

SALMO PUSTILNICK

**ANÁLISE PELO MÉTODO FDTD
DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS
EM ESTRUTURAS ATINGIDAS
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

CURITIBA

2004

SALMO PUSTILNICK

**ANÁLISE PELO MÉTODO FDTD
DOS EFEITOS ELETROMAGNÉTICOS
EM ESTRUTURAS ATINGIDAS
POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Área de Concentração: Compatibilidade
Eletromagnética

Orientador: Wilson Arnaldo Artuzi Junior, Ph.D

CURITIBA

2004

Eu dedico esta obra à minha esposa Tami e minha filha Ilana.
Vocês são a grande motivação que me levou a realizar este trabalho.

Também dedico ao meu sogro José (Ua), quem me iniciou no estudo da proteção
contra descargas atmosféricas e tem sido um grande exemplo de conduta de vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Wilson Arnaldo Artuzi Júnior por sua brilhante orientação e permanente auxílio.

Aos professores Alexandre Piantini, Renê Robert e Ewaldo Mehl pelas valiosas contribuições.

Ao Prof. Dr. Antonio Panicali, pela colaboração.

A todos os companheiros do mestrado, que contribuíram de forma valiosa com suas opiniões. Em especial, aos companheiros Michelle Foltran, Sinésio Julio Barberini e Márcio Braga.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Aos meus pais Isac e Genia, minhas irmãs Karla e Kátia e a todos os familiares que sempre me incentivaram.

Ao meu primo e amigo Renato Pustilnick, pela amizade, companheirismo e incentivo.

Ao amigo Sérgio Gurovski pelo apoio e amizade.

A CAPES pela bolsa de estudos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO	V
LISTA DE ACRÔNIMOS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1 INTRODUÇÃO	14
2 NORMAS TÉCNICAS	18
2.1 SISTEMA EXTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	19
2.1.1 SUBSISTEMA DE CAPTORES.....	19
2.1.2 SUBSISTEMA DE CONDUTORES DE DESCIDA	22
2.1.3 SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO.....	25
2.2 SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	28
2.2.1 EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS	28
3 MÉTODO FDTD	31
3.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL EM TRÊS DIMENSÕES.....	31
3.2 O ALGORITMO DE YEE.....	35
3.3 DIFERENÇAS FINITAS PARA AS EQUAÇÕES DE MAXWELL	39
3.4 INTERPRETAÇÃO DAS LEIS DE FARADAY E AMPERE NA FORMA INTEGRAL	41
3.5 MODELAMENTO DE SUPERFÍCIES CONDUTORAS.....	45
3.6 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE.....	46
4 SIMULAÇÕES	48
4.1 MODELO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	48
4.2 MODELO DO ESPAÇO COMPUTACIONAL	51
4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CANAL DO RAI0	54

4.4 COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS DE BUCCELLA <i>ET.AL.</i> [28]	55
4.4.1 MODELAGEM DA SIMULAÇÃO	56
4.4.2 COMPONENTE VERTICAL DO CAMPO ELÉTRICO	57
4.5 COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS DE PANICALI [29]	60
4.5.1 CORRENTES NOS CONDUTORES DE DESCIDA DO SPDA	60
4.5.2 AVALIAÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA	63
4.6 ANÁLISE DO CAMPO ELÉTRICO NUMA EDIFICAÇÃO TÍPICA	66
4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	88
4.7.1 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS	88
4.7.2 RESULTADOS PARA UM PULSO COM TEMPOS DE 0,25/2,5 μ s	94
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS	102
ANEXOS	106

LISTA DE ACRÔNIMOS

Sigla	Definição	Significado
ABC	<i>Absorbing Boundary Condition</i>	Condição de contorno absorvente
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>	Órgão Responsável pela Normalização Técnica no Brasil
ALDIS	<i>Austrian Lightning Detection and Information System</i>	Sistema Austríaco de Detecção e Informação de Raios
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>	Instituto Nacional Americano de Normalização
DPS	<i>Dispositivo de Proteção Contra Surtos</i>	Dispositivo destinado a proteger uma determinada instalação ou equipamento contra surtos causados por descarga atmosférica
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>	Compatibilidade Eletromagnética
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>	Interferência Eletromagnética
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>	Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FFT	<i>Fast Fourier Trasnformer</i>	Transformada Rápida de Fourier
ICLRT	<i>International Center for Lightning Research and Testing</i>	Centro Internacional para a Pesquisa e Testes de Descargas Atmosféricas
IEC	<i>International Electrotechnical Comission</i>	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Organização Internacional para a Normalização
LEMP	<i>Lightning Electromagnetic Impulse</i>	Pulso eletromagnético originado por descarga atmosférica
LPATS	<i>Lightning Position and Tracking System</i>	Sistema de Localização e Posicionamento de Raios
MoM	<i>Method of Moments</i>	Método dos Momentos
PEC	<i>Perfect Electric Conductor</i>	Condutor Elétrico Perfeito

Sigla	Definição	Significado
RINDAT	<i>Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil</i>	Órgão responsável pelo intercâmbio de informações a respeito das descargas atmosféricas no Brasil
RTL	<i>Rocket-Triggered Lightning</i>	Raios Disparados por Foguetes
SI	<i>Sistema Internacional de Unidades</i>	Sistema internacional de unidades de medida
SPDA	<i>Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas</i>	Sistema responsável pela proteção contra raios, composto de subsistemas de captação, condutores de descida, aterramento e equalização de potenciais

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descrição	Página
Figura 2.1	Malhas de captação	20
Figura 2.2	Método da esfera rolante	21
Figura 2.3	Condutores de descida	23
Figura 2.4	Malha de aterramento	27
Figura 2.5	Malha ou anel de equalização de potenciais	29
Figura 3.1	Célula cúbica unitária do espaço entrelaçado de Yee	36
Figura 3.2	Gráfico do espaço-tempo do algoritmo de Yee para a propagação de uma onda em uma dimensão	37
Figura 3.3	Lei de Ampere para o passo correspondente à H_z	42
Figura 3.4	Lei de Faraday para o passo correspondente à E_z	42
Figura 4.1	Forma de onda da corrente do raio	49
Figura 4.2	Espectro de frequências da corrente do raio	50
Figura 4.3	Modelo do espaço computacional	51
Figura 4.4	Superfícies laterais do espaço computacional	52
Figura 4.5	Superfície superior e inferior do espaço computacional	52
Figura 4.6	Distância L , entre a extremidade do edifício e a superfície limite do espaço computacional	53
Figura 4.7	Canal do raio	54
Figura 4.8	Componente vertical normalizada (E_z/E_{zp}) do campo elétrico como função da altura (H) do canal do raio	55
Figura 4.9	Configuração geométrica do SPDA	61
Figura 4.10	Configuração geométrica do SPDA com a extremidade do condutor em aberto	64
Figura 4.11	Configuração geométrica do SPDA com o condutor conectado ao piso do 5º pavimento	65
Figura 4.12	Geometrias do SPDA	67

