



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação

TESE DE DOUTORADO

**Determinação e modelagem da
impedância de surto de torres de linhas
de transmissão e seus efeitos no estudo
de sobretensões atmosféricas**

Paulo César Álvares Mota
Autor

José Roberto Camacho
Orientador

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
Coorientador



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-Graduação

Determinação e modelagem da impedância de surto de torres de linhas de transmissão e seus efeitos no estudo de sobretensões atmosféricas

Tese submetida à Universidade Federal de Uberlândia por Paulo César Álvares Mota como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA:

José Roberto Camacho, Ph.D. - **UFU (Orientador)**
Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. - **UFU (Coorientador)**
Elise Saraiva, Dra. – **UFU**
Fabrício Augusto Matheus Moura, Dr. – **UFTM**
Arturo Suman Bretas, Ph.D. – **University of Florida**

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

M917d Mota, Paulo César Álvares, 1985-
2017 Determinação e modelagem da impedância de surto de torres de
linhas de transmissão e seus efeitos no estudo de sobretensões
atmosféricas / Paulo César Álvares Mota. - 2017.
138 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.

Coorientador: Marcelo Lynce Ribeiro Chaves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.39>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linhas de telecomunicação - Teses.
3. Torres - Teses. 4. Descargas elétricas - Teses. I. Camacho, José
Roberto. II. Chaves, Marcelo Lynce Ribeiro. III. Universidade Federal
de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV.
Título.

CDU: 621.3

Rejâne Maria da Silva – CRB6/1925

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa **Kamilla Martins de Moura Mota**, pela compreensão e incentivo dedicados a mim para a realização desta pesquisa e pelo apoio nos momentos em que mais necessitei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a **Deus**, que através de seus ensinamentos pude superar os momentos difíceis.

O meu muito obrigada a minha mãe **Laura Álvares Mota** e ao meu pai **José Moreira da Mota Filho** que sempre me apoiaram e incentivaram na incessante obtenção de conhecimento.

À minha madrinha **Amélia Maria Mota** que desde sempre foi um pilar em momentos difíceis da minha vida e me possibilitou chegar ao final desta importante etapa de minha vida.

Um agradecimento mais que especial aos meus irmãos **Daniel Álvares Mota**, **Vinicius Alvares Mota** e **Bárbara Mota Caixeta**, por todo incentivo e compreensão nas horas de ausência, e todo apoio nos momentos de indecisão.

Ao professor **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, incentivo e orientação sobre os assuntos desta tese. Todos os conhecimentos a mim transmitidos, juntamente com toda a paciência e apoio no desenvolvimento e compreensão sobre o assunto aqui estudado, possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor **José Roberto Camacho** meus sinceros agradecimentos pelo tempo a mim despedido, em suas orientações sobre o método de elementos finitos, além de todo o apoio para a obtenção de recursos, equipamentos e referências

bibliográficas cruciais para a conclusão do trabalho. Agradeço também, pela amizade e confiança que estão além da conclusão do curso de doutorado.

Aos amigos **Afonso Bernardino, Matheus Garcia, Jan Ferraz e Ildeu de Oliveira Martins** pelas discussões sobre assuntos variados, inclusive relacionados ao tema dessa tese, os quais foram fundamentais para uma reflexão sobre os rumos desta pesquisa. O companheirismo destes amigos foi de extrema importância para uma organização mental e manutenção da sanidade.

Ao engenheiro **Maurício Caldora Costa** os meus agradecimentos pelo auxílio em questões sobre a utilização do *software* Flux3D e sobre conhecimentos relacionados ao método de elementos finitos.

À **Cedrat**, que através da cessão de uma licença temporária do *software* Flux3D, possibilitou o desenvolvimento da pesquisa, contribuindo de forma significativa para a elaboração desta tese.

AOS DEMAIS AMIGOS, COLEGAS E PROFESSORES, QUE APESAR DE NÃO TEREM SIDO CITADOS AQUI, TAMBÉM ESTÃO PRESENTES NOS AGRADECIMENTOS QUE FAÇO, POR TODO CARINHO E APOIO, AO LONGO DE MINHA VIDA E PARA REALIZAÇÃO DESSE TRABALHO.

RESUMO

Esta tese reuni conceitos e análises que fundamentam e favorecem o desenvolvimento de alternativas para a determinação da impedância de surto de torres de transmissão através de modelos computacionais. O tema central se apresenta na questão da ocorrência de descargas atmosféricas, e seus efeitos sobre a impedância de surto da torre originando potenciais na estrutura, o que pode favorecer a disrupção do ar e caracterizando o chamado *backflashover*. Propõem-se então uma metodologia para determinação da impedância de surto de torres, de forma a se obter uma melhoria na precisão deste parâmetro. Para tanto, este trabalho propõem a criação de modelos computacionais tridimensionais, aos quais se aplica o Método de Elementos Finitos (MEF) como ferramenta de análise dos campos eletromagnéticos envolvidos no fenômeno. Um trabalho analítico é realizado com base nos resultados obtidos pelo uso do MEF, de forma a se calcular a impedância de surto das torres. Com a utilização do MEF, novas potencialidades são exploradas, como a determinação da impedância de surto para diferentes tipos de torres, sem a realização de aproximações. Objetivando fundamentar os estudos, a partir de uma base de informações oriunda de ensaios experimentais, são realizados trabalhos investigativos sobre o grau de aplicação do modelo proposto e as referências experimentais. A partir de comparações entre resultados obtidos dos métodos existentes, medições e da proposta apresentada por esse trabalho, uma avaliação sobre o desempenho do método desenvolvido é sugerida de forma expor seus pontos positivos e negativos e assim justificar sua utilização. Além disso, visando o estudo da influência da impedância de surto nos potenciais da estrutura, são discutidos aspectos gerais relacionados com a representação elétrica de torres de transmissão, culminando na utilização de um modelo robusto para análise transitória através do *software* EMTP/ATP. Assim, a partir da imposição de correntes de surto no modelo elétrico serão produzidos resultados de potenciais na torre. Tais resultados também serão comparados a dados experimentais a fim de se verificar a precisão do modelo elétrico. Adicionalmente, serão apresentadas análises da variação de parâmetros diretamente relacionados com o fenômeno, para verificação de seus impactos nas tensões originadas na torre devida a surtos de correntes.

Palavras chave: Impedância de Surto, Linha de Transmissão, Torre de Transmissão, Método de Elementos Finitos, EMTP/ATP.

ABSTRACT

This thesis brings together concepts and analyzes that base and favor the development of alternatives for the determination of the towers surge impedance through computational models. The lightning strikes in the transmission lines and their effects on the tower surge impedance, can favor the formation of a permanent electric arc between tower and line wires, characterizing the backflashover. This work proposes a methodology for determination of the tower surge impedance, in order to obtain an improvement in the accuracy of this parameter. Therefore, this thesis proposes the creation of three-dimensional computational models, to which the Finite Element Method (FEM) is applied as a tool for the analysis of the electromagnetic fields involved in the phenomenon. In general, this methodology consists of the application of the Finite Element Method (FEM) in three-dimensional computational models of transmission towers. In this way, the FEM provides the quantitative characteristics of the electromagnetic fields that surround the tower. An analytical work is then applied to the FEM results, in order to obtain the tower surge impedance. The FEM provides the use of new potentialities, such as the determination of the surge impedance for different types of towers, without making simplifications. Based on a measurement data base, investigative work is carried out to verify the qualitative and quantitative aspects of the models described. From comparisons between results of measurements, existing and proposal methods, an evaluation of the techniques are developed in order to expose their main characteristics. In addition, in order to study the influence of surge impedance on the tower voltages, general aspects related to the electrical representation of transmission towers are discussed, culminating in the use of a robust model for transient analysis through the EMTP/ATP *software*. Thus, from the imposition of surge currents on the electric tower model will produce voltages in the structure. These results will also be compared to experimental data in order to verify the reliability of the electric model. In addition, analyzes will be presented on the influence of the variation of parameters directly related to the phenomenon, to verify its impacts on the voltages originated in the tower due to surge currents.

Keywords: Surge impedance, Transmission Line, Transmission Tower, Computational Modeling, Finite Element Methods, EMTP/ATP

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Aspectos gerais.....	9
1.2 Estado da arte	12
1.3 Diretrizes e recomendações.....	16
1.4 Objetivos da Tese	17
2.1.1. Objetivos gerais.....	17
2.1.2. Objetivos específicos.....	17
1.5 Estrutura da tese	18
CAPÍTULO 2 - IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	20
2.1. Considerações iniciais	20
2.2. Métodos teóricos	23
2.2.1. Método 1 e Método 2 - Técnica de Jordan [6] e Técnica de Jordan Revisada [36].....	24
2.2.2. Método 3 - Técnica de Wagner e Hileman [7].....	26
2.2.3. Método 4 e 5 - Técnica de Sargent e Darveniza [8] para Torre Cilíndrica e Cônica.....	28
2.2.4. Método 6, 7 e 8 - Técnica de Chisholm, Show e Srivastava para Torre Cilíndrica, Cônica e Composta.....	31
2.2.5. Método 9 - Técnica das diferenças finitas no domínio do tempo	33
2.2.6. Método 10 - Método dos momentos	35
2.3. Métodos experimentais	36
2.3.1. Método Direto	37
2.3.2. Método de reflexão.....	39
2.4. Considerações finais.....	40
CAPÍTULO 3 – PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO	43
3.1 Considerações Iniciais.....	43
3.2 Modelagem da Torre em Três Dimensões	44
3.3 Método de Elementos Finitos.....	47
3.3.1 Condições de Contorno	47
3.3.2 Discretização do Domínio	51

3.3.3	Caracterização dos Materiais	54
3.3.4	Fontes de Excitação.....	54
3.3.5	Algoritmos Numéricos Empregados	55
3.4	Cálculo da Impedância de Surto de Torres	55
3.5	Verificação da Metodologia Proposta.....	58
3.6	Considerações Finais.....	64

CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO 67

4.1	Considerações iniciais	67
4.2	Análise dos Métodos Teóricos	67
4.3	Análise dos Métodos Experimentais	71
4.4	Análise da Metodologia Proposta	72
4.5	Análise dos Resultados.....	78
4.5.1	Torre Autoportante para circuito duplo e LT de 500kV	78
4.5.2	Torre Autoportante para circuito duplo.....	79
4.5.3	Torre Autoportante para circuito simples e LT de 500kV	82
4.6	Considerações Finais.....	86

CAPÍTULO 5 – MODELO ELÉTRICO DE TORRES E FATORES QUE INFLUENCIAM EM SEU DESEMPENHO 89

5.1	Considerações iniciais	89
5.2	<i>Software</i> EMTP/ATP	90
5.3	Modelo <i>Multistory</i> para representação de torres	91
5.4	Verificação do modelo <i>Multistory</i>	95
5.5	Fatores que influenciam no desempenho das torres.....	97
5.5.1	Corrente de surto	98
5.5.2	Impedância de surto da torre	104
5.5.3	Velocidade do surto e variação da impedância de surto na torre	108
5.6	Considerações Finais.....	111

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES 115

6.1	Considerações gerais	115
-----	----------------------------	-----

6.2 Contribuições da tese	119
6.3 Sugestões para trabalhos futuros	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXOS	128
Anexo A	128
Anexo B.....	130
APÊNDICES	132
Apêndice A – Circuitos e modelos utilizados no EMTP/ATP.....	132
Modelo <i>Multistory</i>	132
Apêndice B – Simulações das tensões na torre para os diferentes coeficientes de atenuação, e seguindo os parâmetros da Tabela 5.1	135
Apêndice C – Simulações das tensões na torre para os casos da Tabela 5.5	136
Apêndice D – Simulações das tensões na torre para os casos da Tabela 5.6	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Formas geométricas utilizadas para representar a torre.....	11
Figura 1.2: Diversidade de silhuetas de torres de transmissão.....	11
Figura 2.1: Representação da torre pelo circuito elétrico equivalente de LTs.....	21
Figura 2.2: Métodos das imagens aplicado a um cilindro vertical.....	24
Figura 2.3: Configuração para cálculo da impedância de surto de uma torre cilíndrica.....	26
Figura 2.4: Configuração para cálculo da impedância de uma torre com forma cônica.....	29
Figura 2.5: Modelo de cone invertido para cálculo da impedância de surto.....	31
Figura 2.6: Modelo para cálculo da impedância de surto de torres, usado pelo Método 8.....	32
Figura 2.7: Posicionamento das células de campo elétrico e magnético	33
Figura 2.8: Exemplo de (a) torre e (b) respectivo modelo discretizado em cubos.....	35
Figura 2.9: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições alinhados.....	37
Figura 2.10: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições perpendiculares	38
Figura 2.11: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições alinhados.....	38
Figura 2.12: Configuração e ligações dos equipamentos de medição.....	39
Figura 2.13: Perfil da onda de tensão medida no topo da torre (resposta ideal)	40
Figura 3.1: Modelo 3D de torre de transmissão: (a) modelo 3D de toda a torre; (b) detalhe ampliado deste modelo e; (c) um dos perfis metálicos modelados.....	44
Figura 3.2: Exemplo de subestruturas de uma torre autoportante.....	45
Figura 3.3: Exemplo simplificado de projeto de uma família de torres.....	46
Figura 3.4: Modelo 3D de torre e fronteira cilíndrica (modelo fora de escala).....	49
Figura 3.5: Resultados de energias para diferentes valores de Rf , em função de h	49
Figura 3.6: Resultados de energias para diferentes alturas da fronteira cilíndrica, em função da altura da torre.	50
Figura 3.7: Os EF utilizados na discretização de domínios	51
Figura 3.8: Malha de EF triangulares e retangulares em um mesmo domínio 2D.....	51
Figura 3.9: (a) Exemplo de uma malha de um modelo 3D e, (b) sua avaliação qualitativa, no software Flux3D.....	52
Figura 3.10: Malha de elementos finitos em (a) um modelo 3D de um perfil de aço e, (b) a vista superior deste modelo.....	53

Figura 3.11: Volume para cálculo da energia armazenada no campo eletromagnético, considerando a altura do braço intermediário da torre.	56
Figura 3.12: Torre autoportante para LT de circuito duplo e nível de tensão de 500kV.	58
Figura 3.13: (a) Modelo 3D desenvolvido e, (b) dimensões e locais dos perfis metálicos.....	59
Figura 3.14: Fronteira cilíndrica na qual foram estabelecidas as condições de contorno	60
Figura 3.15: (a) Malha de EF no domínio sob estudo, (b) ampliação do modelo e, (c) as características quantitativas e qualitativas da malha	60
Figura 3.16: Resultados das simulações com a (a) distribuição do campo elétrico e, (b) a distribuição do campo magnético.....	61
Figura 3.17: Configurações para determinação das energias: (a) no topo da torre, (b) na altura dos braços superiores, (c) na altura dos braços intermediários e (d) na altura dos braços inferiores.	62
Figura 4.1: Resultados de impedância de surto resultantes dos métodos 1 a 7.....	69
Figura 4.2: Modelos 3D da mesma torre: (a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3 e, (d) Modelo 4.	74
Figura 4.3: Perfis metálicos considerados no: (a) o modelo 2, (b) o modelo 3 e, (c) o modelo 4	74
Figura 4.4: Visão superior da torre e distribuição de campo magnético (a) no modelo 1, (b) no modelo 2, (c) no modelo 3, e, (d) no modelo 4.	75
Figura 4.5: Relação entre tempo de simulação e impedância de surto no topo da torre	77
Figura 4.6: Torre sob estudo.	80
Figura 4.7: Modelo 3D da torre sob análise	80
Figura 4.8: Torre sob estudo	82
Figura 4.9: Modelo 3D da torre sob estudo.....	83
Figura 4.10: Comparação das dimensões das torres Investigadas (a) no item 4.5.1 e, (b) no item 4.5.3.....	84
Figura 5.1: Modelo <i>multistory</i> para representação elétrica de torres de transmissão	91
Figura 5.2: Tensões no topo da torre representada pelo modelo <i>multistory</i> , variando-se α	93
Figura 5.3: Gráfico do pico de tensão no topo da torre e respectivo α	94
Figura 5.4: Onda de corrente de surto (a) medida em [17] e, (b) reproduzida em simulação.....	96
Figura 5.5: Tensões na torre (a) medidas e, (b) simuladas no EMTP/ATP.	97
Figura 5.6: Forma de onda típica da corrente de uma descarga com polaridade negativa.....	99
Figura 5.7: Janela de interface do modelo de fonte tipo “Heidler”, no ATPDraw	100
Figura 5.8: Ondas de corrente resultantes das simulações: (a) destaque para a calda da onda e, (b) destaque para a frente da onda.	101
Figura 5.9: Taxa instantânea de variação e respectiva onda de corrente do modelo de Heidler.....	102

Figura 5.10: (a) Ondas de correntes simuladas pelo modelo de Heidler, de acordo com os dados da Tabela 5.2 e, (b) respectivas derivadas	103
Figura 5.11: Tensões simuladas no topo da torre devido a imposição das correntes de A a D, ilustradas na Figura 5.10a.....	103
Figura 5.12: Ondas de tensão no topo da torre obtidas pela simulação do modelo <i>multistory</i> para: (a) os casos de 1 a 6 e, (b) os casos de 7 a 11 da Tabela 5.6.	106
Figura 5.13: Gráfico das tensões no topo da torre e as respectivas impedâncias de surto	107
Figura 5.14: Ondas de tensão simuladas no modelo <i>multistory</i> para (a) o caso 12 e, (b) o caso 13.	109
Figura 5.15: Ondas de tensão simuladas no modelo <i>multistory</i> para (a) o caso 14 e, (b) o caso 15.	110
Figura 5.16: Ondas de tensão simuladas no modelo <i>multistory</i> para (a) o caso 16 e, (b) para todos os casos (somente topo da torre).....	111
Figura A-1: Circuito utilizado nas simulações desta tese	132
Figura A-2: Janela de interface do Modelo de linha de transmissão	132
Figura A-3: Janela de interface do elemento resistor	133
Figura A-4: Janela de interface do elemento indutor	134
Figura A-5: Janela de interface da fonte tipo “ponto a ponto”	134
Figura B-1: Simulações das tensões na torre com diferentes valores de coeficiente de atenuação: (a) $\alpha=0,80$, (b) $\alpha=0,82$ e, (c) $\alpha=0,84$	135
Figura B-2: Simulações das tensões na torre com diferentes valores de coeficiente de atenuação: (a) $\alpha=0,86$, (b) $\alpha=0,88$ e, (c) $\alpha=0,90$	136
Figura C-1: Resultados de tensões para o (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3 e, (d) caso 4 da Tabela 5.5.....	136
Figura D-1: Resultados de tensões para o (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3 e, (d) caso 4 da Tabela 5.7	137
Figura D-2: Resultados de tensões para o (a) caso 5, (b) caso 6, (c) caso 7 e, (d) caso 8 da Tabela 5.7	137
Figura D-3: Resultados de tensões para o (a) caso 9, (b) caso 10 e, (c) caso 11 da Tabela 5.7	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Impedância de surto determinada por diferentes métodos, para uma mesma torre	10
Tabela 3.1: Resultados de energias magnética e eletrostática.....	63
Tabela 3.2: Resultados de impedância de surto oriundos do emprego da metodologia proposta e de medições, para a torre da Figura 3.12	63
Tabela 3.3: Valores de indutância e capacitância distribuídos e velocidade de propagação do surto	64
Tabela 4.1 Resultados de impedância de surto, em ohms.....	76
Tabela 4.2: Tempos de simulação, em relação ao tempo gasto no modelo 4	76
Tabela 4.3: Resultados de impedância de surto	78
Tabela 4.4: Resultados de impedância de surto	79
Tabela 4.5: Resultados de Impedância de surto	81
Tabela 4.6: Resultados de Impedância de surto	83
Tabela 4.7: Comparação entre as impedâncias de surto das torres da Figura 4.10b e da Figura 4.10a	85
Tabela 5.1: Parâmetros para simulação do modelo <i>multistory</i> [26].....	93
Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no modelo <i>multistory</i>	95
Tabela 5.3: Parâmetros de uma forma de onda padronizada para descargas com polaridade negativa	98
Tabela 5.4: Taxas de variações da onda de corrente para o modelo de Heidler	101
Tabela 5.5: Parâmetros para simulação de correntes de surto.....	102
Tabela 5.6: Parâmetros do modelo <i>multistory</i> calculados a partir da impedância de surto determinada por vários métodos para a torre da Figura 3.12	105
Tabela 5.7: Valores de Z_1 e respectivos picos de tensão no topo da torre em cada caso	107
Tabela 5.8: Valores para parametrização do modelo <i>multistory</i>	108

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Capacitância da torre
c	Velocidade da luz
CC	Condições de contorno
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
DFDT	Diferenças finitas no domínio do tempo
EF	Elemento finito
EMTP/ ATP	<i>Electromagnetic Transients Program/Alternative Transient Program</i>
h	Altura da torre
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
L	Indutância da torre
LT	Linha de transmissão
MEF	Método de elementos finitos
MoM	Método dos momentos
NEA	<i>Numerical Electromagnetic Analysis</i>
NEC-2	<i>Numerical Electromagnetics Code</i>
PVC	Problema de valor de contorno
r	Raio da base do modelo que representa a torre
t	Tempo
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TDR	<i>Time-Domain Reflectometry</i>
v	Velocidade de propagação do surto na torre
Z	Impedância de surto da torre
Z _g	Impedância de aterramento ou impedância de pé de torre
ϵ	Permissividade elétrica
θ	Ângulo que a geratriz do cone forma com seu eixo vertical
μ	Permeabilidade magnética

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ρ	Resistividade elétrica
σ	Condutividade elétrica
Δh	Intervalos de altura da torre
$z(t)$	Impedância de surto transitória da torre
$u(t)$	Tensão transitória na torre
I_o	Valor máximo da onda de corrente de surto
U_o	Valor máximo da onda de tensão de surto
$i(t)$	Corrente transitória na torre
\vec{A}	Vetor potencial magnético
\vec{E}	Vetor campo elétrico
\vec{H}	Vetor campo magnético
I_{U_o}	Valor da corrente em que a tensão atinge seu valor máximo
E_x, E_y, E_z	Componentes de campo elétrico nas direções x, y e z do plano cartesiano
H_x, H_y, H_z	Componentes de campo magnético nas direções x, y e z do plano cartesiano
J_s	Densidade de corrente superficial
H_f	Altura da fronteira cilíndrica tomada como condição de contorno
R_f	Raio da fronteira cilíndrica tomada como condição de contorno
W_m	Energia armazenada no campo magnético
W_e	Energia armazenada no campo elétrico

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

As descargas atmosféricas são a grande causa de danos aos sistemas elétricos, seja de forma direta (danificando equipamentos) ou indireta (causando o corte no fornecimento de energia elétrica), constituindo-se como principal fonte de desligamentos não programados das linhas de transmissão (LT) e das redes de distribuição de energia elétrica [1].

Em sistemas de transmissão com nível de tensão de 230 kV, as descargas atmosféricas são responsáveis por 65% dos desligamentos não programados nos Estados Unidos [1]. Já no sistema elétrico da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), os desligamentos não programados chegam a 70%, como consequência desse fenômeno [1].

O caráter estratégico das linhas como componente de infraestrutura para a economia de qualquer país evidencia a importância de se oferecer um fornecimento de energia confiável. Para tanto, é vital o entendimento pleno dos parâmetros determinantes dos desligamentos devido à descargas atmosféricas. A compreensão de todo o fenômeno e das grandezas envolvidas pode fomentar aplicações de técnicas para minimizar o número de desligamentos das linhas de transmissão.

Os distúrbios provocados pelas descargas atmosféricas são normalmente verificados na forma de sobretensões. Quando uma descarga atmosférica atinge uma torre de uma linha de transmissão (também chamada de “torre de transmissão”), a corrente que flui pela impedância de surto da torre causa um aumento do potencial na estrutura. Quando a onda de tensão que percorre a torre atinge o solo, ela sofre uma reflexão, devido a diferença entre o valor da impedância de surto da torre (Z) e o valor da impedância de aterramento (Z_g). A onda de tensão refletida é negativa, e tende a neutralizar a sobretensão resultante. Entretanto, se a impedância de surto da torre possuir valores próximos da impedância de aterramento, a onda de tensão refletida será pequena, e a onda de tensão resultante pode ser muito elevada [2].

Devido ao acoplamento eletromagnético, uma parcela da tensão de surto é induzida nos condutores fase da linha, mas, mesmo assim, a tensão na torre pode ser muito maior que a tensão naqueles condutores. Caso essa diferença de tensão ultrapasse valores críticos, um arco elétrico se forma entre a torre e o condutor fase, fenômeno chamado de *flashover*. Quando a tensão de operação da rede sustenta o arco após o fluxo da corrente de descarga, é caracterizado um curto-circuito fase-terra, levando o sistema de proteção da linha comandar seu desligamento. Em alguns casos, o

flashover pode danificar a cadeia de isoladores, implicando em um período prolongado de corte na alimentação do sistema elétrico.

Nestas circunstâncias, a impedância de surto das torres de transmissão tem grande importância na determinação do desempenho das linhas de transmissão. Entretanto, a representação das torres é um procedimento complexo e demanda uma investigação minuciosa. A torre pode ser representada por uma impedância de surto, a qual é determinada de algumas formas:

- Através de métodos teóricos (métodos analíticos e numéricos);
- Através de métodos experimentais.

Entre medições e cálculos analíticos, vários métodos foram propostos para determinação da impedância de surto de torres. Entretanto, os valores resultantes de métodos analíticos são divergentes entre si, e, em geral, diferem dos valores obtidos por meio de medição. Valores desse parâmetro calculados com imprecisão levam a previsão equivocada de tensões na torre, podendo induzir erros em projetos de proteção e coordenação de isolamento, impactando negativamente no índice de desempenho da linha de transmissão.

Estudos mostram que uma diferença de 10% no cálculo da impedância de surto resulta em alteração, na mesma proporção, da taxa de desligamento de linhas de transmissão [3], [4]. Já o trabalho apresentado em [5] sugere uma alteração de 20% na taxa de interrupção de LTs para uma diferença de 10% no cálculo da impedância de surto.

As diferenças no valor da impedância de surto, para uma mesma torre, podem variar de, aproximadamente, 5% a 46,5% [5], de acordo com o método utilizado, conforme exemplificado na Tabela 1.1 [5].

Tabela 1.1: Impedância de surto determinada por diferentes métodos, para uma mesma torre

Método	Jordan[6]	Wanger[7]	Sargent[8]	Medição[5]
Z (Ω)	92,92	207,30	165,90	174,22

O resultado do cálculo da tensão de solicitação na cadeia de isoladores devido a uma descarga atmosférica pode ter grande variação para cada valor da Tabela 1.1, o que pode ser decisivo na previsão de um *flashover* e, conseqüentemente, na escolha adequada da proteção da LT.

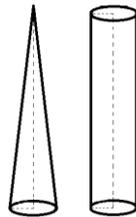
Estudos sugerem que desligamentos em trechos específicos da LT dominam seu desempenho geral [9]. Isso pode estar relacionado com características peculiares de cada torre, tais como sua altura e silhueta, particularidades determinantes na impedância de surto. Assim, análises individuais de cada torre de uma LT são importantes na determinação de seu desempenho frente a descargas atmosféricas.

Visto que uma linha de transmissão pode ser composta por centenas de torres ou mais, a realização de medições em cada uma delas, a fim de se determinar as impedâncias de surto individuais, se torna uma prática inviável, pois haveria a necessidade de deslocamento de vários equipamentos para locais muitas vezes de difícil acesso.

Os métodos analíticos determinam a impedância de surto de torres através de equacionamentos matemáticos. Entretanto, a grande variedade de silhuetas existentes pode trazer inconsistências nos resultados. Isto acontece devido a impedância de surto estar intimamente relacionada às formas e dimensões geométricas das torres e a existência de silhuetas complexas torna difícil o cálculo exato de sua impedância de surto.

Comumente são empregados equacionamentos que consideram as torres com formas geométricas simples, como a forma cilíndrica [7] e a forma cônica [8], ilustrado na Figura 1.1.

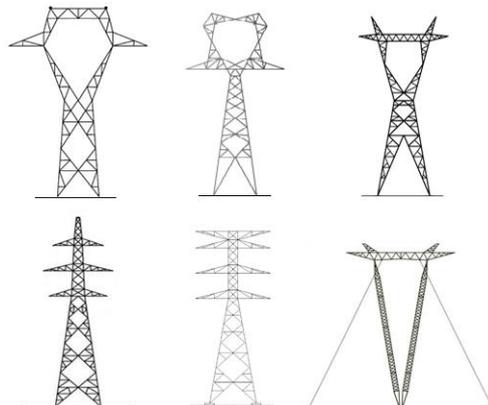
Figura 1.1: Formas geométricas utilizadas para representar a torre



Fonte: Do autor

Entretanto, estas generalizações podem levar a cálculos de valores da impedância de surto que destoam das medições, principalmente para torres com silhuetas que se diferenciam muito dessas formas geométricas. A Figura 1.2 mostra algumas torres de transmissão, as quais evidenciam a variedade de silhuetas existentes.

Figura 1.2: Diversidade de silhuetas de torres de transmissão.



Fonte: Do autor

Comparando-se as silhuetas de torres da Figura 1.2 com as representações utilizadas em métodos analíticos, como as mostradas na Figura 1.1, observa-se que vários detalhes construtivos são desprezados.

Outro ponto a se observar é a variação da impedância de surto na torre. Vários trabalhos consideram um valor constante para a impedância de surto da torre [6]–[8], [10], [11]. Entretanto, medições sugerem que este parâmetro é variável, fator que deve ser levado em consideração [3], [12]–[17].

Ao longo das últimas décadas, vários métodos foram propostos para determinação da impedância de surto em torres. Entretanto, a quantidade de métodos existentes sugere uma falta de consenso na forma de se determinar esse parâmetro, constatando a inexistência de uma técnica geral, que possa ser aplicada em qualquer tipo de torre.

Por todos os aspectos apresentados anteriormente, a impedância de surto de torres de transmissão é um fator de grande importância na análise de desempenho de linhas de transmissão e seu cálculo é um assunto que necessita de uma abordagem sistêmica de forma a se obter resultados concisos.

1.2 Estado da Arte

Após estudos da bibliografia encontrada pelos meios tradicionais de acesso, obteve-se um conjunto de informações sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no âmbito da área em análise. Optou-se por descrever tais estudos em ordem cronológica para melhor entendimento dos progressos sobre o cálculo da impedância de surto de torres de transmissão.

Em 1934, Jordan [6] propôs a primeira formulação para o cálculo da impedância de surto de torres de transmissão. Ele assumiu uma torre com forma cilíndrica com altura e raio equivalentes às dimensões da estrutura investigada, além de considerar uma distribuição uniforme da corrente pela estrutura. A velocidade de propagação do surto pela torre foi considerada igual a velocidade da luz. Seu estudo se baseou na fórmula de Neumann para determinação da indutância própria da torre e do valor de uma impedância média da torre.

Em 1958, Breuer et. al. [18] verificou valores de impedância de surto por meio de medições em torres de transmissão reais utilizando o método de reflexão. Nesse mesmo ano, Caswell et al. [19], pelo mesmo método, obteve valores similares de impedância através de medições em uma torre com silhueta similar, mas com dimensões diferentes. Nos dois trabalhos os valores obtidos de velocidade de propagação na torre foram próximos à velocidade da luz.

Em 1960, Wagner e Hileman [7] analisaram a resposta de uma torre com formato cilíndrico submetida a um surto de corrente com forma de onda em degrau, e propuseram uma formulação para a impedância de surto variante no tempo. A velocidade de propagação do surto pela torre foi considerada igual à velocidade da luz.

Em 1964, Kawai [13], através do método direto, realizou medições da impedância de surto em torres reais, obtendo valores em torno de 100 ohms. As medições ainda mostraram uma velocidade de propagação do surto na torre mais lenta, entre 70 e 80% da velocidade da luz.

Sargent e Darveniza [8], em 1969, desenvolveram duas formulações para cálculo da impedância de surto. O primeiro equacionamento consistiu em uma variação do estudo realizado por Wagner e Hileman [7], levando-se em conta uma corrente de surto com forma de onda em rampa aplicada em uma torre cilíndrica. O segundo equacionamento considerou a torre com um formato cônico, submetida a uma corrente com forma de onda retangular.

Na década de 1980, Chisholm, Show e Srivastava [3] propuseram uma formulação para a impedância de surto aproximando a torre a uma forma geométrica composta por dois troncos de cone. Neste trabalho também foram realizadas medições da impedância de surto através do método de reflectometria no domínio do tempo em modelos em escala reduzida. Em 1991, o CIGRÉ recomendou este trabalho para o cálculo da impedância de surto [20], o qual ainda descreve técnicas e premissas utilizadas para calcular o desempenho de linhas de transmissão aéreas frente a descargas atmosféricas.

Na década de 1990, vários trabalhos [14], [21]–[23] propuseram modelos de circuitos elétricos equivalentes para representação da torre utilizando-se *softwares* como o EMTP (*Electromagnetic Transients Program*). Os resultados desses modelos foram comparados com aqueles obtidos por ensaios em torres reais, através da aplicação do método direto. A velocidade de propagação da onda no interior da torre foi considerada igual a velocidade da luz.

Vale destacar o trabalho de Ishii et al [14], no qual foi proposto o modelo em estágios (*multistory tower model*) para representação de torres. Este modelo consiste na representação da torre por vários elementos de linhas de transmissão de parâmetros distribuídos associada a elementos concentrados. Posteriormente, este modelo foi adotado em outros estudos [22], [24]–[27].

De forma semelhante, Ametani et al [15] apresentaram um modelo no qual a torre é representada por vários condutores verticais (*multiconductor tower model*). Esse modelo também foi utilizado por outros pesquisadores posteriormente [16], [21], [28]–[30].

Em 1996, Hara e Yamamoto [21] apresentaram uma equação empírica, deduzida a partir de medições realizadas em um condutor cilíndrico pelo método direto.

Em 1999, Baba e Ishii [4] reportaram seu estudo utilizando uma análise numérica do campo eletromagnético através do algoritmo computacional *numerical electromagnetics code* (NEC-2), o

qual aplica o método dos momentos em um modelo em três dimensões (3D) do problema para determinação da impedância de surto da estrutura [4]. Trabalhos posteriores também utilizaram tal algoritmo para estudo da impedância de surto de torres de transmissão, em alguns casos propondo pequenas variações [27], [31], [32].

Motoyama e Matsubara [11], em 2000, apresentaram uma formulação que considera os efeitos da velocidade de propagação do surto na torre e da variação do ângulo de injeção da corrente.

Em 2001, Dawalibi et al [33], propuseram o cálculo da impedância de surto de estruturas utilizando a transformada de Fourier rápida. Em seu estudo foi considerada a influência da resistividade do solo nos resultados.

Em 2002, Zakaria et al [34] sugeriram um método utilizando o *software* PSCAD/EMTDC para determinação da impedância de surto de torres. Os valores obtidos se mostraram próximos a resultados oriundos de ensaios em torres reais. Testes experimentais nessas torres ainda mostraram uma velocidade de propagação do surto na torre entre 80 e 90% da velocidade da luz.

Zhang et al [5], em 2004, propôs uma nova formulação para cálculo da impedância de surto a partir da determinação da capacitância e indutância da torre através do método das imagens. Para verificação dos valores obtidos, foi proposto um modelo de parâmetros concentrados para representar a torre. A velocidade de propagação do surto pela torre foi considerada igual a velocidade da luz.

Em 2005, Baba e Rakov [35] utilizaram o método das diferenças finitas no domínio do tempo (DFDT) para resolver as equações de Maxwell e encontrar o campo elétrico de uma torre com silhueta cônica, quando esta é acometida por uma descarga atmosférica.

Em 2006, De Conti et al [36] apresentaram sua pesquisa com a revisão e extensão do método de Jordan [6] para o cálculo da impedância de surto. Nesse trabalho foi deduzida a formulação apresentada em [6] através da aplicação do método das imagens em uma torre cilíndrica, com base no vetor potencial magnético. Ainda foi proposta uma variação da formulação de Jordan levando-se em conta o acoplamento mútuo entre condutores verticais quando a torre é representada por vários condutores [15].

Em 2009, Motoyama et al [17] utilizaram o método das diferenças finitas no domínio do tempo (DFDT) para análise do campo eletromagnético e, assim, determinar a impedância de surto de torres. Os resultados obtidos foram comparados com valores de ensaios realizados em torres reais com utilização do método direto nos experimentos.

Em 2011, Wang et al [37] apresentaram um estudo matemático sobre a impedância de surto em um condutor cilíndrico. Para tanto eles utilizaram o método de circuito equivalente por elementos parciais (*partial element equivalent circuit*).

Em 2014, Takami et al [38] realizaram ensaios em escala reduzida de uma torre utilizando o método direto. Os campos eletromagnéticos foram verificados através do método DFDT, e os resultados de tensão na estrutura foram comparados àqueles obtidos experimentalmente.

No mesmo ano, Wang et al [39] analisaram o campo elétrico em uma torre montada por materiais compostos (*composite tower*) através do MEF. Este tipo de torre, utilizada na China, possui vantagens de um menor peso e facilidade de instalações, mas ainda carece de maiores estudos sobre seu desempenho frente a descargas atmosféricas.

Em 2015, Sliskis et al [40] utilizaram o MEF para verificar o campo eletromagnético em uma torre a fim de se estudar os níveis de isolamento em diversos pontos da estrutura. Para tanto, um modelo foi implementado no EMTP, baseado em resistências (parâmetros concentrados), para representar a torre.

Islam e Yusuf [32], ainda em 2015, apresentaram seu trabalho onde utilizaram o NEC-2 e a transformada de Fourier para determinação da impedância de surto de torres de telefonia móvel.

Um ponto de grande discussão sobre o tema é a realização de aproximações no desenvolvimento das equações de impedância de surto, tais como: solo condutor perfeito, distribuição homogênea da carga na torre, velocidade de propagação do surto igual à velocidade da luz, silhueta da torre igual a formas geométricas simples (cilindro e cone). Tais aproximações são consideradas por pesquisas existentes com o intuito de facilitar a resolução de sistemas de equações complexos, a fim de se chegar a uma formulação simplificada.

Nas últimas décadas, o emprego de recursos computacionais foi uma alternativa utilizada para se evitar simplificações. O uso de *softwares* que aplicam métodos numéricos torna algumas aproximações sem sentido ao passo que a complexidade nos cálculos é contornada através do uso de métodos numéricos e de *softwares* especializados, os quais podem resolver sistemas de equações complicados com certo esforço computacional.

A partir de 1990, fica evidente a considerável utilização de *softwares* na resolução das equações de campo eletromagnéticos em linhas de transmissão. Qualquer que seja o *software* utilizado, um ponto importante é o método numérico empregado na resolução das equações que regem o problema. Dentre os vários métodos utilizados, cita-se: método das diferenças finitas no domínio do tempo (DFDT)[41], método dos momentos[23], [37] e o método de elementos finitos (MEF)[42], [43].

O presente estudo apresenta uma abordagem eletromagnética do problema, como em outros métodos existentes na literatura. Entretanto, a pesquisa em questão propõe a obtenção dos parâmetros eletromagnéticos através da aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF) em um modelo em

três dimensões (3D) das torres de transmissão. A partir desses resultados, a impedância de surto é então calculada através de equações tradicionais.

1.3 Diretrizes e Recomendações

As diretrizes e recomendações apresentadas nesse tópico se referem a procedimentos para medição ou cálculo dos parâmetros elétricos e magnéticos envolvidos no estudo do tema em questão, de forma que podem contribuir para a investigação da impedância de surto de torres de transmissão.

- CIGRE WG 33-01 - *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines* [20]

Este guia procura descrever as técnicas e premissas utilizadas para calcular o desempenho de linhas de transmissão aéreas frente a descargas atmosféricas. Além disso, o guia inclui exemplos de aplicação para servir como referência e para permitir uma análise de sensibilidade das técnicas de modelagem dos parâmetros elétricos envolvidos.

- CIGRE WG C4.501 - *Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena* [44]

Este documento do CIGRÉ apresenta o método de análise eletromagnética numérica (*Numerical Electromagnetic Analysis - NEA*), o qual é um algoritmo para resolução de fenômenos transitórios através da solução de problemas de natureza eletromagnética, por meio do emprego das equações de Maxwell. Através deste método é possível se determinar o desempenho de linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas.

- IEEE Std 1243-1997 - *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines* [9]

Neste documento são discutidos os tipos de estrutura, os isolamentos, efeitos de blindagem e o aterramento em linhas de transmissão. Ainda são apresentados métodos especiais que podem melhorar o desempenho de LTs, levando-se em conta que suas características influenciam em sua resposta frente a descargas atmosféricas.

- IEEE Std 1410-2010 - *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines* [45]

Este guia identifica os fatores que contribuem para as falhas causadas por descargas atmosféricas em linhas aéreas de distribuição e sugere melhorias para construções existentes e para projetos de novas linhas.

1.4 Objetivos da Tese

Em vista das informações apresentadas anteriormente, esta tese busca alcançar um objetivo geral, desencadeando uma série de objetivos específicos que complementam e corroboram para se chegar ao objetivo geral. Tais objetivos são apresentados a seguir.

2.1.1. Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo geral apresentar um estudo sobre a impedância de surto de torres de transmissão, de forma que tal parâmetro possa ser determinado com maior precisão. Assim, uma melhor representação elétrica da torre de transmissão, acarreta uma maior precisão nos estudos que envolvem a transmissão de energia elétrica, a proteção dos sistemas elétricos, a qualidade da energia e os transitórios eletromagnéticos.

