado [38]. A Figura 2.2 mostra o perfil de corrente de uma descarga atmosférica.

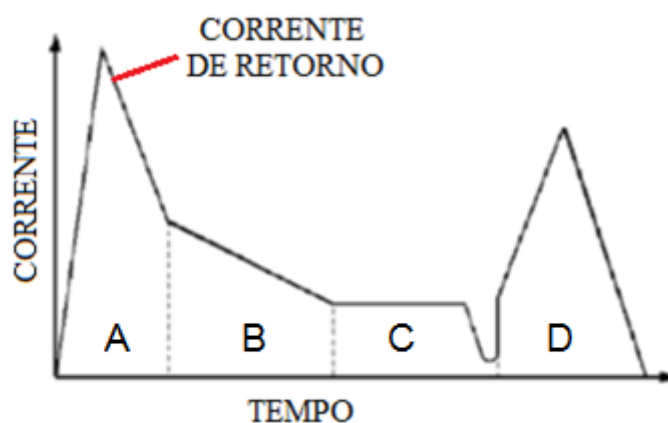


Figura 2.2 – Perfil de corrente de uma descarga descendente

Por se caracterizar com uma maior intensidade e menor duração, a corrente de retorno (etapa A) terá maior enfoque no estudo.

2.5. Características da Corrente da Descarga

A corrente de descarga é utilizada na análise do desempenho de linhas de transmissão e equipamentos elétricos que são afetados pelas descargas atmosféricas. Utiliza-se parâmetros para caracterização da corrente de descarga, tais quais: Valor de pico[kA]; tempo de frente de onda [μ s]; tempo de meia onda [μ s]; taxa de variação da corrente em relação ao tempo [kA/ μ s]; forma de onda; e polaridade (positiva ou negativa).

Por serem grandezas muito pequenas (μ s) ou muito grandes (kA), o conhecimento destes parâmetros é feito através de sofisticados sistemas de detecção de descargas atmosféricas, os quais se baseiam ou nos campos eletromagnéticos ou na luminosidade advindos dessas descargas.

2.5.1. Valor de pico (I_o)

O valor de pico, dado em kA, normalmente acontece no primeiro impulso, ou primeira corrente de retorno, como mostrado na Figura 2.2, sendo que os surtos subsequentes possuem amplitudes menores. Em média a primeira corrente de retorno toma valores médios de 30 a 50 kA, podendo chegar a 300 kA [34]. O valor de pico ocorre em torno de 1,2 μ s após o início da corrente de retorno, valor de tempo normalizado pelo IEEE para descargas atmosféricas [7, 8].

2.5.2. Forma de onda da corrente de retorno

A forma de onda da corrente é outro parâmetro importante a ser observado. A partir dela pode-se determinar vários parâmetros, além de se verificar a característica da corrente por todo o tempo em que a descarga ocorre.

Recentemente foram adotados novos parâmetros para se descrever melhor a forma de onda da corrente de retorno. A Figura 2.3, adaptada de [35], mostra tais parâmetros.

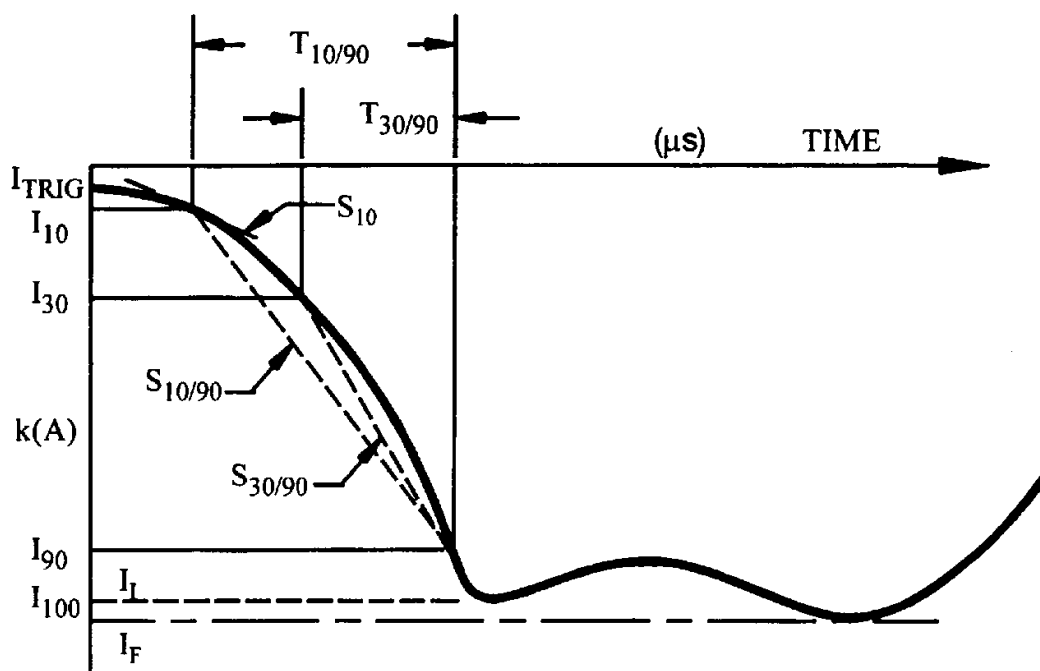


Figura 2.3 – Forma de onda da corrente de retorno.

Onde:

I_I - primeiro pico da corrente de descarga;

I_F - segundo pico da corrente de descarga;

I_{100} - maior valor entre I_I e I_F ;

I_{10} –Corrente a 10% da forma de onda;

I_{30} –Corrente a 30% da forma de onda;

I_{90} –Corrente a 90% da forma de onda;

$T_{10/90}$ –Tempo entre I_{10} e I_{90} ;

$T_{30/90}$ –Tempo entre I_{30} e I_{90} ;

S_{10} – Taxa instantânea do crescimento da corrente em I_{10} ;

$S_{10/90}$ –Inclinação da reta obtida através de I_{10} e I_{90} ;

$S_{30/90}$ - Inclinação da reta obtida através de I_{30} e I_{90} ;

2.5.3. Tempo de frente de onda ou tempo de crista (tcr)

Intervalo de tempo entre o início da corrente de retorno e o seu pico, dado em microssegundos;

2.5.4. Tempo de meia onda ou tempo de cauda(tcl)

Intervalo de tempo entre o início da descarga e o ponto da cauda em que a amplitude cai a 50% do valor máximo, dado em microssegundos;

2.5.5. Taxa de variação da corrente em relação ao tempo [kA/μs]

Este parâmetro é dado pela derivada, no tempo, da onda da corrente de descarga em um ponto de interesse da mesma. Deste modo é possível avaliar o quão intensa é a descarga em análise, além de se ter uma melhor caracterização do surto de corrente.

2.5.6. Modelo Matemático da forma de onda da corrente de retorno

As simulações e verificação de resultados se relacionam diretamente com a representação computacional da forma de onda da corrente de retorno. Deste modo é importante a escolha de um modelo matemático fiel à forma de onda real, para que os resultados aqui obtidos sejam os mais fidedignos possíveis.

Apesar de existir vários modelos para a representação da corrente de descarga, a seguir serão apresentados aqueles considerados de maior expressão.

- Modelo de “Dupla Exponencial” [47]: Este modelo faz uso de funções exponenciais combinadas a outras variáveis para se chegar à forma de onda esperada, como mostra a equação 2.2.

$$I_{desc} = k * I_0 * (e^{-\alpha.t} - e^{-\beta.t}), \text{ para } t \geq 0 \quad (2.2)$$

Onde:

$$\alpha = \ln(2)/(t_{cr} - t_{cl})$$

$$\beta = \ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)/t_{cr} + \alpha$$

I_0 é amplitude da corrente de retorno;

$$k = I_0/(e^{\alpha.t_{cr}} - e^{\beta.t_{cr}})$$

α e β são parâmetros que dependem das variáveis de tempo da corrente de retorno.

k é um fator de correção da amplitude da corrente;

Como pode ser visto a obtenção dos parâmetros α e β não é espontânea, podendo estes serem obtidos através do método da região de confiança.

➤ Formulação proposta por JONE [48]:

$$\begin{cases} I_{desc} = k * I_0 * \left(e^{\alpha.t'} - (e^{\beta.t'})^2 \right), \text{ para } t \geq 0 \\ t' = t + \frac{\beta^{-2}}{\alpha} \end{cases} \quad (2.3)$$

➤ Gardner [49] propôs a seguinte formulação:

$$\begin{cases} I_{desc} = k * I_0 * \left(e^{\alpha.t'} - e^{\beta.t'} \right)^{-1}, \text{ para } t \geq 0 \\ t' = t - \alpha^{-1} \end{cases} \quad (2.4)$$

➤ F. Heidler apresentou a formulação a seguir [50]:

$$\begin{cases} I_{desc} = k * I_0 * \frac{(\alpha.t)^n}{1+(\alpha.t)^n} * e^{\beta.t}, \text{ para } t \geq 0 \\ n = \frac{1}{e^{-\frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{n.\alpha}{\beta} \right)^{1/n}}} \end{cases} \quad (2.5)$$

Devido à facilidade de diferenciação e integração no tempo, e também pela facilidade de implementação computacional, optou-se por se utilizar o método da dupla exponencial na representação da corrente de retorno. Além disso, esta é a formulação utilizada nos tradicionais geradores de impulsos em laboratórios.

A Figura 2.4 mostra a forma de onda da corrente de uma descarga do tipo 1,2 x 50us, ou seja, com valor de crista após 1,2 us do início do impulso e com valor da metade do valor de crista em 50 us, utilizando-se o método da dupla exponencial no *software* EMTP/ATPDraw.

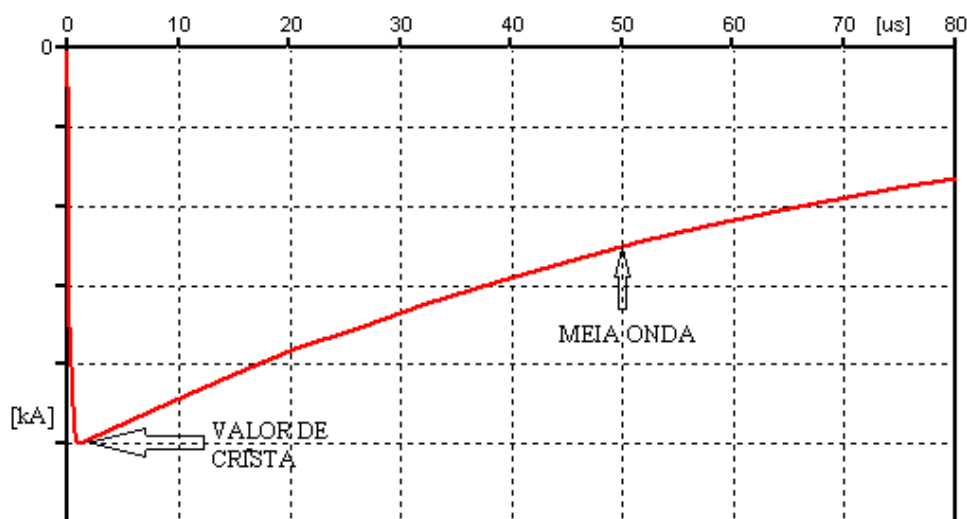


Figura 2.4 – Forma de onda da corrente de retorno obtida a partir do método da dupla exponencial.

Comparando-se as Figuras 2.3 e 2.4, observa-se que as formas de ondas nas duas Figuras se assemelham, verificando-se assim que o método da dupla exponencial implementado no EMTP/ATPDraw traz resultados satisfatórios.

2.6. Densidade de Descargas Atmosféricas (Ng)

A densidade de descargas para o solo é o nível de incidência de descargas atmosféricas em um dado local por unidade de tempo, ou seja, é o número de descargas nuvem-solo registrado anualmente em certa região, representado pela equação 2.6.

$$N_g = \frac{\text{número de descargas}}{\text{km}^2 \cdot \text{ano}} \quad (2.6)$$

Este parâmetro é de grande importância em projetos de proteção de sistemas elétricos contra descargas atmosféricas. A partir da densidade de descargas de um determinado local é possível se estimar a frequência com que o sistema de proteção e isolamento, por exemplo, de uma linha de transmissão será exigido.

A medição do chamado “ N_g de um local” pode ser feita de três formas: a partir do nível cerâmico; a partir de uma rede de contadores de descargas ou através dos dados providos por sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas (LLS).

- O nível cerâmico consiste na contagem dos “dias de trovoadas por ano”, que registra o número de dias no ano em que foi ouvido o trovão de ao menos uma descarga. Apesar de rústico, este método é uma alternativa em locais onde não se dispõe de outros métodos. A densidade de descargas é obtida, pelo nível cerâmico, através de fórmula empírica, cujas constantes variam de região para região [35].
- Os contadores de descargas resultam em um valor direto para a densidade de descargas, uma vez que este método de medição consiste na detecção, e conseqüentemente na contagem, das descargas atmosféricas através da variação do campo elétrico provocado pelas mesmas.
- Os sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas consistem em uma rede de sensores espaçados entre si de 200 a 400 km os quais captam o sinal do campo eletromagnético irradiado pela descarga atmosférica, indicando a localização da descarga (latitude e longitude), tempo de ocorrência e estimativa da amplitude da corrente, entre outros parâmetros [39]. Pela variedade e qualidade de dados, e pela possibilidade de se abrangerem uma maior área com custos relativamente menores, este método é o mais utilizado na atualidade.

A Figura 2.5 mostra mapas de densidade de descargas atmosféricas para o estado de Minas Gerais, utilizando os três métodos de medição deste parâmetro.

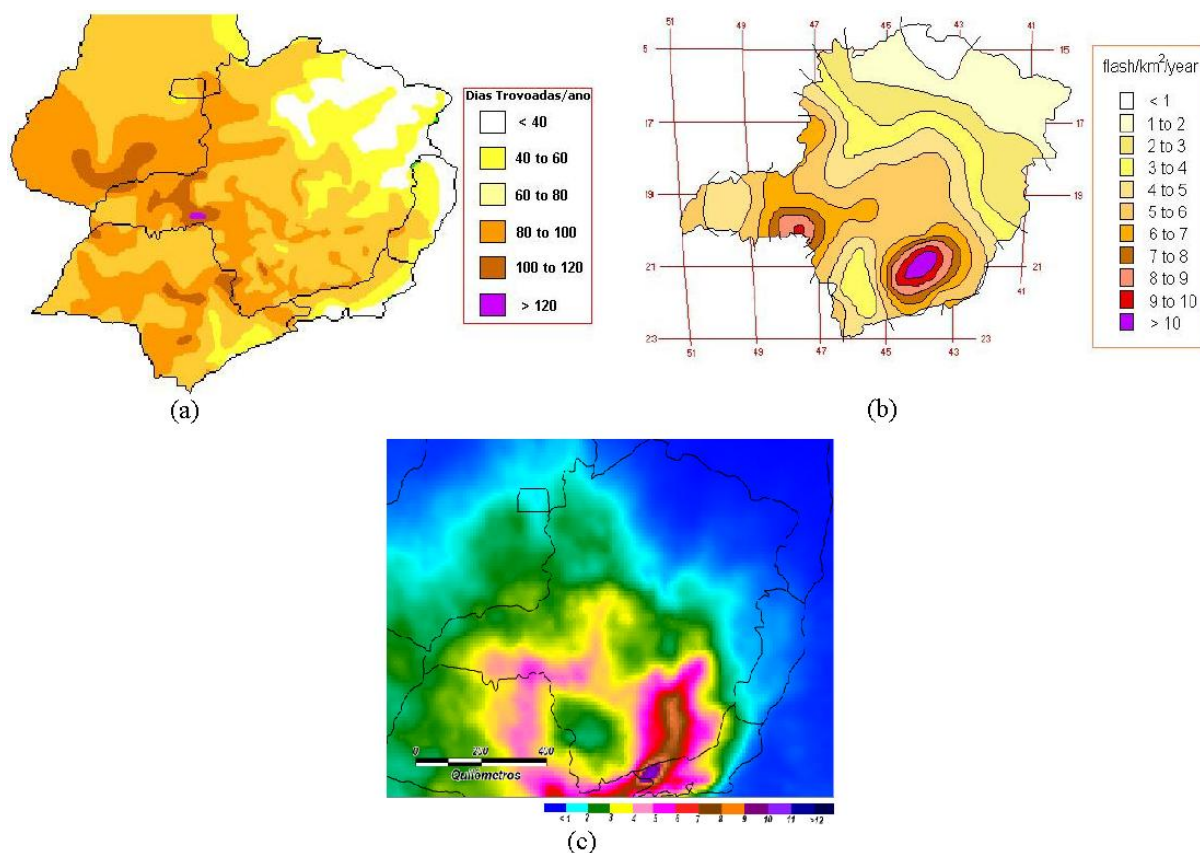


Fig. 2.5 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas nuvem-solo para o estado de Minas Gerais. (a) Mapa do nível isoceráunico, (b) Mapa do N_g obtido com contadores de descargas e (c) mapa de densidade de *strokes* obtido por LLS [34].

2.7. Efeitos das Descargas Atmosféricas nas LT's

As descargas atmosféricas entre nuvem e solo, tipicamente, influenciam diretamente na escolha do isolamento dos equipamentos de média e alta tensão. Mesmo com efeitos mais brandos para níveis de tensão maiores, as descargas atmosféricas devem ser levadas em conta.

O estudo das descargas atmosféricas é de grande importância já que as mesmas são a causa da maior parte dos curtos-circuitos e interrupções não programadas do suprimento de energia elétrica tanto em linhas de distribuição quanto em linhas de transmissão [34]. Este problema é mais sentido em algumas regiões,

sendo necessária uma maior atenção na escolha da proteção e isolamento dos equipamentos. Isto acontece devido à densidade de descargas variar de acordo com o local, tomando valores mais elevados em regiões tropicais [34]. O Brasil, por abranger um extenso território, possui grandes variações da densidade de descargas, sendo que em alguns locais este parâmetro toma valores relativamente elevados, levando uma maior preocupação com o fenômeno.

Os efeitos das descargas atmosféricas são sentidos em todo o mundo, havendo vários estudos sobre este assunto. Por exemplo, na Austrália foi registrado que até 60% dos desligamentos não programados são devido a descargas atmosféricas [40, 41]. Em regiões da Suíça, com densidade de descargas em torno de 14 descargas/km²/ano, foi observado que em linhas de 66 e 132 kV, cerca de 40% dos desligamentos não programados são causados por descargas atmosféricas [42]. No Brasil, como já dito, estes níveis diferem para cada região. Para se ter uma ideia, no estado de Minas Gerais a densidade de descargas varia entre 1 e 10 descargas/km²/ano, com 70% dos desligamentos não programados de linhas de transmissão causados por descargas atmosféricas [43].

Em razão dos prejuízos que uma descarga atmosférica pode trazer, interrompendo o fornecimento de energia, ou danificando equipamentos, deve-se procurar caminhos para que estes efeitos sejam minimizados. Deve-se lembrar que o principal efeito observado quando descargas atmosféricas incidem diretamente na linha ou próximo a elas são as sobretensões transitórias que surgem nos cabos fase e no cabo para-raios. Visto estes aspectos, algumas técnicas são utilizadas, tais como: emprego de sistemas com neutro isolado, redução da resistência de aterramento, o uso de bobinas de Petersen entre os pontos de neutro do sistema e o seu aterramento, o emprego de religadores automáticos, a inserção de para-raios, aumento do NBI das estruturas, os próprios cabos-guarda existentes nas linhas de transmissão, etc.

Em linhas de transmissão, os cabos para-raios têm papel importante na proteção contra as descargas atmosféricas. Caso seja bem projetada, este tipo de proteção impede que descargas atmosféricas incidam diretamente nos cabos fase, evitando maiores danos. No entanto, ainda é possível a incidência da descarga nos cabos fase, e até a ocorrência de um “*flashover*” do cabo para-raios para o cabo fase, quando da incidência da descarga no primeiro cabo. Neste caso outra proteção também é utilizada, os para-raios, os quais são ligados em derivação entre fase e terra, a fim de limitar as amplitudes das sobretensões nos pontos de sua instalação.

No estudo do desempenho das linhas de transmissão, as descargas atmosféricas são classificadas em dois tipos: Descargas diretas e descargas indiretas.

As descargas diretas são aquelas que incidem diretamente nos cabos – cabos fase ou cabo para-raios; ou diretamente em uma torre da linha.

As descargas indiretas são aquelas que incidem em um ponto próximo da linha, seja no solo próximo ou em estruturas e vegetações próximas á linha, fazendo com que a sobretensão notada nos cabos seja somente aquelas causadas pelo fenômeno de indução eletromagnética nos mesmos.

A incidência direta da descarga atmosférica produz uma sobretensão com intensidade dependente de vários fatores tais como: a impedância de surto dos condutores, a geometria da linha, a intensidade da corrente de descarga, a taxa de crescimento desta corrente, o ponto de incidência da descarga, da impedância de surto da torre, etc. Caso a sobretensão gerada ultrapasse o nível básico de isolamento da linha (NBI), certamente haverá um “*flashover*” e esta será desligada. Mesmo que a descarga atinja o cabo para-raios ou a própria torre, sobretensões serão notadas nos cabos fase, devido ao acoplamento existente entre estes condutores.

As sobretensões produzidas entre cabo fase e a torre normalmente provocam um arco elétrico, neste caso chamado de “*backflashover*”, que produz um curto-circuito culminando na atuação do sistema de proteção e assim a retirada da linha. Religadores são acionados para que a linha não continue desligada, evitando maiores transtornos. A Figura 2.6 mostra um “*backflashover*” provocado pela incidência direta de uma descarga atmosférica na linha de transmissão.



Figura 2.6 – Descarga atmosférica incidindo em uma torre [34].

Quando a descarga incide nas proximidades da linha de transmissão, é possível ocorrer consequências significativas na linha. Apesar de não atingir a linha de transmissão, este tipo de descarga provoca sobretensões nos cabos (tanto no cabo fase quanto no cabo guarda), que dependendo de suas amplitudes, pode implicar no desligamento da linha de transmissão. Curtos-circuitos podem ocorrer fazendo com que a proteção de sobrecorrente atue, ou a própria sobretensão induzida pode acionar a proteção deste tipo de anormalidade, provocando assim o desligamento da linha de transmissão.

A Tabela 2.1 mostra as classificações quanto à qualidade do fornecimento de energia em função do número de desligamentos em uma linha de transmissão [44].

