

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA  
TENSÃO FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

RICARDO HACHEM THOMÉ CHAMIÉ FILHO

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará - Brasil  
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA  
TENSÃO FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

RICARDO HACHEM THOMÉ CHAMIÉ FILHO

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará - Brasil  
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA  
TENSÃO FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

RICARDO HACHEM THOMÉ CHAMIÉ FILHO

Dissertação de Mestrado Sub-  
metida à Banca Examinadora do Pro-  
grama de Pós Graduação em Engenha-  
ria Elétrica da UFPA para obtenção  
do Grau de Mestre em Engenharia  
Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém - Pará - Brasil

2009

*“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o mistério passará pela vida sem ver nada.”*

Albert Einstein

*Aos meus pais Ricardo (em memória) e Celina e minha irmã Carolina.*

# Agradecimentos

A meu *DEUS* por mais essa conquista da minha vida, e ao meu pai *RICARDO CHAMIÉ* que, mesmo não estando mais aqui do nosso lado, olhou sempre por mim e me deu forças para dar seguimento a todo esse trabalho.

À minha mãe *CELINA CHAMIÉ* e minha irmã *CAROLINA* por todo o amor incondicional, apoio e força para a conclusão desse longo trabalho. Agradeço também a toda minha família que torceu muito por mim para chegar onde estou hoje.

À *NATHÁLIA FONSECA*, minha namorada e acima de tudo companheira de todos os momentos. Uma das pessoas que mais me incentivou a chegar no fim de mais essa jornada.

Ao meu professor e orientador *CARLOS LEONIDAS SOBRINHO*, sem dúvidas, um agradecimento muito mais do que especial por ter me ajudado a todo momento que precisei e por ter acreditado em meu potencial. Sem ele e toda sua experiência, nada disso teria sido realizado.

Ao professor e amigo de longa data *RODRIGO M. S. DE OLIVEIRA*, por todo conhecimento compartilhado, companheirismo e apoio nos trabalhos desenvolvidos ao longo desse tempo na universidade.

A todos os amigos do LANE: *Reinaldo C. Leite (Eletronorte)*, *Thais Tavares*, *Adolfo Colares*, *Rodrigo Lisboa*, *Rita de Cássia*, *Waldir Hipólito*, *Josivaldo Araújo*, *Emanuel Souza Jr*, *Yuri Salame* e ao *Prof. Dr. José Felipe de Almeida* que contribuíram direta e indiretamente para a elaboração desse trabalho.

A todos os professores do PPGEE/UFGA pela minha formação de Mestre em Engenharia Elétrica, e a toda comunidade científica.

À Universidade Federal do Pará e à Eletronorte por toda infra-estrutura disponibilizada para a realização desse trabalho.

À FAPESPA (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará) pela concessão da bolsa de mestrado.

A toda comunidade de desenvolvedores do Linux e do Software Livre, ferramentas que foram indispensáveis do início ao fim desse trabalho.

Aos revisores e membros da banca examinadora pela suas valiosas contribuições para levar esse trabalho à sua versão final.

# Lista de Símbolos

$\vec{E}$	Vetor Intensidade de Campo Elétrico
$\vec{H}$	Vetor Intensidade de Campo Magnético
$\vec{D}$	Vetor Densidade de Fluxo Elétrico
$\vec{B}$	Vetor Densidade de Fluxo Magnético
$\rho$	Resistividade do Solo
$\epsilon_0$	Permissividade Elétrica do Vácuo
$\epsilon$	Permissividade Elétrica
$\epsilon_s^*$	Permissividade Modificada - Tec. Fio Fino
$\mu_0$	Permeabilidade Magnética do Vácuo
$\mu$	Permeabilidade Magnética
$\mu^*$	Permeabilidade Modificada - Tec. Fio Fino
$\sigma$	Condutividade Elétrica
$\sigma_\alpha$	Condutividades para UPML
$\sigma^*$	Condutividade Modificada - Tec. Fio Fino
$c$	Velocidade da Luz no Vácuo
$f$	Frequencia
$t$	Tempo
$T_f$	Tempo de Frente da Onda Triangular
$T_t$	Tempo de Meia Cauda da Onda Triangular
$x, y$ e $z$	Coordenadas Cartesianas
$E_x, E_y$ e $E_z$	Componentes do Campo Elétrico
$H_x, H_y$ e $H_z$	Componentes do Campo Magnético
$D_x, D_y$ e $D_z$	Componentes de $\vec{D}$
$B_x, B_y$ e $B_z$	Componentes de $\vec{B}$

$\frac{\partial f}{\partial \alpha}$	Derivada Parcial de $f$ em relação a $\alpha$
$\frac{df}{d\alpha}$	Derivada de $f$ em relação a $\alpha$
$(i, j, k)$	Endereçamento de Espaço Discretizado (Índices)
$n$	Índice Temporal
$\Delta_x, \Delta_y$ e $\Delta_z$	Incrementos de Espaço
$\Delta_t$	Incremento de Tempo
$\nabla \times \vec{A}$	Rotacional de Um Vetor $\vec{A}$
$r_0$	Raio Intrínseco do Fio Fino
$r_0^*$	Raio Arbitrário do Fio Fino
$r$	Distância do Centro do Fio Fino ao Vetor Campo Magnético
$S_x, S_y$ e $S_z$	Elementos do Tensor Diagonal $\bar{S}$
$K_x, K_y$ e $K_z$	Parte Real Não Unitária do Tensor Diagonal $\bar{S}$
$d$	Espessura da UPML
$p$	Subdomínio de Análise



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO E AS EQUAÇÕES DE MAXWELL</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	O Algoritmo de Yee . . . . .	6
2.3	Formulação Analítica das Equações de Maxwell . . . . .	6
2.4	O Método Numérico das Diferenças Finitas Com Aproximação Centrada . . . . .	8
2.5	A Célula de Yee e As Equações de Campo . . . . .	9
2.6	A Formulação do Fio-Fino ( <i>Thin-wire</i> ) . . . . .	12
2.7	A UPML em Coordenadas Cartesianas . . . . .	17
2.8	O Software LANE-SAGS . . . . .	21
<b>3</b>	<b>TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>28</b>
3.1	Motivação do Estudo do Fenômeno . . . . .	28
3.2	Origem e Formação das Descargas Atmosféricas . . . . .	29
3.3	A Tensão Induzida nas Linhas de Energia . . . . .	32
3.4	As Interações Eletromagnéticas Entre o Canal de Descarga e as Linhas de Energia . . . . .	34
3.4.1	Acoplamento Elétrico . . . . .	34
3.4.2	Acoplamento Condutivo . . . . .	34
3.4.3	Acoplamento Magnético . . . . .	34
3.4.4	Acoplamento Irrradiado . . . . .	35
3.5	O Aterramento do Condutor Neutro e Sua Importância Nos Sistemas de Baixa Tensão . . . . .	36
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASOS E RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>38</b>
4.1	Caso I: Validação do software utilizado. . . . .	38
4.2	Caso II: Utilização de um modelo de solo com características eletromagnéticas reais, com linha de energia possuindo dois pontos de terra no neutro. . . . .	40

4.3	Caso III: Modelagem de torre metálica realística, container de equipamentos, malhas de aterramento e adição de uma linha extra de baixa tensão, com dois pontos de terra no condutor neutro. . . . .	43
4.4	Caso IV: Adição de novas estruturas modeladas, localizadas em regiões adjacentes às linhas de energia. . . . .	47
4.5	Caso V: Análise de tensões induzidas ao longo (eixo $x$ ) das linhas de baixa tensão, considerando as estruturas utilizadas no Caso III e IV. . . . .	60
4.6	Caso VI e Caso VII: Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VI: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso VII: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre. . . . .	61
4.7	Casos VIII a XI - Geometrias T e T Invertido: Apresentação, análise e comentários. . . . .	66
4.7.1	Caso VIII e Caso IX: Implementação da <i>Geometria T</i> nas linhas de energia. Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VIII: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso IX: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre. . . . .	66
4.7.2	Caso X e Caso XI: Implementação da <i>Geometria T Invertido</i> nas linhas de energia. Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VIII: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso IX: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre. . . . .	69
4.7.3	Resultados obtidos com as configurações de linha Geometria T e Geometria T Invertido . . . . .	71
4.8	Síntese dos Resultados Obtidos nas Simulações Anteriores . . . . .	76



## Lista de Figuras

1	Representação das componentes de campos elétrico e magnético na Célula de Yee. . . . .	11
2	Representação do fio-fino ( <i>thin-wire</i> ) e suas configurações adjacentes de componentes de campo elétrico e magnético. . . . .	16
3	Representação esquemática de uma região de análise com implementação da UPML. . . . .	22
4	Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de blocos materiais. . . . .	23
5	Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de blocos metálicos. . . . .	24
6	Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de hastes metálicas. . . . .	24
7	Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de elementos eletrônicos RLC. . . . .	25
8	Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de configuração dos parâmetros FDTD. . . . .	26
9	Esquema de divisão dos subdomínios na paralelização automática. . . . .	27
10	Ilustração simplificada do mecanismo de formação da descarga atmosférica. . . . .	31
11	Forma de onda da corrente utilizada para simular a descarga atmosférica. . . . .	32
12	Topologia tipo “estrela” utilizada no secundário de um transformador de média para baixa tensão. . . . .	37
13	Esquema de aterramento do condutor neutro atuando como cabo-guarda, com pontos de terra espaçados por uma distância $d$ . . . . .	37
14	Visão geral do Caso I: torre retangular com canal de descarga, linhas de transmissão, pontos de aterramento e solo metálico conectado com resistores de $80 \Omega$ , no plano $yz$ (vista transversal). . . . .	39
15	Visão geral do Caso I: torre retangular com canal de descarga, linhas de transmissão, pontos de aterramento e solo metálico conectado com resistores de $80 \Omega$ , no plano $xz$ (vista longitudinal). . . . .	40
16	Visão geral do Caso II: torre retangular com canal de descarga, linha de transmissão e pontos de aterramento, no plano $yz$ (vista transversal). . . . .	41

17	Visão geral do Caso II: torre retangular com canal de descarga, linha de transmissão e pontos de aterramento, no plano $xz$ (vista longitudinal). . . .	42
18	Resultados obtidos para o Caso I. . . . .	42
19	Resultados obtidos para o Caso II. . . . .	43
20	Ilustração simplificada do caminho de integração numérica utilizado no cálculo da tensão induzida em uma linha de baixa tensão. . . . .	44
21	Visão geral do Caso III. Linhas de energia, torre metálica com canal de descarga, container e malhas de aterramento, no plano $yz$ (vista transversal)	45
22	Visão geral do Caso III. Linhas de energia, torre metálica com canal de descarga, container e malhas de aterramento, no plano $xz$ (vista longitudinal)	45
23	Representação 3D da estrutura utilizada no Caso III: torre modelada, elementos adjacentes e linhas de baixa tensão (LANE-SAGS). . . . .	46
24	Representação 3D da estrutura utilizada no Caso III (detalhes): base da torre, container e malha de aterramento (LANE-SAGS). . . . .	46
25	Resultados obtidos para o Caso III. . . . .	47
26	Vista frontal do prédio modelado computacionalmente. . . . .	48
27	Vista lateral do prédio modelado computacionalmente. . . . .	49
28	Vista superior do prédio modelado computacionalmente. . . . .	49
29	Vista superior da região de análise no plano $xy$ . . . . .	50
30	Representação 3D da região analisada para o Caso IV. . . . .	50
31	Resultados obtidos para o Caso IV. . . . .	51
32	Curva de nível para o plano $xy$ em $z = 41$ (superfície do solo), com 720 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	52
33	Curva de nível para o plano $xy$ em $z = 41$ (superfície do solo), com 900 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	52

34	Curva de nível para o plano $xy$ em $z = 41$ (superfície do solo), com 1050 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	53
35	Curva de nível para o plano $xy$ em $z = 41$ (superfície do solo), com 1440 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	53
36	Curva de nível obtida para o plano $yz$ em $x = 420$ (centro geométrico do eixo $x$ da região de análise), com 120 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	54
37	Curva de nível obtida para o plano $yz$ em $x = 420$ (centro geométrico do eixo $x$ da região de análise), com 330 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	55
38	Curva de nível obtida para o plano $yz$ em $x = 420$ (centro geométrico do eixo $x$ da região de análise), com 420 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	56
39	Curva de nível obtida para o plano $yz$ em $x=420$ (centro geométrico do eixo $x$ da região de análise), com 1410 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	57
40	Curva de nível obtida para o plano $xz$ em $y=225$ (centro geométrico da torre modelada), com 120 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	58
41	Curva de nível obtida para o plano $xz$ em $y=225$ (centro geométrico da torre modelada), com 330 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	58

42	Curva de nível obtida para o plano $xz$ em $y = 225$ (centro geométrico da torre modelada), com 630 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	59
43	Curva de nível obtida para o plano $xz$ em $y = 225$ (centro geométrico da torre modelada), com 1410 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico. . . . .	59
44	Resultados obtidos para o Caso V, sem a presença de prédios representativos próximos à torre. . . . .	60
45	Resultados obtidos para o Caso V, com a presença de prédios representativos próximos à torre. . . . .	61
46	Vista superior da região de análise estudada no Caso VI, enfatizando os pontos de aterramento das linhas. . . . .	62
47	Representação 3D da região de análise estudada no Caso VI. . . . .	63
48	Representação 3D da região de análise estudada no Caso VII. Detalhe da interligação das fundações dos prédios. . . . .	63
49	Representação 3D da região de análise estudada no Caso VII. Detalhe da interligação das estruturas com as malhas de terra e da torre modelada. . .	64
50	Resultados obtidos para o Caso VI. . . . .	65
51	Resultados obtidos para o Caso VII. . . . .	66
52	Representação 3D da região de análise estudada no Caso VIII. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T. . . . .	67
53	Representação 3D da região de análise estudada no Caso IX. . . . .	68
54	Representação 3D da região de análise estudada no Caso IX. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T e das interligações das malhas de aterramento e torre. . . . .	68
55	Representação 3D da região de análise estudada no Caso X. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido. . . .	69
56	Representação 3D da região de análise estudada no Caso XI. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido e das interligações das fundações dos prédios. . . . .	70

57	Representação 3D da região de análise estudada no Caso XI. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido e das interligações das malhas de aterramento e torre. . . . .	71
58	Resultados obtidos para o Caso VIII. . . . .	72
59	Resultados obtidos para o Caso IX. . . . .	73
60	Resultados obtidos para o Caso X. . . . .	74
61	Resultados obtidos para o Caso XI. . . . .	75



## RESUMO

Neste trabalho são apresentadas simulações computacionais inéditas para o cálculo de tensões induzidas em linhas de baixa tensão, provenientes de descargas atmosféricas em estações rádio-base de telefonia celular (ERBs). Foram construídas estruturas representativas que denotam um grau de complexidade bastante avançado e semelhante ao encontrado em campo, visando assim a obtenção de resultados bem próximos aos da realidade. Para tal, desenvolveu-se um *software*, no qual as equações de Maxwell são resolvidas numericamente utilizando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), associado à truncagem de domínio de análise pela técnica da UPML e representação de condutores elétricos pela formulação de fio fino para meios condutivos, gerando soluções de onda completa para o problema.

*Palavras-Chave:* Surto de Tensão, Descarga Atmosférica, Estação Rádio-Base, Rede Elétrica, Tensões Induzidas, Transitório Eletromagnético, Computação Paralela, Método FDTD.

## ABSTRACT

Numerical full-wave solutions of induced voltages on low-voltage energy lines due to atmospheric discharges on cell phone radio base stations (RBS), installed at the proximities of such lines, are presented for the first time in this work. Structures, such as towers and buildings, which present high structural complexity, have been modeled in order to obtain realistic results. In particular, this paper shows the importance of considering the effects related to real electrical conductivity and permittivity of the soil (in technical literature, PECs have been used to represent the soil in similar problems). For this purpose, a software has been developed in which Maxwell's equations are numerically solved by using a parallel implementation of the Finite-Difference Time-Domain Method (FDTD), producing full wave solutions for the problem. The thin wire formulation has been implemented for representing thin cylindrical electric conductors and transmission lines.

*Index Terms:* atmospheric discharges, induced voltages, low voltage energy lines, parallel FDTD method, radio base stations.

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido à expansão mundial dos sistemas de telefonia celular nas áreas urbanas, estruturas elevadas na forma de torres e postes têm sido cada vez mais encontradas nas cidades, operando principalmente na função de Estações Rádio-Base (ERBs). Por possuírem alturas consideráveis, variando entre 30 e 50 metros, estas estruturas constituem um ponto “preferencial” (de maior probabilidade) para a ocorrência de descargas atmosféricas, tanto em seus pára-raios, como em seu próprio corpo metálico.

Descargas ocorridas em torres de telefonia provocam uma série de efeitos indesejáveis, seja no solo, com o aumento de potenciais e correntes de retorno em sistemas de aterramento, ou em linhas de transmissão de energia, provocando surtos devido à forte indução de campo eletromagnético. Tais surtos são caracterizados por picos bastante elevados de tensão e corrente, seguidos por súbitas variações de diferença de potencial no sistema fase-neutro e fase-fase de linhas de baixa tensão, chegando até à unidade consumidora final, ocasionando sérios danos a equipamentos elétricos.

O estudo de campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas bem como as tensões induzidas em linhas de energia elétrica representam uma grande parcela das pesquisas relacionadas à compatibilidade eletromagnética. Porém, é interessante ressaltar que esse tipo de pesquisa se desenvolve em dois aspectos básicos: o experimental e o computacional. Sabendo que as descargas atmosféricas são capazes de produzir correntes de dezenas de kilo-Ampères e que é quase que impossível prever seu acontecimento, estudar e quantificar tal fenômeno e seus efeitos torna-se bastante complicado. Dessa forma, decidiu-se realizar este trabalho utilizando recursos computacionais de tal forma que simulações de alta complexidade foram realizadas com estruturas modeladas em software gerando um ambiente virtual bastante próximo ao da realidade, resultando em um trabalho de estudo de casos inédito, com o objetivo de caracterizar e quantificar em diversas situações a tensão induzida em sistemas de baixa tensão, avaliando de que forma o campo eletromagnético gerado pela descarga atmosférica incidente em uma estrutura metálica de altura elevada pode vir a comportar-se em relação a um conjunto de estruturas complexas com diferentes características materiais.

Trabalhos como [1] e [2] utilizam diferentes métodos numéricos para simulação de casos semelhantes, onde diversos tipos de acoplamentos mútuos entre estruturas presentes no modelo de análise são considerados, como é o caso do HEM (*Hybrid Electromagnetic Mo-*

*del*), modelo baseado em equações de campo eletromagnético que considera acoplamentos mútuos entre linha de energia e canal da corrente de retorno para calcular tensões induzidas em locais próximos à incidência dessa descarga atmosférica. No trabalho aqui apresentado, utilizou-se a formulação das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) [3] para solução das equações de Maxwell em sua forma rotacional, considerando os meios isotrópicos e com perdas. Tal técnica tem como principal vantagem a obtenção de uma solução do tipo onda completa para os campos calculados durante todo o processo de simulação, calculando-se assim de forma automática reflexões, refrações e difrações nas estruturas envolvidas no processo de propagação, tornando assim os resultados obtidos bastante realistas. Além do mais, o método FDTD incorpora de maneira transparente a adição de estruturas simples ou complexas na região de análise do problema, tornando desnecessária a análise dos acoplamentos mútuos entre estruturas no programa. Dessa forma, a adição de elementos de alta complexibilidade e detalhamento não aumenta de maneira significativa o tempo de execução do programa, quando se mantém fixo o nível de discretização do domínio computacional utilizado.

Sendo os problemas aqui apresentados de natureza aberta ou infinita, teve-se a necessidade de truncar o domínio de análise por motivos de recurso computacional, ou seja, limitou-se a análise do problema considerado a uma certa região. Dessa forma, utilizou-se então a técnica das camadas perfeitamente casadas uniaxiais (técnica UPML) [4], escolhida por apresentar uma excelente eficiência de absorção em simulações computacionais, tornando o sistema livre de reflexões indesejadas, melhorando significativamente a confiabilidade dos resultados obtidos através do método. Assim, a região analisada passou a tomar a forma de uma câmara anecóica, onde todas as ondas eletromagnéticas incidentes nos limites computacionais são absorvidas e não retornam ao espaço de análise.

Os condutores de energia encontrados instalados nas redes de distribuição de baixa tensão, apresentam-se na forma de cabos condutores metálicos, possuindo uma forma cilíndrica de raio reduzido e de longo comprimento. Estruturas que apresentam uma região de análise da ordem de dezenas de metros com elementos em seu interior que possuem medidas bastante inferiores precisam de um tipo especial de representação computacional. Para essa representação, utilizou-se a Técnica do Fio Fino apresentada por Baba et al [5], que promove uma economia substancial no tempo de processamento e memória computacional empregada, devido ao fato de não haver necessidade de se em-

pregar uma discretização com células menores. Isso gera uma malha computacional menos densa, ou seja, com menos pontos para a análise, gerando assim uma solução mais breve para o problema. O modelo de solo adotado nesse trabalho possui condutividade finita ao invés de se considerar o solo como um metal perfeito, ou seja, nas simulações foram consideradas as propriedades eletromagnéticas do solo para que os resultados obtidos relativos às tensões induzidas nas linhas se aproximassem ainda mais da realidade.

Mesmo com recursos computacionais bastante eficientes, houve a necessidade da utilização de um *cluster* de computadores para o cálculo dos resultados. Nesse caso, a região de análise foi dividida em partes menores, onde essas partes foram distribuídas entre vários processadores. Cada parte da região de análise foi computada por um processador do *cluster*, onde a divisão das tarefas foi realizada de forma automática e transparente. O *cluster* utilizado é do tipo *Beowulf*, dotado de 16 processadores, o que tornou o processamento bastante ágil, ao ponto que uma simulação era executada em torno de 24 horas, viabilizando assim o rápido desenvolvimento do trabalho. O *software* utilizado para os cálculos de tensões induzidas em linhas de distribuição de baixa tensão conta com um visualizador 3D de estruturas que auxilia o usuário na modelagem de estruturas complexas. Também foram desenvolvidas ferramentas extras em linguagem C para o cálculo de tensões ao longo das linhas de energia e inversão de polaridades das ondas de tensão propagantes calculadas nos condutores. Todas as ferramentas, o software de análise, o visualizador tridimensional, o *cluster*, o gerador de gráficos e todos os outros programas e rotinas computacionais desenvolvidas ou empregadas neste trabalho utilizam o sistema operacional Linux, distribuição Slackware.

No Capítulo 2 é encontrada uma abordagem teórica acerca do trabalho executado, onde inicialmente é feito um breve resumo histórico sobre o método FDTD, e o algoritmo de Yee, que é de fundamental importância para a realização deste trabalho. Em seguida, são apresentadas as equações de Maxwell em sua formulação analítica no domínio do tempo, e posteriormente em sua forma das diferenças finitas onde se utiliza o algoritmo de Yee citado anteriormente. Após isso, são mostradas as técnicas do Fio-Fino e da UPML juntamente com um breve apanhado histórico e suas respectivas formulações. Uma explanação sobre computação paralela também foi acrescentada a esse trabalho com o intuito de se mostrar de que forma o domínio computacional é distribuído entre as máquinas integrantes do *cluster*.

No Capítulo 3 é encontrado um estudo de casos relacionados a simulações computacionais realizadas, no intuito de se compreender de que forma uma descarga atmosférica incidente em uma torre com geometria bastante próxima à realidade influencia na indução de tensões em linhas de energias remotas. Em um primeiro momento é feita uma validação do software utilizado, onde se compara um caso já presente na literatura com uma simulação executada com parâmetros idênticos à esta. Em um segundo momento é feita a comparação entre o tipo de solo utilizado na literatura com um tipo de modelagem de solo onde se considera os parâmetros eletromagnéticos do solo. Finalmente em um terceiro momento, busca-se diversos tipos de soluções para a minimização das tensões induzidas em linhas de baixa tensão provenientes da descarga atmosférica em uma torre modelada com geometria realística.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações a respeito do desenvolvimento do trabalho e dos resultados obtidos, com um enfoque nos resultados obtidos ao longo do trabalho, bem como nas soluções adotadas para a minimização das tensões induzidas em linhas de energia.

## 2 O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO E AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

### 2.1 Introdução

Amplamente utilizado em estudos de irradiação e propagação eletromagnética, o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) pode ser tido como uma implementação particular do Método das Diferenças Finitas (FDM) para a solução de equações diferenciais parciais no domínio do tempo. Uma de suas primeiras utilizações é datada no ano 1965 por Frank Harlow, na solução numérica de equações diferenciais que envolvem fluidos incompressíveis [6]. Já em 1966, Kane Yee utilizou as diferenças finitas no domínio do tempo para solucionar numericamente as equações rotacionais de Maxwell [3]. Através de uma aproximação simples para esses operadores diferenciais, as equações rotacionais de Maxwell para os campos elétrico e magnético podem ser resolvidas pontualmente por meio de uma equação algébrica solucionada simultaneamente no tempo e no espaço.

O emprego de um método numérico para as soluções de equações diferenciais parciais reside no fato de que somente alguns problemas eletromagnéticos com certas geometrias bastante simples possuem solução fechada (exata) com fácil equacionamento analítico. Quando a geometria do problema passa a ser complexa, como as encontradas em problemas reais, com materiais de diversas características e com diferentes condições de contorno, os métodos numéricos passam a ser amplamente utilizados por oferecerem excelentes resultados, implicando assim em soluções confiáveis e bastante econômicas, especialmente em se tratando de estudos de transitórios no domínio do tempo, sendo esse um dos principais motivos para a utilização desse método matemático na análise dos problemas apresentados nesse trabalho.

Além disso, o FDTD possui a vantagem de ser um método de natureza explícita, ou seja, um método em que nenhuma matriz de equações precisa ser resolvida para que haja a obtenção de resultados. Diferentemente disso, um conjunto de equações atualizáveis ao longo do tempo é utilizado, em que valores de campo de um instante próximo são obtidos basicamente em função de valores desse campo em um instante atual e em um instante anterior a esse. O domínio de análise do problema considerado, anteriormente contínuo

e com difícil solução analítica, transforma-se em um problema discreto com uma solução simplificada e de fácil implementação computacional [7].

## 2.2 O Algoritmo de Yee

Como dito anteriormente, em 1966, Kane Yee introduziu a técnica que solucionava numericamente, de maneira simples e eficiente, as equações de Maxwell no domínio temporal, fornecendo assim valores de campo elétrico e magnético no tempo e espaço. Atualmente, o Algoritmo de Yee é bastante utilizado na prática, em uma vasta gama de aplicações que vão desde sistemas de aterramento [8] e análise de antenas [9] até na medicina [10], e de uma maneira geral oferece soluções bastante sólidas e confiáveis quando se lida com interações de ondas eletromagnéticas em estruturas materiais. Por se tratar de um método de “onda completa” (*full-wave method*), os fenômenos de reflexão, refração e difração são automaticamente considerados na solução do problema. Ao lidar com as equações rotacionais de Maxwell, é possível visualizar que qualquer variação de campo elétrico no tempo está intimamente ligada com uma variação de campo magnético no espaço. Da mesma forma é corrente afirmar que qualquer variação temporal no campo magnético corresponde a uma variação do campo elétrico no espaço [11]. Esse acoplamento entre os comportamentos dos dois campos definem a ideia inicial do Algoritmo de Yee onde, em qualquer ponto do espaço, o valor atualizado do campo elétrico no tempo é dependente do valor armazenado (anteriormente calculado) desse campo elétrico e também dependente do rotacional do campo magnético. De maneira análoga, o valor atualizado do campo magnético em qualquer ponto do espaço é dependente do valor armazenado (anteriormente calculado) desse campo magnético e também dependente do rotacional do campo elétrico. A partir daí, a atualização mútua desses valores de campo em tempo e espaço resulta em uma espécie de “marcha” temporal, onde os valores de campo elétrico e de campo magnético são atualizados dentro de um *grid* computacional ([7],[12]).

## 2.3 Formulação Analítica das Equações de Maxwell

Considerando um meio isotrópico, não dispersivo e com perdas, as Equações de Maxwell podem ser escritas em sua forma diferencial como:

$$\nabla \times \vec{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \vec{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (1)$$



e

$$\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \epsilon \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t} + \sigma \vec{\mathbf{E}} \quad (2)$$

onde  $\vec{\mathbf{E}}$  e  $\vec{\mathbf{H}}$  representam o vetor intensidade de campo elétrico (V/m) e o vetor intensidade de campo magnético (A/m), respectivamente,  $\mu$  representa a permeabilidade magnética ou grau de magnetização de um material quando exposto a um campo magnético, expresso em Henry/m,  $\epsilon$  é a permissividade elétrica ou a habilidade de um material entrar em estado de polarização quando em presença de um campo elétrico, medida em Farad/m e  $\sigma$  é a condutividade elétrica ou facilidade a qual um material conduz corrente elétrica, dada em Siemens/m, todos esses, parâmetros do meio considerado.

A equação (1) é conhecida como a Lei de Faraday, e descreve como um campo magnético variante no tempo pode gerar um campo elétrico rotacional a ele. Esse princípio rege, por exemplo, o funcionamento de um gerador rotativo ou de turbina hidroelétrica. Já a equação (2) é conhecida como a Lei de Ampère corrigida por Maxwell. Essa equação mostra que campos magnéticos podem ser gerados pela passagem de corrente elétrica por um condutor (corrente de condução) bem como por um campo elétrico variante no tempo presente num meio dielétrico entre as placas de um capacitor (corrente de deslocamento). Os parâmetros do meio  $\epsilon$  e  $\sigma$  definem, respectivamente, como um campo elétrico é afetado quando se encontra na presença de um meio dielétrico. Em coordenadas cartesianas, as equações (1) e (2) podem ser expandidas e escritas como:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right), \quad (5)$$

e

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right), \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left( \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right), \quad (8)$$

respectivamente, onde  $E_x, E_y, E_z$  e  $H_x, H_y, H_z$  representam as componentes do vetor intensidade de campo elétrico  $\vec{E}$  e vetor intensidade de campo magnético  $\vec{H}$ , respectivamente, sendo todas funções do tempo  $t$  e das coordenadas  $x, y$  e  $z$ .

## 2.4 O Método Numérico das Diferenças Finitas Com Aproximação Centrada

Utilizando o conceito de *grid* de coordenadas  $(x, y, z)$  definido por Yee, onde um espaço contínuo é transformado em uma grade de pontos, um ponto  $(x, y, z)$  presente em uma região de análise com três dimensões espaciais pode ser representado na forma:

$$(x, y, z) = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, k \cdot \Delta z) \equiv (i, j, k) \quad (9)$$

onde  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  representam a separação entre os pontos do *grid* ou também as arestas da célula de Yee [7] e  $i, j, k$  são números inteiros. Já um sistema que possui dependência espacial e temporal, a representação pode ser feita de maneira que os valores calculados para um ponto  $(x, y, z)$  sejam atualizados ao longo do tempo. Sendo assim, têm-se para uma função  $F$ :

$$F^n(i, j, k) \equiv F(i \cdot \Delta i, j \cdot \Delta j, k \cdot \Delta k, n \cdot \Delta t) \equiv F_{i,j,k}^n \quad (10)$$

onde o termo  $\Delta t$  é um número finito que representa o incremento temporal e  $n$  é o índice de incremento temporal ou índice do passo de tempo (inteiro).

Aplicando a expansão da Série de Taylor aproximada com precisão de 3<sup>a</sup> ordem, e considerando que  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ , é correto afirmar que as derivadas espaciais em

relação a  $x$  e temporais podem ser escritas da seguinte maneira, respectivamente:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + 1/2, j, k) - F^n(i - 1/2, j, k)}{\Delta x} + 0(\Delta x^2) \quad (11)$$

e

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + 0(\Delta t^2) \quad (12)$$

Como a precisão considerada nas equações é de segunda ordem, pode-se dizer que o método possui um erro relacionado à sua precisão também de segunda ordem. Esse fato é devido ao cancelamento (truncamento) dos termos representados por  $0(\Delta x^2)$  e  $0(\Delta t^2)$  em relação ao espaço e ao tempo, respectivamente [13].