Figura	Descrição	Página
Figura 4.13	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	69
Figura 4.14	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	70
Figura 4.15	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	71
Figura 4.16	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	72
Figura 4.17	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	74
Figura 4.18	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	75
Figura 4.19	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	76
Figura 4.20	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	77
Figura 4.21	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	79
Figura 4.22	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	80
Figura 4.23	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	81
Figura 4.24	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	82
Figura 4.25	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	84
Figura 4.26	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	85
Figura 4.27	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	86
Figura 4.28	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	87
Figura 4.29	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	89
Figura 4.30	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	90
Figura 4.31	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)	95
Figura 4.32	Distribuição do campo elétrico máximo: (a) na direção x e (b) na direção y	96

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Página
Tabela 2.1	Posicionamento de captores conforme o nível de proteção	22
Tabela 2.2	Espaçamento médio dos condutores de descida não naturais conforme o nível de proteção	24
Tabela 2.3	Seções mínimas dos materiais do SPDA	25
Tabela 2.4	Materiais do SPDA e condições de aplicação	27
Tabela 2.5	Seções mínimas dos condutores de ligação equipotencial para conduzir parte substancial da corrente de descarga atmosférica	29
Tabela 2.6	Seções mínimas dos condutores de ligação equipotencial para conduzir uma parte reduzida da corrente de descarga atmosférica	30
Tabela 4.1	Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio igual a 1x a altura do SPDA	57
Tabela 4.2	Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio igual a 1x a altura do SPDA	58
Tabela 4.3	Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio 2x a altura do SPDA e com malha gradual	58
Tabela 4.4	Comparação entre os métodos FDTD e MoM	59
Tabela 4.5	Percentual de corrente em cada condutor de descida	62
Tabela 4.6	Resultados comparativos entre FDTD x MoM	66
Tabela 4.7	Resultados do campo elétrico máximo nas duas paredes do edifício, para as direções x (Ex), y (Ey) e z (Ez)	91
Tabela 4.8	Resultados do campo elétrico máximo nas três alturas do edifício, para as direções x (Ex) e y (Ey)	92
Tabela 4.9	Resultados do campo elétrico máximo nas duas paredes do edifício, para as direções x (Ex), y (Ey) e z (Ez)	97
Tabela 4.10	Resultados do campo elétrico máximo nas três alturas do edifício, para as direções x (Ex) e y (Ey)	97

RESUMO

O fenômeno das descargas atmosféricas representa atualmente um importante aspecto na vida humana. Não se poupam esforços no sentido de minimizar os danos causados por este fenômeno. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise qualitativa do comportamento do campo eletromagnético, da distribuição de correntes e das tensões induzidas em edificações atingidas por descargas atmosféricas, através do método FDTD. Esta análise leva em consideração os aspectos mais importantes relacionados às normas técnicas atuais de proteção contra descargas atmosféricas e também os aspectos relacionados à compatibilidade eletromagnética (EMC). Estão abordadas as diversas características geométricas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e seus subsistemas de captação, condutores de descida e aterramento, além de considerações fundamentais a respeito da equalização de potenciais.

Palavras-chave: Compatibilidade eletromagnética, Descargas atmosféricas, Métodos numéricos.

ABSTRACT

The phenomenon of the lightning represents an important aspect in the life human being. Efforts to prevent the actual damages caused by this phenomenon are of relevant importance. The objective of this work is to carry through an analysis of the behavior of the electromagnetic field, the current distribution and the induced voltages in constructions stroke by lightning, by the FDTD method. This analysis also takes in consideration aspects related to the current standard techniques of protection against lightning and electromagnetic compatibility (EMC).

Keywords: Electromagnetic compatibility, Lightning, Numeric methods.

1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas, ou simplesmente raios, certamente estão incluídos entre os fenômenos naturais mais importantes para a humanidade. Tanto do ponto de vista da proteção de pessoas e animais, como também com relação à proteção de equipamentos e estruturas.

A grande expansão tecnológica que vem ocorrendo nos últimos 100 anos e a proliferação dos equipamentos eletrônicos tem elevado sensivelmente o risco de ocorrência de problemas causados pelas descargas atmosféricas. Os sistemas de telecomunicações, os quais estão em plena expansão, os sistemas de energia e também os sistemas computacionais são as áreas onde estas conseqüências são mais evidentes e os prejuízos materiais chegam a cifras enormes.

Têm-se desenvolvido numerosas pesquisas envolvendo os diversos aspectos e parâmetros das descargas atmosféricas. Com relação à fenomenologia do raio, procura-se conhecer as principais características da forma de onda do raio: a amplitude, os tempos de ocorrência dos pulsos, o número de descargas subseqüentes e o espectro de freqüências gerado pelo raio. Nos trabalhos publicados por Uman [1] e [2], são apresentadas descrições detalhadas das diversas formas de descargas atmosféricas, sejam elas ocorridas entre nuvens, de nuvem para o solo, podendo ser classificada como positiva ou negativa, ou ainda do solo para a nuvem. No caso de Rakov *et. al.* [3], são analisadas as rajadas de pulsos durante a ocorrência dos raios. Pritindra Chowdhury [4] faz uma abordagem dos parâmetros do raio e seus efeitos nos sistemas de energia. No artigo publicado por V. Shostak *et. al.* [5] são analisadas as características de corrente e do campo eletromagnético de raios compostos por descargas múltiplas, que atingiram uma torre de 553m de altura em Toronto, no Canadá. Em [6], Giorgio Baldo faz uma abordagem do ponto de vista físico do raio e também apresenta uma comparação entre três modelos propostos para representar a descarga atmosférica. São eles os modelos Rizk, Eriksson e Dellera/Garbagnati. Takatoshi Shindo *et. al.* [7] apresenta uma nova teoria relativa à blindagem para os raios ascendentes.