Tabela 2.1 - Qualidade de serviço de linhas de transmissão em função do número de desligamentos.

Qualidade de Serviço	Desligamentos/100km/ano
Muito boa	$\leq 0,1$
Boa	0,1 a 1,0
Média	1 a 5
Má	≥ 5

Nota-se que para pelo menos um bom serviço de suprimento de energia, uma linha menor que 100 km não pode sofrer mais que um desligamento por ano.

As descargas indiretas são o principal motivo de desligamentos em redes de distribuição e redes de transmissão até 69 kV [34], sendo que para tensões maiores os efeitos são menos sentidos.

Ressalta-se ainda que para linhas de distribuição em media tensão (até 35kV), é importante se conhecer o material utilizado nas torres. No caso de torres compostas por postes metálicos ou de concreto, o nível de isolação é ainda menor, fazendo com que nestes casos a sobretensão necessária para ocorrência de um curto-circuito seja menor. Deste modo é recomendada a utilização de proteção composta de para-raios em pontos críticos, como em locais próximos a transformadores, ou em regiões com alta densidade de descargas.

A impedância de aterramento elevada ou condições ambientais desfavoráveis também proporcionam situações em que as sobretensões possam causar

problemas com maior frequência. Ambientes poluídos, ou isoladores sujos ou com rachaduras diminuem significativamente o nível de isolamento das linhas de transmissão.

Outro efeito grave que sobretensões podem provocar é a destruição do isolamento de um equipamento. Sobretensões elevadas, por exemplo, no interior de um transformador podem provocar um curto-circuito entre as bobinas do mesmo, danificando seus enrolamentos e também seu isolamento interno. Visto o grande custo de equipamentos que compõem sistemas de nível de tensão elevado, é de grande interesse se evitar este tipo de problema.

Uma solução bastante utilizada é a instalação de para-raios, dimensionados corretamente, entre fase e terra nas proximidades dos equipamentos. Caso a onda de sobretensão a caminho do equipamento seja incompatível com seu nível de isolamento, o para-raios limitará esta sobretensão, passando a conduzir a energia excedente diretamente para a terra. Deste modo o equipamento não deixará de operar, e o mais importante, ele não sofrerá danos internos.

Utilizam-se também os para-raios, principalmente nas linhas de transmissão em alta tensão, no sentido de se ter um sistema mais robusto. Os mesmos podem ser instalados nas linhas para, juntamente com o cabo-guarda, tornar o sistema mais confiável.

2.8. Elementos que Influenciam nos Estudos Computacionais

Para o cálculo de todas essas sobretensões e a análise de seus efeitos na rede de transmissão utilizando-se recurso computacional, é importante a modelagem apropriada dos elementos que compõem os sistemas de energia elétrica.

Estes elementos influenciam tanto na propagação de campos eletromagnéticos quanto nas análises típicas das redes elétricas. Como equipamentos que influenciam nos estudos computacionais citam-se: cabos aéreos (modelos de linhas de transmissão), elementos metálicos das torres, cabos de estais,

componentes de sistemas de aterramento, elementos representativos do canal da descarga atmosférica, transformadores, reatores, elementos RLC, para-raios, chaves, etc.

Várias metodologias de cálculo de sobretensões induzidas foram desenvolvidas, as quais utilizam técnicas no domínio do tempo, no domínio da frequência e aquelas que utilizam métodos híbridos, unindo cálculos no domínio do tempo e frequência para obtenção de resultados.

A utilização de cada um destes domínios traz vantagens e desvantagens e podem melhor se aplicar em situações específicas.

Software que empregam o domínio do tempo normalmente necessitam de um tempo de simulação bem maior em relação aos *software* que utilizam o domínio da frequência. No entanto, alguns cálculos apresentam maiores complexidade em sua modelagem como, por exemplo, aqueles que envolvem os campos eletromagnéticos, sendo necessário um maior conhecimento por parte do usuário em relação à utilização do *software* e também detalhes profundos do modelo a ser representado.

Software que aplicam técnicas no domínio da frequência são mais “amigáveis”, ou seja, sua interação com o usuário é espontânea e de fácil entendimento. O inconveniente desta técnica é que em fenômenos transitórios, que ocorrem em tempos e frequências incertos, não se pode fazer uso da mesma.

Neste trabalho será utilizado o Método de Elementos Finitos (MEF), por meio do “*software*” FLUX3D, para a estimação da impedância de surto das torres de linhas de transmissão; e também o método no domínio do tempo, com emprego do “*software*” EMTP/ATPDraw para aplicação das tensões induzidas nos sistemas elétricos e verificação dos transitórios eletromagnéticos nas linhas de transmissão.

O valor da impedância de surto da torre influencia diretamente no fenômeno de “*backflashover*”. Caso a diferença de potencial entre o cabo fase e um ponto próximo da torre ultrapasse o nível básico de isolamento da linha, acontece a ionização do ar e conseqüentemente o rompimento do dielétrico causando o curto-circuito entre fase e terra limitado pela impedância de surto. Assim, a estimativa desta impedância pode determinar se acontecerá um curto-circuito e assim o desligamento da linha.

No caso da sobretensão no ponto de fixação do cabo para-raios com a torre de transmissão, esta é determinada pela impedância de surto da torre em conjunto com a impedância de aterramento da mesma.

Desta forma, é de grande importância se determinar um método adequado para estimativa da impedância de surto das torres de linhas de transmissão.

Os elementos que compõem os sistemas elétricos serão modelados no EMTP/ATPDraw. Neste estudo serão utilizados modelos de linhas de transmissão, fonte de descargas atmosféricas, fonte de tensão induzida e elementos RL.

As linhas de transmissão serão representadas por parâmetros distribuídos, ou seja, o *software* utiliza métodos matemáticos que consideram os parâmetros resistivos, indutivos e capacitivos dos condutores distribuídos por toda a extensão da linha. Esta técnica é de grande valia em estudos onde se pretende analisar o fenômeno de reflexões de ondas para verificação de tensão e corrente em pontos específicos da linha. A este modelo é aplicada a metodologia de cálculo de JMarti, com a qual se representa a variação dos parâmetros da linha de acordo com a frequência [45]. Outro benefício deste modelo é a representação dos acoplamentos magnéticos entre as fases, ou seja, fenômenos ocorridos em uma das fases também serão sentidos nas outras fases e até no cabo-guarda.

As estruturas metálicas das linhas conhecidas como torres de transmissão, serão representadas por modelos de linhas de transmissão monofilares. A vantagem desta técnica é que, como descrito anteriormente, é possível se avaliar a sobretensão em pontos específicos da torre levando em conta as reflexões de ondas que possam ocorrer na mesma. A impedância de surto destes modelos será representada pelos valores estimados com auxílio do *software* FLUX3D o qual utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF), ou Método das Diferenças Finitas (MDF). Este método terá maior enfoque no Capítulo 3 desta dissertação.

A fonte de descarga atmosférica utilizada se baseia no método da dupla exponencial na representação da corrente de descarga, representada pela função da equação 2.2. Esta fonte será utilizada para representação de descargas diretas na linha de transmissão, seja nos cabos fase, no cabo-guarda ou na própria torre.

Para as descargas indiretas foi elaborada uma fonte de tensão induzida, construída utilizando o recurso da MODELS, a qual é uma linguagem de programação que interage com o EMTP/ATPDraw por meio de uma interface e um padrão de construção das linhas de código. Sua vantagem é a facilidade de representação dos modelos além da possibilidade de implementação de elementos lógicos, condicionais, e os chamados “loops” que realizam a repetição de um conjunto de comandos de acordo com condições impostas pelo usuário. A desvantagem do uso da MODELS é o maior esforço computacional exigido, levando a um maior tempo de simulação, e em alguns casos ao estouro de memória utilizada pelo programa. Esta fonte representará as descargas indiretas, as quais tem como efeito a tensão induzida nos cabos fase e cabo-guarda.

Os elementos RL, como cargas e impedâncias de aterramento serão modelados com os elementos lineares disponíveis no *software* EMTP/ATPDraw.

CAPITULO 3 - Cálculo da Impedância de Surto de Torres de LT's

3.1. Considerações Iniciais

A impedância de surto das estruturas que compõem as linhas de transmissão é um parâmetro importante no que diz respeito à análise do desempenho das mesmas frente a descargas atmosféricas. Tal análise fica comprometida quando este parâmetro é desconsiderado ou considerado de forma inadequada. Este parâmetro influencia diretamente na amplitude das sobretensões na linha de transmissão. Além disso, reflexões de ondas devido a esta impedância também podem influenciar na análise do desempenho das linhas.

3.2. Impedância de Surto de Torres de LT's

A impedância de surto de torres não é só mais um acréscimo de um termo de impedância no sistema, pois ela é variável em função da altura da estrutura. Seu valor pode ser encontrado através dos campos eletromagnéticos gerados por uma descarga atmosférica. Através das equações de Maxwell, esta impedância pode ser determinada com esforço e desenvolvimento matemático adequado.

Desta premissa, a estimativa deste parâmetro têm sido feita através de equações analíticas desenvolvidas com base em formas geométricas simples da torre (cilíndricas e cônicas) utilizando a teoria dos campos eletromagnéticos.

Entretanto, as formas geométricas utilizadas para as tradicionais formulações podem não representar todos os detalhe da torre. A existência de vários tipos de torres, as quais podem possuir formas físicas complexas, pode originar diferenças discrepantes no cálculo da sua impedância de surto, quando se utiliza o método clássico através das equações aproximadas.

Outro detalhe importante deixado de lado no metodo clássico, é a variação da impedância de surto com a altura da torre. Vários estudos utilizando condutores

na vertical verificam este efeito, no intuito de se encontrar um método genérico para se determinar tal variação [4].

Intuitivamente, pode-se fazer uma breve análise da variação deste parâmetro com a altura da torre de transmissão. A impedância de surto pode ser obtida, como mostra a equação 3.1, conhecendo-se a capacitância e a velocidade de propagação do surto na torre [61].

$$Z_t = \frac{1}{C \cdot v} \quad (3.1)$$

Onde:

C é a capacitância da torre (F/m);

v é a velocidade de propagação da onda de tensão pela torre (m/ μ s).

Comparando-se a capacitância da torre em seu topo e em sua base, chega-se a conclusão que ao se aproximar do solo, seu valor cresce, de maneira que no ponto de contato da torre com o solo, seu valor tende a infinito. Em contrapartida, a impedância de surto toma um comportamento contrário, ou seja, assume valores elevados em seu topo e decresce com a proximidade com o solo até um valor nulo.

3.3. Metodologia Clássica para Estimação da Impedância de Surto de Torres

A impedância de surto de torres está intimamente relacionada às formas e dimensões geométricas das mesmas. No entanto, a existência de formas complexas de torres torna complicado o cálculo exato de sua impedância de surto.

A variedade de estruturas, com diferentes formas e tamanhos faz com que não se tenha uma equação geral, que abranja todos os casos. Desta forma foram desenvolvidas equações obtidas a partir de formas geométricas simples, como cilindros e cones [46], a fim de representar os vários tipos de torres. Os chamados modelos cilíndricos e cônicos são mostrados na Figura 3.1.

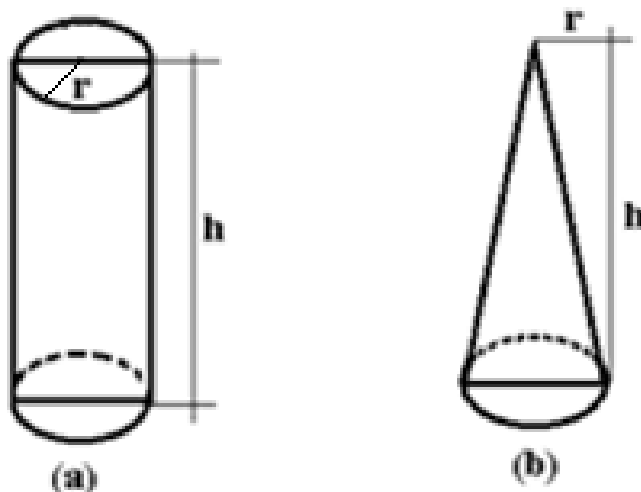


Figura 3.1 - Equações para estimação da impedância de surto de torres a partir dos modelos (a) cilíndrico e (b) cônico [25].

Para casos em que a torre se assemelha ao modelo cilíndrico (figura 3.1a), utiliza-se para o cálculo da impedância de surto a equação 3.2.

$$Z_t = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(c \frac{t}{r} \right) \right] \quad (3.2)$$

Onde c é a velocidade de propagação da luz.

Para casos em que a torre se assemelha ao modelo cônico (figura 3.1b), utiliza-se para o cálculo da impedância de surto a equação 3.3.

$$Z_t = 60 \ln \left[\left(\sqrt{2(h^2 + r^2)} \right) / r \right] \quad (3.3)$$

Além dos modelos cilíndrico e cônico também existem outros modelos, mais complexos, criados com finalidade de se aproximar á forma real das torres. Tais modelos são apresentados na Figura 3.2.

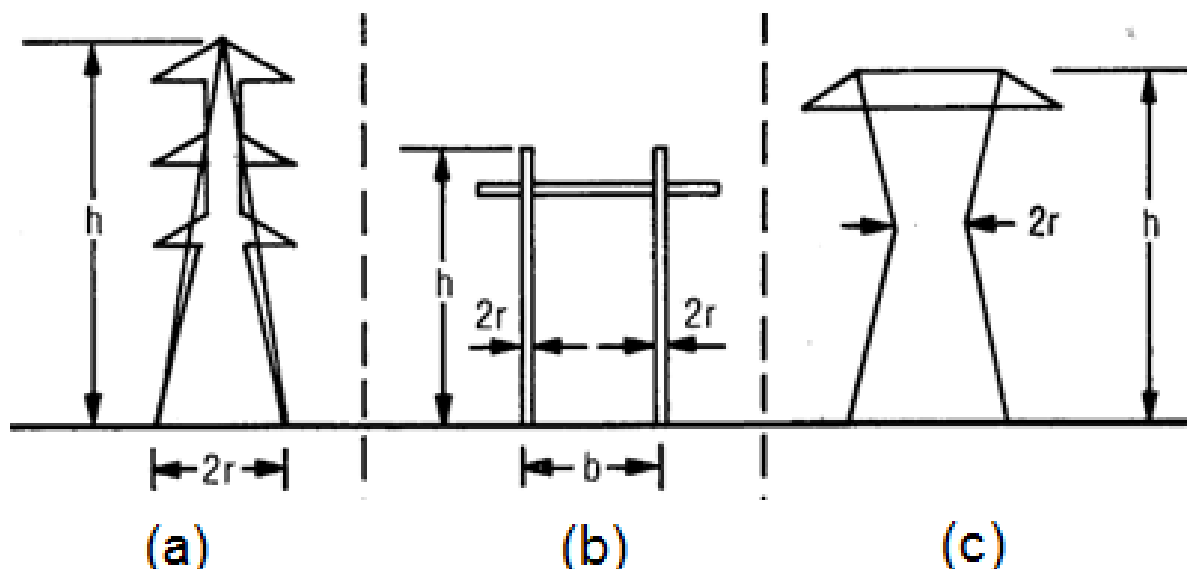


Figura 3.2 – Aproximações para a impedância de surto das torres, adaptada de [25].

Para casos em que a torre se assemelha à figura 3.2a, utiliza-se para o cálculo da impedância de surto a equação 3.4.

$$Z_t = 30 \ln \left[\frac{2 \cdot (h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad (3.4)$$

Para casos em que a torre se assemelha à figura 3.2b, utiliza-se para o cálculo da impedância de surto a equação 3.5.

$$Z_t = 0,5 \cdot [Z_s + Z_m] \quad (3.5)$$

Onde:

$$Z_s = 60 \cdot \ln \left(\frac{h}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{h} \right) - 60;$$

$$Z_m = 60 \cdot \ln \left(\frac{h}{b} \right) + 90 \left(\frac{b}{h} \right) - 60.$$

Para casos em que a torre se assemelha à figura 3.2c, utiliza-se para o cálculo da impedância de surto a equação 3.6.

$$Z_t = 60. \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

Frequentemente se utiliza estes modelos para determinar o valor aproximado da impedância de surto de torres, apesar de que na atualidade existam técnicas específicas e complexas para este cálculo.

Vale lembrar que a grandeza obtida pelos equacionamentos anteriores representa um valor equivalente, ou seja um valor constante de impedância, o qual não considera a variação da mesma ao longo da altura da torre.

3.4. Método de Elementos Finitos

A maioria dos problemas matemáticos pode ser resolvida através de equações diferenciais. Mesmo aparentando de fácil resolução, tais equações podem proporcionar grande dificuldade, tornando tal processo desgastante e trabalhoso. No entanto, formas geométricas simples proporcionam soluções fáceis e rápidas, culminando na criação de um método embasado nesta ideia.

Na metodologia de cálculo com o método de elementos finitos, no domínio do tempo, normalmente é utilizada na solução de equações diferenciais parciais, ordinárias e aproximações numéricas, de modo que estas são linearizadas para pequenos intervalos de tempo (Δt) e de espaço (Δx). Para problemas que possuem equações diferenciais como, por exemplo, as equações de linhas de transmissão ou as equações básicas de Maxwell dos campos elétricos e magnéticos, é empregado o MEF para se obter uma solução acumulativa no tempo e no espaço, considerando-se condições de contorno iniciais.

O Método de Elementos Finitos, aplicado nesta dissertação, basicamente utiliza o desenho geométrico do problema em questão, subdividindo-o em várias partes com formas geométricas simples, como triângulos (utilizados por *softwares* que trabalham com problemas em duas dimensões), pirâmides, prismas, cubos e paralelepípedos (caso do *software* FLUX3D, que trabalha com problemas em

três dimensões). Os vários componentes inscritos na região formam uma rede, chamada de malha do problema.

A partir desta malha, a solução é obtida através de equações diferenciais simples aplicadas em cada parte, a fim de se formar uma solução cumulativa do problema. Para cada elemento, é realizada a interpolação linear ou não linear dos valores da solução em seus vértices até que o erro entre equações diferenciais sejam minimizados.

A vantagem de se dividir a região em elementos pequenos é que se transforma um único problema de difícil resolução em vários problemas de solução mais simples. Isto implica, de modo geral, que este tipo de técnica evita a resolução de complexos sistemas de equações, em contrapartida as matrizes onde são armazenados os dados do problema, têm dimensões elevadas, conforme as características da malha gerada.

No que diz respeito à estimação da impedância de surto de torres, na metodologia proposta, o Método de Elementos Finitos será utilizado para o cálculo da energia armazenada no campo elétrico que envolve a torre. Para tanto uma tensão unitária é aplicada na torre para que seja obtida a energia potencial elétrica.

A partir desta energia é possível se obter o valor de capacitância da torre, como mostra a equação 3.7.

$$E_{elet} = \frac{C.V^2}{2} \quad (3.7)$$

Onde:

V é a tensão aplicada na torre,

C é a capacitância da torre.

Como já visto, capacitância e impedância de surto possuem íntima relação. A partir da equação 3.1 é possível se encontrar o valor da impedância de surto da torre através da capacitância obtida. Observa-se, que para tal cálculo é necessário o conhecimento da velocidade de propagação da onda de surto pela torre. Na literatura várias velocidades são sugeridas [50-53], tendo a velocidade da luz como referência.

No trabalho de Wagner e Hileman [54], é considerada a velocidade de propagação do surto de corrente pela torre igual à velocidade da luz. O estudo de Kawai [55] propôs que esta velocidade variasse com a altura da torre, tomando valores entre $0,71*c$ e $0,89*c$, onde c é a velocidade da luz. Sargent [56] propôs que esta velocidade seria 80% da velocidade da luz.

A velocidade de propagação do surto depende das características elétricas e magnéticas do meio no qual ele se propaga. Se a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do meio forem iguais aos respectivos valores do ar, então a velocidade de propagação do surto é aproximadamente igual à velocidade da luz.

Neste trabalho será adotada como velocidade de propagação do surto igual à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km/s.

3.5. Modelos de Torres e Considerações Sobre o *Software* FLUX3D

3.5.1. O *Software* FLUX3D e as Torres a Serem Modeladas

A metodologia implementada utiliza o *software* FLUX3D como auxílio na estimação da impedância de surto das torres.

O *software* FLUX3D aplica o MEF na resolução de problemas eletromagnéticos [57]. Por utilizar representações em três dimensões sua malha é composta por elementos tridimensionais, como pirâmides, prismas, cubos e paralelepípedos. A

escolha destes elementos para formulação da malha é automatizada pelo *software* de modo que esta se aproxime ao máximo da forma do desenho.

Nesta etapa é de grande importância a aquisição de dados geométricos das torres. Para se obter resultados coerentes, os modelos devem ser o mais próximos das torres reais. Projetos construtivos são os mais indicados para ser a referência dos modelos, já que eles contêm todas as dimensões reais das torres.

Duas torres serão modeladas, uma delas compõe uma LT de circuito simples e a outra faz parte de uma LT de circuito duplo com nível de tensão de 138 kV. A Figura 3.3 mostra estas torres e suas dimensões.