## 2.5 A Célula de Yee e As Equações de Campo

De posse das duas equações rotacionais de Maxwell (1) e (2) e do conceito de aproximação numérica de uma derivada no espaço e no tempo utilizando o método das diferenças centradas mostradas em (11) e (10), pode-se então escrever as seis equações escalares de Maxwell mostradas anteriormente em (3)-(8) na forma de equações de diferenças finitas, com natureza explícita:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \right], \quad (13)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_z^n(i+1, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta z} \right], \quad (14)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \right], \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
E_{x(i+\frac{1}{2},j,k)}^{n+1} &= E_{x(i+\frac{1}{2},j,k)}^n \left( \frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}} \right) + \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{z(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z(i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_y} \right], \tag{16}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{y(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y(i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_z} \right] \\
E_{y(i,j+\frac{1}{2},k)}^{n+1} &= E_{y(i,j+\frac{1}{2},k)}^n \left( \frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}} \right) + \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{x(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x(i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_z} \right], \tag{17}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{z(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k)}^{n+\frac{1}{2}} - H_{z(i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k)}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_x} \right] \\
E_{z(i,j,k+\frac{1}{2})}^{n+1} &= E_{z(i,j,k+\frac{1}{2})}^n \left( \frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon}} \right) + \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{y(i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}} - H_{y(i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_x} \right], \tag{18}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \left( 1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\epsilon} \right)} \left[ \frac{H_{x(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}} - H_{x(i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2})}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta_y} \right]
\end{aligned}$$

onde as seis componentes dos campos presentes nas equações podem ser inseridas em uma célula cúbica que representa uma unidade do *grid* computacional de três dimensões mostrada na Fig. 1. As componentes de campo elétrico podem ser posicionadas nas

arestas da célula e as componentes de campo magnético podem ser posicionadas no centro das faces da mesma, em uma direção normal a essas faces. Feito isso, um esquema de resolução dessas equações foi proposto de forma que as mesmas pudessem ser resolvidas de maneira intercalada, onde, conforme o tempo da simulação avança, os campos elétrico e magnético são calculados e atualizados de forma intercalada para, por fim, obter-se a resposta final do problema ponto a ponto na região de análise (espaço) e ponto a ponto no tempo.

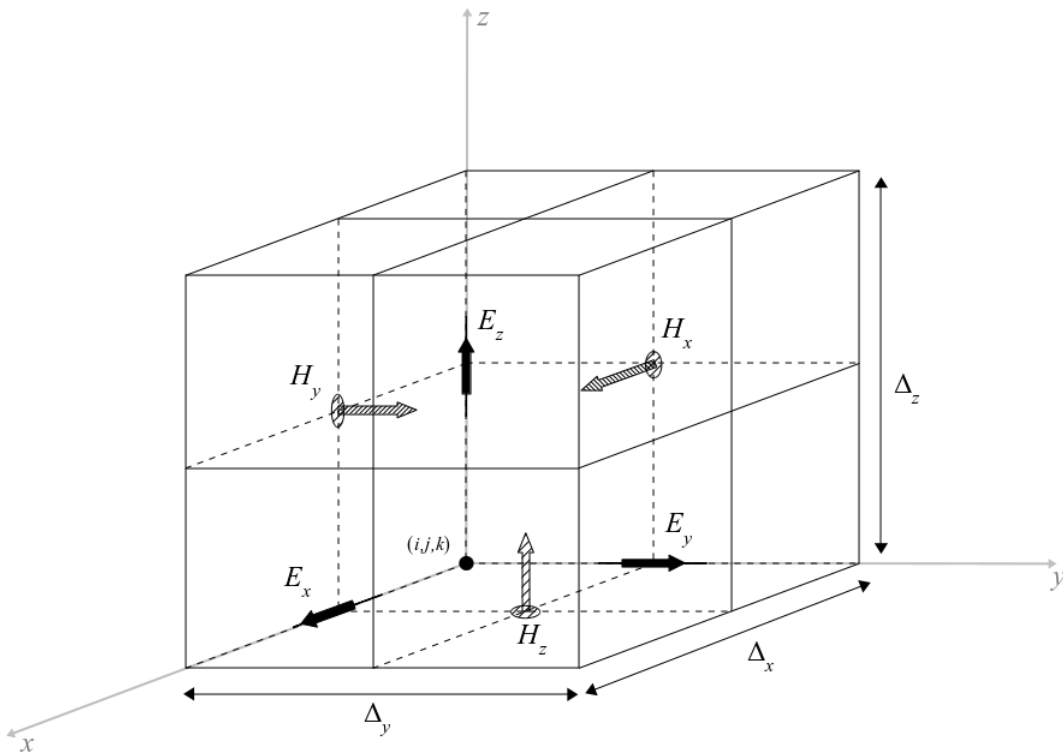


Figura 1: Representação das componentes de campos elétrico e magnético na Célula de Yee.

Para a verificação da estabilidade do método das diferenças finitas, utiliza-se o critério de *Neumann* que se faz necessário e suficiente para este caso, onde as equações possuem coeficientes constantes, condições de contorno periódicas, duas variáveis independentes e não utilizam mais do que dois níveis de tempo, atendendo assim as equações (3)-(8), como mostrado em ???. O valor do erro calculado a cada passo de tempo, que deverá sofrer um decaimento em relação ao passo anterior, está diretamente ligado aos incrementos espaciais  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  encontrados nas equações discretizadas de Maxwell, que por sua vez possuem uma ligação direta com o incremento temporal  $\Delta t$ . O método FDTD aplicado às equações rotacionais de Maxwell causam efeitos que promovem a dispersão numérica em simulações

de propagação de ondas, causando uma alteração no valor de velocidade de propagação de onda no espaço livre  $c$ , que pode variar com o comprimento de onda utilizado, direção de propagação no *grid* e porção de discretização do espaço de análise. Para isso, um critério prático para a obtenção do passo de tempo da simulação é adotado, de forma que:

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{min}}{10} \quad (19)$$

onde  $\lambda_{min}$  é o menor comprimento de onda significativo presente no sistema, representado por um tamanho mínimo de dez células [14]. Definido o valor de  $\Delta$ , o incremento temporal da simulação pode ser obtido através da condição de Courant [15]:

$$\Delta_t \leq \frac{1}{v_{max} \sqrt{\frac{1}{\Delta_x^2} + \frac{1}{\Delta_y^2} + \frac{1}{\Delta_z^2}}} \quad (20)$$

que define a máxima distância que a onda irá percorrer dentro da célula computacional sem atingir regiões adjacentes, causando assim erros por instabilidade numérica. Tomando como base que a célula computacional utilizada neste trabalho é de natureza cúbica, pode-se assumir que  $\Delta x, \Delta y, \Delta z = \Delta$ . Logo, a equação anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta_t \leq \frac{\Delta}{v_{max} \sqrt{3}}. \quad (21)$$

A equação (19) mostra que a máxima distância percorrida pela onda propagante dentro da célula computacional analisada é a diagonal do cubo da célula [14].

## 2.6 A Formulação do Fio-Fino (*Thin-wire*)

Entre as inúmeras possibilidades de se representar uma estrutura metálica utilizando o método FDTD, existe uma que é a de se modelar condutores cilíndricos tais como cabos de aterramento, suportes metálicos ou até mesmo antenas do tipo dipolo que possuem diâmetros muito menores que as dimensões de uma célula unitária de Yee. A grande vantagem da utilização dessa técnica reside no fato de se evitar altos níveis de discretização da região de análise para um determinado problema, que resultaria em um extenso *grid*

computacional, ocupando um espaço bastante grande na memória de um computador, tornando assim inviável a solução via *software* com os *hardwares* disponíveis atualmente [14]. Ao invés disso uma atualização nas componentes dos campos elétrico e magnético nas células adjacentes a essa estrutura cilíndrica pode ser feita, gerando assim um novo modelo para análise, promovendo uma economia de recursos computacionais.

A primeira ideia de se modelar um condutor cilíndrico fino em um *grid* FDTD foi proposta por Umashankar *et al.* no ano de 1987 [16], porém, esse modelo não era adequado para análise de transitórios em sistemas de baixa frequência, como por exemplo, aterramento elétrico, pois não considerava parâmetros relativos à permissividade e permeabilidade, e sim, promovia a anulação da componente axial do campo elétrico da estrutura para a obtenção de um raio equivalente  $r_0$ , utilizando assim um valor de campo magnético modificado. Em 2002, um novo modelo estabelecido por Noda e Yokoyama [17] mostrou ser muito mais preciso para essa aplicação, pois inseria nas equações usuais do FDTD (16) a (15) os parâmetros relativos à impedância do fio. De posse dessa ideia, é correto afirmar que, para que houvesse essa correção dos campos, um parâmetro  $m$  deveria ser inserido de modo a se alterar a permissividade de um meio  $\epsilon$  para um valor modificado  $m.\epsilon$ . No caso da permeabilidade, o valor de  $\mu$  passaria a ter um valor modificado  $\mu/m$ . As Figs. 2a e 2b mostram o corte transversal de uma estrutura fina com características cilíndricas de raio  $r$  alinhadas ao longo do eixo  $z$ , onde a Fig. 2a mostra as componentes  $E_x$  e  $E_y$  de campo elétrico nas 4 células de Yee em torno da estrutura fina, em um meio com permissividade  $\epsilon$  e a Fig. 2b mostra as componentes  $H_x$  e  $H_y$  do campo magnético das mesmas 4 células, onde o meio tem permeabilidade  $\mu$ . Já nas Figs. 2c e 2d, é possível visualizar os campos elétrico e magnético para a estrutura semelhante, porém, o raio do condutor é igual a  $r_0$  (raio intrínseco) e os parâmetros de meio modificado  $m.\epsilon$  e  $\mu/m$ , respectivamente, todas as duas alinhadas em  $z$ .

Levando em consideração uma célula cúbica onde  $\Delta x, \Delta y, \Delta z = \Delta$ , o processo de se levar a zero a componente do campo elétrico axial geraria apenas um condutor fino de raio  $r_0 = 0,23\Delta$ . Na verdade, para que haja a geração de um condutor de raio  $r$ , essas componentes devem ser calculadas utilizando-se a permissividade modificada  $m.\epsilon$  e, para as componentes de campo magnético  $H_{x1}$ ,  $H_{x2}$ ,  $H_{y1}$  e  $H_{y2}$ , deve-se utilizar a permeabilidade modificada  $\mu/m$ , além de zerar-se a componente axial  $E_z$  do fio [5]. //

Para a obtenção desse fator  $m$ , é necessário se igualar as componentes de campo

elétrico mostradas nas Figs. 2a e 2c, e as de campo magnético mostradas nas Figs. 2b e 2d. Delimitando-se um contorno C em torno das quatro células mostradas nas Figs. 2a a 2d, que correspondem à periferia da nova estrutura metálica a ser modelada, pode-se primeiramente dizer que a distância entre o centro do cilindro e o contorno C é igual a  $\Delta$ . Como o valor de  $\Delta$  é considerado pequeno, as componentes normais do campo elétrico, presente na estrutura, podem ser tomadas como funções que variam com o inverso da distância radial. Ao invés de uma superfície quadrada, se a circulação C for considerada uma superfície cilíndrica equivalente de raio  $\Delta$ , o valor de  $m$  pode ser determinado através da igualdade entre as capacitâncias dessas duas superfícies de modo que:

$$\frac{2\pi\epsilon}{\ln(\Delta/r)} = \frac{2\pi m\epsilon}{\ln(\Delta/r_0)}. \quad (22)$$

De posse dessa informação, o fator de correção  $m$  pode ser representado na forma:

$$m = \frac{\ln(\Delta/r_0)}{\ln(\Delta/r)}. \quad (23)$$

Da mesma forma, o fator  $\mu/m$  pode ser encontrado quando se iguala a indutância presente nos casos mostrados nas Figs. 2b e 2d. É importante lembrar que toda essa teoria de campos elétrico e magnético é baseada em campos eletrostáticos e magnetostáticos na periferia do condutor, localizados dentro da circulação C. Sendo assim, tomando como base o valor intrínseco de  $r_0$  onde as componentes de campo elétrico axiais mostradas na Fig. 2a são igualadas a zero, se uma corrente de valor estável igual a  $I_0$  for injetada no condutor analisado, os valores de campo elétrico obtidos ao longo da direção radial da estrutura obedecem os valores dados no plano  $xy$ :

$$E(x_0, y_0) = 2,206.E(x_{(0+1)}, y_0) \quad (24)$$

onde  $E(x_0, y_0)$  é o valor de campo elétrico para um cilindro de raio  $r_0$  centrado em um ponto  $(x_0, y_0)$  e  $E(x_{(0+1)}, y_0)$  é o valor de campo elétrico para um cilindro em uma célula deslocada de uma unidade no eixo  $x$ , considerando uma célula cúbica de aresta  $\Delta$  e incremento temporal  $\Delta_t$  calculado pelo valor de 70% do resultado obtido pela equação (20). Nesse caso, o valor de 2,206 leva em conta implicitamente os efeitos causados pela



discretização inerente ao método no tempo e no espaço. Analiticamente, quando uma corrente de regime  $I_0$  é injetada no condutor analisado, o campo elétrico encontrado na vizinhança é dado por:

$$E = \frac{3\Delta}{2x} \quad (25)$$

onde o campo elétrico calculado é inversamente proporcional à distância radial  $x$  medida a partir do centro do cilindro. Em outras palavras, é correto afirmar que, se  $E_0$  representa o campo elétrico calculado na posição  $x = 0$  e  $E_1$  representa o campo elétrico calculado na posição  $x = \Delta$ , é correto afirmar que a diferença de potencial entre esses dois pontos calculada pelo método FDTD resulta em um valor igual a  $2,206\Delta$ . Por outro lado, se tomarmos a expressão analítica apresentada pela equação (25), o potencial obtido entre esses dois pontos é dado pela integral de linha:

$$\int_{r_0}^{\Delta} E \cdot dx = \frac{3\Delta}{2} \cdot \ln \frac{\Delta}{r_0}. \quad (26)$$

Igualando a expressão acima a  $2,206\Delta$ , obtem-se então:

$$r_0 \approx 0,2298\Delta. \quad (27)$$

que é o valor do raio intrínseco  $r_0$  do condutor em questão. Substituindo então a equação (27) na equação (23), obtem-se o valor final de  $m$ , como:

$$m = \frac{1,471}{\ln(\Delta/r)}. \quad (28)$$

Ao se analisar um meio condutivo utilizando a técnica do fio-fino, é possível também promover a implementação do parâmetro da condutividade  $\sigma$  [5]. Esse procedimento é aplicado ao se utilizar, por exemplo, uma antena mono-polo ou dipolo imersa em alguma substância, assim como hastes e/ou cordoalhas de cobre inseridas no solo compondo um sistema de aterramento. Da mesma forma como foram feitas as correções dos parâmetros  $\epsilon = m \cdot \epsilon_s$  e  $\mu = \mu_s/m$ , pode-se dizer que a condutividade modificada pode ser representada

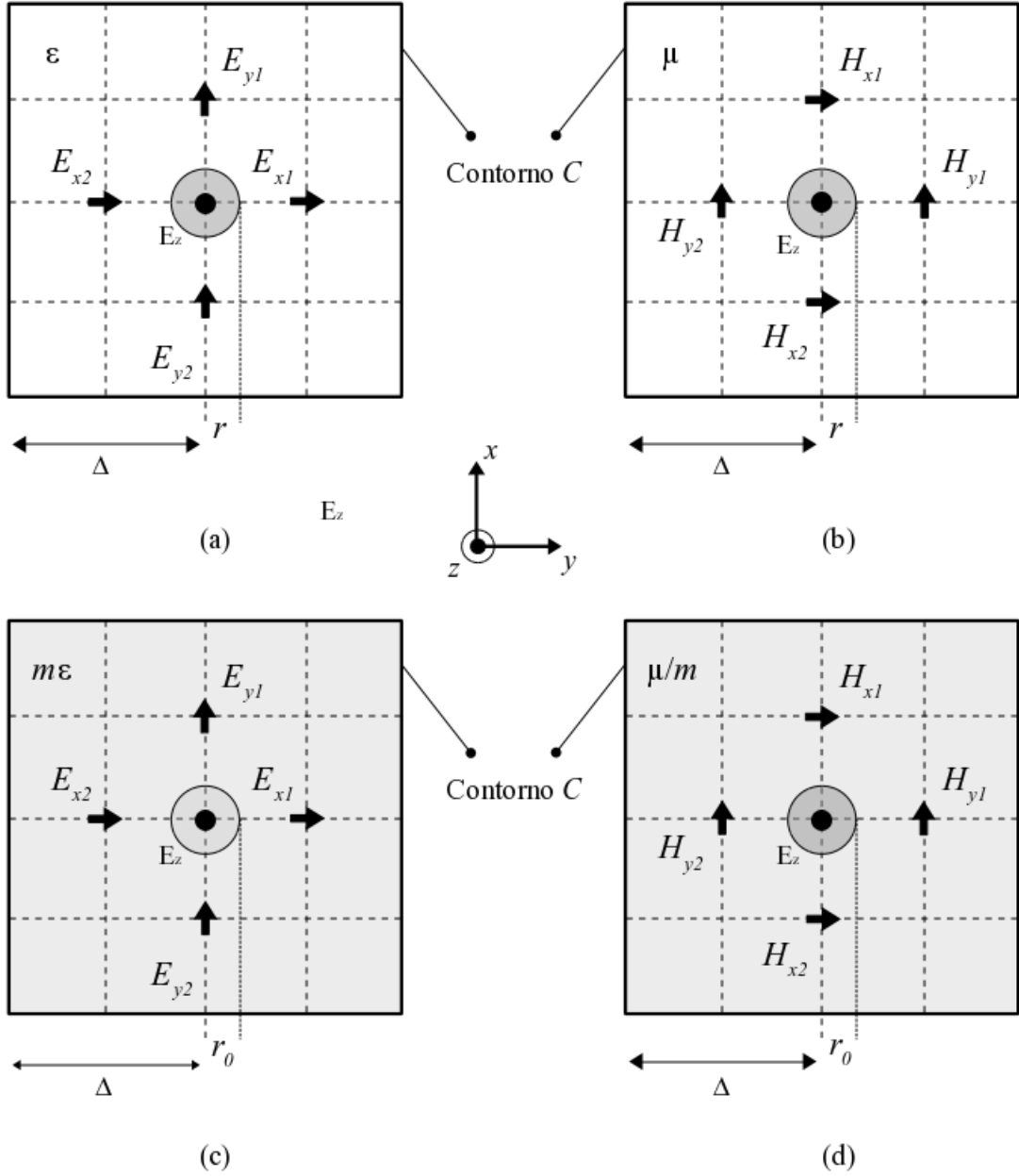


Figura 2: Representação do fio-fino (*thin-wire*) e suas configurações adjacentes de componentes de campo elétrico e magnético.

como  $\sigma = m \cdot \sigma_s$  onde  $\epsilon_s$ ,  $\mu_s$ , e  $\sigma_s$  são, respectivamente, a permissividade, permeabilidade e a condutividade original do meio onde o fio-fino se encontra. Dessa forma, pode-se escrever a forma final dos parâmetros modificados do meio, acima mostrados, da seguinte forma:

$$\epsilon = \epsilon_s \frac{\ln(1/0, 23)}{\ln(\Delta)} \quad (29)$$

$$\mu = \mu_s \frac{\ln(\Delta)}{\ln(1/0, 23)} \quad (30)$$

$$\sigma = \sigma_s \frac{\ln(1/0, 23)}{\ln(\Delta)}. \quad (31)$$

## 2.7 A UPML em Coordenadas Cartesianas

Na solução de problemas numéricos relacionados ao eletromagnetismo utilizando o método FDTD, um dos grandes desafios encontrados está relacionado em como truncar o domínio de análise modelado computacionalmente. Esse procedimento se faz necessário devido ao fato de que o método encontra de maneira simples e direta os valores das componentes dos campos elétrico e magnético em todos os pontos do domínio de análise, e que cada um desses pontos ocupa um determinado espaço na memória de um computador. Sendo assim, existe a necessidade de se tornar finito esse número de pontos, ou seja, o espaço computacional a ser analisado deve ser grande o suficiente para envolver a estrutura que se deseja analisar, porém limitado por motivos de recursos computacionais finitos. Preferencialmente, essa limitação é feita nas bordas ou fronteiras, a fim de se evitar reflexões indesejadas e não naturais de ondas incidentes nas bordas dessa região. A limitação desse espaço analisado tem como intuito fazer com que cada onda incidente na fronteira sofra uma determinada atenuação suficientemente grande para que essa onda não retorne à região de análise, simulando assim uma continuidade ao infinito do espaço analisado.

De posse dessa ideia inicial, várias técnicas para a truncagem do domínio de análise foram desenvolvidas para o método FDTD. Inicialmente foram criadas as ABCs ou *Absorbing Boundary Conditions*, técnicas analíticas de primeira e segunda ordens desenvolvidas por Mür [18], a técnica de Higdon [19] e a ABC desenvolvida por Liao [20], que não possuem derivação direta das equações de Maxwell mostradas nas equações (16) a (15). A implementação das ABCs nesse caso torna-se limitada pois a discretização das equações de Maxwell é apresentada utilizando a forma das diferenças finitas centradas, que necessitam de informações de campos que se encontram a meia célula para cada lado do ponto de observação [14]. Por fim, a melhor implementação computacional de um material absorvente foi feita por *Holland* [21] que utilizou um meio absorvente convencional, sem perdas e não dispersivo que promovia a atenuação apenas de ondas eletromagnéticas

com incidência necessariamente perpendicular. Considerando como um todo, a utilização das ABCs no eletromagnetismo computacional conseguiu apenas aplicações bastante limitadas, onde uma formulação mais elaborada da truncagem do domínio de análise era necessária.

Posterior ao surgimento dessas técnicas de *ABCs*, surgiu a ideia de tentar se substituir os limites da região de análise por um material “absorvente” que, ao ser modelado, que pudesse dar às ondas eletromagnéticas incidentes nesse material, o mesmo tratamento que fisicamente uma câmara anecóica apresenta na absorção de uma onda incidente. Para esse material modelado, deu-se o nome de PML ou *Perfectly Matched Layer*. Em sua essência, a PML nada mais é do que um meio absorvente com algumas células computacionais de largura que evita reflexões das ondas nela incidentes dentro de toda gama de frequências existentes, mesmo que dentro da região de campo próximo de uma fonte de sinal ou de um agente que promova um espalhamento eletromagnético. Berenger [22] em 1994 foi o primeiro a desenvolver uma formulação matemática de um material altamente absorvente que foi considerada inovadora, pois a onda eletromagnética computacional que incidia no meio absorvente independia da frequência, ângulo de incidência e polarização. Além do mais, a formulação de Berenger era derivada das equações de Maxwell, onde cada vetor de campo era dividido em duas outras componentes ortogonais [22], gerando assim um conjunto de 12 equações de primeira ordem acopladas.

Dando prosseguimento ao trabalho de Berenger, muitos trabalhos como [23] e [24] deram validação ao desenvolvimento e implementação da PML, bem como sugestões de modificação em sua formulação para aprimorar seu desempenho, porém, Gedney publicou uma formulação de PML denominada de *Uniaxial Perfectly Matched Layer*, Fig. 3, também baseada nas equações de Maxwell, construindo um conjunto de equações que simulavam um meio material que utiliza tensores em suas permissividades e permeabilidades [4]. A introdução de perdas nos tensores resultou então em um meio absorvente perfeitamente casado, da forma que as equações de Maxwell no domínio da frequência podiam ser escritas como

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu[S]\mathbf{H} \quad (32)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon[S]\mathbf{E} \quad (33)$$

onde  $[S]$  é o tensor que representa as perdas nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Esse tensor pode ser

representado como sendo

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{S_y S_z}{S_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_x S_z}{S_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_x S_y}{S_z} \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde  $S_x$ ,  $S_y$  e  $S_z$  representam as anisotropias uniaxiais nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Já os parametros  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , representam as condutividades também nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , correlacionadas através da equação

$$S_k = 1 + \frac{\sigma_\gamma}{j\omega\epsilon}. \quad (35)$$

em que  $gamma$  representa a direção de análise considerada  $x$ ,  $y$  ou  $z$ . Ao se promover a discretização das equações (32) e (33), operações de convolução para transformação para o domínio do tempo terão que obrigatoriamente ser utilizadas devido à inclusão do tensor  $[S]$  nessas duas equações. Cálculos desse tipo normalmente implicam em um altíssimo custo computacional, aumentando assim o tempo de processamento do programa utilizado. Para contornar esse problema, foi efetuado o desacoplamento dos termos dependentes da frequência, definindo-se assim as seguintes relações constitutivas:

$$\mathbf{B}_x = \mu (S_y/S_x) \mathbf{H}_x, \quad (36)$$

$$\mathbf{B}_y = \mu (S_z/S_y) \mathbf{H}_y, \quad (37)$$

$$\mathbf{B}_z = \mu (S_x/S_z) \mathbf{H}_z \quad (38)$$

e

$$\mathbf{D}_x = \epsilon (S_y/S_x) \mathbf{E}_x \quad (39)$$

$$\mathbf{D}_y = \epsilon (S_z/S_y) \mathbf{E}_y, \quad (40)$$

$$\mathbf{D}_z = \epsilon (S_x/S_z) \mathbf{E}_z. \quad (41)$$

Quando esses termos são substituídos em (32) e (33), os resultados obtidos são equações que possuem fácil transformação para o tempo. Dessa forma, encontra-se o valor para cada componente dos vetores  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{D}$ , para posteriormente obter-se as componentes dos vetores  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{E}$ . As equações finais para a UPML então podem ser escritas de forma que

$$D_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = \left( \frac{2\epsilon_0\kappa_y - \sigma_y\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_y + \sigma_y\Delta t} \right) D_x|_{i+1/2,j,k}^n + \left( \frac{2\epsilon_0\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_y + \sigma_y\Delta t} \right) \cdot \quad (42)$$

$$\left( \frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta_y} - \frac{H_y|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta_z} \right)$$

$$E_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} = \left( \frac{2\epsilon_0\kappa_z - \sigma_z\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_z + \sigma_z\Delta t} \right) E_x|_{i+1/2,j,k}^n + \left[ \frac{1}{(2\epsilon_0\kappa_z + \sigma_z\Delta t)\epsilon} \right]. \quad (43)$$

$$\left[ (2\epsilon_0\kappa_x + \sigma_x\Delta t) D_x|_{i+1/2,j,k}^{n+1} - (2\epsilon_0\kappa_x + \sigma_x\Delta t) D_x|_{i+1/2,j,k}^n \right]$$

$$H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+3/2} = \left( \frac{2\epsilon_0\kappa_y - \sigma_y\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_y + \sigma_y\Delta t} \right) B_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - \left( \frac{2\epsilon_0\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_y + \sigma_y\Delta t} \right) \cdot \quad (44)$$

$$\left( \frac{E_z|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1} - E_z|_{i,j,k+1/2}^{n+1}}{\Delta_y} - \frac{E_y|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1} - E_y|_{i,j+1/2,k}^{n+1}}{\Delta_z} \right)$$

$$H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+3/2} = \left( \frac{2\epsilon_0\kappa_z - \sigma_z\Delta t}{2\epsilon_0\kappa_z + \sigma_z\Delta t} \right) H_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} + \left[ \frac{1}{(2\epsilon_0\kappa_z + \sigma_z\Delta t)\mu} \right]. \quad (45)$$

$$\left[ (2\epsilon_0\kappa_x + \sigma_x\Delta t) B_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+3/2} - (2\epsilon_0\kappa_x + \sigma_x\Delta t) B_x|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \right]$$

Na análise das equações apresentadas anteriormente, é interessante lembrar o fato de que o domínio de análise pode ser dividido em duas regiões: uma que representa uma região isotrópica e sem perdas a ser analisada, mostrada na Fig. 3, denominada de Região 1 (região de análise), e outra que compreende a UPML, contornada externamente por uma superfície de condução elétrica perfeita (PEC), denominada de Região 2. Ao se aplicar (32) e (33) para a Região 1 onde as condutividades  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são nulas, o tensor  $[S]$  que

é responsável pelas perdas transforma-se em um tensor identidade fazendo com que as equações da UPML recaiam nas equações tradicionais do FDTD (16) a (15). Na Região 2, as condutividades finalmente são inseridas e calculadas nas posições físicas de campo localizadas nas células de Yee [3]. Para a região da UPML localizada na parte inferior da Fig. 3, é possível dizer que

$$\sigma_{x(i-\frac{1}{2})} = \frac{|\sigma_{max(i+\frac{1}{2})} \Delta_{x-x_0}|^m}{d^m}, \quad (46)$$

onde nessa equação,  $d$  representa a espessura da UPML,  $x_0$  é a posição do *grid* computacional que define o início da UPML (somente para o caso mostrado na Fig. 3),  $m$  é a ordem do polinômio interpolador e  $\sigma_{max}$  é o máximo valor de condutividade dessa “parede” absorvente, que situa-se mais próxima à parede metálica. Teoricamente, quanto maior fosse o valor desse  $\sigma_{max}$ , melhor deveria ser o desempenho da superfície absorvente, porém, altos valores adotados para  $\sigma_{max}$  resultam em uma performance deficiente da UPML devido a erros decorrentes da discretização pelo método das diferenças finitas. Para um valor que satisfaça a condutividade  $\sigma_{max}$  da camada absorvente, utiliza-se [25]

$$\sigma_\alpha = \frac{1 + m}{150\pi\Delta_\alpha}. \quad (47)$$

As equações da UPML mostradas anteriormente são deduzidas em [14] e [22] e também apresentadas em uma abordagem completa de fácil compreensão em [25].

## 2.8 O Software LANE-SAGS

As simulações computacionais de alta complexabilidade requerem softwares cada vez mais poderosos, complexos e eficientes, dotados de interfaces gráficas (GUIs - *Graphical User Interfaces*) para sua melhor utilização. Em países em desenvolvimento como o Brasil, a utilização do software livre favorece bastante a criação de ambientes computacionais avançados, sem a necessidade da obtenção de licenças de alto custo para sua utilização. Mais importante do que a questão financeira, é a possibilidade que estudantes possuem de formular questões matemáticas e aplicá-las junto a ferramentas de desenvolvimento, conseguindo assim construir programas de acordo com sua necessidade, tornando-se livres de soluções proprietárias existentes no mercado [26].

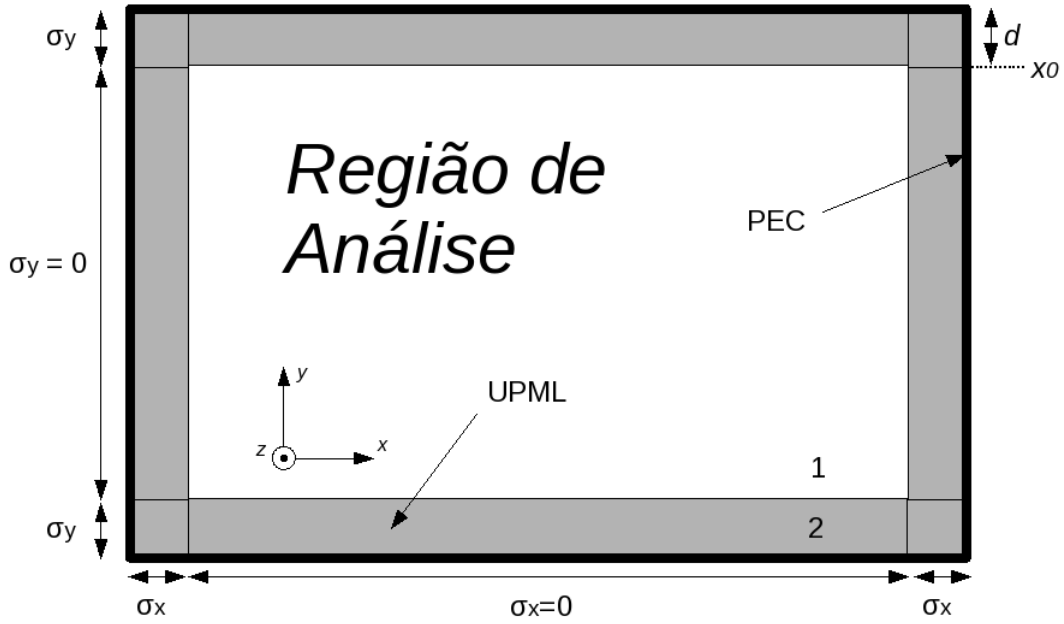


Figura 3: Representação esquemática de uma região de análise com implementação da UPML.

A incidência de erro humano é comumente detectada quando se trabalha na construção de estruturas complexas, especialmente quando empregado o processamento paralelo manual. Dessa forma, foram desenvolvidos na própria universidade: 1) uma rotina computacional em linguagem C para divisão automática do domínio computacional entre os processadores, 2) uma interface gráfica para usuários (GUI) em linguagem C++ e 3) um visualizador de ambientes com gráficos tridimensionais interativos, denominado glView, implementado em C com as bibliotecas OpenGL e GLUT.

A GUI e o glView, sincronizados com o método FDTD, constituem uma poderosa ferramenta para modelagem gráfica dos ambientes a serem simulados. A troca de mensagens no ambiente de memória distribuída é realizada através da utilização da biblioteca LAM/MPI [27]. A esse ambiente computacional, deu-se o nome de LANE-SAGS (*Synthesis and Analysis of Grounding Systems*), desenvolvido em [28]. O *cluster* configurado e utilizado neste trabalho é do tipo *Beowulf* [29], dotado de um computador *master* e três “nós” escravos, com compartilhamento de disco utilizando o serviço NFS (Network File System) [30] que concentra o disco principal no computador *master*, e o serviço NIS (*Network Information Service*) [31], que promove, em conjunto com o serviço rsh (*remote shell*) [32], a comunicação dos computadores entre si, sem a necessidade de login e senha para execução das rotinas. Nesse *cluster*, cada máquina possui dois processadores de dois núcleos cada, de 64 bits.