Além das inúmeras publicações relacionadas à análise das características dos raios naturais, tem-se investido muito em pesquisas utilizando-se técnicas cujo

objetivo é o de se forçar, ou de se induzir a ocorrência de uma descarga atmosférica em um determinado ponto de impacto desejado, de maneira que se possam facilitar as medições relacionadas a este fenômeno. Um forte representante desta linha de pesquisa é o Dr. Vladimir A. Rakov. O sistema utilizado pelo Dr. Rakov basea-se no lançamento de um foguete conectado a terra através de um cabo de cobre, até as nuvens de tempestades, de forma que se tente induzir a descarga elétrica da nuvem para a terra através do cabo de cobre. Em [8] são apresentados resultados referentes a raios diretos no sistema de proteção de uma residência teste, induzido através da utilização de foguete. Esta experiência foi realizada no ICLRT (*International Center for Lightning Research and Testing*) em Camp Blanding, Flórida, Estados Unidos. Marvin E. Morris *et.al.* [9] faz um estudo a respeito da utilização do sistema de raios disparados por meio de foguetes (RTL), com o objetivo da proteção de locais críticos, como por exemplo locais contendo materiais explosivos.

Diversos trabalhos envolvendo a análise e medição de raios através da utilização de sistemas de localização de raios (LPATS) têm sido desenvolvidos em todo o mundo. Em Diendorfer *et. al.* [10] são apresentadas comparações das características de raios ocorridos na Áustria, detectados através do sistema ALDIS. Em Bogotá, na Colômbia, Horácio Torres *et. al.* [11] apresentaram estimativa da corrente de pico dos raios através de uma análise comparativa entre diversos modelos, calculados a partir do campo elétrico medido. Katz *et. al.* [12] apresentam os primeiros resultados obtidos pelo sistema de localização de descargas atmosféricas instalado em Israel. Fedoseev *et. al.* [13] apresentam uma proposta para um sistema de detecção e localização de raios na Tailândia. No Brasil, país onde o índice de descargas atmosféricas está entre os mais elevados do mundo, um trabalho bastante importante tem sido desenvolvido pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR, o qual faz parte da RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil). Uma das principais atividades deste órgão é o monitoramento das descargas atmosféricas na região sul do Brasil e a disponibilização de dados históricos ou informações em tempo real, como data e hora da ocorrência da descarga, valor de pico e polaridade da corrente de retorno.

Com estes exemplos percebe-se que o interesse no monitoramento dos raios, em todo o mundo, é muito grande.

A avaliação das conseqüências fisiológicas causadas pela passagem da corrente do raio pelo corpo humano também é motivo de vasta pesquisa, além dos efeitos eletromagnéticos e das formas de proteção contra as descargas atmosféricas. Meliopoulos [14] apresenta uma análise dos efeitos relacionados à segurança de pessoas e animais que estão próximos ao local de impacto do raio.

As pesquisas envolvendo estudos relacionados a descargas atmosféricas em linhas de transmissão e distribuição também constituem uma área de muito interesse e com uma vasta e variada gama de trabalhos. Em [15, 16, 17 e 18] temos alguns trabalhos que exemplificam as tendências desta linha de pesquisa e tratam questões específicas como a influência do tipo e dimensões da torre de transmissão, do arranjo do aterramento, da resistividade do solo e da atividade dos raios e seus parâmetros na região em análise.

Quanto à avaliação dos efeitos eletromagnéticos, ou seja, da distribuição do campo elétrico e do campo magnético no interior de edificações atingidas por raios, e da indução causada por estes campos, na forma de correntes de surto e tensões induzidas, o número de publicações tem crescido muito nos últimos anos, demonstrando o grande interesse dos pesquisadores por este fenômeno e suas conseqüências. Em S. Pustilnick *et. al.* [19] são mostrados alguns resultados referentes à distribuição do campo elétrico no interior de um edifício atingido por uma descarga atmosférica. Dentro deste contexto os modelamentos matemáticos e as simulações computacionais através de métodos numéricos constituem-se nas ferramentas mais utilizadas, entretanto quando os recursos permitem, recorre-se também à experimentação prática através de modelos em escala reduzida, ou em algumas poucas situações, a modelos em escala real, como nos casos das pesquisas utilizando os foguetes.

Com relação especificamente aos métodos numéricos utilizados para o cálculo das grandezas eletromagnéticas, os estudos concentram-se basicamente entre o Método dos Momentos (MoM) e Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). Este último, atualmente, ocupando um lugar preferencial por parte dos pesquisadores.

No capítulo 2 serão apresentados os preceitos mais importantes com relação à proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, exigidos pelas normas técnicas, em particular, pela norma brasileira, a NBR-5419 [20]. O objetivo deste capítulo é de salientar os fatores mais significativos relacionados ao sistema de proteção contra descargas atmosféricas, os quais foram avaliados na etapa de simulações.

No capítulo 3 serão abordadas as motivações para a utilização do método FDTD e também sua formulação e características.

No capítulo 4 serão apresentados detalhadamente os resultados das diversas simulações computacionais realizadas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, além dos critérios e parâmetros adotados em cada situação. O principal objetivo das simulações é de analisar o comportamento do campo elétrico gerado ao longo da estrutura atingida pela descarga atmosférica. Esta análise tomará como referência as diferentes configurações geométricas do SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), de forma que se possa avaliar a sua influência sobre a distribuição do campo elétrico.

2 NORMAS TÉCNICAS

O fórum nacional de normalização, ou seja, o organismo oficial responsável pela normalização técnica no Brasil é a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas e a norma vigente relacionada à proteção de estruturas contra descargas atmosféricas é a NBR-5419:2001 [20], válida a partir de 30 de março de 2001. Esta norma foi baseada nas normas internacionais IEC 61024-1:1990 [21], IEC 61024-1-1:1993 – Guide A [22] e IEC 61024-1-2:1998 – Guide B [23] e fixa as condições exigíveis ao projeto, instalação e manutenção do SPDA para a proteção de estruturas, pessoas e instalações no seu aspecto físico dentro do volume protegido.

Um aspecto importante é que esta norma aplica-se às estruturas comuns, utilizadas para fins comerciais, industriais, agrícolas, administrativas ou residenciais e também para as estruturas especiais, conforme o Anexo A da NBR 5419 [20]. Esta norma não se aplica aos sistemas ferroviários, sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica externos às estruturas, sistemas de telecomunicação externos às estruturas e também para veículos, aeronaves e plataformas marítimas.

Vale ressaltar que esta norma não contempla a proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra interferências eletromagnéticas causadas pelas descargas atmosféricas. Entretanto, durante o desenvolvimento deste trabalho serão analisados vários aspectos relevantes da relação entre o sistema de proteção contra descargas atmosféricas e o campo eletromagnético gerado no interior de uma edificação atingida por descargas atmosféricas.