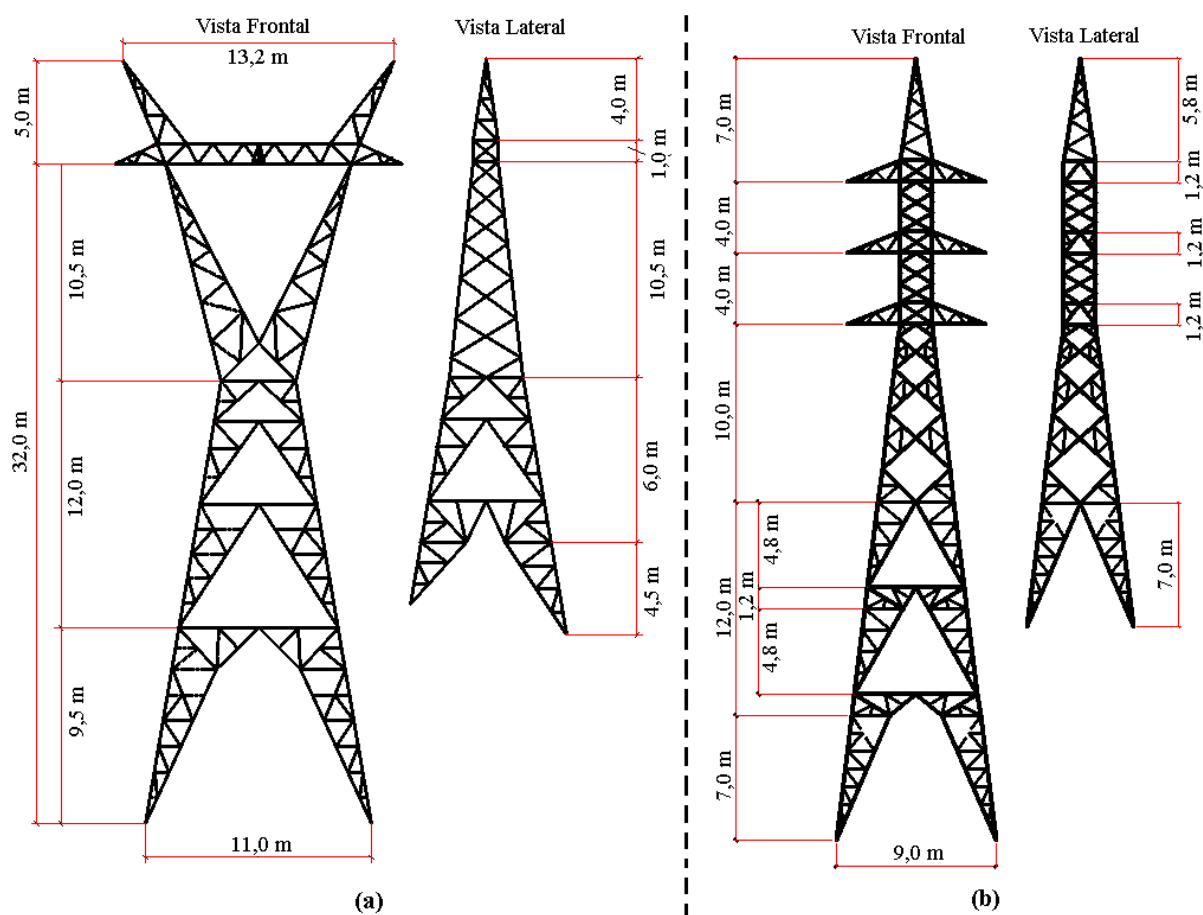


Figura 3.3 – Torres de linhas de transmissão utilizadas nos modelos do FLUX3D, (a) Torre de uma LT de circuito simples, e (b) Torre de uma LT de circuito duplo.

Um parâmetro importante para este *software* é a condição de contorno a ser adotada. A obtenção dos resultados desejados neste estudo é relacionada com o

espaço que envolve a torre, que na prática deve-se limitar ao raio de interação do campo elétrico, para que os resultados sejam coerentes com os valores reais.

3.5.2. Condições de Contorno do Problema

A condição de contorno de um problema é um fator que influencia diretamente nos resultados de sua resolução. As equações diferenciais utilizadas pelo MEF necessitam destas condições como ponto de partida para obtenção de resultados coerentes.

Partindo desta idéia, podem-se ter dois tipos de problemas: aqueles com condição de contorno fechada, e os problemas com condição de contorno aberta. O primeiro possui um número delimitado de elementos de malha tornando sua resolução limitada por uma ou mais condições de contorno conhecidas. O segundo tipo se torna mais complicado ao passo que a região de interesse é “aberta”, o que faz com que uma fronteira seja estabelecida, mas que faz parte da solução do problema.

Desta forma em casos de regiões abertas há a necessidade de aplicação de técnicas que criam uma condição fechada para se obter soluções aproximadas [57, 58, 59]. As seguintes técnicas podem ser empregadas.

- Truncamento de limites externos: Nesta técnica escolhe-se uma condição de contorno de modo que ela seja muito maior que as dimensões do problema, geralmente em torno de cinco vezes as dimensões do problema. Esta técnica é bastante simples, e com resultados aceitáveis na maioria dos casos;
- Transformada de Kelvin: Nesta técnica os efeitos da região exterior são, em teoria, exatamente modelados, além de manter uma solução homogênea do problema e da possibilidade de se aplicar condições de contorno periódicas;

- Ballooning: Nesta técnica, a região exterior é representada por uma região anular em torno do problema, com raio inicial aleatório e que aumenta em uma taxa progressiva. Deste ponto é estabelecido um processo iterativo, no qual a cada aumento de raio da região anular é aplicado o MEF até que o erro dos resultados obtidos esteja abaixo de um valor pré-estipulado;
- Transformações Espaciais: Esta metodologia tenta converter uma região infinita em um domínio finito por meio de algum método de mapeamento geométrico, como por exemplo, o mapeamento conformal.

Existem várias outras técnicas na literatura, mas com o intuito de simplicidade e obtenção espontânea de resultados, nesta dissertação será adotada a técnica de truncamento de limites externos, a qual será utilizada em um caso especial apresentado na sequência, para obtenção de parâmetros de referência e assim a verificação do método proposto.

3.6. Modelos das Torres no FLUX3D

Os modelos desenvolvidos tiveram como base as torres presentes na Figura 3.3. A entrada de dados construtivos no *software* é primeiramente de ponto a ponto, e a eles se ligam os seguimentos para formar a torre.

Os modelos das duas torres, mesmo com base em dados reais, podem vir a ser questionados quanto à metodologia utilizada e se os valores de impedância de surto, obtidos a partir destes modelos, seriam coerentes com a realidade. Sendo assim foi proposto um terceiro modelo, que faz menção à metodologia clássica, e compara resultados com a mesma. Para tanto, utilizou-se o modelo da Figura 3.2b, ou seja, o modelo cônico, o qual possui uma formulação matemática própria e com resultados consolidados em vários estudos [21, 22, 23, 25, 46,]. Na implementação deste modelo não haverá aproximações ou considerações, sendo as comparações dos resultados diretas.

Deste modo foi modelado um cone de altura de 30 metros e raio da base de 5 metros. Seguindo a metodologia clássica, foi encontrado um valor de impedância de surto de 129,12 ohms. A Figura 3.4 mostra o mesmo modelo implementado no *software* FLUX3D.

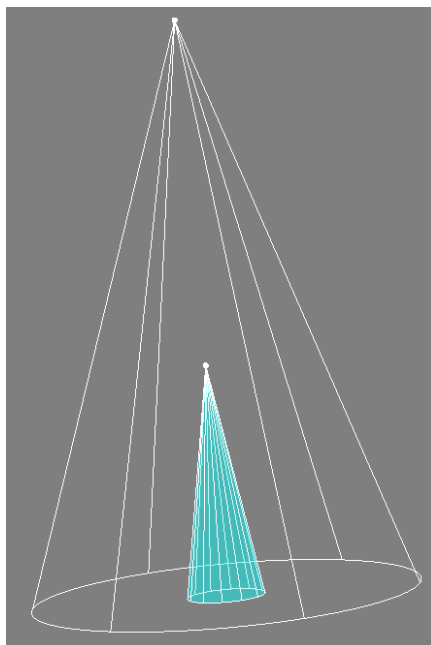


Figura 3.4 – Modelo cônico implementado no *software* FLUX3D

Como pode ser visto, foi considerada uma condição de contorno também na forma de cone, o qual possui dimensões aproximadamente 5 vezes maior que o cone que representa a torre.

A partir da simulação deste modelo é obtida a energia elétrica armazenada no ar próximo a torre. A Figura 3.5 mostra a variação desta energia nas proximidades da superfície da torre.

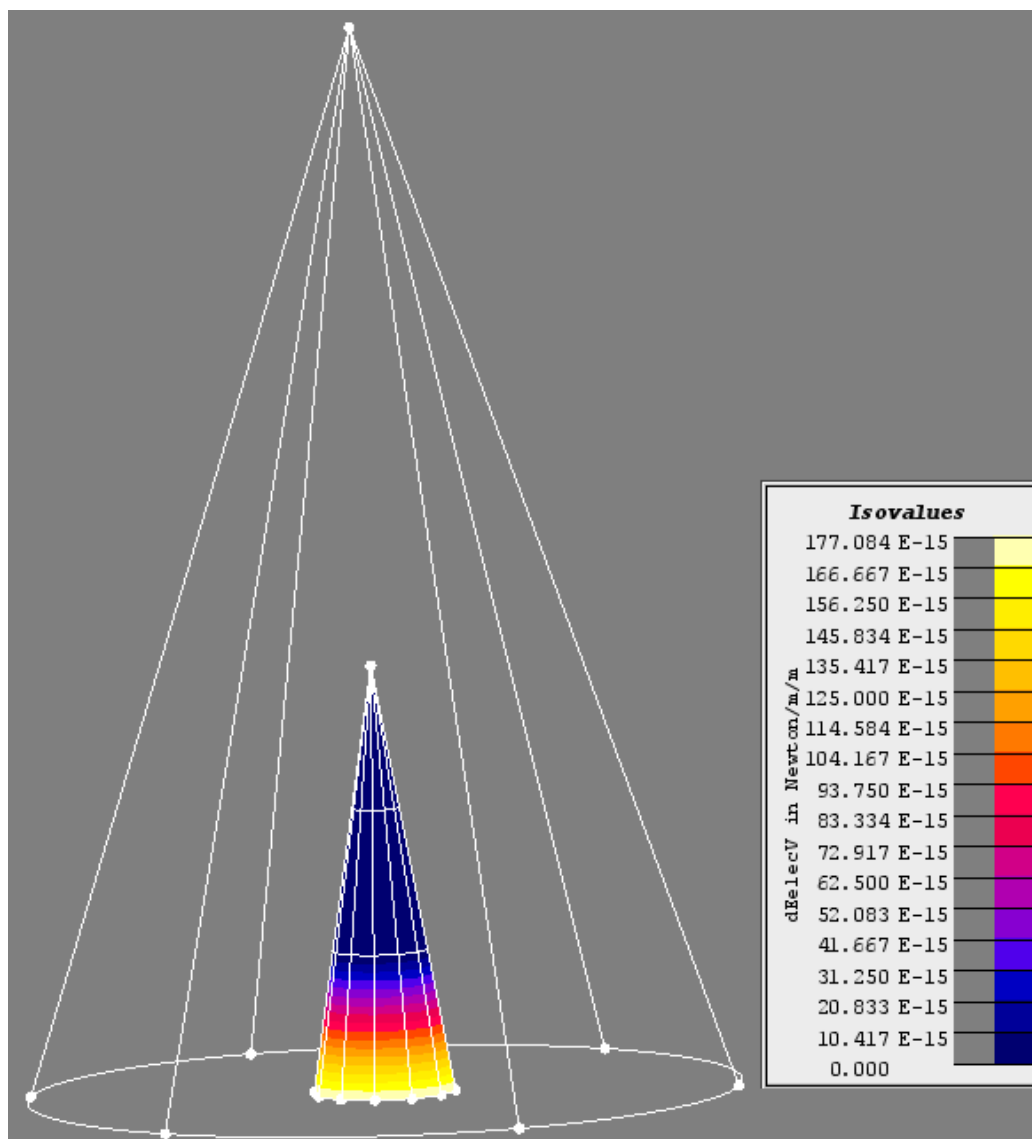


Figura 3.5- Variação da energia elétrica em torno da superfície do modelo

Sabe-se que a capacitância é diretamente proporcional a energia elétrica armazenada, como mostra a equação 3.7. Como pode ser observado, a energia cresce com a proximidade com o solo. Assim, pode-se dizer que os maiores valores de capacitância são registrados na base da torre.

A partir de simulações computacionais foi obtida, na região de interesse, energia armazenada de $397,015 \cdot 10^{-12}$ joules. Para obtenção desta energia, foi adotada uma condição de contorno de aproximadamente 5 vezes as distâncias entre o centro do problema (centro do cone) até a sua fronteira externa (superfície

lateral do cone). A partir do valor de energia é obtido um valor de impedância de 125,94 Ohms. Para se chegar a este valor utilizou-se as equações 3.1 e 3.7.

A impedância de surto obtida nos dois métodos (método analítico clássico e o método proposto na dissertação) possuem valores semelhantes. Deste modo, pode-se dizer que o método que emprega o *software* FLUX3D é aceitável, e assim este pode ser utilizado para a obtenção de resultados dos modelos das torres reais.

- Modelo da torre da LT de circuito simples

As análises utilizando dados reais são de grande importância no estudo devido à influência das formas e das dimensões das torres nos resultados finais de impedância de surto.

Com base na Figura 3.3a, foi realizado o cálculo da impedância de surto através da metodologia clássica e pela metodologia proposta, através do modelo da torre da LT de circuito simples implementado no FLUX3D.

A metodologia clássica aplicada neste caso obteve a impedância de surto com valor de 183,77 Ohms, utilizando a equação 3.6.

Para a metodologia proposta, foi implementado o desenho tridimensional desta torre no *software* FLUX3D, como mostra a Figura 3.6.

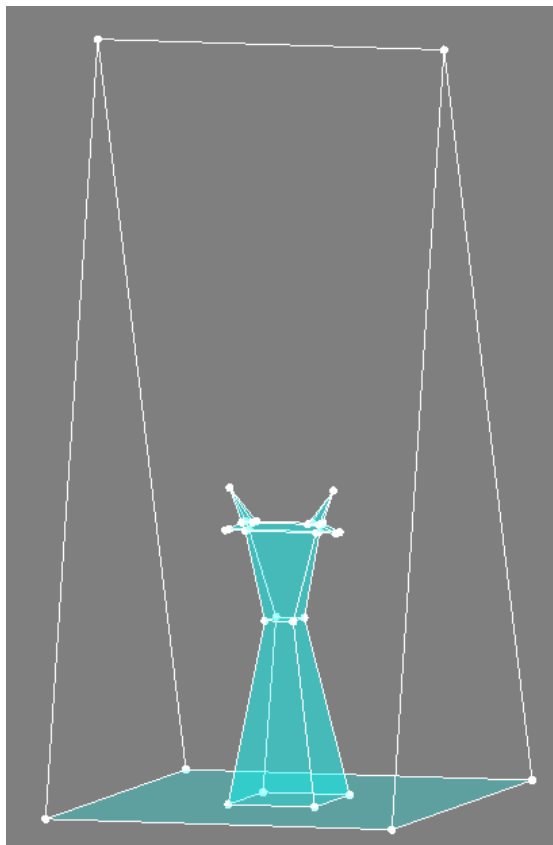


Figura 3.6 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.

Nota-se que a condição de contorno é semelhante à forma de uma cunha, seguindo as recomendações de construção das condições de contorno obtidas no modelo cônico.

A Figura 3.7 mostra a distribuição de energia potencial elétrica armazenada pela superfície da torre. Semelhante ao modelo cônico, a energia toma maiores valores nas proximidades da base da torre.

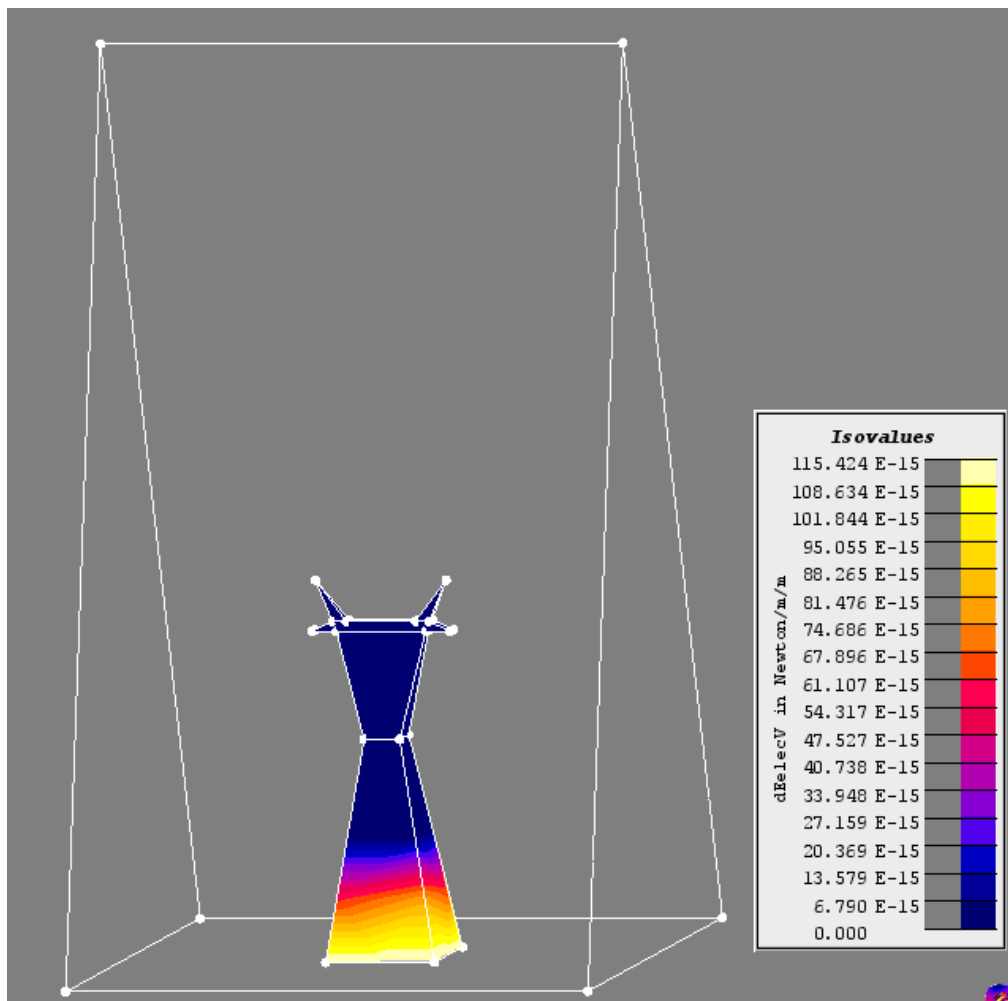


Figura 3.7 - Distribuição de energia armazenada no modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.

A partir da simulação do modelo foi obtida uma energia armazenada de $534,281 \cdot 10^{-12}$ Joules. Utilizando as equações 3.1 e 3.7, é obtida a impedância da torre de 115,42 Ohms. Observa-se uma diferença considerável entre o valor obtido utilizando o método clássico e o método proposto, sendo que o primeiro resulta um valor mais elevado.

- Modelo da torre da LT de circuito duplo

A metodologia clássica utilizada nesta torre para se calcular sua impedância de surto foi baseada no modelo da Figura 3.2a. A impedância de surto resultante neste caso foi de 187,62 Ohms.

O modelo da Figura 3.8 foi desenvolvido para análise utilizando a metodologia proposta, para estimação da impedância de surto desta torre.

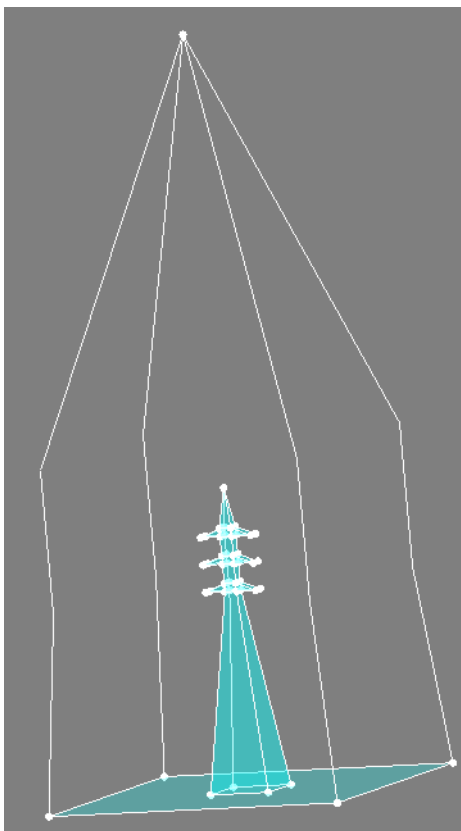


Figura 3.8 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D.

A modelagem desta torre teve como base os dados geométricos presentes na Figura 3.3b. De modo semelhante aos casos anteriores, foi obtida a distribuição de energia armazenada pela torre. A Figura 3.9 mostra tal distribuição de energia.

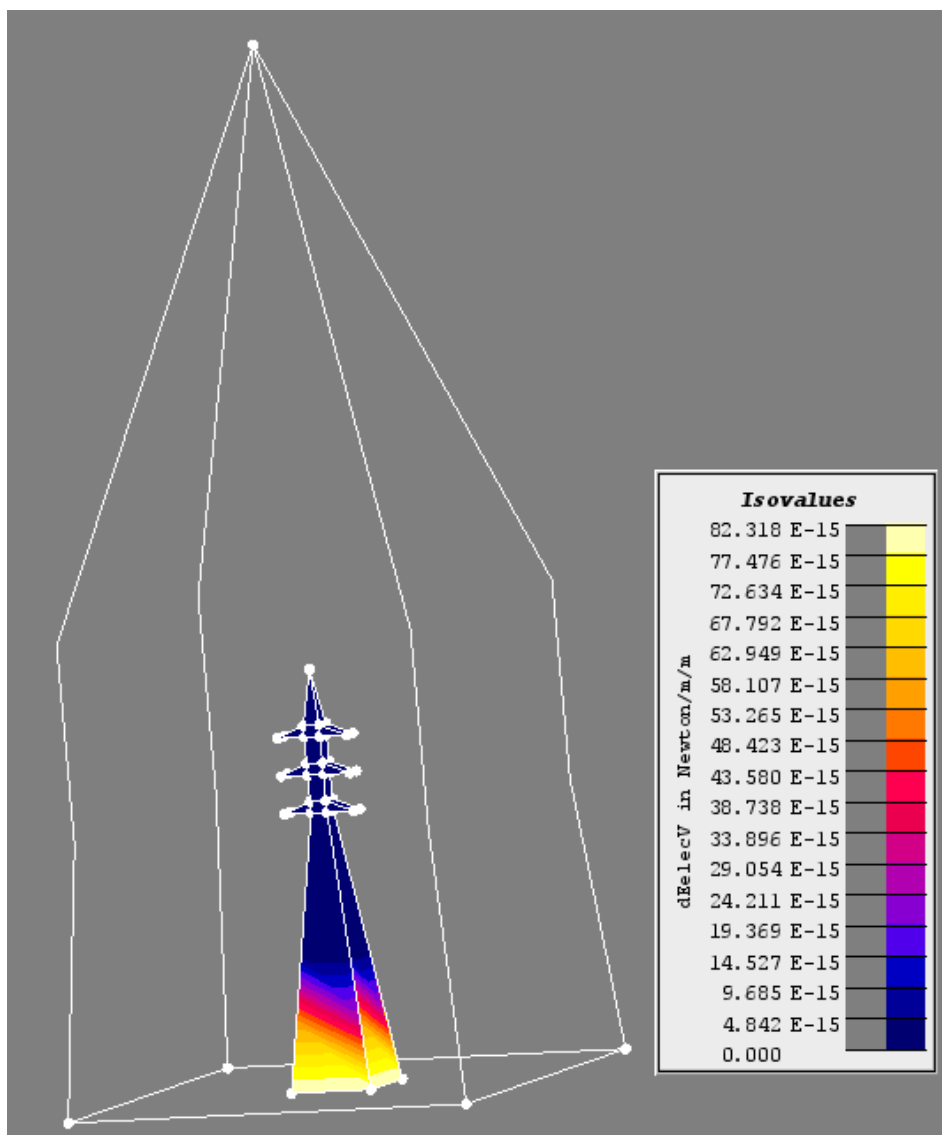


Figura 3.9 - Distribuição de energia armazenada no modelo da torre da LT de circuito duplo no FLUX3D.