O *software* LANE-SAGS atualmente trabalha com coordenadas retangulares e possui a capacidade de inserir automaticamente no domínio de análise objetos tais como blocos metálicos, blocos de materiais diversos, condutores finos [5] e elementos de circuitos elétricos tais como resistores, capacitores e indutores, todos via interface gráfica e sem a necessidade de se entrar em contato diretamente com o código fonte do programa, conforme mostrado nas Figs. 4 a 7. Os parâmetros do método FDTD tais como tamanho de célula  $\Delta$ , tempo de simulação  $\Delta_t$ , dimensão da região de análise e número de máquinas a serem usadas no processamento do problema também são inseridos de maneira simples e direta no programa, que também mostra a quantidade de memória RAM a ser utilizada no processamento. (Fig. 8).

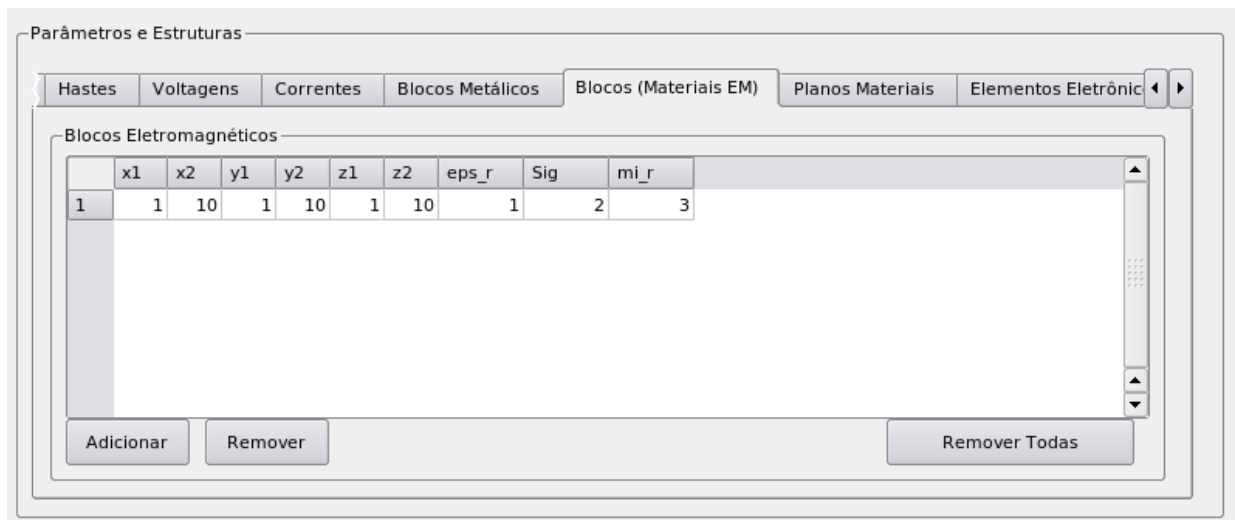


Figura 4: Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de blocos materiais.

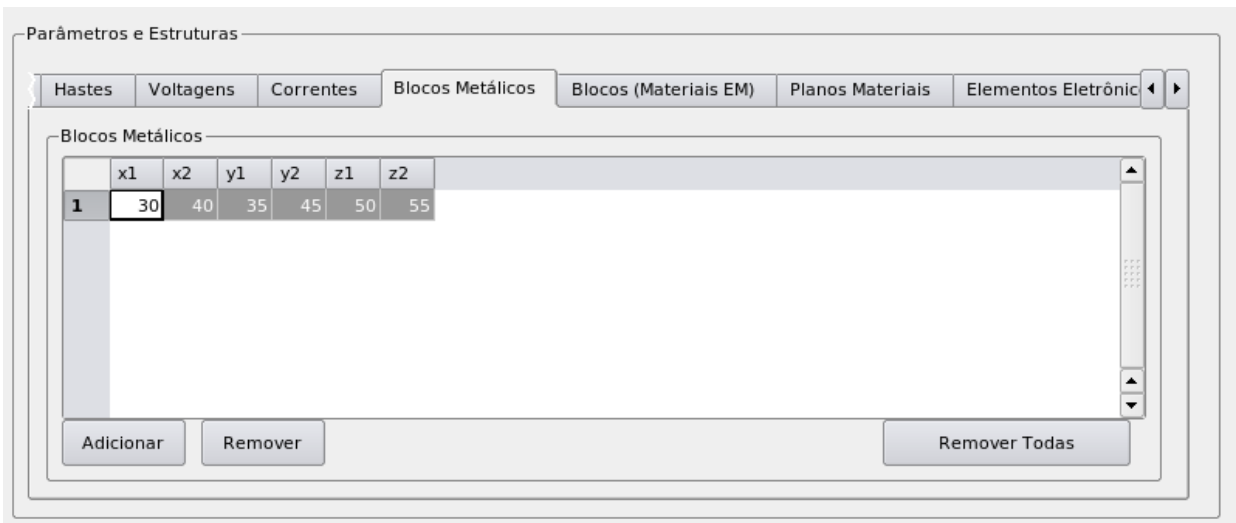


Figura 5: Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de blocos metálicos.

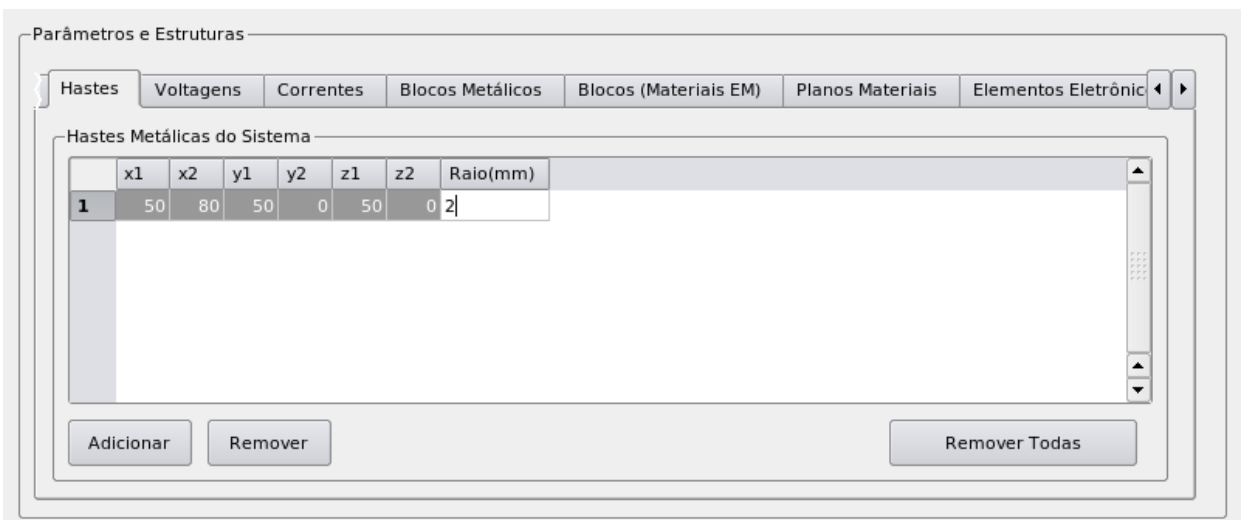


Figura 6: Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de hastes metálicas.

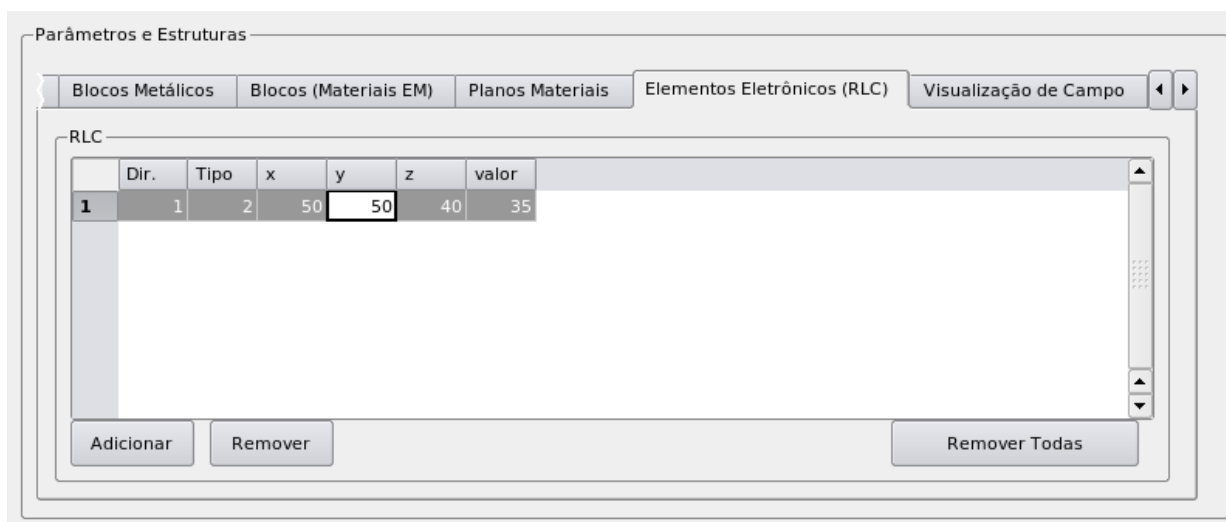


Figura 7: Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de inserção de elementos eletrônicos RLC.

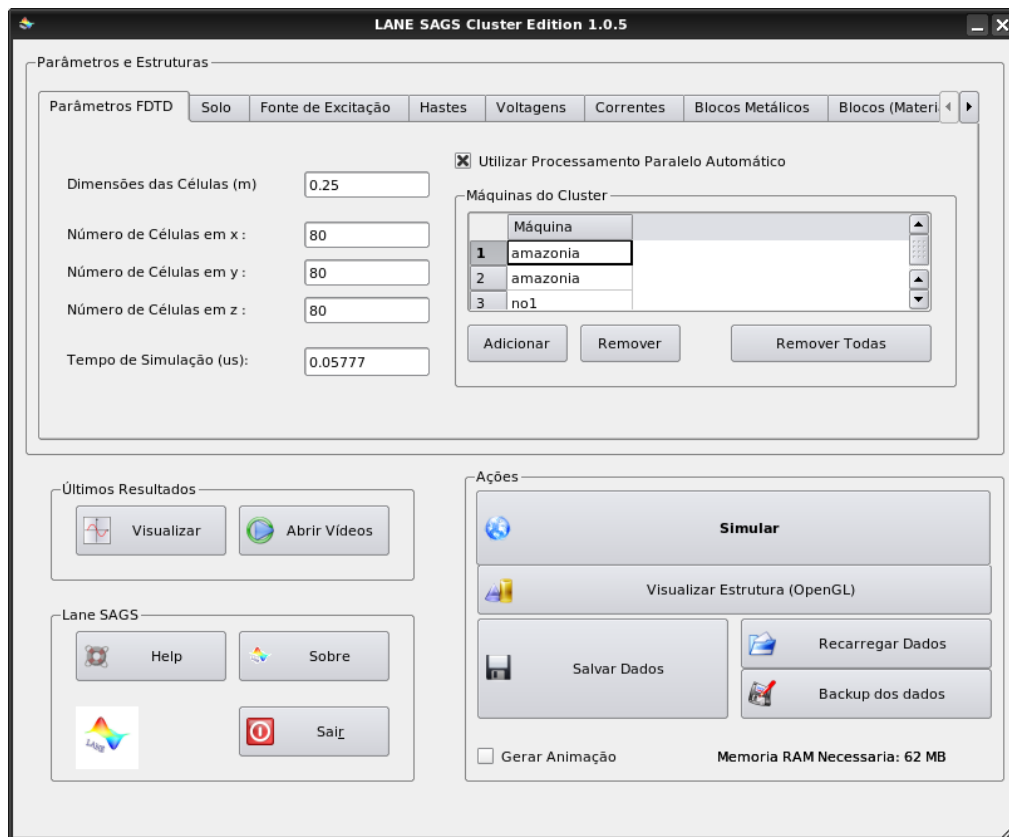


Figura 8: Interface gráfica do software LANE-SAGS. Janela de configuração dos parâmetros FDTD.

A divisão automática do domínio de análise entre as máquinas utilizadas no *cluster* é de suma importância para a solução de um problema computacionalmente grande. Quando modelado, o domínio de análise ou *grid* computacional é representado dentro do computador como um *array* com 3 dimensões de pontos, que no caso deste *software*, é alocado dinamicamente para a memória das máquinas. Em muitos casos, a quantidade de memória ocupada por esse *array* é muito maior do que a quantidade de memória disponível em um único computador.

Frente à essa situação, um algoritmo de paralelização foi criado para que a divisão desse domínio de análise fosse feita automaticamente entre as  $n$  máquinas presentes no *cluster*. Essa divisão é feita de forma que o domínio de análise seja dividido por  $(p/2)$  processadores na direção  $x$ , e em duas subregiões (ou subdomínios) na direção  $y$  conforme a Fig. 9, no caso do número de máquinas ser par. Caso o número de máquinas seja ímpar, o domínio de análise não sofre divisão na direção  $y$ . Tal procedimento pode ser feito utilizando-se uma rotina que utilize o conceito de quociente e resto [28].

Como foi visto anteriormente, a célula de Yee (Fig. 1) dispõe de três componentes de

campo elétrico, denominadas de  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$ , e de três componentes de campo magnético, denominadas de  $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ . Essa divisão é feita no plano  $xz$  da Célula de Yee com as componentes  $H_x$ ,  $H_z$ ,  $E_x$  e  $E_z$ . Já no plano  $yz$ , a troca é feita utilizando as componentes  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $E_y$  e  $E_z$ , todas entre processadores “vizinhos”. No caso dos subdomínios centrais que contêm a UPML, o “material” absorvedor encontra-se nas células iniciais de  $y$  para os sub-somínios (1) a  $(p/2 - 2)$ , e nas partes finais de  $y$  para os sub-dominios  $(p/2 + 1)$  a  $(p - 2)$ . No caso em que a parede absorvente é nos cantos (sub-domínio (0),  $(p/2 - 1)$ ,  $(p/2)$  e  $(p - 1)$ ), a configuração é feita de forma diferenciada [28].

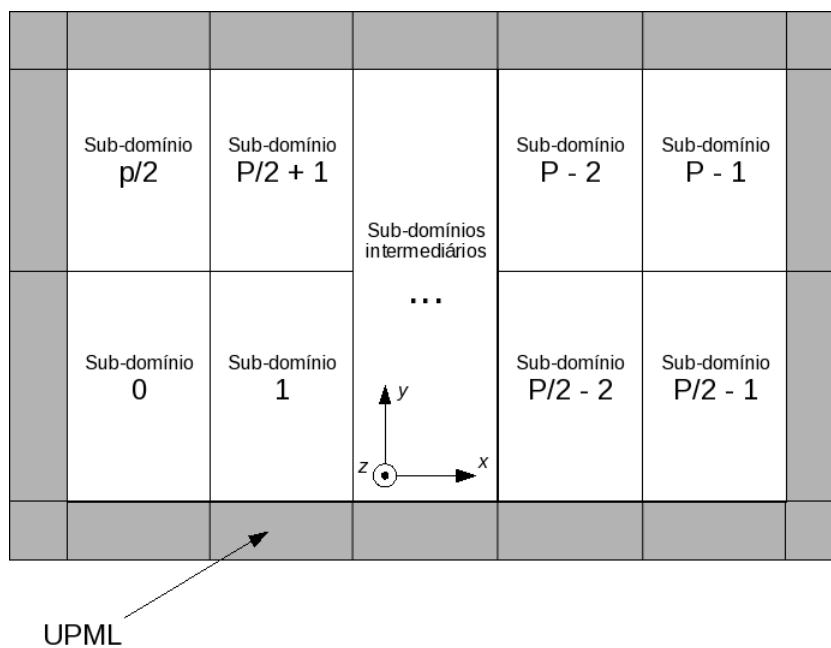


Figura 9: Esquema de divisão dos subdomínios na paralelização automática.

De posse dessa configuração, o programa gera um espaço livre computacional, somado a um solo de profundidade definida pelo usuário na interface gráfica. No momento da inserção de uma haste ou bloco material, o programa divide adequadamente quais pontos dessas estruturas cada máquina irá processar. No final do processamento de cada passo de tempo da simulação, cada máquina do *cluster* envia para o servidor principal seu conteúdo de dados (apenas o necessário) que foi processado para que os resultados sejam agrupados e o domínio de análise seja montado novamente fornecendo assim valores de medidas de tensão, corrente ou gráficos de curva de nível. É importante salientar que todos os valores obtidos no processamento paralelo da simulação são exatamente os mesmos obtidos na implementação *serial* (não paralela) do programa [28].

## 3 TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### 3.1 Motivação do Estudo do Fenômeno

Dentre as principais causas de desligamentos não programados em redes de distribuição de energia elétrica, uma das que merece destaque é a que se refere à ocorrência de surtos de tensão causados por descargas atmosféricas. Tal fenômeno, além de remeter a trans-tornos de menor ordem como por exemplo uma interrupção temporária de uma jornada de trabalho, pode causar sérios danos a equipamentos elétricos, em especial eletrônicos e de telecomunicações, sem contar a existência do risco de possível choque elétrico em seres humanos que estejam em contato com algum desses equipamentos, seja no trabalho ou até mesmo dentro de casa ao se executar uma simples tarefa doméstica. Tal fato é devido aos surtos induzidos nas linhas de baixa tensão decorrentes das descargas atmosféricas comumente se propagam através dos condutores da linha, chegando assim às unidades consumidoras finais. Esses efeitos que decorrem das descargas atmosféricas podem ser atribuídos a dois principais fatos: a incidência direta da descarga sobre a linha de baixa tensão ou a incidência da descarga em uma região localizada próxima à essa linha, fazendo com que um campo eletromagnético induzido se propague até ela gerando assim uma tensão induzida em seus condutores em relação ao solo. Esse fato apresenta uma probabilidade muito maior de ocorrência, elevando assim ainda mais a relevância do estudo.

Paralelamente a isto, é bastante interessante notar que o setor de telecomunicações se expande cada vez mais no mundo todo e em especial no Brasil, e um desses setores que sofre maior expansão é o de telefonia celular. O crescente número de operadoras oferecendo uma grande diversidade de serviços, aliado à preocupação com a qualidade de cobertura do sinal tem promovido a inserção de estruturas relativamente elevadas, entre 30 e 50 metros, no meio urbano atuando como Estações Rádio-Base (ERBs). Essas estruturas possuem normalmente a forma de uma torre com base triangular ou retangular, que em sua porção mais elevada possui suportes metálicos relativamente finos para a fixação

de antenas de telefonia, constituindo assim um ponto preferencial para a incidência de descargas atmosféricas. Além disso, é interessante salientar que o posicionamento dessas ERBs dentro do espaço urbano favorece a indução de surtos em linhas de baixa tensão no momento em que essa estrutura é atingida por uma descarga devido ao fato de que normalmente, essas torres estão posicionadas a não mais do que 30 metros de distância dessas linhas.

De posse dessa ideia, vários trabalhos como [33]-[34] realizaram estudos relacionados à indução de tensão em linhas de distribuição, inclusive criando modelos de análise bastante difundidos como é o caso do Modelo de Corrente de Retorno que utiliza um dipolo de Hertz simples [35]. Esses estudos investigam os mecanismos que promovem a ocorrência desse fenômeno e tentam quantizar os níveis de tensão induzida nessas linhas de energia. Neste trabalho, é apresentado um estudo do comportamento dessas tensões induzidas em linhas de baixa tensão frente a uma descarga atmosférica incidente em uma dessas torres de telefonia celular.

### 3.2 Origem e Formação das Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que ocorre devido ao acúmulo de cargas elétricas nas nuvens. Em média, a temperatura encontrada na base dessas nuvens é da ordem de  $-15^{\circ}\text{C}$ , e em seu topo a temperatura encontrada gira em torno de  $-60^{\circ}\text{C}$ . Essa diferença de temperatura da base para o topo da nuvem tem como consequência a formação de correntes de convecção ascendentes no centro da nuvem, e descendente nas bordas. Esse movimento gera um tipo atrito entre as partículas de água existentes na nuvem dando origem à formação de cargas elétricas. Normalmente, a concentração das cargas elétricas negativas se dá na base da nuvem, enquanto as cargas elétricas positivas tendem a se concentrar na parte superior da mesma. A base carregada negativamente induz a separação das cargas na terra, formando um círculo de cargas positivas e uma coroa de cargas negativas ao redor deste círculo. A descarga atmosférica pode então designar de um modo geral as descargas que ocorrem dentro dessas nuvens carregadas eletricamente (descarga intra-nuvem), as descargas que ocorrem entre duas nuvens próximas carregadas (inter-nuvem), e as descargas entre a nuvem e a terra. As nuvens de chuva na qual ocorrem esses fenômenos são denominadas de *Cumulus Nimbus*, e encontram-se a, em média, a 750 metros de altura do solo, possuindo uma altura de 10 a 15 km, com em

média 5 km de raio. É importante salientar que, apesar de nos dias atuais esse processo ainda não se encontrar totalmente esclarecido, já é possível afirmar que a grande maioria (por volta de 70%) das descargas atmosféricas são do tipo intra-nuvem ou inter-nuvem, e o restante ocorre entre a nuvem e a terra. Desses, 99% obedecem o caminho nuvem-solo, sendo que os 1% restantes ocorrem somente em montanhas bastante altas ou ainda, são gerados por foguetes [36] e [37]. As descargas atmosféricas também podem ser classificadas em termos do sinal da carga do *leader*, podendo essas serem negativas ou positivas, porém dados estatísticos apontam que 90% dessas descargas nuvem-solo são negativas.

Quando a intensidade do campo elétrico entre a nuvem e o solo é suficientemente grande para romper a rigidez dielétrica do ar, pequenas descargas elétricas são libertadas da nuvem seguindo pelo ar ionizado na direção do solo, formando um canal de descarga precursor chamado de *stepped leader*, que possui a função de criar um caminho favorável para a ocorrência da descarga. Quando esse *leader* se aproxima da superfície do solo, há um aumento na intensidade de campo elétrico do mesmo que dependendo do seu valor, poderá promover o rompimento da rigidez dielétrica do ar em suas proximidades, fazendo com que haja a formação de um *leader* ascendente, também chamado de *upward leader*. Considerando que o *stepped leader* possui uma polaridade que é inversa à do *upward leader*, quando ocorre a conexão ou *attachment* entre esses dois *leaders*, as cargas armazenadas neles são descarregadas. Nesse momento, há o aparecimento de duas ondas de corrente que possuem polaridades semelhantes, porém com sentidos opostos: uma que segue em direção ao solo, e outra que segue em direção à nuvem, com velocidade que varia entre  $0,3c$  e  $0,6c$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no espaço livre [38]. Quando a porção descendente da onda atinge a superfície do solo, uma parte desta onda penetra no mesmo, enquanto a outra parte é refletida com uma certa defasagem retornando à nuvem com uma velocidade um pouco maior à da primeira ascendente devido ao fato de encontrar um meio com maior ionização para se propagar. Após isso, o canal de descarga é desfeito, tendo o processo total em torno de alguns milissegundos. Neste trabalho, é de fundamental importância mencionar que a parcela mais importante para a análise do fenômeno da descarga atmosférica está centrada no momento em que ocorre o *attachment* entre o *upward leader* com o *stepped leader*, gerando as duas ondas de corrente ascendente e descendente. O processo é ilustrado na Fig. 10.



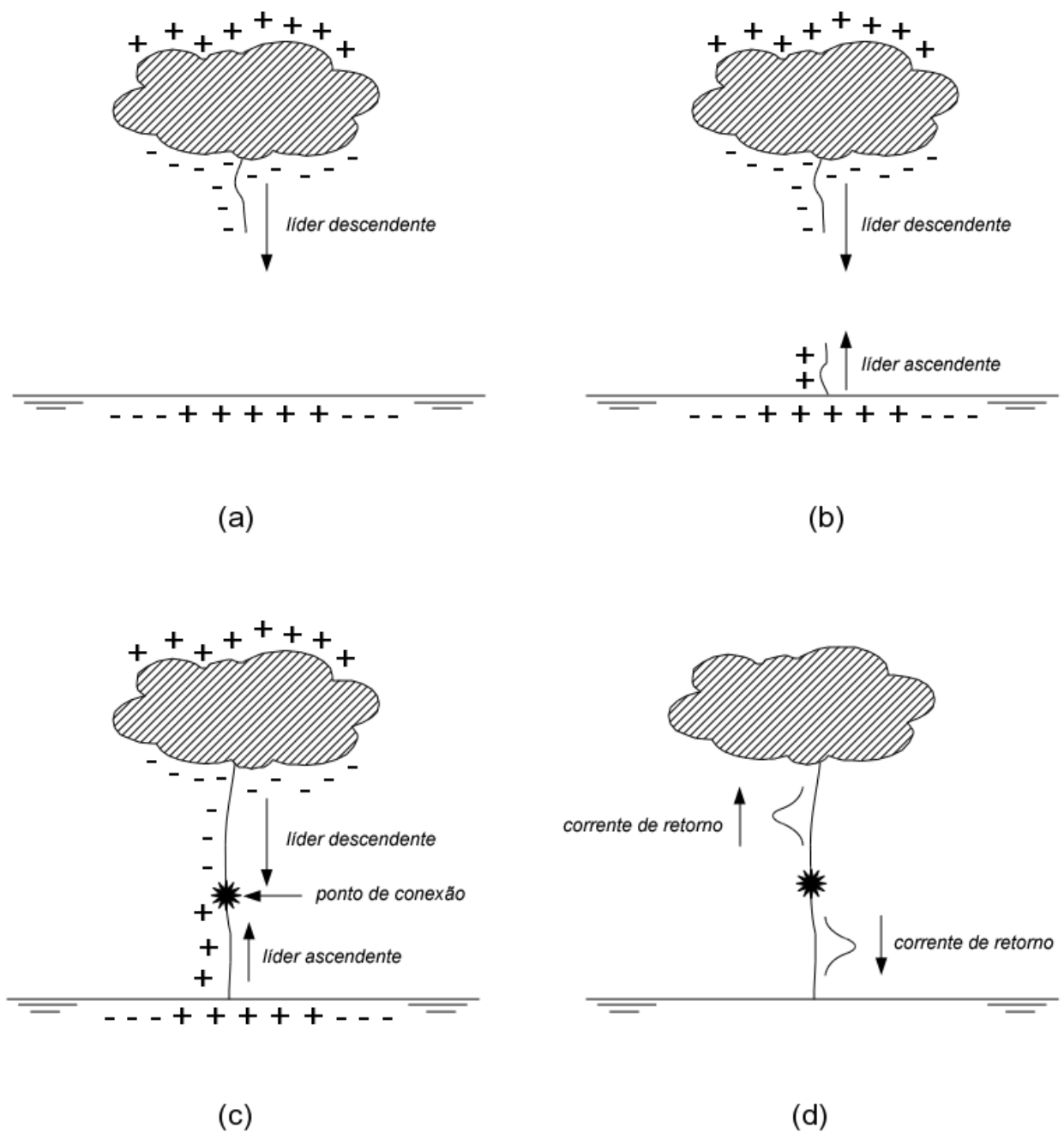


Figura 10: Ilustração simplificada do mecanismo de formação da descarga atmosférica.

### 3.3 A Tensão Induzida nas Linhas de Energia

Para as simulações consideradas nesse trabalho, utilizou-se uma onda superposta de injeção de corrente para a análise dos efeitos das descargas atmosféricas. Essa onda injetada possui uma forma triangular conforme mostrado na Fig. 11.

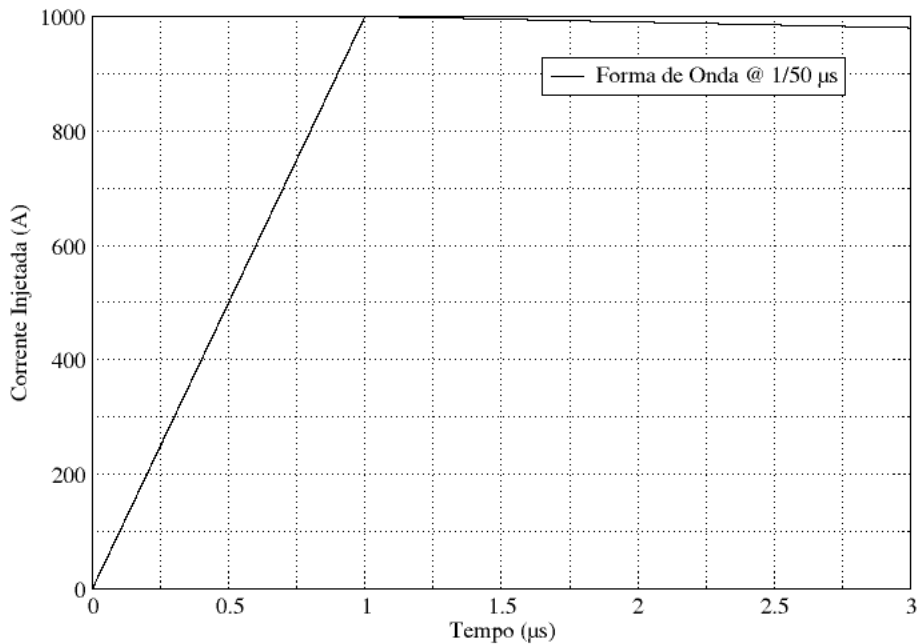


Figura 11: Forma de onda da corrente utilizada para simular a descarga atmosférica.

Essa onda de corrente pode ser caracterizada como uma onda de  $1/50 \mu s$  com 1 kA de valor de pico onde em sua porção inicial, quando o tempo vai de zero a  $1 \mu s$ , pode ser observado um caráter de rápida elevação em sua amplitude até que esta atinja seu valor máximo. Esse período que compreende essa elevação de amplitude da onda até seu máximo pode ser denominado de “tempo de subida”, o qual é definido como o tempo necessário para que a onda de corrente injetada atinja seu valor de pico. Após esse instante, pode-se caracterizar como tempo de meia cauda o tempo para que a onda de corrente atinja metade de seu valor máximo, no caso 500 A, quando o tempo considerado é igual a  $50 \mu s$ . A importância de se considerar a descarga atmosférica como sendo uma onda triangular, ou seja, possuindo um comportamento impulsivo, está centrada no fato de que essa onda apresenta uma variação bastante rápida no seu tempo de frente e uma

variação um pouco mais lenta em seu decaimento. Esse comportamento faz com que no momento da ocorrência de uma descarga atmosférica, um campo eletromagnético seja gerado devido à variação temporal da corrente elétrica. Isso pode ser explicado pelo fato de que no momento em que há o *attachment* entre os *leaders* ascendente e descendente, há a troca de cargas elétricas que possuem polaridades opostas no sistema, onde essas cargas são escoadas em um caminho compreendido como sendo da nuvem para o solo. Esse movimento de cargas por esse caminho pode ser entendido como uma variação da quantidade  $q$  de carga envolvida no sistema ao longo do tempo, representada por uma derivada  $dq/dt$ . Essa variação gera um campo magnético rotacional a esse percurso de corrente. Como a corrente de uma descarga atmosférica possui um caráter impulsivo, é correto afirmar que ela possui uma variação no tempo de forma que essa variação é representada por uma derivada  $di/dt = d(dq/dt)/dt$ , ou seja, a variação da corrente do sistema é representada pela segunda derivada da carga ao longo do tempo. Essa variação de corrente ao longo do tempo dá origem a um campo magnético variável, que, por sua vez, dá origem a um campo elétrico induzido, resultando em um campo eletromagnético que é irradiado no espaço.

Dessa forma, é correto afirmar que dois efeitos podem ser observados a partir do instante em que ocorre o fenômeno da descarga atmosférica. O primeiro deles está relacionado à geração de uma onda de tensão decorrente da “iluminação” direta da linha de distribuição de energia por parte do canal da descarga atmosférica. Já o segundo efeito é relacionado a uma onda de tensão propagante nos condutores da linha de baixa tensão a partir do momento em que esta é atingida pelo campo eletromagnético gerado pelo primeiro efeito decorrente da descarga atmosférica citado anteriormente. Esses dois efeitos dão origem finalmente à uma onda de tensão induzida que pode ser observada nos condutores das linhas de energia. De posse da informação que esses dois efeitos são gerados quando ocorre uma descarga atmosférica nas proximidades de uma linha de energia, é interessante lembrar que quanto mais afastada encontra-se a linha do local da descarga, mais a onda propagante sofrerá atenuação em sua amplitude. Com isso, pode-se afirmar que para pontos da linha de energia que se encontram muito distantes do local onde situa-se o canal de descarga, a tensão que é induzida na linha é essencialmente composta pela parcela da onda que se propaga ao longo desta.

## **3.4 As Interações Eletromagnéticas Entre o Canal de Descarga e as Linhas de Energia**

Para o caso em que as linhas de energia são constituídas por condutores isolados eletricamente do solo, é correto afirmar que existem quatro tipos de interações eletromagnéticas entre o canal de descarga e a linha no momento da ocorrência de uma descarga atmosférica quando há a indução de tensões nas linhas de energia. Essas interações eletromagnéticas, também chamadas de acoplamentos eletromagnéticos, podem ser classificadas como:

### **3.4.1 Acoplamento Elétrico**

Pode ser classificado como sendo de uma natureza capacitiva e condutiva. Quando localizado em um meio de baixa condutividade, como o ar, predomina essencialmente o efeito capacitivo.