2.1.2. Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral desta tese, os seguintes objetivos específicos foram estipulados:

- Apresentar os principais procedimentos existentes, teóricos e experimentais, para determinação da impedância de surto de torres de transmissão.
- Apresentar uma metodologia de modelagem, em três dimensões, de torres de transmissão;
- Empregar o método de elementos finitos nos modelos 3D das torres de transmissão a fim de se determinar as intensidades e distribuição dos campos elétrico e magnético no entorno das estruturas;
- Calcular a impedância de surto da torre de transmissão através dos valores da energia armazenada no campo eletromagnético;
- Avaliar quantitativamente e qualitativamente os métodos de determinação da impedância de surto de torres de transmissão apresentados nesta tese;

- Selecionar e avaliar um modelo elétrico para representação das torres de transmissão, o qual possa abranger os aspectos de deformação e dissipação dos surtos que fluem pela torre;
- Verificar a influência da impedância de surto nas tensões originada na torre devido a incidência de uma descarga atmosférica.

1.5 Estrutura da Tese

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho encontra-se assim estruturado:

Capítulo 2 - Impedância de Surto de Torres de Linhas de Transmissão

Neste capítulo é apresentada a definição da impedância de surto de torres. Além disso, serão analisados os métodos teóricos existentes para seu cálculo, bem como os procedimentos experimentais para determinação deste parâmetro.

Capítulo 3 - Proposta para Determinação da Impedância de Surto de Torres de Transmissão

Neste capítulo é apresentada uma proposta de metodologia para a determinação da impedância de surto de torres. São descritos os procedimentos de modelagem em 3D de uma torre, para posterior aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF). A metodologia ainda será avaliada através da comparação de seus resultados com registros de medições.

Capítulo 4 - Avaliação das Metodologias de Determinação da Impedância de Surto

O enfoque deste capítulo será a obtenção e comparação dos resultados dos métodos apresentados nesta tese, inclusive do método proposto. Dessa forma será possível avaliar a precisão da técnica proposta, de forma a se verificar as diferenças de seus resultados com aqueles obtidos pelos métodos tradicionais.

Capítulo 5 - Modelo Elétrico de Torres e Fatores que Influenciam em seu Desempenho

Neste capítulo será analisada a influência da impedância de surto nas tensões verificadas na torre através de simulações de modelos equivalentes da estrutura utilizando-se o *software* EMTP/ATP. Para tanto, a imposição de um surto de corrente no modelo possibilitará se verificar os potenciais em alguns pontos da torre. Por fim a comparação desses resultados com medições em torres reais evidenciaram o impacto da escolha do método para determinação da impedância de surto de torres.

Capítulo 6 - Conclusões

Finalmente, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Destacam-se as contribuições da tese embasados nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2 - IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

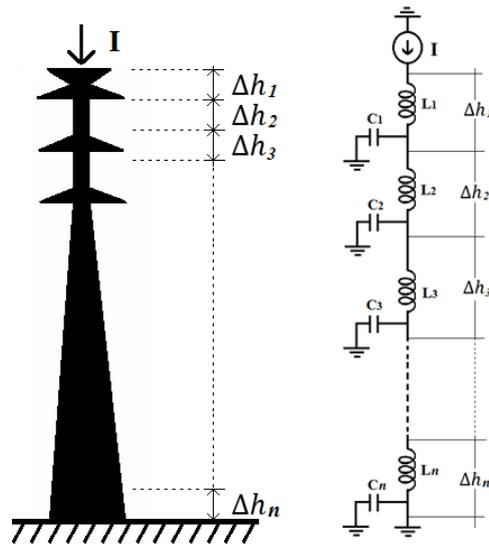
2.1.Considerações Iniciais

A previsão da tensão de solicitação nas cadeias de isoladores, provocadas pelas descargas atmosféricas, é essencial para o desenvolvimento de projetos de proteção e de coordenação de isolamento em linhas de transmissão. Em particular, a impedância de surto da torre é um parâmetro fundamental para a previsão da tensão de solicitação nas cadeias de isoladores. Neste contexto, este parâmetro possui grande importância na análise do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e sua determinação deve ser criteriosa.

A torre pode ser representada por um modelo de linha de transmissão (LT) de parâmetros distribuídos ou não, para fins de análises de transitórios elétricos [3], [15]. Nesse caso, a impedância de surto da torre é considerada como a impedância de surto da LT que a representa. Dessa forma, pode-se utilizar a metodologia clássica de LTs, alicerçada na teoria de campos eletromagnéticos, para determinação da impedância de surto de torres.

Para tanto, considera-se uma torre de altura h e sem perdas, dividida em intervalos infinitesimais Δh e posicionada sobre um solo condutor perfeito. Tomando-se o movimento de cargas elétricas, do topo para a base da torre, é estabelecido gradativamente, em cada Δh , campos elétricos e campos magnéticos. Esta situação proporciona a energização da estrutura a uma velocidade v , e assim, a origem de elementos de capacitância e indutância a cada intervalo infinitesimal. Nessas condições, o circuito representativo desta linha pode ser obtido por uma associação de células LC infinitesimais de comprimento Δh onde L e C representam a indutância (H/m) e a capacitância (F/m) distribuídas [46]. A Figura 2.1 ilustra a torre representada por este circuito equivalente.

Figura 2.1: Representação da torre pelo circuito elétrico equivalente de LTs



Fonte: Do autor

Com base na teoria clássica de linhas de transmissão, a partir dos valores de indutância e capacitância da torre, ambas por unidade de comprimento, a impedância de surto é calculada através da equação 2.1 [13].

$$Z_n = \sqrt{\frac{L_n}{C_n}} \quad 2.1$$

Onde: L_n e C_n são a indutância e a capacitância da LT que representam o elementos infinitesimal de ordem n ;

De modo semelhante, a velocidade de propagação do surto pela torre pode ser calculada pela equação 2.2 [13].

$$v_n = \frac{1}{\sqrt{L_n \cdot C_n}} \quad 2.2$$

Desse modo, para se entender o comportamento da impedância de surto, deve-se analisar a indutância e a capacitância da torre.

Na análise eletrostática, a capacitância é dada pela relação entre a energia armazenada no meio isolante e o potencial elétrico no condutor [13], de forma que a variação da altura sob análise, influencia a energia armazenada, e, por consequência, no valor de capacitância.

Tomando-se a torre como um condutor cilíndrico vertical, sua indutância própria será a razão entre o fluxo magnético e a corrente elétrica que flui por este condutor [13]. Visto que, pelo efeito

pelicular a distribuição de corrente no condutor não é uniforme, o fluxo magnético, e então, a indutância, sofrem a influência das dimensões físicas do condutor [13].

Posto desta forma, em LTs convencionais o condutor não muda sua seção transversal e considera-se que ele está sempre à mesma altura do solo (despreza-se a variação da altura no vão entre as torres). Isto implica em valores de indutância e capacitância constantes em toda extensão da LT, e, portanto, em uma impedância de surto e velocidade de propagação também constantes.

Já na aplicação da metodologia clássica para torres de transmissão, esta seria representada por uma LT perpendicular ao plano do solo, de modo que cada conjunto de elementos infinitesimais L_n e C_n está mais próximo do solo a cada Δh . Nesta situação, a capacitância da estrutura aumenta à medida que o surto se propaga em direção ao solo. Considerando-se também que a silhueta da torre toma formas físicas distintas em Δh diferentes, a indutância também é variável.

Pode-se dizer que a impedância de surto, bem como a velocidade de propagação, variam com a altura da torre [13]. Apesar disso, vários trabalhos [8], [11] consideram estes parâmetros constantes.

A impedância de surto de torres ainda pode ser calculada diretamente pelos valores de corrente que incidem na estrutura e a tensão resultante. No estudo apresentado por [47], os autores consideraram as funções de corrente $i(t)$ e de tensão $u(t)$ variantes no tempo, resultando assim, em uma impedância de surto transitória $z(t)$, conforme equação 2.3. Todavia, pelo o que foi exposto anteriormente, esses parâmetros são variáveis no tempo e no espaço (Δh).

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad 2.3$$

No trabalho apresentado por [33], a impedância de surto também é uma função variante no tempo. Entretanto, neste caso ela é calculada através da razão entre a tensão transitória $u(t)$ e o valor de pico da onda de corrente I_o , conforme a equação 2.4.

$$z(t) = \frac{u(t)}{I_o} \quad 2.4$$

Em ambos os casos, a impedância de surto transitória é calculada com base nos valores de tensão no topo da torre, tomando-se como referencial o solo. Assim, a torre é considerada um elemento concentrado com valores ditados pelas equações 2.3 ou 2.4, de forma que sua variação no espaço (pela altura da estrutura) não é considerada.

Em estudos experimentais, normalmente são registradas as ondas de tensão e de corrente, o que proporcionaria, através das equações 2.3 e 2.4, em uma impedância de surto transitória. Entretanto, vários trabalhos [7], [8], [10], [11] optam em utilizar valores instantâneos da tensão e da

corrente, resultando assim no cálculo de uma impedância de surto constante. Para tanto, normalmente utiliza-se o valor de pico da onda de tensão (U_o) e o valor da corrente no momento em que ocorre tal pico (I_{U_o}), conforme a equação 2.5.

$$Z = \frac{U_o}{I_{U_o}} \quad 2.5$$

Assim, a torre é representada por uma impedância de surto constante, à qual é considerada como o maior valor da relação entre tensão e corrente.

De forma geral, as diferentes silhuetas de torres tornam difícil o desenvolvimento de uma metodologia genérica para a determinação da impedância de surto, não havendo uma equação geral que traga resultados coerentes para qualquer tipo de torre. Assim, vários estudos foram propostos ao longo dos anos, e cada um deles deve ser avaliado para se verificar suas respostas para diferentes torres.

2.2. Métodos Teóricos

Os métodos teóricos são embasados na abordagem de campos eletromagnéticos e utilizam as equações de Maxwell para determinação da impedância de surto de torres. Entretanto, devido às formas físicas complexas, a resolução de tais equações pode ser um processo trabalhoso, o que requer a necessidade de utilização de técnicas específicas para aproximação dos resultados, como os modelos geométricos e os métodos numéricos.

A técnica de modelos geométricos consiste na utilização de formas geométricas simples para representação da torre. Esta aproximação facilita a resolução das integrais de volume e de superfície para determinação dos campos eletromagnéticos.

Os métodos baseados nestes modelos são encontrados com frequência na literatura, e podem ser uma opção interessante para o cálculo da impedância de surto em torres com silhuetas semelhantes às geometrias consideradas. Outras considerações são tomadas nestes métodos, tais como:

- O solo e a torre são condutores perfeitos;
- A carga elétrica é distribuída uniformemente na torre;
- O surto viaja pela torre com velocidade constante e igual à velocidade da luz.

Como pode ser visto, são realizadas algumas aproximações, que podem levar a resultados de impedâncias de surto inadequados para o tipo de estrutura sob análise.

Uma alternativa é o uso de métodos numéricos para a resolução das equações de campo eletromagnético. Nesses casos, evita-se a realização de aproximações no formato das torres,

proporcionando uma maior confiabilidade aos resultados. Entretanto, tais métodos devem ser utilizados com cuidado, pois uma modelagem inadequada pode levar a resultados imprecisos.

A seguir serão apresentados os principais métodos teóricos, baseados nas técnicas supracitadas.

2.2.1. Método 1 e Método 2 - Técnica de Jordan [6] e Técnica de Jordan Revisada [36]

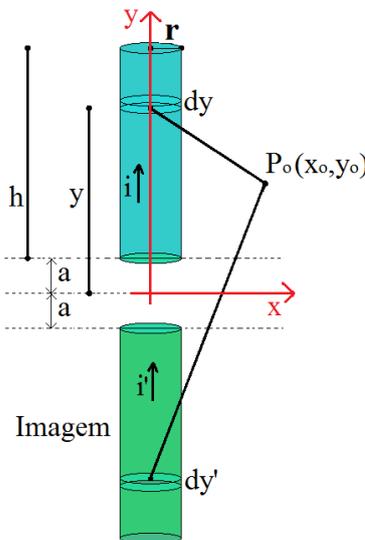
Estes métodos consideram a torre com uma forma cilíndrica, equivalente a um condutor vertical. Através da teoria de campo eletromagnético, no Método 1 foi desenvolvida a expressão 2.6 para o cálculo da impedância de surto de torres.

$$Z = 60 \ln\left(\frac{h}{r}\right) + 90 \frac{r}{h} - 60 \tag{2.6}$$

Onde: h e r são a altura e raio do cilindro que representa a torre.

Em [6] não é demonstrado o desenvolvimento da expressão 2.6. Entretanto, em [36] foi proposto o Método 2, no qual esta equação foi revisada supondo-se que o Método 1 utilizou o vetor potencial magnético \vec{A} para calcular a indutância do cilindro que representa a torre. Para esta hipótese, foi utilizado o método das imagens, conforme ilustra a Figura 2.2, onde, i e i' representam a corrente no condutor real e no condutor imagem, respectivamente. O potencial vetor magnético \vec{A} é calculado em um ponto P_0 genérico com coordenadas (x_0, y_0) . O parâmetro “a” é definido como a profundidade no solo onde o potencial é zero.

Figura 2.2: Métodos das imagens aplicado a um cilindro vertical.



Fonte: Adaptado de [36]

O vetor potencial magnético pode ser encontrado pela soma algébrica dos vetores potencial magnético originados pelas correntes i e i' , nomeados aqui como \vec{A}_r e \vec{A}_i , respectivamente. De acordo com o método das imagens, i e i' possuem o mesmo sentido [13]. Entretanto, no Método 1 considerou-se que as correntes i e i' possuíam sentidos opostos, o que motivou a revisão apresentada em [36], onde propôs-se a equação 2.7.

$$\vec{A} = \frac{\mu i}{4\pi} \left[\int_0^{h+a} \frac{1}{\sqrt{(y_o - y)^2 + x_o^2}} + \int_0^{h+a} \frac{1}{\sqrt{(y_o - y)^2 + x_o^2}} \right] \hat{y} \quad 2.7$$

Onde \hat{y} é o vetor unitário na direção do eixo y ;

μ é a permeabilidade magnética do material que compõe a torre.

A primeira integral corresponde ao termo \vec{A}_r , e a segunda corresponde a \vec{A}_i . Depois de resolver as integrais e sabendo que $dL = \vec{A} dy / i$, a expressão 2.8 é encontrada [13].

$$dL = \frac{\mu}{4\pi} * \left\{ \ln \left[\frac{(h + a - y_o) + \sqrt{(h + a - y_o)^2 + x_o^2}}{a - y_o + \sqrt{(a - y_o)^2 + x_o^2}} \right] + \ln \left[\frac{(h + a + y_o) + \sqrt{(h + a + y_o)^2 + x_o^2}}{a + y_o + \sqrt{(a + y_o)^2 + x_o^2}} \right] \right\} dy_o \quad 2.8$$

Onde dL é o elemento diferencial de indutância.

Para calcular a indutância L por unidade de comprimento do condutor vertical, é necessário integrar a equação 2.8 no intervalo de $a \leq y_o \leq a+h$, em $x_o = r$, e, em seguida, dividir o resultado por h . Assumindo-se a condutividade do solo como infinita, pode-se considerar $a = 0$, levando a expressão 2.9.

$$L = \frac{h\mu}{4\pi} \left[2 \ln \left(\frac{2h + \sqrt{4h^2 + r^2}}{r} + \frac{r}{h} - \frac{\sqrt{4h^2 + r^2}}{h} \right) \right] [H/m] \quad 2.9$$

A impedância de surto da torre pode ser obtida simplesmente pela multiplicação da equação 2.9 pela velocidade da luz. Ainda, considerando-se $h \gg r$, a equação resultante pode ser simplificada, resultando na equação 2.10

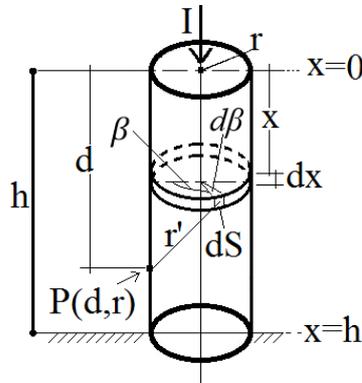
$$Z = 60 \ln \left(\frac{4h}{r} \right) - 60 \quad 2.10$$

Assim, pode-se destacar duas expressões para o cálculo da impedância de surto de torres de transmissão, sendo elas 2.6 e 2.10, integrantes do Método 1 e Método 2, respectivamente.

2.2.2. Método 3 - Técnica de Wagner e Hileman [7]

Na pesquisa apresentada em [7], considerou-se as torres com a forma de um cilindro de altura h e raio r , sobre um solo condutor perfeito, como ilustrado na Figura 2.3, onde: dS é o elemento infinitesimal da superfície do cilindro; β é o ângulo desse elemento com o eixo horizontal; $d\beta$ é o elemento infinitesimal deste ângulo; e r' é a distância de dS até o ponto P.

Figura 2.3: Configuração para cálculo da impedância de surto de uma torre cilíndrica.



Fonte: Adaptada de [8]

Com base nesta figura o campo elétrico \vec{E} em um ponto P, pode ser dado por:

$$\oint \vec{E} dS = - \oint \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} dS \quad 2.11$$

Onde: \vec{A} é o vetor potencial magnético;

S é a superfície cilíndrica;

t é o tempo;

Para uma corrente I com forma de onda retangular aplicada neste modelo em $x = 0$ e no tempo $t = 0$, a densidade de corrente superficial J_S pode ser calculada pela equação 2.12.

$$J_S = \frac{I}{2\pi r} \quad 2.12$$

Considerando um elemento dx do modelo, então o vetor potencial magnético no ponto (d, r) pode ser dado por:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{J_S(x, \beta, t - \frac{r'}{c})}{r'} dS \quad 2.13$$

Onde: dS é o elemento infinitesimal de superfície ($dx.r.d\beta$);

r' é a distância de dS até o ponto (d, r);

c é a velocidade da luz;

t é o tempo;

Substituindo-se a equação 2.12 na equação 2.13, chega-se na expressão:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{I}{2\pi r} \frac{rdx.d\beta}{\sqrt{(x-d)^2 - x^2}} \quad 2.14$$

O limite de integração y deve levar em consideração os efeitos de atraso na onda de corrente (considerada como um degrau) ao viajar pela torre, de forma que:

$$y = \frac{1}{2}(d + ct) + \frac{r^2}{2(d - ct)} \quad 2.15$$

Assim, integrando a expressão 2.14 com este limite obtém-se:

$$\vec{A} = \frac{\mu I}{4\pi} \left[\log(ct - d) - \log(-d + \sqrt{d^2 - x^2}) \right] \quad 2.16$$

Fazendo-se o termo diferencial de \vec{A} no tempo, tem-se [7], [8]:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{c}{(ct - d)} \quad 2.17$$

Assim, pode-se reescrever a equação 2.12 como:

$$\int_0^d \vec{E} d\vec{s} = -\frac{\mu I c}{4\pi} \ln \frac{ct}{ct - d} \quad 2.18$$

Considerando valores da altura do cilindro, que representa a torre, muito maiores que seu raio ($h \gg r$), e sabendo-se que $h = ct$ (velocidade do surto considerada constante e igual à velocidade da luz [7], [8]), a equação 2.18 pode ser escrita como:

$$\int_0^d \vec{E} d\vec{s} = -I * \left[60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) \right] \quad 2.19$$

O termo entre colchetes na expressão 2.19 é considerado, no Método 3, como a impedância de surto transitória de torres, ou seja:

$$z(t) = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) \quad 2.20$$

Para a determinação de um valor constante de impedância de surto, o Método 3 considera o valor de pico da tensão no tempo $t = \frac{2h}{c}$, para uma corrente com forma de onda em degrau aplicada a um modelo cilíndrico, resultando-se na expressão 2.21 [7].

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) \quad 2.21$$

Notou-se em [8] que a impedância de surto calculada utilizando a equação 2.21 resulta em valores maiores do que aqueles obtidos por medições, evidenciando a necessidade de ajustes nesse método.

2.2.3. Método 4 e 5 - Técnica de Sargent e Darveniza [8] para Torre Cilíndrica e Cônica

A metodologia proposta em [8], apresenta duas formulações para cálculo da impedância de surto, cada uma baseada em uma representação geométrica da torre. A primeira delas, aqui nomeada método 4, consistiu em um equacionamento similar àquele apresentado em [7] descrito anteriormente, diferenciando-se deste por analisar a impedância de surto de uma torre cilíndrica para uma corrente com forma de onda em rampa.

Ainda considerando a configuração e nomenclatura da Figura 2.3, uma onda de corrente em rampa aplicada na torre em $x = 0$ e no tempo $t = 0$, provoca um retardo na resposta da densidade de corrente, representada por:

$$J_S(x, t - \frac{r'}{c}) = \frac{K \left(t - \frac{x}{c} - \frac{r'}{c} \right)}{2\pi r} \quad 2.22$$

Onde K representa a função da onda de corrente em rampa.

A partir da equação 2.22, em [8] é apresentado um desenvolvimento semelhante ao proposto no Método 3 [7], mas com uma nova expressão para considerar os efeitos de retardo da onda de corrente. Desta forma, substituindo-se a equação 2.22 na equação 2.13, pode-se determinar a impedância de surto da torre através do cálculo do vetor potencial magnético \vec{A} , resultando na expressão 2.23.

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) - 60 \quad 2.23$$

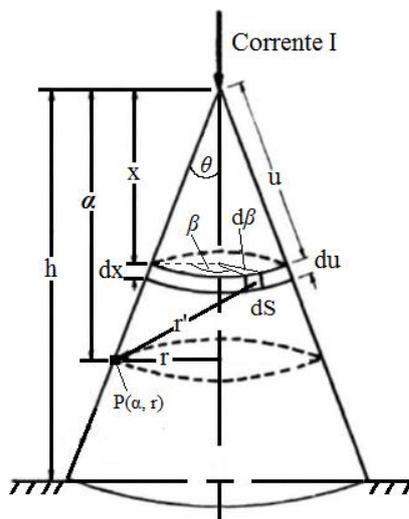
De forma semelhante à metodologia anterior, para a determinação de um valor constante de impedância de surto, é tomado o momento em que ocorre a tensão de pico ($t = \frac{2h}{c}$). Assim, a impedância de surto de uma torre cilíndrica, quando submetida a uma corrente com forma de onda em rampa, pode ser dada por [8]:

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 60 \quad 2.24$$

Nota-se que as expressões 2.24 e 2.21, se diferenciam somente pelo termo negativo, implicando na redução em 60 ohms nos valores resultantes.

A segunda formulação proposta em [8] (método 5), propõem o cálculo da impedância de surto considerando uma corrente com forma de onda em degrau incidente no topo de uma torre representada por um modelo cônico, como ilustra a Figura 2.4, onde h e r são a altura e raio do cone, θ é o ângulo que a geratriz forma com o eixo vertical, onde dS é o elemento infinitesimal da superfície do cone, β é o ângulo desse elemento com o eixo horizontal, $d\beta$ é o elemento infinitesimal deste ângulo, r' é a distância de dS até o ponto genérico $P(\alpha, r)$, u é distância do vértice até o elemento dS .

Figura 2.4: Configuração para cálculo da impedância de uma torre com forma cônica.



Fonte: Adaptada de [8]

A contribuição do vetor potencial magnético $|\delta \vec{A}|$ em um ponto qualquer (D, r) de um elemento $(du, d\beta)$, pode ser dada pela equação 2.25 [8]:

$$|d\vec{A}| = \frac{\mu I}{4\pi 2\pi} \frac{du \cdot d\beta}{r'} \quad 2.25$$

Com base na Figura 2.4 pode-se determinar r' como:

$$r' = \sqrt{\left(\frac{1}{(\cos \theta)^2}\right) (x^2 + D^2 - ([1 + (\tan \theta)^2 \cdot \cos \beta] 2 \cos \theta) D \cdot x)} \quad 2.26$$

Assim, o vetor potencial magnético em (D, r) , na direção do vetor unitário \hat{u} , pode ser dado por:

$$\vec{A} = \frac{\mu I}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{r dx \cdot d\beta}{\sqrt{x^2 + D^2 - 2xD[(\cos \theta)^2(1 + (\tan \theta)^2 \cos \beta)]}} \hat{u} \quad 2.27$$

O limite de integração y deve levar em consideração os efeitos de atraso na onda de corrente (considerada como um degrau) ao viajar pela torre cônica, de forma que o tempo de viagem pela torre é dado por [8]:

$$t = \frac{y + \sqrt{y^2 + D^2 - 2yD[(\cos \theta)^2(1 + (\tan \theta)^2 \cos \beta)]}}{c \cos \theta} \quad 2.28$$

Onde c é a velocidade da luz.

Isolando o limite y na equação 2.28 e resolvendo a equação 2.27 com tal limite, obtém-se:

$$\vec{A} = \frac{\mu I}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \varphi [\ln(\cos \theta ct - \varphi D) - \ln(D - \varphi D)] d\beta \quad 2.29$$

Onde: $\varphi = (\cos \theta)^2(1 + (\tan \theta)^2 \cos \beta)$.

Fazendo-se o termo diferencial de \vec{A} no tempo, tem-se [8], [13]:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{E}_u = \frac{\mu I}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \frac{c\varphi \cos \theta}{ct \cos \theta - D\varphi} d\beta \quad 2.30$$

Substituindo-se a equação 2.30 na equação 2.11, obtém-se:

$$\int_0^{ct} \vec{E} d\vec{u} = -\frac{\mu I}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{ct} \frac{c\varphi}{ct - u\varphi} du d\beta \quad 2.31$$

Resolvendo-se as integrais, tem-se:

$$\int_0^{ct} \vec{E} d\vec{u} = -I \left[60 \ln \frac{\sqrt{2}}{\sin \theta} \right] \quad 2.32$$

O termo entre colchetes na expressão 2.32 é considerada, pelo Método 5 [8], como a impedância de surto de uma torre cônica submetida a uma corrente com forma de onda em degrau, ou seja:

$$Z = 60 \ln \frac{\sqrt{2}}{\sin \theta} \quad 2.33$$

Ainda pode-se reescrever a equação 2.33 em função da altura e raio do cone que representa a torre:

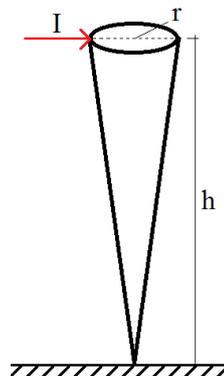
$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{h^2 + r^2}}{r} \right) \quad 2.34$$

Nota-se que essa metodologia considera a impedância de surto constante, enquanto que nos métodos anteriores, apresentou-se a possibilidade de se calcular a impedância de surto transitória.

2.2.4. Método 6, 7 e 8 - Técnica de Chisholm, Show e Srivastava para Torre Cilíndrica, Cônica e Composta

Nos métodos anteriores, foi considerado que as descargas incidiam verticalmente no topo da torre, enquanto que em [3], também foi verificada a incidência horizontal da descarga. Isso se torna uma consideração relevante, já que na maioria dos casos a descarga incide no meio do vão e chega até a torre horizontalmente por meio do cabo-guarda [48]. Nessas situações, considerando-se a impedância de surto da torre constante, o modelo do cone invertido deve ser utilizado [3], [13]. Esse modelo se baseia em uma estrutura cônica posicionada verticalmente e com o vértice no plano de terra, como ilustra a seguir.

Figura 2.5: Modelo de cone invertido para cálculo da impedância de surto.



Fonte: Do autor

A impedância de surto para essa forma geométrica é determinada, através da equação 2.35 [3], [13].

$$Z = 60 \ln \left(\cot \frac{\theta}{2} \right) \quad 2.35$$

Onde θ é o meio ângulo do cone.

A equação 2.35 pode ser reescrita em função do raio r e altura h do cone invertido, de modo que:

$$Z = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{r}{h} \right) \right] \quad 2.36$$

Entretanto, na maioria dos casos a forma física de uma torre é significativamente diferente de um cone invertido.

Nos Métodos 6 e 7, a expressão 2.36 foi modificada de forma que a altura h fosse uma função compatível com o modelo geométrico adotado, e assim utilizada para o cálculo da impedância de surto de qualquer torre.

Supondo-se que o surto se propaga a uma velocidade constante e igual à velocidade da luz c , a posição de análise na torre pode ser representada por expressões de tempo e velocidade. A partir desta suposição, determinou-se as equações 2.37 e 2.38, para o cálculo da impedância de surto de torres representadas por um cilindro (Método 6) e por um cone (Método 7), respectivamente [3].

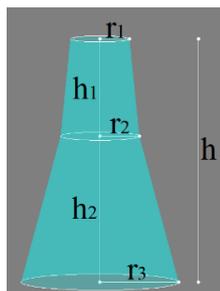
$$Z = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{r}{h} \right) \right] - 60 \quad 2.37$$

$$Z = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{r}{h} \right) \right] \quad 2.38$$

Assim, em [3] são consideradas estas duas equações para determinação da impedância de surto em torres, para a incidência horizontal da corrente de surto.

Dois anos depois, nos estudos reportados em [12], foi apresentado um método baseado no cálculo da capacitância de objetos com formas arbitrárias. Para tanto, considerou-se uma forma geométrica composta por duas bases de cone, a qual é ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6: Modelo para cálculo da impedância de surto de torres, usado pelo Método 8.



Fonte: Adaptado de [12].

Com base nas dimensões desta forma geométrica, tomando-se a relação da altura e raio, a impedância de surto da torre representada por este modelo é determinada pela equação 2.39.

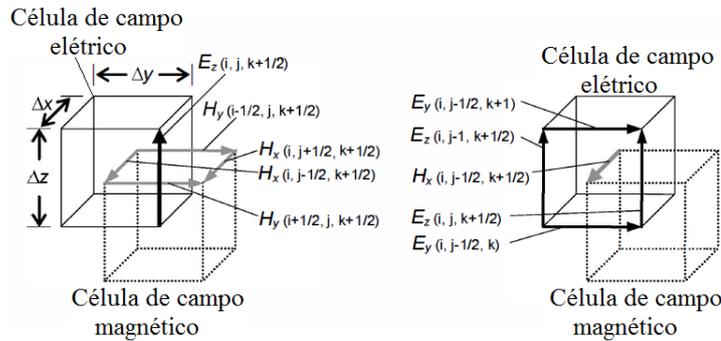
$$Z = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2} \right) \right) \right] \quad 2.39$$

Em 1991, o CIGRÉ [20] recomendou o Método 8, e a expressão 2.39, para o cálculo da impedância de surto em torres.

2.2.5. Método 9 - Técnica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

O DFDT consiste em um método numérico comumente utilizado como alternativa para resolução de problemas eletromagnéticos [17], [35], [38], [41], [49], [50]. Este método envolve a discretização do espaço de forma a aplicar diferenças finitas à forma diferencial das equações de Maxwell. O DFDT requer que todo o modelo seja dividido em células cúbicas (3D) ou retangulares (2D). As células para o cálculo do campo elétrico e as células para o cálculo do campo magnético são colocadas em posições relativas umas das outras, como ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Posicionamento das células de campo elétrico e magnético



Fonte: Adaptado de [41]

As equações em função do tempo para os componentes de campo elétrico e magnético (E_x , E_y , E_z) e (H_x , H_y e H_z), são mostrados a seguir em sua forma diferencial:

$$\nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + J^{n-\frac{1}{2}} = \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma E^{n-\frac{1}{2}} \quad 2.40$$

Onde: H e E são vetores de intensidade de campo magnético e elétrico, respectivamente;

J é o vetor densidade de corrente;

ε é a permissividade elétrica;

σ é a condutividade elétrica;

t é o tempo;

$n - \frac{1}{2}$ é o passo de tempo atual.

Fazendo a derivada no tempo da equação 2.40, através de diferenças finitas centrais, obtém-se:

$$\varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma E^{n-\frac{1}{2}} \approx \varepsilon \frac{E^n - E^{n-1}}{\Delta t} + \sigma \frac{E^n - E^{n-1}}{2} \quad 2.41$$

Onde Δt é o incremento de tempo.

Rearranjando a equação 2.41 e atualizando-a para o campo elétrico no tempo n e o campo magnético em $n - \frac{1}{2}$, tem-se.

$$E^n = \left(\frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \right) E^{n-1} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \right) \nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} \quad 2.42$$

A equação 2.42 pode ser utilizada para se obter os valores de campo elétrico E_z^n , E_x^n e E_y^n para cada célula. Já para o cálculo do campo magnético, toma-se a lei de Faraday:

$$\nabla \times E^n = -\mu \frac{\partial H^n}{\partial t} \approx \mu \frac{H^{n+\frac{1}{2}} - H^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad 2.43$$

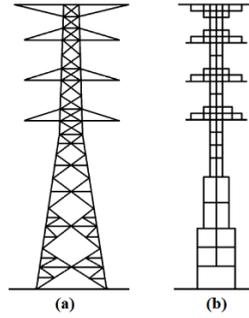
Rearranjando 2.43 para campo magnético no tempo $n + \frac{1}{2}$ e o campo elétrico no tempo n , tem-se:

$$H^{n+\frac{1}{2}} = H^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \nabla \times E^n \quad 2.44$$

De forma análoga ao cálculo do campo elétrico, pode-se calcular o campo magnético, $H_x^{n+\frac{1}{2}}$, $H_y^{n+\frac{1}{2}}$ e $H_z^{n+\frac{1}{2}}$ nas células através da equação 2.44.

Desta forma, pode ser realizado o cálculo do campo elétrico e do campo magnético em cada elemento, em função do tempo, possibilitando uma análise transitória destas grandezas. A torre então sofre um processo de discretização, para que o método seja utilizado. A Figura 2.8 mostra um exemplo de torre e sua discretização em células com formas de cubo.

Figura 2.8: Exemplo de (a) torre e (b) respectivo modelo discretizado em cubos.



Fonte: Adaptado de [17]

A tensão no topo da torre pode ser calculada através da integral de linha do campo elétrico. Conhecendo-se a corrente aplicada, pode-se então determinar a impedância de surto de torres através da relação entre tensão e corrente.

2.2.6. Método 10 - Método dos Momentos

O Método dos Momentos (MoM) é um método numérico utilizado na resolução de equações de operadores lineares, como equações diferenciais. Esse método geralmente é empregado na solução de problemas de radiação em antenas, especificamente na resolução de equações diferenciais eletromagnéticas, aplicadas a superfícies ou volumes, no domínio da frequência [51], [52].

No MoM, é aplicado um operador linear L na função do problema f , como na expressão 2.45.

$$Lf = e \quad 2.45$$

Onde: e é uma excitação conhecida.

A função desconhecida do problema (f) é aproximada por uma série finita de funções conhecidas (f_j) com coeficientes desconhecidos (a_j):

$$f \cong \sum_{j=1}^n a_j f_j \quad 2.46$$

Onde n é o número funções f_j que representa a função f .

As funções aproximadas são substituídas na equação original, o que resulta em um sistemas de equações algébricas com n coeficientes desconhecidos.

Os coeficientes a_j podem ser obtidos realizando o produto escalar da expressão 2.45 com um conjunto de funções ponderadas w_i , de forma que:

$$\langle w_i, Lf \rangle = \langle w_i, e \rangle \text{ para } i = 1, \dots, n \quad 2.47$$

Devido a linearidade de L , pode-se substituir a função f , da equação 2.46, pelos termos da equação 2.47:

$$\langle w_i, e \rangle = \sum_{j=1}^n a_j \langle w_i, Lf_j \rangle \quad 2.48$$

Escrevendo a equação 2.48 na forma matricial, tem-se:

$$[E] = [G][A] \quad 2.49$$

Onde: Os elementos da matriz G são: $G_{ij} = \langle w_i, Lf_j \rangle$

Os elementos da matriz A são: $A_j = a_j$

Os elementos da matriz E são: $E_i = \langle w_i, e \rangle$

A partir da solução desse sistema matricial, são obtidos os coeficientes a_j . Para a solução das funções de expansão é utilizado o algoritmo NEC-2 (*Numerical Electromagnetic Code*) [30], [33], [37], [50], [53], [54], o qual se baseia na representação da torre por um condutor filamental, o qual é dividido em vários segmentos para resolução do sistema de equações.

Desprezando-se os efeitos de acoplamento entre tais segmentos, a composição dos resultados em cada um desses segmentos, formam os valores de carga elétrica total do condutor. A partir da distribuição de carga elétrica, o potencial no condutor pode ser determinado, de modo que a impedância de surto é calculada através da razão entre este potencial e a corrente, esta última devendo ser conhecida.

2.3. Métodos Experimentais

Os métodos experimentais consistem basicamente em ensaios, em laboratório ou em campo, onde uma descarga atmosférica é reproduzida através de geradores de impulso. Estas práticas são realizadas em torres reais, para os ensaios realizados em campo, ou em réplicas reduzidas da estrutura, para ensaio em laboratórios. Através destes ensaios são obtidos valores de corrente e tensão na torre, os quais são utilizados para determinação da impedância de surto.

Dois métodos experimentais destacam-se na bibliografia: o método direto e o método de reflexão (indireto). A seguir essas técnicas serão apresentadas para uma compreensão dos procedimentos adotados em cada uma delas.

2.3.1. Método Direto

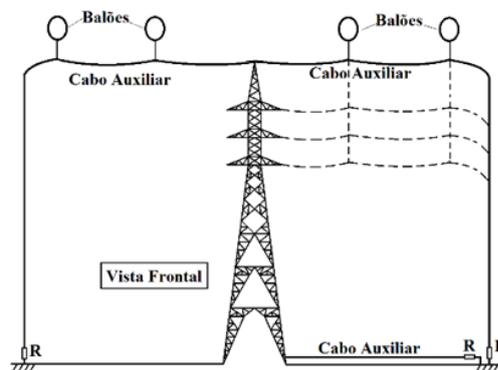
O método direto [4], [10], [11], [17], [22], [55] consiste em se aplicar, através de um gerador de impulso, o surto de corrente diretamente no topo da torre e então registrar a diferença de potencial entre o ponto de injeção da corrente e o pé da torre ou em outro ponto de análise. Essa medição é um caminho simples para se determinar a tensão em qualquer ponto da torre devido a um impulso de corrente.

A medição direta traz algumas complicações em sua execução, como a dificuldade em se elevar equipamentos até o topo da torre. Em vários experimentos, são utilizados geradores de impulso de baixa potência, e conseqüentemente de tamanhos reduzidos, possibilitando seu posicionamento no topo da torre [4], [11], [17], [22].

Neste método ainda são utilizados cabos de referência de tensão e um cabo de injeção de corrente. Alguns trabalhos realizaram a elevação destes cabos por meio de balões [10], [17], [22]. Nesse caso, os balões posicionam os cabos paralelamente ao solo e perpendicularmente entre si e em relação à linha de transmissão, minimizando assim o acoplamento indutivo. O posicionamento inadequado de tais cabos pode levar a um acoplamento indutivo entre eles, o que prejudicaria a aquisição dos dados.

Em [22], as medições foram realizadas em um linha energizada, com o posicionamento dos cabos de injeção de corrente e de medição de tensão perpendiculares somente em relação à LT, e alinhados entre si. O alinhamento dos cabos neste caso, implica na influência do campo magnético gerado pela corrente injetada nas medições de tensão. A Figura 2.9 mostra tal configuração.

Figura 2.9: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições alinhados.



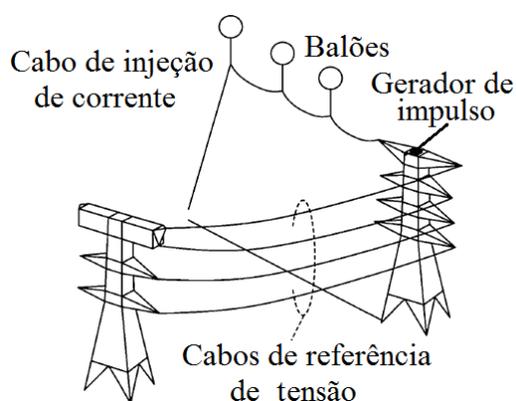
Fonte: Adaptado de [22]

Ainda foram conectadas resistências às extremidades dos cabos auxiliares, com valores semelhantes às suas impedâncias características, de forma a evitar reflexões de ondas indesejadas. As medições foram realizadas através de transdutores ópticos e osciloscópio digital.

Nota-se a utilização de três cabos auxiliares: o cabo à esquerda, para a injeção da corrente e os dois cabos à direita, para verificação da diferença de potencial na torre. As linhas tracejadas sinalizam a possibilidade de movimentação do cabo auxiliar para medição da tensão em diferentes pontos da torre.

Em [17], foi apresentada uma medição realizada em uma linha desenergizada, o que elimina qualquer influência, nas medições, dos cabos fases da LT. A Figura 2.10 mostra a configuração utilizada.

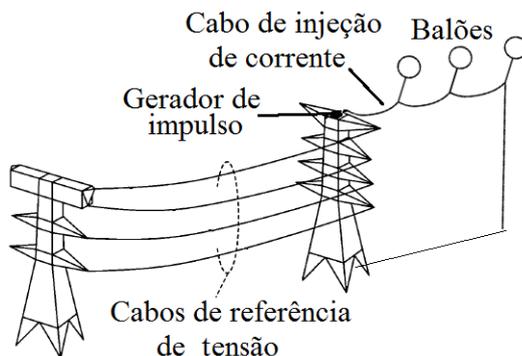
Figura 2.10: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições perpendiculares



Fonte: Adaptado de [17]

Nesta medição, os cabos de tensão e de corrente estão posicionados perpendicularmente entre si e também em relação ao eixo vertical da torre. Esta disposição é a ideal para se minimizar o efeito de acoplamento magnético originado pela corrente injetada. Nessa mesma referência, ainda foram realizadas medições para a configuração da Figura 2.11, ou seja, com o alinhamento dos cabos de injeção de corrente e de medição de tensão.