A simulação deste modelo resultou em uma energia armazenada de $458,59 \cdot 10^{-12}$ Joules. A impedância de surto da torre calculada foi de 159,91 Ohms, com base nas equações 3.1 e 3.7.

Semelhante à torre da LT de circuito simples, a impedância de surto também resultou em uma diferença considerável entre o valor obtido utilizando o método clássico e o método proposto. No método clássico é considerada a torre em forma de cone, simplificando muito seu formato real, explicando tal diferença.

Observa-se que entre os dois tipos de estruturas utilizados esta apresenta a menor diferença em relação à forma padrão (cone), o que justifica a menor discrepância entre os métodos.

3.7. Representações da Variação da Impedância de Surto das Torres

Tanto a indutância como a capacitância são variáveis de acordo com a distância relativa ao solo, conseqüentemente a impedância também o será. Logo, à medida que uma corrente de surto percorre uma torre no sentido de seu topo até o solo, a mesma é submetida a uma impedância variável e, pela teoria de ondas viajantes, ondas refletidas surgirão. O cálculo da sobretensão que a torre será submetida deve considerar este aspecto.

Contudo a variação contínua destes parâmetros, no presente trabalho, não será abordada. Aqui será considerada a estrutura subdivida ao longo de sua altura em partes iguais, para as quais serão determinadas as impedâncias de surto. Como o acoplamento capacitivo com o solo se eleva à medida que o surto se aproxima deste, é de se esperar que a impedância de surto tenha uma redução neste sentido.

Os métodos de cálculos apresentados consideram a torre como um todo, e a impedância determinada refere-se ao valor equivalente da impedância variável.

Sob este aspecto, a torre será dividida em três partes iguais ao longo de sua altura, para verificação da impedância de surto de cada parte, sendo possível assim a análise de sua variação.

As torres das linhas de transmissão de circuito simples e de circuito duplo, estudadas anteriormente, serão consideradas nesta análise.

- Análise da variação da impedância de surto para a torre da LT de circuito simples.

Como dito anteriormente, os modelos das torres foram divididos em três partes para verificação da variação de sua impedância de surto. Assim, somente necessitou-se da adaptação dos modelos já implementados no *software* FLUX3D. A Figura 3.10 mostra o que se modificou no modelo da torre da LT de circuito simples.

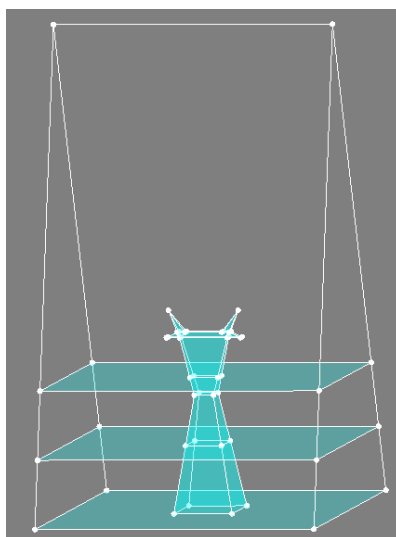


Figura 3.10 - Modelo da torre da LT de circuito simples no FLUX3D para análise da variação da impedância de surto.

A impedância de surto de cada divisão da torre foi encontrada a partir da energia armazenada na região próxima a respectiva parte. A Tabela 3.1 mostra as energias encontradas a partir de simulações deste modelo, bem como as respectivas impedâncias de surto calculadas a partir destes valores de energia e através das equações 3.1 e 3.7.

Tabela 3.1 - Resultados de Energia armazenada e Impedância de Surto nas Três Partes da Torre da LT de Circuito Simples.

	TOPO	MEIO	BASE
Energia armazenada (pJ)	40,83	89,34	394,99
Impedância de surto (Ω)	1510,33	690,25	156,12

Percebe-se uma grande diminuição da impedância de surto à medida que o ponto de referência se aproxima do solo.

Além disto, nota-se que apesar da parte superior possuir o maior espaço, o valor de energia armazenada nesta região é a menor de todas, devido seu acoplamento capacitivo com o solo ser bem menor em relação às outras regiões.

- Análise da variação da impedância de surto para a torre da LT de circuito duplo.

Semelhante à adaptação feita no modelo da torre da LT de circuito simples, esta torre também foi dividida em três partes para se verificar a variação da impedância de surto. A Figura 3.11 mostra a modificação no modelo da torre da LT de circuito duplo.

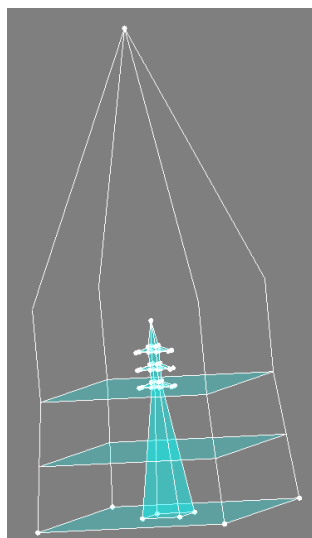


Figura 3.11 - Modelo da torre da LT de circuito duplo no FLUX3D para análise da variação da impedância de surto.

A partir da energia armazenada encontrada e das equações 3.1 e 3.7, foi obtida as impedâncias de surto de cada divisão do modelo. A Tabela 3.2 mostra os resultados de energia armazenada e de impedância de surto.

Tabela 3.2 - Resultados de Impedância de Surto em Três Partes da Torre da LT de Circuito Duplo.

	TOPO	MEIO	BASE
Energia armazenada (pJ)	16,11	58,54	372,74
Impedância de surto (Ω)	4552,04	1252,70	196,74

Novamente é notado uma diminuição na impedância de surto no sentido do topo para a base da torre.

Para melhor avaliação dos resultados obtidos, nos itens seguintes serão analisadas situações nas quais a impedância de surto possa vir a influenciar no desempenho da LT, como por exemplo, nas sobretensões observadas devido a descargas atmosféricas em cabos para-raios.

3.8. Análise dos Resultados de Impedância de Surto Utilizando o *Software* EMTP/ATPDRAW

Para se analisar os resultados é necessária a representação dos vários elementos que possam influenciar no estudo. Deste modo optou-se por modelar no *software* EMTP/ATPDraw uma linha de transmissão monofásica, com algumas simplificações, sendo a mesma composta por 11 torres igualmente espaçadas com vãos de 200 metros. No estudo foi representado somente as torres e o cabo para-raios desta LT, ao qual foi aplicado o surto de corrente.

Cada torre foi representada por três linhas monofásicas a parâmetros distribuídos, cada uma com um terço da altura da torre e os respectivos valores de impedância (topo, $2/3$ e $1/3$ da altura), de modo que a variação da mesma fosse reproduzida.

As impedâncias de pé de torre foram representadas por impedâncias puramente resistivas com valores típicos de 6,5 ohms [46].

A impedância característica do cabo para-raios é de 455 ohms, e para se evitar reflexões indesejadas, as extremidades do cabo foram conectadas a resistências para a terra de igual valor.

O surto de corrente é aplicado na sexta torre, na qual é analisada a sobretensão nos três pontos considerados, como mostra a Figura 3.12.

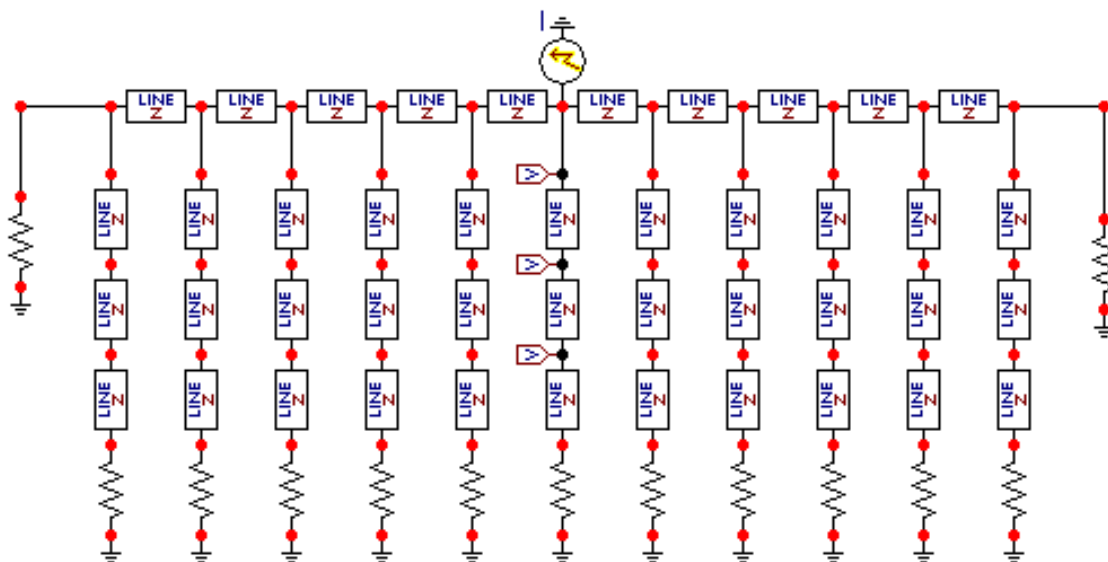


Figura 3.12 - Arranjo no EMTP/ATPDRAW do cabo para-raios e torres da linha de transmissão.

Baseando-se neste esquema, foram realizadas simulações com a finalidade de se comparar os resultados e também de se verificar impactos na torre de transmissão.

3.8.1. Comparação com Resultados de Medições.

Devido à complexidade de se medir a impedância de surto de torres, sendo necessário, como já dito, o desligamento da linha de transmissão, além da técnica demandar equipamentos e métodos caros, não foi possível a realização destas medições no presente trabalho. No entanto, para uma análise sólida e fundamentada dos resultados obtidos é necessário compara-los com dados reais providos de medições em campo. Em vista disto, tomou-se como base medições de sobretensões realizadas por Motoyama et al [46] para comparação dos resultados obtidos, onde se utiliza uma torre semelhante à torre de linha de circuito duplo aqui modelada.

No referido trabalho foi aplicada uma corrente conhecida no topo da torre e simultaneamente registrou-se a tensão em alguns pontos da mesma. A comparação realizada considerou a medição da tensão no ponto da estrutura no

qual se conecta o isolador do cabo fase mais baixo, coincidentemente o ponto que equivale a $2/3$ da altura da torre modelada, onde se pode obter o registro de tensão. A onda de corrente injetada na torre alvo da medição é mostrada na Figura 3.13.

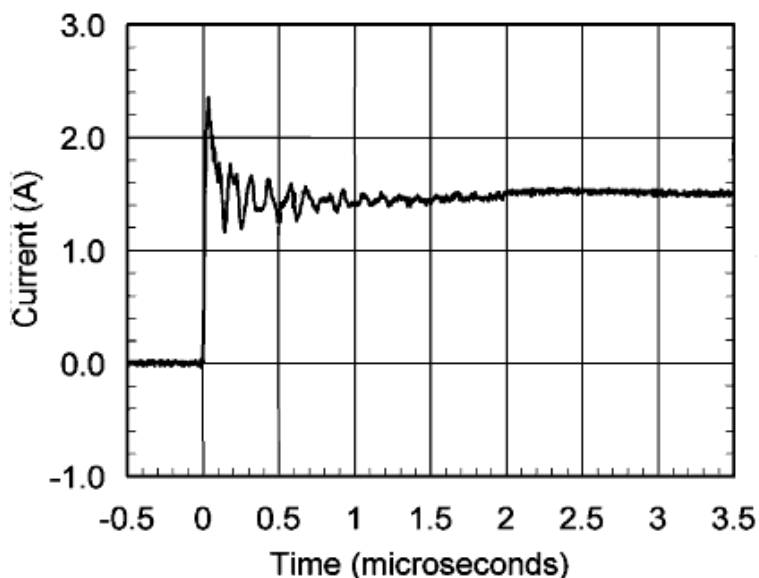


Figura 3.13 – Corrente injetada na torre para medição da tensão.

Esta mesma corrente foi representada no EMTP/ATPDraw para obtenção dos resultados de tensão. A Figura 3.14 mostra a tensão medida e os resultados obtidos a partir das simulações no EMTP/ATPDraw.

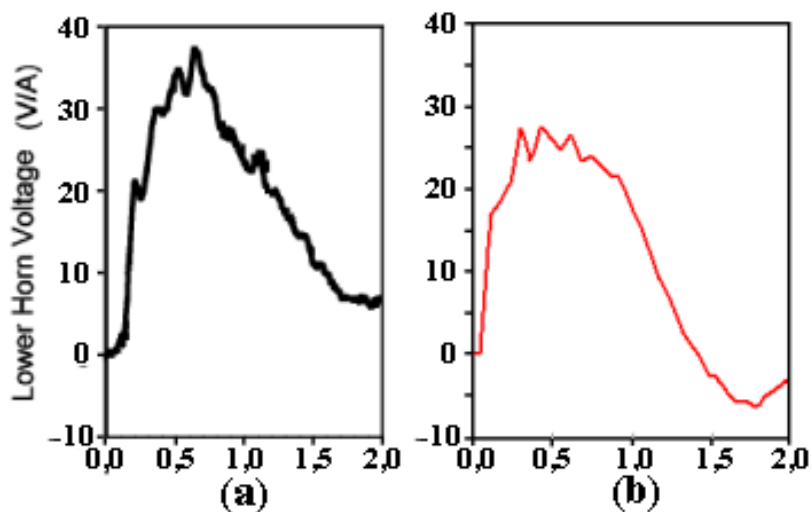


Figura 3.14 – Registro de tensão no ponto da torre em que o isolador da fase mais baixa se conecta, obtido por (a) medição e (b) por simulação no EMTP/ATPDraw.

Como pode ser visto as formas de ondas, provenientes de medição e de simulação, são semelhantes sendo que a onda medida tomou um pico maior. Outra observação importante é que a onda obtida no EMTP/ATPDraw toma valores negativos. Isto acontece porque o efeito de reflexões de onda são mais sentidos neste caso, fazendo com que a tensão tome valores negativos. Ressalta-se que apesar das duas torres em questão serem de formato semelhantes, as mesmas possuem dimensões diferentes, explicando a diferença na amplitude das tensões registradas.

3.8.2. Comparação com Resultados Obtidos a partir de Equações Analíticas.

Com a finalidade de verificar o impacto da variação de impedância ao longo da altura da torre pela sobretensão proporcionada por uma descarga atmosférica, apresentam-se os resultados de simulação obtidos do programa EMTP/ATPDraw.

Para tanto foi utilizado o esquema da linha de transmissão monofásica já modelado no EMTP/ATPDraw, assolado por uma descarga atmosférica. Esta é representada por uma fonte de surto que se baseia na forma de dupla exponencial [47], alcançando valor de crista de 10 kA no tempo de 1,2 microssegundos e com tempo de cauda (metade do valor de crista) de 50 microssegundos (1,2x50us).

A título de comparação, também foram utilizados os valores de impedância obtidos dos cálculos analíticos. Neste caso manteve-se a representação de três linhas para uma torre, cada linha com um terço da altura, porém com os valores de impedância iguais à impedância calculada.

Primeiramente foram utilizados os valores obtidos da torre da LT de circuito simples a partir dos cálculos analíticos e simulação com o FLUX3D. Foram simuladas tensões ao longo da torre como mostra a Figura 3.15.

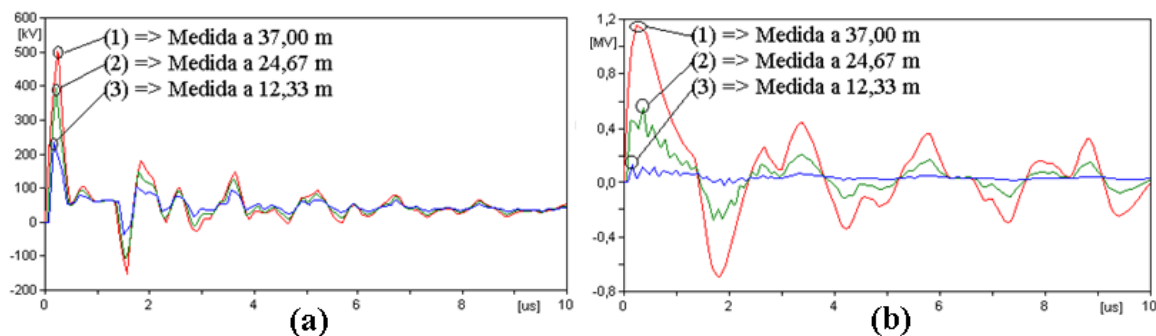


Figura 3.15 - Sobretensões simuladas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito simples.

Outro caso simulado foi o da torre da LT de circuito duplo. De maneira similar, a torre foi representada por linhas monofásicas com as respectivas impedâncias. A Figura 3.16 mostra os resultados.

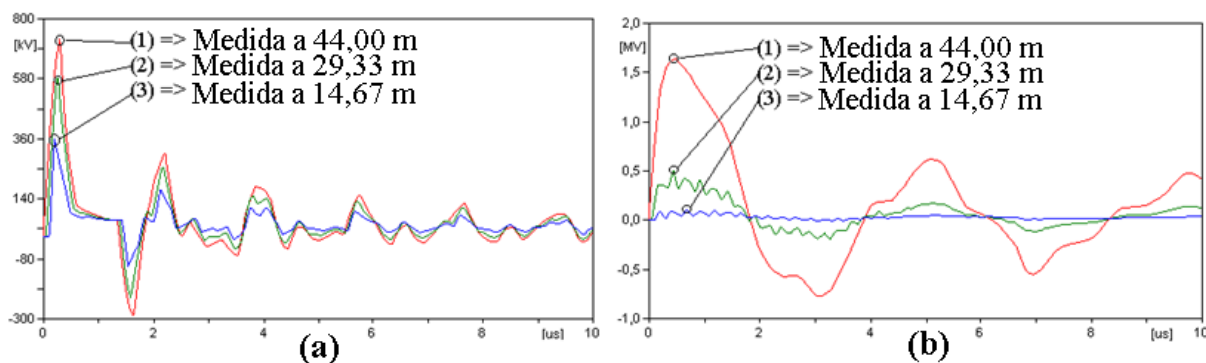


Figura 3.16 - Sobretensões simuladas utilizando impedâncias obtidas a partir (a) do método analítico, e (b) do FLUX3D, para a torre da LT de circuito duplo.

No caso da torre da LT de circuito duplo, notam-se maiores diferenças de valores de pico de tensão. A Tabela 6 mostra os resultados numéricos obtidos das simulações no EMTP/ATPDraw.

Tabela 3.3 - Resultados de Sobretensão do Modelo no *Software*
EMTP/ATPDraw

Tipo de estrutura	Circuito Simples					
Ponto de análise	37 metros (topo)		24,33 metros		12,33 metros	
Método para obtenção da impedância de surto	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D
Pico de tensão [kV]	540	1200	425	530	250	140
Tipo de estrutura	Circuito Duplo					
Ponto de análise	44 metros (topo)		29,33 metros		14,66 metros	
Método para obtenção da impedância de surto	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D	Análítico	FLUX3D
Pico de tensão [kV]	725	1630	580	500	360	100

A Tabela 3.3 mostra que as diferenças nos valores da sobretensão encontrada nos diferentes pontos da torre são significativas e dependendo do tipo da torre de transmissão e do ponto de análise poderão conduzir a interpretações errôneas.

Observa-se que nas proximidades dos condutores fase ($2/3$ da altura), ponto ao qual deve ser associada a tensão de solicitação dos isoladores, os valores de pico de tensão são semelhantes nos dois casos. Contudo, há grande diferença entre os valores obtidos para o topo e a $1/3$ da altura da torre.

CAPITULO 4 - Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas Indiretas

4.1. Considerações Iniciais

A tensão induzida nas linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas sempre foi um fenômeno observado e que atrai a atenção da comunidade não só de pesquisadores desta área, mas também das concessionárias transmissoras de energia. Desde 1908, com o trabalho de K.W Wagner, este fenômeno vem sendo estudado, com algumas divergências à cerca das metodologias de seu cálculo.

Neste capítulo será apresentado um método implementado no *software* EMTP/ATPDraw o qual se baseia na pesquisa pioneira de Sune Rusck. A metodologia desenvolvida por Rusck é usada até hoje, inclusive por instituições respeitadas mundialmente como o IEEE e o CIGRÉ [6, 7, 8].

A seguir será apresentada a teoria proposta por Rusck para o cálculo da tensão induzida em linhas aéreas devido a descargas atmosféricas.

4.2. A Teoria de Rusck

Em 1957 Sune Rusck publicou sua teoria, que viria a ser a base dos estudos sobre tensões induzidas devido a descargas atmosféricas. O pioneirismo de seu trabalho se deu pelo fato de propor uma expressão analítica embasada na teoria dos campos eletromagnéticos que estima a tensão induzida de forma próxima à realidade.

4.2.1. Considerações e simplificações do modelo de Rusck

Em sua teoria, Rusck baseou-se em um sistema de três condutores posicionados horizontalmente, a certa altura acima do nível do solo – representando uma linha de transmissão trifásica, e um canal de descarga por onde flui a corrente de

retorno sentido solo-nuvem disposto verticalmente e na lateral da linha – representando a descarga atmosférica causadora das tensões induzidas na linha.