### **3.4.2 Acoplamento Condutivo**

Está relacionado diretamente com o efeito da descarga elétrica com o solo, promovendo uma continuidade elétrica entre esses dois elementos. No canal, considera-se um efeito longitudinal de propagação da corrente de caráter indutivo e resistivo, e no solo, um comportamento caracterizado como sendo de propagação divergente. Essa divergência de corrente no solo promove uma distribuição de curvas de potenciais em sua superfície, que se estende até às imediações da linha promovendo assim uma indução de tensão nos condutores.

### **3.4.3 Acoplamento Magnético**

Nesse caso, a corrente de retorno que é gerada pela descarga atmosférica percorre um caminho compreendido entre o solo e a nuvem, gerando um campo magnético que “ilumina” a linha de energia, dando origem a uma força eletromotriz (FEM) no caminho fechado linha-solo. Como existe uma descontinuidade eletromagnética nesse percurso quando se consideram os condutores das linhas que não estão ligados diretamente à terra, as tensões associadas à essa FEM localizam-se no espaço vertical entre a linha e o solo.

#### 3.4.4 Acoplamento Irrradiado

Quando há a variação da corrente ao longo do tempo, ocorre a irradiação de um campo eletromagnético que tem origem no canal de descarga e interage diretamente com a linha de energia mesmo após o canal de descarga se extinguir (através da propagação do campo gerado). Sendo assim, há a indução de tensão no momento em que a onda eletromagnética irradiada ilumina a linha.

De posse dessas informações, é correto afirmar que essas quatro relações de acoplamento mútuo são a base da indução de tensões e correntes em linhas de energia quando um pulso eletromagnético é gerado decorrente de uma descarga atmosférica. É importante salientar também que o fenômeno de tensão induzida e corrente gerada se dá em função da impedância da linha para uma determinada faixa de frequência, denominada de impedância de surto, onde esse se propaga pelos condutores da linha de energia. Outro fator de suma importância diz respeito ao fato da existência de elementos adjacentes às linhas de energia analisadas. Estruturas presentes nas imediações das linhas de energia que possuem uma característica condutiva bem como uma característica dielétrica, influem diretamente no comportamento da onda propagada, a partir do local de onde ocorre a descarga atmosférica.

No momento em que a onda se propaga de sua origem e colide ou interage com estruturas presentes em seu caminho de propagação, fenômenos como reflexão, refração e difração ocorrem nesse caminho percorrido e distorcem de alguma forma seu perfil original, resultando em uma tensão induzida de características diferentes do pulso original emitido pela descarga atmosférica. Para essas interações entre objetos nos cenários analisados nesse trabalho, utilizou-se o método FDTD pois trata os fenômenos de reflexão, refração e difração, bem como a interação eletromagnética entre diferentes objetos presentes na região analisada de forma transparente e até mesmo bastante prática, pois a adição de novos itens nas simulações executadas, sem que se promova o crescimento da região de análise do problema, não aumenta em nenhum momento o tempo de cálculo dos resultados, mantendo-se fixo o tamanho da célula de Yee utilizada.

### 3.5 O Aterramento do Condutor Neutro e Sua Importância Nos Sistemas de Baixa Tensão

Em sistemas trifásicos de baixa potência, a alimentação que é fornecida pela concessionária de energia ao consumidor final tem como origem a saída de um transformador com secundário ligado em estrela, sendo o condutor neutro desse sistema obtido através do ponto central dessa ligação, conforme mostrado na Fig. 12.

Via de regra, pode-se considerar que o valor de tensão do neutro fornecido pela concessionária de energia é igual a zero (valor teórico), assumindo que há um perfeito balanceamento entre as cargas que estão acopladas a essas 3 fases. Caso haja um desbalanceamento dessas fases, o que ocorre na maioria dos casos, o valor de tensão encontrado no condutor neutro passa a ser diferente de zero. Essa flutuação de tensão ocorre normalmente quando em um mesmo *link* estão ligados consumidores com demandas de energia que apresentam uma disparidade considerável entre si, como por exemplo uma residência e um pequeno supermercado. Como forma de evitar essa flutuação de tensão no condutor neutro, costuma-se ligar (logo no ramal entrada do local a ser analisado) esse condutor a um pequeno sistema de aterramento ou até mesmo uma haste apenas, para que qualquer tensão que por ventura possa surgir, seja reduzida “escoando” para a terra.

Um outro ponto que merece bastante atenção é que, em locais que não possuem estruturas de grande altura nas imediações das linhas de baixa tensão como prédios ou torres metálicas, o condutor neutro passa a ter também um papel significativo na segurança dessas linhas de energia. Como esse condutor está normalmente situado acima dos outros três condutores fase presentes no sistema, o condutor neutro passa a ter o papel de cabo-guarda dos condutores fase. Dessa forma, no momento em que ocorre uma descarga atmosférica na linha de energia, há uma maior probabilidade de que ela atinja o cabo neutro. Supondo que o neutro encontra-se aterrado em alguns pontos ao longo da linha, a corrente injetada no neutro pelo canal de descarga terá maior facilidade de escoar para a terra (Fig. 13).

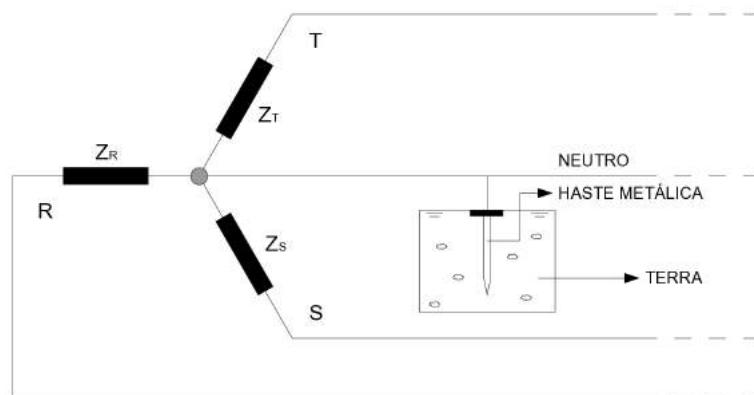


Figura 12: Topologia tipo “estrela” utilizada no secundário de um transformador de média para baixa tensão.

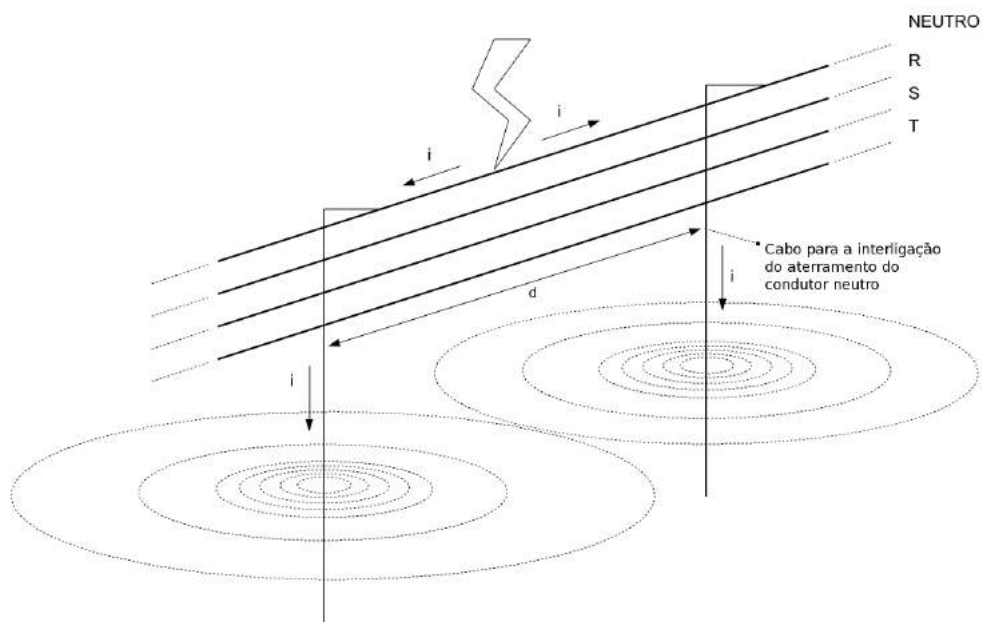


Figura 13: Esquema de aterramento do condutor neutro atuando como cabo-guarda, com pontos de terra espaçados por uma distância  $d$

## 4 ESTUDO DE CASOS E RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo, é encontrado um estudo de casos relacionados a simulações computacionais realizadas, no intuito de se compreender de que forma uma descarga atmosférica incidente em uma torre com geometria bastante próxima à realidade influencia na indução de tensões em linhas de energias remotas.

Em um primeiro momento é feita uma validação do software utilizado, onde se compara um caso já presente na literatura [1] com uma simulação executada com parâmetros idênticos à esta. Em um segundo momento é feita a comparação entre o tipo de solo utilizado na literatura com um tipo de modelagem de solo onde se considera os parâmetros eletromagnéticos do solo, como condutividade e permissividade. Finalmente em um terceiro momento, busca-se diversos tipos de soluções, como múltiplos pontos de aterramento do neutro, equipotencialização do solo e proposição de geometrias diferenciadas para as linhas de energia, no intuito de se tentar a minimização das tensões induzidas em linhas de baixa tensão provenientes da descarga atmosférica em uma torre modelada com geometria realística.

### 4.1 Caso I: Validação do software utilizado.

Para fins de validação do software utilizado nas análises mostradas a seguir, o problema mostrado em [1] foi reproduzido neste trabalho (Fig. 14). A estrutura analisada consiste em um bloco metálico de condutividade infinita que representa a torre da estação rádio-base e condutores metálicos, também de condutividade infinita, que representam as linhas de energia e estruturas de aterramento do condutor neutro a serem analisadas. Assim como mostrado em [1], o solo foi modelado com características de um condutor perfeito e a distância entre os dois pontos de aterramento considerados é de 150 m. Como pode ser visto nas Figs. 14 (vista transversal) e 15 (vista longitudinal), o condutor neutro está conectado ao solo através de um condutor metálico perfeito de raio igual a 12,7 mm, que possui na sua extremidade inferior um resistor de  $80 \Omega$ . A torre metálica modelada possui 50 metros de altura e está localizada a 20 metros da linha de energia. Cada um dos quatro condutores dessa linha de energia possui 15 mm de raio e penetram na UPML, promovendo um casamento de impedância nas extremidades e assim fazendo com que essa linha atue como uma linha de comprimento infinito.



A fonte utilizada neste trabalho para simular a corrente de descarga atmosférica é semelhante à utilizada em [1] e adaptada de [38], e será empregada neste caso e nos subsequentes. Matematicamente a fonte é modelada da seguinte forma:

para  $t \leq T_f$ :

$$I_s(t) = \frac{I_{max}}{T_f} t \quad (48)$$

para  $t > T_f$ :

$$I_s(t) = -\frac{I_{max} \cdot t}{10^{-4}} + 1010 \quad (49)$$

onde  $T_f = 10^{-6} \mu s$ ,  $I_{max} = 1000$  A, gerando assim um pulso com características de 1/50  $\mu s$ .

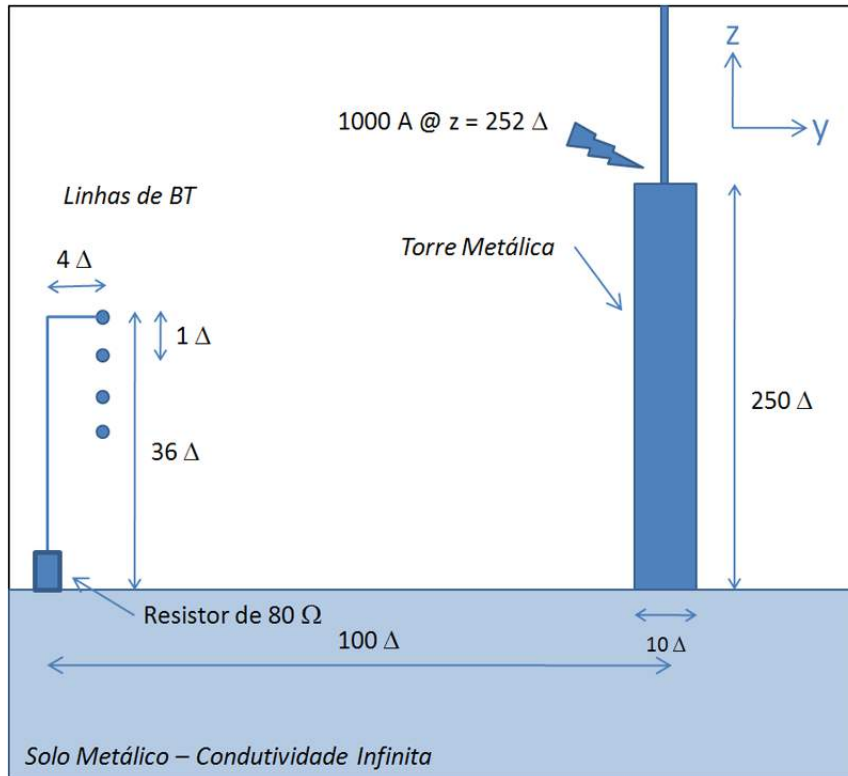


Figura 14: Visão geral do Caso I: torre retangular com canal de descarga, linhas de transmissão, pontos de aterramento e solo metálico conectado com resistores de  $80 \Omega$ , no plano  $yz$  (vista transversal).

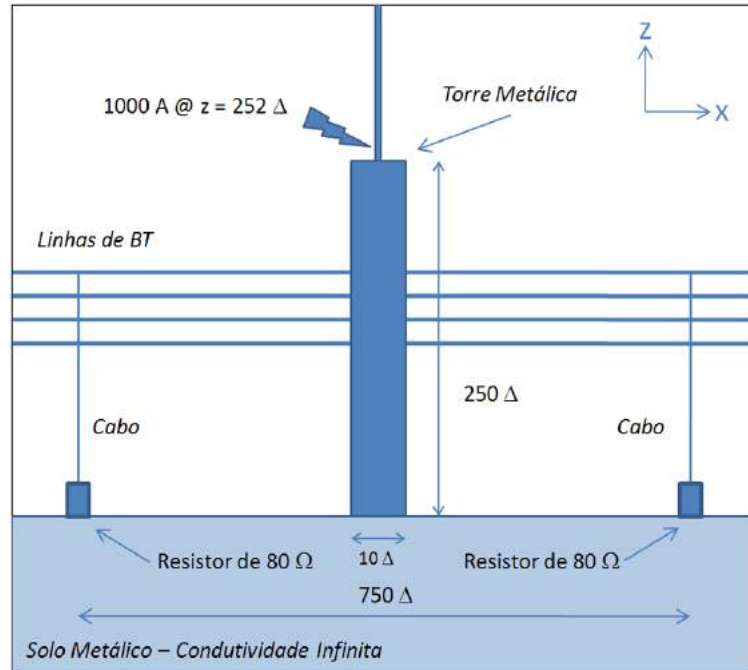


Figura 15: Visão geral do Caso I: torre retangular com canal de descarga, linhas de transmissão, pontos de aterramento e solo metálico conectado com resistores de  $80\ \Omega$ , no plano  $xz$  (vista longitudinal).

## 4.2 Caso II: Utilização de um modelo de solo com características eletromagnéticas reais, com linha de energia possuindo dois pontos de terra no neutro.

Da mesma forma que as Figs. 14 e 15 caracterizam o Caso I, as Figs. 16 e 17 mostram as vistas transversais e longitudinais, respectivamente, para o Caso II. Para ambos os casos, o grid computacional utilizado foi de  $840 \times 150 \times 320$  Células de Yee com formato cúbico, de aresta  $\Delta = 0,2\text{ m}$ , para todos os casos subsequentes. Para o Caso II, as características eletromagnéticas do solo utilizam parâmetros eletromagnéticos realistas, como segue:  $\sigma = 0,004\text{ S/m}$ ,  $\epsilon_r = 10$  e  $\mu_r = 1$ . As hastes de aterramento utilizadas possuem comprimento padrão de  $3\text{ m}$ , com raio de  $12,7\text{ mm}$ , resultando em uma Resistência de Terra ( $R_t$ ) de  $80\ \Omega$ , obtida através da equação de Sundae [39]. Em ambos os casos, o ponto de injeção de corrente na torre metálica modelada foi posicionado a duas células do topo da torre, e a corrente gerada nesse ponto foi obtida excitando-se as componentes do campo magnético em torno do canal de descarga da torre. Tal procedimento foi feito para todos os casos subsequentes.

As Figs. 18 e 19 mostram os resultados calculados para a tensão induzida, nos Casos I

e II, respectivamente, no plano representado pelas Figs. 14 e 16, no caminho de integração vertical compreendido entre a superfície do solo até cada condutor da linha de energia (menor caminho linha-solo perpendicular), conforme mostrado na Fig. 20. Esses valores de tensão induzida foram calculados para cada kA de corrente proveniente da descarga atmosférica injetada na torre, com o intuito de avaliar a influência das modelagens do solo utilizadas nos Casos I e II. É importante mencionar que os resultados mostrados na Fig. 19 revelam a importância de se considerar os parâmetros reais da terra e de se utilizar uma metodologia de onda completa (full wave) para a análise do problema. A comparação entre essas duas situações mostram aumentos consideráveis nas tensões induzidas no Caso II (solo realístico), quando comparado com o Caso I, havendo uma diferença máxima de aproximadamente 2,5 kV. Tal diferença é explicada pela atenuação que a descarga atmosférica sofre ao atingir a torre modelada e se espalhar pelo solo. Essa atenuação (que não é relevante no Caso I, pois o solo é considerado de condutividade infinita), aumenta a diferença de tensão no caminho de integração solo-linha. Sendo assim, a tensão entre solo-linha para o Caso II é superior à tensão solo-linha encontrada no Caso I.

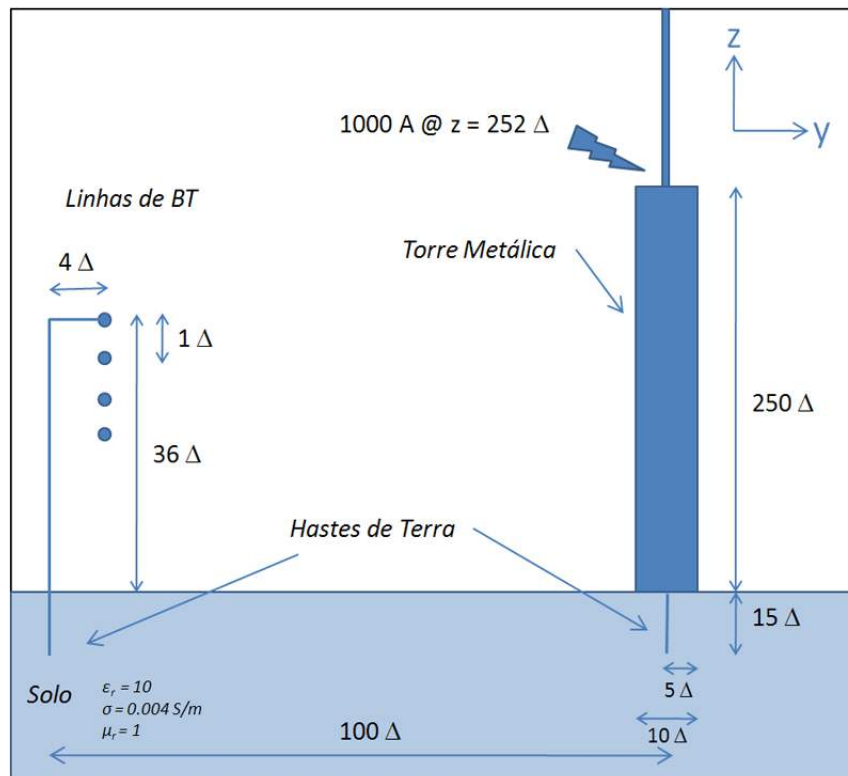


Figura 16: Visão geral do Caso II: torre retangular com canal de descarga, linha de transmissão e pontos de aterramento, no plano  $yz$  (vista transversal).

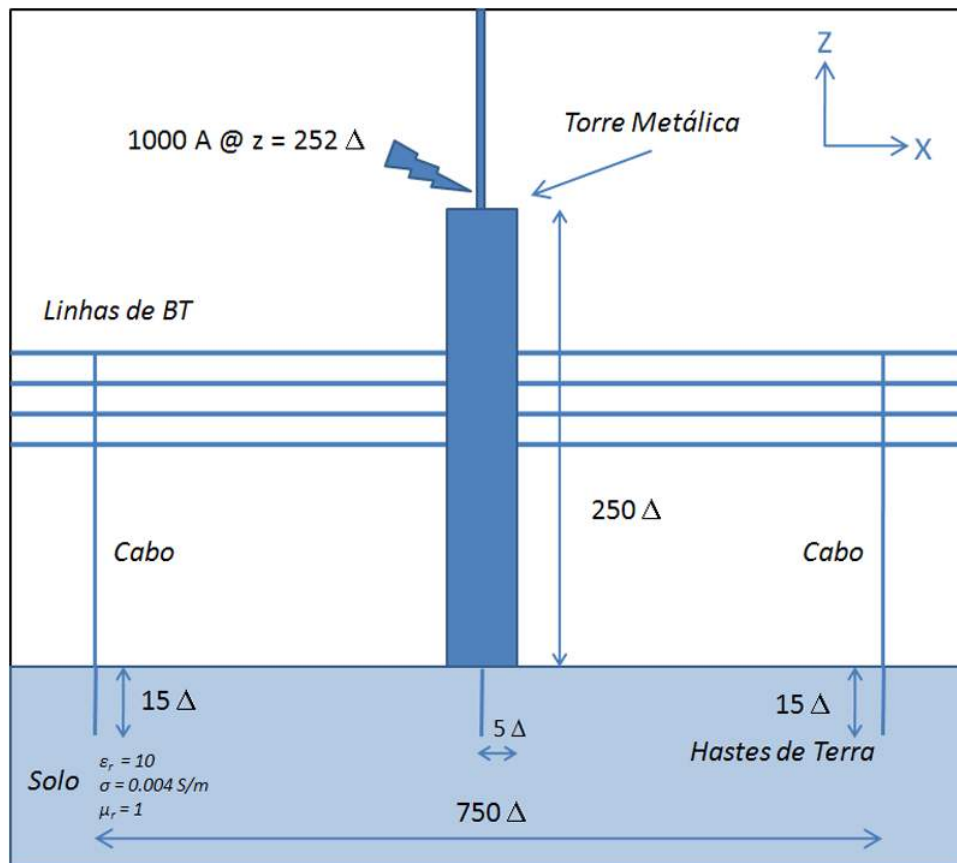


Figura 17: Visão geral do Caso II: torre retangular com canal de descarga, linha de transmissão e pontos de aterramento, no plano  $xz$  (vista longitudinal).

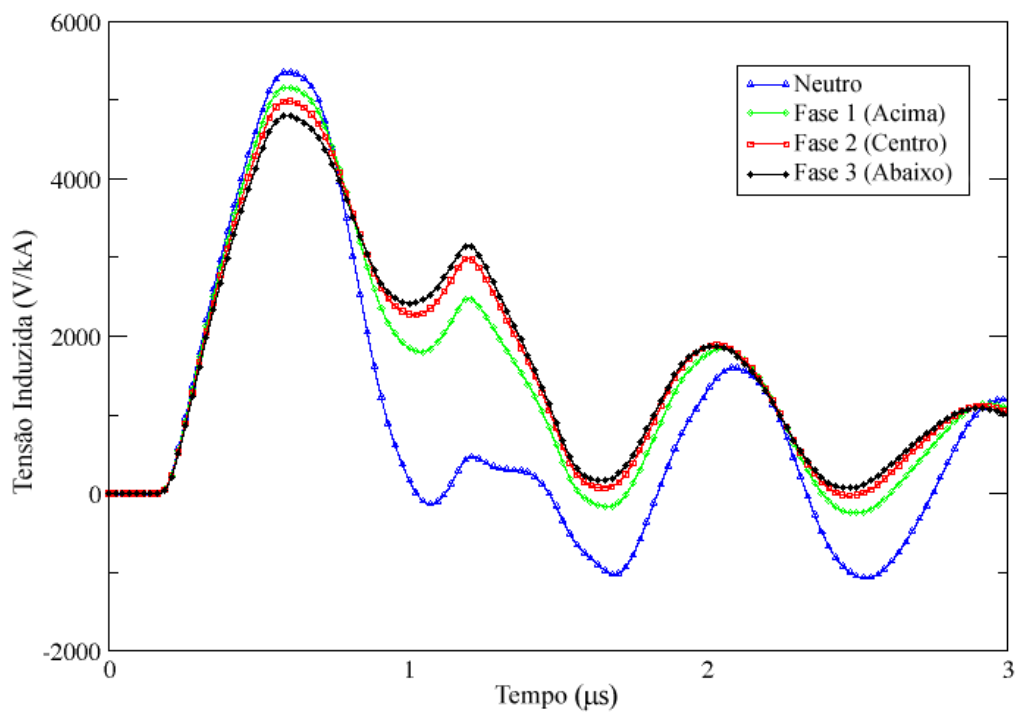


Figura 18: Resultados obtidos para o Caso I.

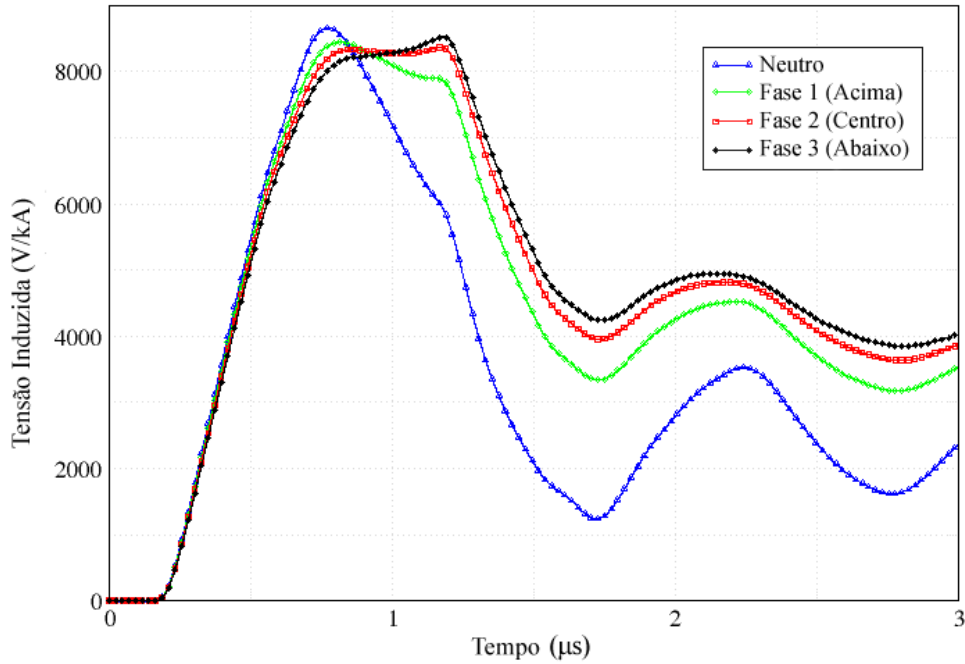


Figura 19: Resultados obtidos para o Caso II.

### 4.3 Caso III: Modelagem de torre metálica realística, container de equipamentos, malhas de aterramento e adição de uma linha extra de baixa tensão, com dois pontos de terra no condutor neutro.

Para o Caso III (terceira simulação), uma torre metálica realística com geometria realística e um container de equipamentos foram modelados, como mostrado nas Figs. 21 (vista transversal) e 22 (vista longitudinal). É importante mencionar que o container de equipamentos atua como uma sala blindada, onde se encontram os equipamentos utilizados no funcionamento da Estação Rádio-Base (ERB). Esse container possui dimensões de 6 m (direção  $x$ ) por 4 m (direção  $y$ ) por 3 m (direção  $z$ ). Além disso, uma malha de aterramento foi construída ao redor dessa estrutura e da torre metálica representativa com o intuito de promover a proteção dos equipamentos internos e das pessoas que possam estar próximas do local no momento da descarga atmosférica. Os condutores metálicos da torre e as hastes de aterramento utilizadas possuem respectivamente 15 mm e 12.7 mm de raio.

As Figs. 21 e 22 mostram a estrutura modelada para o Caso III nos planos  $yz$  e  $xz$  respectivamente, e as Figs. 23 e 24 mostram a mesma estrutura simulada em visualização tridimensional gerada pelo software LANE-SAGS. Nesse caso, outra linha de baixa tensão

com parâmetros similares à da utilizada nas simulações anteriores foi adicionada na região de análise, porém com posicionamento diferente distando apenas 10 m da torre modelada onde a descarga atmosférica incide. A Fig. 25 mostra os resultados para as tensões induzidas calculadas em V/kA, ao longo do tempo para cada um dos condutores localizados em ambas as linhas. As medidas foram obtidas, assim como nos Casos I e II, no ponto médio das linhas de energia no plano  $yz$  (Fig. 21).

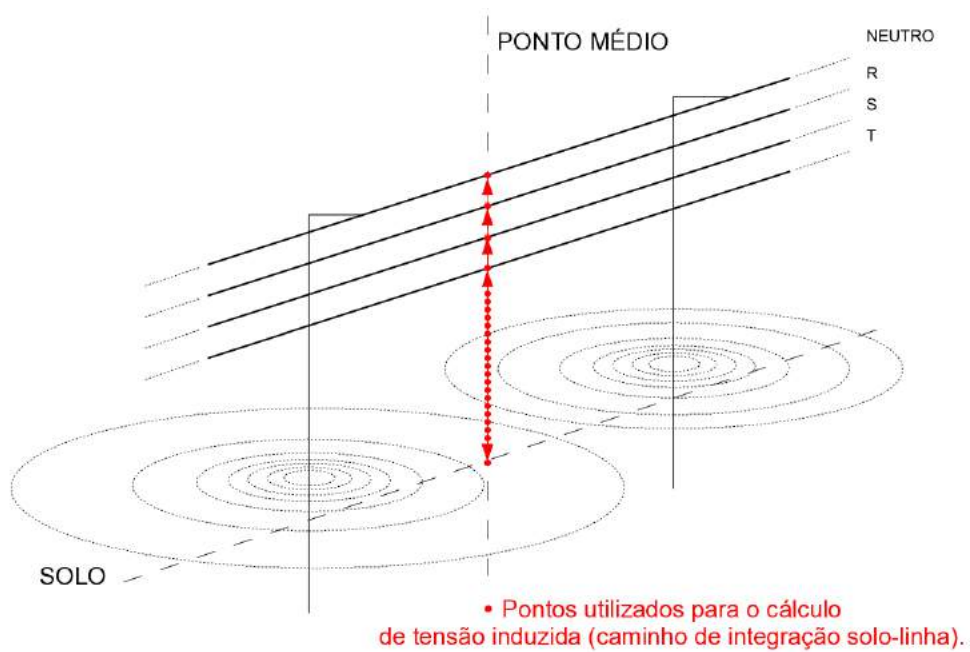


Figura 20: Ilustração simplificada do caminho de integração numérica utilizado no cálculo da tensão induzida em uma linha de baixa tensão.