Com relação à elaboração e ao dimensionamento de um SPDA, a NBR 5419 [20] estabelece dois sistemas distintos: o sistema externo (seção 5.1 de [20]) e o sistema interno (seção 5.2 de [20]) de proteção contra descargas atmosféricas.

2.1 SISTEMA EXTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O sistema externo de proteção contra descargas atmosféricas aborda basicamente os aspectos de dimensionamento dos subsistemas de captação, subsistema de condutores de descida e subsistema de aterramento do SPDA.

Em algumas situações específicas a instalação de um SPDA é dispensada e, para se determinar se uma estrutura necessita ou não de sistema de proteção contra descargas atmosféricas, deve-se recorrer ao Anexo B da NBR 5419 [20]. No caso de haver necessidade, este anexo também mostra como se faz a seleção do nível de proteção.

2.1.1 SUBSISTEMA DE CAPTORES

Também chamado simplesmente por captor, este subsistema, (subseção 5.1.1 da NBR 5419 [20]), é a parte, do SPDA externo, destinada a interceptar as descargas atmosféricas. A grande importância deste subsistema está baseada no fato de que a probabilidade de penetração de uma descarga atmosférica no volume a proteger é consideravelmente reduzida pela presença de um subsistema de captação corretamente projetado.

Os captosres que podem ser utilizados são uma combinação dos seguintes elementos: hastes, cabos esticados, condutores em malha ou elementos naturais, que são componentes da própria estrutura, porém desempenham uma função de proteção contra descargas atmosféricas, mas, que não foram instalados especificamente para este fim. A figura 2.1 apresenta dois exemplos de captosres em malha.

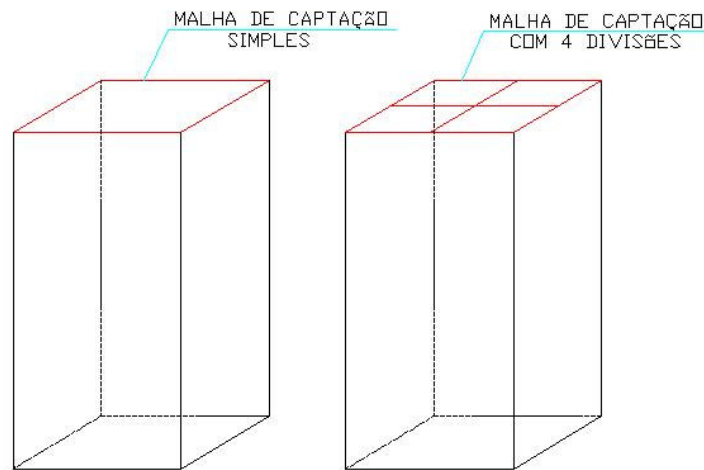


Figura 2.1 – Malhas de captação

Com relação ao posicionamento dos captores, deve-se observar a tabela 2.1, a qual relaciona a posição dos captores e o nível de proteção adotado para o SPDA em questão. Os níveis de proteção são caracterizados pela sua eficiência, sendo o nível de proteção IV o que apresenta a menor eficiência e o nível I o que apresenta a maior eficiência quanto à proteção contra raios, ou seja, o que apresenta uma maior probabilidade do SPDA proteger um dado volume contra os efeitos das descargas atmosféricas.

No projeto dos captores, podem ser utilizados três métodos distintos:

O primeiro, de uso mais restrito, é o método Franklin, ou método do ângulo e proteção. Da tabela 2.1 verifica-se que o uso deste método vai sendo restrito na medida em que se eleva a altura do captor ou na medida em que se eleva o nível de proteção. Como exemplo de uma aplicação, seja uma edificação de 35 metros de altura e nível de proteção II. Neste caso, não se pode utilizar o método Franklin para o dimensionamento do captor.

O segundo método para o dimensionamento dos captores é o método da esfera rolante, esfera fictícia ou também pode ser chamado de modelo eletrogeométrico, conforme ilustrado na figura 2.2. Este método é utilizado para se delimitar o volume de proteção dos captores de um SPDA, sejam eles constituídos por hastes, cabos, ou por uma combinação de ambos. A sua aplicação é indicada,

normalmente para os casos de estruturas de elevada altura ou com formas arquitetônicas complexas e está baseado no mecanismo de formação das descargas atmosféricas. Uma descrição resumida dos conceitos e aplicações deste método é apresentada no Anexo C da NBR 5419 [20], além do conceito da distância R , que representa a distância entre o ponto de partida do líder descendente e a extremidade do líder ascendente. Observando a tabela 2.1, verificam-se os valores possíveis para R de acordo com o nível de proteção. De uma forma simples, este método consiste em se tomar uma esfera com raio dado por R , de acordo com a tabela 2.1. Deve-se rolar esta esfera por toda a estrutura que contém o volume a proteger e onde a esfera tocar a estrutura deve-se instalar um captor.

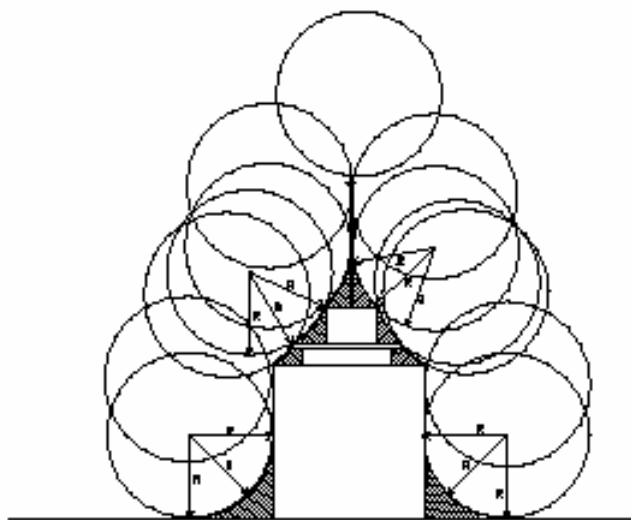


Figura 2.2 – Método da esfera rolante

O terceiro método é chamado de gaiola de Faraday ou condutores em malha. Como é considerado o método mais eficiente, no caso do dimensionamento de captores para estruturas com altura superior a 60 metros, este é o único método aceito pela norma. Os captores em malha consistem uma rede de condutores dispostos no plano horizontal ou inclinado, sobre o volume a proteger. A dimensão dos anéis da malha é dada pela coluna “Largura do módulo da malha”, da tabela 2.1, sendo que o comprimento do anel não pode ser superior à dimensão da sua largura. Como exemplo, para o nível de proteção III, deve-se utilizar captores compostos por anéis fechados cuja malha tenha a dimensão máxima de $10 \times 20 \text{ m}^2$.