Rusck ainda realizou algumas considerações para simplificar a equação analítica para cálculo da tensão induzida, sem alterar significativamente os resultados esperados. Tais considerações são citadas a seguir:

- 1-** Considerou-se que a corrente de retorno é a principal causadora da tensão induzida. Como já visto no capítulo 2, a descarga atmosférica é composta por etapas, e em consequência, picos de correntes consecutivos, os quais podem influenciar no campo eletromagnético. No entanto, o maior pico de corrente ocorre na chamada corrente de retorno, fazendo com que ela tenha maior destaque durante o processo da descarga atmosférica. Além disso, o campo eletromagnético (o qual induz a tensão nas linhas aéreas) é influenciado pela taxa de variação da corrente de descarga, ou seja, quanto menor o tempo em que a corrente atua, maior será a variação no campo eletromagnético. Como pode ser visto na Figura 2.2, a corrente de retorno, além de possuir o maior pico, também ocorre no menor intervalo de tempo, proporcionando grande variação no campo eletromagnético, e deste modo tensões induzidas elevadas. As demais correntes, por ocorrerem em intervalos de tempo relativamente grandes, têm influência insignificante na composição da tensão induzida na linha de transmissão. Também é desconsiderado o campo elétrico produzido pela presença de cargas nas nuvens.
- 2-** Considerou-se que a incidência da descarga fosse de forma perpendicular ao solo, ou seja, um canal de descarga retilíneo e perpendicular ao solo. Sabe-se que o canal de descarga é composto por tortuosidades e pode incidir no solo com ângulos não ortogonais, o que

complica consideravelmente os cálculos dos campos eletromagnéticos. Deste modo, esta consideração simplificou significativamente os cálculos analíticos, sem que os resultados fossem influenciados sensitivamente.

- 3- A distribuição de cargas no canal foi considerada uniforme. Apesar das cargas no canal de descarga não ser uniforme, devido à variação da capacitância de acordo com a proximidade do solo, em altitudes menos elevadas (algumas centenas de metros), elas variam pouco, e é justamente esta faixa de altitude do canal de descarga que tem a maior influência na amplitude do pico da onda de tensão induzida bem como em sua taxa de variação.
- 4- A corrente de retorno é considerada em forma de degrau e viaja sem distorções ao longo do canal. Esta consideração é consequência da distribuição uniforme das cargas no canal de descargas mencionado anteriormente. Para neutralizar estas cargas, a corrente de descarga deve variar em forma de degrau e sem distorções pelo canal de descarga. Existem estudos que consideram a variação da corrente [4, 20, 33], sendo que os resultados apresentados por estes estudos não diferem consideravelmente em relação àqueles obtidos utilizando-se o método proposto por Rusck.
- 5- A resistividade do solo foi considerada nula, ou seja, supôs que o solo fosse um condutor perfeito. A contribuição da resistividade do solo para formação da tensão induzida só começa a ser significativa quando a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha de transmissão é mais elevada. Entretanto, as descargas são capazes de gerar tensões induzidas significativas na linha a algumas centenas de metros, fazendo esta consideração pertinente.

- 6- Com a consideração do solo como um condutor perfeito, Rusck empregou em sua metodologia o método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético. Assim foi possível tomar uma resolução mais prática para obtenção dos valores do campo eletromagnético envolvido no processo.

- 7- A linha foi considerada como sendo infinita e sem descontinuidades. Esta hipótese, mais uma vez, simplificou o equacionamento que Rusck desenvolveu, entretanto, considerar a linha infinita e sem descontinuidades pode trazer erros consideráveis no cálculo da tensão induzida. Não é sem razão que esta consideração feita por Rusck é uma das mais discutidas, sendo que existem vários trabalhos, levando em conta uma linha finita e com descontinuidades [14, 15, 33,]. A consequência de se considerar uma linha infinita e sem descontinuidades é que não haverá o efeito das ondas viajantes, que podem fazer com que a onda de tensão analisada diminua ou aumente consideravelmente dependendo dos parâmetros da linha.

Assim, nesta metodologia Rusck valeu-se de um modelo composto por um condutor retilíneo, carregado e posicionado na vertical, o qual representa o canal de descarga, sendo que este possui uma distribuição de carga uniforme, e por ele flui a corrente de retorno com forma de onda de corrente em degrau no sentido do solo para a nuvem.

A partir deste modelo de descarga atmosférica, e considerando-se o solo com resistividade nula (condutor perfeito), utilizou-se o método das imagens juntamente com as equações de Maxwell para obtenção de uma equação para se determinar o campo eletromagnético gerado pela ação da corrente de retorno de uma descarga atmosférica [60].

Para o cálculo da tensão induzida na linha de transmissão, implementou-se um modelo no qual a linha se encontra a certa altura e não possui nenhum tipo de descontinuidades. Deste modo, conhecido o campo eletromagnético, foi desenvolvido uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida, levando-se em conta a interação destes campos com os condutores da linha de transmissão.

A Figura 4.1 mostra o arranjo descrito, e que Rusck considerou em sua teoria.

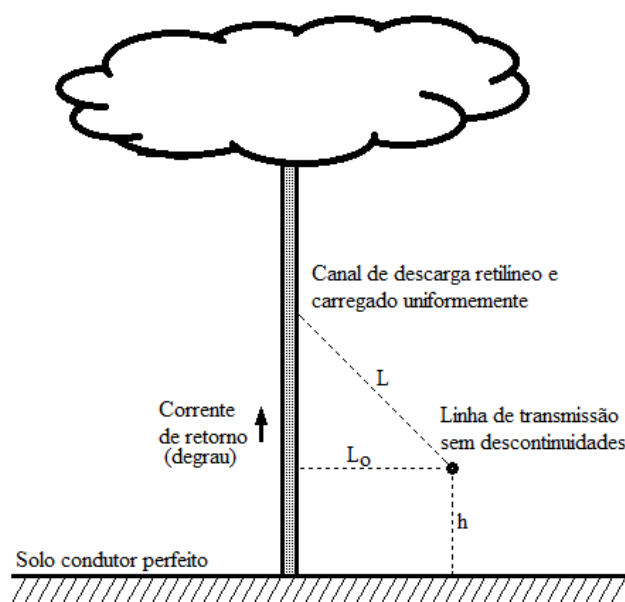


Figura 4.1 – Modelo para cálculo da tensão induzida em linhas de transmissão

Apesar de sua simplicidade, a teoria de Rusck traz resultados satisfatórios na maioria dos estudos de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. Mesmo a existência de teorias similares mais complexas, que consideram aspectos como as descontinuidades da linha, ou corrente de retorno variável pelo canal, muitas vezes não justificam se ignorar o modelo matemático de Rusck.

4.2.2. Cálculo da Tensão Induzida

Em seu estudo, Rusck observou que a tensão induzida em linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas indiretas é diretamente dependente com a taxa

de variação do campo elétrico produzido. Em outras palavras, a tensão induzida varia de acordo com a derivada da onda do campo elétrico no tempo.

Deste modo, para o cálculo da tensão induzida, primeiramente deve-se conhecer os campos eletromagnéticos que são produzidos pela incidência de uma descarga atmosférica.

De modo geral os campos eletromagnéticos são compostos por dois potenciais – escalar e vetor magnético, sendo que a soma deles proporcionam o campo eletromagnético resultante.

O potencial escalar é a parcela do campo elétrico criada pelas cargas presentes no canal de descarga, que como dito anteriormente, distribuem-se homogeneamente pelo mesmo. Esta parcela do campo elétrico também é chamada de componente conservativa do campo, pelo fato de seu rotacional ser nulo e dessa forma poder ser escrito como o gradiente de um campo escalar, ou seja:

$$\vec{E}_e = -\vec{\nabla} v_i \quad (4.1)$$

Onde:

\vec{E}_e é o vetor campo elétrico conservativo;

v_i é o potencial escalar.

A determinação do potencial escalar é dada pela equação 4.2:

$$v_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q\left(s, t - \frac{L}{v_o}\right)}{L} ds \quad (4.2)$$

Onde:

v_o – é a velocidade da luz no vácuo (m/μs);

ϵ_0 – é a permissividade elétrica do vácuo (F/m);

t – Tempo decorrido a partir do início da corrente de retorno [s];

L – distância da linha até o ponto do canal de descarga sob análise (ver Figura 4.1).

$q(s, t)$ – Carga elétrica por unidade de comprimento, distribuída no canal de descarga. Como Rusck propõe a carga elétrica homogênea pelo canal de descarga, a equação 4.2 se torna uma expressão com resolução facilitada.

O potencial vetor magnético é a componente do campo eletromagnético criada pela corrente que flui pelo canal de descarga. Por sua vez, o potencial vetor magnético é chamado de conservativo, já que este não se caracteriza pela existência de potenciais e que a força deste campo sobre uma carga que se desloca dentro dele depende da velocidade da carga e do ângulo que ela faz com as linhas do campo. Assim, esta parcela compõe o campo elétrico da seguinte forma:

$$\vec{E}_v = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4.3)$$

Onde:

\vec{E}_v – Campo elétrico não-conservativo;

A_i - Potencial vetor magnético.

A determinação do potencial vetor magnético é dada pela equação 4.4:

$$\vec{A}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I\left(s, t - \frac{L}{v_0}\right)}{L} ds \quad (4.4)$$

Sendo:

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo;

$I(s,t)$ – Corrente de retorno variante no tempo e pelo canal de descarga. Considerando-se esta corrente invariável no comprimento do canal e no tempo – como Rusck propôs, o processo de resolução da equação 4.4 torna-se facilitado.

Desta forma, o campo elétrico resultante, necessário para o cálculo da tensão induzida, pode ser dado pelo somatório de suas parcelas, como mostra a equação 4.5.

$$\vec{E}_r = -\vec{\nabla}v_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (4.5)$$

A partir do campo elétrico, foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo da tensão induzida nas linhas, de forma que fosse representada a interação do campo com os condutores da linha para origem destas tensões.

Para desenvolvimento de um equacionamento que representasse esta interação, considerou-se o sistema apresentado na Figura 4.2.

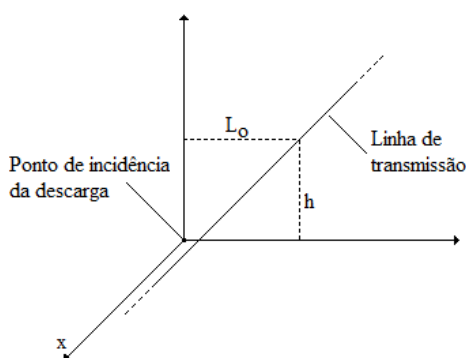


Figura 4.2 – Orientação da linha em relação a descarga.

Salienta-se, que o propósito do equacionamento a ser desenvolvido por Rusck é obter um valor de tensão induzido em um ponto da linha. Para esta expressão, considerou duas contribuições do campo na tensão induzida: V_1 e V_2 ,

representando as contribuições do lado esquerdo e direito do eixo x a partir do ponto de incidência da descarga, respectivamente. Assim, pode-se dizer que a tensão induzida pode ser representada por:

$$V = V_1 + V_2 \quad (4.4)$$

Sabe-se também que estes valores estão relacionados com o ponto de análise da linha (x) e com o tempo decorrido a partir do início da corrente de retorno (t). A partir dos equacionamentos para os campos, Rusck desenvolveu uma expressão analítica para cada um destes valores de tensão, como é mostrado nas equações 4.5 e 4.6.

$$V_{1(x,t)} = Z_o I_o h \beta \frac{v_0 t - x}{L^2 + \beta^2 (v_0 t - x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (v_0 t - x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + L^2)}} \right] \quad (4.5)$$

$$V_{2(x,t)} = V_{1(-x,t)} = Z_o I_o h \beta \frac{v_0 t + x}{L^2 + \beta^2 (v_0 t + x)^2} \left[1 + \frac{-x + \beta^2 (v_0 t + x)}{\sqrt{\beta^2 (v_0 t)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + L^2)}} \right] \quad (4.6)$$

Onde:

Z_o – Impedância característica do canal de descarga dada por:

$$Z_o = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\mu_o / \epsilon_o} = 30 \text{ ohms};$$

$$\beta = v/v_0;$$

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo [H/m];

ϵ_0 – Permissividade elétrica do vácuo [F/m];

I_0 – Valor de pico da corrente de retorno [kA];

h – Altura do condutor da linha de transmissão [m];

v_0 – Velocidade de propagação da luz [m/μs];

v – Velocidade de propagação da corrente de retorno [m/μs];

t – Tempo decorrido a partir do início da corrente de retorno [s];

x – Distância entre o ponto de cálculo da tensão induzida e o ponto da linha mais próximo da descarga [m].

L – Menor distância entre a linha e o canal de descarga

Tomando-se somente o ponto da linha mais próximo da descarga, ou seja, para $x=0$, pode-se escrever a equação para tensão induzida em função do tempo.

$$V_{(t)} = 2Z_0 I_0 h \frac{vt}{L^2 + (vt)^2} \left[1 + \frac{\beta vt}{\sqrt{(vt)^2 + L^2(1 - \beta^2)}} \right] \quad (4.7)$$

A partir desta equação é possível se obter a expressão que representa a onda da tensão induzida em uma linha de transmissão.

Existem algumas divergências para o valor da velocidade da onda da corrente de retorno, com valores entre 60 e 240 m/μs [39]. A elevada amplitude aliada a um tempo de frente reduzido faz com que esta corrente possua uma elevada taxa de subida, sendo ela a principal causadora da tensão induzida [39]. O guia do IEEE para desempenho de linhas [7, 8] recomenda a utilização do valor de velocidade de 120 m/μs.

Ao combinar um modelo básico de descarga com o modelo simplificado de Rusck, levando-se em consideração uma velocidade de propagação da onda de corrente de 120 m/ μ s, o pico de tensão induzida em um condutor sobre a terra pode ser determinado pela expressão (4.8).

$$V_{\max} = 38,8 \frac{I_0 h}{L} \quad (4.8)$$

Onde:

V_{\max} = Máxima tensão induzida no condutor [kV];

A equação 4.8 é bastante utilizada para obtenção de resultados diretos e rápidos principalmente em casos que se queira uma visão geral do fenômeno, ou apenas para se conhecer a grandeza do pico da tensão induzida.

Nesta dissertação, para um estudo mais amplo do fenômeno, será utilizada a equação 4.7, a partir da qual será possível verificar a influência de algumas das características da descarga atmosférica, como da velocidade de propagação da corrente de descarga, de sua amplitude, da altura da linha e da distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha de transmissão (L). Deste modo, a partir da equação 4.7 será desenvolvido, no *software* EMTP/ATPDraw, um modelo para a obtenção da tensão induzida por descargas atmosféricas a fim de se analisar o impacto de algumas variáveis que compõem o fenômeno na tensão induzida.

4.3. O *Software* EMTP/ATPDraw

A ferramenta utilizada para implementação das idéias expostas nesta dissertação é o EMTP/ATPDraw, sendo que se faz necessário uma breve introdução sobre o mesmo. Não se pretende aqui apresentar todas as potencialidades do *software*, visto que o mesmo é muito abrangente e o seu conhecimento total requer longo tempo de dedicação.

4.3.1. Histórico do Software EMTP/ATP

O *software* ATP tem origem nos trabalhos de Herman W. Dommel na década de 60, quando estava ligado a *Bonneville Power Administration* (BPA).

Dommel desenvolveu a ferramenta computacional EMTP, a qual inicialmente somente permitia a modelagem de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, resistências, capacitâncias representados por parâmetros concentrados para os quais se utilizava a regra de integração trapezoidal nas simulações. Ainda existia modelos de linhas sem perdas, que por sua vez utilizavam o método de Bergeron para sua solução.

A partir de 1973 Dommel foi para a Universidade de British Columbia (UBC) e Scott Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa na BPA.

A partir de então, a coordenação da BPA, estabeleceu uma rede de interação com os usuários do EMTP pelo mundo, criando-se grupos de estudos do EMTP na Europa, Índia, Japão, Austrália e América Latina.

Por ser uma empresa pública, a BPA sempre distribuiu o *software* EMTP gratuitamente, o que se constituiu em um dos fatores mais importantes para o seu desenvolvimento e difusão em todo o mundo. No entanto, em 1982 foi criado o DCG (*Development Coordination Group*) com a finalidade de produzir uma versão mais amigável do programa. Então foi lançada a versão M39 e a DCG decidiu convertê-la em propriedade exclusiva de seus componentes, o que gerou divergências entre os que trabalhavam no seu desenvolvimento.

Estas divergências culminaram na criação do Leuven EMTP Center (LEC), situado na Bélgica, onde Scott Meyer lançou uma versão livre para microcomputadores e computadores de grande porte, baseada na versão M39, a qual recebeu o nome de ATP (*Alternative Transient Program*). A partir de então o LEC assumiu o papel de distribuidor mundial do programa.

A ação da LEC em conjunto com os grupos de estudos existentes pelo mundo, além de disseminar a ferramenta, ajudou em sua consolidação já que tais grupos colaboraram com pesquisas a fim de melhorar os modelos existentes, criar novos modelos e atualizar a documentação existente. Deste modo o EMTP/ATPDraw se tornou uma ferramenta bastante poderosa e respeitada para a execução de estudos de fenômenos transitórios.

4.3.2. A Ferramenta ATPDraw

A origem do ATPDraw está no EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), o qual foi um dos primeiros programas desenvolvidos para simulação computacional de transitórios eletromagnéticos. O EMTP é um programa computacional utilizado para simular transitórios eletromagnéticos, eletromecânicos e sistemas de controle em uma rede multifásica de sistemas elétricos de potência em geral.

O estudo de transitórios eletromagnéticos abrange uma grande quantidade de fenômenos, os quais são provocados por variações súbitas de tensão ou corrente em um sistema elétrico. Sua origem está relacionada à incidência (direta ou indireta) de descargas atmosféricas, faltas ou chaveamentos no sistema elétrico. O estudo de transitórios pode levar à especificação dos dispositivos de proteção, verificar a coordenação de isolamento de um sistema elétrico, ou ainda permitir a determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

O programa ATPDraw permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com figurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método de Bergeron para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O *software* traz soluções discretas no tempo, onde são calculados valores a intervalos de tempo mínimos, ou seja, em passos de integração (Δt).

Podem ser representados elementos lineares, não lineares, elementos com parâmetros concentrados ou distribuídos além da combinação destes elementos para representação dos vários componentes que formam o sistema. Na solução matemática também pode ser utilizado o método dos componentes simétricos, onde são considerados parâmetros em componentes de fase e de sequência zero, positiva e negativa.

A documentação do EMTP consiste basicamente de um manual [45], onde estão todas as informações sobre os modelos disponíveis. O LEC's journals apresenta artigos de interesse dos usuários do programa e novidades que envolvem o *software*. Além disto, existem vários estudos publicados em entidades, conferências e congressos sobre o EMTP/ATPDraw pelo mundo todo.

4.3.3. A linguagem MODELS

A rotina MODELS foi desenvolvida por Laurent Dubé, que também é o autor da TACS (outra rotina interna do EMTP), concebida como uma ferramenta que complementa o *software* EMTP, a fim de que o mesmo possa realizar simulações de algoritmos genéricos.

A MODELS é uma linguagem de programação de alto nível, o que traz uma maior facilidade de modelagem e flexibilidade para as simulações no EMTP. Esta rotina permite a modificação de parâmetros numéricos e/ou analógicos, de modo a controlar a lógica de funcionamento de componentes elétricos do sistema simulado, além da criação de modelos elétricos diferentes daqueles já encontrados no *software*.

Apesar de similar a outras linguagens de alto nível como Pascal, a MODELS possui funções e sintaxes específicas de aplicação para a representação da operação contínua de sistemas dinâmicos no EMTP.

Por meio da modelagem de componentes através de procedimentos, funções e algoritmos, a MODELS permite ao *software* a criação de bibliotecas de modelos em função das necessidades do usuário, o qual não se limita a utilização do conjunto pré-definido de componentes existentes. Funções adicionais podem ser definidas pelo usuário, sob a forma de expressões parametrizadas, listas de pontos e funções externas programadas.

A linguagem proporciona um mecanismo para a estruturação do modelo em componentes independentes, através da possibilidade de seu uso dentro de outros sub-modelos e até de um modelo mais complexo, com alteração de parâmetros de entrada do usuário, valores provenientes do circuito elétrico (sinal de tensão, corrente, estado de chaves ou ainda variáveis internas do próprio *software*) e valores de saída da MODELS (em forma de sinal de tensão ou corrente).

A simulação do modelo é basicamente executada em duas fases: uma fase de inicialização e outra de atualização. Procedimentos detalhados podem ser definidos tanto para a fase de inicialização quanto para a fase de operação do modelo. A cada passo de integração (Δt) o circuito elétrico é simulado, e é dado um resultado discreto, de modo a se formar um resultado final de todo o período analisado.

4.4. O Modelo Desenvolvido

O modelo desenvolvido nesta dissertação teve como base a teoria de Rusck aplicada ao *software* EMTP para o estudo dos efeitos da onda de tensão induzida em uma linha de transmissão.

O *software* EMTP trabalha no domínio do tempo e deste modo o modelo da fonte de tensão induzida deve seguir tal critério, no que tange as características de sua forma de onda.

A equação 4.8 retorna apenas o valor de pico da onda de tensão induzida. No entanto, para representação da tensão induzida no *software*, é necessário um equacionamento para a forma de onda da mesma. Em vista disto será desenvolvido um modelo de fonte de tensão induzida a partir da equação 4.7, para que os impactos deste fenômeno possam ser estudados com maiores detalhes.

Outro fato importante para se utilizar a equação 4.7 é que com um modelo desenvolvido a partir dela será possível verificar a influência da variação de alguns parâmetros na onda de tensão induzida, como a velocidade de propagação da onda da corrente de retorno, da amplitude desta corrente, da altura da linha e da menor distância entre a descarga e a linha.

Primeiramente determinaram-se os parâmetros de entrada do usuário, ou seja, as variáveis que o usuário escolhe e muda de acordo com as características do caso simulado. No modelo implementado, tais variáveis são:

- Amplitude da corrente de retorno (I_0);
- Altura da linha (h);
- Menor distância entre a linha e a descarga;
- Velocidade de propagação da onda da corrente de retorno;
- A impedância de surto da linha.

Utilizou-se também as constantes envolvidas no fenômeno de descarga atmosférica, necessárias na modelagem, quais sejam:

- Impedância do canal de descarga, considerada igual a 30 ohms, e;
- A velocidade de propagação da luz, igual a 300 m/ μ s.

Apesar de se tratar de um cálculo de tensão induzida na linha, a fonte modelada será do tipo fonte de corrente. Isto acontece pelo fato de que a representação de uma fonte de tensão implica em alguns inconvenientes para a simulação do modelo.