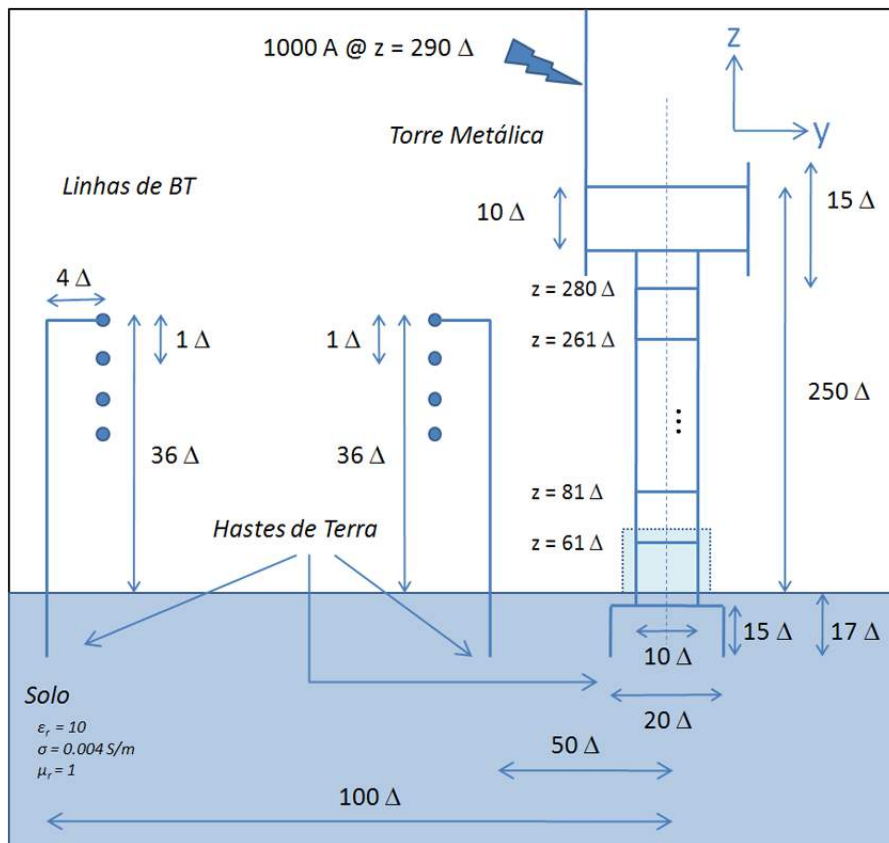


Figura 21: Visão geral do Caso III. Linhas de energia, torre metálica com canal de descarga, container e malhas de aterramento, no plano  $yz$  (vista transversal)

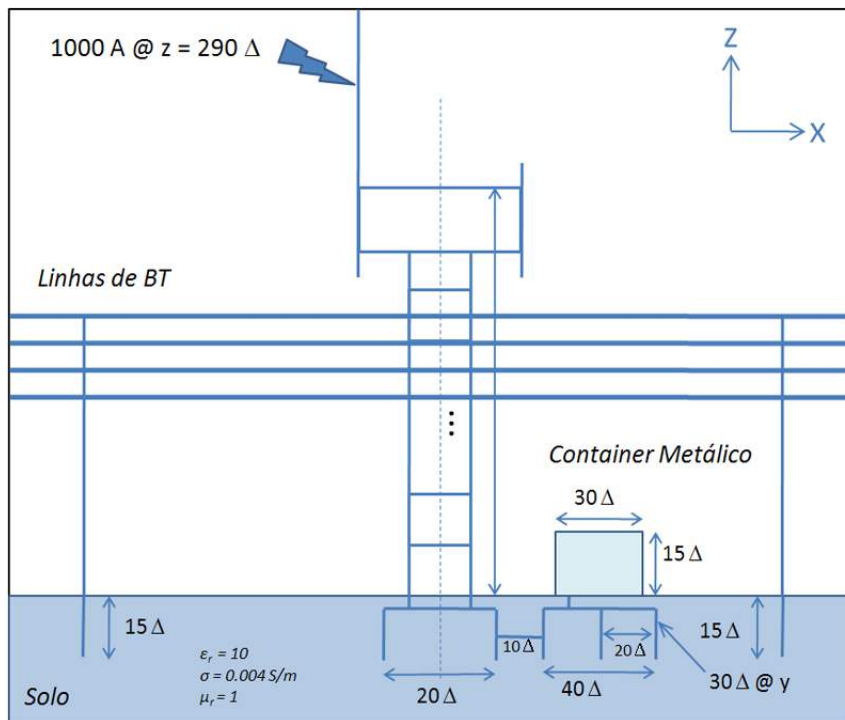


Figura 22: Visão geral do Caso III. Linhas de energia, torre metálica com canal de descarga, container e malhas de aterramento, no plano  $xz$  (vista longitudinal)

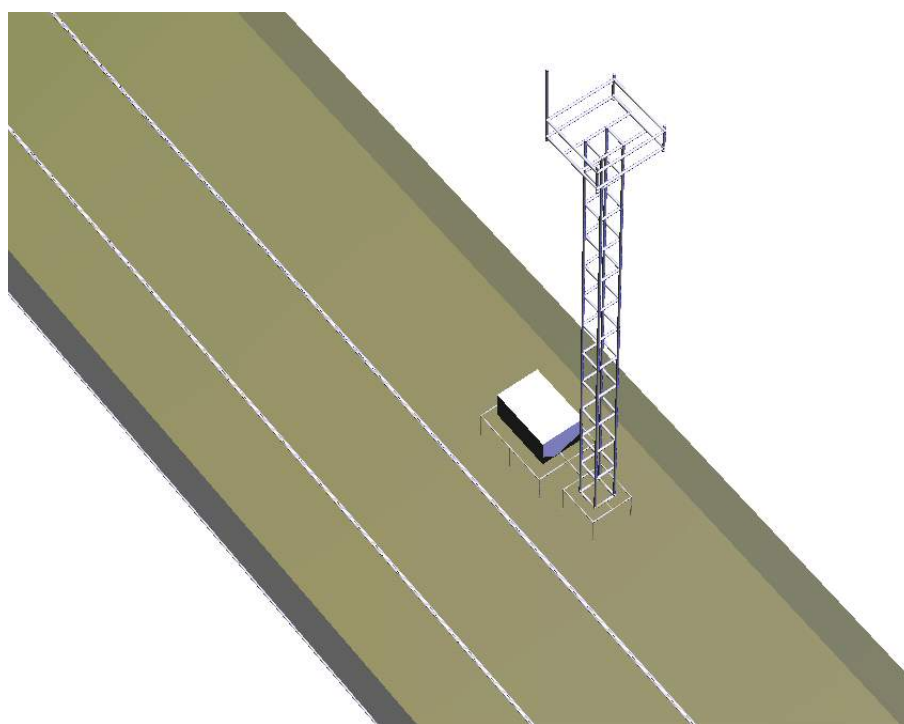


Figura 23: Representação 3D da estrutura utilizada no Caso III: torre modelada, elementos adjacentes e linhas de baixa tensão (LANE-SAGS).

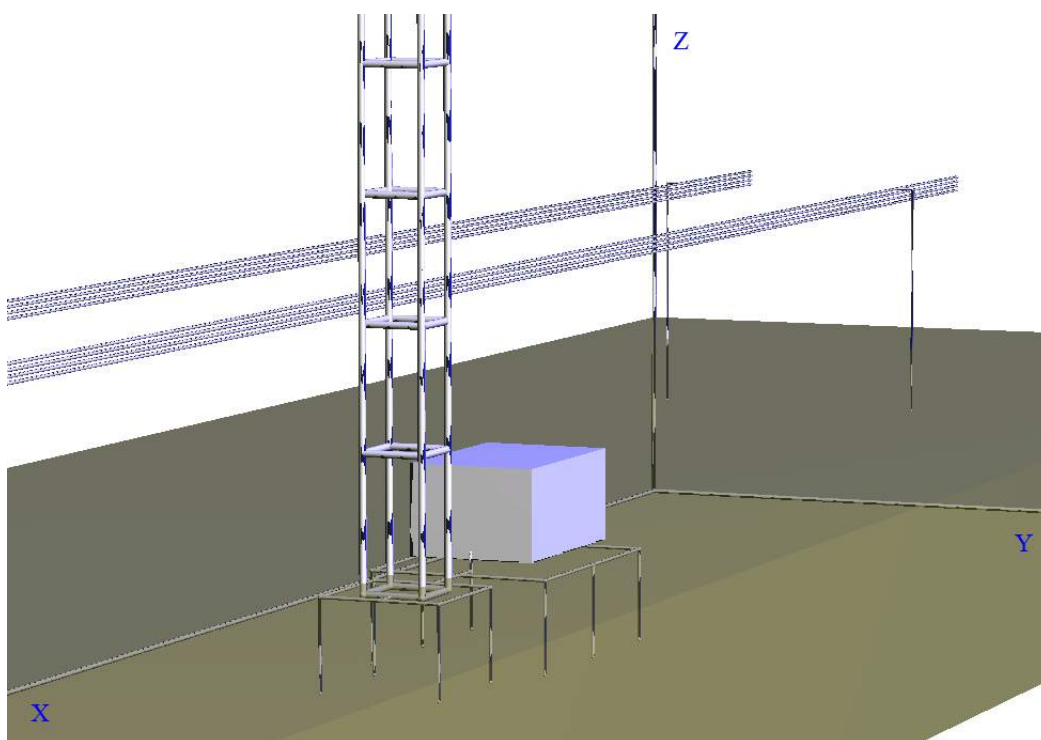


Figura 24: Representação 3D da estrutura utilizada no Caso III (detalhes): base da torre, container e malha de aterramento (LANE-SAGS).



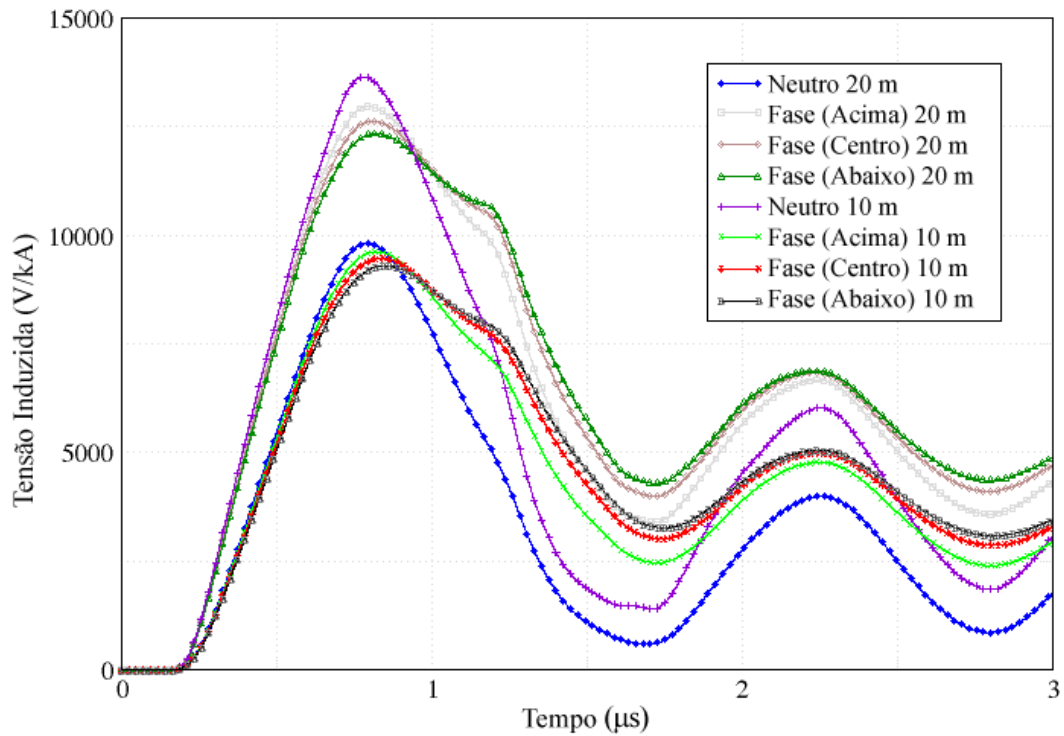


Figura 25: Resultados obtidos para o Caso III.

Valores de tensão induzida da ordem de 10 kV/kA e 14 kV/kA foram calculados para as linhas localizadas a 20 metros e a 10 metros de distância da torre, respectivamente, quando o tempo de simulação encontra-se próximo a  $1 \mu s$ . Inicialmente é possível concluir que as tensões induzidas calculadas na linha localizada a 10 m da torre tendem a ser mais intensas que as tensões obtidas na linha que está localizada na posição mais afastada de onde a descarga incide. Também nessa mesma figura pode ser visto que, quando a simulação encontra-se logo após  $1,5 \mu s$ , surge uma diferença de tensão fase-neutro de mais de 2,5 kV, que passa a diminuir conforme a simulação avança.

#### 4.4 Caso IV: Adição de novas estruturas modeladas, localizadas em regiões adjacentes às linhas de energia.

Para a análise de um modelo computacional com um comportamento mais próximo ao encontrado em casos reais, nove prédios, cada um medindo 24 metros de frente (direção  $x$ ), por 12,8 metros de fundo (direção  $y$ ) e com 24 metros de altura (direção  $z$ ) conforme

mostrado nas Figs. 26 (plano  $xz$ ), 27 (plano  $yz$ ) e 28 (plano  $xy$ ), foram modelados e introduzidos nas proximidades da torre que representa a estação rádio-base. Esses prédios encontram-se separados lateralmente por uma distância de 8,6 metros, e frontalmente por uma distância de 14 metros conforme mostrado na Fig. 29, exceto o prédio localizado na posição mais central da região de análise, que se encontra distante de 18,6 metros da torre representativa e está separado lateralmente dos outros prédios por uma distância de 4 metros. As paredes e os pisos de cada uma dessas estruturas utilizam blocos materiais computacionais com  $\sigma=0,02$  S/m,  $\epsilon_r=7,5$  e  $\mu_r=1$ . Já as vigas que compõem esses prédios foram modeladas utilizando-se blocos metálicos de condutividade perfeita (PECs - *Perfect Electric Conductors*). Além dos prédios, uma rua representativa de 168 metros de comprimento (direção  $x$ ) e 10 metros de largura foi inserida na região de análise tornando o caráter da simulação computacional ainda mais próximo da realidade. Este cenário é referido como sendo o Caso IV e é mostrado em detalhes nas Figs. 26-30, sendo que na Fig. 30, têm-se a representação 3D da região de análise.

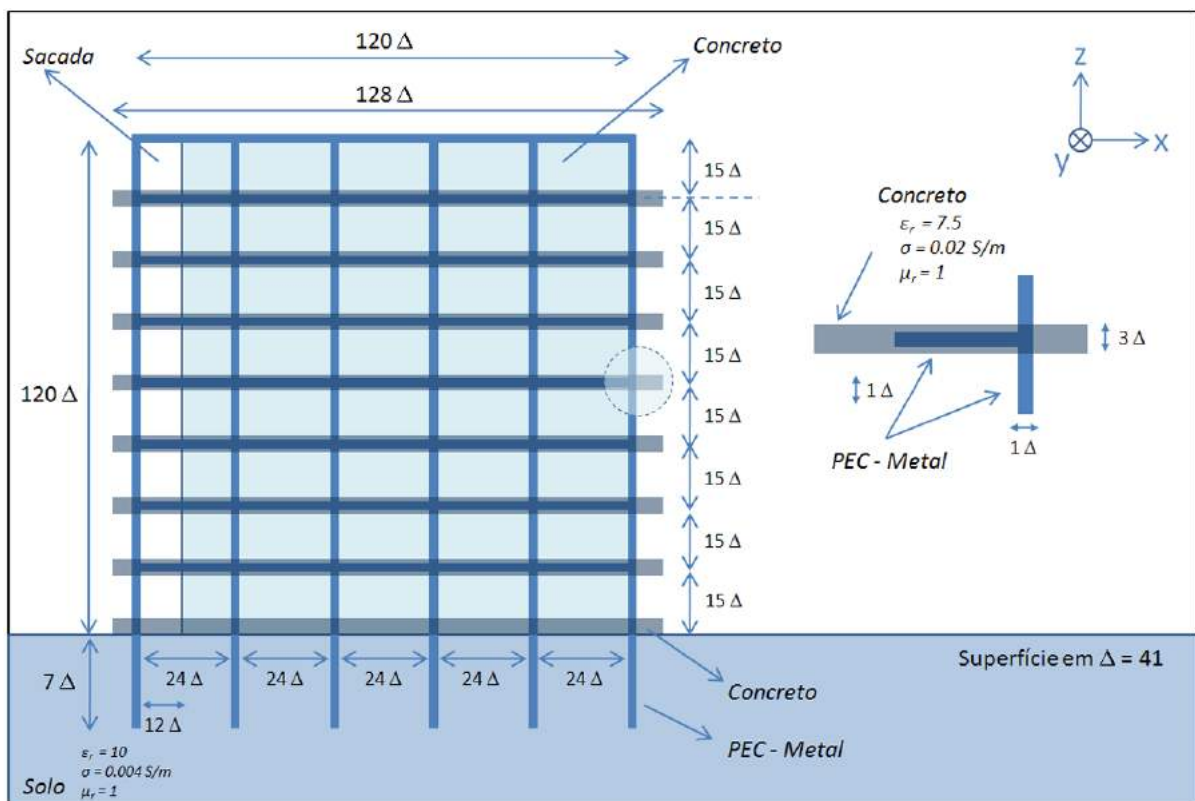


Figura 26: Vista frontal do prédio modelado computacionalmente.

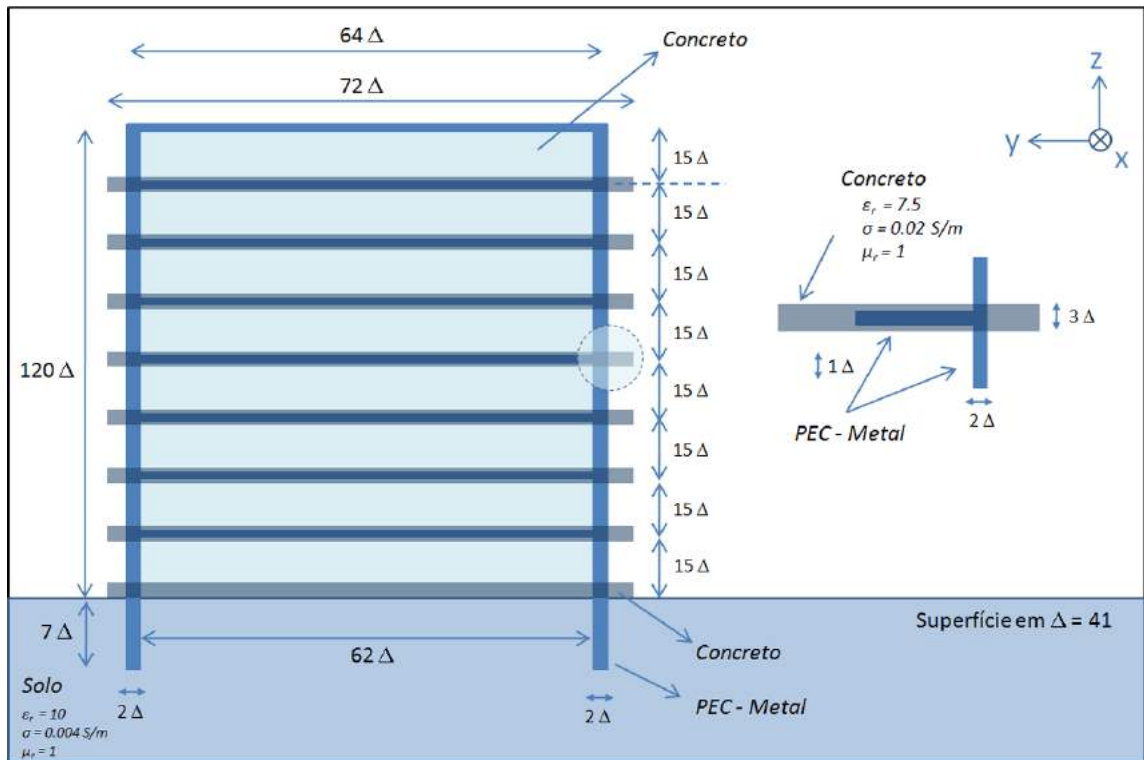


Figura 27: Vista lateral do prédio modelado computacionalmente.

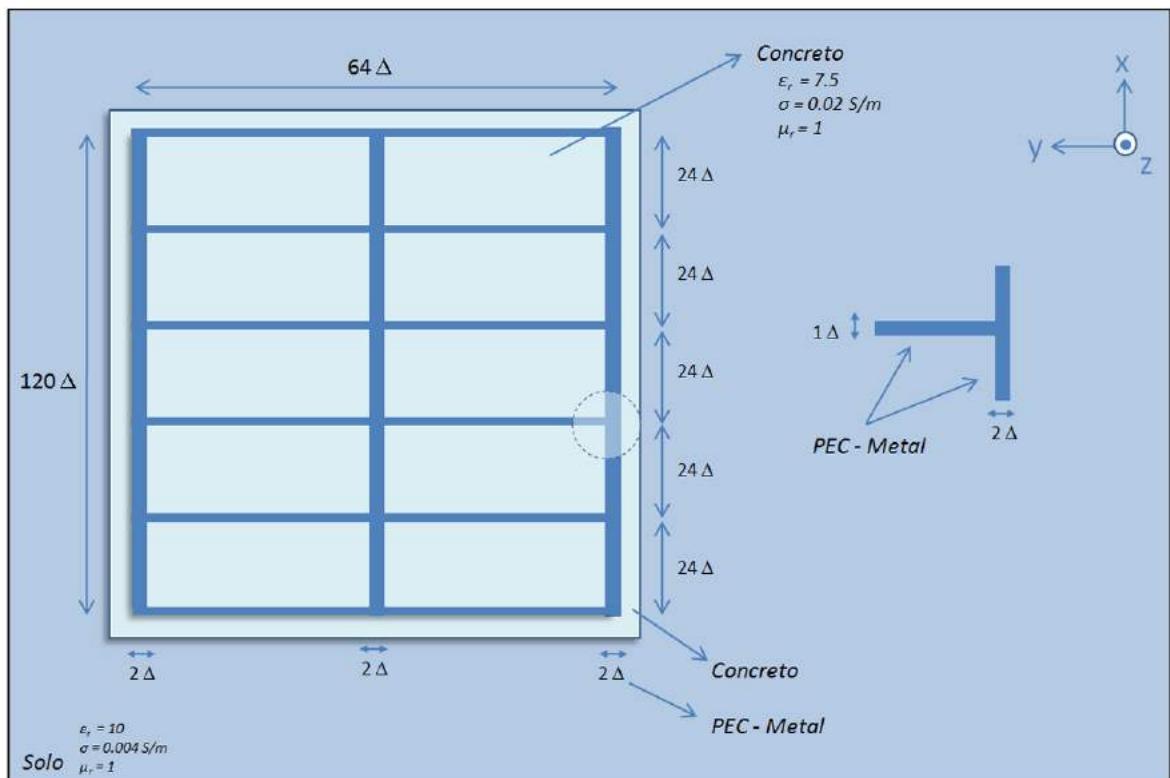


Figura 28: Vista superior do prédio modelado computacionalmente.

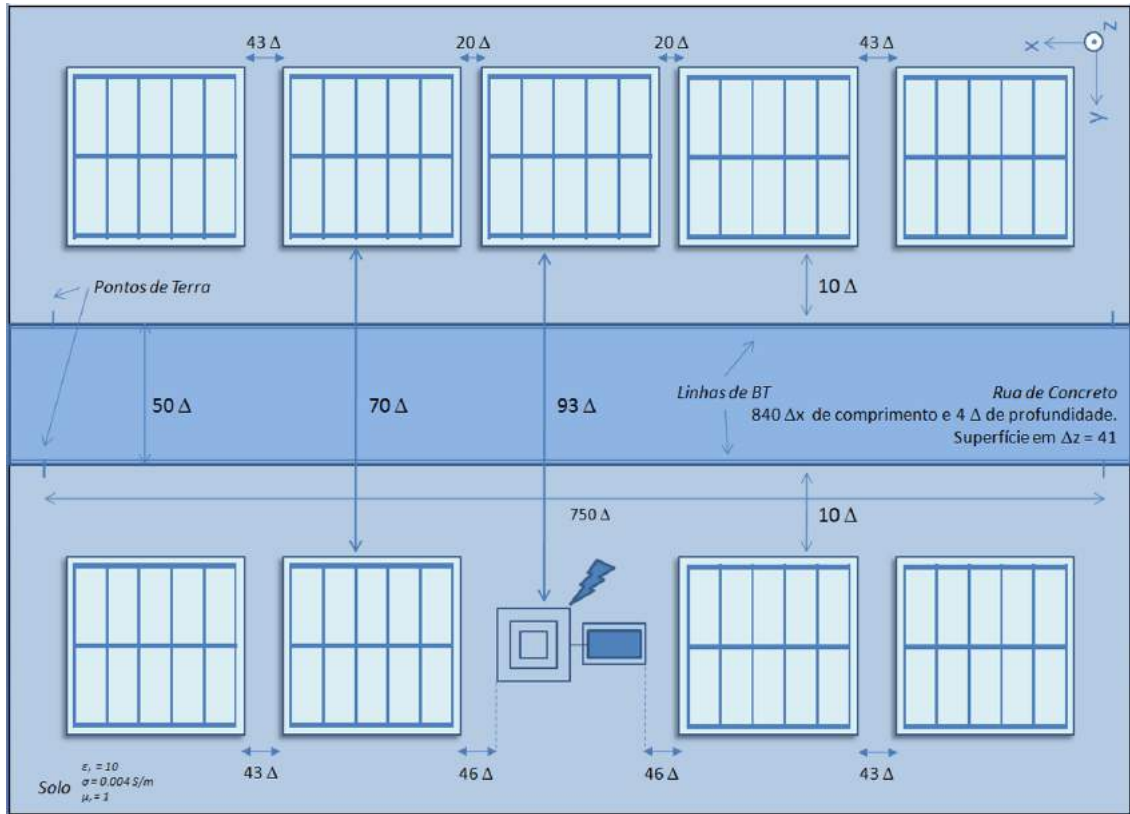


Figura 29: Vista superior da região de análise no plano  $xy$ .

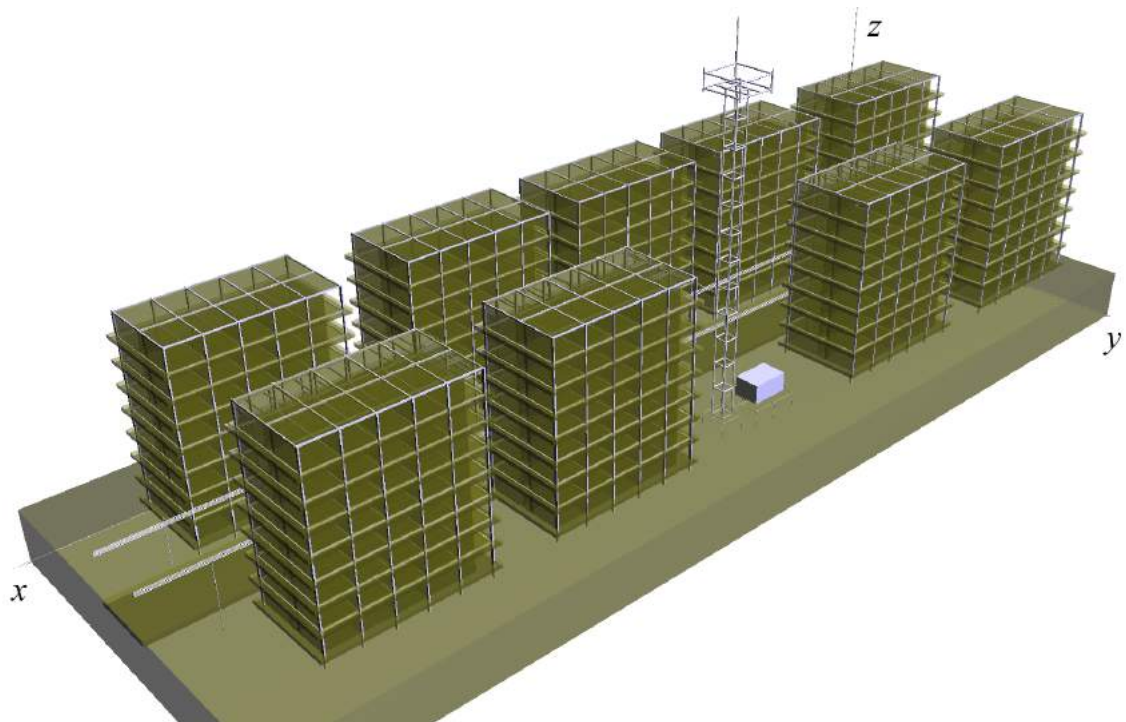


Figura 30: Representação 3D da região analisada para o Caso IV.

Comparando os resultados dos Casos III e IV para a linha localizada a 10 metros da torre, pode ser visto que na Fig. 31 são mostradas algumas oscilações bastante suaves nas tensões induzidas calculadas que não se fazem presentes na Fig. 25. Esse comportamento pode ser atribuído às múltiplas reflexões dos campos eletromagnéticos nos prédios. Para os três cabos fase, o valor de pico para as tensões induzidas sofreu uma redução em torno de 6 kV se comparado ao caso anterior, passando de aproximadamente 14 kV para 8 kV. Além disso, pode ser notado também que, devido a essas reflexões, o instante na qual ocorre o pico de tensão foi deslocado de  $0,4 \mu s$  em relação ao caso anterior, passando de  $0,8 \mu s$  para  $1,2 \mu s$ .

A partir deste momento, é possível observar que os valores absolutos das tensões entre fase e neutro apresentam valores da ordem de 2,5 kV e, nos instantes finais quando a simulação se aproxima de  $3 \mu s$ , as quatro curvas tendem a se aproximar e reduzir essa diferença de tensão. No caso das tensões fase-fase, a tensão induzida calculada gira em torno de aproximadamente 800 V no momento mais crítico dessa medição. Algo semelhante se observa para a linha afastada de 20 metros, onde a tensão fase-fase mais crítica é de aproximadamente 1,2 kV e a tensão entre fase e neutro de maior valor gira em torno de 3 kV no momento em que a simulação se encontra entre  $1,5 \mu s$  e  $2,0 \mu s$ .

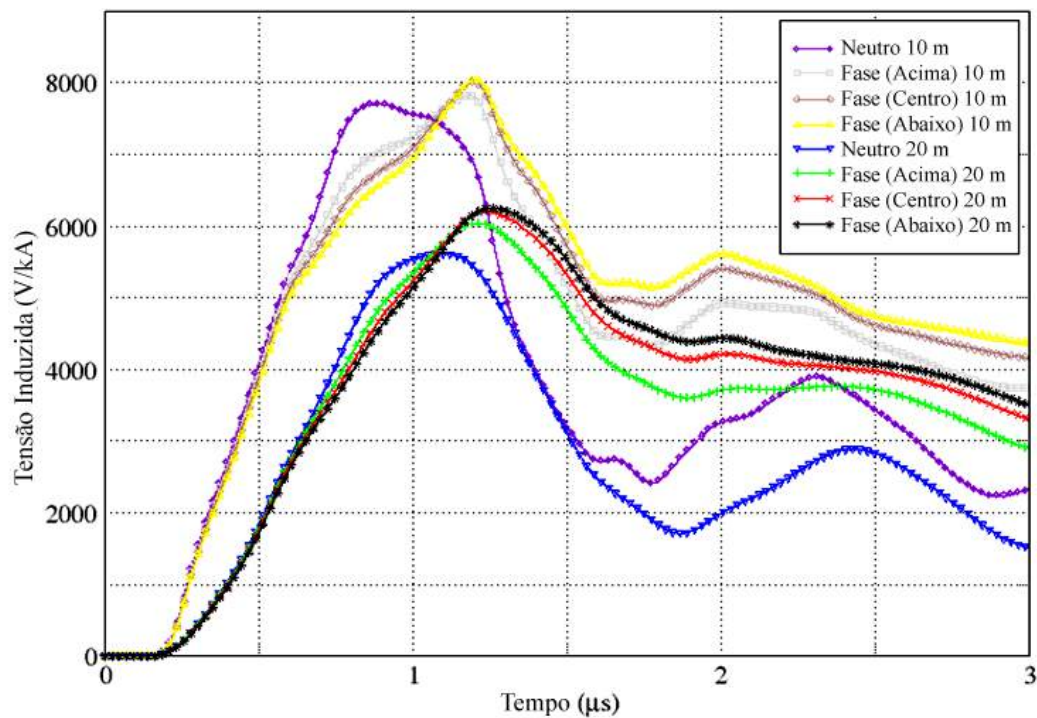


Figura 31: Resultados obtidos para o Caso IV.

Como forma de facilitar a visualização da distribuição do campo elétrico na região de análise, foram feitos três “cortes” na estrutura simulada para a geração de imagens do tipo “curvas de nível”. A primeira sequência de imagens foi feita no plano  $xy$  da estrutura, em  $z=8,2$  m ou  $41\Delta$ , exatamente na superfície do solo. Nas Figs. 32-35, é possível visualizar de que forma o campo obtido nesse plano se distribui ao longo da região analisada.

Tomando como base que as cores “frias” ou de tons mais azulados representam valores menores de campo elétrico, e que as cores “quentes” ou mais avermelhadas representam valores mais acentuados desse campo, pode-se visualizar na figura que, nas regiões adjacentes à malha de aterramento da torre, há a presença de uma grande intensidade de campo elétrico.