		Ângulo de proteção (α) – Método Franklin, em função da altura do captor (h) (ver Nota 1) e do nível de proteção					Largura do módulo da malha (ver Nota 2) m
Nível de proteção	$\begin{matrix} H \\ m \\ \diagdown \\ R \\ m \end{matrix}$	0 - 20 m	21 – 30 m	31 – 45 m	46 – 60 m	> 60 m	
I	20	25°	1)	1)	1)	2)	5
II	30	35°	25°	1)	1)	2)	10
III	45	45°	35°	25°	1)	2)	10
IV	60	55°	45°	35°	25°	2)	20

R = raio da esfera rolante
h = altura do captor (ver Nota 1)
¹⁾ Aplicam-se somente os métodos eletrogeométrico, malha ou da gaiola de Faraday.
²⁾ Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday.

NOTAS

1- Para escolha do nível de proteção, a altura é em relação ao solo e, para verificação da área protegida, é em relação ao plano horizontal a ser protegido.
2- O módulo da malha deverá constituir um anel fechado, com o comprimento não superior ao dobro da sua largura.

Tabela 2.1 – Posicionamento de captores conforme o nível de proteção

2.1.2 SUBSISTEMA DE CONDUTORES DE DESCIDA

O subsistema formado pelos condutores de descida, subseção 5.1.2 da NBR 5419 [20], constitui a parte do SPDA externo destinado a conduzir a corrente de descarga atmosférica desde o subsistema captor até o subsistema de aterramento, conforme exemplificado na figura 2.3. Algumas estruturas especiais como as estruturas metálicas de torres, postes e mastros, assim como as armaduras de aço interligadas de postes de concreto armado constituem descidas naturais até a base das mesmas, e dispensam a necessidade de utilizarem-se condutores adicionais paralelos ao longo da sua extensão.

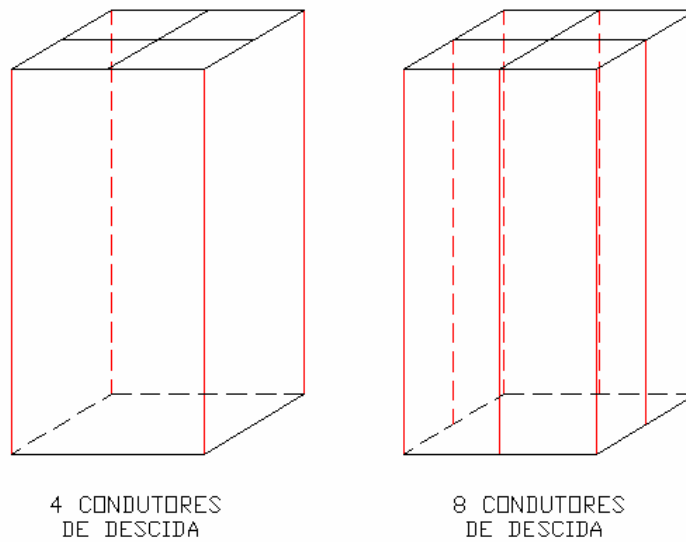


Figura 2.3 – Condutores de descida

Para os SPDA isolados, o posicionamento e a quantidade mínima de condutores de descida é função do tipo de subsistema captor. No caso de utilizar-se um ou mais mastros captos separados, é necessária a instalação de um condutor de descida para cada mastro não condutor. Para captor composto de um ou mais condutores horizontais separados, deve-se instalar um condutor de descida na extremidade de cada condutor horizontal e no caso de utilizar-se um subsistema captor formado por uma rede de condutores, deverá ser instalado um condutor de descida para cada estrutura de suporte não condutora. No caso de SPDA isolado, o espaçamento entre os condutores de descida e as instalações metálicas do volume a proteger não pode ser inferior a 2 metros, dado que o sistema é isolado.

Com relação ao posicionamento das descidas para os SPDA não isolados, deve-se levar em conta a tabela 2.2, que apresenta o espaçamento médio dos condutores de descida não naturais conforme o nível de proteção.

Nível de proteção	Espaçamento médio [m]
I	10
II	15
III	20
IV	25

Tabela 2.2 – Espaçamento médio dos condutores de descida não naturais conforme o nível de proteção

Os condutores de descida devem ser distribuídos ao longo do perímetro do volume a proteger, de modo que seus espaçamentos médios não sejam superiores aos indicados na tabela 2.2. Isto significa que no caso de uma edificação, com nível de proteção III e com dimensões de 20 metros de largura por 30 metros de comprimento, seu perímetro vale 100 metros, e de acordo com a tabela 2.2, o espaçamento médio deverá ser inferior a 20 metros, portanto, para esta situação, o número mínimo de condutores de descida é cinco.

No item 5.1.2.3.2 da NBR 5419 [20] é prescrita a instalação de condutores, formando anéis horizontais externos, de forma a interligar os condutores de descida não naturais. O primeiro anel deve ser o anel de aterramento, no solo, e os outros a cada 20 metros de altura. Estes anéis externos são aceitos como captadores de descargas laterais.

Uma alternativa bastante utilizada e de muita eficiência é a adoção de condutores de descida naturais. Os pilares metálicos e as armaduras de aço interligadas das estruturas de concreto armado podem ser considerados condutores de descida naturais, desde que se respeite a subseção 5.1.2.5.4 da NBR 5419 [20], o qual determina a interligação de cerca de 50% dos cruzamentos de todas as barras da armadura, incluindo os estribos. Esta medida visa garantir a continuidade elétrica ao longo de toda a estrutura, de forma que ocorra a condução da corrente da descarga atmosférica desde a captação até o aterramento.

No caso de edificações existentes, poderá ser implantado um SPDA com descidas externas, ou opcionalmente, poderão ser utilizadas as armaduras do concreto com descidas naturais, desde que sejam feitos testes de continuidade e as

resistências medidas neste testes devem ser inferiores a 1 Ω . As medições poderão ser realizadas de acordo com o Anexo E da NBR 5419 [20].

Os anéis horizontais externos, prescritos na subseção 5.1.2.3.2 da NBR 5419 [20], não são necessários no caso de se utilizar como condutores de descida os pilares metálicos da estrutura ou as armações de aço do concreto armado, desde que se admitam danos no revestimento dos elementos metálicos no ponto de impacto da descarga atmosférica.