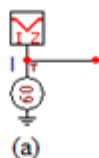
Considera-se uma simulação, na qual uma linha em funcionamento normal é assolada por uma tensão induzida originada de uma descarga indireta. Espera-se que a tensão nesta linha se eleve a partir de seu valor nominal, somando-se este, ao valor da fonte modelada, e após algum tempo retornando à tensão inicial (desconsiderando a atuação de qualquer tipo de proteção).

Entretanto, no EMTP a fonte de tensão é representada por uma fonte ideal conectada a um referencial comum (terra). Isto faz com que no ponto em que esta fonte é conectada, a tensão seja rigorosamente igual à tensão da própria fonte. Desta forma, a tensão inicial seria nula, passando por um pico, e após algum tempo voltando ao valor nulo.

A fim de se contornar este inconveniente e se aplicar uma tensão em série com o sistema, optou-se por utilizar na modelagem, uma fonte de corrente. A adaptação do modelo para esta fonte consiste em transformar os valores de tensão induzida calculados em valores de corrente. Para tanto, o valor de corrente desta fonte é dado pela relação entre a tensão e a impedância de surto da linha de transmissão. Esta corrente também deve ser submetida à outra correção, pelo fato de que seu valor é dividido em duas parcelas iguais quando a fonte é inserida em um ponto da linha, sendo que cada parcela da corrente se propaga para extremidades opostas da linha. Deste modo, para que o efeito de tensão induzida seja reproduzido corretamente, o valor da corrente aplicada deve ser dobrado.

Para ilustrar melhor o modelo desenvolvido, a Figura 4.3 mostra a fonte e sua janela de interação com o usuário, no EMTP/ATPDraw.

Como pode ser visto na Figura 4.3(b), o usuário pode escolher e modificar os parâmetros de entrada do problema, bem como modificar tais variáveis para aperfeiçoamento do modelo, ou para verificação da variação destes parâmetros.



MODEL: INDUZI

Attributes

DATA	VALUE
TEMPO	0
ALTURA	40
DISTAN	100
Imax	20
VELOCI	120
ZSURTO	100

NODE	PHASE	NAME
linduz	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Models

Model file: C:\ATP\project\mod\INDUZI Browse... Use As: INDUZI

Hide Lock

OK Cancel Help

(b)

Figura 4.3 – Modelo desenvolvido no EMTP/ATPDraw, (a) fonte de corrente que reproduz os efeitos da tensão induzida e, (b) sua janela de interação com o usuário.

Para maiores detalhes do modelo, a seguir encontra-se o código fonte, em linguagem MODELS, utilizado para implementação da tensão induzida no *software* EMTP/ATPDraw.