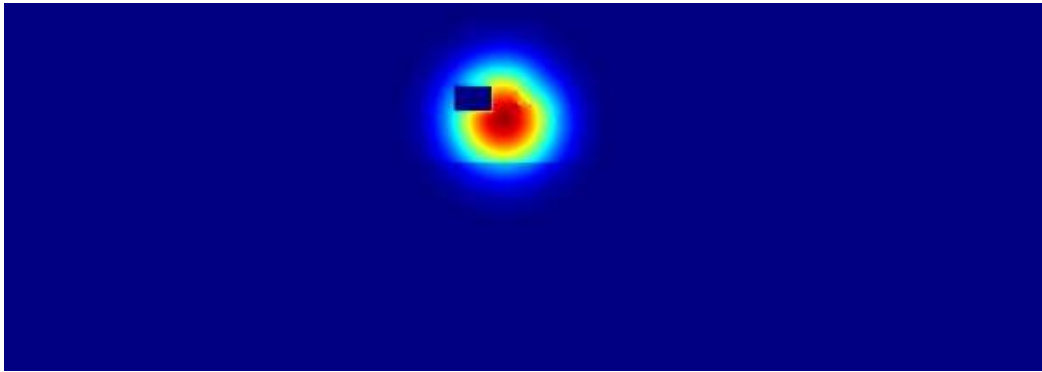


Figura 32: Curva de nível para o plano  $xy$  em  $z = 41$  (superfície do solo), com 720 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

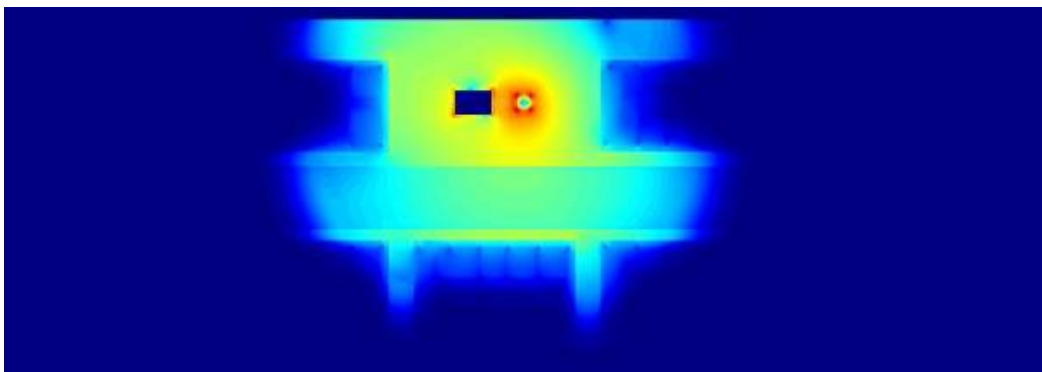


Figura 33: Curva de nível para o plano  $xy$  em  $z = 41$  (superfície do solo), com 900 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.



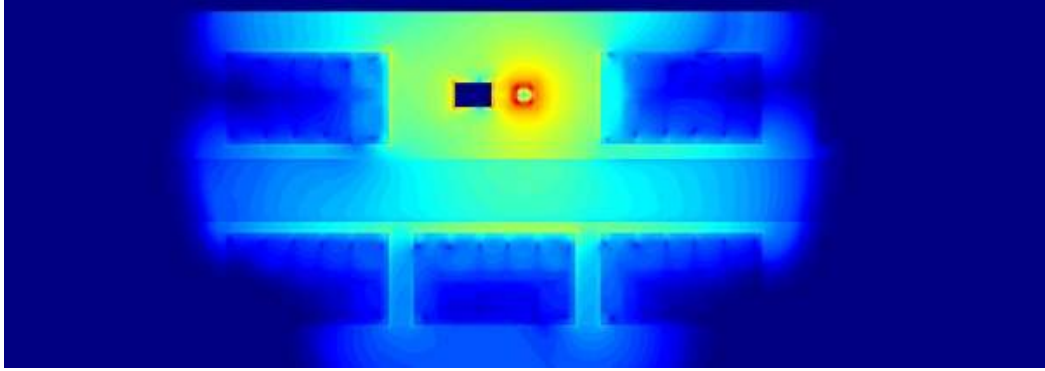


Figura 34: Curva de nível para o plano  $xy$  em  $z = 41$  (superfície do solo), com 1050 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

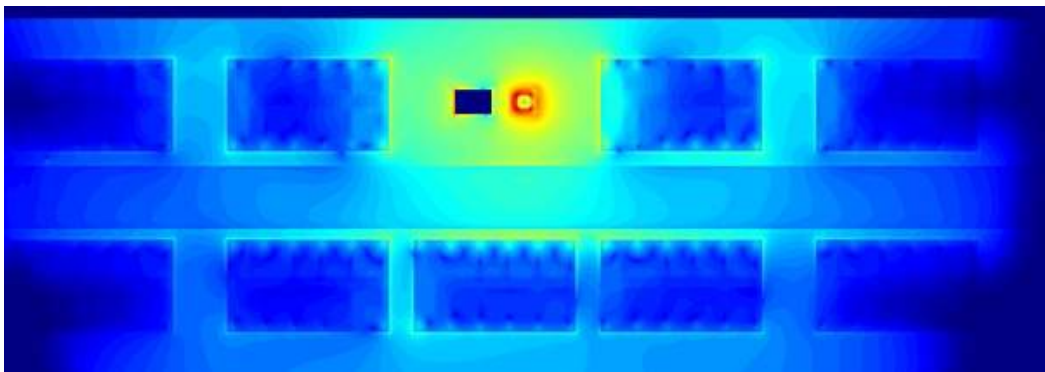


Figura 35: Curva de nível para o plano  $xy$  em  $z = 41$  (superfície do solo), com 1440 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

Essa intensidade de campo decai abruptamente à medida que se promove o afastamento da borda dessa malha, promovendo assim valores significativos de potencial de passo para regiões vizinhas a essa. A segunda sequência de imagens, apresentadas nas Figs. 36-39 mostram o plano  $yz$  da estrutura simulada em  $x=84$  m, ponto médio das linhas de energia em diferentes passos de tempo da simulação. É possível notar claramente que o campo elétrico que penetra a estrutura do prédio representativo possui uma intensidade muito menor do que o campo elétrico presente nas regiões externas dessa estrutura.

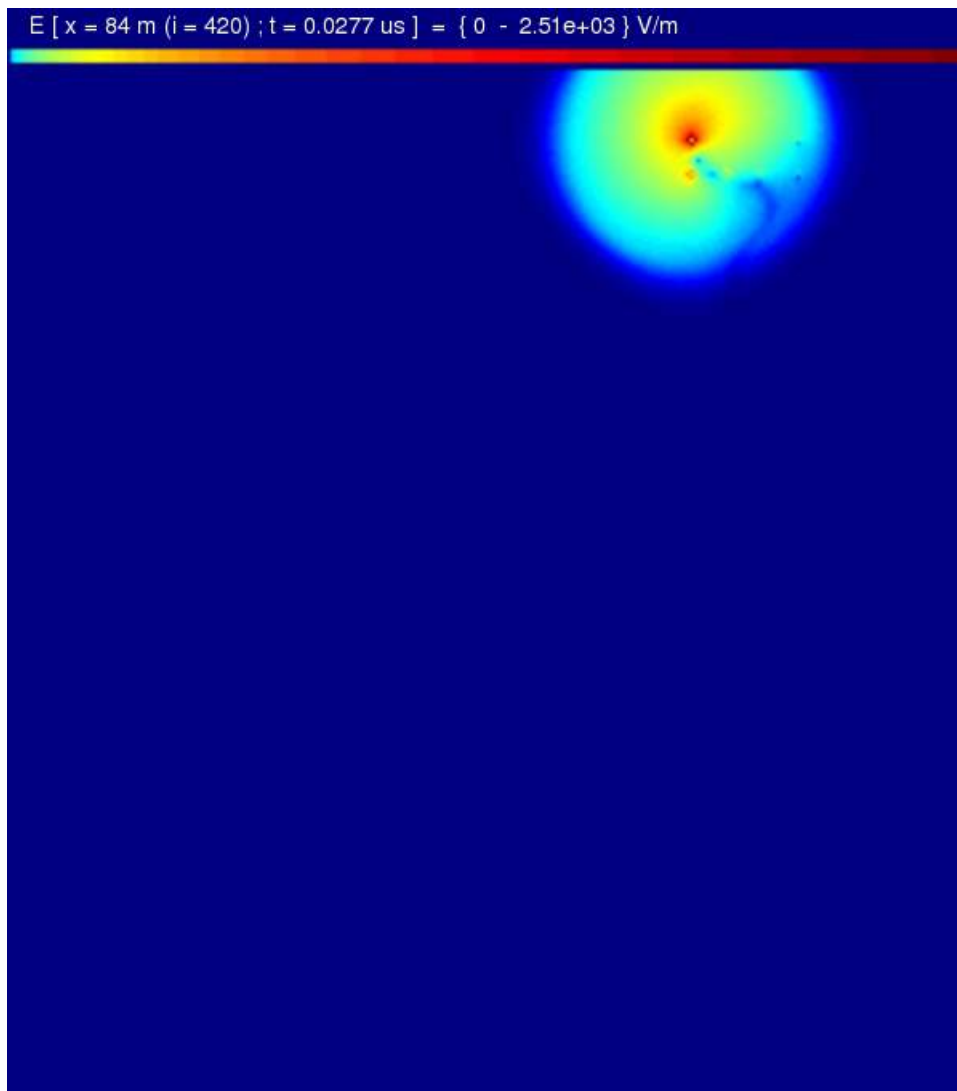


Figura 36: Curva de nível obtida para o plano  $yz$  em  $x = 420$  (centro geométrico do eixo  $x$  da região de análise), com 120 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.



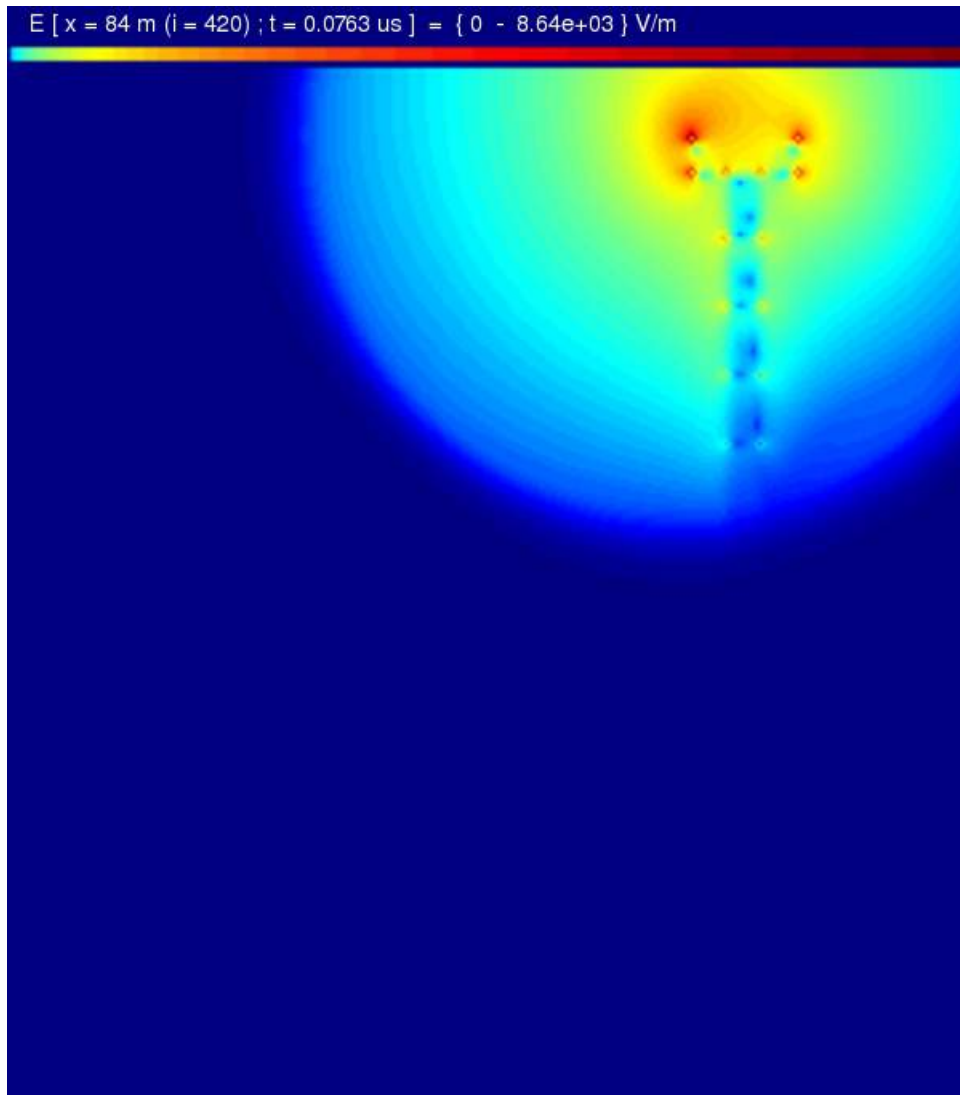


Figura 37: Curva de nível obtida para o plano  $yz$  em  $x = 420$  (centro geométrico do eixo  $x$  da região de análise), com 330 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

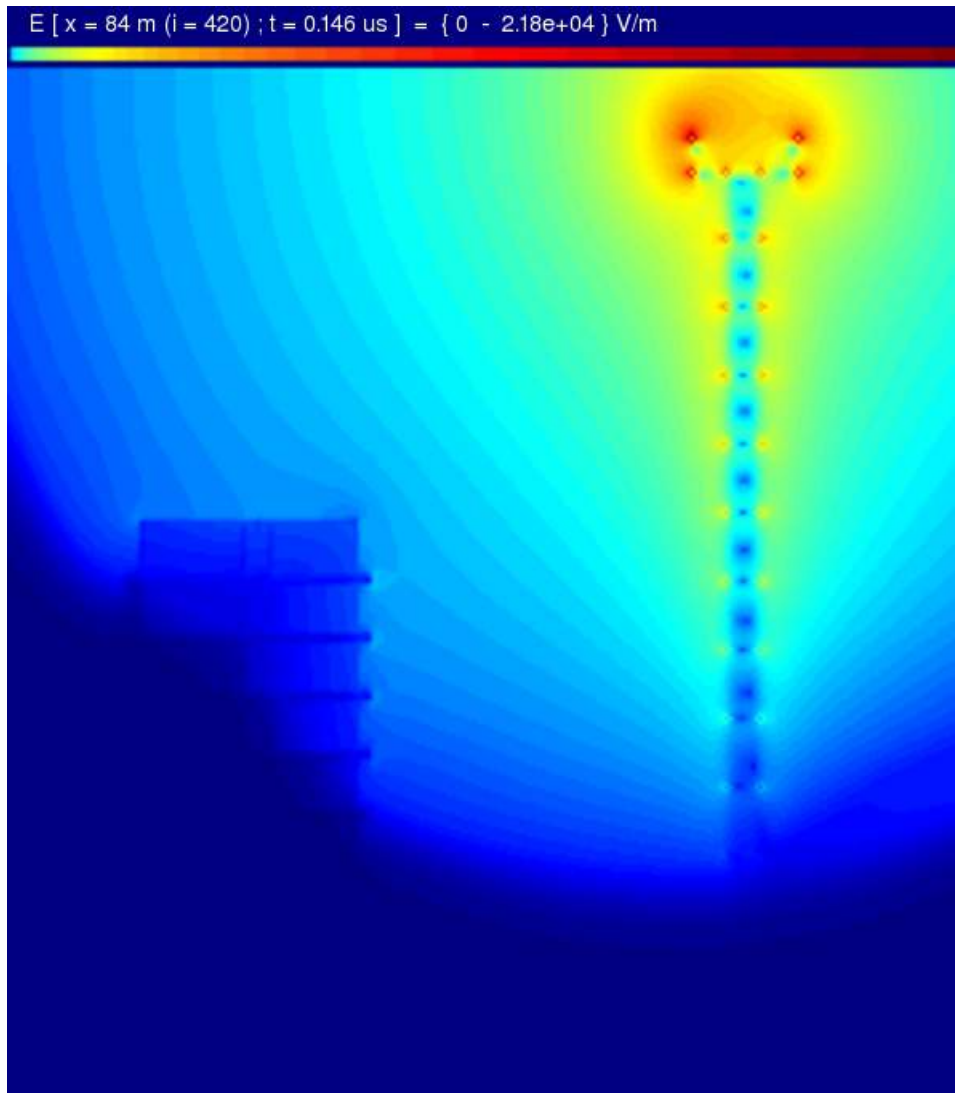


Figura 38: Curva de nível obtida para o plano  $yz$  em  $x = 420$  (centro geométrico do eixo  $x$  da região de análise), com 420 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

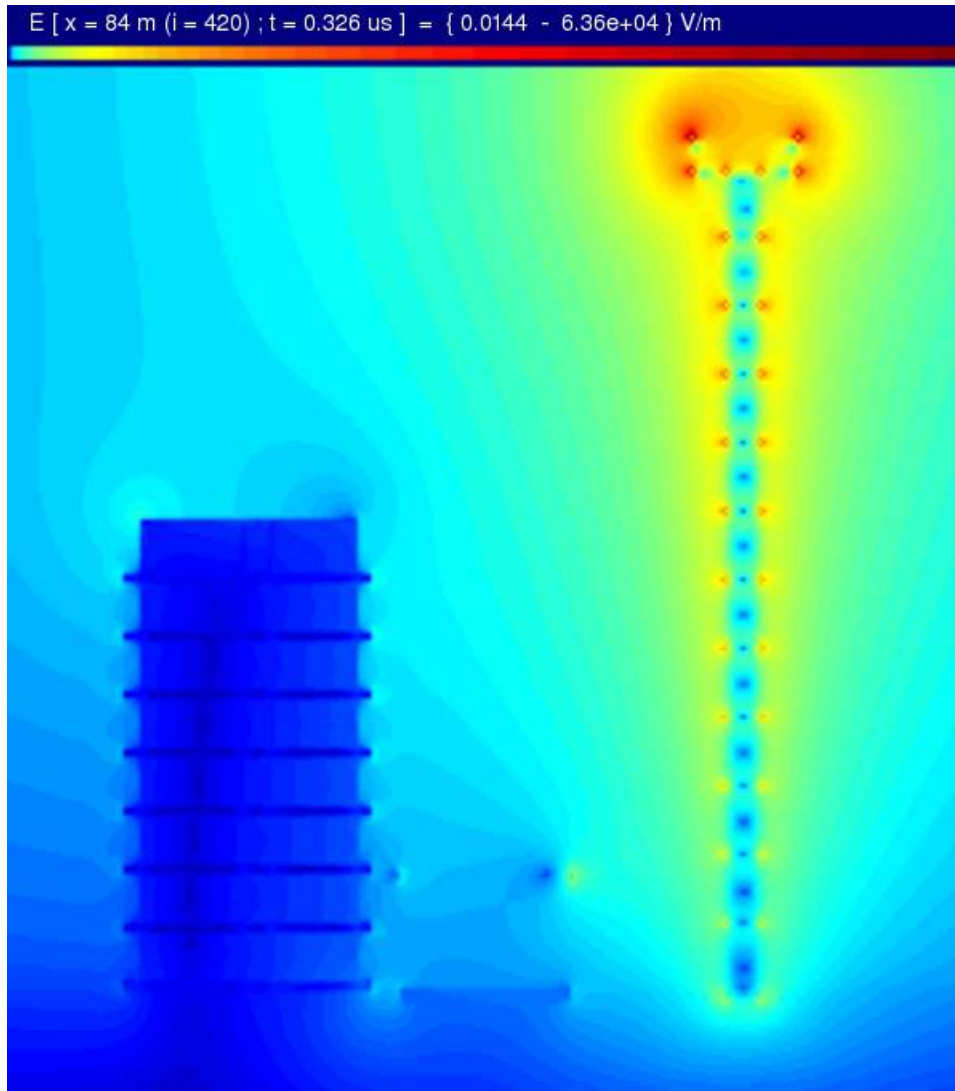


Figura 39: Curva de nível obtida para o plano  $yz$  em  $x=420$  (centro geométrico do eixo  $x$  da região de análise), com 1410 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

Tal fato é devido tanto aos elementos metálicos que representam as vigas da estrutura dos prédios, que desempenham o papel de uma Gaiola de Faraday, como dos elementos dielétricos que representam as paredes de concreto da estrutura, que promovem uma espécie de blindagem eletromagnética dificultando a propagação do campo no interior da estrutura analisada (no caso de baixas frequências). Tal comportamento da propagação do campo elétrico também pode ser visualizado em outro plano, dessa vez no plano  $xz$  na posição  $y=225$ , que corresponde a um “corte” no centro geométrico da torre modelada, mostrado nas Figs. 40-43.

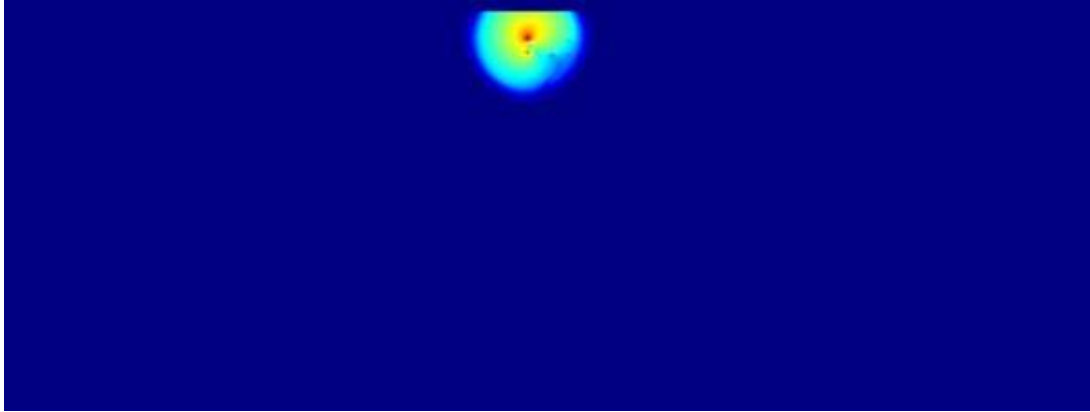


Figura 40: Curva de nível obtida para o plano  $xz$  em  $y=225$  (centro geométrico da torre modelada), com 120 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

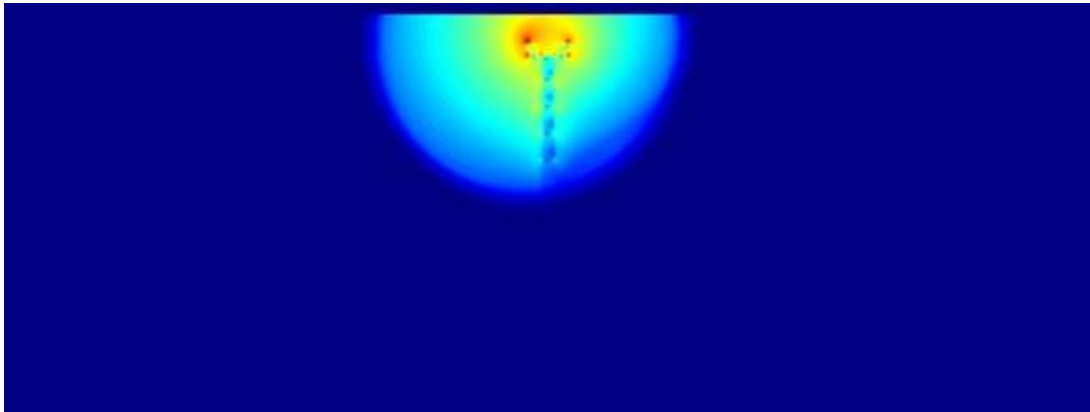


Figura 41: Curva de nível obtida para o plano  $xz$  em  $y=225$  (centro geométrico da torre modelada), com 330 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

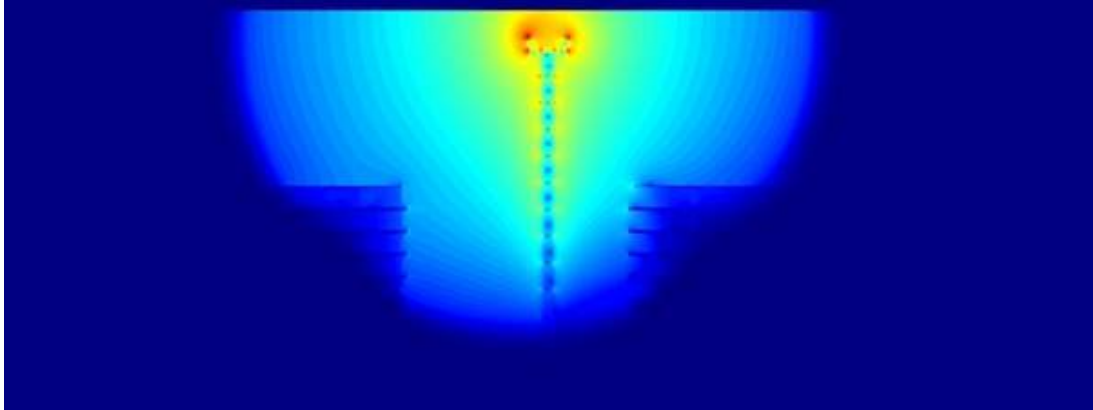


Figura 42: Curva de nível obtida para o plano  $xz$  em  $y = 225$  (centro geométrico da torre modelada), com 630 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

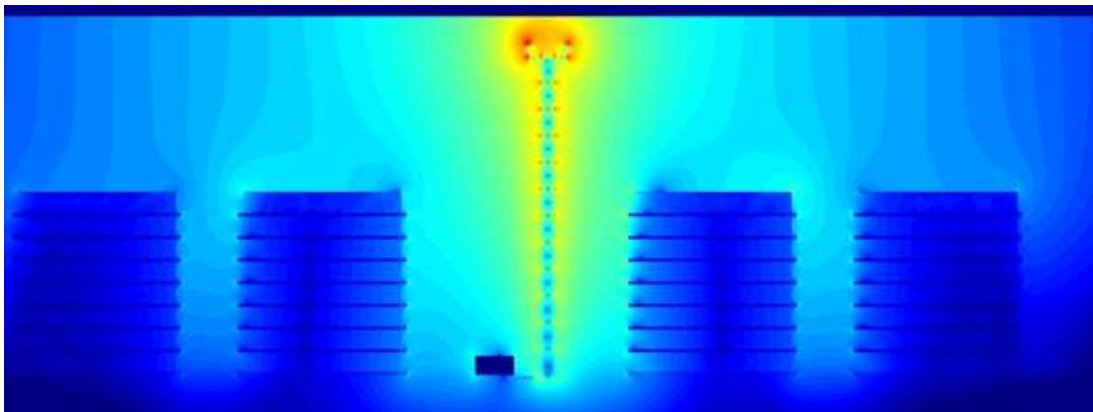


Figura 43: Curva de nível obtida para o plano  $xz$  em  $y = 225$  (centro geométrico da torre modelada), com 1410 passos de tempo. As cores “frias” representam menores intensidades de campo elétrico, enquanto as cores “quentes” representam maiores intensidades de campo elétrico.

#### 4.5 Caso V: Análise de tensões induzidas ao longo (eixo $x$ ) das linhas de baixa tensão, considerando as estruturas utilizadas no Caso III e IV.

Com o intuito de demonstrar a forma como as tensões induzidas se distribuem ao longo das linhas de energia, e como as estruturas adjacentes às linhas de energia influem nas tensões induzidas nas mesmas, foram criados pontos de medição de tensão a cada dois metros de distância ao longo do eixo  $x$ , localizados em cada um dos oito condutores das linhas de energia. Nesses pontos de medição, calcula-se a tensão induzida de pico na linha de integração que corresponde ao caminho perpendicular do solo até cada um dos condutores, fases ou neutros, no momento da descarga atmosférica. O cálculo foi efetuado utilizando-se as estruturas modeladas nos Casos III e IV e os resultados são apresentados nas Figs. 44 e 45 levando em consideração a presença ou não das estruturas que representam os prédios localizados nas imediações da torre.

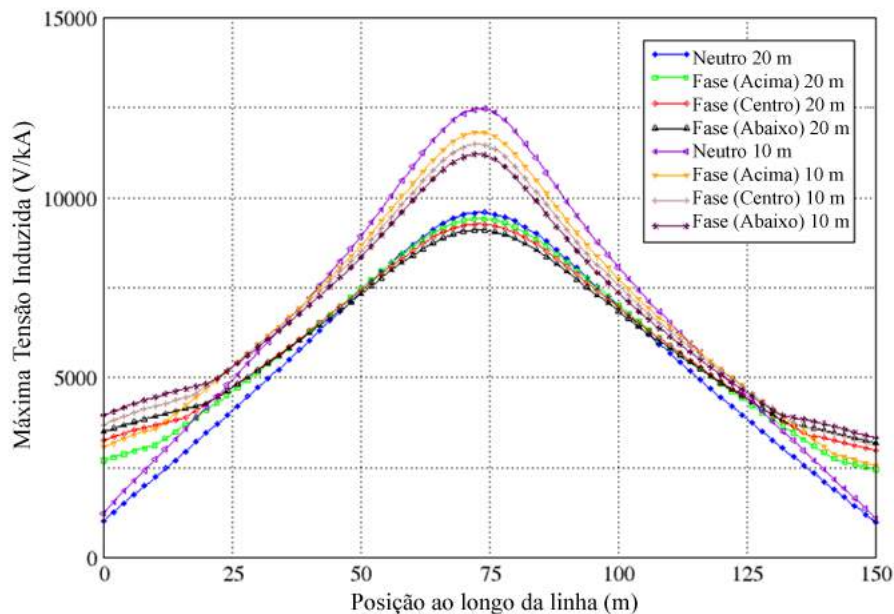


Figura 44: Resultados obtidos para o Caso V, sem a presença de prédios representativos próximos à torre.

Em ambos os casos, é possível notar que a porção central da linha, que corresponde ao menor caminho (caminho perpendicular) entre a torre modelada e ambas as linhas de energia, possui maior indução de tensão. Essa tensão induzida tende a ser menor conforme se avança para as extremidades da linha. Mais uma vez, é possível notar o importante papel que os prédios modelados desempenham para a redução das tensões induzidas nas

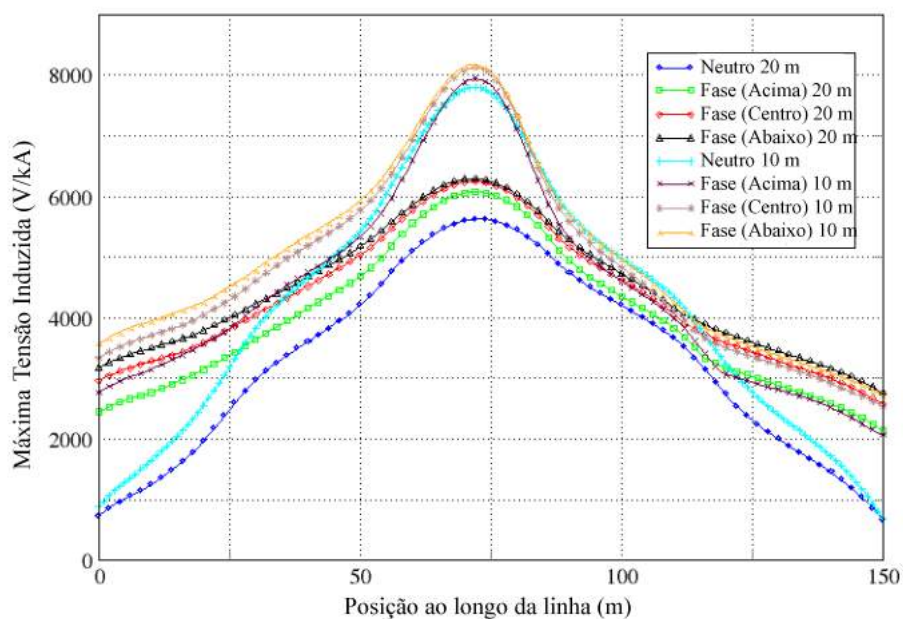


Figura 45: Resultados obtidos para o Caso V, com a presença de prédios representativos próximos à torre.

linhas de energia. Quando comparado o caso em que as estruturas adjacentes não se encontram presentes, com o caso em que há a presença dessas estruturas, a redução gira em torno de 4 kV para ambas as linhas.

**4.6 Caso VI e Caso VII: Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VI: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso VII: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre.**

Em uma primeira tentativa de minimizar os efeitos causados pelas tensões induzidas nas linhas de baixa tensão, foram propostas algumas mudanças nas configurações do sistema de terra dos condutores neutros. Para a seguinte simulação, foram inseridos quatro pontos extras de aterramento com valor de resistência de terra igual a  $80 \Omega$  (hastes de 3 metros de comprimento padrão e 12,7 mm de raio) para cada um dos condutores neutros. Esses



pontos de aterramento encontram-se separados por uma distância de 30 metros e conectam o neutro ao solo da mesma forma que os dois pontos já existentes atuam, totalizando seis pontos de aterramento para cada neutro, descrevendo assim o Caso VI, mostrado nas Figs 46 e 47.

Após isso, os seis pontos de aterramento de cada condutor neutro foram interligados com as fundações dos prédios e também com a torre, o container e seus sistemas de aterramento. As fundações dos prédios também foram interligadas entre si, totalizando assim uma única malha de aterramento, onde todos os elementos presentes na região de análise estão conectados. Essa nova estrutura descreve o Caso VII e é mostrada nas Figs. 48 e 49.