Figura 2.11: Configuração de medição pelo método direto, com cabos de medições alinhados.



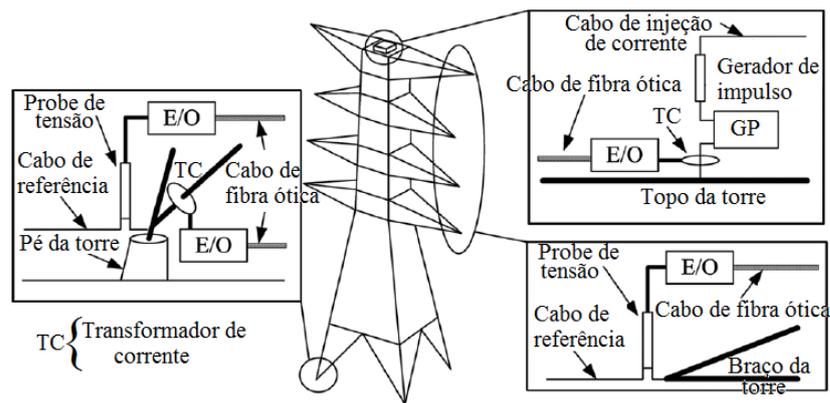
Fonte: Adaptado de [17]

Essa configuração basicamente modificou a posição do cabo de injeção de corrente, colocando-o alinhado com o cabo de medição de tensão, de forma semelhante à Figura 2.9. Como dito anteriormente, esse posicionamento pode impactar as medições da tensão, já que o cabo de referência é influenciado pela corrente de surto injetada.

Resultados teóricos utilizando o Método 10, sugerem que a impedância de surto do arranjo com o alinhamento desses cabos é de 3,1% a 5,4% menor que os valores obtidos utilizando-se o arranjo perpendicular [56]. As medições apresentadas em [17] sugerem uma diferença ainda maior entre os valores de impedância de surto obtidos utilizando-se as duas configurações: cerca de 10,15%.

Independente da configuração, os equipamentos e materiais utilizados em [17] são os mesmos. A Figura 2.12 descreve detalhadamente as ligações dos componentes para a medição apresentada em [17].

Figura 2.12: Configuração e ligações dos equipamentos de medição.



Fonte: Adaptado de [17]

Para minimizar a interferência do campo magnético nas medições ainda são utilizados cabos de fibra ótica para conectar os sensores e medidores.

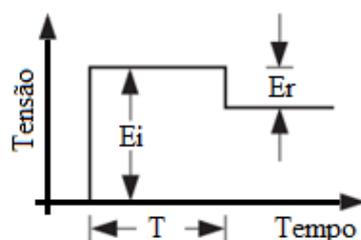
Assim, através das medições são obtidas as ondas da corrente injetada e as ondas de tensão resultantes em diferentes pontos da torre. A impedância de surto é então calculada pela relação entre tensão e corrente, conforme as equações 2.3, 2.4 ou 2.5. Em [17] foi utilizada a equação 2.5 para se obter os valores de impedância de surto da torre.

2.3.2. Método de reflexão

O método de reflexão utiliza a técnica de reflectometria no domínio do tempo (*Time-Domain Reflectometry* - TDR). O TDR é uma técnica que realiza a medição dos coeficientes de reflexão de um sistema através da aplicação de uma onda de tensão em degrau. Um gerador de impulso de alta

qualidade e de impedância conhecida aplica tal tensão (E_i) no topo da torre. Ao incidir na base da torre, a onda de tensão é refletida parcialmente devido a descontinuidade entre os valores da impedância da torre e a impedância de aterramento. A Figura 2.13 ilustra o comportamento da medição da onda de tensão no topo da torre.

Figura 2.13: Perfil da onda de tensão medida no topo da torre (resposta ideal)



Fonte: Do autor

A tensão registrada no topo da torre é a soma algébrica da tensão aplicada (E_i) e a tensão refletida (E_r). O intervalo T é o tempo que o degrau de tensão leva para viajar do topo da torre até sua base e retornar até o topo da torre. Assim, pelo monitoramento da tensão no topo da torre é possível se determinar tempo de viagem do surto.

Um processamento analítico dos dados normalmente é necessário para determinar o valor de impedância de surto. Para tanto, em [3] é proposto um algoritmo numérico para o cálculo da impedância de surto da torre a partir das medições realizadas através do TDR. Baseado em diagramas de reflexão de ondas, o algoritmo realiza o cálculo de coeficientes de reflexão para se chegar ao valor de impedância de surto da torre.

2.4.Considerações finais

A impedância de surto de torres de transmissão é um parâmetro de grande importância na determinação das tensões que as cadeias de isoladores são submetidas. Assim, seu valor deve ser determinado com alto nível de precisão, pois variações em seu cálculo podem implicar na implementação de projetos de coordenação de isolamento pouco eficientes, o que pode levar, em situações extremas, a danos em equipamentos e interrupção prolongada no fornecimento de energia.

Como visto, existem vários métodos que propõem o cálculo da impedância de surto através de equacionamentos analíticos, métodos numéricos ou por vias experimentais.

Os métodos analíticos possuem grande praticidade, pois com poucos parâmetros (altura e raio da base) podem determinar a impedância de surto da torre. Entretanto, as considerações realizadas

para se deduzir suas equações podem trazer imprecisão nos resultados. A aproximação da silhueta da torre a formas geométricas (cilindro e cone) é a principal característica destes métodos, e a que facilita o processo analítico de resolução das equações de campo eletromagnético. Entretanto, as silhuetas das torres, na maioria das vezes possuem formas diferenciadas, o que traz imprecisão na impedância de surto calculada utilizando tais métodos.

Deve-se observar também a variedade de métodos analíticos existentes, os quais resultam em valores discrepantes. Este fato é resultante do emprego de modelos diferenciados e de abordagens divergentes, evidenciando a necessidade do desenvolvimento de uma metodologia que se aplique a qualquer tipo de torre.

Já os métodos numéricos utilizados na resolução das equações de campos eletromagnéticos podem ser uma alternativa viável para o cálculo da impedância de surto de torres. Tais métodos, normalmente implementados na forma de algoritmos computacionais, trazem uma maior flexibilidade de modelagem das estruturas, podendo abranger silhuetas diferenciadas. Entretanto, por se tratar de métodos de aproximação de resultados, eles possuem peculiaridades que devem ser consideradas, para que a representação da torre seja fidedigna, e os resultados sejam precisos.

A discretização do domínio através de células cúbicas, realizada no DFDT, pode não representar a torre fielmente. Na tentativa de diminuir os elementos para melhor representar a torre, o esforço computacional pode ser elevado a ponto de inviabilizar a utilização desta técnica.

Por outro lado, o MoM, normalmente aplicado no domínio da frequência, faz uso de técnicas de transformadas, as quais devem ser aplicadas com cuidado, pois os erros introduzidos pela amostragem, integração numérica e truncamento das funções no domínio do tempo e frequência, podem levar a imprecisões significativas nos resultados.

As medições são alternativas que resultam em valores com erros mínimos, o que levaria a uma maior precisão no desenvolvimento dos projetos de proteção. Entretanto, a medição em todas as torres de uma LT é um processo inviável, visto o grande número de estruturas e a complexidade das medições. As dimensões elevadas da torre dificultam o posicionamento dos equipamentos bem como o lançamento dos cabos de medição.

Alguns trabalhos utilizam balões para elevação dos cabos de medição. Esta alternativa pode ser precária, visto que os balões estão expostos a rajadas de ventos e podem posicionar de forma equivocada tais cabos. Além disso, os locais de montagem das torres normalmente é de difícil acesso, dificultando ainda mais o deslocamento dos equipamentos necessários para a prática em campo.

Como alternativa podem ser realizados ensaios em laboratórios, em modelos em escala reduzida. Mesmo assim, normalmente são realizados ensaios em um único tipo de torre, não abrangendo a diversidade de silhuetas existentes. Ainda, tais ensaios devem ser realizados

cuidadosamente, e os dados coletados devem ser tratados com as devidas considerações para a escala aplicada. Desta forma, os métodos experimentais acabam se tornando alternativas complexas e dispendiosas.

Visto as diversas dificuldades expostas anteriormente, no capítulo 3 será proposta uma técnica para cálculo da impedância de surto baseada na determinação da indutância e capacitância da torre. Para tanto, deve-se desenvolver o modelo 3D da torre, ao qual será aplicado o Método de Elementos Finitos. Posteriormente, os valores resultantes serão utilizados em cálculos analíticos para determinação da impedância de surto da torre, bem como a velocidade de propagação do surto.

CAPÍTULO 3 – PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO

3.1 Considerações Iniciais

As estratégias adotadas para a obtenção da impedância de surto em torres de transmissão, podem não ser adequadas em determinados estudos. Como destacado no Capítulo 2, os métodos analíticos propõem formulações alicerçadas na teoria clássica de campos eletromagnéticos. Para contornar a complexidade da resolução analítica destas propostas, várias considerações são realizadas, culminando assim em equações mais simples que, por sua vez, proporcionam um valor constante da impedância de surto.

É notório que os recentes avanços na área computacional viabilizaram a utilização de métodos matemáticos para resolução de problemas das mais diversas naturezas, tais como: termodinâmica, eletromagnetismo, mecânica, ondulatória, etc. Tais técnicas, aliadas a computadores com alto poder de processamento, têm sido aplicadas no desenvolvimento e aprimoramento de diversas tecnologias [57].

De modo a se obter resultados mais compatíveis com os valores reais, e através de técnicas eficazes para qualquer tipo de torre, propostas baseadas em métodos numéricos, como o método dos momentos e o método das diferenças finitas, tem sido uma opção como ferramenta de resolução de problemas com esse grau de complexidade [17], [54].

Esta pesquisa apresenta uma proposta baseada na análise dos campos elétrico e magnético através da aplicação de procedimentos combinados, visando a determinação dos valores de impedância de surto de torres de transmissão. A estratégia proposta pode ser dividida em três etapas:

- Modelagem da torre em três dimensões;
- Emprego do Método de Elementos Finitos no modelo 3D da torre;
- Cálculo da impedância de surto da torre.

Para o desenvolvimento de tal estudo optou-se por utilizar a ferramenta computacional Flux em sua versão 3D, nesse caso nomeado de Flux3D, o qual se trata de um *software* comercial amplamente

utilizado em estudos eletromagnéticos e térmicos. O Flux3D possibilita a modelagem da torre bem como a aplicação do MEF neste modelo, podendo resultar as intensidades e distribuições dos campos elétrico e magnético no espaço sob estudo.

Na sequência serão apresentados os procedimentos que compõem cada etapa da metodologia, culminando na obtenção da impedância de surto.

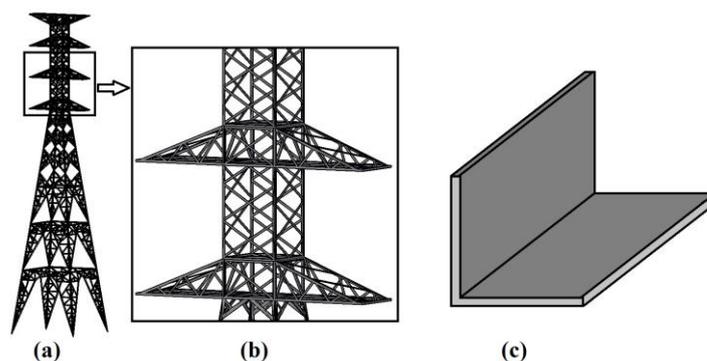
3.2 Modelagem da Torre em Três Dimensões

A utilização da metodologia proposta passa pela aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) em um modelo em três dimensões (3D) da torre, de modo que este modelo deve ser desenvolvido adequadamente para obtenção de resultados coerentes.

O projeto detalhado da torre, constituído por desenhos e listas de materiais, fomentam uma modelagem fidedigna. Visto que outros métodos teóricos realizam algumas aproximações na silhueta da estrutura, considerando-a com formas geométricas simples, nos modelos 3D das torres estas aproximações não são realizadas, pois estes são desenvolvidos com base nas dimensões físicas reais da estrutura, trazendo maior confiabilidade aos resultados.

É importante ressaltar que as torres possuem uma grande quantidade de detalhes estruturais, como as formas e dimensões dos perfis metálicos. Quanto às dimensões, apesar das torres de transmissão apresentarem alturas elevadas, chegando a centenas de metros, os perfis metálicos utilizados em sua construção possuem espessuras na ordem de milímetros. Como será visto posteriormente, esta característica aumenta o esforço computacional durante o emprego do MEF no modelo 3D. A Figura 3.1 ilustra um modelo 3D de torre bem como as características dimensionais de um perfil comumente empregado em sua construção.

Figura 3.1: Modelo 3D de torre de transmissão: (a) modelo 3D de toda a torre; (b) detalhe ampliado deste modelo e; (c) um dos perfis metálicos modelados.



Fonte: Do autor

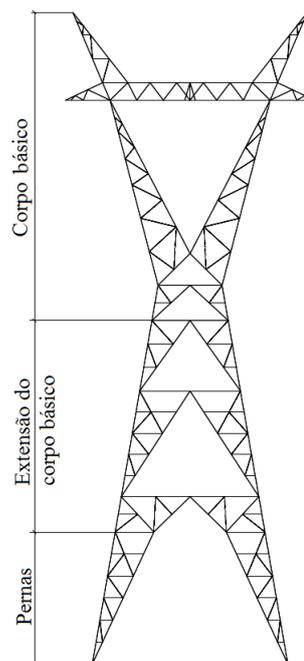
Além disso, cada tipo de torre necessita de uma análise específica e, conseqüentemente, de um modelo 3D particular para as suas características dimensionais. Diferentemente dos métodos tradicionais, a estratégia aqui proposta possibilita o desenvolvimento de vários modelos específicos, de acordo com as silhuetas e alturas utilizadas em cada caso. Entretanto, a determinação da impedância de surto específica de cada torre poderia trazer lentidão para os projetos, já que se deveria então desenvolver modelos 3D para todas as torres de uma LT. Mas, em âmbito técnico, isto não acontece, pois, por questões de economia na fabricação e no projeto, as estruturas são padronizadas em famílias de torres [58].

Idealmente, cada estrutura deveria ser projetada e dimensionada com os esforços correspondentes ao vão de utilização e a topologia do local de montagem. Porém, isto elevaria muito o custo de projeto e de fabricação, já que, para cada posição de locação de torre, existiria um projeto específico. Assim, utiliza-se famílias de torres, as quais consistem em estruturas montadas a partir de módulos ou subestruturas idênticas ou similares [58]. Tais subestruturas são:

- Corpo básico, comum para todas as torres de uma família;
- Extensões do corpo básico, em geral com alturas variando de 6 em 6 metros;
- Pernas, em geral com a altura variando de 1,5 a 9,0 metros com incrementos de 1,5 metros.

A Figura 3.2 mostra uma torre com a subdivisão em módulos.

Figura 3.2: Exemplo de subestruturas de uma torre autoportante

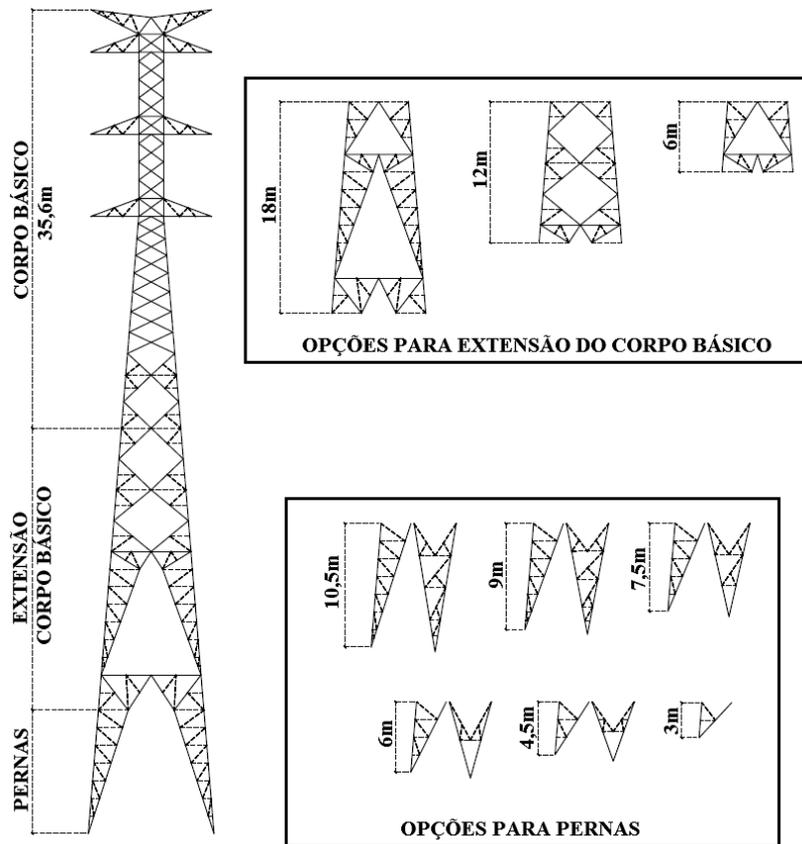


Fonte: Adaptado do Anexo B

Tal modularização da estrutura facilita o transporte e montagem em terrenos de difícil acesso. Além disso, a combinação destes módulos promove maior flexibilidade, de forma que, um mesmo projeto de torre pode alcançar diferentes alturas, possibilitando assim ser empregado em diferentes locais da linha de transmissão, de acordo com a necessidade topográfica daquele local de montagem.

A subdivisão das torres em módulos é vista de maneira positiva para a metodologia aqui proposta, já que a padronização das subestruturas facilita a modelagem de diferentes torres. Assim, desenvolve-se apenas os modelos 3D das subestruturas separadamente. A partir do agrupamento destes modelos, de acordo com as características da torre que se queira estudar, modelos 3D de diferentes estruturas podem ser então obtidos com facilidade. A Figura 3.3 mostra um projeto de uma família de torres, com várias opções de módulos.

Figura 3.3: Exemplo simplificado de projeto de uma família de torres



Fonte: Adaptado do Anexo A

O projeto ilustrado na Figura 3.3 contempla a fabricação e montagem de torres com alturas de 44,6 metros até 64,1 metros. Apesar das torres montadas a partir deste projeto possuírem silhuetas semelhantes, as diferenças em suas dimensões resultam em variações nos valores de impedância de surto, devendo ainda haver um estudo específico para cada estrutura.

3.3 Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos (MEF) é um método numérico comumente empregado em problemas de natureza eletromagnética, devido a possibilidade de trabalhar com campos variáveis no tempo, estruturas com formas complexas e com materiais de características não-lineares [57]. Devido a sua flexibilidade e facilidade de emprego, esta técnica numérica será utilizada nesta tese.

De posse do modelo 3D da torre, o MEF é então utilizado visando a determinação das intensidades do campo magnético e do campo elétrico. O emprego do MEF envolve a aplicação de procedimentos que devem ser seguidos corretamente para que sejam obtidos resultados fieis à realidade. Assim, será apresentada uma abordagem sucinta desta técnica, de forma que serão expostos os principais procedimentos para a utilização do MEF.

3.3.1 Condições de Contorno

O primeiro passo após o desenvolvimento do modelo da torre, é a atribuição de condições de contorno ao domínio sob estudo. As condições de contorno (CC) de um domínio são o conjunto de valores conhecidos em determinadas fronteiras, para a função, ou sistema de funções, que representa o fenômeno sob estudo. Assim, a solução desta função também deve satisfazer suas CC.

De maneira geral, as CC são o ponto de partida para a solução das expressões que representam o problema, e sua definição é essencial para a obtenção dos resultados. Adicionalmente, as condições de contorno podem ser classificadas nos seguintes tipos [5]:

- CC Dirichlet [59]: Também chamada de CC fixas, que caracteriza-se pela imposição de valores fixos da grandeza estudada em determinada fronteira do domínio;
- CC Neumann [59]: Como nas CC Dirichlet, que se caracteriza pela predefinição de valores em uma dada fronteira do domínio. Entretanto, neste caso, tais valores devem satisfazer a derivada da função sob estudo;
- CC Cauchy [59]: De maneira geral, esta CC é a imposição da Dirichlet e Neumann simultaneamente, ou seja, os valores predefinidos em certa fronteira devem satisfazer tanto a função sob estudo quanto sua derivada.

O estudo em questão é um problema de valor de contorno (PVC), o qual é caracterizado por condições de contorno fixadas nos extremos do domínio [60]. Assim, será considerada a CC Dirichlet, tomando-se valores nulos para o campo eletromagnético em fronteiras suficientemente distantes da torre.

Entretanto, o domínio sob análise não possui fronteiras definidas, o que impossibilita se estabelecer as CC em um primeiro momento. Neste caso, uma fronteira deve ser imposta, para que as CC sejam estabelecidas e que o MEF crie um número finito de elementos de malha. Para tanto, algumas técnicas de imposição de fronteiras podem ser utilizadas [61], quais sejam:

- Truncamento de limites externos [61]: Técnica que consiste na imposição de fronteiras externas suficientemente distantes da fonte de campo eletromagnético, de modo que nestes limites o campo seja insignificante. Apesar de simples, esta técnica é eficaz na maioria dos problemas;
- Transformada de Kelvin [62]: 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 [61]: Metodologia onde a região exterior é representada por uma superfície anular em torno do problema, com raio inicial aleatório e que aumenta em uma taxa progressiva. A partir do ponto inicial é estabelecido um processo iterativo, no qual a cada aumento de raio da região anular são obtidos resultados através do MEF, até que a diferença entre o resultado atual e o anterior esteja abaixo de um valor pré-estipulado;
- Transformações Espaciais [5]: Esta metodologia converte uma região infinita em um domínio finito por meio de métodos de mapeamento geométrico, como por exemplo, o mapeamento conformal.

O manejo eficiente de domínios com fronteiras abertas é uma questão essencial para se obter resultados coerentes. Nesta tese será adotada a técnica de truncamento de limites externos devido à sua simplicidade e adequação aos objetivos aqui propostos.

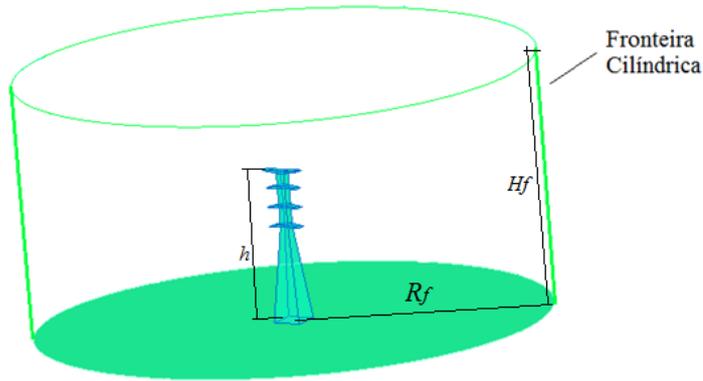
Com a intenção de simplificar a modelagem, foi adotada uma fronteira com forma de um cilindro reto, o qual foi modelado de forma que o eixo vertical coincidissem com o eixo vertical da torre e que sua base inferior seja a superfície do solo.

Para avaliar a distância na qual a fronteira deve ser posicionada é necessário levar em consideração o fenômeno estudado. No caso em questão, o campo eletromagnético se propaga pelo ar que envolve a torre, sem nenhum tipo de confinamento. Caso não se considere uma fronteira que envolva todo o espaço onde haja interação do campo eletromagnético com o meio, a utilização do MEF, bem como a imposição da CC Dirichlet [59], pode resultar em valores inconsistentes.

Recomenda-se posicionar a fronteira, em relação ao objeto sob estudo, a uma distância de cinco a dez vezes a sua maior dimensão [59], [63]. Esta é uma condição ampla, visto que a torre

possui, como maior dimensão, alturas na ordem de dezenas de metros. Assim, com o intuito de otimizar as simulações, tomou-se um modelo 3D de uma torre para avaliar a influência nos resultados devido às dimensões da fronteira. A Figura 3.4 mostra a fronteira descrita e o modelo da torre considerado, onde h é a altura da torre, H_f e R_f são a altura e raio da fronteira cilíndrica, respectivamente.

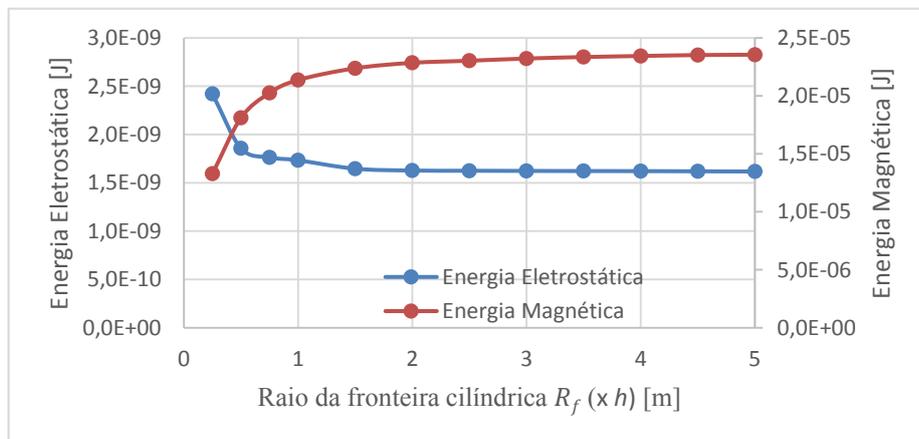
Figura 3.4: Modelo 3D de torre e fronteira cilíndrica (modelo fora de escala).



Fonte: Do autor

Considerando uma corrente com forma de onda retangular de 1 A, aplicada ao topo da torre (para a simulação magnética) e uma tensão de 1 V (para a simulação eletrostática), foram obtidos resultados de energias armazenadas no campo magnético e no campo elétrico para diferentes dimensões da fronteira cilíndrica. A Figura 3.5 ilustra o gráfico dos resultados obtidos para diferentes valores de R_f .

Figura 3.5: Resultados de energias para diferentes valores de R_f , em função de h .

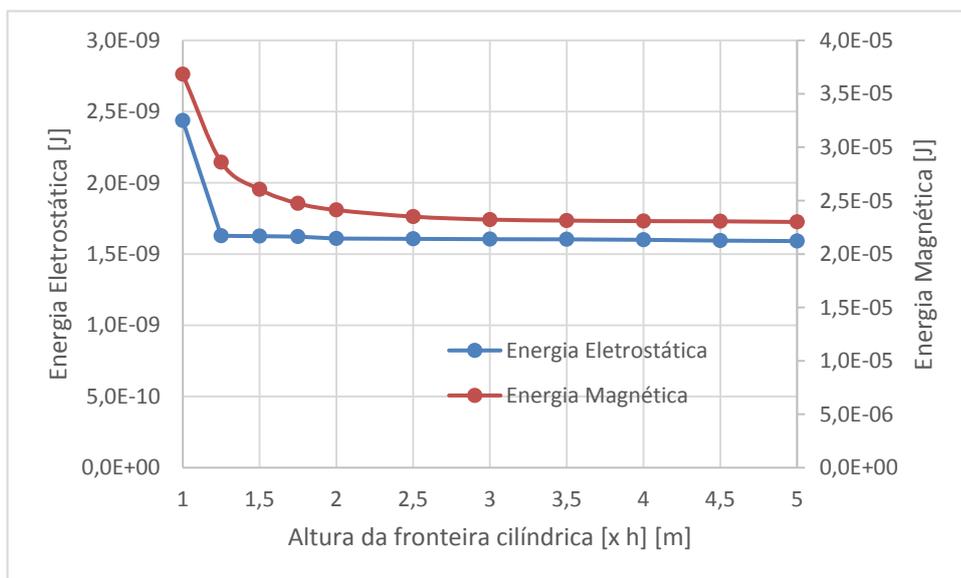


Fonte: Do autor

Neste gráfico a altura da fronteira foi mantida constante e igual a 5 vezes a altura da torre ($H_f = 5h$). A energia no campo elétrico pouco variou para valores de R_f iguais ou maiores que 2 vezes a altura da torre ($R_f \geq 2h$), de modo que, a partir deste ponto, a cada valor da altura de torre acrescentada em R_f , a energia variou menos que 0,25%. Já a energia no campo magnético passou a variar menos para valores de R_f iguais ou maiores que três vezes a altura da torre ($R_f \geq 3h$). A partir deste ponto, a cada incremento h , em R_f , existe uma variação de menos que 0,36% na energia magnética.

De maneira análoga, a Figura 3.6 mostra os valores de energia quando se varia somente a altura da fronteira cilíndrica.

Figura 3.6: Resultados de energias para diferentes alturas da fronteira cilíndrica, em função da altura da torre.



Fonte: Do autor

Nesse caso, o raio da fronteira cilíndrica foi mantido constante e igual a 5 vezes a altura da torre $R_f = 5h$. O gráfico da Figura 3.6 revela uma baixa influência da altura da fronteira cilíndrica nos resultados de energia eletrostática. Com a fronteira cilíndrica tomando valores de altura maiores que 2 vezes a altura da torre, a energia eletrostática pouco varia. Já a energia magnética passa a variar pouco para valores de H_f iguais ou maiores que 3 vezes a altura da torre ($H_f \geq 3h$).

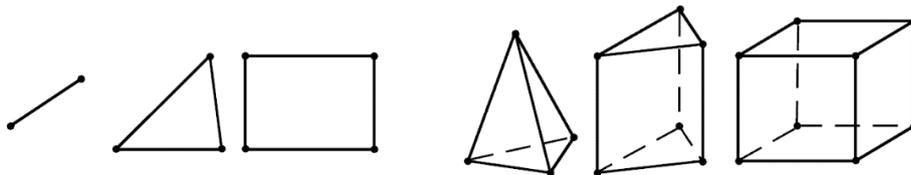
Em vista dos resultados apresentados e visando simulações mais eficientes, mas mantendo-se um padrão de dimensões, nesta tese será utilizada fronteiras cilíndricas com raio e altura iguais a três

vezes a altura da torre sob estudo ($R_f = H_f = 3h$). Desta forma, será analisado um espaço menor no domínio sem que haja diferenças significativas nos resultados.

3.3.2 Discretização do Domínio

A principal característica do MEF consiste na divisão (ou discretização) do domínio sob estudo em subdomínios – os elementos finitos (EF). Em problemas de uma dimensão, onde o domínio é uma curva, os EF são segmentos de retas. Para problemas em duas dimensões, onde o domínio é uma superfície, estes elementos são polígonos, normalmente triângulos ou quadriláteros. Já em problemas em três dimensões, onde o domínio é composto por volumes, os EF são poliedros, normalmente tetraedros, pentaedros ou hexaedros. A Figura 3.7 ilustra os EF que podem ser utilizados.

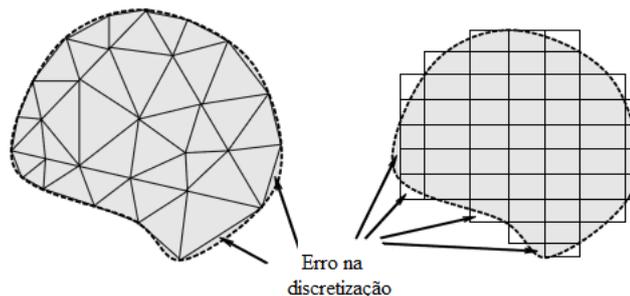
Figura 3.7: Os EF utilizados na discretização de domínios



Fonte: Do autor

O elemento a ser escolhido para compor a malha também influencia na precisão da representação do domínio. O uso de um retângulo, por exemplo, como um EF para discretizar um domínio em duas dimensões (2D) irregular é certamente a escolha mais simples, mas não a mais adequada, porque uma montagem de retângulos pode não representar com precisão a forma geométrica arbitrária do domínio. Por outro lado, se, nesse caso, um triângulo é usado como o EF para compor a malha, o erro na discretização seria menor. A Figura 3.8 ilustra a utilização desses elementos na composição de malhas em um domínio 2D.

Figura 3.8: Malha de EF triangulares e retangulares em um mesmo domínio 2D



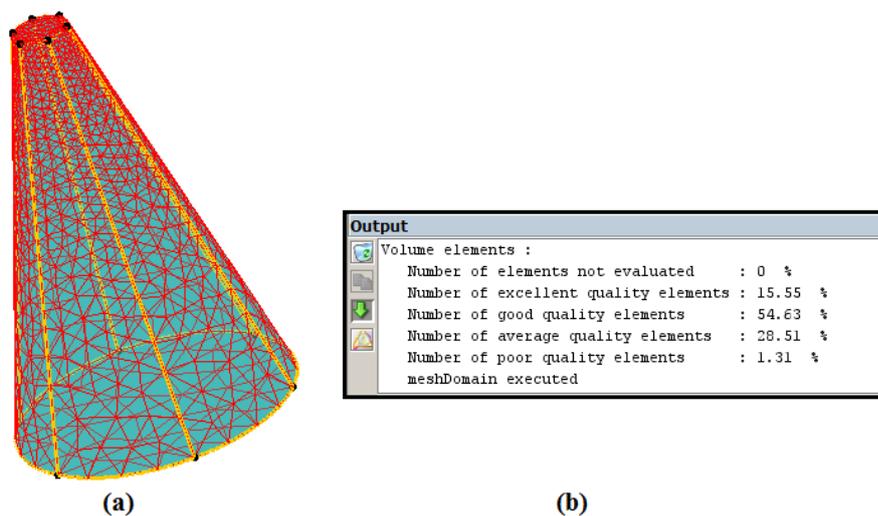
Fonte: Do autor

Como pode ser visto, o conjunto de retângulos representam a superfície com menor precisão. Além disso, o tamanho dos EF utilizados pode ser modificado para que o domínio seja melhor representado através da malha. Entretanto, quando se diminui as dimensões dos EF, estes aumentam em número dentro da malha. Isto faz com que o método resulte em um sistema de equações maior, provocando maior complexidade em sua resolução.

Softwares são ferramentas importantes na utilização do MEF, pois facilitam o seu emprego nas diversas áreas de conhecimento. Visando a determinação de resultados de intensidade e distribuição dos campos elétrico e magnético, a aplicação computacional Flux3D (adotado neste trabalho), aplica o algoritmo de *Delaunay* para criação da malha de elementos finitos [64], [65].

Ao final do emprego de tal algoritmo, os elementos criados são classificados de acordo com sua qualidade como: excelentes, bons, regulares e ruins. Os elementos considerados ideais são triângulos equiláteros e quadrados para uma malha 2D e tetraedros regulares e cubos para uma malha 3D [63]. Na prática, os elementos da malha podem ser deformados até certo limite. A classificação de qualidade verifica então a deformação dos elementos, classificando-o nos grupos supracitados. A Figura 3.9 ilustra o resultado da avaliação de uma malha 3D.

Figura 3.9: (a) Exemplo de uma malha de um modelo 3D e, (b) sua avaliação qualitativa, no software Flux3D



Fonte: Do autor

A predominância de elementos com qualidade inferior leva a imprecisão na malha, implicando em resultados imprecisos, devido à má representação do domínio. Desta forma, posteriormente a criação da malha, o usuário pode avaliar se a qualidade dos elementos criados é adequada para o estudo, e, caso queira melhorar sua precisão, os parâmetros de entrada da malha são modificados (tipo

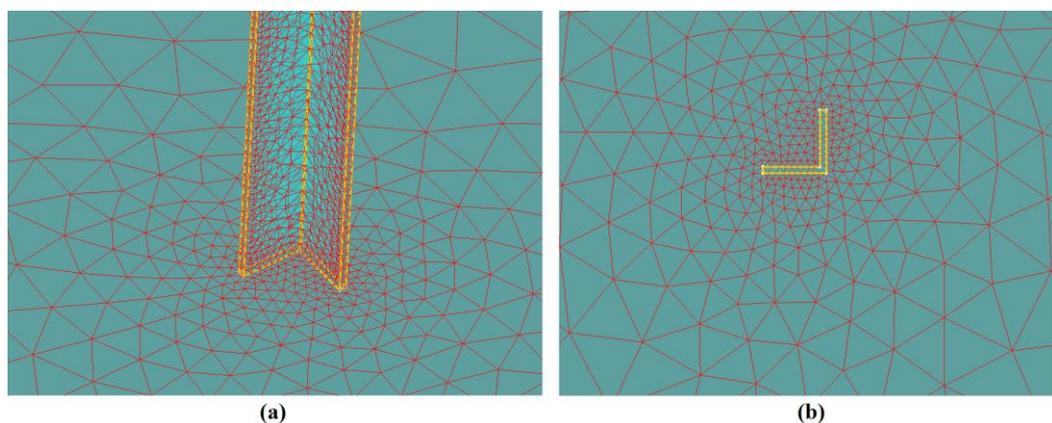
e tamanho dos EF), e o processo pode ser refeito, até que o nível desejado de qualidade seja atendido. De maneira a controlar a qualidade da malha criada nos modelos de torres, nesta tese serão tomados limites máximos para os elementos ruins e regulares de 1,5% e 15%, respectivamente. Estes limites foram determinados através da realização de várias simulações, pelas quais constatou-se que as malhas dentro destes limites resultaram em valores aceitáveis.

Outro ponto importante é a avaliação do esforço computacional que o modelo 3D pode provocar quando da aplicação do algoritmo de criação da malha de EF. Como pode ser visto nas figuras anteriores, elementos adjacentes compartilham nós, arestas e faces. Além disso, o algoritmo cria os elementos respeitando volumes internos ao domínio, de forma que um mesmo elemento esteja contido somente em um volume.

Como visto no item 3.2, a torre possui perfis metálicos com espessura muito pequena se comparado com seus comprimentos. Isto faz com que os elementos criados internamente ao volume desses perfis metálicos sejam extremamente pequenos, enquanto que os elementos externos, que formam a malha que compreende o ar que envolve a torre, tomam dimensões significativamente maiores. Ainda, a superfície dos perfis metálicos divide uma região com elementos pequenos (presentes dentro desses perfis) e elementos relativamente grandes (presentes na região externa).

O algoritmo de criação da malha de elementos finitos, nesta superfície, deve então conciliar estes elementos de dimensões significativamente diferentes, para que compartilhem nós, arestas e faces. Isto faz com que haja um maior esforço computacional durante o processo de criação da malha de elementos. A Figura 3.10 ilustra o modelo de um perfil metálico “L” de abas iguais (ou simplesmente cantoneira), comumente empregado na montagem das torres, e a malha de elementos criada.

Figura 3.10: Malha de elementos finitos em (a) um modelo 3D de um perfil de aço e, (b) a vista superior deste modelo



Fonte: Do autor

Visando um processo rápido e eficiente, o esforço computacional deve ser levado em conta na utilização da metodologia proposta. Assim, no Capítulo 4 será realizada uma análise do esforço computacional provenientes de modelos 3D de uma torre. Estes modelos terão níveis de detalhamento diferentes, de forma que será possível verificar a influência nos valores de impedância de surto devido a uma modelagem menos rigorosa às características físicas da torre.

3.3.3 Caracterização dos Materiais

A presente metodologia adota abordagens de campo magnético e de campo elétrico para determinação da impedância de surto da torre. Em ambas abordagens, as características elétricas dos materiais são parâmetros necessários para análise.

Os materiais envolvidos no problema são o ar que envolve a torre, ao qual serão atribuídas as características elétricas do vácuo, e o metal da estrutura. Para este último, no Brasil, normalmente é utilizado o aço carbono ASTM A572 [66]. Empregado na torre principalmente na forma de chapas com o perfil “L”, de abas iguais, este é um aço com baixo teor de carbono em sua composição (cerca de 23%) [67]. Este material é pouco utilizado em dispositivos elétricos o que implica em uma escassez de informações nesta área de conhecimento.

Assim, como em outros trabalhos, serão consideradas as características elétricas do ferro, pois este é o componente majoritário desse aço, com a permeabilidade magnética (μ) de $4\pi \times 10^{-4}$ (H/m) e resistividade elétrica (ρ) de $9,09 \times 10^{-7}$ ($\Omega \cdot m$) [16].

3.3.4 Fontes de Excitação

A fonte de excitação utilizada no modelo depende da simulação que se deseja realizar, seja a simulação eletrostática ou a magnética. Para a simulação eletrostática, foi atribuído um potencial unitário à todo o volume que compõem a torre. Assim, toda a torre irá originar o campo elétrico, devido às cargas elétricas presentes em sua estrutura.

Para a simulação magnética, há a necessidade de vincular ao modelo 3D, um circuito elétrico simples, composto por uma fonte de corrente conectada a um elemento condutor, que nesse caso é a própria torre, que por sua vez é conectada à referência. Ao elemento condutor são atribuídas as características elétricas do material da torre (permeabilidade magnética e resistividade elétrica). Já para a fonte de corrente, foi atribuído uma forma de onda em degrau, com amplitude de 1 A, com o intuito de simplificar a simulação, bem como os cálculos posteriores.

3.3.5 Algoritmos Numéricos Empregados

A partir da definição da malha e caracterização dos materiais envolvidos, deve-se associar a função matemática, que representa todo o domínio, a cada EF separadamente. Para tanto, utiliza-se funções de interpolação que, normalmente, são polinômios de primeira ou de segunda ordem, levando a uma interpolação linear ou quadrática, respectivamente [60]. Polinômios de ordem superior podem ser utilizados levando a uma melhoria na precisão da interpolação. Entretanto, no processo de resolução do problema, o sistema de equações aumenta consideravelmente, implicando no aumento do tempo necessário para que algoritmos computacionais produzam soluções, não sendo vantajoso a sua utilização na maioria dos casos.