MODEL INDUZI

COMMENT

*INDUZI - FONTE DE TENSAO INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFERICAS
INDIRETAS*

ENDCOMMENT

OUTPUT

Iinduz

DATA

ALTURA *{dflt:40.}* -- *Altura dos condutores [m]*

DISTAN *{dflt:100.}* -- *Menor distância entre a Linha e a descarga [m]*

Imax *{dflt:20.}* -- *Pico de corrente da descarga [kA]*

VELOCI *{dflt:120.}* -- *Velocidade da onda de corrente de retorno [m/μs]*

ZSURTO *{dflt:30.}* -- *Impedancia de surto da linha [ohms]*

VAR

beta

A

B

C

D

Vinduz

Iinduz

Tl

INIT

A := 0

B := 0

C := 0

D := 0

beta := 0

```

Vinduz:=0
Iinduz:=0
T1:=0
ENDINIT
EXEC
T1:=t*1000000
beta := VELOCI/300
A:=2*30*Imax*altura*beta*VELOCI*T1
B:= (DISTAN*DISTAN)+( beta*VELOCI*T1)*(beta*VELOCI*T1 )
C:= beta*beta*VELOCI*T1
D:= (beta*beta*VELOCI*VELOCI*T1*T1)+( DISTAN*DISTAN*(1-(beta*beta) ) )
Vinduz := (A/B)*(1+(C/(SQRT(D))))
Iinduz:=2*Vinduz/ZSURTO
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Com o intuito de se observar a onda de tensão induzida produzida pelo modelo, modelou-se um circuito resistivo, sem se preocupar com parâmetros elétricos de linha. Para se obter a tensão induzida considerou-se a descarga incidindo a 100 metros da linha, a qual possui altura de 30 metros. Levou-se em conta uma corrente de retorno de 10 kA com velocidade de propagação de 120m/μs. A onda de tensão induzida gerada é mostrada na Figura 4.4.

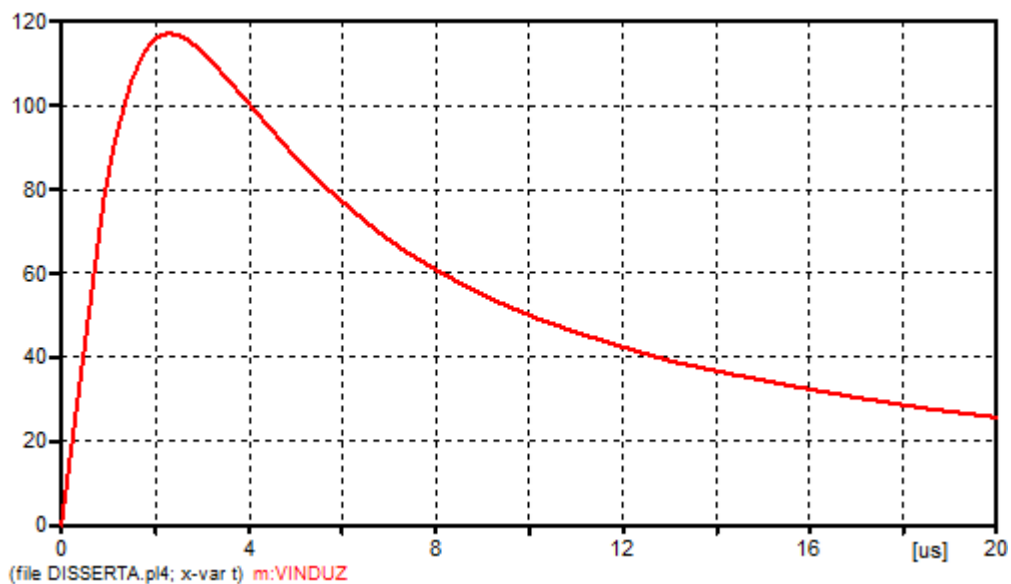


Figura 4.4 – Onda de tensão induzida produzida pelo modelo desenvolvido

Com o modelo para representação da tensão induzida implementado, tem-se a necessidade de sua verificação. Para tanto, no capítulo 5 será desenvolvido um exemplo no EMTP/ATPDraw para que seja possível a obtenção de resultados bem como a análise dos mesmos, a fim de se avaliar o efeito da tensão induzida por descargas atmosféricas nas proximidades das LT's.

CAPITULO 5 – Estudo de Casos Utilizando o Modelo Desenvolvido

5.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados resultados do modelo desenvolvido no EMTP/ATPDraw. Tais resultados possibilitaram a análise dos parâmetros que influenciam a onda de tensão induzida.

Comparações de resultados do modelo com medições serão realizadas tomando-se como base a pesquisa realizada por P. P. Barker, possibilitando a verificação da eficácia do modelo implementado.

Além disso, será verificada a propagação da onda de tensão induzida em uma linha de transmissão, bem como estudar a possibilidade da ocorrência de um “*flashover*” devido ao fenômeno.

5.2. Comparação Entre Resultados do Modelo Implementado e Medições

Para comparação dos resultados de simulações, foi implementado um modelo baseado na pesquisa realizada por P. P. Barker [24]. Com a ajuda do *Electric Power Research Institute*, Barker realizou medições de tensões induzidas em uma linha experimental de aproximadamente 680 metros. Esta linha possuía dois condutores em distribuição vertical, o superior com 7,5 metros de altura e o segundo 1,82 metros abaixo do primeiro. A linha ainda era composta de 15 postes de madeira com vão médio de 45,33 metros. A impedância de surto da linha era de 455 ohms, sendo que as extremidades da mesma eram aterradas por meio de uma resistência de 455 ohms. A Figura 5.1 mostra as características desta linha.

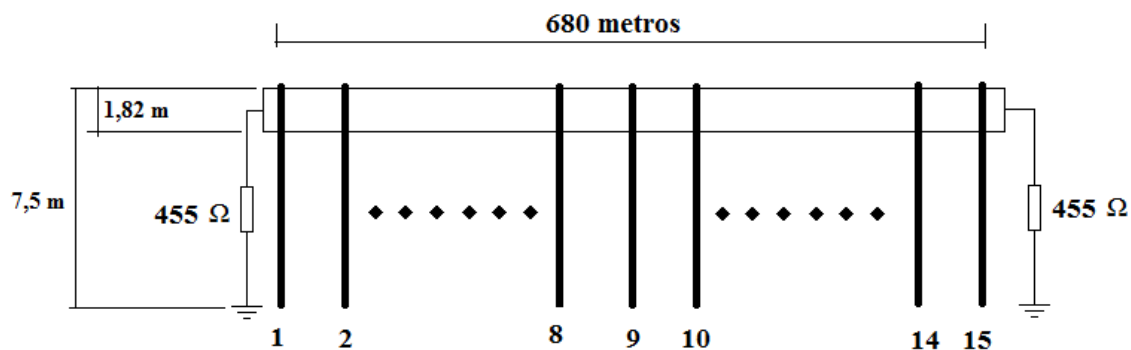


Figura 5.1 – Configuração utilizada por Barker para medição de tensões induzidas.

As descargas eram provocadas artificialmente, por meio de lançamento de foguetes, a uma distância de 145 metros do poste 9 da linha, sendo esta a menor distância entre a linha e o local da descarga. As tensões induzidas foram medidas no início e final da linha (postes 1 e 15) e também no poste 9. Simultaneamente às tensões, as correntes de retorno também eram medidas a fim de se obter mais detalhes do fenômeno. A Figura 5.2 mostra uma onda de corrente de surto e de tensão induzida por esta corrente, medidas simultaneamente.

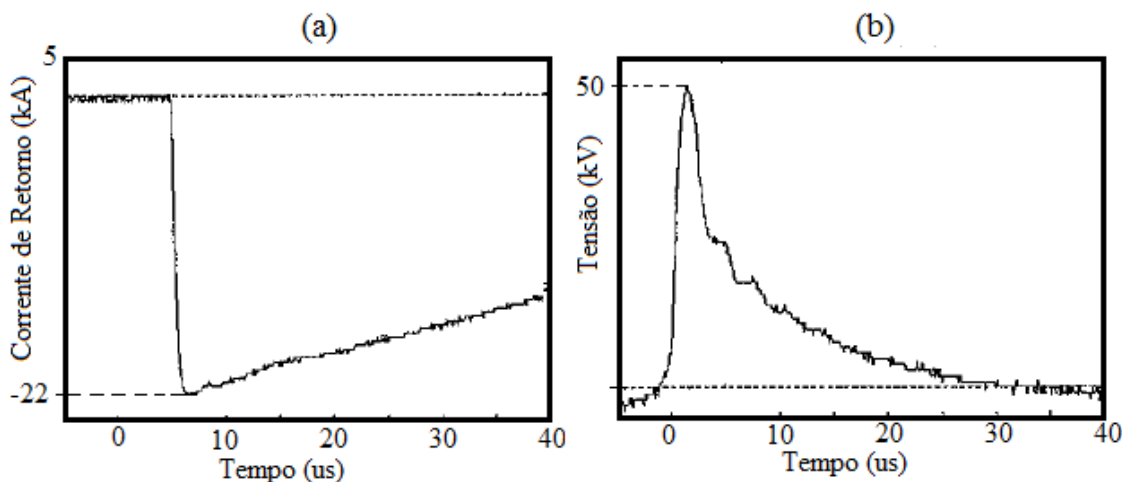


Figura 5.2 – Medições simultâneas de (a) corrente de retorno e (b) de tensão induzida na linha.

Neste primeiro caso as impedâncias das torres foram desconsideradas, já que além de não energizados, os cabos estão conectados entre si, sendo a influência das torres insignificante. Dentre as variáveis da descarga, a velocidade da onda

da corrente de retorno é a única que não pode ser determinada através do modelo descrito. Pode-se considerar esta velocidade com valor recomendado pelo IEEE [6,7] ($120\text{m}/\mu\text{s}$), entretanto, neste estudo serão realizadas simulações para valores de velocidade da corrente de 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 e $220\text{m}/\mu\text{s}$, para que se possa chegar a uma onda mais próxima àquela medida por Barker.

A Figura 5.3 mostra as tensões induzidas simuladas para os valores de velocidade considerados para a onda de corrente de retorno.

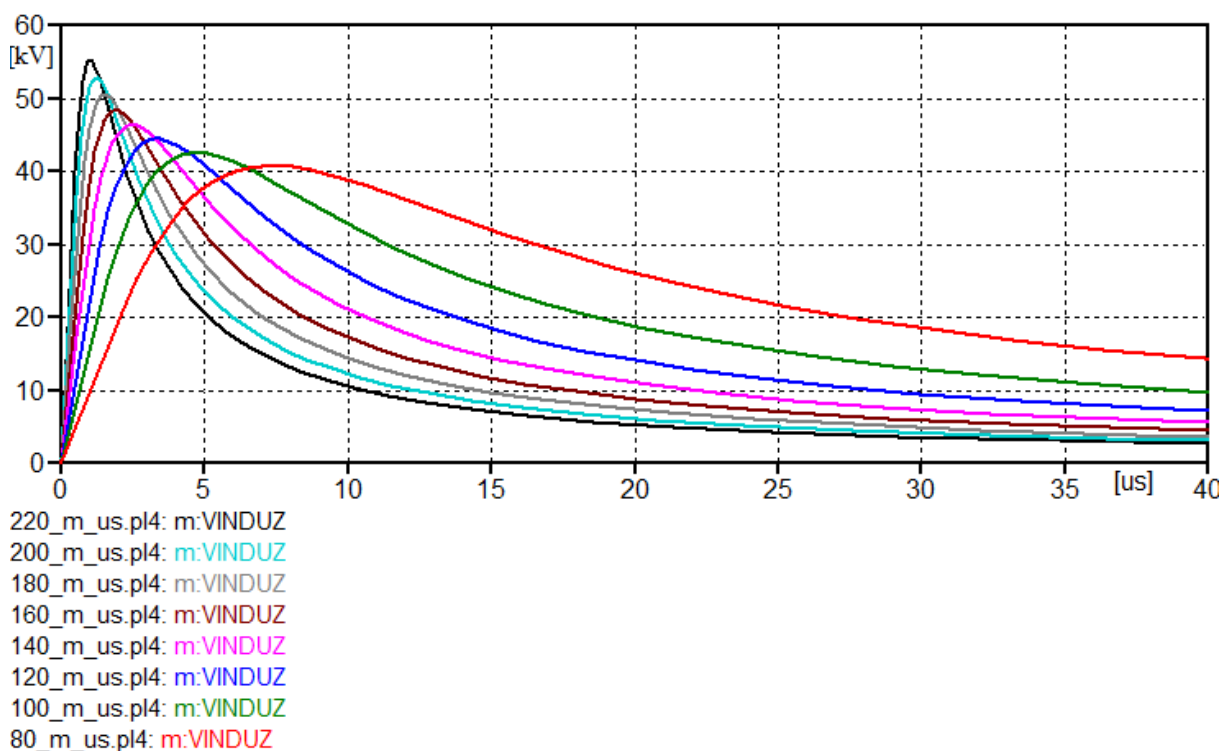


Figura 5.3 – Ondas de tensão induzida resultantes de simulações com varias velocidades da onda de corrente.

Para comparação entre a onda de tensão medida e a simulada devem-se tomar como base critérios característicos das mesmas. Analisando-se a Figura 5.2(b), nota-se que o pico de tensão induzida chega a 50kV e diminui rapidamente. Considerando-se estes critérios, a onda de tensão da Figura 5.3 que mais se aproxima àquela medida é a onda obtida a partir de simulações levando-se em conta uma corrente de retorno com velocidade de $180\text{m}/\mu\text{s}$. Deste modo, nas

simulações seguintes, será considerada esta velocidade para a onda de corrente de retorno.

É importante salientar que estas medições são provenientes de descargas atmosféricas provocadas por lançamentos de foguetes. Apesar de descargas desse tipo terem amplitudes semelhantes às descargas naturais, alguns parâmetros, como tempo de crista e tempo de cauda da onda de corrente, são diferenciados [24]. Assim, os valores de velocidade também podem ser diferentes para os dois tipos de descargas.

Para certificação do valor de velocidade escolhido, apresenta-se a seguir mais alguns resultados tendo-se como base outras medições apresentadas no trabalho de Barker.

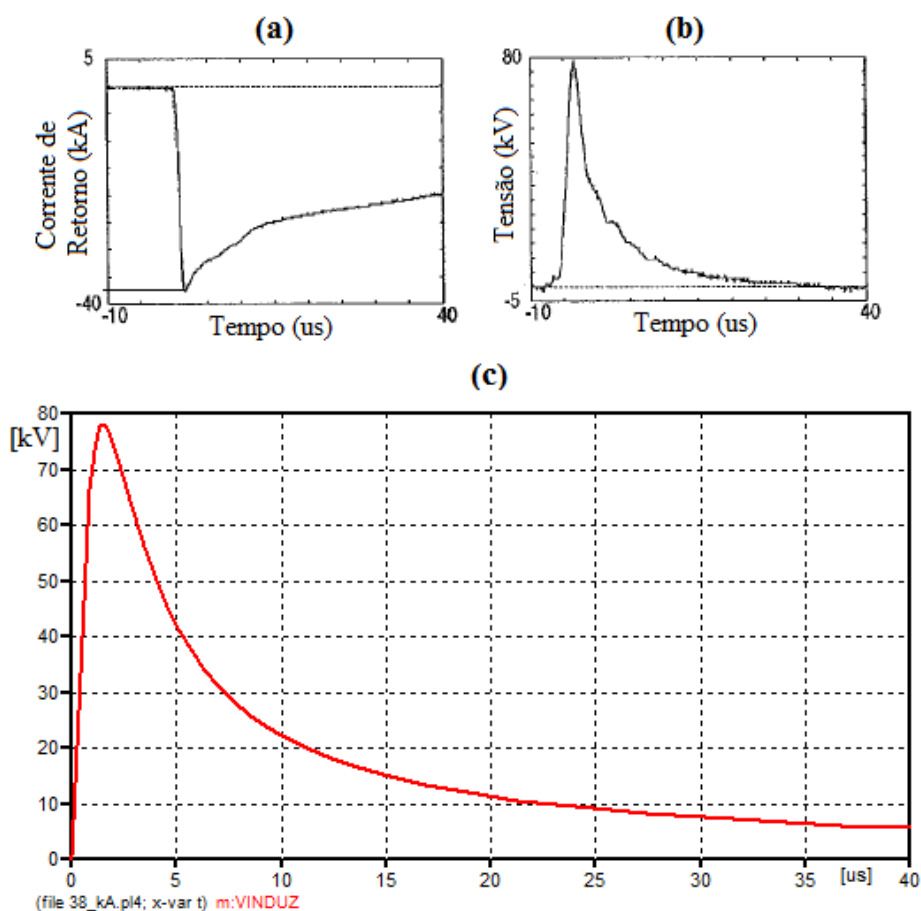


Figura 5.4 – Medições da (a) corrente de retorno, da (b) tensão induzida, e (c) respectivo resultado de simulação para um segundo caso de descarga atmosférica.

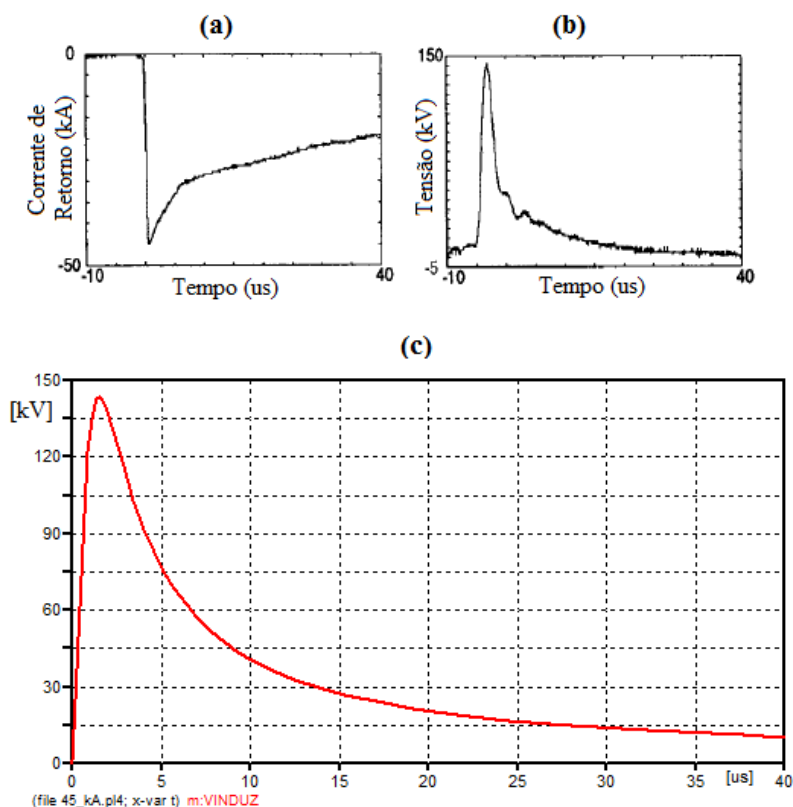


Figura 5.5 – Medições da (a) corrente de retorno, da (b) tensão induzida, e (c) respectivo resultado de simulação para um terceiro caso de descarga atmosférica.

Na Figura 5.4, observa-se um pico de corrente de retorno de 35 kA, a qual provoca uma tensão induzida de 80kV na linha experimental. A simulação para este caso retorna uma onda de tensão semelhante à registrada por Barker. Da mesma forma, pela Figura 5.5, notam-se tensões induzidas, originadas de medição e de simulação, semelhantes.

A partir do momento que todos os parâmetros do modelo desenvolvido foram escolhidos (inclusive a velocidade da onda de corrente), pode-se verificar a influência de alguns deles nos resultados de tensão induzida.

Neste contexto, uma análise a se realizar é a influência da própria velocidade da onda de corrente nos resultados de tensão induzida. Observa-se pela Figura 5.3 que quanto menor é a velocidade, menor é o pico de tensão induzida. Além disso, valores menores de velocidade resultam em tempos de subida e de acomodação da onda de tensão induzida relativamente longos.

Outro aspecto a se verificar é a variação do pico da corrente de retorno. Para uma melhor comparação dos resultados, a Figura 5.6 mostra as ondas de tensão induzida para simulações com três picos de correntes de retorno: 22, 38 e 45 kA.

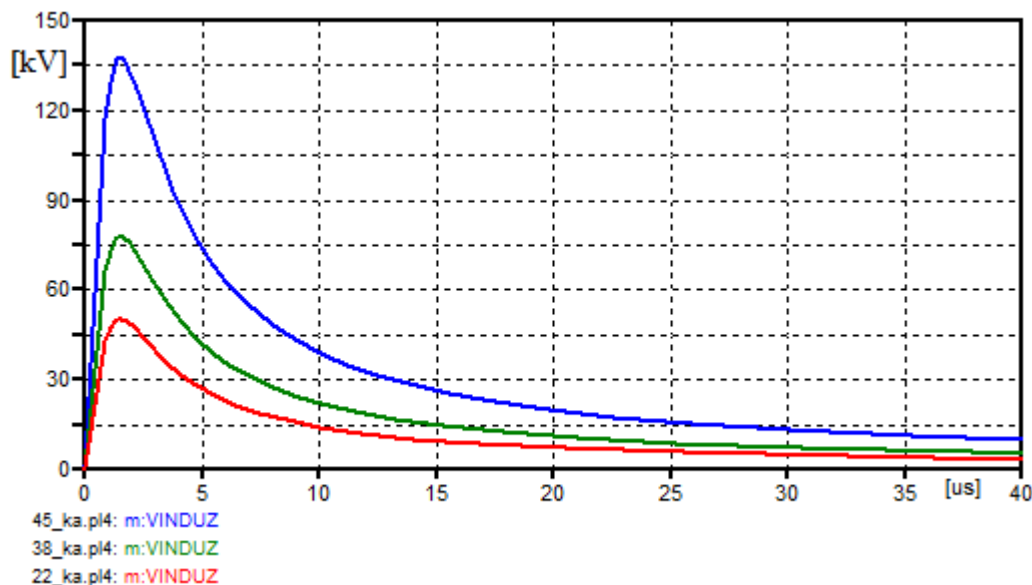


Figura 5.6 – Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a corrente de retorno conforme as medições das Figuras 5.2, 5.4 e 5.5.

Como pode ser visto, com o aumento da corrente de retorno, o valor da tensão induzida também se eleva. Tal análise também pode ser realizada observando-se a equação 4.7.

Barker, em suas medições, não verificou o impacto da variação da altura da linha na tensão induzida, mesmo porque seria inviável modificar a estrutura da linha existente ou até criar outra linha com altura diferente. Da mesma forma, a distância entre a linha e o local onde as descargas eram originadas também não se modificou, devido às dificuldades de locomoção dos equipamentos. Deste modo, não será possível realizar a comparação entre resultados de simulações do modelo com as medições, modificando-se estas duas grandezas de comprimento.

Assim, foram obtidos resultados da tensão induzida para cinco alturas de linhas: 10, 20, 30, 40 e 50 metros de altura. A Figura 5.7 mostra as ondas de tensão induzida obtidas.

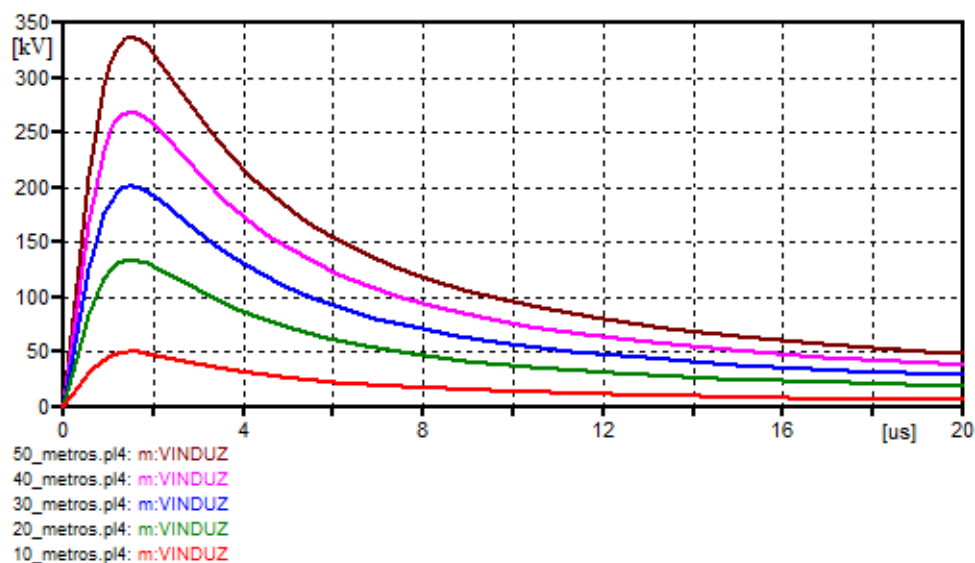


Figura 5.7 - Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a altura da linha.

Observam-se picos de tensões em tempos praticamente iguais, variando-se apenas as amplitudes das ondas. Nota-se também que quanto maior a altura da linha em relação ao solo maior será a amplitude da tensão induzida.

Semelhante à altura, considerou-se alguns valores para a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha. As tensões induzidas obtidas de distâncias de 50, 75, 100, 125 e 150 metros são mostradas na Figura 5.8.

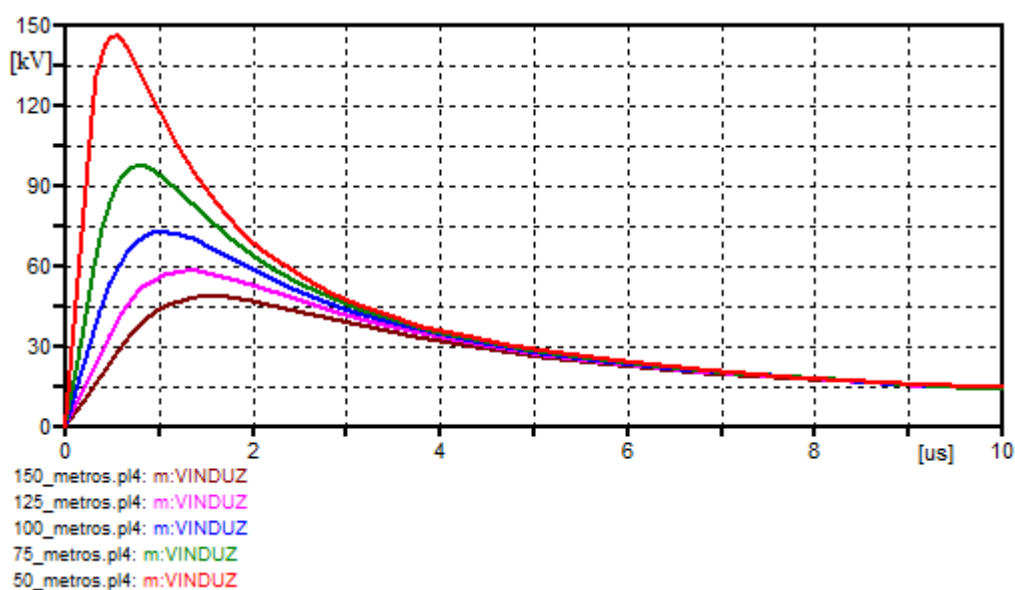


Figura 5.8 - Tensões induzidas obtidas de simulações variando-se a distância entre a descarga e a linha.

Neste caso, nota-se uma relação não linear entre as duas grandezas analisadas, de forma que quanto menor a distância considerada, maior o pico de tensão induzida nos dois primeiros microssegundos. Entretanto, logo após o pico de tensão, a onda acomoda-se rapidamente para um mesmo valor, aproximadamente 25kV em 6 μ s, independente do valor de distância considerado.

Portanto, conclui-se que a distância entre o local de descarga e a linha influencia somente na etapa inicial da onda de tensão induzida, a qual é responsável por seu valor de crista.

Como pode ser visto, a tensão induzida é determinada por vários parâmetros, tornando difícil uma análise generalizada de seus efeitos. Por isso deve-se verificar cada caso, de forma a se dimensionar um sistema de proteção eficaz para se evitar maiores transtornos.

5.3. Estudo de Caso - Modelo de Linha de Transmissão Monofilar

O caso que se pretende analisar a seguir envolve uma linha monofilar, com torres de circuito simples semelhantes àsquelas utilizadas no capítulo 3, mostradas na Figura 3.3(a). Nas simulações também é considerada um nível básico de isolamento (NBI) de 350 kV, característico de linhas com tensão nominal de 69kV. Considerou-se ainda uma impedância de surto da linha de 300 ohms, e suas extremidades ligadas a resistências também de 300 ohms. Além disso, esta linha é composta de 10 torres separadas de 200 metros, com resistência de pé de torre de 10 ohms. A tensão induzida é provocada no meio da linha entre a 5^a e 6^a torres. Inicialmente, a descarga considerada possui uma corrente de retorno com pico de 20 kA, com uma velocidade de propagação de 180 m/ μ s, incidindo a 150 metros da linha.

Neste estudo será considerada a possibilidade de um “*Flashover*” do cabo para uma das torres da linha. Para tanto, implementou-se no modelo, além das torres

(representadas por três linhas monofilares, semelhante á técnica utilizada no capítulo 3), uma chave que liga o condutor da linha ás torres. Esta chave possui contatos normalmente abertos, configurada de forma a atuar quando a diferença de potencial em seus polos ultrapassar o NBI da linha.

Desta forma será possível verificar quais as características da descarga atmosférica para que esta venha a causar um curto-circuito na linha de transmissão. Serão registradas as tensões nos pontos do condutor próximos às torres representadas, e também na própria torre (torre 5), como mostra a figura 5.9.

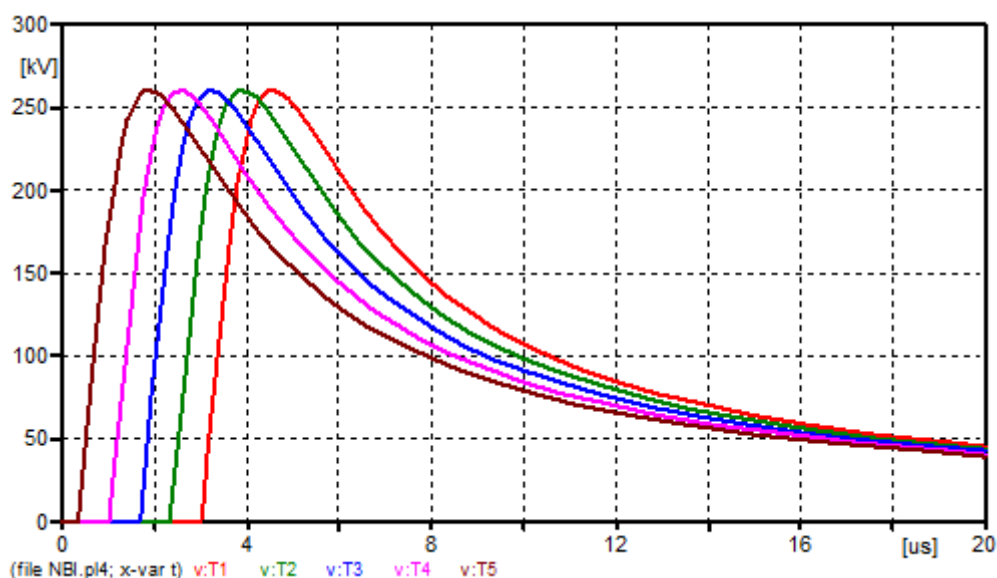


Figura 5.9 – Registros de tensões na linha de transmissão.

Com um pico de tensão pouco maior que 250 kV, verifica-se a onda de tensão induzida viajando pela linha no sentido de sua origem para a sua extremidade. Como a tensão foi menor que o NBI da torre, não haverá ocorrência de um curto-circuito.

Aumentando-se a corrente progressivamente, e mantendo-se os outros parâmetros, até que haja ocorrência de um curto-circuito, verifica-se qual a amplitude de corrente de retorno para uma descarga prejudicar o sistema.

Com uma corrente de retorno 27 kA, a tensão induzida ultrapassa o NBI da linha (350 kV) provocando um curto-circuito na torre mais próxima, ou seja, na quinta torre. As tensões no topo da torre, a 2/3 e 1/3 de sua altura foram registradas, como mostra a figura 5.10.

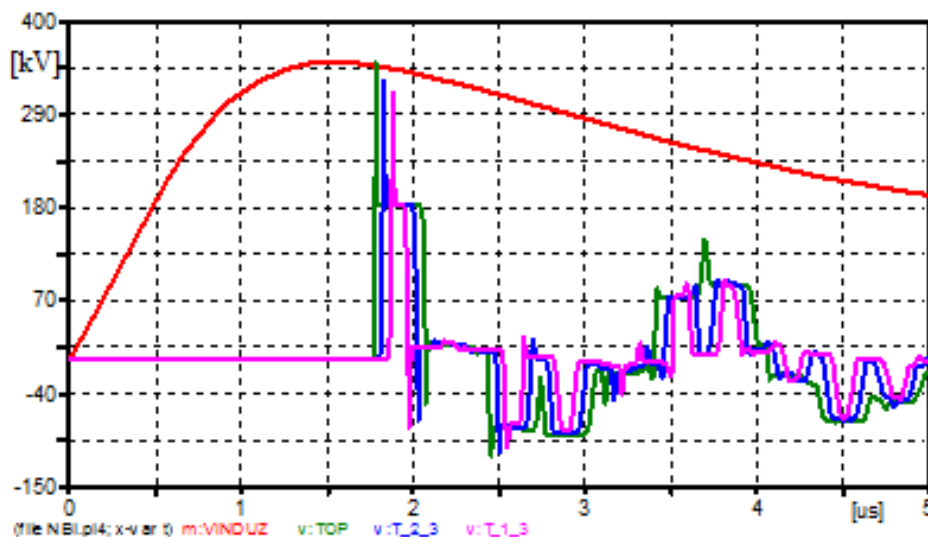


Figura 5.10 – Registros de tensões na torre da linha de transmissão - corrente de retorno de 27 kA.

Percebem-se as reflexões de onda pela torre, fazendo com que a onda de tensão registrada tome hora valores negativos, hora valores positivos.

Voltando-se aos valores iniciais dos parâmetros, e desta vez variando-se a distância da descarga, verifica-se o quão próxima da linha a descarga deve acontecer para que haja um curto-circuito na mesma.

Deste modo, variando-se esta distância até provocar o curto-circuito, as tensões na torre são registradas, como mostra a figura 5.11.

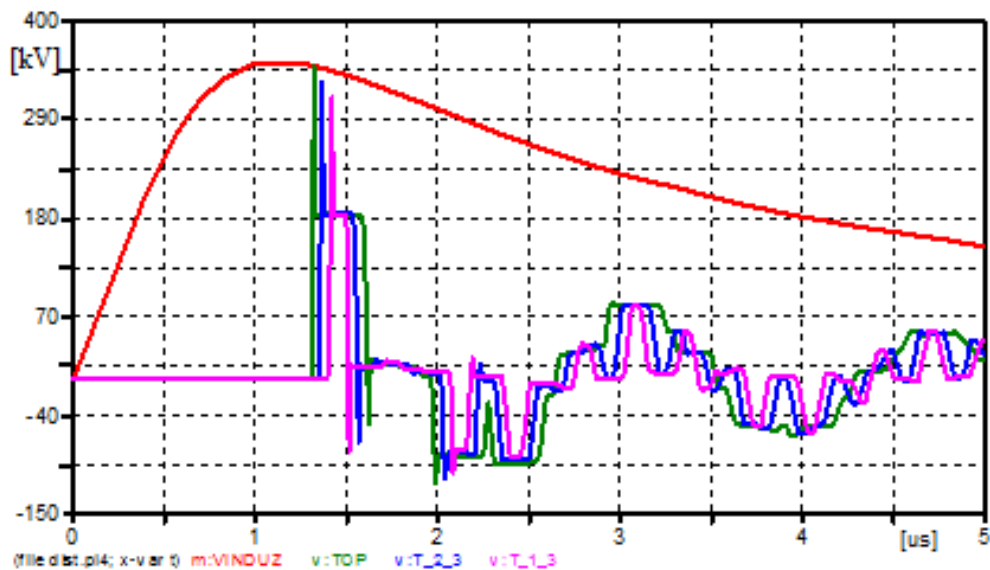


Figura 5.11 – Registros de tensões na torre da linha de transmissão – Descarga a 110 metros de distância da linha.

A 110 metros da linha, uma descarga de 20 kA provoca um curto-circuito. Novamente pode ser visto as reflexões de onda influenciando nas tensões registradas na torre.

Observa-se a partir de 3 microssegundos de simulação nas figuras 5.10 e 5.11 que a onda de tensão na torre possui uma componente de alta frequência. Verifica-se que tal frequência toma valor aproximado de 666 kHz nos dois casos, sendo esta frequência dependente da altura da torre, bem como da distancia entre cada divisão considerada na torre.

5.4. Estudo de Caso - Modelo de Linha de Transmissão Trifásica

Neste ponto, já foram estudados o modelo representativo da tensão induzida comparando-o com medições em campo, e uma linha monofilar a vazio, para verificação da propagação da onda de tensão induzida.

O caso a seguir diz respeito a um modelo mais próximo do que se é encontrado em termos de linhas de transmissão. Foi implementado um modelo de uma linha trifásica, carregada, e operando com tensão nominal. Este estudo é importante

para se verificar a influência da tensão induzida entre as fases, causado pelo acoplamento elétrico entre elas.

Para o modelo implementado, considerou-se uma alimentação proveniente de uma subestação principal de 69 kV, com transformador de potência de 100 MVA, e reatância de 12%, a qual alimenta uma carga de 50 MVA e fator de potência de 0,80. A linha que liga a subestação à carga possui 2 km de extensão, sustentada por 10 torres, semelhantes às torres da Figura 3.3b, as quais estão separadas umas das outras de 200 metros. A linha implementada utilizou o modelo *LINE CONSTANTS* (LCC) do EMTP/ATPDraw, o qual utiliza o método JMARTI para cálculo de seus parâmetros.

A figura 5.12 mostra as tensões nas três fases, na altura da quinta torre, com o sistema operando normalmente.

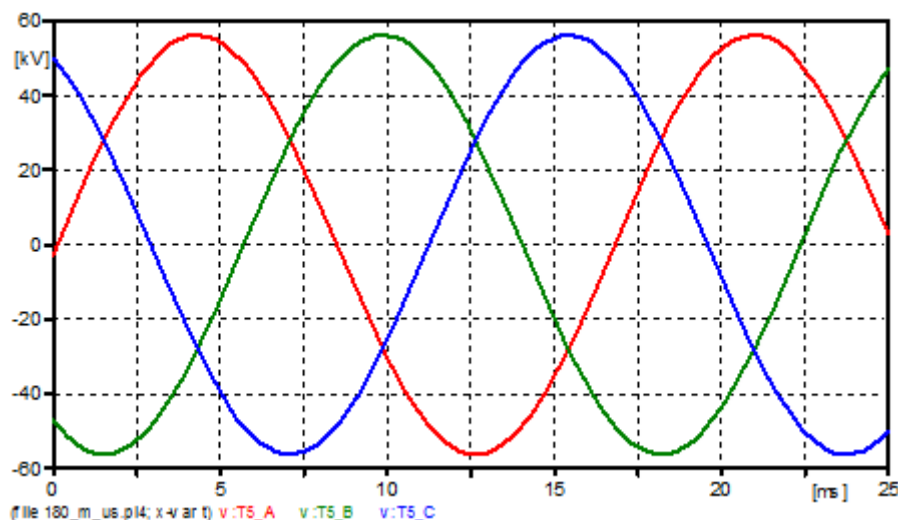


Figura 5.12 – Tensão no meio da linha trifásica modelada.

Como pode se visto, a tensão é nominal, sem qualquer tipo de anomalia. A seguir adiciona-se o modelo de tensão induzida, considerando uma descarga com corrente de retorno de 20 kA, propagando-se na velocidade de 180 m/ μ s, incidindo-se a 150 metros da linha.

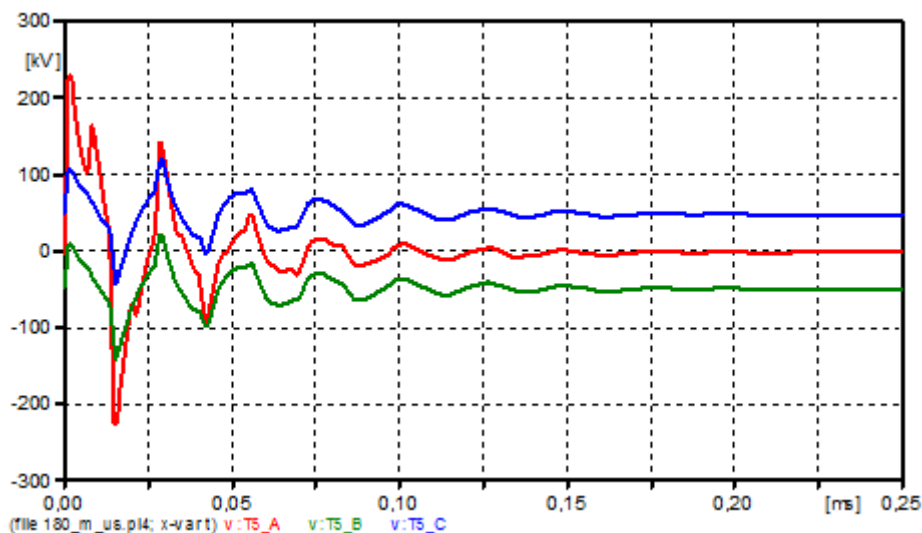


Figura 5.13 – Tensão no meio da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada na fase A.

Nesta análise, a tensão induzida é aplicada somente na fase A, para verificação da tensão nas outras fases. Comparando-se as figuras 5.12 e 5.13, é registrado na fase A uma sobretensão de 230 kV. As fases B e C, mesmo sem a aplicação direta da sobretensão, também sofrem alteração nos valores registrados. A fase B que antes possuía um valor negativo, em um primeiro momento passa a registrar um valor próximo de zero, e logo após oscila até acomodar-se na tensão nominal. Já a fase C passa de um valor de 55kV para 105kV, voltando ao valor nominal após algum tempo.

Ainda percebem-se os efeitos das reflexões de onda após o primeiro pico, fazendo com que ora diminua, ora aumente a tensão registrada.

Entretanto, quando da incidência de uma descarga atmosférica próximo à linha, todas as fases da mesma sentirão seus efeitos e, neste caso, o que diferencia a sobretensão induzida em cada uma delas, são suas alturas. Considerando a distribuição vertical, onde a fase A está a 37 metros, a fase B a 33 e a fase C a 29 metros do solo, obtêm-se novos resultados, como mostra a figura 5.14.

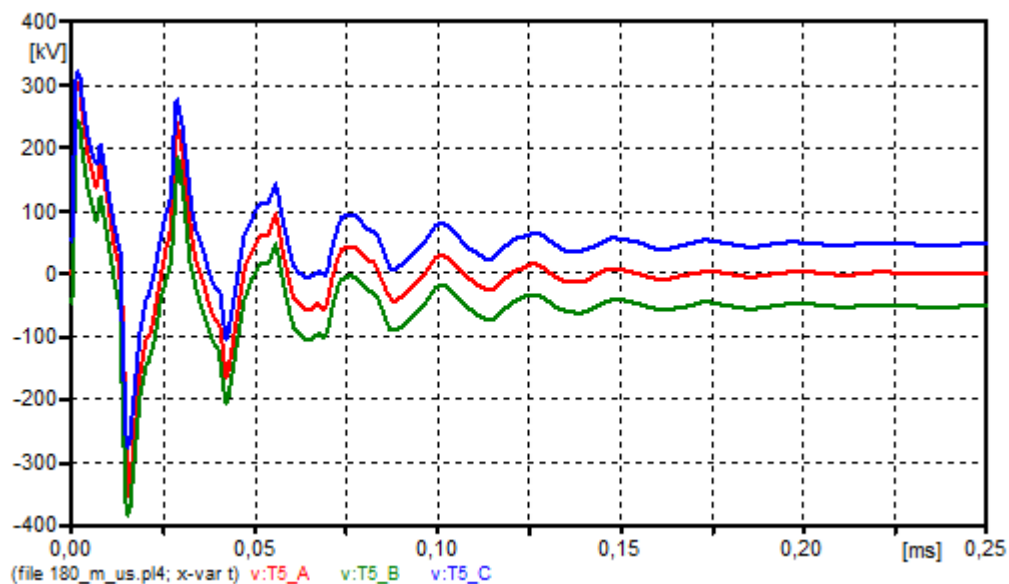


Figura 5.14 – Tensão no meio da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.

Neste caso, as sobretensões sentidas são ainda maiores, chegando a valores próximos a 400 kV nas três fases. A figura 5.15 e 5.16 mostram as tensões registradas próximo à subestação e à carga, respectivamente.

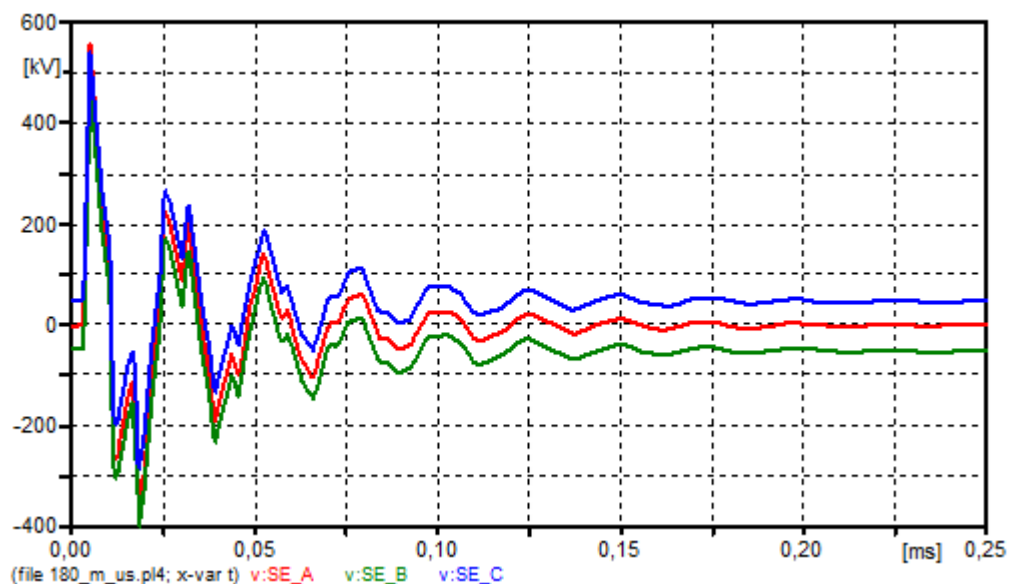