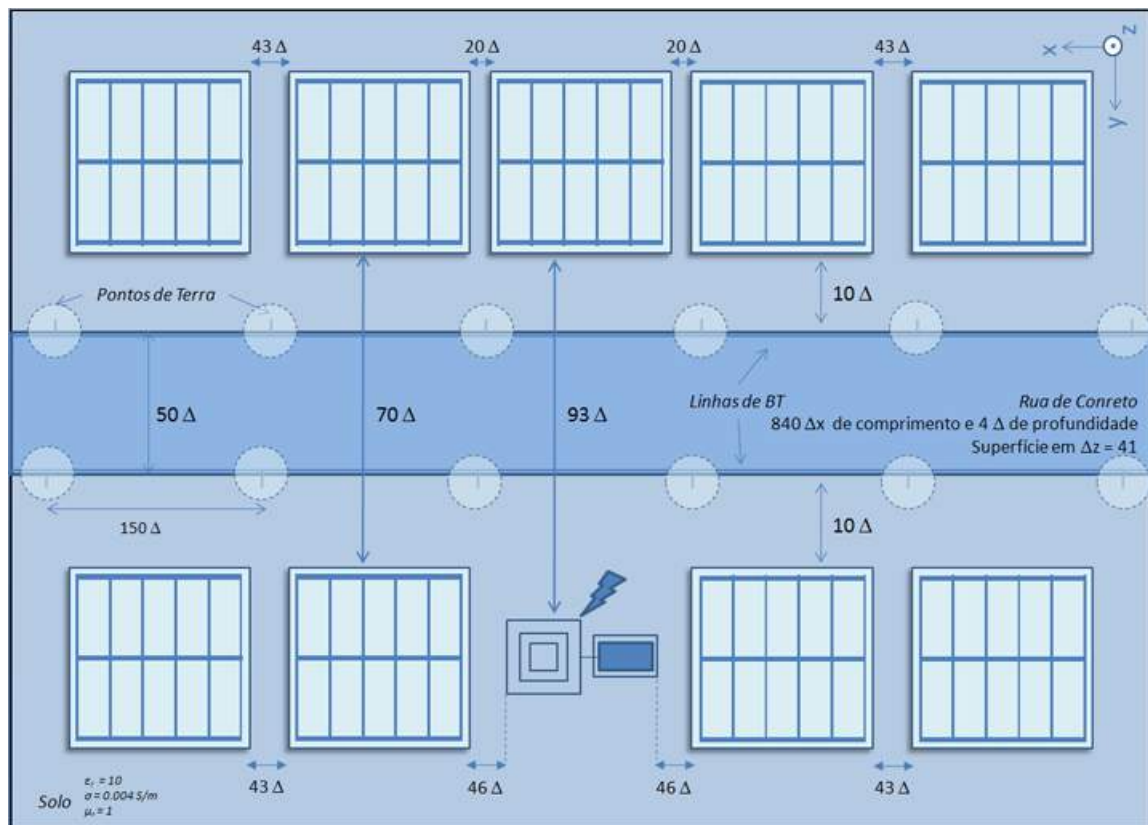


Figura 46: Vista superior da região de análise estudada no Caso VI, enfatizando os pontos de aterramento das linhas.



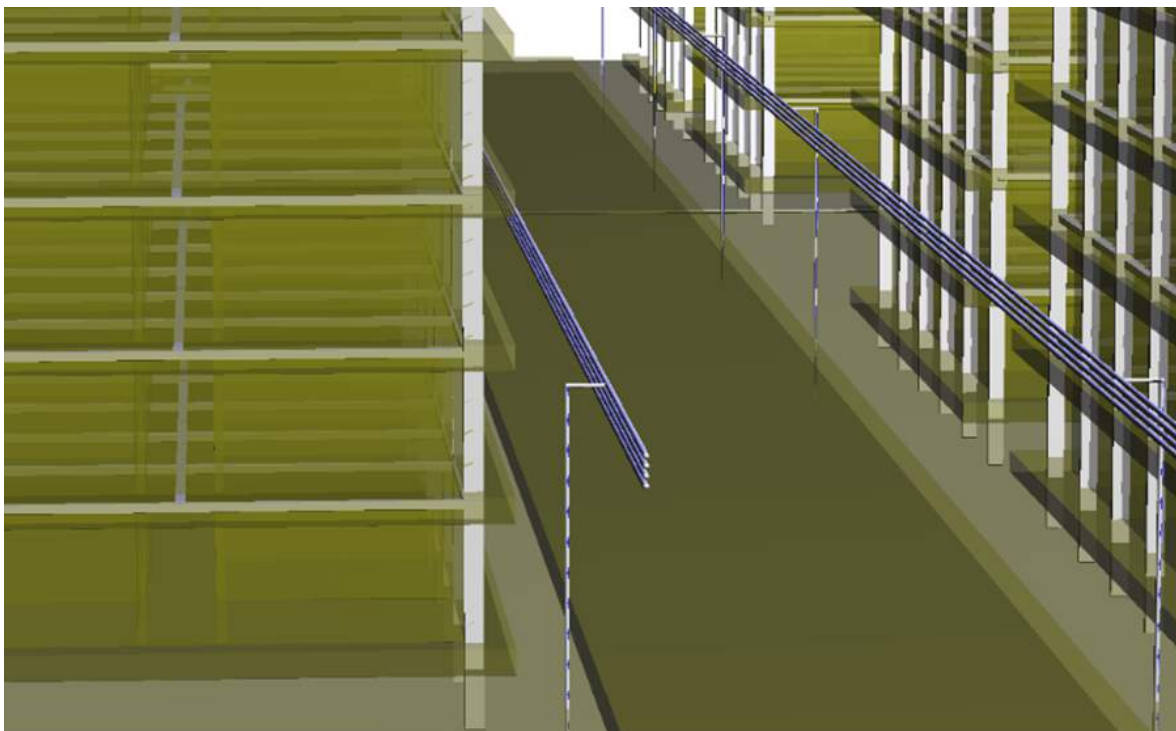


Figura 47: Representação 3D da região de análise estudada no Caso VI.

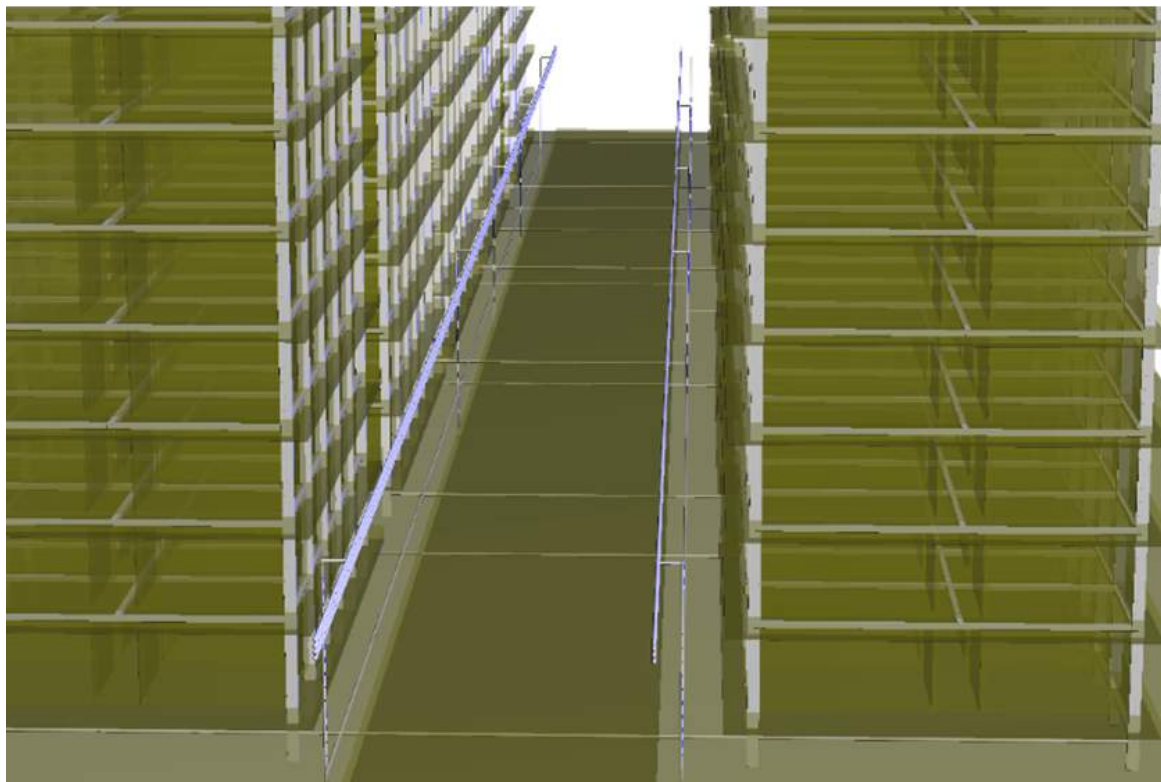


Figura 48: Representação 3D da região de análise estudada no Caso VII. Detalhe da interligação das fundações dos prédios.

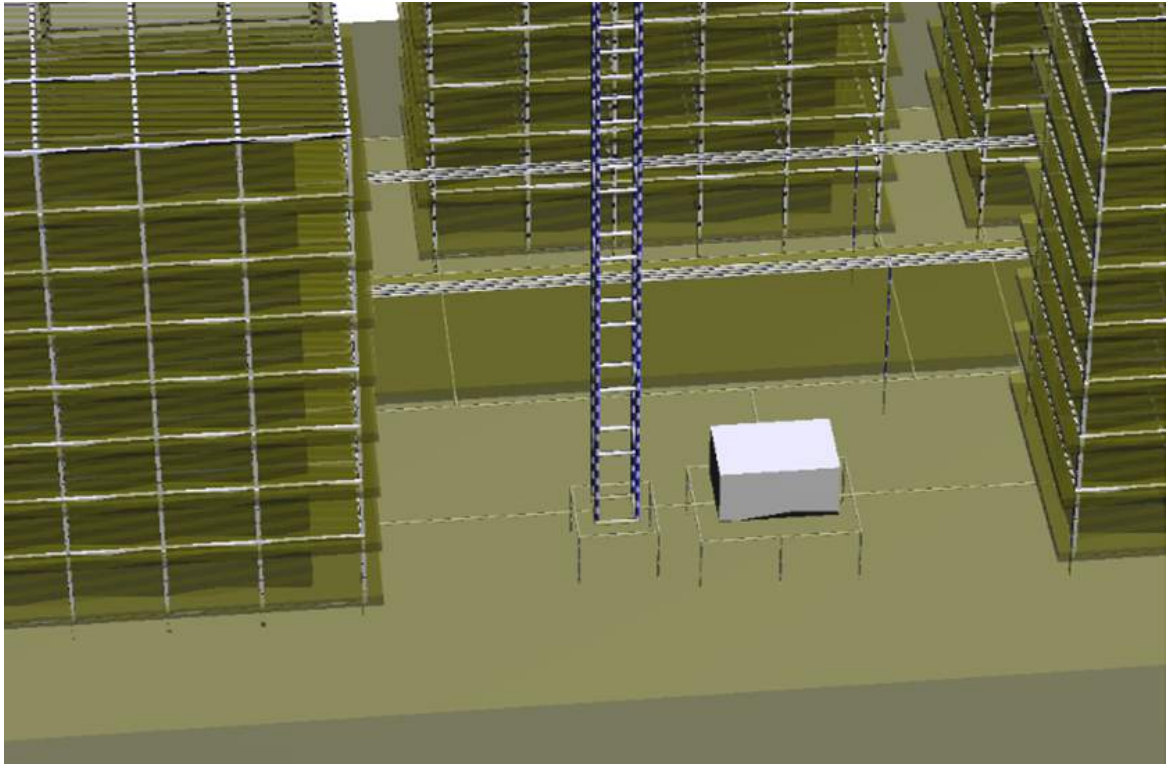


Figura 49: Representação 3D da região de análise estudada no Caso VII. Detalhe da interligação das estruturas com as malhas de terra e da torre modelada.

Os resultados mostrados na Fig. 50 (Caso VI) apresentam uma tensão de pico de aproximadamente 3,5 kV sobre o condutor neutro para a linha localizada a 10 metros da torre quando a simulação se encontra próxima a  $1 \mu s$ . Após esse instante, essas tensões induzidas nesse condutor tendem a se estabilizar com valores em torno de 2 kV. Para a linha localizada a 20 metros da torre, o valor de pico calculado no neutro foi de aproximadamente 1 kV.

Esses valores mostram uma redução considerável na tensão induzida nos condutores neutros quando se compara à simulação apresentada no Caso IV, que mostrou valores próximos a 3 kV e 2 kV (Fig 14). No caso dos condutores fase, é possível visualizar também na Fig. 50, que logo após a simulação completar  $1 \mu s$ , a tensão induzida de pico em uma dessas fases é de aproximadamente 6,4 kV para a linha localizada a 10 metros da torre e de aproximadamente 4,7 kV para a linha distante 20 metros da torre, mostrando também uma significativa redução nos valores de pico da tensão induzida calculada, se comparado aos valores de aproximadamente 8 kV e 6 kV calculados nos Caso IV, para as linhas afastadas de 10 metros e 20 metros respectivamente. Esses valores mostram a importância da presença de mais pontos de aterramento ao longo do neutro quando se

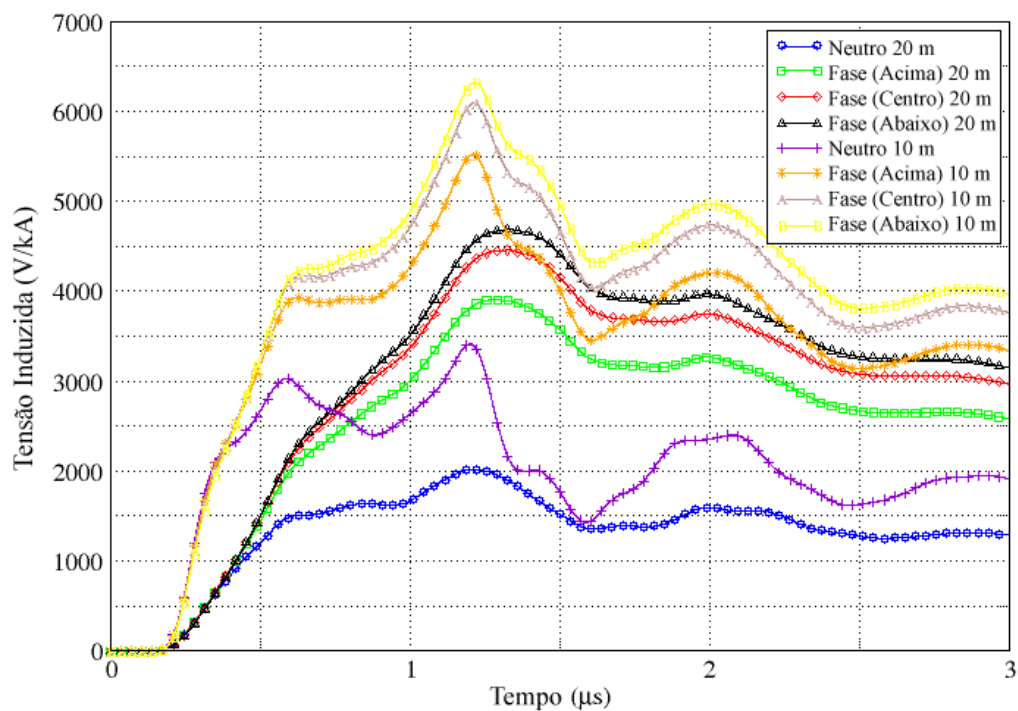


Figura 50: Resultados obtidos para o Caso VI.

tenta reduzir a tensão induzida tanto nas fases quanto nos neutros do sistema analisado.

Na Fig. 51 é possível visualizar os resultados obtidos para o Caso VII, onde as tensões de pico induzidas nos condutores neutros sofreram uma redução de aproximadamente 1 kV quando comparadas com as obtidas no Caso VI, para ambas as linhas de energia. No caso das fases, a tensão induzida mais crítica foi calculada no momento em que a simulação ultrapassa o tempo de  $1 \mu s$ , e foi calculada no condutor localizado na posição inferior da linha afastada de 10 metros da torre. O valor obtido foi de aproximadamente 4,5 kV, sofrendo uma redução em torno de 2 kV quando também comparado com o Caso VI. Diante dos resultados calculados nas duas últimas simulações, é fundamental salientar a importância de se construir um sistema de aterramento que procure interligar todos os elementos contidos na região de análise, a fim de se obter uma única malha que promova o melhor escoamento da corrente injetada no sistema de aterramento ao solo, tendo assim como uma das principais consequências, a redução das tensões induzidas nas linhas de baixa tensão consideradas nessa simulação.

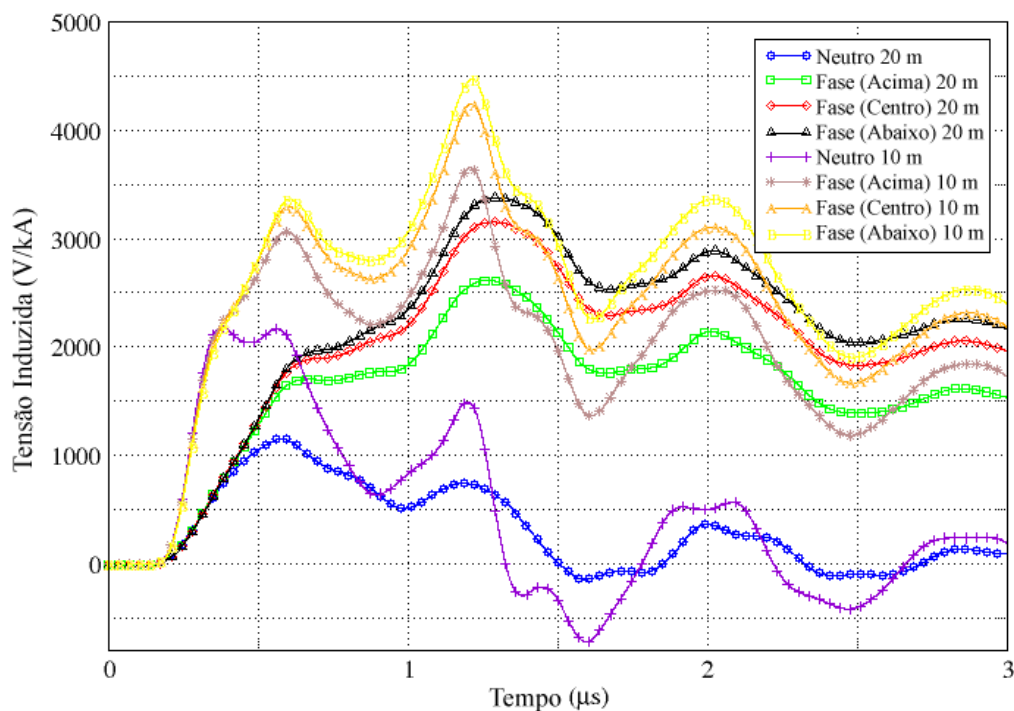


Figura 51: Resultados obtidos para o Caso VII.

## 4.7 Casos VIII a XI - Geometrias T e T Invertido: Apresentação, análise e comentários.

4.7.1 Caso VIII e Caso IX: Implementação da *Geometria T* nas linhas de energia. Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VIII: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso IX: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre.

Em uma segunda tentativa de se minimizar os efeitos causados pelas tensões induzidas em linhas de baixa tensão no momento de uma descarga atmosférica, foram propostas duas novas configurações de linhas de energia, com seus respectivos pontos de aterramento do condutor neutro interligados ou não conforme o caso, todas mostradas nas Figs 52

a 54. A primeira configuração é denominada de Geometria T, mostrada na Fig. 52, na qual o condutor neutro aterrado e dois condutores fase, adjacentes a esse neutro, se encontram posicionados a 7,2 metros do solo e separados lateralmente por 0,2 metros. O terceiro condutor fase da linha de energia situa-se a 0,2 metros abaixo do condutor neutro, posicionado a 7,0 metros do solo. A simulação que compreende a análise das tensões induzidas nas linhas de energia que utilizam a Geometria T será denominada de Caso VIII. Na tentativa de se minimizar ainda mais os efeitos causados pelas tensões induzidas nas linhas que utilizam essa geometria, os condutores neutros aterrados foram interligados com as fundações dos prédios e também com a torre, o container e seus sistemas de aterramento. As fundações dos prédios também foram interligadas entre si, totalizando assim uma única malha de aterramento, onde todos os elementos presentes na região de análise estão conectados, da mesma forma como utilizado no Caso VII e mostrado nas Figs. 53 e 54. Essa simulação será definida como Caso IX.

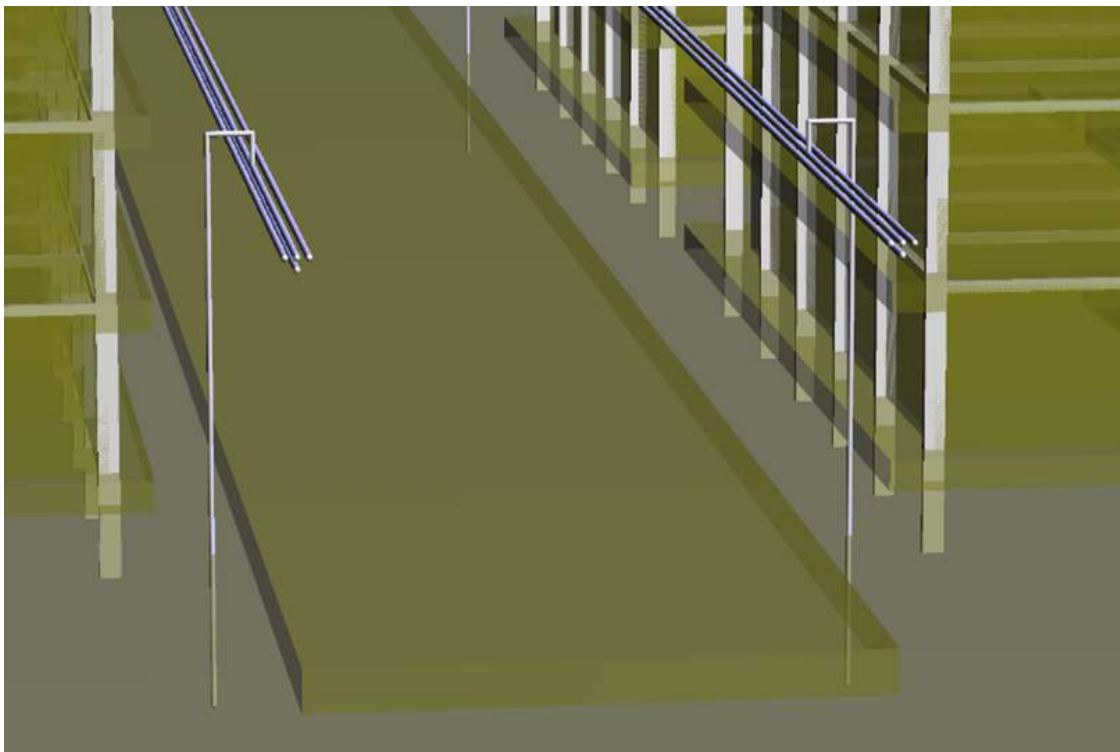


Figura 52: Representação 3D da região de análise estudada no Caso VIII. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T.



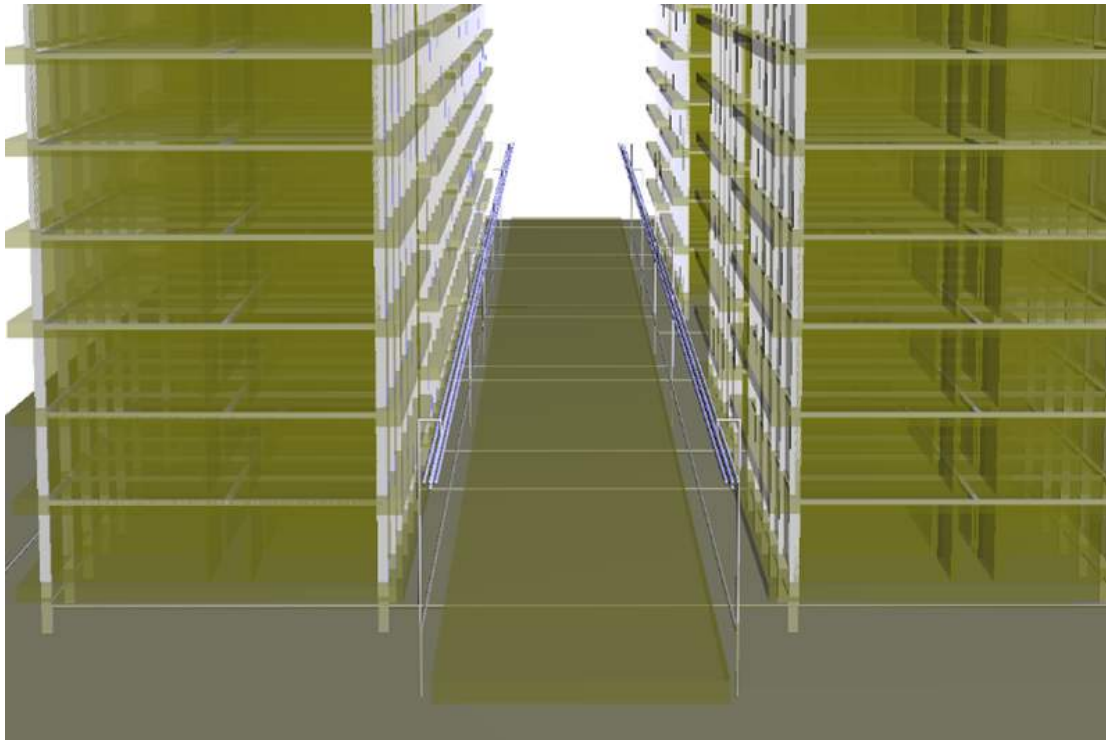


Figura 53: Representação 3D da região de análise estudada no Caso IX.

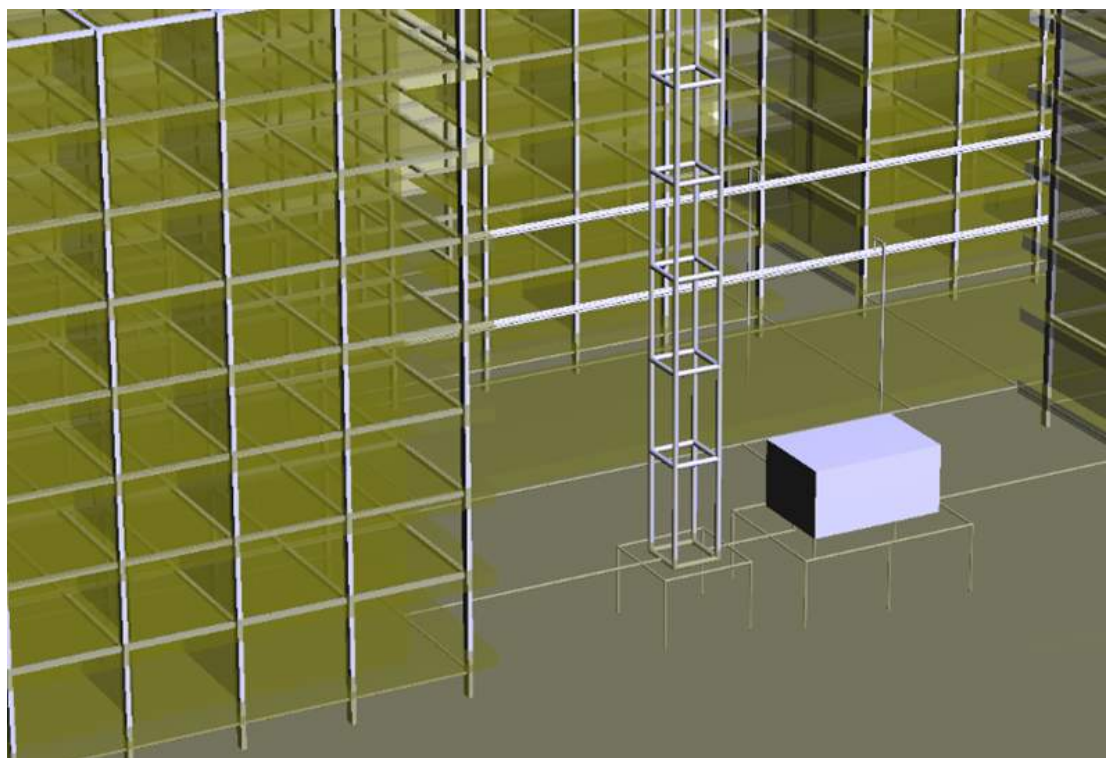


Figura 54: Representação 3D da região de análise estudada no Caso IX. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T e das interligações das malhas de aterramento e torre.

**4.7.2 Caso X e Caso XI: Implementação da *Geometria T Invertido* nas linhas de energia. Medição de tensões induzidas no centro das linhas de energia, considerando os condutores neutro com 6 pontos de aterramento cada. Caso VIII: as fundações dos prédios, os terras dos neutros e a malha de aterramento não encontram-se interligadas. Caso IX: é feita a interligação das fundações dos prédios, com os terras dos neutros e a malha de terra da torre.**

A segunda configuração das linhas de energia é denominada de Geometria T Invertido, mostrada na Fig. 55. Nessa configuração, o condutor neutro aterrado encontra-se posicionado a 7,2 metros do solo, enquanto os três condutores fase que completam a linha, encontram-se posicionados a 7,0 metros do solo, e separados lateralmente de 0,2 metros. O condutor central desse arranjo de fases está localizado 0,2 metros exatamente abaixo do neutro. A simulação que compreende a análise das tensões induzidas nas linhas de energia que utilizam a Geometria T Invertido será denominada de Caso X.

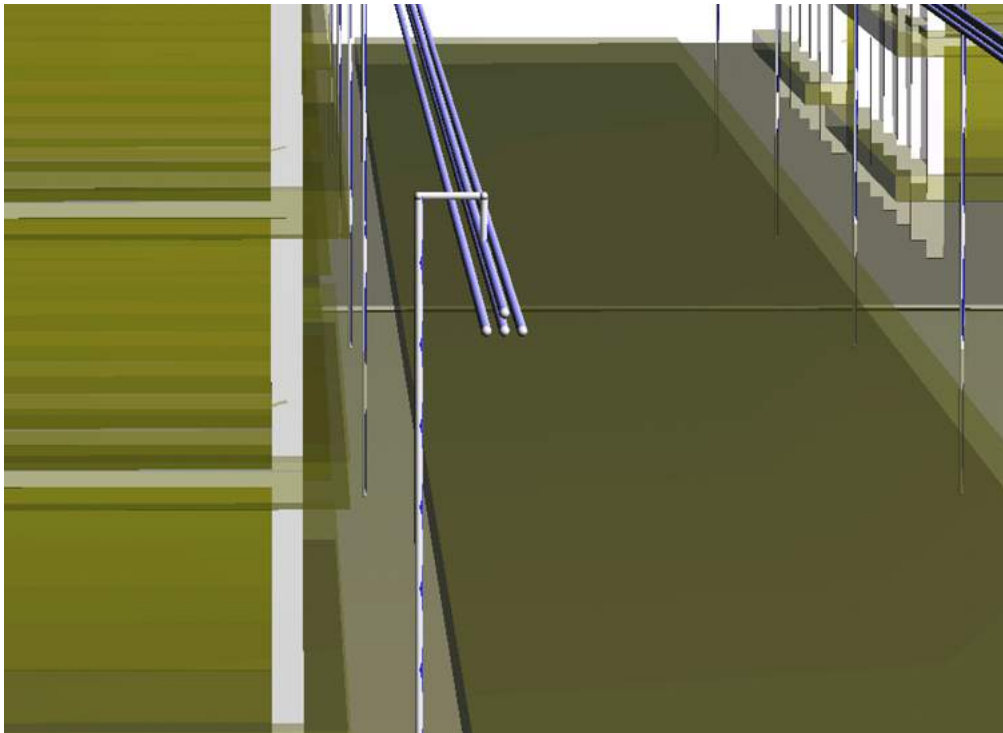


Figura 55: Representação 3D da região de análise estudada no Caso X. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido.

Na tentativa de se minimizar os efeitos causados pelas tensões induzidas nas linhas que utilizam essa geometria, os condutores neutros aterrados foram interligados com as fundações dos prédios e também com a torre, o container e seus sistemas de aterramento. As fundações dos prédios também foram interligadas entre si, totalizando assim, novamente, uma única malha de aterramento onde todos os elementos presentes na região de análise estão conectados, da mesma forma como utilizado nos Caso VII e IX, mostrado nas Figs. 56 e 57. Essa simulação será definida como Caso XI.