Para determinação dos coeficientes dos polinômios de interpolação, utiliza-se o método de Galerkin, o qual consiste em um caso particular do método residual ponderado [60]. Esta técnica matemática se inicia formando um elemento residual a partir da equação diferencial associada ao domínio sob estudo, isolando-se todos os termos desta expressão de um lado da igualdade. Este residual é então forçado a assumir valor nulo com o auxílio de funções de ponderação. A partir da utilização desta técnica, um sistema de equações é determinado, com tamanho correspondente ao número de elementos e número de nós do domínio.

Uma vez que o sistema de equações é determinado, é possível resolvê-lo através de algoritmos matemáticos adequados. No *software* Flux3D, é utilizado o método de Newton-Raphson para se chegar a solução deste sistema e, assim, determinar a intensidade e distribuição dos campos elétrico e magnético no domínio sob estudo.

Devido às suas características de flexibilidade e estabilidade numérica, o MEF pode ser implementado na forma de um *software* de maneira consistente e sistemática, o que facilita sua utilização atualmente [60], [68].

3.4 Cálculo da Impedância de Surto de Torres

Conforme apresentado no Capítulo 2, métodos existentes para determinação da impedância de surto de torres utilizam, para tal fim, a relação entre tensão e corrente na estrutura. Outras estratégias possuem abordagens através da determinação do campo magnético ou do campo elétrico (métodos teóricos).

O presente trabalho propõe o cálculo do parâmetro sob investigação através da equação 2.1, a qual utiliza os valores de indutância e capacitância da torre. Para tanto, duas abordagens foram

realizadas: uma através do campo magnético, para determinação da indutância da torre; e outra utilizando o campo elétrico, para determinação da capacitância da torre.

Como visto no item 3.3, o emprego do MEF no modelo 3D da torre, resulta na distribuição e intensidade dos campos elétricos e magnéticos no domínio. Para se criar tais campos em uma região é necessária uma certa quantidade de energia, a qual é armazenada nestes campos na forma da energia magnética (W_m) ou energia eletrostática (W_e) [13]. Com base na intensidade do campo magnético (H) e na permeabilidade elétrica da torre (μ), considerando o meio homogêneo, a energia magnética é determinada através da equação 3.1 [13].

$$W_m = \int_v \frac{1}{2} \mu H^2 dv \quad 3.1$$

Onde: v é o volume onde se queira avaliar a energia magnética.

De forma semelhante, a energia armazenada no campo elétrico W_e pode ser obtida através da intensidade de campo elétrico E e da permissividade elétrica do ar (ϵ_o), conforme a equação 3.2 [13].

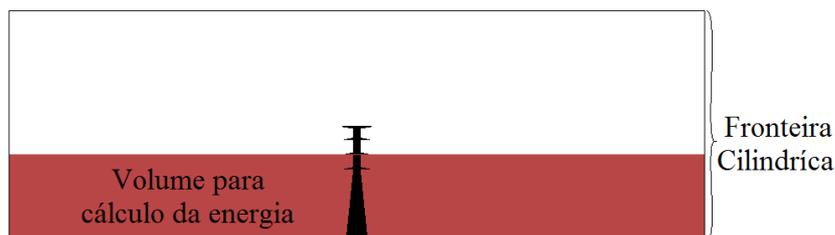
$$W_e = \int_v \frac{1}{2} \epsilon_o E^2 dv \quad 3.2$$

Onde: v é o volume onde se queira avaliar a energia eletrostática.

O volume tomado para avaliar as energias possui grande importância neste estudo, pois através dele é possível determinar mais de um valor de impedância de surto para a mesma torre, e assim representar a variação deste parâmetro na estrutura.

Para tanto, nas equações 3.1 e 3.2, foram considerados os volumes abaixo do ponto onde se queira determinar a impedância de surto. A Figura 3.11 ilustra um exemplo para o qual pretende-se determinar a impedância de surto na altura do braço intermediário da torre.

Figura 3.11: Volume para cálculo da energia armazenada no campo eletromagnético, considerando a altura do braço intermediário da torre.



Fonte: Do autor

As partes da torre acima do ponto de interesse não são energizadas. Através dos valores de energia obtidos, a indutância e a capacitância da torre podem ser determinadas através das expressões 3.3 e 3.4, respectivamente [13].

$$L_i = \frac{2W_{mi}}{I^2} \quad 3.3$$

$$C_i = \frac{2W_{ei}}{U^2} \quad 3.4$$

Onde: I é a corrente imposta na torre;

U é a tensão imposta na torre.

o índice i refere-se ao ponto da torre sob análise.

Como visto anteriormente, as fontes de excitação foram parametrizadas com valores unitários de amplitude para a corrente e para a tensão, o que simplifica as equações 3.3 e 3.4. Ainda, substituindo as equações 3.3 e 3.4 na equação 2.1, a impedância de surto da torre pode então ser determinada por:

$$Z_i = \sqrt{\frac{W_{mi}}{W_{ei}}} \quad 3.5$$

A metodologia proposta resulta em valores de impedâncias de surto diferentes em cada trecho da torre, de tal sorte que sua variação na estrutura é representada. Dessa forma, pode-se dividir a torre em n partes, resultando-se assim em n impedâncias de surto para uma mesma estrutura.

Em estudos de desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas, as tensões que as cadeias de isoladores são submetidas ocorrem em pontos estratégicos, próximos aos condutores fase. É nesses pontos que existe uma maior chance de ocorrência de arco elétrico, e, conseqüentemente, onde devem ser verificadas tais tensões. Assim, é interessante a determinação da impedância de surto da torre nesses pontos, para que seja realizada uma previsão fidedigna da solicitação de tensão nas cadeias de isoladores.

É possível ainda representar a indutância e a capacitância em suas formas distribuídas. Para tanto, elas são consideradas constantes na torre e, dessa forma, as equações 3.3 e 3.4, divididas pela altura do ponto sob análise h_i , resultam em valores distribuídos, como nas equações 3.6 e 3.7.

$$L_{id} = \frac{2W_{mi}}{I^2} / h_i \quad 3.6$$

$$C_{id} = \frac{2W_{ei}}{U^2} / h_i \quad 3.7$$

Onde L_{id} e C_{id} são os valores distribuídos da indutância e da capacitância para o ponto i sob análise na torre.

Assim, pode-se determinar a velocidade de propagação do surto, que neste caso possui valor constante para cada trecho da estrutura. Substituindo-se as equações 3.6 e 3.7 na equação 2.2, a velocidade pode ser calculada através da expressão:

$$v_i = \frac{h_i}{2\sqrt{W_{mi}W_{ei}}} \quad 3.8$$

Onde h_i é a altura na qual foram determinadas a indutância e a capacitância.

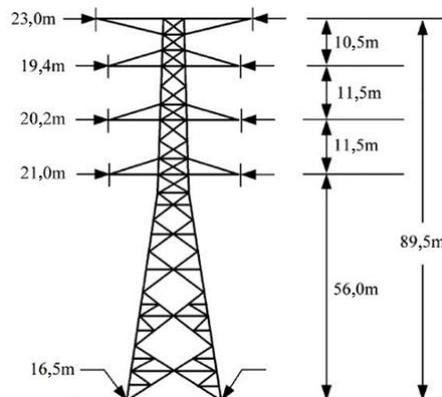
De maneira semelhante à impedância de surto, cada trecho resultará em uma velocidade de propagação diferente. Vários trabalhos tratam a velocidade de propagação do surto igual à velocidade da luz [12], [14], [22]. Entretanto, medições realizadas em torres reais sugerem que seu valor é menor, em torno de 70 a 90% da velocidade da luz [10], [11], [17], o que evidencia a necessidade de se analisar tal parâmetro. Esta análise será realizada no Capítulo 5.

3.5 Verificação da Metodologia Proposta

Apesar da utilização de técnicas computacionais, numéricas e analíticas consolidadas, a abordagem aqui apresentada deve ter seus resultados ratificados por resultados oriundos de medições.

Para validar a metodologia proposta, uma torre real será submetida aos procedimentos descritos anteriormente de forma a se obter resultados de impedâncias de surto. Estes resultados serão então comparados com registros experimentais para validação da metodologia proposta. Para tanto considerou-se a torre apresentada em [17], onde são descritas as dimensões básicas da estrutura, como ilustrado na Figura 3.12.

Figura 3.12: Torre autoportante para LT de circuito duplo e nível de tensão de 500kV.



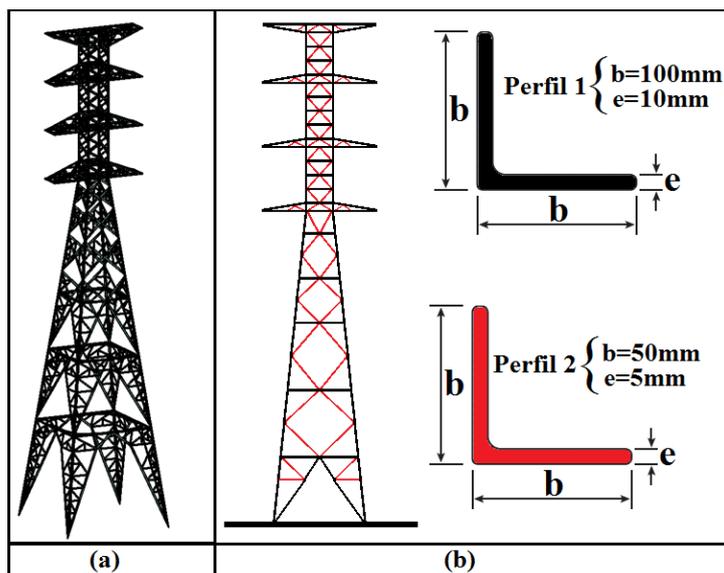
Fonte: Adaptado de [17]

O emprego da metodologia se inicia pelo desenvolvimento do modelo 3D da torre em questão, considerando-se as dimensões da Figura 3.12. Entretanto, somente tais medidas são insuficientes para uma modelagem fidedigna.

Adicionalmente, será considerado o Anexo A, o qual consiste em um projeto de família de torres autoportantes, utilizado na construção de uma LT de circuito duplo e nível de tensão de 345kV, situada no estado do Espírito Santo – Brasil. As estruturas fabricadas e montadas com base neste projeto, possuem características semelhantes à torre da Figura 3.12. Dessa forma, este projeto será adotado para consulta a informações necessárias que não sejam encontradas em [17].

A estrutura é composta por perfis metálicos de várias dimensões. Com o intuito de simplificar a modelagem, serão consideradas somente dois perfis metálicos. A modelagem da torre resultou na forma ilustrada na Figura 3.13, onde as dimensões “e” e “b” representam a espessura e largura dos perfis modelados, respectivamente.

Figura 3.13: (a) Modelo 3D desenvolvido e, (b) dimensões e locais dos perfis metálicos

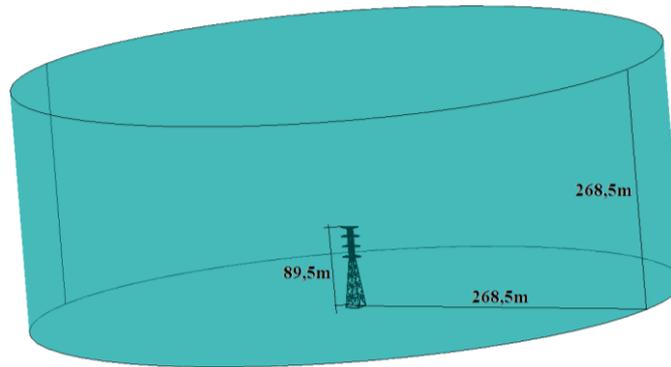


Fonte: Do autor

O perfil 1 foi utilizado na estrutura principal de sustentação, enquanto que o perfil 2 foi considerado para modelar as treliças da torre.

De posse do modelo 3D da torre, define-se as condições de contorno bem como as fronteiras externas do domínio sob estudo. Como delineado anteriormente, será considerada uma fronteira cilíndrica, com raio e altura 3 vezes maiores que a altura da torre (268,5 metros). Como condição de contorno, nesta fronteira são definidos valores nulos para os campos magnéticos e elétricos. Ainda, o solo foi considerado com resistividade nula. A Figura 3.14 ilustra a fronteira adotada.

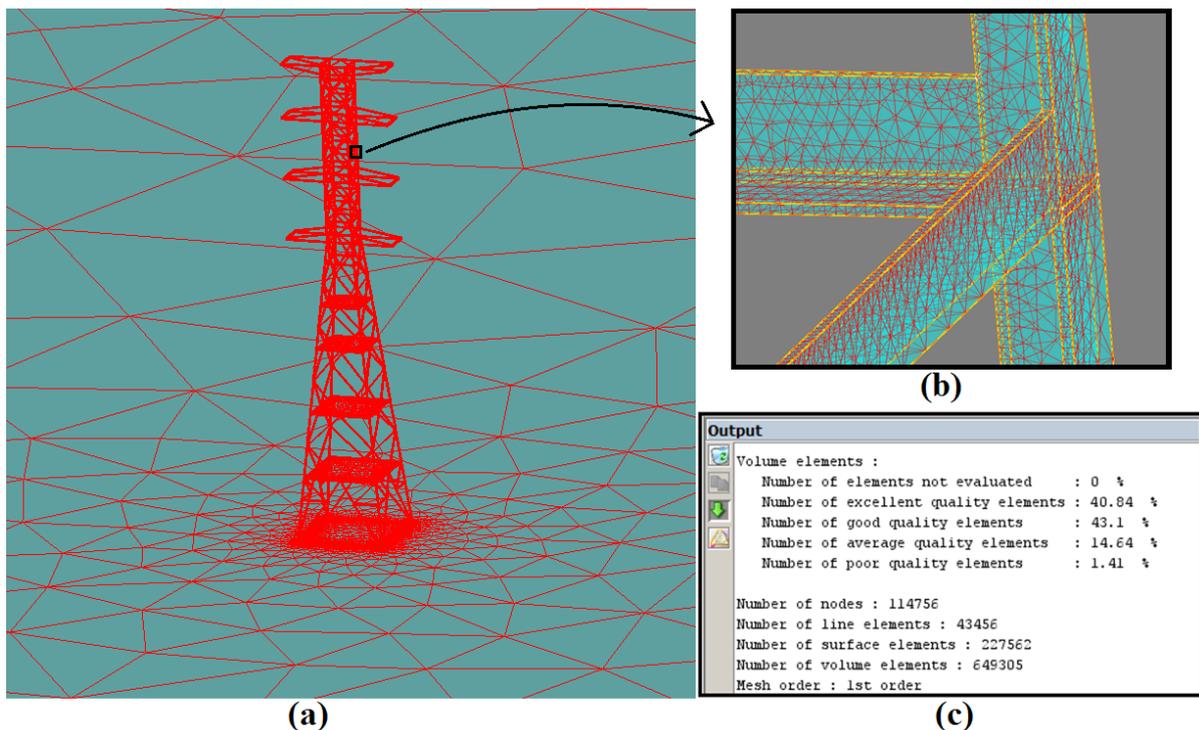
Figura 3.14: Fronteira cilíndrica na qual foram estabelecidas as condições de contorno



Fonte: Do autor

O modelo da torre, com as devidas condições de contorno estabelecidas é então submetido ao *software* Flux3D, o qual utiliza o algoritmo de Delaunay para discretização do domínio. Para se obter uma boa qualidade da malha em questão, foram adotados elementos tetraédricos. Além disso, o algoritmo busca a criação dos maiores elementos possíveis, mantendo-se uma boa qualidade, de acordo com cada volume. Isto faz com que a malha tenha um menor número de elementos, sem que sua qualidade seja comprometida. A Figura 3.15 mostra a malha criada bem como as características quantitativas e qualitativas.

Figura 3.15: (a) Malha de EF no domínio sob estudo, (b) ampliação do modelo e, (c) características quantitativas e qualitativas da malha



Fonte: Do autor

Na Figura 3.15, para uma melhor visualização da malha interna aos perfis metálicos que formam a estrutura, a malha presente no volume de ar que envolve a torre foi suprimida. Como pode ser visto, o *software* mostra quantos elementos foram criados e a qualidade da malha.

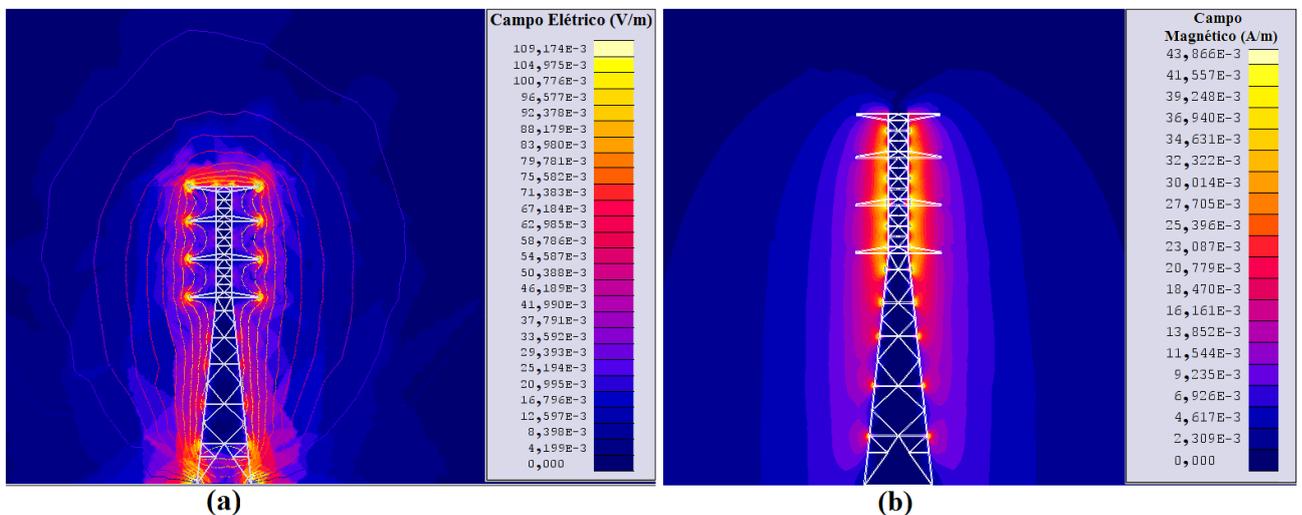
Na etapa seguinte de emprego do MEF, deve-se preparar o modelo para dois tipos de simulações: uma de abordagem magnética e a outra de abordagem eletrostática. Esta preparação consiste na caracterização dos materiais envolvidos, de forma a definir os meios condutores e isolantes.

Na simulação magnética, deve-se impor a permeabilidade magnética e a resistividade elétrica ao volume da torre, bem como caracterizar o meio que envolve a estrutura com os parâmetros elétricos do ar. Além disso, deve-se definir a corrente elétrica e seu ponto de entrada e de saída, indicando assim o seu sentido de circulação na torre. Neste trabalho será considerada a propagação da corrente de surto no sentido do topo para a base da torre. Assim, o ponto de saída será sempre a base da estrutura, e o ponto de entrada será escolhido de acordo com cada altura de análise. Foi utilizada uma fonte de corrente de impulso retangular, com amplitude de 1 A.

Na simulação eletrostática, também define-se o meio que envolve a torre com os parâmetros elétricos do ar, e o material da estrutura, que no caso foi considerado o ferro. Além disso, deve-se impor o potencial elétrico às partes metálicas da estrutura, conforme o ponto sob análise.

A última etapa de emprego do MEF consiste na aplicação dos algoritmos numéricos no modelo 3D da torre. Como resultado, são definidas as distribuições e nas intensidades de campo elétrico e campo magnético em cada simulação, como ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16: Resultados das simulações com a (a) distribuição do campo elétrico e, (b) a distribuição do campo magnético.

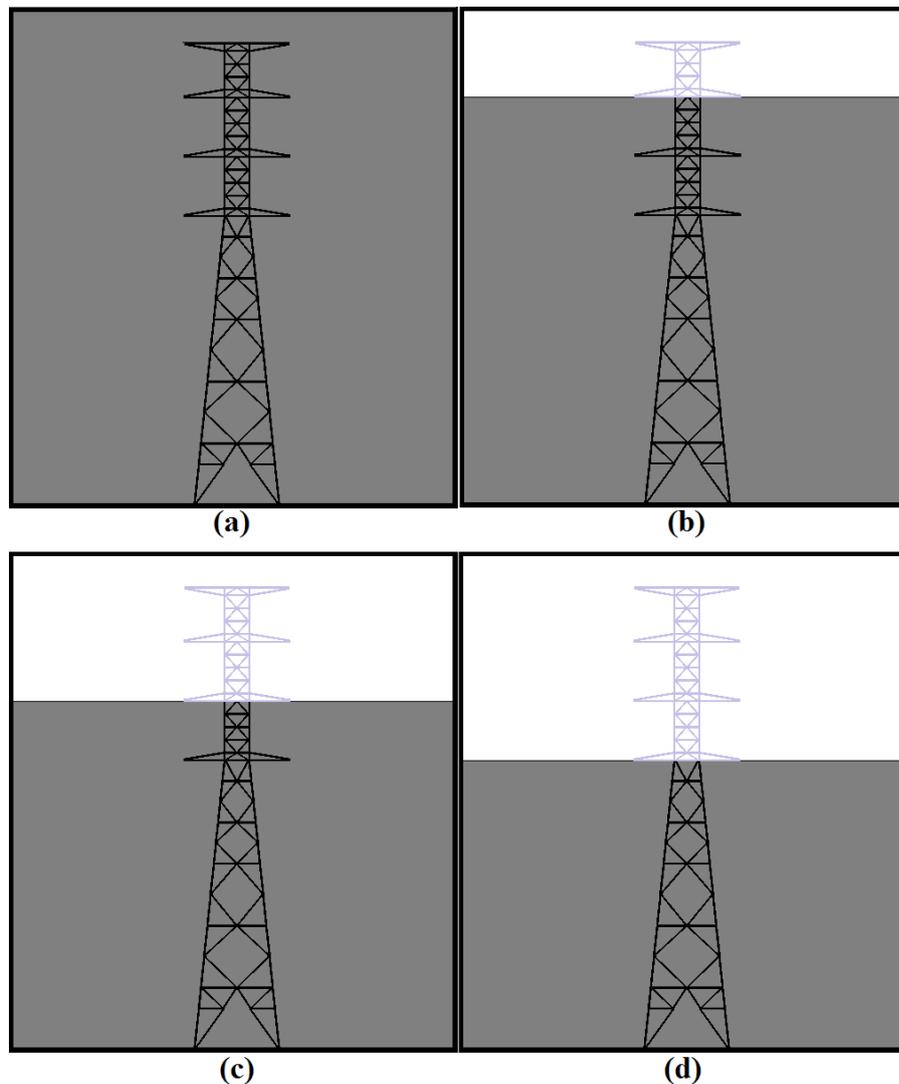


Fonte: Do autor

O próximo passo, consiste na determinação das energias armazenadas nos campos elétrico e magnético, de acordo com cada trecho de torre analisado, através das equações 3.1 e 3.2. Nesta etapa, deve-se definir os pontos onde queira se determinar as impedâncias de surto, para que sejam tomados os volumes para o cálculo das energias.

Como dito anteriormente, é interessante a determinação da impedância de surto na altura dos braços da torre, os quais estão situados em locais propícios a ocorrência de arco elétrico, e comumente são alvo de estudos de sobretensões devido a descargas atmosféricas [2]. Assim, considerando tais alturas, foram definidos os volumes, ilustrados na Figura 3.17, para análise das energias armazenadas nos campos elétrico e magnético.

Figura 3.17: Configurações para determinação das energias: (a) no topo da torre, (b) na altura dos braços superiores, (c) na altura dos braços intermediários e (d) na altura dos braços inferiores.



Fonte: Do autor

Através do próprio *software* Flux3D pode-se aplicar as equações 3.1 e 3.2 em um procedimento chamado de pós processamento, culminando nos resultados de energias armazenadas, para cada configuração da Figura 3.17. Tais resultados são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resultados de energias magnética e eletrostática

Altura sob análise	Energia Magnética (μJ)	Energia Eletrostática (ηJ)
Topo da torre	23,565	1,203
Braços Superiores	19,850	1,140
Braços Intermediários	15,064	1,121
Braços Inferiores	12,008	1,143

De posse das energias, as impedâncias de surto da torre são determinadas através do uso da equação 3.5. Para validação da nova metodologia, os resultados de impedância de surto serão comparados à valores de medições apresentadas em [17]. Tais medições foram realizadas na torre da Figura 3.12. A Tabela 3.2 mostra os resultados da aplicação da metodologia aqui proposta bem como os valores provenientes de medições.

Tabela 3.2: Resultados de impedância de surto oriundos do emprego da metodologia proposta e de medições, para a torre da Figura 3.12

Altura sob análise	Medições (Ω)	Metodologia proposta (Ω)	Diferença (%)
Topo da torre	141,00	140,21	0,561%
Braços Superiores	133,00	131,96	0,785%
Braços Intermediários	117,00	115,93	0,914%
Braços inferiores	104,00	102,48	1,457%

Como pode ser visto, os valores de impedância possuem pequena discrepância com os resultados de medições.

Também foram calculadas as indutâncias e capacitâncias distribuídas, através das equações 3.6 e 3.7, respectivamente. Estes resultados são então substituídos na equação 3.8, a fim de se determinar a velocidade de propagação do surto em cada trecho. A Tabela 3.3 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3.3: Valores de indutância e capacitância distribuídos e velocidade de propagação do surto

Altura sob análise	Indutância ($\mu\text{H/m}$)	Capacitância ($\mu\text{F/m}$)	Velocidade*
Topo da Torre	0,529	26,890	88,41%
Braços Superiores	0,503	28,860	87,53%
Braços Intermediários	0,446	33,210	86,58%
Braços inferiores	0,429	40,830	79,66%

*Porcentagem em relação à velocidade da luz (3×10^8 m/s)

A capacitância possui um comportamento de aumento do seu valor com a proximidade do solo, característica que está em consonância com as teorias de campo eletromagnético [13]. Observa-se também que a velocidade de propagação do surto tende a cair com a propagação do surto em direção ao solo. Com base na equação 2.2, pode-se dizer então que o produto LC resulta em valores maiores para pontos mais baixos da torre.

Através dos resultados anteriormente postos, pode-se dizer que a metodologia apresentada pode ser uma alternativa robusta para cálculo da impedância de surto das torres.

3.6 Considerações Finais

As diferenças entre os valores de impedância de surto obtidos através do emprego de métodos teóricos, sugere a divergência nas abordagens realizadas por estas metodologias, não havendo uma equação geral para cálculo do parâmetro sob estudo. Por outro lado, os métodos experimentais se mostraram alternativas complexas e dispendiosas. Em vista disso, neste capítulo foi proposto uma metodologia para a determinação da impedância de surto de torres.

Tal metodologia se baseia na representação das torres por modelos tridimensionais. Esta característica do método garante grande fidelidade dos modelos às torres reais, desde que eles sejam desenvolvidos com base nas dimensões reais das torres. Para tanto, é interessante utilizar como referência o projeto da torre sob estudo, no qual estão presentes todas as informações necessárias para uma modelagem tridimensional apropriada. Além disso, projetos que contemplam uma família de torres permitem a criação de vários modelos com maior agilidade.

Através da aplicação do MEF nos modelos tridimensionais são determinados os campos elétrico e magnético, que por sua vez, são utilizados para o cálculo da impedância de surto da torre.

Dentro do processo de aplicação do MEF, a imposição das condições de contorno do problema se caracteriza com uma importante etapa. Isto se deve à particularidade de dispersão dos campos no

problema em questão, o qual não possui fronteiras definidas. Caso uma fronteira fosse adotada erroneamente, os resultados seriam comprometidos, levando a uma grande imprecisão no método.

Neste caso foi considerado que, em regiões suficientemente distantes da torre, os campos são nulos. Esta solução corrobora com a teoria de eletromagnetismo, pela qual sabe-se que, em um meio imperfeito, os campos se dissipam à medida que se afastam de sua origem. Através do estudo realizado no item 3.3.1, foi possível estipular dimensões adequadas para a fronteira externa do domínio.

No processo de discretização do domínio, o *software* Flux3D (adotado neste trabalho) realiza a avaliação da malha criada, de acordo com a qualidade dos elementos finitos que a integram. Esta análise é interessante devido ao impacto negativo aos resultados que uma malha de baixa qualidade traria. Assim, se necessário o usuário pode refazer o processo, modificando os parâmetros de criação da malha, para que a qualidade dos elementos atenda os níveis desejados.

No trabalho analítico realizado para o cálculo da impedância de surto, também são obtidos os valores distribuídos de indutância e capacitância da torre. Tais parâmetros possibilitam a avaliação da velocidade de propagação do surto na torre, o que permite a realização de análises mais profundas quando da ocorrência de descargas atmosféricas. Além disso, a verificação da variação da impedância de surto na torre possibilita a análise das tensões originadas em alturas estratégicas da torre. Este aspecto permite se prever com maior exatidão as tensões de solicitação da cadeia de isoladores, promovendo projetos de coordenação de isolamento mais precisos.

Para validação da metodologia proposta, tomou-se como referência uma torre real apresentada em [17]. Esta torre foi submetida à nova metodologia, de forma que foram obtidos 4 resultados, os quais, representam as impedâncias de surto em determinadas alturas, quais sejam: no topo da torre e na altura dos braços superiores, intermediários e inferiores da estrutura. Ainda, resultados experimentais, presentes em [17], foram tomados para comparação dos valores de impedância de surto obtidos.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, ao passo que a diferença de impedância de surto, em relação aos valores das medições, ficaram abaixo de 1,5%. Notou-se que em pontos mais altos, essa diferença mostrou-se menor. Assim, a metodologia proposta revelou-se válida através da comparação dos seus resultados de impedância de surto com aqueles oriundos de medições.

De forma geral, os diferentes tipos de torres tornam difícil o desenvolvimento de métodos analíticos para a determinação da impedância de surto, não havendo uma equação geral que traga resultados precisos para todos os tipos de torres.

Assim, a metodologia proposta neste trabalho se torna uma alternativa interessante, visto que ela pode ser empregada em vários tipos de torres de transmissão através de um processo viável e

relativamente rápido, mantendo-se a alta precisão nos resultados. Dessa forma, tais características demonstram uma significativa contribuição para os projetos de coordenação de isolamento, ao passo que a impedância de surto pode ser determinada para cada torre, sendo a análise pontual em cada caso.

CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO

4.1 Considerações Iniciais

Como exposto nos capítulos anteriores, é evidente a carência de uma metodologia geral para a determinação da impedância de surto de torres de transmissão. Este fato é ratificado pela diversidade de métodos propostos para tal fim. Isto muito se deve à existência de vários tipos de torres, com diferentes silhuetas, o que dificulta o desenvolvimento de uma metodologia genérica para este cálculo.

De fato, as diferenças nas silhuetas e dimensões das torres provocam a modificação nos valores da capacitância e indutância da estrutura em diferentes proporções [12], levando à alteração da sua impedância de surto. Portanto, torres com a mesma altura, mas com silhuetas diferentes, resultam em valores distintos de impedância de surto. Da mesma forma, torres com silhuetas semelhantes, mas com alturas diferentes, podem possuir impedâncias de surto diferentes.

Neste capítulo será realizada uma análise comparativa dos métodos com o intuito de expor suas características, para que sejam analisadas as diversas abordagens de forma a se indicar aquelas mais precisas.

Além disso, os métodos serão utilizados em algumas torres, e os resultados serão comparados. Deste modo, será possível a quantificação das divergências dos métodos através da verificação das diferenças nos valores de impedância de surto.

4.2 Análise dos Métodos Teóricos

Entre os métodos teóricos, situam-se as técnicas analíticas e as técnicas numéricas. Todas as metodologias possuem sua contribuição para o tema sobre estudo e serão aqui analisadas.

Mesmo com as aproximações adotadas em seu desenvolvimento, os métodos analíticos são de grande importância no processo de averiguação de novas técnicas. Isto acontece, devido seus resultados proporcionarem uma ordem de grandeza do parâmetro sob estudo, possibilitando a análise comparativa com novas técnicas.

De modo geral, os métodos analíticos fazem uso das equações de Maxwell para determinar a impedância de surto de torres. Entretanto, devido às formas físicas complexas das estruturas, a resolução de tais equações pode ser um processo árduo. Como alternativa, é comum realizar a aproximação da silhueta da torre a uma forma geométrica mais simples.

Os métodos de 1 a 8, apresentados no Capítulo 2, são estudos analíticos presentes na literatura, os quais propõem formulações para determinação da impedância de surto de torres. As várias formulações existentes indica a divergência destas metodologias. De fato, cada método realiza aproximações e abordagens peculiares, o que implica no desenvolvimento de equações distintas.

Mesmo apresentando equações finais diferentes, tais técnicas podem partir dos mesmos modelos geométricos para representar a torre. Dentre as metodologias apresentadas, os métodos 1, 2, 3, 4 e 6 se baseiam no modelo geométrico cilíndrico, enquanto que os métodos 5, 7 e 8 se baseiam em modelos cônicos (método 8 se baseia na composição de duas bases de cones). Entretanto, ainda que utilizando os mesmos modelos geométricos, os métodos possuem abordagens diferentes, e consequentemente, resultam em formulações distintas.

Os métodos 1 e 2, utilizam o método das imagens para se obter o vetor potencial magnético originado na torre. A partir deste parâmetro, a indutância da torre é determinada, e, considerando a velocidade de propagação do surto igual à velocidade da luz, determina-se a impedância de surto. Entretanto, o método 2 propõem a modificação do sentido da corrente na imagem da torre. Isto faz com que a formulação resultante seja diferente daquela proposta no método 1.

Os métodos 3 e 4, também propõe a determinação do vetor potencial magnético. Entretanto, nessas metodologias são analisados os efeitos de atraso na onda de corrente ao viajar pela torre (torre cilíndrica). No método 3, o surto de corrente foi considerado com a forma de um degrau, enquanto que no método 4, tomou-se a forma de onda em rampa.

O método 5 é semelhante ao método 4, que leva em consideração os efeitos de atraso da passagem de um surto com forma de onda em degrau na torre. Entretanto, neste caso, a forma geométrica cônica é tomada para representar a torre.

Os métodos 6 e 7 são derivados da equação para cálculo da impedância de surto do modelo de cone invertido. Nesses métodos foram consideradas as funções que relacionam tempo, altura e raio da forma geométrica considerada (cilindro para o método 6 e cone para o método 7). Substituindo-se

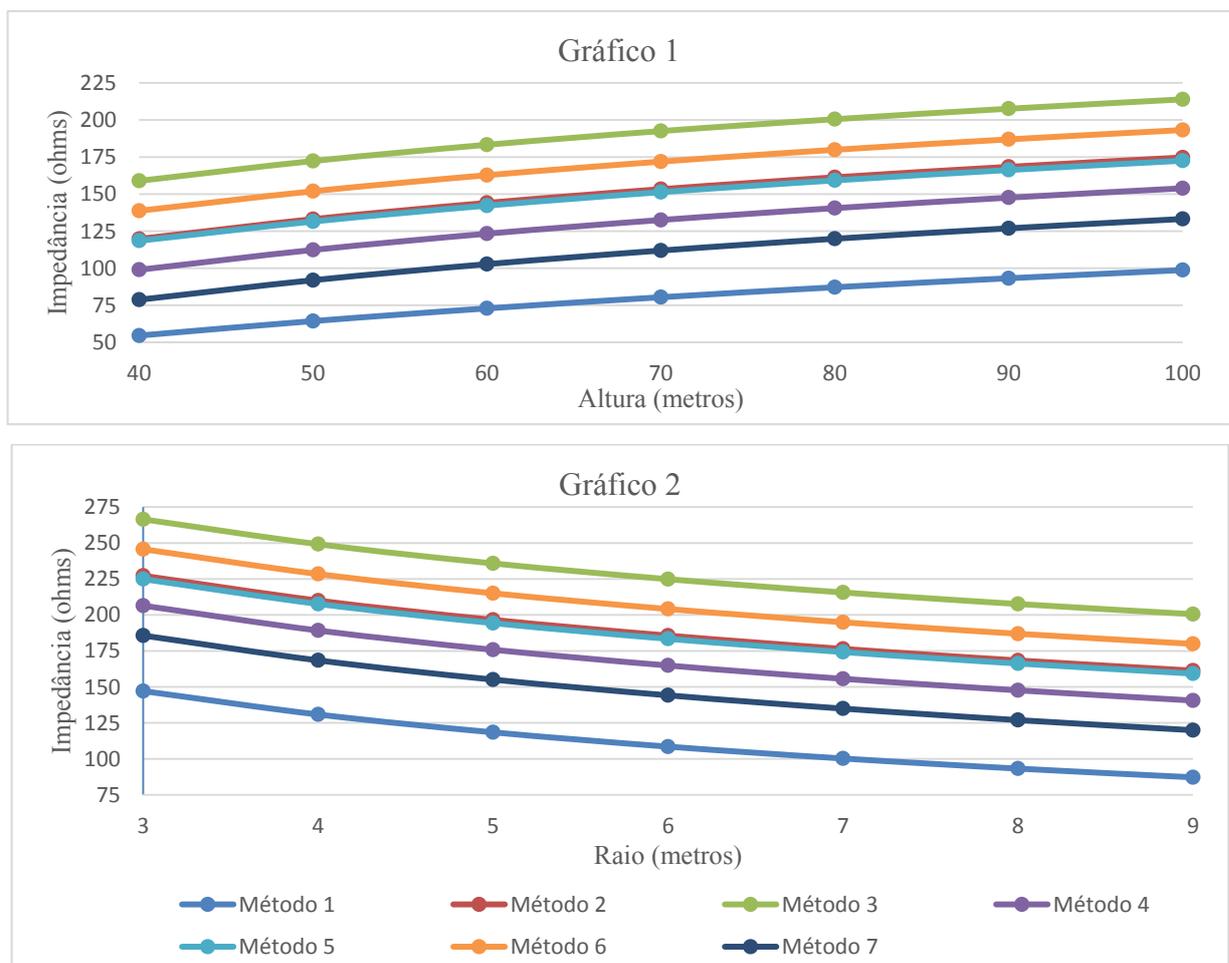
a função de cada forma geométrica na equação do cone invertido resultam-se, então, nos equacionamentos dos métodos 6 e 7.

O método 8 baseia-se no cálculo da capacitância de objetos com formas arbitrárias. Nessa metodologia, considerou-se uma forma geométrica composta por duas bases de cone. Através de um cálculo que leva em conta a proporção entre altura e raio equivalente da estrutura, a impedância de surto é então determinada.

As peculiaridades no desenvolvimento dos métodos analíticos resultaram em diferentes equações para determinação da impedância de surto das torres. De forma direta, as diferenças entre as formulações podem ser verificadas através de resultados obtidos por suas aplicações em uma mesma torre.

Para tanto, pode-se representar tais equações em gráficos, em função da altura e do raio da torre. Por apresentarem as mesmas variáveis (raio r e altura h), foram considerados somente os métodos de 1 a 7 nos gráficos da Figura 4.1.

Figura 4.1: Resultados de impedância de surto resultantes dos métodos 1 a 7



Fonte: Do autor

No gráfico 1, obteve-se os valores de impedância de surto para várias alturas de torre, mantendo-se seu raio constante e igual a 8 metros. Já no gráfico 2, manteve-se a altura constante e igual a 90 metros, e verificou-se a resposta dos métodos para vários raios.

Como pode ser visto nos gráficos, a impedância de surto apresenta uma taxa de variação semelhante para todos os métodos. Entretanto, a maioria deles apresenta valores significativamente discrepantes. Somente os métodos 2 e 5 resultaram em valores semelhantes, apesar de considerarem formas geométricas diferentes para representar a torre (o método 2 considera um modelo cilíndrico enquanto o método 5 considera o modelo cônico).

Percebe-se também o comportamento da impedância de surto de acordo com as dimensões dos modelos geométricos. Enquanto a impedância aumenta à medida que a altura aumenta, para o aumento do raio, ela toma valores menores.

A despeito das aproximações, os métodos analíticos possuem grande facilidade de aplicação. Por levarem em conta somente a altura e largura da estrutura, as impedâncias de surto de várias torres podem ser calculadas rapidamente. Além disso, os custos para tal cálculo são reduzidos, ao passo que não é necessário *softwares* especializados (que em sua maioria são *softwares* pagos) ou equipamentos sofisticados.

Entretanto, as aproximações podem levar a valores de impedância de surto imprecisos, ocasionando erros em projetos de coordenação de isolamento.

Como uma alternativa, pode-se utilizar técnicas numéricas para a determinação da impedância de surto de torres. Os métodos 9 e 10, bem como o método proposto, fazem uso de tais técnicas, facilitando a resolução de equações de campo eletromagnético, e conseqüentemente, a obtenção do parâmetro sob estudo. Entretanto, tais métodos devem ser implementados com cautela, para que as características da estrutura sejam representadas corretamente.

As técnicas numéricas consistem em métodos de aproximação, os quais fazem uso de algoritmos matemáticos para aproximação das funções à sua resposta. Tais métodos podem introduzir nos resultados um erro devido a aproximação numérica realizada, devendo haver cuidado no desenvolvimento dos modelos.

O método 9 faz uso do DFDT, técnica numérica aplicada em problemas eletromagnéticos com abordagem no domínio do tempo. Este método traz uma solução aproximada para as equações de Maxwell, em suas formas diferenciais, através da discretização do espaço em células cúbicas (3D) ou retangulares (2D) [41].

Entretanto, para objetos de formas arbitrárias, estas células podem não representar adequadamente o domínio sob estudo, levando a resultados imprecisos. Assim, o DFDT pode não representar adequadamente domínios com limites que não estejam alinhados com o plano cartesiano.