Figura 5.15 – Tensão no início da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.

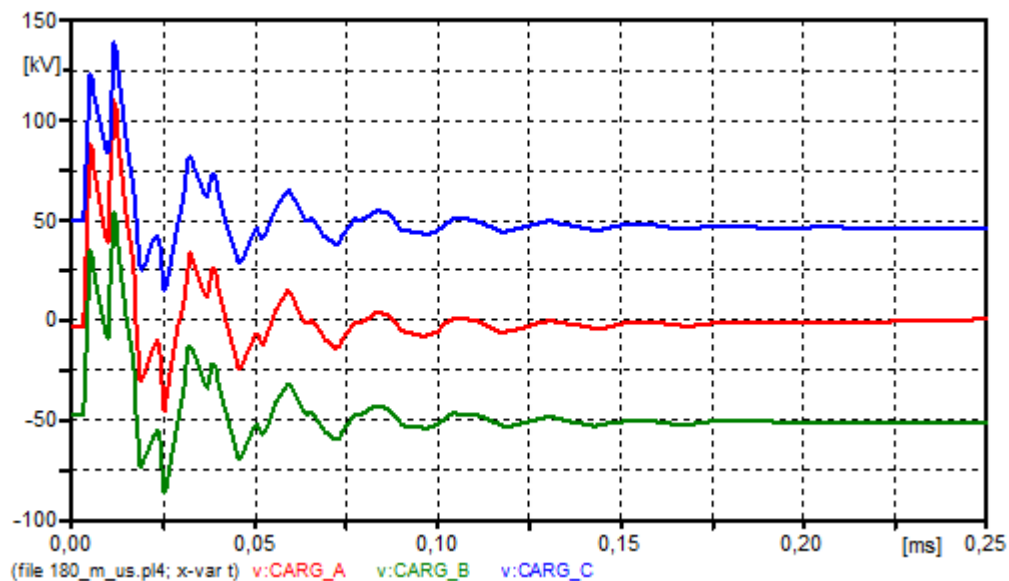


Figura 5.16 – Tensão no fim da linha trifásica modelada, com sobretensão provocada nas três fases.

Como pode ser visto, próximo à subestação foram sentidas sobretensões com valores por volta de 550 kV, o que, sem uma proteção adequada, poderia danificar equipamentos. Já no final da linha, foram sentidas sobretensões menores, por volta de 140 kV, mas com valor significativo.

Como pode ser visto nos estudos anteriores, descargas atmosféricas com características normalmente registradas podem ocasionar o desligamento de uma linha de transmissão. Isto implica no fato das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de linhas serem a principal causa de desligamentos, já que tais ocorrências acontecem com maior frequência.

CAPITULO 6 – Conclusões

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo representar computacionalmente a técnica desenvolvida por Rusck para cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas.

Nos últimos tempos vários pesquisadores vêm estudando este fenômeno devido a sua importância no desempenho das linhas de transmissão. Foi visto que seus efeitos podem prejudicar significativamente a produção industrial, no que diz respeito a perdas financeiras.

Além disso, a interrupção no fornecimento de energia causa grande transtorno para a população. Nos dias de hoje, com a grande dependência do homem em relação aos meios de comunicação, e conseqüentemente à energia elétrica, se torna essencial a garantia de um sistema confiável, com o mínimo de falhas. Para tanto, deve-se garantir que os sistemas de proteção da rede elétrica sejam dimensionados o melhor possível. Sabendo-se que a principal causa de desligamentos são as descargas atmosféricas, é indispensável a análise das tensões induzidas nas linhas de transmissão, para uma proteção adequada.

Primeiramente estudou-se a origem das sobretensões induzidas, ou seja, as descargas atmosféricas. A caracterização das descargas atmosféricas foi realizada com o intuito de identificar e conceituar seus parâmetros, para que se possa entender como a mesma origina sobretensões induzidas nas linhas de transmissão. Por ser um fenômeno aleatório, estudou-se o parâmetro que determina a frequência de incidência de descargas atmosféricas em dado local, neste caso nomeado como densidade de descargas. Principalmente nas proximidades de linhas de transmissão e distribuição, esta característica local deve ser levada em conta.

Como principal causadora da tensão induzida, a corrente de retorno foi caracterizada no que diz respeito às variáveis que a compõe. Sua forma de onda foi analisada, bem como algumas expressões para sua representação matemática, concluindo-se da utilização do método da dupla exponencial para implementação computacional.

Devido à sua importância no estudo do desempenho de linhas, a impedância de surto de torres teve uma maior atenção nesta dissertação. A análise dos métodos clássicos para estimação deste parâmetro mostrou que em alguns casos eles podem gerar resultados diferentes do esperado. Isso acontece devido à simplificação dos modelos de torres em formas geométricas simples. As expressões existentes para determinação da impedância de surto de torres se baseia em modelos geométricos simplificados, que em casos de torres diferenciadas podem não ser adequados para este cálculo.

Assim, foi proposta uma técnica, a qual se baseia na energia potencial elétrica armazenada para o cálculo da impedância de surto. A partir de resultados obtidos de modelos computacionais, os quais aplicam o MEF, e de equacionamentos conhecidos, obteve-se a impedância de surto das torres. Comparando-se resultados foi verificada uma diferença considerável entre o método clássico e o método proposto.

Também foi realizada a análise da variação da impedância de surto pela altura da torre. Um sistema elétrico foi implementado no EMTP/ATPDraw, para verificação do impacto da impedância de surto na onda de tensão que percorre a torre. Em todos os casos foram consideradas torres reais, para as quais foram obtidos resultados computacionalmente.

Para o cálculo das tensões induzidas nas linhas de transmissão, foi apresentada a teoria de Rusck [5]. Em sua teoria Rusck realiza algumas considerações para que a partir de equacionamentos para o cálculo dos campos eletromagnéticos

pudesse chegar a expressão que determina a tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Com base nesta teoria foi proposto um modelo computacional no software EMTP/ATPDraw para a representação da onda de tensão induzida. Tal software consiste em uma ferramenta computacional para estudo de transitórios eletromagnéticos a partir de modelos de sistemas elétricos.

A verificação dos resultados do modelo desenvolvido foi realizada comparando-se os mesmos com medições apresentadas na pesquisa de Barker [24]. Nesta pesquisa foram realizados registros de tensões induzidas por descargas atmosféricas provocadas artificialmente, através de lançamentos de foguetes. Verificou-se assim, que os resultados obtidos a partir da utilização do modelo foram semelhantes às ondas de tensão induzidas registradas por Barker.

Ainda, foram verificadas as influências de alguns parâmetros na onda de tensão induzida. Velocidade da onda da corrente de retorno, amplitude do pico desta corrente, altura da linha e distância da mesma em relação à descarga foram modificados no modelo, para a verificação do impacto sentido na onda de tensão registrada.

Uma linha de transmissão monofilar foi modelada para se analisar a propagação da onda de tensão induzida pela mesma. Neste modelo foram representadas as torres de transmissão, de forma que quando a tensão ultrapassasse o nível básico de isolamento da linha, um curto-circuito fase terra entre a linha e a torre foi provocado. As tensões na torre foram registradas para uma análise do fenômeno.

Outro estudo realizado foi a implementação de um sistema, composto de uma subestação alimentadora, uma linha e uma carga consumidora. A esta linha foi aplicada uma sobretensão induzida para verificação da propagação da mesma pela linha. Observou-se que descargas atmosféricas comumente registradas podem frequentemente prejudicar o sistema elétrico.

Deste modo se faz importante o estudo das sobretensões induzidas em linhas de transmissão, para que o sistema seja projetado adequadamente, no que diz respeito à sua proteção, para que se evitem danos ao mesmo.

6.2. Propostas Para Trabalhos Futuros

O estudo das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas possui uma ampla gama de análise possíveis de se realizar, desde a utilização de métodos diferentes para seu cálculo, à análise de casos específicos.

Uma pesquisa possível de se realizar é a influência da tensão induzida em linhas de circuito duplo. A verificação das tensões induzidas nos dois circuitos, bem como as interações dos acoplamentos elétricos entre eles também pode ser realizada.

As considerações realizadas no estudo de Rusck implicam no questionamento de sua metodologia. Alguns pontos podem ser mudados, já existindo trabalhos neste sentido.

Para trabalhos futuros podem ser considerados na técnica para cálculo das sobretensões a resistividade do solo, como proposto em [12]. Além disso, um estudo aprofundado da variação da corrente de descarga pelo canal, bem como da impedância do mesmo pode ser realizado para verificação de seus impactos na onda da tensão induzida. Uma análise de linhas descontínuas poderia ser realizada com maiores detalhes. Finalmente, as considerações realizadas na teoria de Rusck abrem uma série de discussões, até hoje criticadas por vários pesquisadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WAGNER, K. W., 1908. "Elektromagnetische ausgleichvorgänge in freileitungen und kabeln", Per. 5, Leipzig.
- [2] BEWLEY, L. W., 1929. "Traveling waves due to lightning", AIEE Trans., no. 48, pp. 1050-1064.
- [3] WAGNER, C. F. e MCCANN, G. D., 1942. "Induced voltages on transmission lines", AIEE Trans., no. 61, pp. 916-930.
- [4] GOLDE, R. H., 1954. "Indirect lightning surges on overhead distribution lines", The Electrical Research Association, S/T 75, Leatherhead.
- [5] RUSCK, S., 1957. "Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks", Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [6] CIGRE Working Group 33.01 (Lightning), "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," CIGRE Brochure 63, Paris, Oct. 1991
- [7] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission lines, "IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines," Proposed IEEE P1243 draft (1996).
- [8] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution lines. Approved 09, IEEE Standards Board, IEEE Std 1410TM, IEEE Std 1410TM, Feb. 2004.
- [9] MASTER, M. J. e UMAN, M. A., 1983. "Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole", Am. J. Phys. no.51, pp.118-126.

[10] RUBINSTEIN, M. e UMAN, M., 1989. "Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning", IEEE Trans. on EMC, vol. 31, no.2.

[11] 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;

[12] 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;

[13] 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;

[14] Assis, S. C., Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em Linhas Aéreas Polifásicas e Multiaterradas : Implementação no PSCAD®/EMTDCTM, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2006;

[15] 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;

[16] ZEDDAM, A. e DEGAUQUE, P., 1990. "Current and voltage induced on a telecommunication cable by a lightning stroke", Lightning Electromagnetic, R. L. Gardner Ed., Hem. Public. Corp., pp.377-400.

- [17] COORAY, V. e LUNDQUIST, S., 1983. "Effects of propagation on the rise times and the initial peaks of radiation fields from return strokes", *Radio Science*, Vol. 18, n. 3, pp. 409-415.
- [18] RUBINSTEIN, M., 1996. "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate and long range", *IEEE Trans. on EMC*, vol.38, no. 3.
- [19] NUCCI, C. A., RACHIDI, F., IANOZ, M. V. e MAZZETTI, C., 1993. "Lightning-induced voltages on overhead lines", *IEEE Trans. EMC*, vol. 35, no. 1, pp. 75-86.
- [20] NUCCI, C. A., 2007. "Lightning-induced voltages on distribution systems: influence of ground resistivity and system topology", *Journal of Lightning Research*, vol. 1, pp. 148-157.
- [21] BABA Y. e RAKOV, V.A., 2006. "Voltages induced on an overhead wire by lightning strikes to a nearby tall grounded object", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 48, no. 1, pp.212-224.
- [22] BABA, Y. e RAKOV, V. A., 2008. "Evaluation of lightning return stroke electromagnetic models," 29th Int. Conf. Lightning Protection, Uppsala, Sweden, pp.1a-1-1-8.
- [23] MIMOUNI, A., RACHIDI, F. e AZZOUZ, Z., 2007. "Electromagnetic environment in the immediate vicinity of a lightning return stroke", *Journal of Lightning Research*, vol. 2, pp. 64-75.
- [24] BARKER, P. P.; SHORT, T. A.; EYBERT-BERARD, A. R.; BERLANDIS, J. P. Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2., p. 980-995, 1996.;

- [25] General Electric Company and Electric Power Research Institute, "Transmission line reference book, 345KV and above" Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1982.
- [26] Baba, Y., Ishii M., Numerical Electromagnetic Field Analysis On Measuring Methods Of Tower Surge Impedance, IEEE Transactions on power Delivery, vol. 14, No. 2, 1999.
- [27] Zhang, Z., Sima, W., Zhang, Y., Shu L., The Simulation Model for Calculating the Surge Impedance of a Tower, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 19-22, 2004.
- [28] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H. Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, v. 102, n. 8, p.2420-2427, 1983.
- [29] BARBOSA, C. F., PAULINO, J. O. S., G. C. MIRANDA, W. C. BOAVENTURA, F. E. NALLIN, S. PERSON e A. ZEDDAM, 2008. "Measured and modeled horizontal electric field from rocket-triggered lightning", IEEE Trans. EMC, vol. 50, no. 4, pp. 913-920.
- [30] PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M., 2003. "The extended Rusck model for calculating lightning induced voltages on overhead lines", Proc. of the VIII Int. Symp. on Lightning Protection, Curitiba, Brasil, pp. 151-155.
- [31] 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;
- [32] 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;

[33] 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;

[34] Filho, J. C. S., Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[35] Carvalho, A. M; Diniz, J.H; Cherchiglia, L.C.L; “Obtenção de Densidades de Descargas Atmosféricas para a Terra Através de Contadores de Descargas, Dias de Trovoadas Ouvidas e Sistema de Localização de Tempestades”; in II Seminário.

[36] PINTO JR., O. , PINTO, I. R. C. A. “Tempestades e relâmpagos no Brasil” In: Instituto nacional de pesquisas espaciais, São Jose dos Campos, 2000.

[37] WAGNER, C. F., MCCANN, G. D., CLAYTON, J. M., 1950, “Lightning Phenomena”. In: Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, chapter 18, Fourth Edition, Pennsylvania, United States of America.

[38] U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 1983, Military Standard MIL-1757: Lightning Qualification Test Techniques for Aerospace Vehicles and Hardware. Department of Defense, Washington, D.C., United States of America.

[39] 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;

- [40] DARVENIZA, M., LIMBOURN, G. J., PRENTICE, S. A., 1967, “Line Design and Electrical Properties of Wood”, IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems, n. 11 (September), pp 1344-1356.
- [41] DARVENIZA, M., 1980, Electrical Properties of Wood and Line Design. Queensland, Australia, University of Queensland Press.
- [42] MSWANE, L. M., GAUNT, C. T., 2001, “Lightning Performance Improvement of the Swaziland Electricity Board Transmission System (132 and 66kV)”. In: Proceedings of the Cigre 4th Southern Africa Regional Conference, Cape Town, October.
- [43] CARVALHO, A. M., ABREU, M. S., CARVALHO, A. C., et al., 1997, “Tecnologias para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalações de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas”. In: Proceedings of the IV International Seminar on Lightning Protection, São Paulo, Brazil.
- [44] PORTELA, C. M. J. C. M., 1982, Sobretensões e Coordenação de Isolamento. v. 1, 2 e 3, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- [45] DOMMEL, Hermann W., Electromagnetic transients program reference manual (EMTP theory book). Vancouver/Canadá: Department of Electrical Engineering – The University of British Columbia, 1986;
- [46] Motoyama, H., Kinoshita, Y., Nonaka, K., ” Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines”, IEEE trans. PWRD, Vol.23, pp 2488-2495, October, 2008.
- [47] Jia, W., Xiaoqing, Z., Double-Exponential Expression of Lightning Current Waveforms, Environmental Electromagnetics, The 2006 4th Asia-Pacific Conference on.

- [48] JONES, R. D., 1977, "On the Use of Tailored Return-Stroke Current Representation to Simplify the Analysis of Lightning Effect on Systems", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, pp. 95-96.
- [49] GARDNER, R. L., BAKER, L., BAUM, C. E. et al., 1985, "Comparison of Lightning with Public Domain HEMP Waveforms on the Surface of an Aircraft". In: Proceedings of the 6th EMC Symposium, pp. 175-180, Zurich.
- [50] HEIDLER, F., CVETIC, J. M., STANIC, B. V., 1999, "Calculation of Lightning Current Parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 2 (April), pp. 399-404.
- [51]] CHAI, J. C., MONTEGUT, J. L., DE RUSSY, S. D., 1997, "Survey of CGLSS/SLC40 Lightning Data and Retest Criteria". In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 391- 396, Austin, United States of America.
- [52] SCHROEDER, M. A. O. , 2001, Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Moro do Cachimbo. Tese de D.Sc., UFMJ, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- [53] CHOWDHURI, P., ANDERSON, J. G., CHISHOLM, W. A., et al., 2005, "Parameters of Lightning Strokes: A Review", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1 (January), pp. 346-358
- [54] WAGNER, C. F., HILEMAN, A. R., 1959, "A New Approach to Calculation of Lightning Performance of Transmission Lines", AIEE Transactions, December, pp. 996-1020.
- [55] M. Kawai, "Studies of the Surge Response on a Transmission Tower", IEEE %S. PAS-83, No.1, pp.30-34 (1964).

- [56] SARGENT, M. A., 1972, “Monte Carlo Simulation of the Lightning Performance of Overhead Shielding Networks of High Voltage Stations”, IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems, July/August, pp. 1651-1656.
- [57] CEDRAT, “FLUX® 10 User’s guide”, vol. 3 & 4, June 25, 2009.
- [58] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics - User’s Manual”, FEMM4.2, September 28, 2009.
- [59] Chen, Q., Konrad, A., A Review of Finite Element Open Boundary Techniques for Static and Quasi-Static Electromagnetic Field Problems, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 33, NO. I , JANUARY 1997.
- [60] Simpson, J.J., Global 3-D full-Maxwell's equations FDTD modeling of the effects of space weather on the Earth-ionosphere system, Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2010.
- [61] R. D. Fuchs, “Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas”, vol.2, LTC/EFEL, 1977.