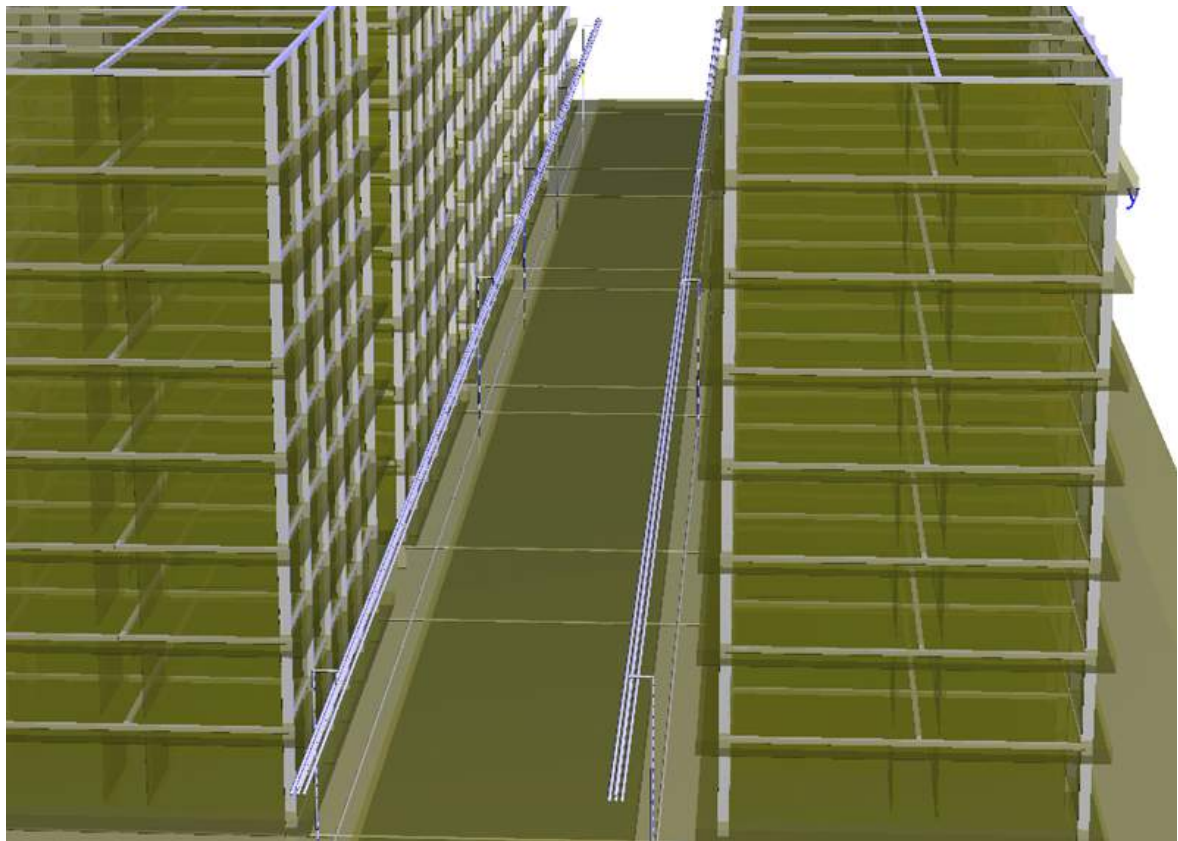


Figura 56: Representação 3D da região de análise estudada no Caso XI. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido e das interligações das fundações dos prédios.



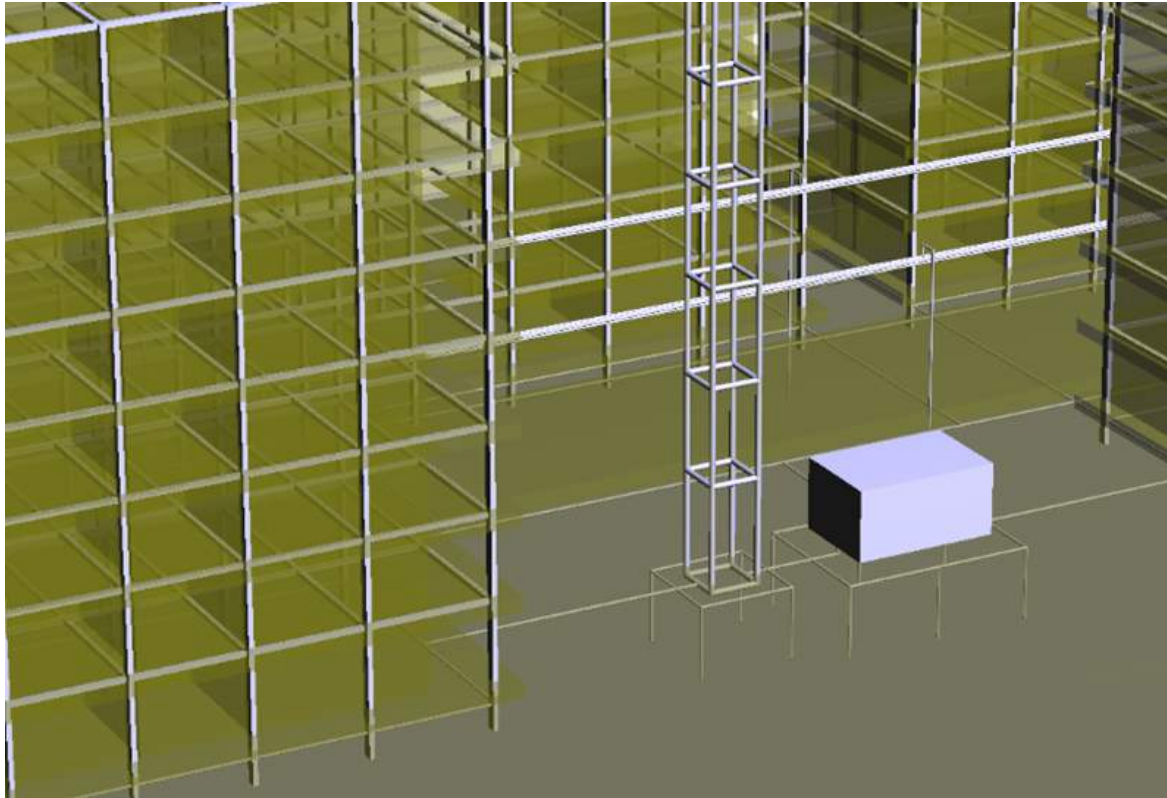


Figura 57: Representação 3D da região de análise estudada no Caso XI. Detalhe da estrutura utilizada nas linhas denominada de Geometria T Invertido e das interligações das malhas de aterramento e torre.

#### 4.7.3 Resultados obtidos com as configurações de linha Geometria T e Geometria T Invertido

A criação dessas configurações tem como objetivo mostrar a eficiência da Geometria T e da Geometria T Invertido, utilizando-se seis pontos de aterramento do condutor neutro (também separados de 30 metros entre si como modelado no Caso VI), no intuito de se promover a redução dos potenciais fase-fase e fase-neutro no momento de uma descarga atmosférica na torre modelada, bem como reduzir o pico de tensão induzida nos condutores fase e neutro de ambas as linhas de baixa tensão. Os resultados mostrados na Fig. 58 (Caso VIII) mostram para o caso mais crítico que, no momento em que a simulação ultrapassa o tempo de  $1 \mu s$ , uma tensão de pico de aproximadamente 6,2 kV é calculada em um dos condutores fase que se encontra presente na linha que está situada mais próxima da torre. No caso dos neutros, valores de pico de aproximadamente 3,4 kV e 2,0 kV são calculados, também no instante em que a simulação ultrapassa o instante de  $1 \mu s$ , para as linhas que se encontram a 10 metros e a 20 metros da torre, respectivamente.

É importante salientar que, no caso da linha que se encontra mais próxima de onde

incide a descarga, um valor máximo de aproximadamente 0,4 kV entre fases foi calculado e que, conforme o tempo dessa simulação avança, esse valor sofre uma diminuição gradual. Quando comparado com o valor de tensão de pico entre fases apresentado no Caso VI, que foi de aproximadamente 0,9 kV, o valor da tensão de pico medida no atual Caso VIII mostra que a estrutura denominada de Geometria T promove uma redução em torno de 0,5 kV nessas tensões induzidas. Da mesma forma, é possível observar um comportamento semelhante a esse quando se analisa o Caso IX.

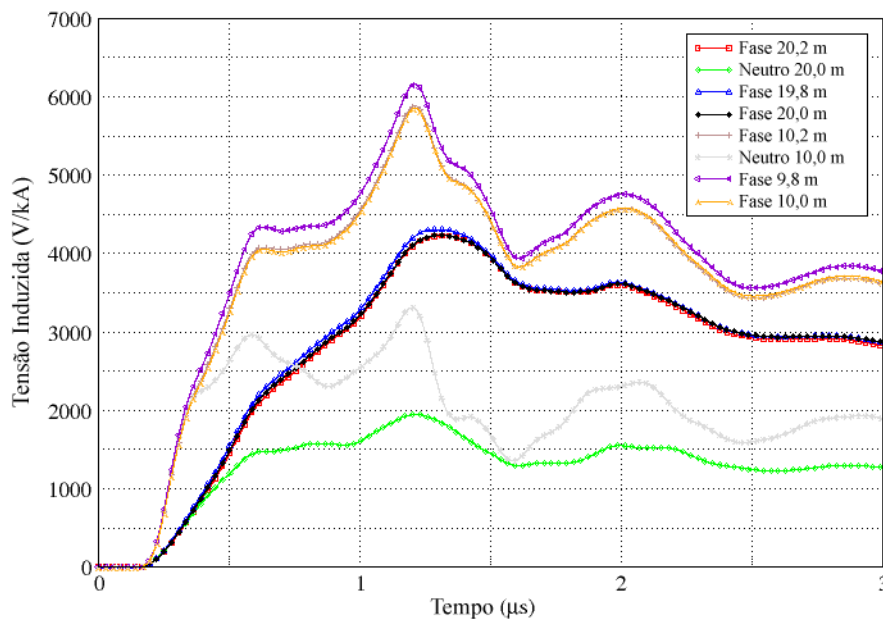


Figura 58: Resultados obtidos para o Caso VIII.

Na Fig. 59 pode-se verificar uma tensão de pico de aproximadamente 4,3 kV em um dos condutores fase da linha afastada de 10 metros da torre, logo após a simulação atingir o tempo de  $1 \mu s$ . Esse valor mostra que, se comparado com o caso VIII, a redução na tensão de pico devido à interligação dos elementos da região de análise para o caso mais crítico fica em torno de 1,9 kV. Já no caso dos neutros, verificam-se tensões de aproximadamente 2,2 kV e 1 kV para os condutores nas linhas afastadas de 10 metros e 20 metros da torre respectivamente, quando o tempo de simulação encontra-se em torno de  $0,5 \mu s$ , mostrando uma redução de aproximadamente 1,0 kV a 1,1 kV quando comparado com o caso VIII. Conforme esse tempo de simulação avança, é possível notar que as tensões induzidas no condutor neutro tendem a uma estabilidade próxima de zero, bem como os valores das tensões fase-fase calculadas.

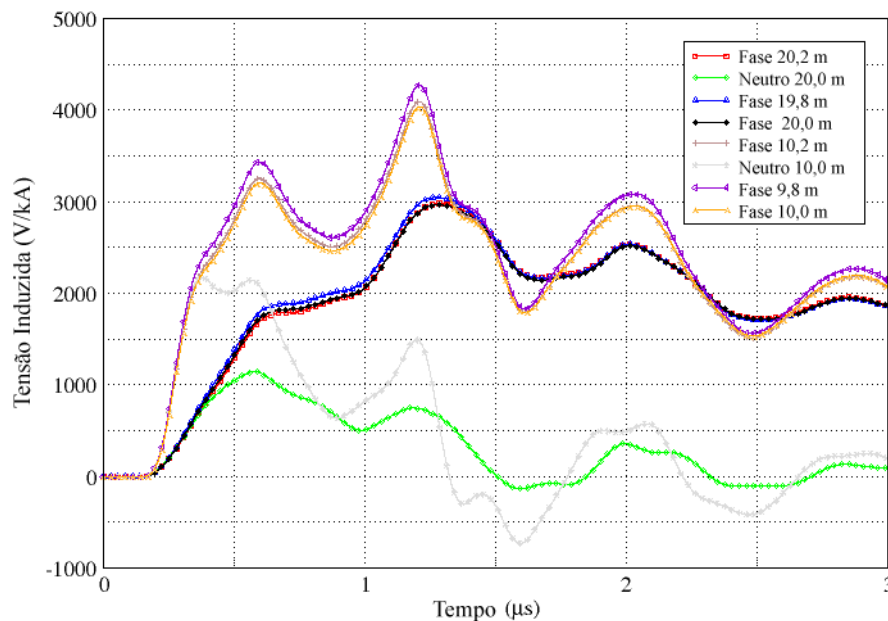


Figura 59: Resultados obtidos para o Caso IX.

Tais comportamentos podem ser explicados tanto pela utilização desta nova geometria, quanto pelos condutores que interligam as estruturas, formando uma única malha de aterramento e promovendo assim um rápido escoamento da corrente injetada no sistema para o solo.

Na análise do Caso X, é possível visualizar na Fig. 60 que, quando a simulação ultrapassa o tempo de  $1 \mu s$ , uma tensão de pico de aproximadamente 6,2 kV pode ser calculada em uma das fases da linha que se encontra situada a 10 metros da torre. Nessa mesma linha, a tensão máxima de pico encontrada no condutor neutro ocorre praticamente nesse mesmo instante de tempo, porém com um valor em torno de 3,5 kV. Para o caso da linha situada a 20 metros da torre, o valor máximo da tensão induzida calculada não ultrapassa 4,4 kV para os condutores fase, e 2,0 kV para o condutor neutro. As tensões fase-fase calculadas na linha situada a 10 metros da torre possuem valores semelhantes às mostradas no Caso VIII, que são de aproximadamente 0,4 kV e, quando essas são comparadas com o Caso VI apresentam também valores de redução da ordem de 0,5 kV.

Quando as fundações dos prédios são interligadas à torre, ao container e aos sistemas de aterramento (Fig.61, Caso XI) é possível notar que a tensão de pico observada para uma das fases localizadas na linha situada a 10 metros da torre fica em torno de 4,3 kV, mostrando assim uma redução de tensão de pico induzida de aproximadamente 1,9 kV

quando comparado com o Caso X. Para o caso dos neutros, os valores de pico obtidos foram de aproximadamente 2,2 kV e 1,2 kV, mostrando uma redução de aproximadamente 1,0 kV para ambos os casos. Quando a simulação do Caso XI atinge os  $3 \mu s$ , as tensões induzidas nos neutros tendem a uma estabilidade com valores muito baixos de tensão induzida. É importante salientar também que os cabos neutros presentes nessa simulação atuam também como cabos-guarda para os condutores fase de ambas as linhas, protegendo-os de eventuais descargas atmosféricas.

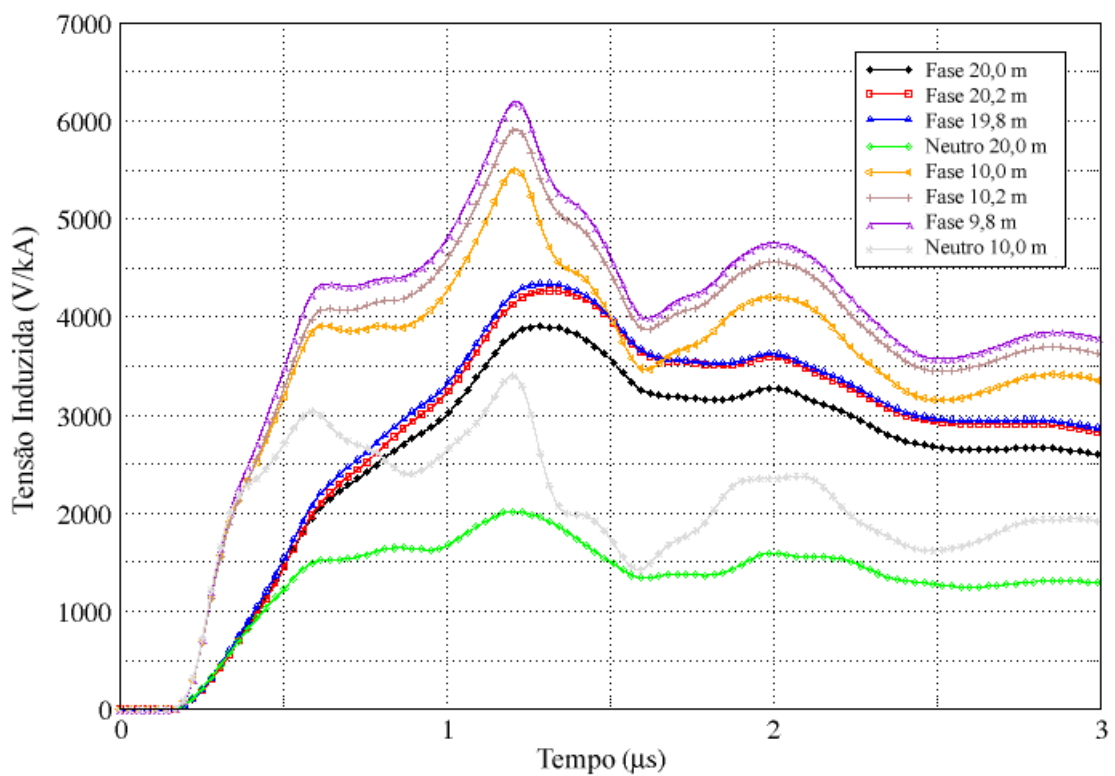


Figura 60: Resultados obtidos para o Caso X.

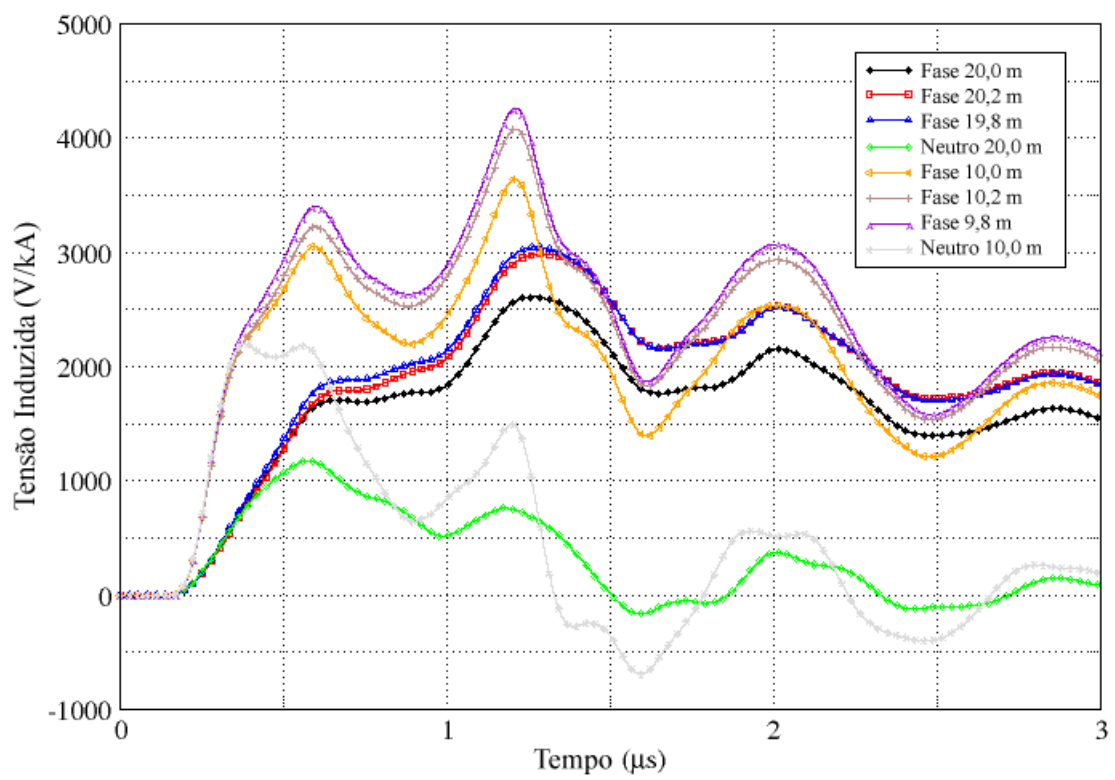


Figura 61: Resultados obtidos para o Caso XI.

## 4.8 Síntese dos Resultados Obtidos nas Simulações Anteriores

Como forma de facilitar a visualização dos resultados obtidos nas simulações computacionais deste trabalho, organizou-se uma tabela comparativa dos onze casos apresentados.

- Caso I - Os resultados obtidos com a simulação que utiliza o modelo de solo metálico concordam com os apresentados na referência [1].
- Caso II - O modelo que considera as propriedades eletromagnéticas do solo promove aumentos significativos nas tensões induzidas nas linhas de transmissão de energia.
- Caso III - A modelagem da torre com geometria realística também promove o aumento das tensões induzidas nas linhas de energia.
- Caso IV - Os prédios auxiliam na redução das tensões de pico induzidas nas linhas de energia, bem como nas diferenças de tensão entre as fases, mas esta última permanece com valor elevado mesmo após um longo período de tempo.
- Caso V - A adição de pontos extras de aterramento promove o melhor escoamento para o solo da tensão induzida nas linhas de energia, reduzindo as tensões de pico.
- Caso VI - As conexões entre os pontos de aterramento promovem uma redução considerável do pico de tensão induzida nos condutores fase bem como uma redução substancial da tensão induzida no condutor neutro, mostrando que o conceito de equipotencialização possui grande importância em um sistema de aterramento.
- Caso VII - A Geometria T se apresenta bastante eficiente para a redução da diferença de tensão fase-fase no momento da descarga.
- Caso VIII - A interligação dos pontos de aterramento, junto com a utilização da Geometria T das linhas, além da redução de tensão fase-fase induzida, promovem juntas a redução da tensão de pico induzida nas linhas de energia e também a redução da tensão induzida no condutor neutro, que atinge valores de tensão induzida bastante reduzidos no momento da descarga.
- Caso IX - A Geometria T Invertido contribui também de forma eficiente para a redução das tensões fase-fase induzida nas linhas no momento da descarga atmosférica remota.
- Caso X - A interligação dos pontos de aterramento do sistema, aliado à Geometria T Invertido, também reduz as diferenças de tensão induzida fase-fase, os picos de tensão, e a tensão induzida no condutor neutro.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É proposta neste trabalho, a construção de novos modelos computacionais para cálculo de tensões induzidas em linhas de baixa tensão por campos eletromagnéticos decorrentes de uma descarga atmosférica. Inicialmente, uma estrutura idêntica a de um trabalho já existente na literatura foi modelada e testada, com o intuito de se promover a validação do *software* utilizado. Os resultados obtidos aqui são coincidentes com aqueles apresentados em tal trabalho. Como o trabalho de referência trata de uma situação não realista, posteriormente, foram apresentadas diferentes situações bastante próximas às encontradas em campo, às quais foram analisadas e logo em seguida comparadas em diferentes casos. Foram propostas também alternativas de minimização dos efeitos indesejáveis dos transitórios induzidos nas linhas, como a adição de mais pontos de aterramento do condutor neutro, bem como a interligação das fundações das estruturas adjacentes à torre.

Também foram propostas duas novas soluções para as configurações das linhas de energia, sendo elas a configuração “T” e a configuração “T Invertido”, ambas com o intuito também de se minimizar tais efeitos indesejáveis decorrentes de transitórios eletromagnéticos na rede de baixa tensão. Foi empregada também neste trabalho a técnica da equipotencialização, aplicada nos casos analisados anteriormente onde especificado, fazendo a interligação de estruturas metálicas (fundações, malhas de terra e pontos de aterramento) através de condutores metálicos, também com o intuito de se reduzir as tensões induzidas nos condutores da linha de energia. A equipotencialização mostrou ser uma técnica de fundamental importância na proteção das linhas de distribuição, promovendo o “escoamento” de tensões induzidas nessas linhas de energia.

A influência de uma modelagem de solo realístico adotada neste trabalho, ou seja, considerando as propriedades eletromagnéticas deste, foi outro ponto bastante importante a ser observado. Quando se utiliza tais parâmetros na modelagem computacional do solo, é bastante notório o efeito da elevação da tensão induzida nas linhas de energia. A modelagem utilizada em [1] utilizando o solo como sendo um metal condutor perfeito, minimiza os valores calculados de tensão induzida, o que pode levar a uma análise incorreta dos reais efeitos do fenômeno das tensões induzidas nas linhas de energia.

As análises dos resultados aqui obtidos mostram níveis bastante elevados de sobre-tensão nos três condutores fase bem como no condutor neutro das linhas de energia, sendo que na linha que se encontra mais próxima à torre onde incide a descarga atmosférica, o

efeito é mais proeminente. A diferença de potencial entre Fase-Neutro e Fase-Fase na rede de energia elétrica sofre uma mudança de valor bastante abrupta em um espaço de tempo bastante curto, em torno de  $1 \mu_s$ , a partir do momento em que a descarga atmosférica se manifesta. Em todos os casos foi possível observar que, após esse instante inicial, várias oscilações se sucedem ao longo do tempo, caracterizando que quando o pulso de corrente atinge o topo da torre (momento inicial da descarga atmosférica - ponto de *attachment*), este se propaga até a base da torre e, ao atingir o solo, uma porção desse pulso é escoada para dentro do solo pela malha de aterramento da torre, e a porção restante reflete no solo com inversão de fase até chegar novamente à cabeceira da torre.

Nesse momento, uma parte desse pulso segue em direção à UPML, já que existe um canal de descarga modelado ligando a torre à parede absorvente da UPML, e a outra parte segue novamente ao solo. Essa situação se repete até que todo o pulso atmosférico seja escoado tanto para o solo, como para a UPML. É interessante ressaltar que em todos esses momentos, desde a injeção de corrente na torre até a extinção total do pulso atmosférico, uma onda eletromagnética que se propaga em direção radial à torre modelada é gerada e se distribui pelas imediações das linhas de energia e estruturas adjacentes, explicando assim valores de tensão oscilatórios calculados nas linhas de energia no momento em que a descarga ocorre. Foi possível observar também que a porção das linhas de energia que apresenta maiores valores de tensão induzida é justamente a que se encontra perpendicular à torre modelada. Esse comportamento pode ser explicado de forma que esse caminho representa a menor distância do ponto de incidência da descarga até a posição da linha, permitindo que o pulso eletromagnético gerado percorra uma distância menor até iluminar a linha de energia, sofrendo assim menor atenuação em sua amplitude.

A presença de estruturas adjacentes às linhas de energia (prédios modelados) desempenham um papel bastante importante na diminuição das tensões induzidas nas linhas de energia. Por serem constituídas em sua maioria de um material dielétrico (mesmas propriedades do concreto real), as estruturas desempenham um papel de blindagem natural para o pulso eletromagnético que se propaga a partir da torre metálica modelada. Com isso, o valor da atenuação da onda que se propaga até as linhas de energia sofre uma atenuação considerável em seu percurso, resultando assim em uma diminuição nos valores de tensão induzida na rede de baixa tensão. Outro fato interessante é o papel que as vigas metálicas apresentam na redução dos valores de campos eletromagnéticos



no interior dos prédios modelados. Na faixa de frequência em que se encontra o pulso atmosférico que vai até algumas centenas de kHz, os comprimentos das ondas do pulso eletromagnético propagante é suficientemente grande para serem bloqueado pela Gaiola de Faraday que as vigas metálicas modeladas formam. Como um todo, o prédio também passa a desenvolver um papel fundamental na proteção de seus habitantes quando se considera uma situação real, impedindo que em seu interior sejam formados gradientes de potenciais intensos pondo em risco a vida humana. Ainda sobre as vigas, é importante salientar que as mesmas quando interligadas com outros sistemas de aterramento adjacentes, promovem um escoamento da corrente circulante no sistema para camadas mais profundas do solo, promovendo a segurança de quem se encontra na porção externa dos prédios devido também à diminuição de gradientes de potenciais intensos.

Na verificação das curvas de nível do campo elétrico presente no sistema na hora da descarga, é possível notar que nas imediações da torre, em especial nas bordas das malhas de aterramento da mesma, surgem gradientes de potenciais bem mais intensos do que os encontrados em outras regiões do sistema analisado. A torre metálica pode ser considerada um ponto preferencial para a ocorrência de descargas atmosféricas, e ao se considerar uma situação real, a torre e seus arredores constituem um ponto de grande perigo para a circulação de pessoas, especialmente em situações em que a ocorrência de descargas atmosféricas é mais provável, como por exemplo, chuvas ou tempestades. Como pode ser visto em qualquer cidade, essas torres de telecomunicações (ERBs) são figuras cada vez mais presentes no cotidiano, e instaladas nos locais mais inusitados possíveis, como quintais ou jardins de casas que cedem espaço por um aluguel mensal, ou mesmo nas adjacências de outras residências.

Torres de telecomunicações requerem uma atenção especial por parte das operadoras responsáveis pelo serviço de telefonia e também da concessionária de energia local. Além da boa qualidade de energia elétrica fornecida, é necessário que haja a preservação da segurança nas proximidades da instalação, bem como a integridade da unidade consumidora de energia e principalmente a preservação da vida humana, único bem irreparável.

## Referências

- [1] F. H. Silveira, “Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas,” Ph.D. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [2] S. Visacro and J. Soares, “Hem: A model for simulation of lightning related engineering problems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20.
- [3] K. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302–307, 1966.
- [4] S. D. Gedney, “An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of fdtd lattices,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, pp. 1630–1639, 1996.
- [5] Y. Baba, N. Nagaoka, and A. Ametani, “Modeling of thin wires in a lossy medium for fdtd simulations,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, 2005.
- [6] F. H. Harlow and J. E. Welch, “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface,” *Physics of Fluids*, vol. 8, pp. 2182–2189, 1965.
- [7] M. N. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition*. CRC Press, 2000.
- [8] E. T. Tuma, R. O. Santos, and C. Sobrinho, “Análise do comportamento transitório dos parâmetros de sistemas de aterramento usando o método fdtd,” *VI Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2004.
- [9] F. C. B. F. Muller, R. G. Farias, C. L. S. S. Sobrinho, and V. Dmitriev, “Multistatic radar with ultra wideband pulses: Fdtd simulation,” *International Microwave and Optoelectronic Conference*, 2005.
- [10] R. L. R. Miry, C. Gillard, “An application of the multilevel dg-fdtd to the study of a medical implant antenna in different body models,” *Applied Sciences on Bi-*

*omedical and Communication Technologies, 2008. ISABEL '08. First International Symposium on*, pp. 1–5, 2008.

- [11] J. C. Maxwell, “A dynamical theory of the electromagnetic field,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459–512, 1865.
- [12] D. B. Davidson, *Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*. Cambridge University Press, 2005.
- [13] G. D. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equations, Finite Difference Methods, Third Edition*. Oxford University Press, 1985.
- [14] A. Taflov and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House Inc., 2000.
- [15] R. Courant, K. O. Friedrichs, and H. Lewy, “Über die partiellen differenz-gleichungen der mathematischen physik,” *Mathematische Annalen*, vol. 100, pp. 32–74, 1928.
- [16] K. R. Umashankar, “Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity,” vol. 35, pp. 1248–1257, 1987.
- [17] T. Noda and S. Yokoyama, “Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation,” *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 17, pp. 840–847, 2002.
- [18] G. Mür, “Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations,” vol. 23, pp. 377–382, 1981.
- [19] R. Higdon, “Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation,” *Mathematics of computation*, vol. 49, pp. 65–90, 1987.
- [20] Z. Liao, H. Wong, B.P.Yang, and Y.F.Yuan, “A transmitting boundary for transient wave analysis,” *Scientia Sinica*, vol. XXVII (series A), pp. 1063–1076, 1984.
- [21] R. Holland and J. Williams, “Total-field versus scattered-field finite-difference,” *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 30, pp. 4583–4587, 1983.
- [22] J. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *J. Computational Physics*, vol. 114, pp. 185–200, 1994.

- [23] D. S. Katz, E. T. Thiele, and A. Taflove, "Validation and extension to three-dimensions of the berenger pml absorbing boundary conditions for fdtd meshes," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 4, pp. 268–270, 1994.
- [24] M. Cai and H. Zhou, "Proof of perfectly matched layer conditions in three dimensions," *Electronics Lett.*, vol. 31, pp. 1675–1676, 1995.
- [25] J. F. Almeda, C. L. S. S. Sobrinho, and R. O. dos Santos, "Técnica computacional para implementação de condições de fronteira absorvente upml por fdtd: Abordagem completa," *IEEE America Latina*, vol. 3, pp. 1–5, 2005.
- [26] "General public license," *The GNU at the Web*: <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>, 1991.
- [27] "Lam/mpi parallel computing," <http://www.lam-mpi.org>.
- [28] R. M. S. Oliveira, "Nova Metodologia para Análise e Síntese de Sistemas de Aterramento Complexos Utilizando o Método LN-FDTD, Computação Paralela Automática e Redes Neurais Artificiais," Ph.D. thesis, Universidade Federal do Pará, 2008.
- [29] "Beowulf.org: The beowulf cluster site," <http://www.beowulf.org>.
- [30] "Linux network file system - nfs," <http://nfs.sourceforge.net>.
- [31] "Linux network information service (nis)," <http://www.linux-nis.org/nis/>.
- [32] "Rsh man pages," <http://unixhelp.ed.ac.uk/CGI/man-cgi?rsh>.
- [33] G. Diendorfer, "Induced voltage on an overhead line due to nearby lightning," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 32, 1990.
- [34] R. H. T. Chamié Filho, R. M. S. de Oliveira, and C. L. da S. S. Sobrinho, "Simulations of lightning strokes on transmission lines at urban environments," *International Conference on Grounding and Earthing and 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects*, 2008.
- [35] A. Sommerfeld, *Partial Differential Equations in Physics*. Academic Press Inc, NY, 1949.

- [36] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kröniger, “Parameters os lightning flashes,” *Electra*, vol. 41, pp. 23–37, 1975.
- [37] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, “Lightning parameters for engineering applications,” *Electra*, vol. 69, 1980.
- [38] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning - Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003.
- [39] E. D. Sundaе, “Earth conduction effects in transmission systems,” *Bell Laboratories*.