Além disso, tal método numérico exige um esforço computacional significativamente maior quando se comparado com outras técnicas, como o MoM e o MEF [41].

O método 10 utiliza algoritmos computacionais que aplicam o MoM para obtenção dos potenciais eletromagnéticos na torre. O MoM é normalmente utilizado em estudos de antenas e na análise de propagação de campos eletromagnéticos em alta frequência [69].

Um dos algoritmos que utiliza o MoM é o *Numerical Electromagnetic Code* (NEC-2) [69]. Amplamente utilizado na análise de antenas, o NEC-2 pode determinar a distribuição dos campos eletromagnéticos ao redor de conjuntos de segmentos finos de condutores cilíndricos [70]. Assim, neste método a torre é decomposta em segmentos cilíndricos, o que leva a simplificações nas dimensões da estrutura.

Além disso, a modelagem de materiais condutores imperfeitos é inviável, exceto em casos muito simples. Isto se deve ao fato de que a determinação da distribuição de corrente neste tipo de material seja um procedimento complexo neste método [50].

Por serem algoritmos complexos e contendo particularidades, neste trabalho, os métodos 9 e 10 não serão implementados. Visando a comparação entre as técnicas, bem como a verificação da metodologia proposta, serão tomados apenas os resultados dos métodos 9 e 10 já presentes na bibliografia.

4.3 Análise dos Métodos Experimentais

A determinação da impedância de surto através de medições em torres reais é uma prática que deve ser realizada com cautela. A forma de se obter resultados próximos da realidade seria através da medição de uma corrente de surto incidente na torre e das tensões originadas na estrutura. A primeira dificuldade é a aplicação do surto na torre.

A alternativa mais utilizada é a reprodução dos surtos através de geradores de impulsos. Desta maneira a forma de onda da corrente pode ser controlada, podendo o surto ser reproduzido com relativa precisão. Entretanto, em alguns casos são reproduzidos surtos com amplitudes significativamente baixas, ficando as medições sensíveis a pequenas perturbações que possam ocorrer. Assim, os cabos e equipamentos devem ser adequados para se evitar tais perturbações.

Do mesmo modo, o posicionamento dos cabos deve ser realizado de forma apropriada para se evitar acoplamentos eletromagnéticos indesejados. Medições apresentadas em [17], utilizando posicionamentos diferentes dos cabos de injeção de corrente e de medição de tensão, sugerem diferenças significativas nas medições, devido à indução de tensão que a corrente de surto provoca nos cabos de medições.

Além disso, os locais onde se encontram as torres normalmente são de difícil acesso, dificultando ainda mais o deslocamento do gerador de impulso e dos equipamentos necessários para a medição em campo. Para contornar esta dificuldade, alguns trabalhos realizam ensaios laboratoriais, utilizando torres em escala reduzida. Desta forma, uma réplica menor da torre real (entre 30 e 40 vezes menor) é construída para realização dos ensaios em laboratório, trazendo maior flexibilidade para movimentação e instalação dos equipamentos.

Entretanto, a réplica da torre pode não ser totalmente fiel à estrutura real. Visto que os perfis metálicos utilizados na estrutura real possuem espessuras menores que 10 milímetros, a aplicação do fator de escala resultaria em dimensões muito pequenas para estes perfis metálicos. Dessa forma, os materiais necessários não seriam encontrados comercialmente, impossibilitando a construção de uma réplica totalmente fiel à escala utilizada. Normalmente o fator de escala é aplicado somente nos comprimentos destes perfis, diminuindo-se assim a altura e largura da torre.

Outro inconveniente seria a elevada altura que as torres normalmente possuem, o que dificulta o manuseio de equipamentos e materiais elétricos para realização dos procedimentos experimentais. Alternativas são tomadas de forma a facilitar a utilização dos métodos experimentais, como a utilização de balões para elevar os cabos de medições. Contudo, visto que uma linha de transmissão pode ser composta por até centenas de torres, a realização de medições em cada uma delas, a fim de se determinar as impedâncias de surto individuais, se caracteriza como uma prática inviável.

Assim, as medições em torres consistem em processos complexos e que engloba algumas questões que dificultam o emprego de tais métodos. Contudo, os métodos experimentais possuem grande importância na validação das técnicas teóricas. Uma alternativa interessante seria a realização de medições em torres reais somente para fins de validação de técnicas teóricas menos complexas e financeiramente viáveis.

4.4 Análise da Metodologia Proposta

Nesta tese foi apresentada uma metodologia para determinação da impedância de surto de torres, com base no cálculo de sua indutância e de sua capacitância. Para tanto, utiliza-se o MEF,

através do *software* comercial Flux3D, de forma que são determinadas as intensidades de campo elétrico e campo magnético no domínio sob estudo.

O MEF proporciona grande versatilidade para as simulações, pois pode representar com alta precisão objetos com formas complexas. Isto se deve ao fato do MEF utilizar elementos tetraédricos e piramidais para discretizar o domínio em estudo. Estas formas geométricas possuem maior flexibilidade na composição de volumes, quando comparado a outras geometrias, podendo representar melhor os domínios. Além disso, materiais com características não lineares e condutores imperfeitos podem ser modelados por este método, o que não acontece em outras técnicas numéricas.

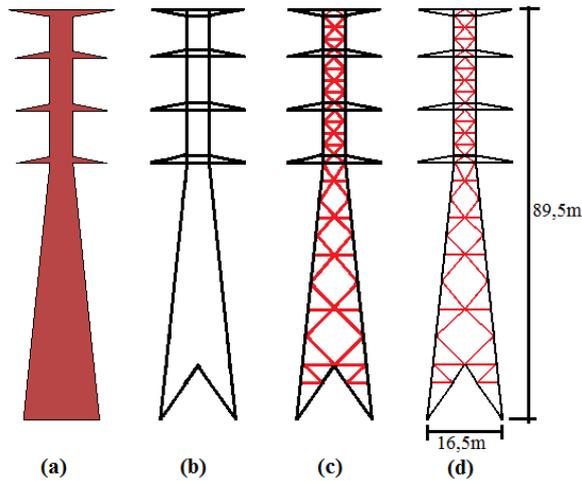
Um ponto que deve ser analisado com cautela é o esforço computacional exigido pela aplicação do MEF no modelo da torre. Isto se deve ao fato de que quanto maior o esforço computacional, maior será o tempo necessário nas simulações.

Como visto no Capítulo 3, quanto maior a complexidade do modelo da torre, com o detalhamento dos perfis metálicos, maior será o esforço computacional exigido nas simulações. Principalmente no processo de criação da malha de EF, a aplicação do algoritmo de Delaunay pode aumentar o tempo total de simulação significativamente.

Posto desta forma, visando a otimização no procedimento de geração da malha de EF, será realizada uma análise dos resultados provenientes de 4 modelos 3D, baseados na torre da Figura 3.12. Estes modelos terão níveis de detalhamento diferentes, e a aplicação da metodologia aqui proposta em cada um deles resultará nas respectivas impedâncias de surto.

Pela análise dos resultados será verificada a possibilidade de se utilizar uma modelagem menos rigorosa às características físicas da torre. Modelos menos detalhados podem exigir um menor esforço computacional, o que pode levar a diminuição dos tempos de simulação, como é apurado através da análise das próximas simulações. Os modelos submetidos à metodologia proposta são ilustrados na Figura 4.2.

Figura 4.2: Modelos 3D da mesma torre: (a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3 e, (d) Modelo 4.

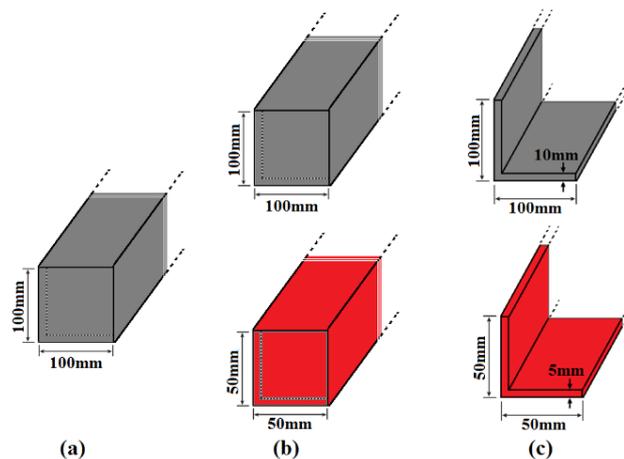


Fonte: Do autor

O modelo 1 é o mais simples, pois representa a silhueta real da torre com seu interior todo preenchido com o material condutor. Nesse caso o processo de modelagem 3D é simples e a simulação demanda um baixo esforço computacional.

O modelo 2 representa apenas os perfis metálicos principais da torre, sem as treliças presentes na estrutura real. Neste caso, os perfis são simplificados com forma de paralelepípedos. Já os modelos 3 e 4 representam todos os perfis metálicos da estrutura, proporcionando grande semelhança com a torre real. Entretanto, no Modelo 3 são considerados perfis metálicos também aproximados a formas de paralelepípedos, enquanto que no Modelo 4 são tomadas estruturas metálicas com forma de cantoneiras (perfis “L”) de abas iguais, como aquelas utilizados na construção da torre real. As formas utilizadas para representar os perfis metálicos nos modelos 2, 3 e 4 são ilustrados na Figura 4.3.

Figura 4.3: Perfis metálicos considerados no: (a) o modelo 2, (b) o modelo 3 e, (c) o modelo 4

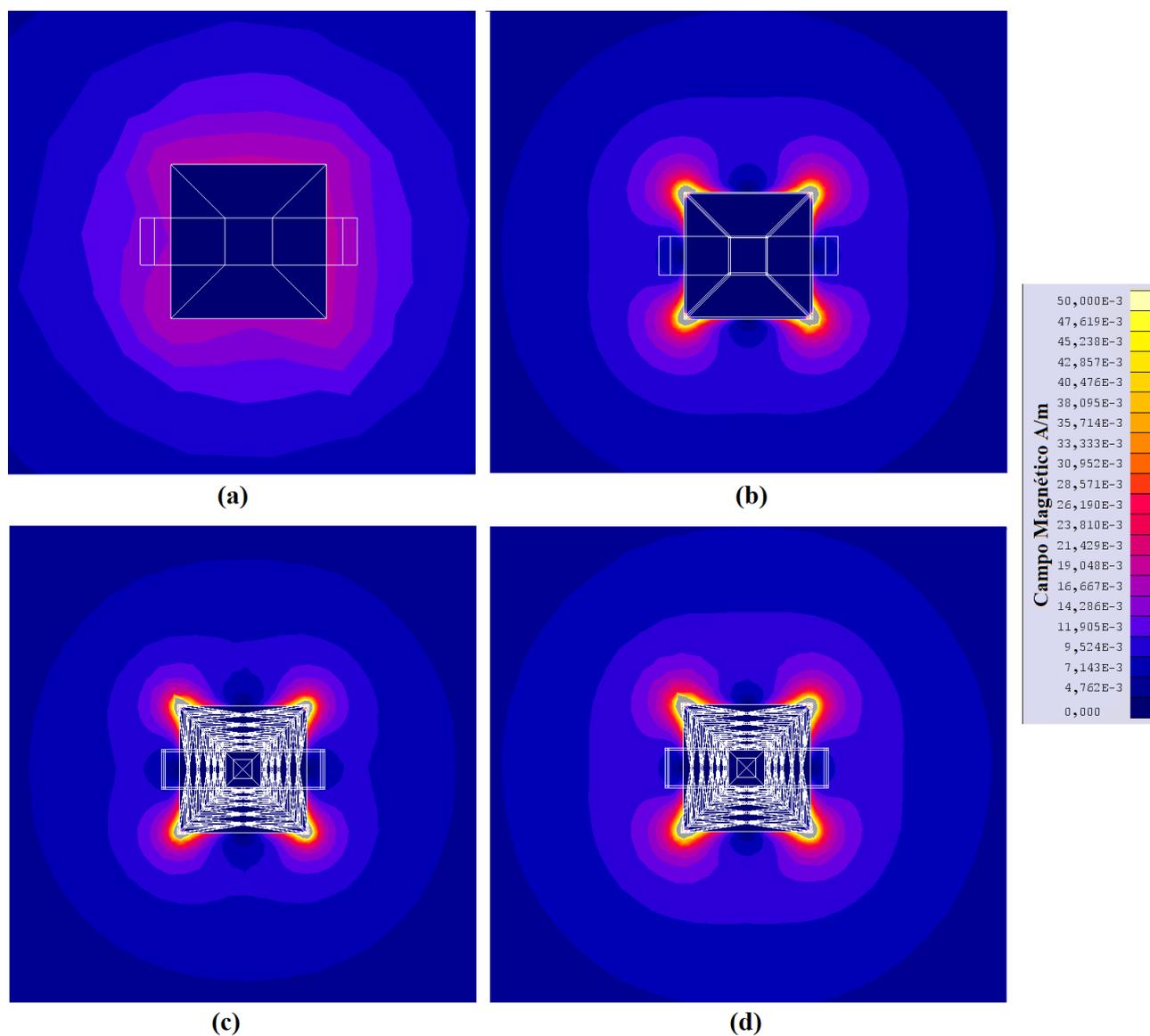


Fonte: Do autor

No modelo 2 foram consideradas a mesma dimensão para todos os perfis metálicos. No modelo 3 foram acrescentadas as treliças, as quais possuem mesma forma que os perfis principais, mas com dimensões menores. No modelo 4 também foram consideradas duas dimensões para os perfis, os quais foram representados, neste caso, como cantoneiras (perfis “L” de abas iguais).

Após a modelagem, o MEF é então aplicado a cada um dos modelos para determinação das intensidades dos campos elétricos e magnéticos, e conseqüentemente, das energias armazenadas nesses campos. A Figura 4.4 mostra a distribuição de campo magnético no domínio para cada modelo.

Figura 4.4: Visão superior da torre e distribuição de campo magnético (a) no modelo 1, (b) no modelo 2, (c) no modelo 3, e, (d) no modelo 4.



Fonte: Do autor

Percebe-se uma variação significativa na intensidade e distribuição do campo magnético no entorno da torre, quando compara-se o modelo 1 com os outros modelos.

A aplicação da metodologia proposta nestes modelos originaram os valores de impedância de surto da Tabela 4.1. Adicionalmente, também são mostrados os resultados de medições [17]. Tais medições foram realizadas através do método direto aplicado na torre que serviu de referência para o desenvolvimento dos modelos da Figura 4.2.

Tabela 4.1 Resultados de impedância de surto, em ohms.

Posição na Torre	Medições [17]	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Topo	141	121,52	130,88	135,52	140,21
Braços superiores	133	115,46	122,27	127,49	131,96
Braços intermediários	117	98,55	109,06	112,33	115,93
Braços inferiores	104	89,22	96,47	99,75	102,48

Como pode ser visto, quanto mais o modelo se aproxima da estrutura física real, mais próximos das medições são os resultados. Mesmo com significativo ganho de tempo no processamento quando se considera um modelo simplificado, os resultados se mostraram significativamente menores (até 15,77% menores). Dessa forma, de modo a se obter resultados mais aderentes com os objetivos específicos de cada análise, a modelagem da torre, considerando sua estrutura física real, é a alternativa mais interessante.

Uma avaliação do esforço computacional exigido pela aplicação do MEF nos modelos de 1 a 4 pode ser realizada com base nos tempos de simulação. Para uma análise sem a interferência das configurações de *hardware* utilizados, os tempos de simulação são apresentados na Tabela 4.2 em porcentagem, tendo como referência o tempo de simulação do modelo 4.

Tabela 4.2: Tempos de simulação, em relação ao tempo gasto no modelo 4

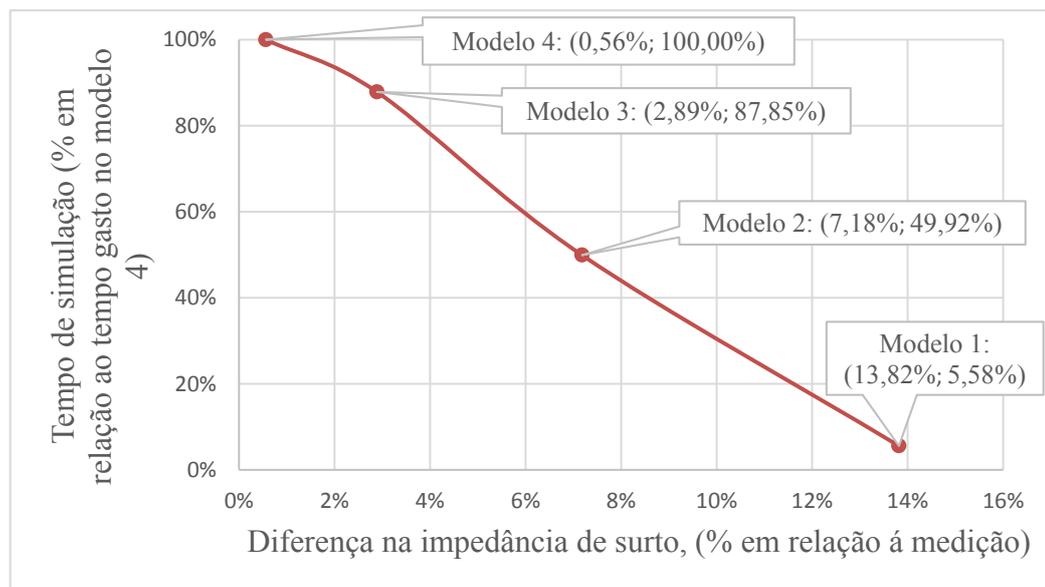
Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
5,58%	49,92%	87,85%

Como pode ser visto, a diminuição nos tempos de simulação é significativa quando o modelo é simplificado. Os tempos de simulação levaram em conta o processo de criação da malha de elementos finitos, a simulação eletrostática e a simulação magnética. O Modelo 4 demandou um tempo total de 23 minutos e 42 segundos. Entretanto, este tempo pode variar conforme as configurações de *hardware* do computador utilizado. Neste caso foi utilizado uma máquina

(considerada de ponta para usuários domésticos) com as seguintes configurações: processador Intel Core I7 7700K, placa mãe Asus maximus IX hero, memória RAM de 32 GB, placa de vídeo GeForce GTX 1080 de 8 GB de memória, HD SSD de 500 GB.

Também deve-se analisar as diferenças nos valores de impedância de surto em função dos tempos de simulação. A Figura 4.5 apresenta o gráfico da relação entre o tempo gasto na simulação e a diferença nos resultados para cada modelo analisado.

Figura 4.5: Relação entre tempo de simulação e impedância de surto no topo da torre



Fonte: Do autor

Apesar da considerável diminuição no tempo de simulação, os modelos simplificados aumentaram significativamente o erro na impedância de surto, em relação à medição. Salienta-se que o modelo mais detalhado foi o que obteve os resultados mais próximos dos valores medidos, e se mostrou ser o mais adequado.

Outro aspecto é a dificuldade da modelagem das torres. Quando se adota simplificações, como as realizadas no modelo 1, o desenvolvimento do modelo 3D da torre é substancialmente mais simples e rápido em relação à modelagem detalhada da estrutura, como no modelo 4.

Além disso, a própria variedade de estruturas existentes acarreta em diferenças nos tempos de modelagem e de simulação. Torres com menos detalhes construtivos demandam tempos menores para a modelagem. Nestes casos, os modelos detalhados (como o modelo 4) serão desenvolvidos com maior rapidez.

A obtenção de resultados próximos às medições sugere que a modelagem detalhada da torre é o procedimento mais adequado, sendo que produz os modelos que melhor representam as torres, e

que trazem maior confiabilidade nos resultados. Assim, este tipo de modelagem é o ideal, e deve ser preferencialmente adotado.

Nesta tese, para determinação da impedância de surto através da metodologia apresentada serão desenvolvidos os modelos 3D detalhados das torres, levando-se em conta as formas dos perfis metálicos utilizados nas estruturas reais.

4.5 Análise dos Resultados

Nos itens anteriores foram analisados os métodos teóricos, os métodos experimentais e a metodologia proposta. Os pontos positivos e as deficiências de tais técnicas foram expostas, e alternativas foram verificadas de forma a se revelar as características das metodologias investigadas.

De forma complementar, serão apresentadas análises quantitativas dos métodos apresentados. Para tanto, as técnicas serão aplicadas em algumas torres com o intuito de se obter resultados de impedâncias de surto. A comparação de tais resultados quantificarão as discrepâncias entre os métodos.

4.5.1 Torre Autoportante para Circuito Duplo e LT de 500kV

A torre em questão é a estrutura tomada como referência no Capítulo 3, para aplicação e validação da metodologia proposta. Composto a LT de 500kV Kouda–Shinmikawa da empresa Chubu Electric Power Co. Inc., esta torre possui os dados dimensionais apresentados na referência [17], e ilustrados na Figura 3.12. Nesta mesma referência foram apresentadas medições para determinação da impedância de surto desta estrutura através do método direto.

A Tabela 4.3 mostra os resultados de impedância de surto para esta torre, obtidos através da aplicação dos métodos apresentados nesta tese.

Tabela 4.3: Resultados de impedância de surto

Método	Impedância de Surto (Ω)	Método	Impedância de Surto (Ω)
Método 1	91,34	Método 7	124,76
Método 2	166,22	Método 8	133,29
Método 3	205,42	Método 9	146,00 [17]
Método 4	145,42	Método 10	-
Método 5	164,09	Medição	141,00 [17]
Método 6	184,76	Método Proposto	140,21

Os métodos de 1 a 8 não produzem valores de impedância de surto em alturas intermediárias da torre. Tais métodos resultam em um valor para toda a torre, considerando a impedância de surto constante por toda a estrutura. Em vista disso, para os métodos que consideram a variação da impedância na torre (método 9, método proposto e a medição) foi tomado somente o resultado no topo da torre, para a comparação com os valores das outras técnicas. O modelo tomado para aplicação do método proposto foi o mesmo desenvolvido no item 3.5 (Figura 3.15a).

Tomando-se como referência os resultados obtidos pela medição, os métodos analíticos em geral resultaram em valores com significativa divergência, chegando a diferenças de até 45,7% em relação ao resultado da medição. Somente o método 4 resultou em valores plausíveis, com uma diferença de 3,14%.

As técnicas que utilizam métodos numéricos (método proposto e o método 9) obtiveram resultados interessantes em relação à medição, com diferenças de 3,55% para o método 9, e com destaque positivo para a metodologia proposta, com diferença de 0,56% no valor de impedância de surto. Uma análise aprofundada pode ser realizada somente entre esses três métodos, observando a variação da impedância de surto na torre, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados de impedância de surto

Local	Medição [17]	Método 9 [17]	Método Proposto
Topo da Torre	141,00	146,00	140,21
Braços Superiores	133,00	144,00	131,96
Braços Intermediários	117,00	123,00	115,93
Braços inferiores	104,00	115,00	102,48

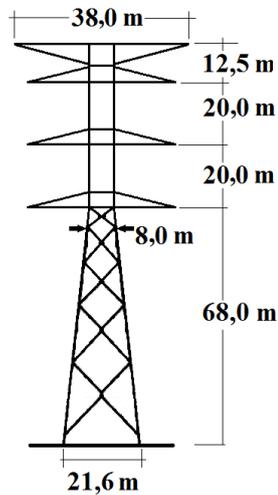
Apesar de resultar em um valor com pequena diferença (em relação à medição) no topo da torre (1,56%), para pontos mais baixos da torre, o método 9 resultou em diferenças significativamente maiores (até 10,57% maior). Já o método proposto manteve diferenças pequenas em relação às medições (menores que 1,5%).

4.5.2 Torre Autoportante para circuito duplo

No estudo apresentado em [22], uma torre da linha de circuito duplo de Nishi-Gunma (Japão) foi alvo de medições através do método direto. No estudo apresentado em [56], também foi calculada a impedância de surto desta mesma estrutura através do método 10, o qual utiliza o método dos momentos. Assim, neste item será possível a comparação entre as técnicas apresentadas e os resultados de medições.

A estrutura em questão é uma torre com silhueta semelhante àquela apresentada no item anterior, mas com dimensões maiores, como mostra a Figura 4.6.

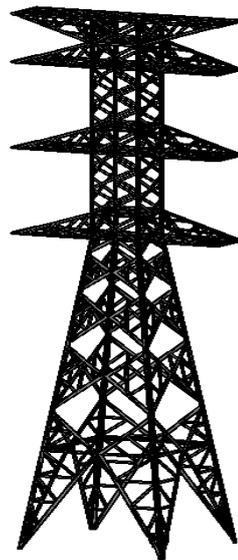
Figura 4.6: Torre sob estudo.



Fonte: Adaptado de [22]

A partir dessas dimensões foi desenvolvido o modelo 3D representante desta torre, para determinação da impedância de surto através do método proposto. Como no item anterior, foram consideradas as formas reais dos perfis metálicos. Para complementação das informações de dimensões físicas da torre, foi utilizado o projeto apresentado no Anexo A. A Figura 4.7 mostra o modelo 3D desenvolvido.

Figura 4.7: Modelo 3D da torre sob análise



Fonte: Do autor

Aplicando-se o método proposto nesse modelo de torre obtêm-se os valores de impedância de surto em vários pontos. Para comparação com as técnicas analíticas, será tomado somente o valor de impedância de surto determinado no topo da torre.

Os métodos analíticos são facilmente aplicados, com base nos valores de alturas e larguras apresentados, para o cálculo da impedância de surto. A Tabela 4.5 mostra os valores de impedância de surto da torre sob análise determinados através da aplicação dos diversos métodos.

Tabela 4.5: Resultados de impedância de surto

Método	Impedância de Surto (Ω)	Método	Impedância de Surto (Ω)
Método 1	92,79	Método 7	126,44
Método 2	167,90	Método 8	130,35
Método 3	207,11	Método 9	-
Método 4	147,11	Método 10	115,00[56]
Método 5	165,76	Medição	126,00[22]
Método 6	186,44	Método Proposto	134,17

O método proposto resultou em uma impedância de surto maior, que a princípio possui uma diferença de 6,48% em relação ao valor medido. Entretanto, deve-se investigar a configuração que foi utilizada nas medições realizadas em [22].

No referido trabalho, devido a dificuldades na realização da medição, os cabos de injeção de corrente e de aquisição de tensão foram posicionados horizontalmente ao solo, e com um ângulo de 130° entre eles. Esta angulação implica em uma indução de tensão no cabo de medição do potencial, devido ao campo magnético originado pela corrente de surto. Em tese, a tensão registrada foi então menor, implicando no cálculo de um valor menor da impedância de surto.

O próprio trabalho que apresenta estas medições, sugere uma correção no valor de impedância de surto através de comparações com medições em modelos com escala reduzida. Assim, o valor corrigido, segundo [22], seria de 130,0 ohms (3,17% maior). Nesse caso a impedância de surto determinada pelo método proposto seria somente de 3,21% maior que o valor corrigido.

Em [17], realizou-se medições para as duas configurações de cabos (perpendiculares e alinhados). Verificou-se uma diferença de 10% entre os valores medidos nos dois casos (128 ohms na configuração de cabos alinhados e 141 ohms na configuração de cabos perpendiculares). Isto indica que o valor a ser corrigido pode ser ainda maior, e se for o caso, o método proposto poderia resultar em valores ainda mais próximos à valores oriundos de uma medição adequada na torre da Figura 4.6.

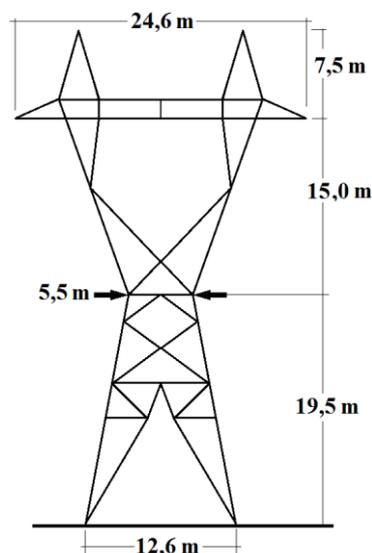
Já os métodos 7 e 8 resultaram em valores interessantes, com destaque para o método 7, que obteve um valor de impedância de surto muito próximo do valor mensurado. Caso for tomado o valor de impedância de surto corrigido, o método 8 se torna mais preciso, com uma diferença de apenas 0,27%. O restante dos métodos analíticos resultaram em valores de impedância muito discrepantes em relação à medição, chegando a diferenças de 64,37%.

O método 10, resultou em um valor de impedância de surto quase 9% menor que o valor medido. Este método realizou o cálculo da impedância de surto já considerando o ângulo de 130° entre os cabos de medições. Esta diferença é significativa, e pode prejudicar estudos que envolvem a previsão das tensões na torre.

4.5.3 Torre Autoportante para Circuito Simples e LT de 500kV

Neste item, é analisada a impedância de surto de uma torre de circuito simples, a qual possui uma silhueta diferenciada das estruturas anteriores. Esta torre possui dimensões menores, e integra as estruturas de uma LT de 500kV. A Figura 4.8 ilustra tal estrutura.

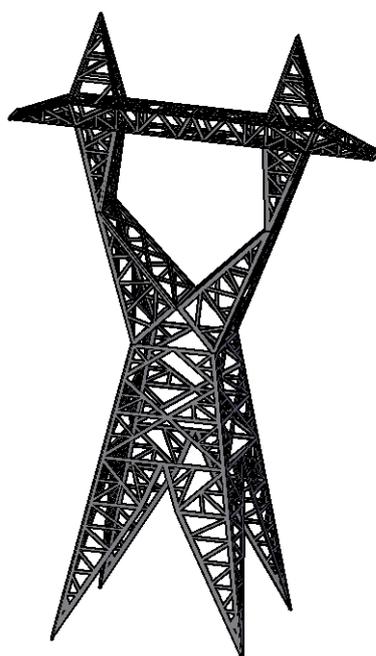
Figura 4.8: Torre sob estudo



Fonte: Adaptado do Anexo B

O projeto desta torre encontra-se no Anexo B, onde pode ser encontrado mais detalhes dimensionais. A partir deste projeto, o modelo 3D da torre pôde ser desenvolvido fielmente à estrutura real. A Figura 4.9 mostra o modelo 3D desenvolvido.

Figura 4.9: Modelo 3D da torre sob estudo



Fonte: Do autor

Novamente, o método proposto é aplicado a este modelo resultando em valores de impedância de surto determinados com o uso do MEF. Através da utilização dos métodos analíticos são determinados outros valores de impedância de surto para comparação. Os resultados são mostrados na Tabela 4.6.

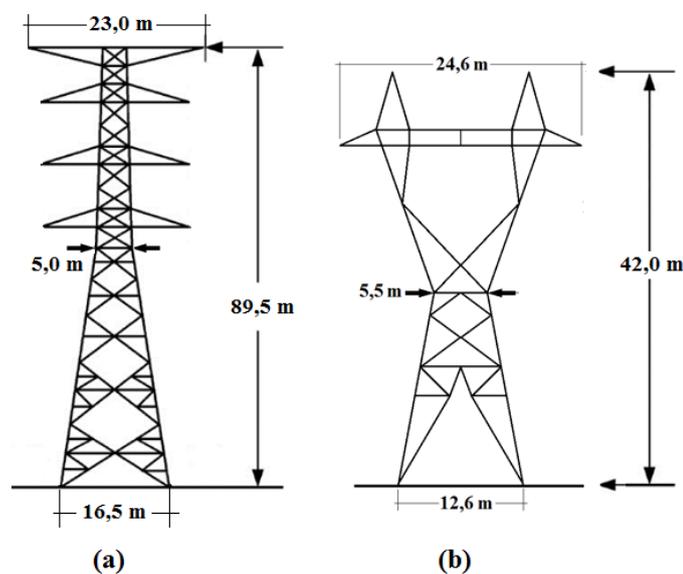
Tabela 4.6: Resultados de impedância de surto

Método	Impedância de Surto (Ω)	Método	Impedância de Surto (Ω)
Método 1	67,33	Método 7	95,75
Método 2	137,00	Método 8	58,74
Método 3	176,21	Método 9	-
Método 4	116,21	Método 10	-
Método 5	135,29	Medição	-
Método 6	155,75	Método Proposto	88,57

Os métodos analíticos resultam em valores menores que os resultados das torres anteriores, devido às dimensões menores desta estrutura. Entretanto, alguns métodos são extremamente divergentes entre si, como é o caso do método 3 que resultou em uma impedância de surto 2,62 vezes o valor obtido pelo método 1.

Como não existem registros experimentais para esta torre, não é possível se quantificar diferenças dos cálculos teóricos tendo como referência as medições. Alternativamente, pode ser realizada uma comparação com os resultados obtidos para uma das torres estudadas anteriormente. Para tanto, deve-se primeiro verificar o comportamento da impedância de surto com a variação das dimensões da torre. Visando esta investigação, a Figura 4.10 mostra as torres lado a lado e suas dimensões.

Figura 4.10: Comparação das dimensões das torres Investigadas (a) no item 4.5.1 e, (b) no item 4.5.3



Fonte: Adaptada de [22] e do Anexo B

A torre em questão possui uma altura equivalente a 0,47 vezes a altura da torre do item 4.5.1. Do mesmo modo, a largura de sua base é equivalente a 0,76 vezes desta mesma dimensão da torre estudada anteriormente.

Os resultados dos métodos analíticos podem ser tomados para a análise do comportamento da impedância de surto com a variação das dimensões da torre. Com base nos gráficos da Figura 4.1, os métodos analíticos sugerem que a impedância de surto diminui com a diminuição da altura da estrutura. Por outro lado, a diminuição da largura da base da torre leva a um aumento da impedância de surto.

Para a análise do comportamento da impedância de surto da torre em questão, são obtidas as relações entre os valores de impedância de surto das duas torres da Figura 4.10.

Tabela 4.7: Comparação entre as impedâncias de surto das torres da Figura 4.10b e da Figura 4.10a

Método	Z da torre da Figura 4.10a	Z da torre da Figura 4.10b	Relação entre Z
Método 1	91,34	67,33	0,74
Método 2	166,22	137,00	0,82
Método 3	205,42	176,21	0,86
Método 4	145,42	116,21	0,80
Método 5	164,09	135,29	0,82
Método 6	184,76	155,75	0,84
Método 7	124,76	95,75	0,77
Método 8	133,29	58,74	0,44
Método Proposto	140,21	88,57	0,63

Os métodos de 1 a 7 resultaram em impedâncias de surto menores na proporção de 0,74 a 0,86 para a torre da Figura 4.10b, em relação aos resultados da torre da Figura 4.10a. Estas proporções são bem maiores que à relação entre as alturas dessas torres, que é de 0,47. Entretanto, a largura da base diminui para a torre da Figura 4.10b, o que levaria a um aumento da impedância de surto, justificando as relações encontradas para os métodos de 1 a 7.

Porém, deve-se analisar não só a largura da base da torre, mas também as variações da seção transversal da torre por toda sua altura, o que caracteriza uma silhueta distinta. O método 8, possui uma forma peculiar para representar a silhueta da torre, tomando-se um equacionamento que leva em conta o raio da base, o raio em uma altura intermediária e o raio no topo da torre, sendo esta representada por dois troncos de cone. Nesse caso, a impedância de surto tomou um valor muito menor: 0,44 vezes a impedância da torre da Figura 4.10a. Nesse caso, a impedância pode ter resultado em um valor muito menor devido aos raios não terem tido grande variações. Assim, a diminuição da altura poderia ter ocasionado esta diminuição acentuada.

Para o método proposto, a relação entre as impedâncias de surto ficou em 0,63. Este valor é maior que aquele obtido no Método 8, mas menor que as relações obtidas nos outros métodos. O método proposto considera a silhueta real da torre, o que implica em uma representação fiel da estrutura. Analisando apenas a parte superior da torre, apesar desta possuir uma largura de 24,6 m, para a vista frontal, quando se considera a vista lateral dessa torre, a largura em seu topo é de apenas 2,2 m (vide Anexo B).

O método 8 considera a maior seção transversal da torre como o raio do modelo de tronco de cone para representação da estrutura. Isso faz com que seja realizada uma grande aproximação na silhueta da torre, o que levaria ao menor valor de impedância de surto obtido pelo método 8.

A diminuição significativa na largura lateral da torre explica a maior impedância de surto obtida pelo método proposto, em relação ao Método 8. Por outro lado, a impedância não cresce tanto, já que a altura desta torre é consideravelmente menor que a altura da torre anterior.

Embora não se tenha valores experimentais, essa análise sugere que o método proposto é uma alternativa interessante, pois ele pode resultar em valores de impedância de surto coerentes para diferentes silhuetas de torres.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo foram analisados os métodos apresentados anteriormente, incluindo a metodologia proposta. Cada técnica apresentou questões interessantes para a determinação do parâmetro sob estudo.

De forma geral, os métodos analíticos trazem grande simplicidade e agilidade na determinação da impedância de surto de torres. Com o conhecimento de poucos parâmetros (altura e raio da forma geométrica que representa a torre), pode-se determinar a impedância de surto da estrutura, o que implica em um processo rápido e barato.

Contudo, algumas considerações são realizadas para facilitar os procedimentos matemáticos de dedução para o desenvolvimento das equações destes métodos. A principal delas é a aproximação da torre a formas geométricas simples (cilindros e cones) de forma a facilitar as integrações de volume quando da aplicação das equações de campos eletromagnéticos. Principalmente para torres com silhuetas discrepantes das formas geométricas consideradas, a impedância de surto calculada pode ser bem diferente do seu real valor.

Já os métodos experimentais podem determinar a impedância de surto através da utilização da torre real e com a reprodução do surto através de geradores de impulso. Caso todos os equipamentos e materiais sejam adequados, e os cabos de medição sejam posicionados de forma a se evitar influências externas, as medições podem então levar a valores de impedância precisos, os quais podem ser tomados como referência.

Entretanto, as práticas em campo possuem alto grau de complexidade, devido principalmente às elevadas alturas que as torres possuem. Além disso, os equipamentos de medição, bem como o gerador de impulso, devem ser deslocados para locais normalmente de difícil acesso. Todas estas características elevam os custos financeiros das medições em torres reais.

Alternativamente, utilizam-se réplicas reduzidas das torres, as quais descaracterizam alguns detalhes físicos da estrutura real, o que pode levar a resultados de impedância de surto menos precisos.

Nestes casos, alguns efeitos podem não ser verificados corretamente, como a variação da impedância de surto, e a velocidade de propagação do surto.

Diferente de outras técnicas, a metodologia proposta não considera a torre com formas geométricas simples, já que os modelos são desenvolvidos com base em suas dimensões reais. Além disso, a solução das equações de campo eletromagnético é dada através da utilização do MEF, em uma aplicação computacional, o que facilita a resolução analítica.

O esforço computacional demandado pela metodologia foi avaliado através da verificação dos tempos de simulação dos modelos. Entretanto, este aspecto pode não ser tão impactante visto que computadores mais robustos podem ser utilizadas para agilizar as simulações. Mesmo assim, foi verificada a possibilidade de simplificação dos modelos, o que diminuiria o esforço computacional. Concluiu-se que tal prática não é interessante devido ao aumento do erro nos resultados. De forma adicional, esta análise evidenciou ainda mais a importância em se representar a torre conforme suas dimensões reais, e que modelos simplificados podem levar a valores de impedância de surto equivocados.

Na avaliação qualitativa, os métodos analíticos mostraram-se muito discrepantes das medições. Para a primeira torre analisada, somente os métodos 4 e 8, resultaram em valores de impedância de surto próximos às medições. Para a segunda torre analisada (item 4.5.2), dentre os métodos analíticos, somente os métodos 7 e 8 resultaram valores próximos às medições.

O que se percebe é que os métodos analíticos podem ser utilizados com eficácia para determinados tipos de silhuetas e dimensões de torres. Entretanto, um estudo sobre qual deve ser o método analítico adequado para determinada estrutura é necessário para se verificar a aplicabilidade de cada um deles para os diferentes tipos de torres existentes.

O método 9 (DFDT), resultou em valores interessantes no topo da torre, com diferenças de 1,56% em relação às medições. Entretanto, quando se analisa a impedância calculada em pontos mais baixos da torre, essa diferença aumenta drasticamente em relação aos valores medidos (até 10,57% maior). O método 10 (MoM), apresentou diferenças consideráveis, para a torre do item 4.5.2, com valores 8,73% menores em relação aos valores medidos.

Por outro lado, o método proposto resultou em valores de impedância de surto interessantes. Para a primeira torre analisada, as diferenças em relação às medições não passaram de 1,5%, não importando o local na estrutura sob investigação, ao contrário do método 9. Para a torre do item 4.5.2, foi obtida uma diferença máxima de 3,21%, considerada ainda uma diferença satisfatória, quando se comparada com outros métodos.

Pelas simulações da terceira torre (item 4.5.3), verificou-se a influência das dimensões da estrutura nos resultados dos métodos. Esta análise possibilitou concluir que a metodologia proposta,

em vista que esta utiliza modelos fidedignos as dimensões reais, pode resultar em valores de impedância de surto coerentes para aquela torre.

Este fato sugere que a metodologia proposta pode ser uma alternativa confiável e robusta para o cálculo da impedância de surto de qualquer tipo de torres, visto que as outras técnicas podem trazer resultados inadequados dependendo da estrutura sob análise.

CAPÍTULO 5 – MODELO ELÉTRICO DE TORRES E FATORES QUE INFLUENCIAM EM SEU DESEMPENHO

5.1 Considerações Iniciais

A identificação e comparação dos resultados de impedância de surto da torre é fundamental para o estudo em questão. Entretanto, verificar seus impactos no sistema elétrico evidencia a importância de se desenvolver um método preciso para determinação da impedância de surto de torres.