A tabela 2.3 apresenta as dimensões mínimas das seções transversais dos materiais utilizados no SPDA aceitos pela norma, para cada subsistema do SPDA.

Material	Captor e anéis intermediários mm ²	Descidas (para estruturas de altura até 20 m) mm ²	Descidas (para estruturas de altura superior a 20 m) mm ²	Eletrodo de aterramento mm ²
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	-
Aço galvanizado a quente ou embutido em concreto	50	50	50	80

Tabela 2.3 – Seções mínimas dos materiais do SPDA

2.1.3 SUBSISTEMA DE ATERRAMENTO

Na subseção 5.1.3 da NBR 5419 [20] são apresentados os preceitos relativos ao subsistema de aterramento do SPDA. Conceitualmente, o aterramento é a parte do SPDA externo destinado a conduzir e a dispersar a corrente de descarga atmosférica na terra. Para a proteção contra raios, é preferível a utilização de um subsistema de aterramento único integrado à estrutura. Este aterramento é adequado para todas as finalidades, ou seja, proteção contra raios, sistema de potência de baixa tensão e sistema de sinal. No caso de haverem aterramentos distintos, estes devem ser interligados através de uma ligação equipotencial de baixa impedância.

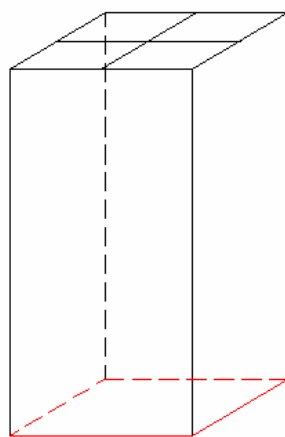
Com o objetivo de assegurar que a corrente de descarga atmosférica seja dispersa na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. Apesar deste fato, é recomendável no caso da utilização de eletrodos não naturais, que a resistência de aterramento seja de aproximadamente 10Ω . A justificativa para esta recomendação é de se reduzir os gradientes de potencial no solo e a probabilidade de centelhamentos perigosos.

Vários tipos de eletrodos de aterramento são aceitos, como por exemplo, condutores em anel, hastes verticais ou inclinadas, condutores horizontais radiais ou ainda um aterramento natural utilizando as armaduras de aço das fundações.

A resistividade do solo é um fator muito importante a ser observado. Para solos em que a resistividade diminua com a profundidade e onde as camadas de baixa resistividade ocorram a profundidades maiores do que aquelas em que normalmente são cravadas as hastes de aterramento, em torno de 3 metros, é adequado o uso de eletrodos de aterramento profundos.

Com relação à utilização de aterramentos naturais, devem ser observadas algumas recomendações contidas, de acordo com a subseção 5.1.3.3.1 da NBR 5419 [20]. As ferragens da fundação devem estar interligadas de forma eficiente, para que se obtenha a continuidade elétrica do sistema. Para isto é necessário que as armaduras de aço das estacas, dos blocos de fundação e das vigas baldrame sejam firmemente amarradas ou soldadas em cerca de 50% de seus cruzamentos. Estas armaduras (da fundação) devem ser interligadas com as armaduras de aço dos pilares da estrutura, utilizados como condutores de descida naturais.

No caso da utilização de eletrodos de aterramento não naturais, subseção 5.1.3.5 da NBR 5419 [20], estes devem ser instalados preferencialmente externos ao volume a proteger, distanciados de aproximadamente 1 metro das fundações da estrutura. As hastes de aterramento verticais, instaladas em paralelo, devem ser distribuídas uniformemente no perímetro da estrutura, espaçadas entre si por uma distância não inferior ao seu comprimento. A figura 2.4 apresenta o posicionamento da malha de aterramento para um SPDA.



MALHA DE ATERRAMENTO

Figura 2.4 – Malha de aterramento

Deve-se considerar no projeto e execução do subsistema de aterramento que a interligação de metais diferentes, sem as devidas precauções, pode causar problemas graves de corrosão eletrolítica. A tabela 2.4 relaciona os diversos materiais utilizados no SPDA e as condições de aplicação para estes materiais.

Material	Aplicação				Corrosão		
	Ao ar livre	Enterrado	Embutido no concreto	Embutido no reboco	Resistência	Risco agravado	Eletrolítica
Cobre	Maciço, encordoadado ou como revestimento de haste de aço		-	Maciço ou encordoadado	A mais substâncias	Cloretos altamente concentrados; compostos sulfúricos; materiais orgânicos	-
Aço de construção comum ou galvanizado a quente	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	-	Boa, mesmo em solos ácidos	-	Com o cobre
Aço inoxidável	Maciço ou encordoadado	Maciço ou encordoadado	-	Maciço ou encordoadado	A muitas substâncias	Água com cloretos dissolvidos	-
Alumínio	Maciço ou encordoadado	-	-	-	-	Agentes básicos	Com o cobre
Chumbo	Como revestimento		-	-	Altas concentrações de sulfatos	Solos ácidos	-

Tabela 2.4 – Materiais do SPDA e condições de aplicação

2.2 SISTEMA INTERNO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.2.1 EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS

A equalização de potencial é considerada a medida mais eficiente para reduzir os riscos de incêndio, explosão e choques elétricos causados pela descarga atmosférica, dentro do volume a proteger. Seus preceitos fundamentais estão descritos na subseção 5.2.1 da NBR 5419 [20] e ela é realizada através da utilização de condutores de ligação equipotencial, eventualmente incluindo a instalação de dispositivos de proteção contra surtos (DPS), interligando o SPDA, a armadura metálica da estrutura, as instalações metálicas, as massas e os condutores dos sistemas elétricos de potência e de sinal, dentro do volume a proteger.

A equalização de potencial deve ser realizada também nas estruturas que não possuem SPDA externo, mas que necessitam de proteção contra os efeitos das descargas atmosféricas sobre as instalações internas. Entretanto, a norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão, a NBR 5410 [24], estabelece que, em ambos os casos, uma ligação equipotencial principal é obrigatória.

Uma ligação equipotencial deve ser efetuada no subsolo, ou próximo ao quadro elétrico geral de entrada de baixa tensão, sendo que os condutores responsáveis pela ligação equipotencial deverão ser conectados a uma barra de ligação equipotencial principal e esta barra deve estar conectada ao subsistema de aterramento. Para as estruturas com mais de 20 metros de altura, deve ser efetuada uma ligação equipotencial acima do nível do solo, em intervalos verticais não superiores a 20 metros. A figura 2.5 mostra um exemplo de um anel de equalização de potenciais para um SPDA típico. Uma outra situação onde é necessária a realização da ligação equipotencial é quando a distância de segurança estabelecida na subseção 5.2.2 da NBR 5419 [20], que trata da proximidade do SPDA com outras instalações, cujo objetivo é de evitar centelhamentos perigosos ocorridos entre os condutores do SPDA e as instalações metálicas ou condutores dos sistemas elétricos de potência e de sinal, não pode ser garantida.