Como foi visto no Capítulo 4, para uma mesma torre podem ser determinados valores de impedância de surto muito discrepantes dependendo do método utilizado. A Tabela 4.3, por exemplo, mostrou resultados 45,7% maiores que os valores obtidos através de medições.

Uma diferença na previsão da impedância de surto de 10% resulta em alteração, nessa mesma proporção, da taxa de desligamento de linhas de transmissão [3], [4]. O trabalho apresentado em [5] sugere um cenário ainda pior: para uma diferença de 10% no cálculo da impedância de surto, a taxa de interrupção de fornecimento de energia em uma LT, devido às descargas atmosféricas, pode aumentar em 20%. Este fato enfatiza não só a importância de se calcular a impedância de surto adequadamente, mas também a necessidade de se verificar quanto estas discrepâncias irão impactar na previsão das tensões na torre.

Diferenças no valor da impedância de surto de torres influenciam significativamente a previsão das tensões sentidas na estrutura. Tais tensões, determinadas de forma inadequada podem levar a dimensionamento equivocado dos equipamentos de proteção das linhas de transmissão.

Como forma de se averiguar os impactos na LT, o *software* EMTP foi utilizado para simulação das tensões ao longo da torre, quando estas são submetidas a um surto de corrente. Deste modo, a estrutura será representada através de um modelo elétrico equivalente, tomando-se como referência as impedâncias de surto calculadas no Capítulo 4.

Assim, uma breve apresentação do *software* EMTP será realizada, para melhor entendimento dos procedimentos e modelos adotados. Não serão abordadas todas as potencialidades do *software*, visto seus inúmeros recursos e aplicações, não sendo este o foco da presente tese.

Posteriormente será apresentado um modelo elétrico para representação da torre, incluindo sua impedância de surto bem como as perdas envolvidas na passagem de uma corrente de surto na estrutura. Além disso, fontes de corrente serão conectadas a este modelo com o intuito de reproduzir o surto proveniente de descargas atmosféricas. Tal configuração possibilitará a análise da tensão transitória na estrutura, para posterior avaliação dos impactos da impedância de surto e de outros parâmetros.

5.2 *Software* EMTP/ATP

Originado nos trabalhos de Herman W. Dommel na década de 60, o EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) foi um dos primeiros programas desenvolvidos para simulação computacional de transitórios eletromagnéticos.

O estudo de transitórios eletromagnéticos abrange uma grande quantidade de fenômenos, os quais são provocados por variações súbitas de tensão ou de 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 *software* EMTP/ATP [71] permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas com configurações 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. O *software* traz soluções discretas no tempo, onde são calculados valores 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.

O EMTP/ATP é uma aplicação computacional largamente utilizada em estudos de transitórios eletromagnéticos, e consolidada através de seu emprego em pesquisas que originaram inúmeras contribuições na comunidade científica e na iniciativa privada.

Neste trabalho será utilizado a interface gráfica ATPDraw [72], o qual permite a criação dos arquivos de entrada de dados, com base no circuito a ser simulado, através de modelos gráficos. Cada

componente gráfico permite a inclusão dos parâmetros correspondentes em janelas próprias que ajustam os dados aos formatos de entrada requeridos pelo EMTP/ATP.

5.3 Modelo *Multistory* para Representação de Torres

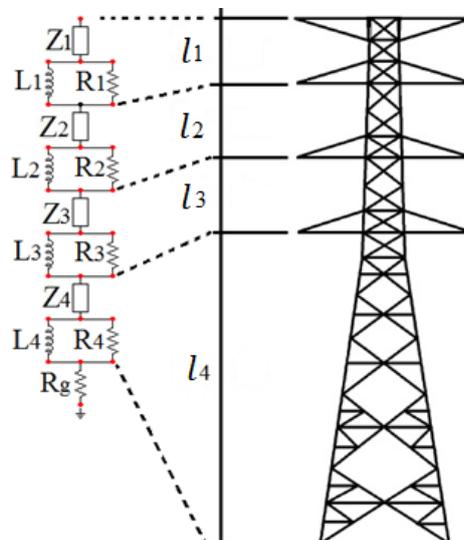
A impedância de surto de torres é um parâmetro fundamental para a análise dos impactos ocorridos nas LTs quando estas são submetidas a surtos de corrente. Entretanto, o cálculo desse parâmetro é somente uma etapa a se estudar, sendo necessária também a análise das tensões originadas nas torres de transmissão devido a incidência de descargas atmosféricas.

A representação elétrica das estruturas é essencial para uma resposta equivalente àquela verificada nos sistemas elétricos reais. Vale ressaltar que a impedância de surto não representa as perdas na torre. De fato, esta representa apenas a interatividade dos campos elétrico e magnético na torre. Para representar as perdas, elementos de dissipação do surto devem ser considerados na modelagem para que sejam obtidos resultados esperados em uma torre de transmissão.

Nesta tese será adotado o modelo *multistory* [14], [24]–[26], [44], [49], [54], [73]. Este modelo é amplamente utilizado em análises dos efeitos da passagem de uma corrente de surto em torres de transmissão. Através do modelo *multistory* implementado no EMTP/ATP, a torre será representada para a simulação das tensões originadas por surtos de corrente que fluem por sua impedância de surto.

Proposto pela primeira vez em [14], este modelo normalmente é aplicado em torres autoportantes com simetria vertical dos condutores. No caso em estudo, utilizando o modelo *multistory*, a torre é dividida em 4 partes, cada uma delas composta por uma LT de parâmetros distribuídos em conjunto com um resistor e um indutor, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Modelo *multistory* para representação elétrica de torres de transmissão



Fonte: Do autor

Os elementos Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 são modelos de LT de parâmetros distribuídos sem perdas, que representam a impedância de surto da torre de acordo com cada trecho. Como dado de entrada destes elementos, além da impedância de surto, também devem ser conhecidas as velocidade de propagação do surto. No caso do método proposto na presente pesquisa, esta velocidade também é determinada.

Como a impedância de surto não representa as perdas na torre, a utilização somente do modelo de LT sem perdas resulta em uma característica da onda de tensão diferente daquela esperada em uma torre real [14].

Assim, em [10], baseando-se em medições realizadas em torres reais através do método direto, foi proposto um coeficiente de atenuação variando entre 0,8 e 0,9, aplicado diretamente no potencial elétrico da torre para representar tal característica. No referido trabalho foi proposta a modificação deste parâmetro a cada passo de integração, de acordo com a inclinação da onda de corrente injetada, ou seja, a atenuação da onda de tensão era modificada conforme a frequência do surto de corrente.

Em [14], este coeficiente de atenuação foi inserido no modelo através da utilização do circuito composto de um resistor em paralelo com um indutor, como ilustra a Figura 5.1. Desta forma, foi possível utilizar um coeficiente de atenuação constante, sendo que a dissipação provocada pela associação paralela dos elementos R-L varia de acordo com as frequências da onda de corrente injetada na torre. O resistor representa a atenuação da onda de tensão, enquanto o indutor em paralelo torna a resistência gradualmente ineficaz à medida que a frequência da onda de corrente diminui.

Vale salientar que estes elementos são utilizados para representar as perdas envolvidas no fenômeno e não estão relacionados com a impedância de surto da torre em si. A interface do modelo *multistory* no ATPDraw, bem como a parametrização de cada elemento são apresentados no Apêndice A. Para determinação dos valores destes elementos foram propostas, em [14], as equações 5.1, 5.2 e 5.3.

$$R_i = \frac{-2l_i Z_i \ln \alpha}{l_1 + l_2 + l_3} \quad 5.1$$

Variando i de 1 a 3, onde:

l_i é o comprimento do trecho sob análise;

Z_i é a impedância de surto do intervalo sob análise;

α é o coeficiente de atenuação.

$$R_4 = -2Z_4 \ln \alpha \quad 5.2$$

$$L_i = \frac{2h}{v_i} R_i \quad 5.3$$

Variando i de 1 a 4, onde:

h é a altura total da torre, e;

v_i é a velocidade de propagação do surto em cada intervalo da torre.

Em [14], foi utilizado um coeficiente de atenuação (α) de 0,8, para uma torre de uma LT com nível de tensão de 500kV. Em [26], considerou-se um coeficiente de atenuação de 0,8944, tendo-se como justificativa o nível de tensão menor da LT (77kV) onde se encontrava a torre estudada. Mas em [24] foram obtidos resultados concisos considerado um coeficiente de atenuação de 0,89 para uma torre que integrava uma LT de 1100kV.

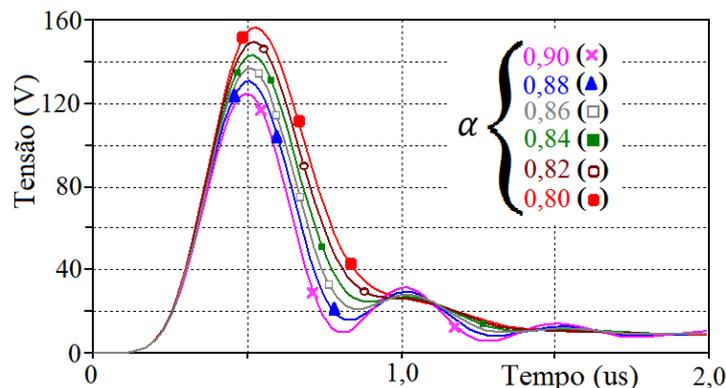
Como não existe um consenso para o valor do coeficiente de atenuação, foram realizadas algumas simulações do modelo no *software* EMTP/ATP, para verificar a influência do coeficiente de atenuação. Para tanto, tomou-se os mesmos parâmetros do modelo *multistory* utilizados em [26], os quais estão expostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros para simulação do modelo *multistory* [26]

Índice (i)	l_i (m)	Z_i (Ω)	v (m/s)	R_i (Ω)	L_i (H)
1	3,50	220,00	$3,0 \times 10^8$	$-143,93 \times \ln(\alpha)$	$R_1 \times 2,51 \times 10^{-7}$
2	3,80	220,00	$3,0 \times 10^8$	$-156,26 \times \ln(\alpha)$	$R_2 \times 2,51 \times 10^{-7}$
3	3,40	220,00	$3,0 \times 10^8$	$-139,81 \times \ln(\alpha)$	$R_3 \times 2,51 \times 10^{-7}$
4	27,00	150,00	$3,0 \times 10^8$	$-300,00 \times \ln(\alpha)$	$R_4 \times 2,51 \times 10^{-7}$

A simulação do modelo *multistory* utilizando-se estes parâmetros e variando-se o coeficiente de atenuação entre 0,8 e 0,9, resultou nos valores de tensão, no topo da torre, ilustrados na Figura 5.2. Para obtenção destes resultados foi considerada uma fonte de surto de corrente do tipo Heidler [74], com amplitude máxima de 1 A e com tempos de crista e de calda de 1,2 μ s e 50 μ s, respectivamente. Adotou-se o valor de 10 ohms para o resistor Rg, o mesmo valor considerado em [26].

Figura 5.2: Tensões no topo da torre representada pelo modelo *multistory*, variando-se α

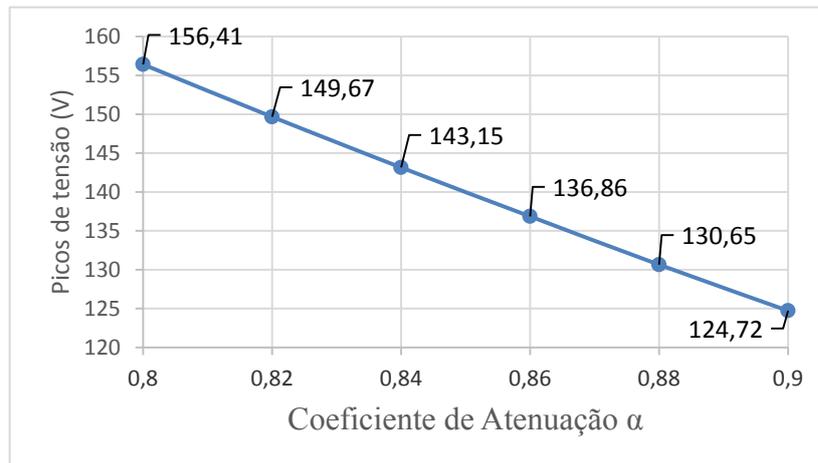


Fonte: Do autor

Na Figura 5.2 foram representadas somente as tensões no topo da torre. As ondas de tensão nos outros pontos da torre podem ser encontradas no Apêndice B.

A modificação do coeficiente de atenuação pode alterar significativamente os picos de tensão. A Figura 5.3 ilustra o gráfico que relaciona o pico de tensão com o coeficiente de atenuação utilizado.

Figura 5.3: Gráfico do pico de tensão no topo da torre e respectivo α .



Fonte: Do autor

Verifica-se uma relação quase linear entre o pico de tensão no topo da torre e o coeficiente de atenuação. Para cada incremento de 0,02 no coeficiente, o valor máximo que a tensão alcançou diminui em média 4,40%. Dentro dos limites recomendados para o coeficiente de atenuação (entre 0,8 e 0,9), o pico de tensão pode variar consideravelmente.

Nota-se que, para menores valores de fator de atenuação, o valor de crista da tensão é maior. Assim, caso queira se adotar valores de tensão que proporcionaram o desenvolvimento de projetos de proteção mais conservadores, deve-se adotar um fator de atenuação de 0,8. Entretanto, atualmente as pesquisas estão convergindo para uma concepção de se otimizar as tecnologias, de forma a evitar o superdimensionamento de sistemas.

Outro ponto a se observar é que os resistores R_i diminuem para valores maiores de α , o que implica em menores cristas de tensões. Como estes resistores representam as perdas na torre, pode-se relacioná-los com a resistividade do material que compõem a estrutura. Assim, quando utiliza-se um material diferente na construção da torre, as perdas na estrutura também são diferentes, e o coeficiente de atenuação a ser utilizado será distinto.

Ainda, a variação da altura da estrutura implicará na variação da resistência elétrica da torre, e conseqüentemente, na variação em suas perdas. Supondo-se que os perfis metálicos mantêm suas

espessuras, maiores alturas implicam em uma maior resistência elétrica, levando a diminuição do α a ser utilizado.

Assim, pode-se dizer que o coeficiente de atenuação é um fator particular de cada estrutura, e deve ser avaliado caso a caso.

Foram realizadas várias simulações com base na torre da Figura 3.12, a fim de se verificar o valor mais adequado para o coeficiente de atenuação. As tensões simuladas foram comparadas com medições, e concluiu-se que um α igual a 0,85 seria o valor mais adequado para tal torre. Os resultados das simulações, para este valor de coeficiente de atenuação, são apresentadas no item a seguir.

5.4 Verificação do Modelo *Multistory*

Com o intuito de se representar a torre adequadamente, o modelo *multistory* foi submetido a comparações com resultados de ondas de tensão medidas em uma torre real.

Para tanto, será tomada a torre da Figura 3.12, a qual possui medições de tensão provenientes da aplicação de uma corrente de surto, as quais são apresentadas em [17]. Os registros das ondas de tensão disponíveis foram obtidos pela medição da referida torre utilizando o arranjo alinhado dos cabos de medição de tensão e corrente, como na Figura 2.11. Assim, serão utilizadas as impedâncias de surto medidas neste arranjo.

A Tabela 5.2 mostra os valores de impedância de surto e velocidade medidos, bem como os valores de R e L calculados, necessários no modelo *multistory*.

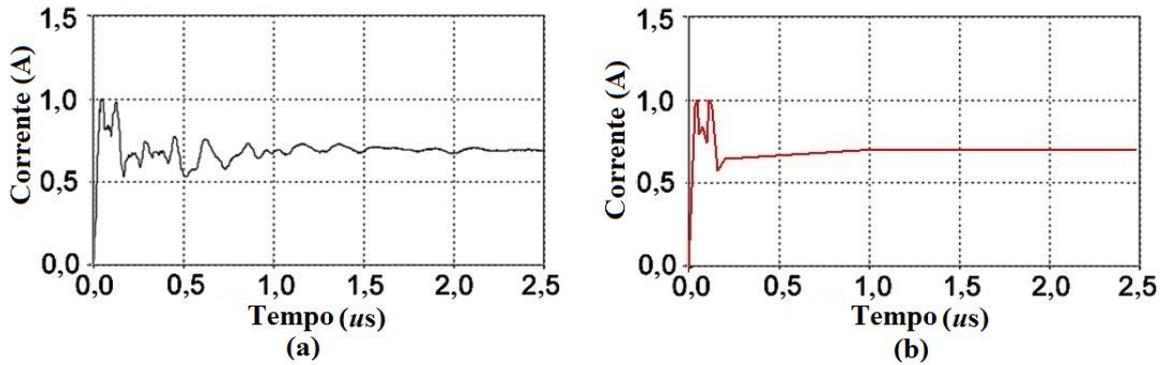
Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no modelo *multistory*

Índice	Altura (m)	Impedância de Surto (Ω) [17]	Velocidade (m/s)	C. Atenuação	Resistência (Ω)	Indutância (μH)
1	10,5	128,00	$2,70 \times 10^8$	0,85	13,04	8,65
2	11,5	120,00	$2,70 \times 10^8$ *		13,39	8,88
3	11,5	106,00	$2,70 \times 10^8$ *		11,83	7,84
4	56,0	95,00	$2,70 \times 10^8$ *		30,88	20,47

*A velocidade foi medida apenas no topo da torre, mas foi considerada constante por toda a estrutura

Para a simulação das tensões na torre é necessário a imposição de uma corrente de surto no modelo *multistory*. Para isso, a onda de corrente de surto medida em [17], foi reproduzida através de uma fonte “ponto a ponto” (TACS DIVEICE 56 [71]) no *software* EMTP/ATP. Esta onda de corrente é ilustrada na Figura 5.4.

Figura 5.4: Onda de corrente de surto (a) medida em [17] e, (b) reproduzida em simulação.



Fonte: Do autor

A fonte de corrente que reproduz esta onda é então conectada ao modelo da torre para simulação das tensões em alguns pontos da estrutura.

Entretanto, antes de proceder com a simulação, a configuração utilizada em [17] foi analisada para se verificar a necessidade da representação de mais algum elemento. As Figuras 2.11 e 2.12 mostram a configuração utilizada e os detalhes das conexões dos equipamentos e cabos.

As capacitâncias dos fios de medição são elementos significativos e influenciam as tensões medidas. Assim, os fios pertencentes ao sistema de medição devem ser representados para uma comparação adequada entre simulações e medições.

Os cabos de referência de tensão estão isolados da torre e não devem ser representados. Já o cabo de injeção de corrente é parte do circuito e deve então ser representado no modelo. Como descrito em [17], este é um cabo de cobre com raio r_w de 0,675 mm, um comprimento l_w de 542 m e suspenso horizontalmente do solo a uma altura h_w de 89,5 m. A capacitância deste cabo pode ser calculada através da equação tradicional para determinação da capacitância de condutores horizontais em relação ao solo [45], [75]:

$$C_w = l_w \frac{\pi \epsilon_0}{\ln(h_w/r_w)} \quad 5.4$$

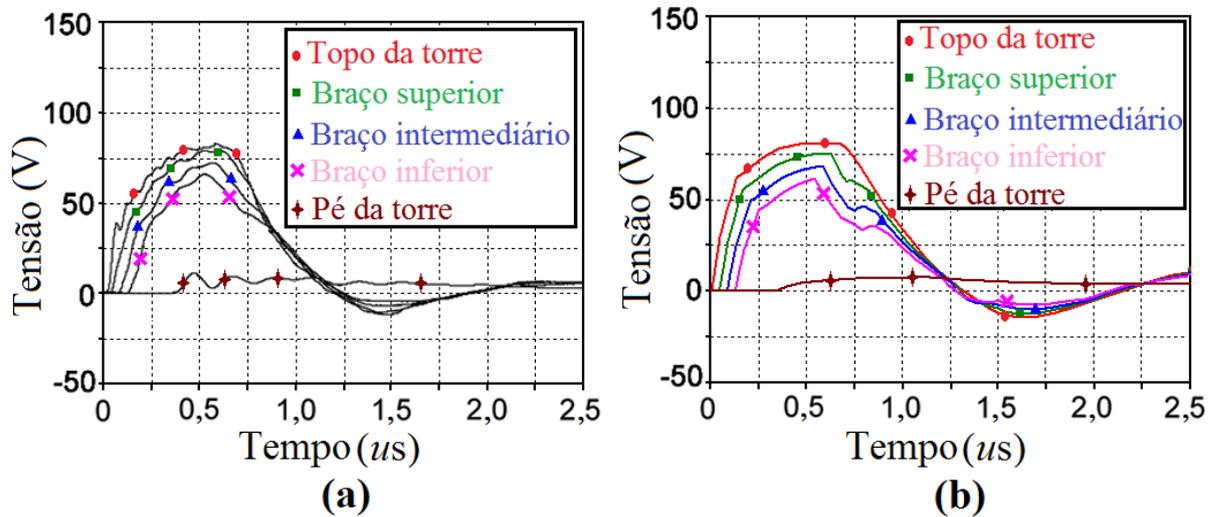
Onde: ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ m/s).

Aplicando esta equação ao cabo em questão, é encontrada uma capacitância no valor de 1,277 nF. Assim, uma capacitância com este valor foi adicionada em paralelo ao modelo *multistory*, para representação do cabo de injeção de corrente.

Deve-se notar que esta simulação considerou a capacitância do cabo de injeção de corrente somente para comparar os resultados com as medições. Em situações ideais de medições, este elemento não existe e não deve ser considerado nas simulações.

A simulação do circuito descrito anteriormente leva a resultados das ondas de tensão no topo, nos braços e no pé da torre, como ilustra a Figura 5.5.

Figura 5.5: Tensões na torre (a) medidas e, (b) simuladas no EMTP/ATP.



Fonte: Adaptado de [17] e do autor

Os valores máximos de tensão obtidos através da simulação foram 81,01 V, 75,52 V, 69,03 V, 61,87 V e 7,46 V verificados no topo da torre, nos braços e no pé da torre, respectivamente. Conforme sugerido na Figura 5.5, o modelo *multistory* resultou em respostas de tensão semelhantes às registradas nas medições.

Pequenas diferenças na forma de onda simulada e medida ocorrem devido à não representação de todas as capacitâncias e indutâncias dos sistemas de medição. Apesar de exercer menor influência, estes parâmetros podem originar pequenas discrepâncias nos resultados.

As oscilações na onda de tensão medida no pé da torre indicam a presença de elementos indutivos e capacitivos neste local. Nas simulações, a característica oscilatória não está presente devido à consideração da impedância de pé de torre como um resistor puro.

Outro ponto a se observar é que a velocidade foi medida somente no topo da torre e considerada constante por toda a estrutura. Esse fato pode explicar divergências nos tempos em que acontecem os picos de tensão.

5.5 Fatores que Influenciam no Desempenho das Torres

Após a verificação do modelo *multistory* para representação elétrica das torres, deve-se agora buscar caminhos para se avaliar quais os parâmetros influenciadores nas tensões das estruturas. Para

tanto, nos próximos itens o modelo *multistory* será parametrizado visando a verificação do impacto de certas grandezas nas simulações das tensões originadas na torre devido a surtos de correntes.

5.5.1 Corrente de Surto

Apesar da corrente de descargas atmosféricas ter sua forma de onda padronizada [45], na prática os surtos podem não seguir este padrão, tomando parâmetros de amplitude e frequência diferenciados. Além disso, em experimentos em campo, é comum a utilização de correntes de surto não convencionais para medição das tensões na torre, como as formas de ondas retangulares [17].

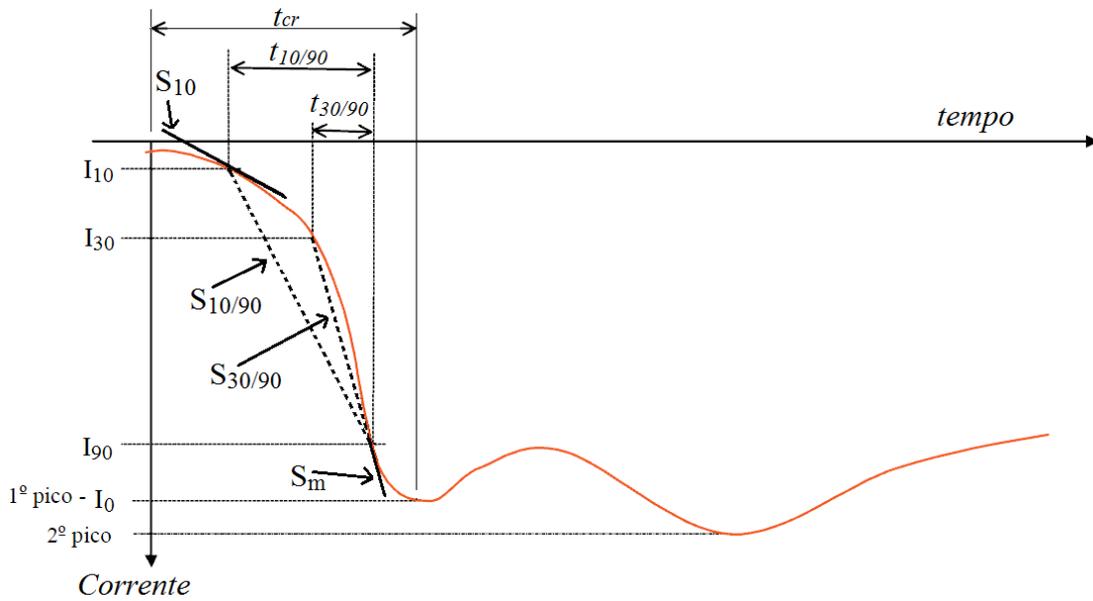
Diferenças nas formas de onda dos surtos podem sensibilizar significativamente os resultados de tensões nas torres. Entretanto, antes de quantificar tal influência, deve-se primeiro estudar a corrente de surto em si.

Para a reprodução das correntes de surtos por modelos de fontes, deve-se inicialmente conhecer os parâmetros que compõem sua forma de onda. A Tabela 5.3 mostra os principais parâmetros da forma de onda padronizada para uma descarga com polaridade negativa, a qual é ilustrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros de uma forma de onda padronizada para descargas com polaridade negativa

Parâmetros	Descrição
I_0	Valor do primeiro pico da onda de corrente
I_{10}	Valor equivalente a 10% de I_0
I_{30}	Valor equivalente a 30% de I_0
I_{90}	Valor equivalente a 90% de I_0
$t_{10/90}$	Intervalo de tempo entre I_{10} e I_{90}
$t_{30/90}$	Intervalo de tempo entre I_{30} e I_{90}
$S_{10/90}$	Taxa de variação média da corrente em $t_{10/90}$ (derivada da corrente no intervalo $t_{10/90}$)
$S_{30/90}$	Taxa de variação média da corrente em $t_{30/90}$ (derivada da corrente no intervalo $t_{30/90}$)
S_{10}	Taxa de variação da corrente em I_{10}
S_m	Taxa máxima de variação da corrente ao longo da frente de onda, tipicamente em I_{90} (derivada da corrente em I_{90})
t_{10} ou t_{cr}	Tempo de crista: Intervalo de tempo entre o início e o momento em que a onda atinge o primeiro pico.
t_{50} ou t_c	Tempo de calda: Intervalo de tempo entre o início da onda e o momento em que ela decai até 50% do segundo valor de pico, também chamado de tempo de calda.

Figura 5.6: Forma de onda típica da corrente de uma descarga com polaridade negativa.



Fonte: Adaptada de [45]

A representação das correntes de descarga em ambiente computacional, normalmente utiliza funções simplificadas, as quais levam em conta somente as principais características das descargas reais, como um aumento inicial rápido, um único valor de pico e decaimento lento após alcançado o valor de pico.

Assim, visando verificar a influência da forma de onda do surto nas tensões da torre, será apresentada a função de Heidler [74], para posterior utilização no modelo *multistory*, através do *software* EMTP/ATP.

5.5.1.1 Modelo de Heidler [74]

O modelo de Heidler consiste na reprodução do surto por uma expressão analítica, desenvolvida através da observação de medições de descargas atmosféricas naturais. A expressão que compõem este modelo pode reproduzir a onda de surto com maior precisão, devido a sua forma côncava na frente de onda e em seu decaimento após atingir seu pico. A função de Heidler é dada pela expressão 5.5.

$$i(t) = \frac{I_0}{F_0} * \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} * e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad 5.5$$

Onde: F_0 é o fator de correção do pico de corrente dado por: $F_0 = e^{\left[\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) * \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right]}$;

n é um número inteiro, maior que 2, que modifica o fator de inclinação da onda;

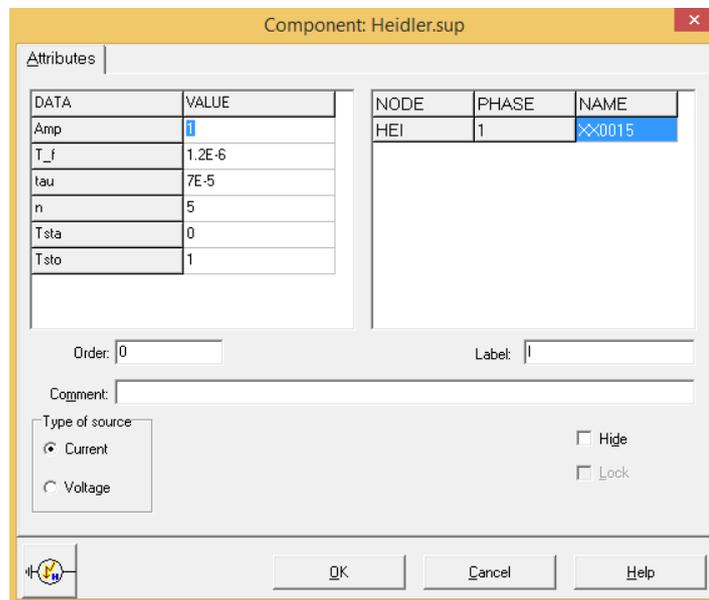
τ_1 e τ_2 são constantes de tempo que determinam o tempo de crista e o tempo de calda da onda.

Através desta expressão, a onda da corrente pode ser representada de forma precisa escolhendo-se valores convenientes para os parâmetros, os quais podem ser ajustados de maneira independente, para se alcançar a forma de onda desejada. Além disso, surtos fora do padrão da corrente de descarga, como as correntes das descargas subsequentes, também podem ser representadas através da combinação de duas ou mais funções de Heidler.

Destaca-se que os parâmetros τ_1 e τ_2 não correspondem ao tempo de crista e ao tempo de calda da onda de surto, mas seus valores os determinam.

A principal contribuição deste modelo foi a eliminação da descontinuidade da primeira derivada de corrente no tempo zero [74]. Além disso, o modelo de fonte para representação deste padrão de surto já está presente no EMTP/ATP, o que facilita sua utilização neste trabalho. A Figura 5.7 mostra a interface do modelo de fonte de Heidler presente no ATPDraw.

Figura 5.7: Janela de interface do modelo de fonte tipo “Heidler”, no ATPDraw



Fonte: Do autor

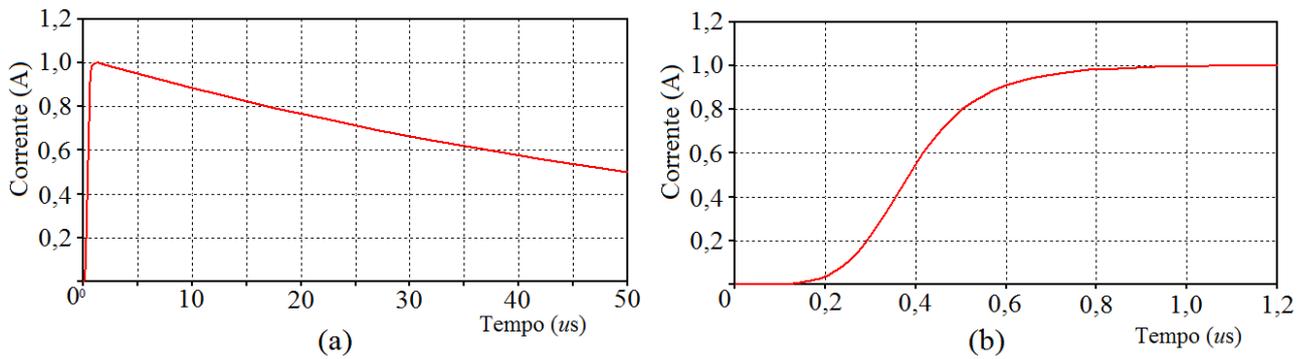
Os parâmetros de entrada do modelo de fonte são:

- **Amp**: é uma constante relacionada ao valor máximo da função, em Amperes ou Volts. Entretanto, não corresponde exatamente ao pico da onda de surto;

- **T_f**: é o intervalo de tempo, em segundos, do início da função até seu valor de pico;
- **tau**: é o intervalo de tempo, em segundos, entre o início da função até o ponto em que seu valor decai até 37% do valor de crista;
- **n**: fator que influencia a taxa de aumento da função. O aumento de n acarreta no aumento da taxa de crescimento.
- **T_{sta}**: Tempo, em segundos, no qual acontece a iniciação da função;
- **T_{sto}**: Tempo, em segundos, no qual a função é finalizada.

A simulação do modelo da fonte em questão, com os parâmetros de entrada apresentados na Figura 5.7, que proporcionam uma onda com tempos de crista e de calda iguais a 1,2 e 50 μ s, e valor de pico de 1 A, como ilustra a Figura 5.8.

Figura 5.8: Ondas de corrente resultantes das simulações: (a) destaque para a calda da onda e, (b) destaque para a frente da onda.



Fonte: Do autor

Parâmetros importantes a se observar são as derivadas da frente de onda, as quais representam as taxas de variação da corrente. Estes valores, referente à onda da Figura 5.8, são apresentados na Tabela 5.4.

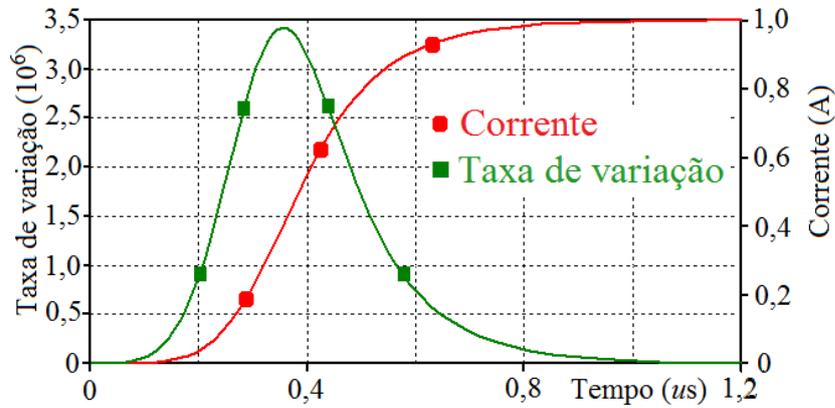
Tabela 5.4: Taxas de variações da onda de corrente para o modelo de Heidler

S_{10/90}	S_{30/90}	S₁₀	S_m
$2,36 \times 10^6$	$2,256 \times 10^6$	$1,856 \times 10^6$	$3,419 \times 10^6$

A taxa de variação S_{10/90} sugere uma reta secante (a qual cruza os pontos I₁₀ e I₉₀) com a maior inclinação em relação à taxa S_{30/90}. A derivada máxima (S_m) acontece no tempo 0,356 μ s, quando a

onda alcança a amplitude de 0,41 A. Uma análise contínua das taxas de variação pode ser realizada com base em seus valores instantâneos. O gráfico da Figura 5.9 ilustram tais valores.

Figura 5.9: Taxa instantânea de variação e respectiva onda de corrente do modelo de Heidler.



Fonte: Do autor

A taxa instantânea de variação da corrente foram obtidas através do cálculo da derivada da onda de corrente a cada passo de integração (foi utilizado um passo de integração de 1×10^{-10} s). Este procedimento foi realizado no próprio *software* EMTP/ATP, através da utilização de modelos da sub-rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) [71].

Verifica-se um crescimento muito acentuado na primeira metade da frente da onda, com a derivada apresentando uma característica parabólica. No próximo item, será verificada a influência dessa característica nas tensões simuladas na torre.

5.5.1.2 Influência da Corrente de Surto nas Torres

A influência da corrente de surto nas tensões da torre pode ser verificada observando-se os resultados da aplicação da corrente de Heidler no modelo da torre.

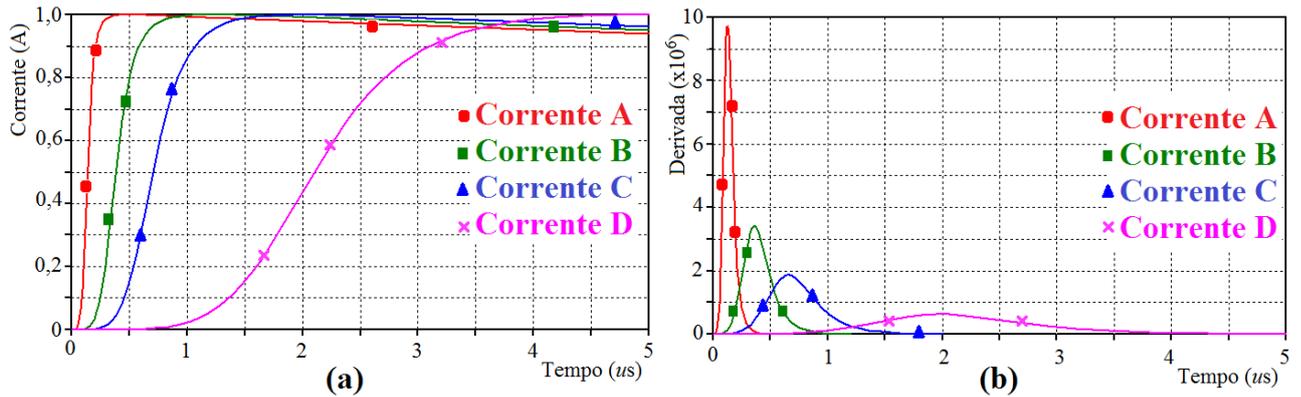
Para tanto, foram realizadas simulações considerando diferentes tempos de crista, forçando-se assim a modificação da inclinação da onda de corrente. Esta análise foi realizada parametrizando-se o modelo de fonte de acordo com os tempos propostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Parâmetros para simulação de correntes de surto

Corrente	t_{cr} (μs)	t_c (μs)	I_0 (A)
A	0,5	50,0	1,0
B	1,2	50,0	1,0
C	2,0	50,0	1,0
D	5,0	50,0	1,0

Através dos tempos propostos na Tabela 5.5, foram obtidas as correntes de surto, pelo modelo de Heidler, conforme ilustra a Figura 5.10. Também foram ilustradas as derivadas instantâneas de cada onda.

Figura 5.10: (a) Ondas de correntes simuladas pelo modelo de Heidler, de acordo com os dados da Tabela 5.2 e, (b) respectivas derivadas

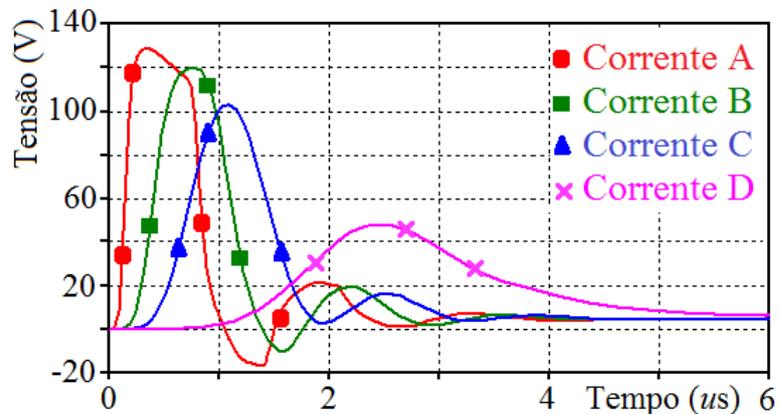


Fonte: Do autor

Pela Figura 5.10b, foram identificados as taxas de variações máximas (S_m), como os valores de $9,738 \times 10^6$, $3,419 \times 10^6$, $1,859 \times 10^6$ e $0,627 \times 10^6$ para as correntes de A a D, respectivamente.

A influência das correntes reproduzidas pelo modelo de Heidler, segundo os tempos da Tabela 5.5, é verificada pelas tensões simuladas no topo da torre, como mostra a Figura 5.11. Para realização dessas simulações, o modelo *multistory* foi parametrizado conforme a Tabela 5.2.

Figura 5.11: Tensões simuladas no topo da torre devido a imposição das correntes de A a D, ilustradas na Figura 5.10a.



Fonte: Do autor

Na Figura 5.11 foram ilustradas apenas as tensões no topo da torre para cada caso. As simulações completas de cada caso, contemplando as ondas de tensão nos braços e no pé da torre podem ser encontradas no Apêndice C.

Verifica-se que o tempo de crista é determinante para se prever a tensão máxima na torre. A Figura 5.11 revelou valores máximos de tensão de 128,91 V, 120,39 V, 105,11 V e 49,74 V, em resposta às correntes de A a D, respectivamente. O tempo de crista está diretamente ligado à taxa de variação da corrente, sendo que para menores tempos de crista, e, conseqüentemente, maiores valores da derivada da onda de surto, maior será a tensão sentida na torre.

Pode-se dizer então que para se obter resultados que refletem a realidade, a onda de surto deve ser fielmente reproduzida, principalmente a inclinação da frente da onda, pois ela influencia significativamente as tensões simuladas na torre.

5.5.2 Impedância de Surto da Torre

Como visto no Capítulo 2, a impedância de surto da torre pode ser determinada por vários métodos, os quais podem resultar em diferenças significativas em relação aos valores oriundos de medições. Estas diferenças podem impactar a previsão das tensões na torre, quando esta é submetida a uma corrente de surto. Dessa forma, deve-se quantificar os impactos originados pela diferença nos resultados de determinação da impedância de surto de torres.

Para tanto, será considerado o modelo *multistory* parametrizado de acordo com os valores de impedância de surto de uma mesma torre, determinados por medições (valores apresentados na Tabela 3.2), pelo método proposto (valores apresentados na Tabela 3.2), e pelos métodos teóricos (valores apresentados na Tabela 4.3).

O surto de corrente tomado nas simulações que seguem é representado pelo modelo de Heidler, com tempo de crista e de calda de 1,2 μ s e 50 μ s, e amplitude de 1 A, o mesmo apresentado na Figura 5.8. Será tomado sempre o mesmo surto no restante das simulações, para que a forma de onda de corrente não comprometam as análises do parâmetro em questão.

A Tabela 5.6 mostra os parâmetros do modelo *multistory* obtidos com o uso da impedância de surto determinada por vários métodos, tomando-se como base a torre da Figura 3.12, a qual já foi utilizada em outras análises nos Capítulos 3 e 4.

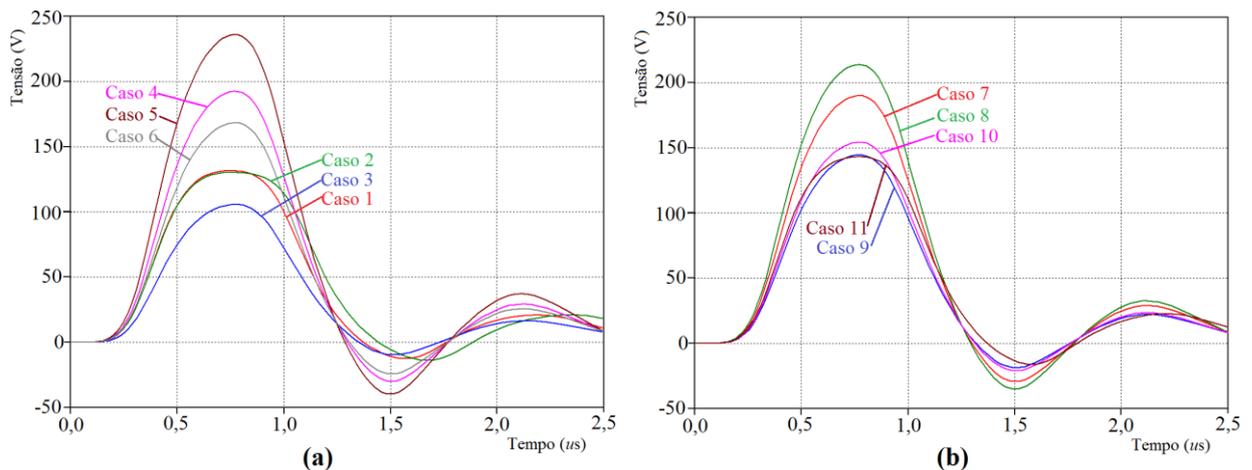
Tabela 5.6: Parâmetros do modelo *multistory* calculados a partir da impedância de surto determinada por vários métodos para a torre da Figura 3.12

Índice	Altura (m)	Impedância de Surto (Ω)	Velocidade (m/s)	C. Atenuação	Resistência (Ω)	Indutância (μH)
Caso 1 - Impedância de surto determinada por medição [17]						
1	10,5	141,00	$2,70 \times 10^8$	0,85	14,36	9,52
2	11,5	133,00	$2,70 \times 10^8$		14,84	9,84
3	11,5	117,00	$2,70 \times 10^8$		13,05	8,65
4	56,0	104,00	$2,70 \times 10^8$		33,80	22,41
Caso 2 - Impedância de surto determinada pelo Método Proposto						
1	10,5	140,21	$2,65 \times 10^8$	0,85	14,28	9,64
2	11,5	131,96	$2,63 \times 10^8$		14,72	10,04
3	11,5	115,93	$2,60 \times 10^8$		12,94	8,91
4	56,0	102,48	$2,39 \times 10^8$		33,31	24,95
Caso 3 - Impedância de surto determinada pelo Método 1						
1	10,5	91,34	$3,00 \times 10^8$	0,85	9,31	5,55
2	11,5	91,34	$3,00 \times 10^8$		10,19	6,08
3	11,5	91,34	$3,00 \times 10^8$		10,19	6,08
4	56,0	91,34	$3,00 \times 10^8$		29,69	17,71
Caso 4 - Impedância de surto determinada pelo Método 2						
1	10,5	166,22	$3,00 \times 10^8$	0,85	16,93	10,10
2	11,5	166,22	$3,00 \times 10^8$		18,55	11,07
3	11,5	166,22	$3,00 \times 10^8$		18,55	11,07
4	56,0	166,22	$3,00 \times 10^8$		54,03	32,24
Caso 5 - Impedância de surto determinada pelo Método 3						
1	10,5	205,42	$3,00 \times 10^8$	0,85	20,93	12,49
2	11,5	205,42	$3,00 \times 10^8$		22,92	13,68
3	11,5	205,42	$3,00 \times 10^8$		22,92	13,68
4	56,0	205,42	$3,00 \times 10^8$		66,77	39,84
Caso 6 - Impedância de surto determinada pelo Método 4						
1	10,5	145,42	$3,00 \times 10^8$	0,85	14,82	8,84
2	11,5	145,42	$3,00 \times 10^8$		16,23	9,68
3	11,5	145,42	$3,00 \times 10^8$		16,23	9,68
4	56,0	145,42	$3,00 \times 10^8$		47,27	28,20
Caso 7 - Impedância de surto determinada pelo Método 5						
1	10,5	164,09	$3,00 \times 10^8$	0,85	16,72	9,97
2	11,5	164,09	$3,00 \times 10^8$		18,31	10,92
3	11,5	164,09	$3,00 \times 10^8$		18,31	10,92
4	56,0	164,09	$3,00 \times 10^8$		53,34	31,82
Caso 8 - Impedância de surto determinada pelo Método 6						
1	10,5	184,76	$3,00 \times 10^8$	0,85	18,82	11,23
2	11,5	184,76	$3,00 \times 10^8$		20,62	12,30
3	11,5	184,76	$3,00 \times 10^8$		20,62	12,30

Índice	Altura (m)	Impedância de Surto (Ω)	Velocidade (m/s)	C. Atenuação	Resistência (Ω)	Indutância (μH)
4	56,0	184,76	$3,00 \times 10^8$		60,05	35,83
Caso 9 - Impedância de surto determinada pelo Método 7						
1	10,5	124,76	$3,00 \times 10^8$	0,85	12,71	7,58
2	11,5	124,76	$3,00 \times 10^8$		13,92	8,31
3	11,5	124,76	$3,00 \times 10^8$		13,92	8,31
4	56,0	124,76	$3,00 \times 10^8$		40,55	24,20
Caso 10 - Impedância de surto determinada pelo Método 8						
1	10,5	133,29	$3,00 \times 10^8$	0,85	13,58	8,10
2	11,5	133,29	$3,00 \times 10^8$		14,87	8,87
3	11,5	133,29	$3,00 \times 10^8$		14,87	8,87
4	56,0	133,29	$3,00 \times 10^8$		43,32	25,85
Caso 11 - Impedância de surto determinada pelo Método 9 [17]						
1	10,5	146,00	$2,70 \times 10^8$	0,85	14,87	9,86
2	11,5	144,00	$2,70 \times 10^8$		16,07	10,65
3	11,5	123,00	$2,70 \times 10^8$		13,72	9,10
4	56,0	115,00	$2,70 \times 10^8$		37,38	24,78

Como pode ser visto, para os métodos analíticos a velocidade e a impedância de surto foram consideradas constantes. A simulação do modelo *multistory*, para cada caso da Tabela 5.6, submetido a mesma corrente de surto resultou nas tensões apresentadas na Figura 5.12.

Figura 5.12: Ondas de tensão no topo da torre obtidas pela simulação do modelo *multistory* para: (a) os casos de 1 a 6 e, (b) os casos de 7 a 11 da Tabela 5.6.



Fonte: Do autor

A Figura 5.12 ilustra apenas as tensões no topo da torre, para cada caso da Tabela 5.6. As tensões nos braços e no pé da torre, em cada caso, são apresentadas no Apêndice D.

Os valores máximos das tensões variam significativamente, como acontece com os valores de impedância de surto. Para uma melhor análise da relação entre o valor da impedância de surto e da tensão na torre, a Tabela 5.7 mostra os valores máximos de tensão simulados e os valores da impedância de surto Z_1 (primeiro estágio do modelo *multistory*), para cada caso.

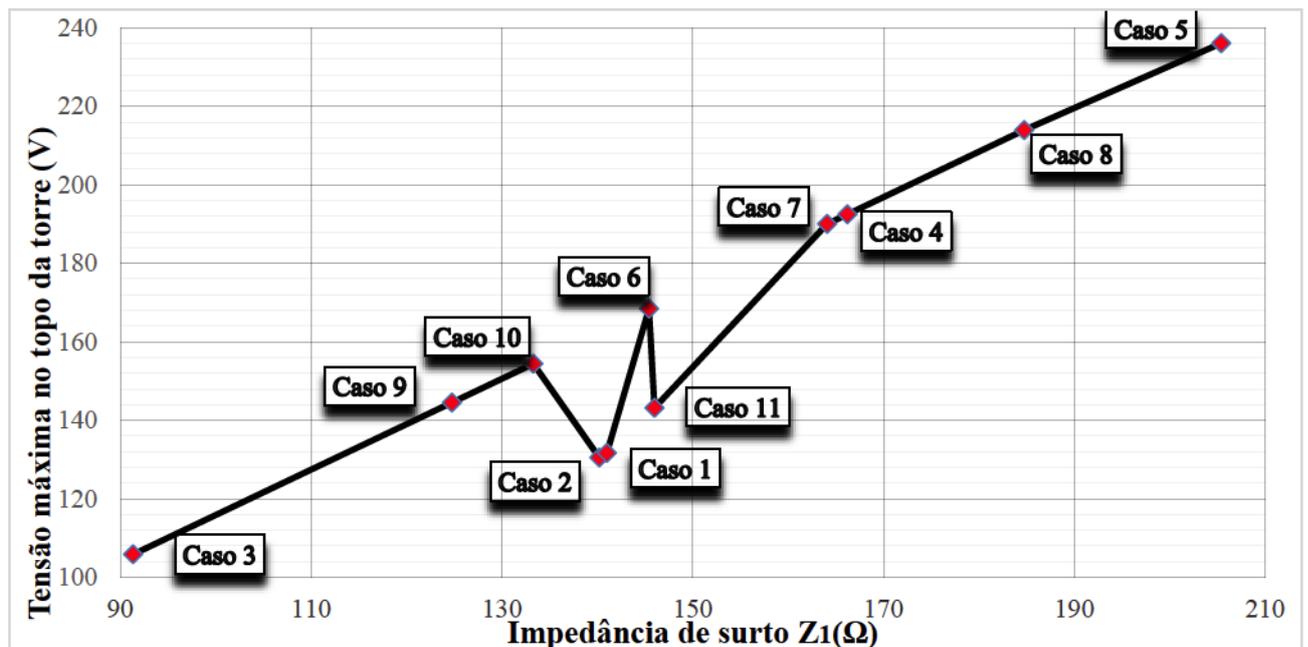
Tabela 5.7: Valores de Z_1 e respectivos picos de tensão no topo da torre em cada caso

Caso	Z_1 (Ω)	$\Delta Z_1\%*$	Pico de Tensão (V)	$\Delta V\%*$
Caso 1	141,00	-	131,67	-
Caso 2	140,21	-0,56%	130,49	-0,90%
Caso 3	91,34	-35,22%	105,84	-19,62%
Caso 4	166,22	17,89%	192,48	46,18%
Caso 5	205,42	45,69%	236,05	79,27%
Caso 6	145,42	3,13%	168,42	27,91%
Caso 7	164,09	16,38%	190,02	44,32%
Caso 8	184,76	31,04%	213,95	62,49%
Caso 9	124,76	-11,52%	144,51	9,75%
Caso 10	133,29	-5,47%	154,38	17,25%
Caso 11	146,00	3,55%	143,19	8,75%

*Diferença percentual em relação aos valores do caso 1.

Nos casos de 3 a 10, percebe-se uma relação de linearidade entre a impedância de surto e valor máximo da tensão. Para uma melhor visualização dessa característica, o gráfico ilustrado na Figura 5.13 mostra as impedâncias de surto Z_1 , e os correspondentes valores máximos de tensão simulados.

Figura 5.13: Gráfico das tensões no topo da torre e as respectivas impedâncias de surto



Fonte: Do autor

A Figura 5.13 evidencia a característica linear entre a variação da impedância de surto e a tensão máxima simulada no topo da torre nos casos analíticos. Entretanto, três casos não seguiram esta característica, quais sejam: o caso 1, 2 e 11. Estes casos possuem a peculiaridade de considerarem velocidades de surto diferentes daquelas utilizadas nos casos de 3 a 10. Além disso os casos 1, 2 e 11 consideram a variação da impedância de surto na torre, o que não ocorre nos casos 3 a 10. Analisando especificamente os casos 6 e 11, estes possuem valores de Z_1 semelhantes ($145,42 \Omega$ e $146,00 \Omega$, respectivamente), mas resultaram em valores máximos de tensão significativamente divergentes.

Todas estas evidências apontam uma necessidade de se investigar qual a característica mais influente nas tensões da torre: a velocidade de propagação do surto ou a variação da impedância na torre. Assim, no item a seguir será analisada a influência desses dois parâmetros.

5.5.3 Velocidade do Surto e Variação da Impedância de Surto na Torre

Como visto nas análises anteriores, a velocidade de propagação do surto e a variação da impedância de surto na torre exercem influência na onda de tensão. Neste item, estes parâmetros serão investigados visando a quantificação dos impactos de cada um deles nas tensões da torre.

Para tanto, continua-se considerando a torre de circuito duplo da Figura 3.12, representada pelo modelo *multistory*. Sua parametrização será realizada com base nos valores de impedância de surto e de velocidade do surto determinados pelo método proposto (Tabela 3.2 e Tabela 3.3, respectivamente). A Tabela 5.8 mostra os parâmetros utilizados no modelo *multistory*.

Tabela 5.8: Valores para parametrização do modelo *multistory*

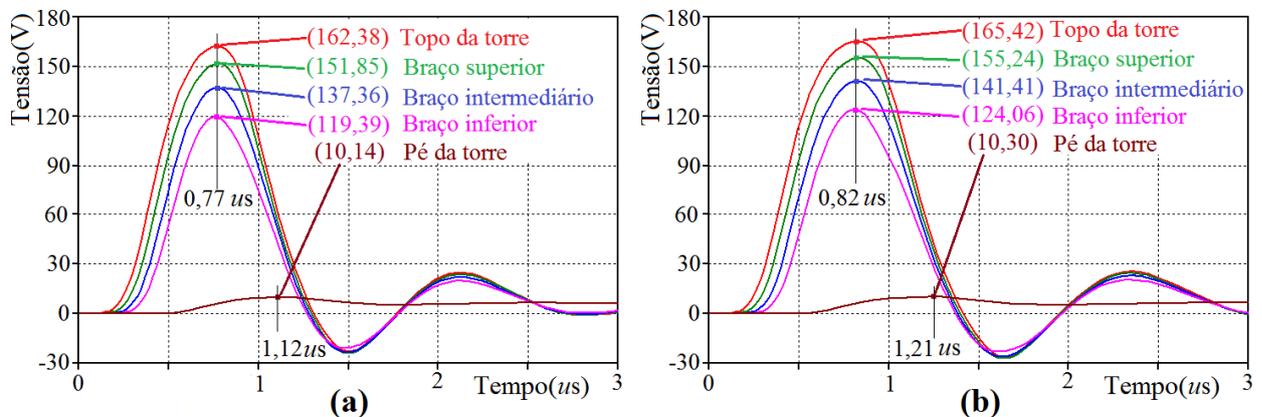
Índice	Altura (m)	Impedância de Surto (Ω)	Velocidade (m/s)	C. Atenuação	Resistência (Ω)	Indutância (μH)
CASO 12 - Velocidade e impedância de surto constantes						
1	10,5	140,21	$3,00 \times 10^8$	0,85	14,28	8,52
2	11,5	140,21	$3,00 \times 10^8$		15,64	9,33
3	11,5	140,21	$3,00 \times 10^8$		15,64	9,33
4	56,0	140,21	$3,00 \times 10^8$		45,57	27,19
CASO 13 - Velocidade e impedância de surto constantes						
1	10,5	140,21	$2,65 \times 10^8$	0,85	14,28	9,64
2	11,5	140,21	$2,65 \times 10^8$		15,64	10,56
3	11,5	140,21	$2,65 \times 10^8$		15,64	10,56
4	56,0	140,21	$2,65 \times 10^8$		45,57	30,76
CASO 14 - Velocidade constante e impedância de surto variando						
1	10,5	140,21	$2,65 \times 10^8$	0,85	14,28	9,64
2	11,5	131,96	$2,65 \times 10^8$		14,72	9,94
3	11,5	115,93	$2,65 \times 10^8$		12,94	8,73
4	56,0	102,48	$2,65 \times 10^8$		33,31	22,48

Índice	Altura (m)	Impedância de Surto (Ω)	Velocidade (m/s)	C. Atenuação	Resistência (Ω)	Indutância (μH)
CASO 15 - Velocidade variando e impedância de surto constante						
1	10,5	140,21	$2,65 \times 10^8$	0,85	14,28	9,64
2	11,5	140,21	$2,63 \times 10^8$		15,64	10,66
3	11,5	140,21	$2,60 \times 10^8$		15,64	10,78
4	56,0	140,21	$2,39 \times 10^8$		45,57	34,14
CASO 16 - Variação da velocidade e da impedância de surto						
1	10,5	140,21	$2,65 \times 10^8$	0,85	14,28	9,64
2	11,5	131,96	$2,63 \times 10^8$		14,72	10,04
3	11,5	115,93	$2,60 \times 10^8$		12,94	8,91
4	56,0	102,48	$2,39 \times 10^8$		33,31	24,95

A comparação entre os resultados dos casos 12 e 13 possibilita a averiguação da influência das diferenças no cálculo da velocidade de propagação do surto, sem que haja sua variação na torre. Já a comparação dos casos 13 e 15, possibilita se verificar os impactos de se considerar a velocidade do surto constante ou variável na torre. A comparação entre os casos 13 e 14 evidencia a influência da variação da impedância de surto na torre. E finalmente, a comparação do caso 16 com os anteriores, permite uma análise da influência de se considerar tanto a impedância de surto, quanto a velocidade de surto, variantes na torre.

Como no item anterior, foi conectada ao modelo uma fonte de corrente de surto tipo Heidler, com tempo de crista e de calda de $1,2 \mu\text{s}$ e $50 \mu\text{s}$, e valor de pico de 1A (vide Figura 5.8). A simulação dos casos 12 e 13 da Tabela 5.8 resultaram nos gráficos ilustrados pela Figura 5.14. Estes gráficos ainda revelam os valores de pico de tensão e o momento em que eles acontecem.

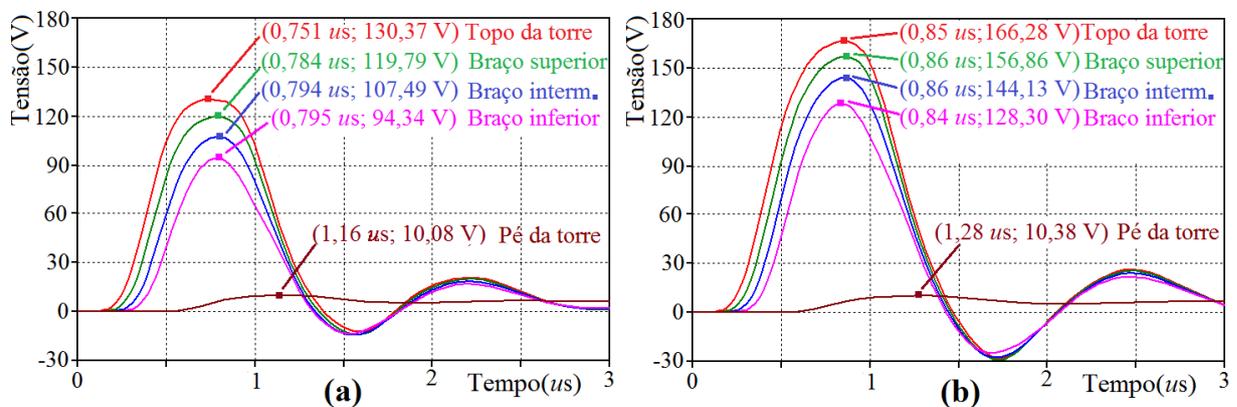
Figura 5.14: Ondas de tensão simuladas no modelo *multistory* para (a) o caso 12 e, (b) o caso 13.



Fonte: Do autor

A diferença entre os casos 12 e 13 é unicamente a velocidade do surto. Comparando-se as tensões máximas, o caso 12 resultou valores menores em média 2,75% que o caso 13. Analisando-se as tensões em cada caso, a medida que o surto se propaga para pontos mais baixos, nota-se que os valores diminuem em uma taxa maior para o caso 12. Assim, pode-se dizer que quanto maior a velocidade considerada, maior é a atenuação da tensão, enquanto o surto se propaga. Outro detalhe é que para valores constante de impedância e velocidade, os picos ocorrem no mesmo instante, independentemente da posição sob análise. Ainda, tais picos ocorrem em menores tempos para maiores velocidades, como acontece no caso 12. A Figura 5.15 mostra os resultados das simulações dos casos 14 e 15.

Figura 5.15: Ondas de tensão simuladas no modelo *multistory* para (a) o caso 14 e, (b) o caso 15.



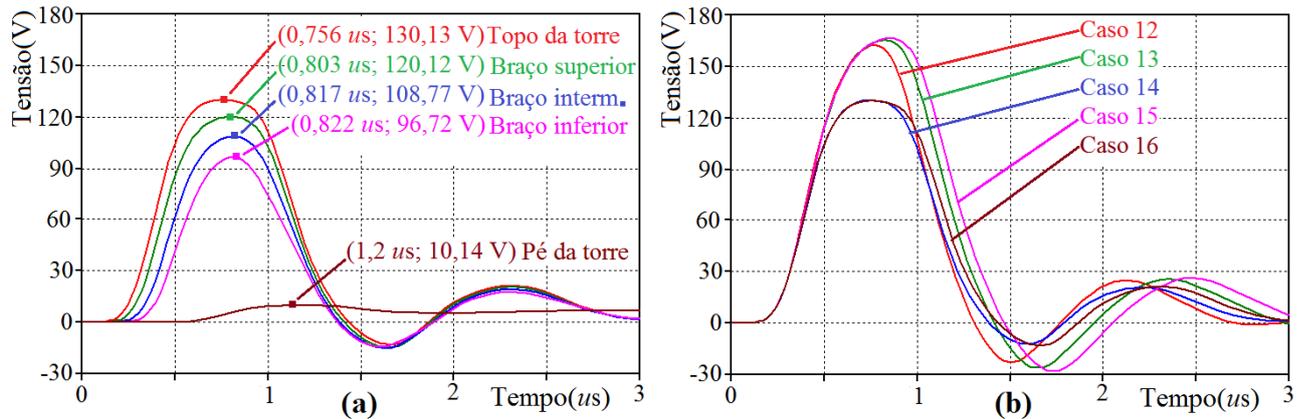
Fonte: Do autor

Os casos 14 e 15 resultaram picos de tensão muito distintos. Nota-se que quando se considera a variação da impedância de surto, os picos de tensão diminuem de maneira significativa, enquanto que quando a variação da velocidade é considerada, os picos de tensão aumentam levemente.

Analisando-se os casos 13 e 15 (Figura 5.14a e Figura 5.15b, respectivamente), observa-se que a variação da velocidade de surto provoca um aumento leve nos picos de tensões – em média 1,7%, do caso 15 em relação ao caso 13.

Comparando-se os resultados do caso 13 (Figura 5.14a) com os do caso 14 (Figura 5.15a), verifica-se que a variação da impedância de surto é a característica que mais influência nos picos de tensão na torre. Quando se considera a variação da impedância de surto (caso 14), os picos de tensão tomaram valores em média 23% menores que no caso que ela é considerada constante (caso 13). Além disso, os tempos nos quais estes picos acontecem, foram menores para o caso 14. A Figura 5.16 mostra os resultados da simulação do caso 16.

Figura 5.16: Ondas de tensão simuladas no modelo *multistory* para (a) o caso 16 e, (b) para todos os casos (somente topo da torre)



Fonte: Do autor

Comparando-se o caso 14 com o caso 16, verifica-se que os valores de pico são praticamente os mesmos. Este fato corrobora com as análises anteriores, de que a variação da velocidade do surto não impacta os valores máximos das tensões. Comparando-se os casos 15 e 16, esta conclusão é comprovada, já que a variação da impedância de surto resultou em uma diminuição, em média, de 23% nas tensões da torre.

Percebe-se então que a variação somente da velocidade do surto não influencia significativamente os picos de tensão da torre. Entretanto, sua variação modifica a forma de onda da tensão, principalmente após ela atingir seu valor máximo, alterando sua taxa de variação no tempo.

5.6 Considerações Finais

Este capítulo abordou a representação da torre por um modelo elétrico, bem como a avaliação dos parâmetros que influenciam os resultados de tensões originadas pela imposição de uma corrente de surto.

A possibilidade de se prever a tensão de solicitação das cadeias de isoladores em torres de transmissão é de grande importância para melhoria de projetos de coordenação de isolamento, resultando assim em melhores índices de desempenho de linhas de transmissão frente a transitórios eletromagnéticos.

A representação elétrica das estruturas é decisiva para a simulação de condições equivalentes às reais, e assim, para a previsão correta da resposta de torres submetidas a surtos de corrente. Com

esse intuito, a torre foi representada pelo modelo *multistory*, que considera a impedância de surto e os elementos de dissipação, estes representando as perdas na estrutura metálica.

O modelo *multistory* corrobora com a metodologia proposta, ao passo que possibilita a representação da variação da impedância de surto na torre. Além disso, tal modelo considera não só a impedância de surto da torre, mas também a velocidade de propagação do surto, e sua variação, através da utilização do modelo de linhas de transmissão de parâmetros distribuídos, presente no EMTP/ATP.

Outra característica importante presente em uma torre real submetida a uma corrente de surto são as perdas na estrutura. Elementos de dissipação presentes no modelo *multistory* representam tal característica, inclusive a variação da atenuação da onda de tensão devido a frequência da corrente de surto, visando a previsão dos efeitos reais originados na torre.

Apesar de ser utilizado em várias pesquisas desde 1991[14], o modelo *multistory* foi aqui avaliado com o intuito de se verificar sua aplicação na representação de torres de transmissão. As tensões simuladas foram comparadas com àquelas registradas nas medições, resultando em formas de ondas e amplitudes semelhantes nos dois casos, evidenciando que o modelo utilizado é uma representação adequada de torres de transmissão.

Após a avaliação do modelo *multistory*, este foi utilizado para verificação das influências de certos parâmetros nas tensões originadas na torre devido a um corrente de surto. Entre eles, foram analisados os impactos da variação da corrente de surto, da impedância de surto e da velocidade de propagação do surto na torre.

Primeiramente analisou-se os efeitos da variação da corrente de surto nas tensões da torre. O tempo de crista apresentou uma influência importante nos valores de tensão. Concluiu-se que o tempo de crista afetou com maior significância a tensão porque ele está intimamente ligado à taxa de crescimento da onda de corrente, e que este parâmetro é o que perturba a tensão na torre. Assim, formas de ondas com frentes mais íngremes e tempos de crista menores, implicam em uma taxa de variação de corrente maior, e conseqüentemente, em uma elevada derivada de corrente no tempo (di/dt).

A influência da impedância de surto foi verificada com base nos resultados da aplicação dos diversos métodos abordados em uma mesma torre. Assim, foram propostos 11 casos, cada um deles apresentando diferentes parâmetros para o modelo *multistory*, de acordo com o valor de impedância determinado em cada método.

Entre os casos que tomaram impedâncias oriundas dos métodos analíticos, foi observada uma relação linear entre o valor de impedância de surto e o valor máximo de tensão simulado. Nestes

casos, tanto impedância de surto quanto a velocidade do surto foram considerados constantes (métodos analíticos), e a relação entre impedância e a tensão máxima no topo da torre resultou no valor de 1,15.

Então, pode-se dizer que quando se considera tais parâmetros constantes, a tensão máxima no topo da torre pode ser estimada multiplicando a impedância calculada por um fator 1,15. Este procedimento pode agilizar a previsão de tensões nas torres, sem a necessidade do desenvolvimento de modelos e realização de simulações. Entretanto, este procedimento poderia amplificar o erro contido no cálculo da impedância de surto, levando a valores de tensão com grande imprecisão. Além disso, sabe-se que tanto impedância quanto velocidade de surto são variáveis na torre, e os efeitos desta variação também foram analisados.

Os casos 1 e 11 consideraram velocidades de surto constantes na torre, mas tomaram valores variáveis para a impedância de surto. Nestes casos, as tensões máximas no topo da torre assumiram proporções significativamente diferentes em relação ao restante dos métodos. O caso 11 se difere do caso 1 por apresentar impedâncias de surto em média 6,88% maiores. Entretanto, a tensão simulada foi maior de 8,75% no topo da torre, no caso 11.

O caso 1 e o caso 2 consideram impedâncias de surto semelhantes, porém o caso 2 toma a variação da velocidade. Apesar dessa divergência, os valores máximos de tensões tomaram valores próximos. Pode-se dizer, então, que a variação da velocidade afeta sutilmente os valores máximos que as tensões atingem.

A influência da velocidade de surto foi melhor analisada no item 5.5.3, onde também foi estudado o impacto da variação da impedância de surto. Analisando os casos em que foram tomadas velocidades constantes, mas diferentes entre si (casos 12 e 13 - Figura 5.14), concluiu-se que quanto maior a velocidade considerada, maior é a atenuação da tensão, enquanto o surto se propaga na estrutura.

Notou-se também que quando se considera a velocidade do surto variável (comparação entre casos 13 e 15 - Figura 5.14a e Figura 5.15b), existe um aumento leve nos valores máximos das tensões – em média 1,7% para os casos analisados. Já a forma de onda da tensão foi mais afetada, de maneira que para velocidades variáveis, a tensão possui um atraso em seu decaimento após atingir seu valor máximo, como foi visto na Figura 5.16b (casos 13 e 15).

Ao contrário, a variação da impedância de surto apresentou grande influência nos valores máximos das tensões. Comparando-se os casos 13, 14 e 16 (Figura 5.14b, Figura 5.15a e Figura 5.16a, respectivamente), a variação da impedância no caso 14, provoca uma diminuição de 23% em média nos valores máximos de tensão, em relação a estes valores do caso 13 (impedância constante). Já o

caso 16, que considera tanto velocidade quanto impedâncias variáveis, a diminuição é em média de 22,3%, se comparado com o caso 13.

Tais resultados levam a conclusão de pouca influência da velocidade do surto nos valores máximos da tensão. Mas a taxa de variação da onda de tensão é afetada, modificando assim os resultados. Para estudos detalhados do desempenho da torre, a velocidade do surto bem como sua variação na torre devem ser determinados corretamente para se prever corretamente as ondas de tensão na torre.

Por outro lado, a variação da impedância de surto na estrutura é determinante na simulação das tensões da torre. Apesar de que a maioria dos métodos não considerarem esta característica, a variação da velocidade e da impedância de surto são importantes na determinação dos efeitos sentidos na torre, e devem ser levados em conta.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1 Considerações Gerais

A presente tese partiu da ideia principal de se estimar, com precisão, a impedância de surto de torres de transmissão, para qualquer tipo de estrutura. Este objetivo central foi estipulado tendo em mente o grande motivo de falhas nos sistemas elétricos: as descargas atmosféricas.

A passagem da corrente de descarga pela impedância de surto da torre origina tensões na estrutura, as quais, se previstas inadequadamente, podem prejudicar os projetos de proteção dos sistemas elétricos.

Em síntese, valores de impedância de surto imprecisos podem levar a uma proteção ineficaz contra as descargas atmosféricas, prejudicando o desempenho das linhas de transmissão frente a tal fenômeno. Neste contexto, a impedância de surto de torres possui grande importância para previsão dos efeitos das descargas atmosféricas nos sistemas de transmissão.

No Capítulo 2 apresentou-se o conceito e a representação da impedância de surto. Verificou-se que adotando o modelo de LTs para representação da torre, sua impedância de surto pode ser determinada pelo cálculo da impedância característica da LT que a representa. Dessa forma, pode-se utilizar a metodologia clássica de LTs, alicerçada na teoria de campos eletromagnéticos, para determinação da impedância de surto de torres.

Posteriormente, foram abordadas as principais metodologias presentes na literatura para determinação da impedância de surto das torres. Como visto, existem vários métodos, os quais propõem o cálculo da impedância de surto através de equacionamentos analíticos, métodos numéricos ou por medições. Tais técnicas foram abordadas naquele capítulo de forma expositiva, com finalidade de elucidar o leitor sobre as diferentes formas de determinação do parâmetro estudado.

Foram apresentados ao todo 12 métodos presentes na literatura. Uma breve descrição de cada método agrega uma importância bibliográfica para esta tese, que reuni então as principais técnicas para determinação da impedância de surto de torres, caracterizando este trabalho como uma referência rápida para o tema em questão.

No Capítulo 3, a metodologia proposta pelo autor teve sua abordagem dividida em três etapas: modelagem da torre em 3D, aplicação do MEF e cálculo da impedância de surto.

A modelagem da torre baseou-se em um procedimento que envolveu o desenvolvimento de desenhos modulares em 3D, de maneira a formar diferentes estruturas com o agrupamento adequado.

Tal procedimento é possível graças à padronização dos projetos em famílias de torres, visando a economia na construção das LTs. No contexto deste trabalho, o conceito de famílias de torres se mostrou interessante, pois ele proporciona maior agilidade no desenvolvimento de vários modelos de torres de uma mesma família.

Na definição das fronteiras do domínio, quando da aplicação do MEF, foi realizada uma análise das dimensões dos limites externos de forma a se obter um padrão. Foi constatado que as dimensões recomendadas pela bibliografia, de 5 vezes a altura da torre, são muito conservadoras e levam a um esforço computacional adicional desnecessário. A análise realizada nesta tese culminou na padronização de fronteiras menores para o estudo em torres de transmissão, resultando em uma otimização das simulações.

Outro aspecto interessante que pôde ser analisado, é a velocidade de propagação do surto na torre. Os métodos teóricos presentes na bibliografia consideram tal velocidade igual à velocidade da luz. Entretanto, medições apontam uma velocidade menor, em torno de 70 a 90% da velocidade da luz [10]. Na aplicação da metodologia proposta, os valores de indutância e capacitância da torre são determinados, possibilitando o cálculo da velocidade de propagação do surto. Os resultados da aplicação do método proposto resultou em uma velocidade de surto de 88,41% no topo da torre e decaiu até 79,66% na altura do braço inferior da torre (porcentagens em relação à velocidade da luz), valores entre os resultados de medições.

Pelo uso do método proposto também pode ser verificada a variação da impedância de surto na torre, característica esta que possibilitou uma melhor análise do comportamento das tensões em pontos intermediários da torre, e não somente em sua base ou em seu topo.

Tendo em vista a validação da metodologia proposta, uma torre real, apresentada em [17] e também utilizando-se informações do projeto apresentado no Anexo A, foi utilizada para obtenção da impedância de surto. Os resultados obtidos foram comparados a medições, constatando-se diferenças abaixo de 0,529%. Estes resultados sugerem que a metodologia proposta é confiável e pode ser uma opção para a determinação da impedância de surto de torres.

O Capítulo 4 apresentou uma análise crítica dos métodos apresentados nos capítulos anteriores, bem como a aplicação deles em algumas torres. Estas análises possibilitaram a identificação dos pontos positivos e das deficiências dos métodos apresentados. Assim, com base na análise exposta, pode-se escolher o método mais adequado de acordo com a necessidade do usuário, seja por maior praticidade, rapidez ou precisão, ou ainda pela disponibilidade das informações sobre as dimensões da torre.

Desta análise concluiu-se que os métodos analíticos possuem grande praticidade, pois necessitam apenas da altura e raio do modelo que representa a torre para calcular sua impedância de

surto. Entretanto, tais métodos podem ser imprecisos devido às considerações realizadas em seu desenvolvimento.

Os métodos numéricos são alternativas que proporcionam maior precisão nos resultados. Entretanto, tais métodos normalmente são mais complexos e exigem um maior conhecimento dos usuários. Além disso, tais técnicas necessitam de mais detalhes dimensionais das torres para desenvolvimento dos modelos.

Os métodos experimentais se mostraram ser alternativas dispendiosas, se caracterizando em um processo inviável, visto seu alto nível de complexidade de execução. As dimensões elevadas da torre dificultam o posicionamento dos equipamentos bem como o lançamento dos cabos de medição. E ainda existe a dificuldade de deslocamento dos equipamento e materiais para locais que podem ser de difícil acesso.

A metodologia proposta mostrou-se versátil, contornando possíveis deficiências. Uma delas seria a criação dos modelos 3D que, como foi visto no Capítulo 3, são desenvolvidos através de módulos, facilitando a implementação de várias torres rapidamente. Além disso, o esforço computacional poderia ser um parâmetro importante, aumentando o tempo de simulação dos modelos. Entretanto, uma avaliação da utilização de modelos menos detalhados foi realizada com o intuito de se averiguar o ganho no tempo de simulação em relação à perda na precisão dos resultados. Assim, existe a possibilidade de se diminuir o esforço computacional, obtendo-se resultados com menor precisão. Além disso, computadores mais robustos podem ser utilizados visando a diminuição nos tempos de simulação, tornando este fator menos importante.

Na avaliação qualitativa, os métodos analíticos, em geral, resultaram em valores com grande diferença em relação às medições. Somente os métodos 7 e 8 obtiveram boa precisão, com valores de impedância de surto com diferenças menores que 5% em relação às medições.

O método 9 (DFDT), resultou em valores de impedância de surto com diferenças de até 11,3% em relação às medições e o método 10 (MoM), apresentou uma diferença de 8,73%, as quais são consideradas diferenças significativas.

Independentemente da posição sob análise na torre, o método proposto resultou em valores de impedância de surto com grande precisão, com diferenças menores que 1,5% em relação às medições. Este fato habilita o método proposto como uma alternativa confiável para o cálculo da impedância de surto de torres.

O Capítulo 5 apresentou os efeitos originados na torre devido a uma corrente de descarga. Assim, foi possível verificar os impactos da precisão no cálculo da impedância de surto, além da influência de outros parâmetros nas tensões originadas na torre.

Para tanto, optou-se por utilizar o *software* EMTP/ATP para modelagem da torre e posterior simulação de fenômenos transitórios. Embora a impedância de surto da torre já tenha sido determinada no Capítulo 4, ela não representa as perdas na estrutura, as quais devem ser consideradas para que a simulação de transitórios resulte em uma resposta fidedigna. Com esse intuito, o modelo *multistory* foi tomado para representação da torre, o qual considera os valores de velocidade e de impedância de surto calculados no Capítulo 4, bem como os elementos de dissipação envolvidos no fenômeno.

Em um primeiro momento, o modelo *multistory* foi avaliado para verificação de sua robustez diante do estudo em questão. Para isso, os resultados da simulação de uma torre representada por este modelo foram comparados às tensões medidas na mesma torre, constatando-se uma semelhança entre os valores, o que comprovou a aplicabilidade do modelo *multistory* a este estudo.

Para a simulação das tensões transitórias na torre, foi necessário a imposição de uma corrente de surto. A modelagem desta corrente foi baseada na forma de onda resultante do modelo de Heidler. A partir aplicação desta forma de onda, pôde ser verificado a influência da corrente nas tensões da torre.

Aprofundando esta análise, também foram verificados os impactos dos parâmetros da forma de onda da corrente de surto. Constatou-se que o tempo de crista (t_{cr}) influencia significativamente as tensões originadas. Foi averiguado que para a corrente com $t_{cr} = 0,5 \mu s$, obteve-se um valor de tensão máxima 2,68 vezes maior, para quando se utiliza uma corrente com $t_{cr} = 5,0 \mu s$.

Este fato comprova uma influência expressiva da taxa de crescimento da frente da corrente de surto nos valores máximos que as tensões alcançam. Assim conclui-se que, para se prever resultados fidedignos, a corrente de surto deve ser representada fielmente, principalmente seu perfil de subida.

A verificação da influência da impedância de surto na torre baseou-se nos valores determinados pelos diferentes métodos. Com base no gráfico da Figura 5.13, concluiu-se que as diferenças entre as impedâncias dos métodos analíticos provocam uma variação diretamente proporcional nas tensões originadas na torre. Isto se deve ao fato de que, para tais métodos, tanto a velocidade do surto quanto a impedância de surto são consideradas constantes na torre.

Entretanto, nas simulações dos modelos parametrizados com valores diferentes de velocidades, e com valores de impedância de surto variáveis na torre, os resultados não seguiram o padrão verificado nas técnicas analíticas.

Estes resultados evidenciaram a necessidade de se analisar melhor o impacto da velocidade do surto e da variação da impedância de surto nas tensões da torre. Assim, novas simulações destacaram que a utilização de diferentes velocidades de surto (ainda constantes na torre) não alteram significativamente os valores máximos que as tensões podem alcançar.