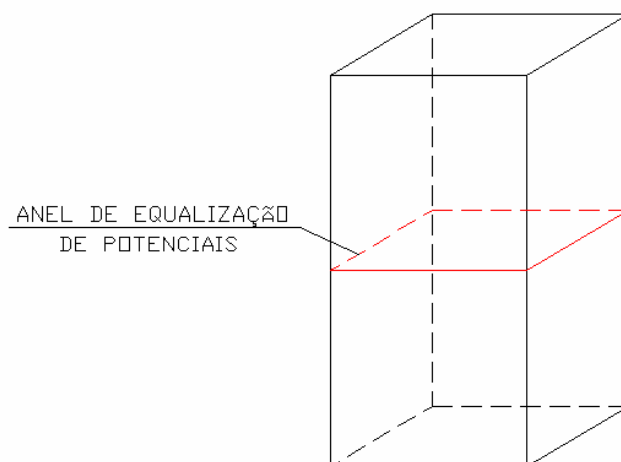


Figura 2.5 – Malha ou anel de equalização de potenciais

A equalização de potencial pode ser realizada através de condutores onde a continuidade elétrica não pode ser garantida através de ligações naturais. No caso de uma ligação equipotencial ter de suportar toda a corrente de descarga atmosférica, ou uma parte substancial dela, as seções mínimas dos condutores devem respeitar os valores determinados pela tabela 2.5. Nos demais casos, podem ser utilizados os valores da tabela 2.6.

Nível de proteção	Material	Seção mm ²
I – IV	Cobre	16
	Alumínio	25
	Aço	50

Tabela 2.5 – Seções mínimas dos condutores de ligação equipotencial para conduzir parte substancial da corrente de descarga atmosférica

Nível de proteção	Material	Seção mm ²
I – IV	Cobre	6
	Alumínio	10
	Aço	16

Tabela 2.6 – Seções mínimas dos condutores de ligação equipotencial para conduzir uma parte reduzida da corrente de descarga atmosférica

Neste capítulo foram apresentados os diversos componentes que formam o SPDA de uma estrutura. São eles os subsistemas de captação, de condutores de descida, malha de aterramento e equalização de potenciais. Nos próximos capítulos será apresentado o método computacional utilizado para o cálculo eletromagnético.

3 MÉTODO FDTD

Em maio de 1966 o Dr. K. S. Yee [25], introduziu um método computacional eficiente para a solução direta das equações de onda de Maxwell, no domínio do tempo, através de diferenças finitas. Esta formulação proposta por Yee, permite em princípio, a modelagem da interação de ondas eletromagnéticas com um nível de detalhamento comparável ao método dos momentos (MoM). A idéia do Dr. K. S. Yee está na escolha de uma relação geométrica para a amostragem espacial das componentes vetoriais dos campos elétrico e magnético, representando as equações de Maxwell tanto na forma diferencial como integral. A teoria do método FDTD é abordada por diversos autores em artigos e livros, como no caso de Allen Taflove e Morris E. Brodwin [26] e também no livro do mesmo autor, Allen Taflove [27].

3.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL EM TRÊS DIMENSÕES

As quatro equações de Maxwell são apresentadas nas formas diferencial e integral, considerando o SI (sistema internacional de unidades), para uma região do espaço que não possui fontes de corrente elétrica ou magnética, mas pode conter materiais que absorvem energia dos campos elétrico ou magnético.

Lei de Faraday

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \quad (3.1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \quad (3.1b)$$

Lei de Ampere

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J} \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \oint_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} + \iint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (3.2b)$$

Lei de Gauss para o campo elétrico

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.3a)$$

$$\oiint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad (3.3b)$$

Lei de Gauss para o campo magnético

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.4a)$$

$$\oiint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.4b)$$

onde

\vec{E} : campo elétrico (volts/metro)

\vec{D} : densidade de fluxo elétrico (coulombs/metro²)

\vec{H} : campo magnético (amperes/metro)

\vec{B} : densidade de fluxo magnético (webers/metro²)

A : superfície tridimensional arbitrária

$d\vec{A}$: vetor normal diferencial que caracteriza o elemento de superfície A (metro²)

ℓ : caminho fechado que contorna a superfície A

$d\vec{\ell}$: vetor comprimento diferencial que caracteriza o elemento do contorno
 ℓ (metros)

\vec{J} : densidade de corrente elétrica (amperes/metro²)

ρ : densidade volumétrica de cargas (coulombs/metro³)

Q : carga elétrica (coulombs)

Em materiais lineares, isotrópicos e não dispersivos, pode-se relacionar \vec{D} com \vec{E} e \vec{B} com \vec{H} através das seguintes equações:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (3.5a)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (3.5b)$$

onde

ϵ : permissividade elétrica (farads/metro)

ϵ_r : permissividade relativa (escalar adimensional)

ϵ_0 : permissividade do espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ farads/metro)

μ : permeabilidade magnética (henrys/metro)

μ_r : permeabilidade relativa (escalar adimensional)

μ_0 : permeabilidade do espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ henrys/metro)

\vec{J} pode atuar como fonte independente de energia do campo elétrico, tratado na forma de \vec{J}_s , representando neste caso a corrente da descarga atmosférica. Assim, para materiais isotrópicos, não dispersivos, e com perdas, tem-se:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_s \quad (3.6)$$

onde

σ é a condutividade elétrica (siemens/metro).

Substituindo as equações (3.5a), (3.5b) e (3.6) nas equações (3.1a) e (3.2a), obtém-se o seguinte resultado para materiais lineares, isotrópicos, não dispersivos e com perdas:

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} \sigma \vec{E} - \frac{1}{\varepsilon} \vec{J}_s \quad (3.8)$$

Em coordenadas cartesianas, as equações (3.7) e (3.8) podem ser descritas como segue:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.9a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (3.9b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3.9c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x - J_{S_x} \right) \quad (3.10a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y - J_{S_y} \right) \quad (3.10b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z - J_{S_z} \right) \quad (3.10c)$$

O sistema de seis equações diferenciais representados por (3.9) e (3.10) formam a base do algoritmo numérico FDTD para a interação de ondas eletromagnéticas com objetos tridimensionais. As equações (3.3) e (3.4), relativas às leis de Gauss, indicam que não há cargas elétricas e magnéticas livres, para o algoritmo FDTD.