A variação na torre da velocidade do surto revelou um aumento leve (em média 1,7%) nos valores máximos das tensões. Já a forma de onda da tensão foi mais afetada, de maneira que para velocidades variáveis, a tensão possui um atraso em seu decaimento após atingir seu valor máximo. Assim, a variação da velocidade é uma característica que deve ser representada para que sejam simuladas corretamente as atenuações nas ondas de tensões da torre.

Já a variação da impedância de surto mostrou um significativo impacto nos valores máximos das tensões. Quando se considera esta característica, as tensões alcançaram valores até 23% menores, em relação a casos que tomam impedâncias constantes na torre. Dessa forma, a variação da impedância de surto é uma característica determinante na previsão das tensões na torre, e deve ser levada em conta.

Apesar de vários métodos não considerarem a variação da impedância de surto na torre [6]–[8], [10], [11], está é uma característica que, pelos resultados obtidos nesta tese, influencia as tensões originadas na torre devido a uma corrente de descarga, sendo então uma característica fundamental para o estudo da impedância de surto de torres de transmissão. Caso ela não seja representada, os valores máximos de tensão calculados podem carregar grande imprecisão, levando a erros nos projetos de proteção das LTs.

6.2 Contribuições da Tese

No contexto apresentado, este trabalho promove contribuições nas seguintes particularidades:

a) Reunião das principais metodologias teóricas existentes para referência rápida

No presente trabalho foram reunidas as principais técnicas para cálculo da impedância de surto de torres de transmissão. Uma breve apresentação de cada técnica foi exposta para rápida referência. Assim, o leitor é elucidado com as principais características de cada método e será capaz de optar por aquele que melhor o atende.

b) Aperfeiçoamento da modelagem em 3D de torres de transmissão

Em trabalhos existentes [39], [40], [43] foram desenvolvidos modelos em 3D de torres de transmissão. Entretanto, vários detalhes construtivos, como as treliças e as dimensões das chapas metálicas, são desconsiderados. No presente trabalho são desenvolvidos modelos 3D, baseados em desenhos “Como Construído” (*As Built*) de torres reais, implicando em uma melhora do nível de detalhes nestes modelos. Além disso, no Capítulo 3 foi apresentada uma metodologia para

desenvolvimento de novos modelos, baseada na característica modular e em projetos de famílias de torres, o que facilita o desenvolvimento de trabalhos futuros que vislumbram a análise de diferenças das formas físicas das torres na impedância de surto.

c) Proposta de metodologia para a determinação da impedância de surto de torres

Como tema principal desta tese, apresentou-se, especificamente no Capítulo 3, uma metodologia para determinação da impedância de surto de torres, baseada na aplicação do MEF em modelos 3D. Modelos de alguns tipos de torres foram desenvolvidos com baixo custo, e a utilização do MEF nestes modelos simplificou a resolução de equações de natureza eletromagnética. Pela comparação dos resultados obtidos com medições, a técnica proposta se demonstrou uma alternativa viável para a determinação da impedância de surto de torres.

d) Melhoria do índice de desempenho das LTs frente a descargas atmosféricas

A melhoria na previsão dos valores de impedância de surto de torres impacta diretamente nos projetos de coordenação de isolamento. A partir de valores de impedância de surto específicos de cada torre, as tensões de solicitação nos isoladores puderam ser previstas com maior precisão através de simulações. Deste modo, é possível determinar equipamentos mais adequados para se evitar o rompimento da isolação e, conseqüentemente, em desligamentos não programados. Assim, o presente trabalho contribui, indiretamente, com a melhoria do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, tornando o fornecimento de energia mais confiável.

e) Avaliação e balizamento de parâmetros oriundos do modelo *Multistory*

A utilização de um modelo robusto e confiável para representação elétrica da torre de transmissão é essencial para previsão de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos. Neste sentido, o modelo *multistory*, utilizado neste trabalho para representação dos parâmetros da torre, foi avaliado através de simulações e posteriormente por comparações dos resultados com registros de medições. Parâmetros de controle nativos de tal modelo foram analisados e balizados proporcionando um melhor entendimento de suas potencialidades. Tal procedimento contribuiu para a otimização do modelo *multistory*, o que corrobora para a melhoria da representação elétrica das torres de transmissão.

f) Verificação dos impactos da impedância de surto nas tensões na torre no *software* EMTP/ATP

Neste trabalho ainda foi investigada a influência da impedância de surto, e de outros parâmetros, nas tensões originadas na torre devido a surtos de corrente. Um modelo equivalente da torre baseado em parâmetros distribuídos será utilizado através do *software* EMTP/ATP. Assim, será possível se prever com maior exatidão as tensões originadas nas torres de transmissão.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a finalização desta pesquisa, e com base na relevância do assunto aqui abordado, apresentam-se, como temas indicativos para um maior investigação, os seguintes assuntos:

- Como foi visto, os diversos métodos existentes podem resultar em valores inadequados para determinados tipos de torres. Visando suprir esta deficiência, uma avaliação dos diversos métodos visando verificar qual é o mais adequado para determinado tipo de torre. Este estudo envolveria a aplicação das metodologias teóricas e comparação dos resultados com medições em diferentes tipos de torres;

- No presente estudo a impedância de aterramento da torre foi considerada puramente resistiva e como um elemento concentrado. Este fato abre campo para a realização de estudos aprofundados sobre a influência da impedância de aterramento, considerando a estratificação do solo, nas reflexões de ondas na torre;

- Nesta tese foram analisadas torres do tipo autoportante, com diferentes dimensões físicas. Uma característica adicional de torres do tipo estaiadas são os cabos de sustentação, os quais podem exercer influência na impedância de surto da estrutura. Assim, seria interessante realizar um estudo da influência destes cabos na impedância de surto das torres que utilizam tal artifício;

- Uma parte das descargas atmosféricas que perturbam os sistemas são as chamadas descargas indiretas, ou seja, descargas que incida nas proximidades da linha de transmissão e da torre. Neste contexto, um estudo adicional pode ser realizado de forma a verificar os impactos de descargas atmosféricas indiretas, visando analisar as perturbações originadas na torre de transmissão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. C. Assis, “Desenvolvimento de um Modelo de Cálculo de Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas em Condutores Multiaterrados e Incorporação,” pp. 1–6, 2005.
- [2] F. H. Silveira, S. Visacro, and R. E. de Souza Filho, “Calculation of backflashover outage rate of transmission lines: A discussion on traditional methodologies and recent advances,” in *2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)*, 2015, pp. 226–230.
- [3] W. Chisholm, Y. I. Chow, and K. D. Srivastava, “Lightning Surge Response Of Transmission Towers,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242, Sep. 1983.
- [4] Y. Baba and M. Ishii, “Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 630–635, Apr. 1999.
- [5] Zhijing Zhang, Wenxia Sima, Yongji Zhang, and Lichun Shu, “The simulation model for calculating the surge impedance of a tower,” in *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2004, no. September, pp. 331–334.
- [6] C. A. Jordan, “Lightning Computations for Transmission Lines With Overhead Ground Wires, Part II,” *Gen. Electr. Rev.*, vol. 37, no. 4, pp. 130–137, 1934.
- [7] C. F. Wagner and A. R. Hileman, “A New Approach to the Calculation or the Lightning Performance or Transmission Lines III-A Simplified Method: Stroke to Tower,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 79, no. 3, pp. 589–603, Apr. 1960.
- [8] M. Sargent and M. Darveniza, “Tower Surge Impedance,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, May 1969.
- [9] Ieee, *IEEE Std 1243-1997: IEEE Guide For Improving The lightning Performance of Transmission Lines*, vol. 2004, no. January. 1997.
- [10] M. Kawai, “Studies of the Surge Response on a Transmission Line Tower,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 83, no. 1, pp. 30–34, Jan. 1964.
- [11] H. Motoyama and H. Matsubara, “Analytical and experimental study on surge response of transmission tower,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 812–819, Apr. 2000.
- [12] W. A. Chisholm, Y. L. Chow, and K. D. Srivastava, “Travel Time of Transmission Towers,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 10, pp. 2922–2928, 1985.
- [13] E. C. Jordan and K. G. Balmain, *Eletromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2º. New Jersey: Prentice Hall, 1968.

- [14] M. Ishii *et al.*, “Multistory transmission tower model for lightning surge analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 3, pp. 1327–1335, Jul. 1991.
- [15] A. Ametani, “Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 141, no. 4, p. 339, 1994.
- [16] J. A. R. Gutierrez *et al.*, “Nonuniform Transmission Tower Model for Lightning Transient Studies,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 490–496, Apr. 2004.
- [17] H. Motoyama, Y. Kinoshita, K. Nonaka, and Y. Baba, “Experimental and Analytical Studies on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 2232–2239, Oct. 2009.
- [18] G. D. Breuer, A. J. Schultz, R. H. Schlomann, and W. S. Price, “Field Studies of the Surge Response of a 345-kV Transmission Tower and Ground Wire,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 76, no. 3, pp. 1392–1396, Apr. 1957.
- [19] R. W. Caswell, I. B. Johnson, E. F. Koncel, and N. R. Schultz, “Lightning Performance of 138-kV Twin-Circuit Transmission Lines of Commonwealth Edison Company - Operating Experience and Field Studies,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 76, no. 3, pp. 1480–1489, Apr. 1957.
- [20] Working Group 33.01-Lightning (CIGRÉ), “Guide To Procedures For Estimating The Lightning Performance Of Transmission Lines,” *CIGRE Broch. 63*, vol. 1, 1991.
- [21] T. Hara and O. Yamamoto, “Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 3, p. 283, 1996.
- [22] T. Yamada *et al.*, “Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 1, pp. 393–402, 1995.
- [23] H. Motoyama, K. Shinjo, Y. Matsumoto, and N. Itamoto, “Observation and analysis of multiphase back flashover on the Okushishiku Test Transmission Line caused by winter lightning,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 4, pp. 1391–1398, 1998.
- [24] A. Ametani and T. Kawamura, “A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 867–875, Apr. 2005.
- [25] Y. Baha and M. Ishii, “Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 3, pp. 1010–1015, Jul. 2000.
- [26] T. Ueda, T. Ito, H. Watanabe, T. Funabashi, and A. Ametani, “A comparison between two tower models for lightning surge analysis of 77 kV system,” in *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology*.

- Proceedings (Cat. No.00EX409)*, 2000, vol. 1, pp. 433–437.
- [27] Changzheng Gao, Lin Li, Bing Li, and Zhibin Zhao, “Computation of power line tower lightning surge impedance using the electromagnetic field method,” in *2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006, pp. 124–127.
- [28] L. Zhiwei and L. Dachuan, “The lightning protection performance of back striking for double-circuit transmission line based on the distributed transmission line tower model,” in *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 2011, no. 2, pp. 500–503.
- [29] R. J. A. Gutierrez, P. Moreno, L. Guardado, and J. L. Naredo, “Comparison of transmission tower models for evaluating lightning performance,” in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 4, pp. 339–344.
- [30] Y. Baha and M. Ishii, “Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 3, pp. 1010–1015, Jul. 2000.
- [31] M. M. Rahman, M. F. Hossain, a. B. M. A. Hossain, and M. O. Goni, “Lightning Surge Analysis on Vertical Tower using Electromagnetic Transient Program (EMTP),” in *2006 International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2006, no. December, pp. 17–20.
- [32] M. S. U. Yusuf, M. Z. Islam, and M. Ahmad, “Analysis of lightning surge characteristics for transmission towers,” in *2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 280–283.
- [33] F. P. Dawalibi, W. Ruan, S. Fortin, J. Ma, and W. K. Daily, “Computation of power line structure surge impedances using the electromagnetic field method,” in *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*, 2001, vol. 0, no. 514, pp. 663–668.
- [34] Z. Zakaria, S. M. Bashi, N. F. Mailah, M. R. Othman, and H. Osman, “Simulation of lightning surges on tower transmission using PSCAD/EMTDC: A comparative study,” in *Student Conference on Research and Development*, 2002, pp. 426–429.
- [35] Y. Baba and V. A. Rakov, “On the Interpretation of Ground Reflections Observed in Small-Scale Experiments Simulating Lightning Strikes to Towers,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 533–542, Aug. 2005.
- [36] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. A. O. Schroeder, “Revision, Extension, and Validation of Jordan’s Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, Aug. 2006.
- [37] Y. Du, X. Wang, and M. Chen, “Numerical investigation of transient surge impedance of a vertical conductor over a perfect ground,” in *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, 2011, pp. 78–84.

- [38] J. Takami, T. Tsuboi, K. Yamamoto, S. Okabe, Y. Baba, and A. Ametani, "Lightning surge response of a double-circuit transmission tower with incoming lines to a substation through FDTD simulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 1, pp. 96–104, Feb. 2014.
- [39] Qingyu Wang, Zongren Peng, Xi Yang, Naiyi Li, Jialong Wang, and Jintao Liao, "Electric field computation and optimization of composite tower in 330 kV double circuit transmission lines," in *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2014, pp. 283–286.
- [40] O. Sliskis, I. Dvornikovs, K. Ketners, and D. Sobolevsky, "Specification of transmission tower structure for following surge protection simulation," in *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015, no. 1, pp. 137–140.
- [41] Y. Baba and V. A. Rakov, "Applications of the FDTD Method to Lightning Electromagnetic Pulse and Surge Simulations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 6, pp. 1506–1521, Dec. 2014.
- [42] Y. Huangfu *et al.*, "Surge voltage and environmental electromagnetic field analysis for HV composite transmission tower under lightning strokes," in *2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2014, pp. 445–450.
- [43] T. X. Cao, T. Pham, and S. Boggs, "Computation of tower surge impedance in transmission line," in *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, no. June, pp. 77–80.
- [44] Cigré WG C4.501, *Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena*, no. June. CIGRÉ, 2013.
- [45] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004)*. pp. 1–73, 2011.
- [46] R. D. FUCHS, *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas*, 3rd ed. EDUFU, 2015.
- [47] L. Grecev and F. Rachidi, "On Tower Impedances for Transient Analysis," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 3, pp. 1238–1244, Jul. 2004.
- [48] V. A. Rakov *et al.*, "CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications," in *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, 2013, pp. 373–377.
- [49] J. Takami, T. Tsuboi, K. Yamamoto, S. Okabe, and Y. Baba, "Lightning surge characteristics on inclined incoming line to substation based on reduced-scale model experiment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, pp. 739–746, Jun. 2013.
- [50] O. Goni, F. Hossain, S. U. Yusuf, M. Rahman, E. Kaneko, and H. Takahashi, "Simulation and Experimental Analyses of Electromagnetic Transients Behaviors of Lightning Surge on Vertical Conductors," *IEEE Trans. Power*

- Deliv.*, vol. 21, no. 4, pp. 1778–1786, Oct. 2006.
- [51] W. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, 2ed ed., no. 2. Broken Sound Parkway NW: Chapman and Hall/CRC, 2007.
- [52] E. Arvas and L. Sevgi, “A Tutorial on the Method of Moments [Testing Ourselves],” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 3, pp. 260–275, Jun. 2012.
- [53] U. Kumar and P. K. Nayak, “Investigations on Voltages and Currents in Lightning Protection Schemes Involving Single Tower,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 543–551, Aug. 2005.
- [54] R. K. Pokharel and M. Ishii, “Applications of Time-Domain Numerical Electromagnetic Code to Lightning Surge Analysis,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 3, pp. 623–631, Aug. 2007.
- [55] X. Sun, Q. Huang, L. J. Jiang, and P. W. T. Pong, “Overhead High-Voltage Transmission-Line Current Monitoring by Magneto-resistive Sensors and Current Source Reconstruction at Transmission Tower,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–5, Jan. 2014.
- [56] M. Ishii and Y. Baba, “Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 483–488, 1997.
- [57] J. Bastos and N. Sadowski, *Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling*. CRC Press, 2013.
- [58] K. de S. Singh, “Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão,” Universidade de Brasília, 2009.
- [59] V. F. Zaitsev and A. D. Polyanin, *Handbook Of Exact Solutions For Ordinary Differential Equations*, Second. Chapman & Hall/Crc, 2002.
- [60] S. J. Salon, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Boston, MA: Springer US, 1995.
- [61] Qiushi Chen and A. Konrad, “A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 1, pp. 663–676, 1997.
- [62] A. F. L. Nogueira and R. M. Le Boudec, “An axisymmetric version of the Kelvin transformation for the analysis of open-boundary electric and magnetic fields,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 9, no. 3, pp. 339–345, Jun. 2011.
- [63] Cedrat, *Flux3D User Guide*. France, 2012.
- [64] P.-L. George and H. Borouchaki, *Delaunay Triangulation and Meshing: Application to Finite Elements*. Butterworth-Heinemann, 1998.
- [65] M. L. G. C. J. K. T. M. A. M. (Eds.), *Transactions on Computational Science XIV*. Springer US, 2003.
- [66] A.-028 Siderurgia, “Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural — Requisitos.” ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

- [67] Gerdau, “Catálogo de Barras e Perfis Metálicos,” 2016.
- [68] Arieh Iserles, *A First Course in the Numerical Analysis of Differential Equations*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [69] A. J. G. Pinto, E. C. M. Costa, S. Kurokawa, J. H. A. Monteiro, J. L. de Franco, and J. Pissolato, “Analysis of the electrical characteristics and surge protection of EHV transmission lines supported by tall towers,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 57, pp. 358–365, 2014.
- [70] G. J. Burke, “Numerical Electromagnetic Code (NEC).” Naval Ocean systems Center, San Diego, 1980.
- [71] K. U. LEUVEN, *Alternative transient program (ATP), Rule Book*. Leuven, Belgium: EMTP CENTRE, 1987.
- [72] N. de Q. de E. E.-U. UFU, “Curso de ATPDraw,” 2012.
- [73] J. A. Martinez and F. Castro-Aranda, “Tower modeling for lightning analysis of overhead transmission lines,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, pp. 1345–1350.
- [74] F. Heidler, J. M. Cvetic, and B. V. Stanic, “Calculation of lightning current parameters,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 399–404, Apr. 1999.
- [75] A. F. Peterson and G. D. Durgin, “Transient Signals on Transmission Lines: An Introduction to Non-Ideal Effects and Signal Integrity Issues in Electrical Systems,” *Synth. Lect. Comput. Electromagn.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–144, Jan. 2008.

Anexo A

Projeto de torre: Torre de suspensão leve - Tipo A33D - LT 345 kV – Viana 2 - Viana

Anexo B

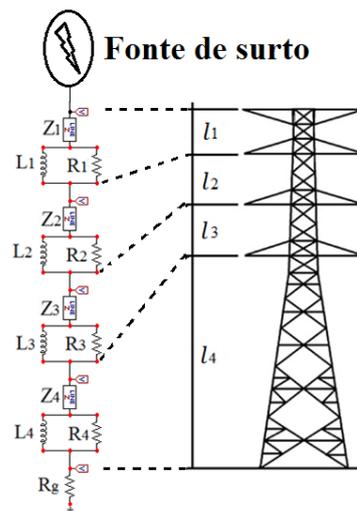
Projeto de torre: Torre Tipo AP80 - LT 500 kV – Colider – Claudia

Apêndice A – Circuitos e modelos utilizados no EMTP/ATP.

Modelo *Multistory*

Como visto no Capítulo 5, esta tese utilizou o modelo *multistory*, implementado no *software* EMTP/ATP, para representação da torre de transmissão.

Figura A.1: Circuito utilizado nas simulações desta tese

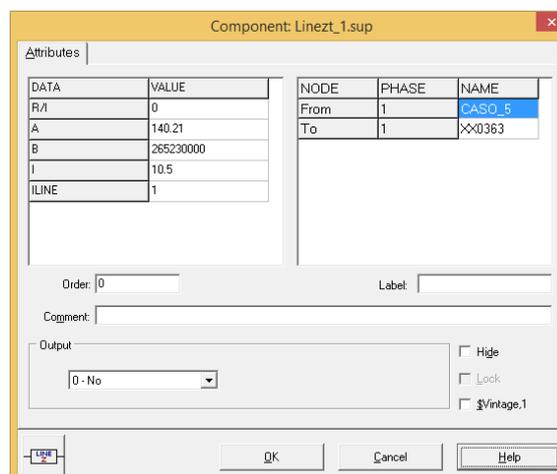


Fonte: Do autor

A seguir serão detalhados os elementos presentes neste modelo.

- Elementos “ Z_i ”: Modelo de linha de transmissão monofásica de parâmetros distribuídos, com a seguinte janela de interface para inserção dos parâmetros de entrada.

Figura A.2: Janela de interface do Modelo de linha de transmissão



Fonte: Do autor

Onde:

ILINE: Parâmetro auxiliar que pode tomar os valores 0, 1 ou 2.

R/I: Resistência por distância em Ohm/comprimento.

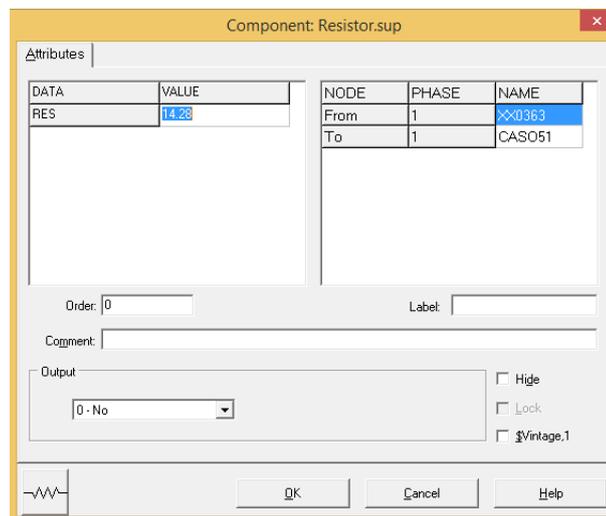
A: Para “ILINE=0” é a indutância da linha em mH/comprimento. Para “ILINE=1 ou 2”, é a Impedância de surto da linha em ohms.

B: Para “ILINE=0” é a capacitância da linha em μF /comprimento. Para “ILINE=1”, é a velocidade de propagação do surto em comprimento/s. Para “ILINE=2”, é tempo de viagem do surto em segundos.

I: é o comprimento da linha

- Elementos “Ri” e “Rg”: Resistor, com a seguinte janela de interface para inserção dos parâmetros de entrada.

Figura A.3: Janela de interface do elemento resistor

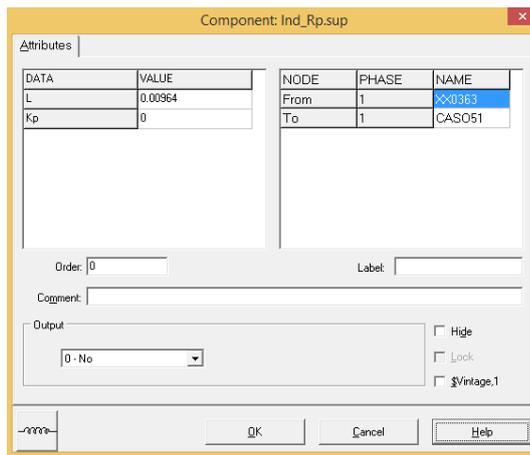


Fonte: Do autor

Onde “RES” é o valor de resistência em ohms.

- Elementos “Li”: Indutor, com a seguinte janela de interface para inserção dos parâmetros de entrada.

Figura A.4: Janela de interface do elemento indutor



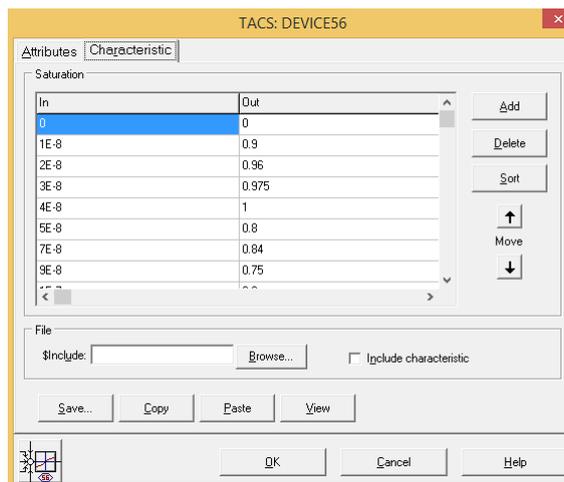
Fonte: Do autor

Onde: “L” é o valor de indutância em mH

Kp é o fator de paralelismo de resistências em ohms (não utilizado neste estudo)

- Fonte Tipo “Ponto a Ponto”: Produz uma onda de corrente ou tensão com uma saída formada por pontos, de tempo e amplitude, fornecidos pelo usuário. Este modelo suporta até 17 pontos fornecidos pelo usuário. A janela de interface para inserção dos parâmetros de entrada é apresentada a seguir:

Figura A.5: Janela de interface da fonte tipo “ponto a ponto”



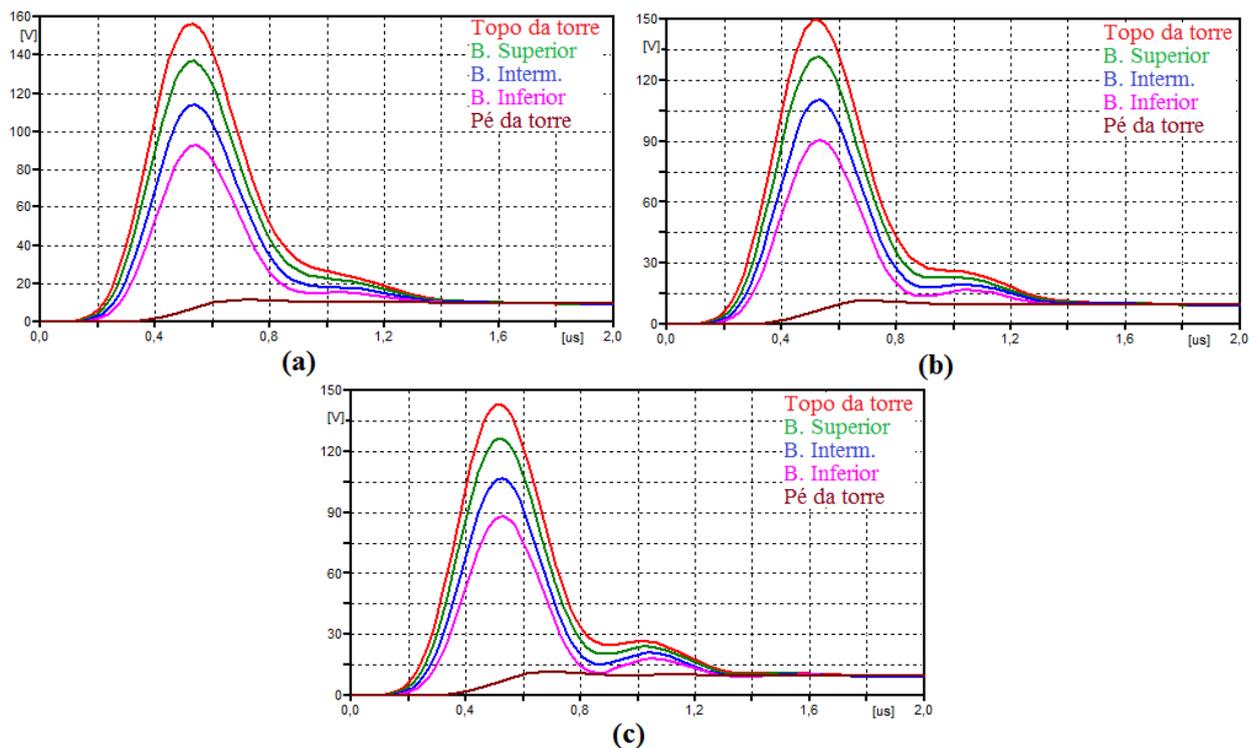
Fonte: Do autor

Onde “In” e “Out”, são os pontos (tempo; amplitude), por onde a função cruza.

Apêndice B – Simulações das tensões na torre para os diferentes coeficientes de atenuação, e seguindo os parâmetros da Tabela 5.1

Gráficos de complementação da Figura 5.2: Tensões no Topo, Braços e pé da torre para simulações uma utilizando fonte de corrente com forma de onda tipo “Heidler”.

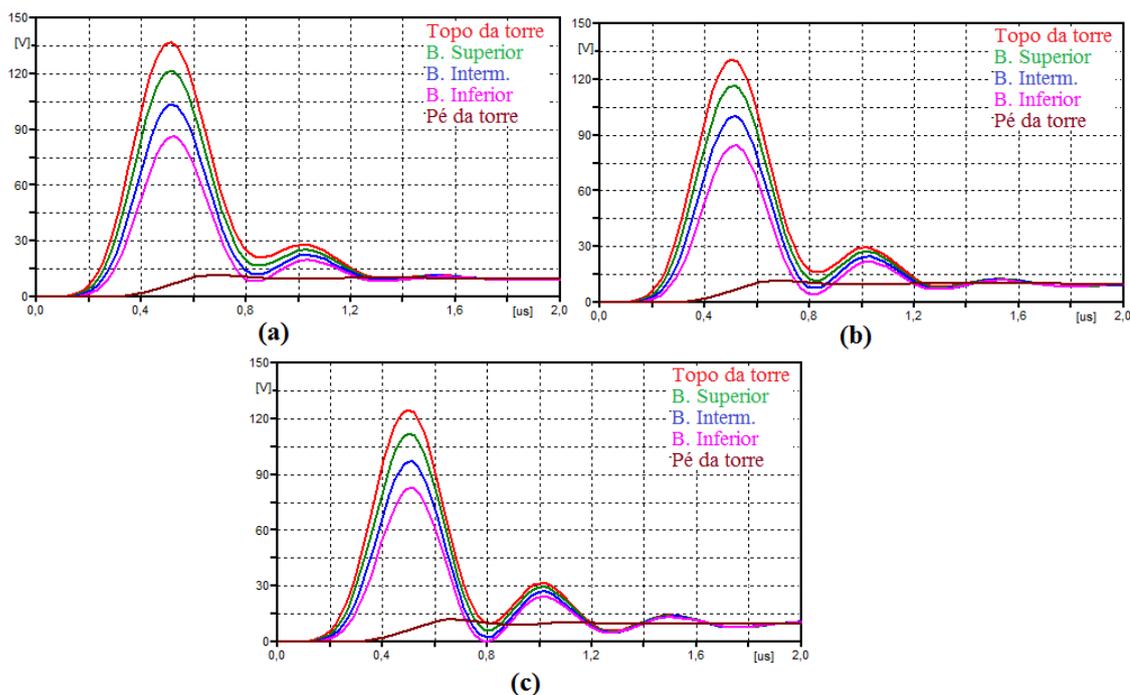
Figura B.1: Simulações das tensões na torre com diferentes valores de coeficiente de atenuação: (a) $\alpha=0,80$, (b) $\alpha=0,82$ e, (c) $\alpha=0,84$



Fonte: Do autor

Figura B.2: Simulações das tensões na torre com diferentes valores de coeficiente de atenuação: (a)

$\alpha=0,86$, (b) $\alpha=0,88$ e, (c) $\alpha=0,90$



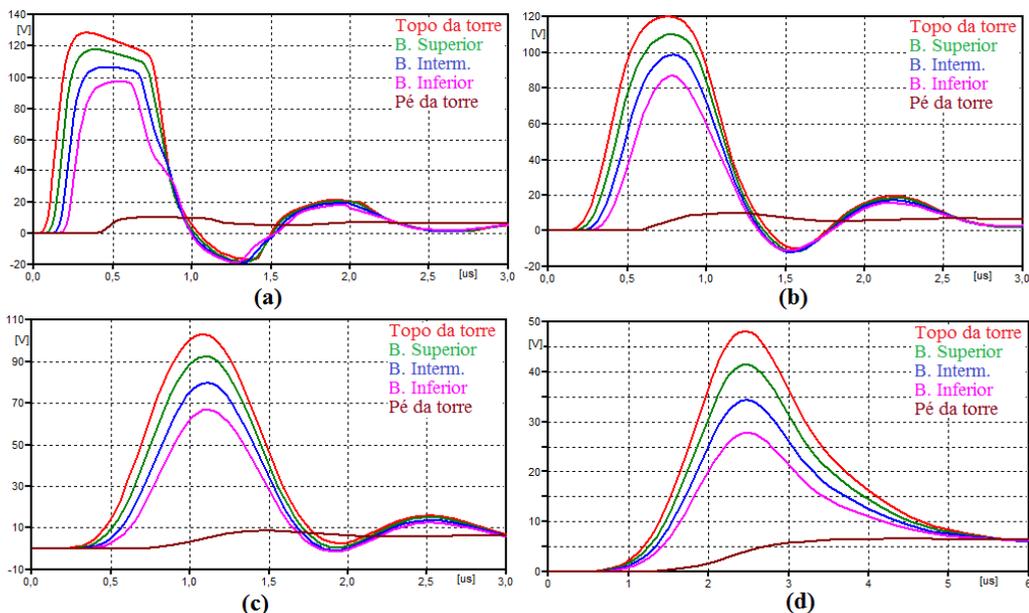
Fonte: Do autor

Apêndice C – Simulações das tensões na torre para os casos da Tabela 5.5

Gráficos de complementação da Figura 5.11: Tensões no Topo, Braços e pé da torre para simulações utilizando fonte de corrente com forma de onda tipo “Heidler”

Figura C.1: Resultados de tensões para a (a) corrente A, (b) corrente B, (c) corrente C e, (d) corrente

D da Tabela 5.5

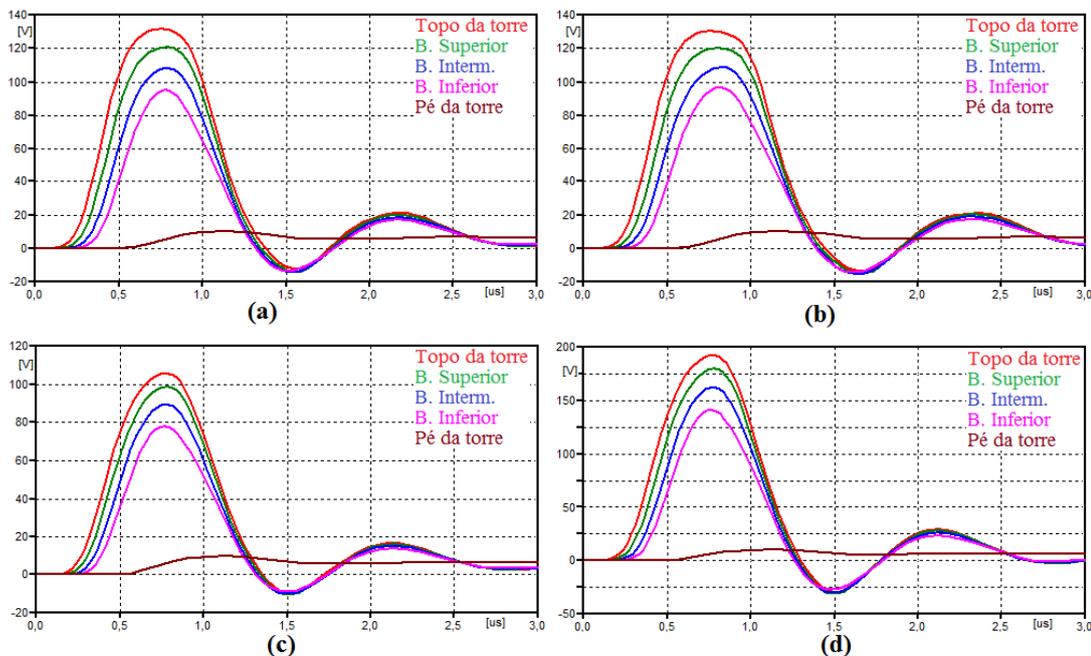


Fonte: Do autor

Apêndice D – Simulações das tensões na torre para os casos da Tabela 5.6

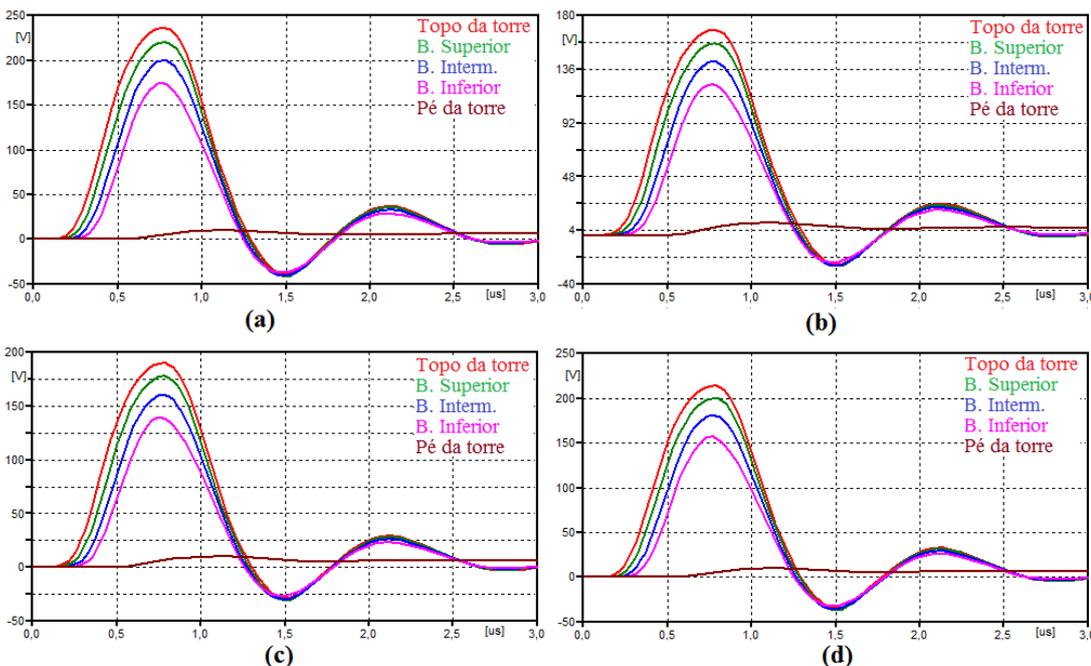
Gráficos de complementação da Figura 5.12: Tensões no Topo, Braços e pé da torre para simulações utilizando fonte de corrente com forma de onda tipo “Heidler”.

Figura D.1: Resultados de tensões para o (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3 e, (d) caso 4 da Tabela 5.6



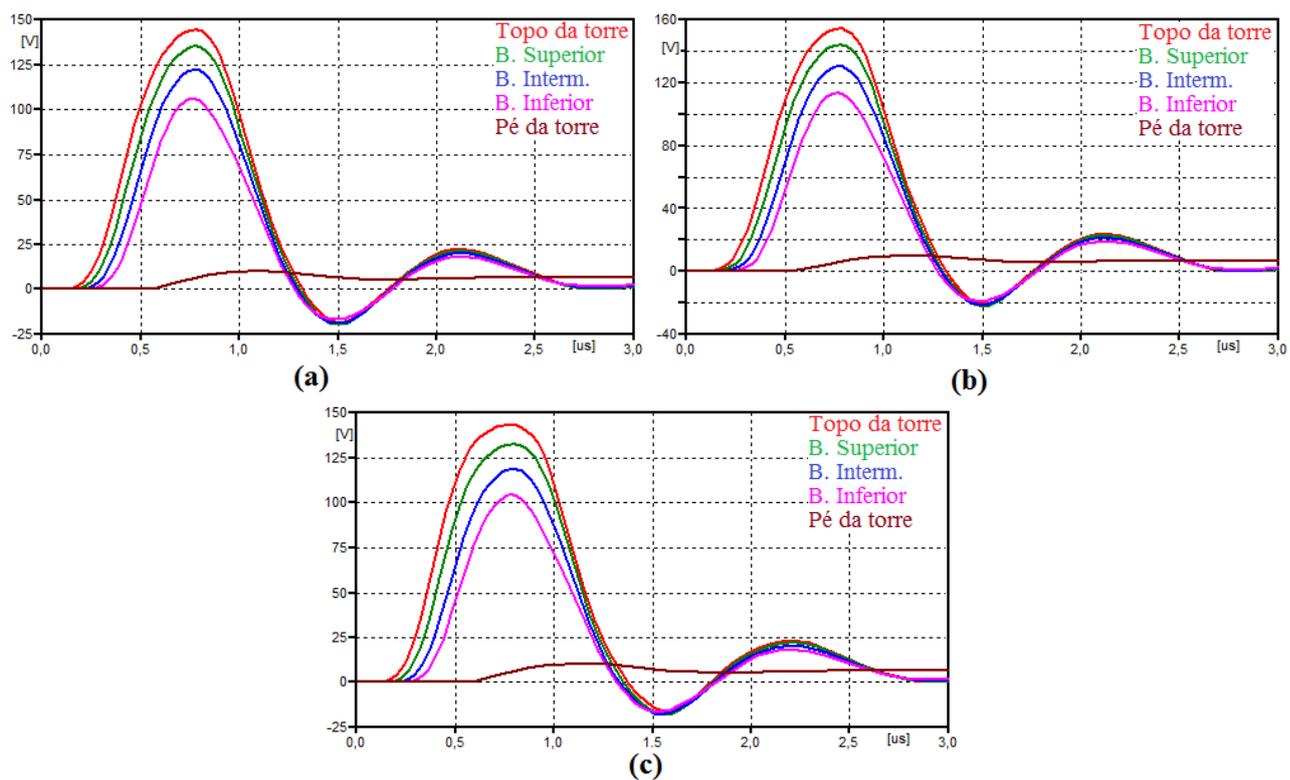
Fonte: Do autor

Figura D.2: Resultados de tensões para o (a) caso 5, (b) caso 6, (c) caso 7 e, (d) caso 8 da Tabela 5.6



Fonte: Do autor

Figura D.3: Resultados de tensões para o (a) caso 9, (b) caso 10 e, (c) caso 11 da Tabela 5.6



Fonte: Do autor