3.2 O ALGORITMO DE YEE

Kane Yee apresentou em 1966, um conjunto de equações de diferenças-finitas para o sistema de equações de Maxwell dependentes do tempo, (3.9) e (3.10), para o caso de materiais sem perdas, ou seja, $\sigma = 0$.

O algoritmo de Yee pode ser utilizado tanto para o campo elétrico como para o campo magnético, no tempo e no espaço, utilizando o sistema de equações de Maxwell (3.9) e (3.10).

A figura 3.1 mostra o posicionamento das componentes de \vec{E} e \vec{H} no espaço tridimensional. Cada componente de \vec{E} é contornada por quatro componentes de \vec{H} e cada componente de \vec{H} é contornada por quatro componentes de \vec{E} .

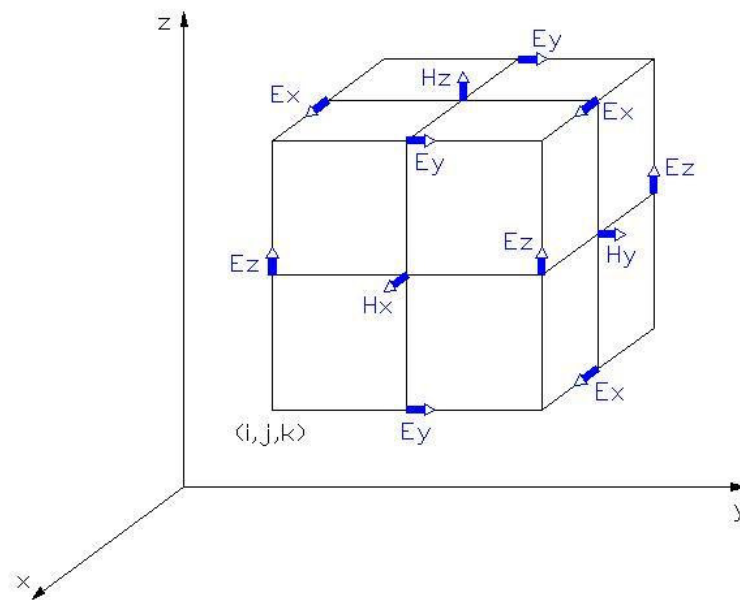


Figura 3.1 – Célula cúbica unitária do espaço entrelaçado de Yee

A geometria representada pelo cubo de Yee, mostra de forma simples, em uma figura do espaço tridimensional, o arranjo de entrelaçamento dos contornos da lei de Faraday e da lei de Ampere. Podem-se identificar as componentes do campo elétrico \vec{E} associadas com o fluxo de corrente de deslocamento do laço fechado \vec{H} , bem como a componente \vec{H} associada com o fluxo magnético do laço fechado \vec{E} . O algoritmo de Yee simula simultaneamente os elementos pontuais da forma diferencial e os macroscópicos da forma integral das equações de Maxwell.

O algoritmo de Yee centraliza no tempo as componentes de \vec{E} e \vec{H} num arranjo denominado de salto de sapo ("*leapfrog*"), como ilustrado na figura 3.2. Todos os cálculos das componentes do campo elétrico \vec{E} no espaço modelado são completados e armazenados na memória para um instante de tempo utilizando os dados do campo magnético \vec{H} armazenados anteriormente. Na seqüência, todas as componentes do campo magnético \vec{H} são recalculadas e armazenadas na memória utilizando os resultados do campo elétrico \vec{E} , recém calculados. O ciclo recomeça com um novo cálculo das componentes do campo elétrico \vec{E} baseados nos novos resultados obtidos para as componentes do campo magnético. Este processo continua até que os passos de tempo sejam concluídos.

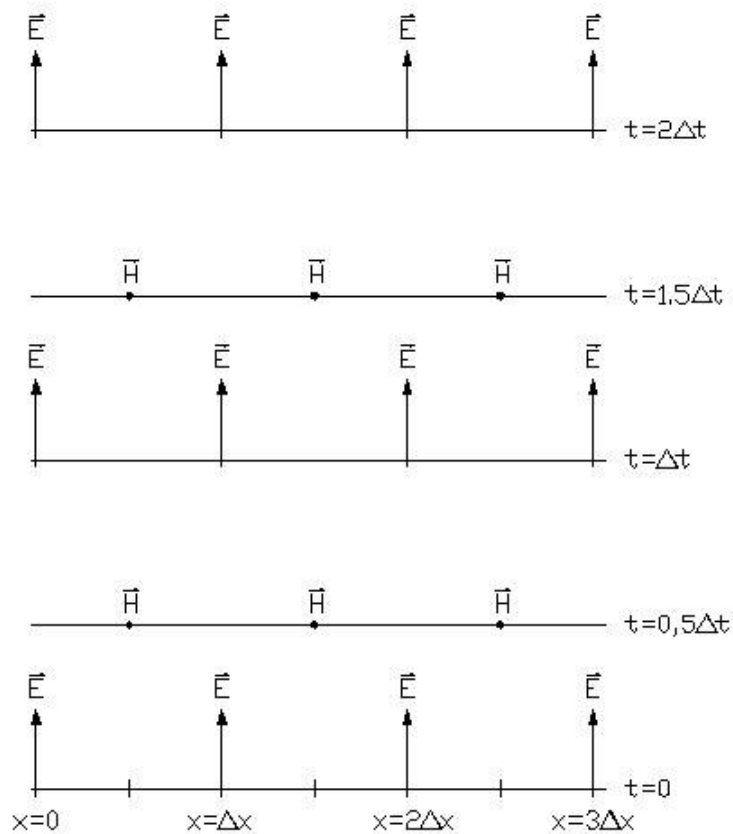


Figura 3.2 – Gráfico do espaço-tempo do algoritmo de Yee para a propagação de uma onda em uma dimensão

As condições iniciais para os campos elétrico e magnético são zero em qualquer ponto da malha.

A notação, em coordenadas cartesianas, utilizada para representar um ponto no espaço é $(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$, onde Δx , Δy e Δz são respectivamente os incrementos espaciais da malha na direção das coordenadas x , y e z , e i , j e k são inteiros. Assim, pode-se denotar qualquer função u , avaliada no espaço e no tempo em um ponto discreto da malha e em um ponto discreto no tempo como:

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = u_{i,j,k}^n \quad (3.11)$$

onde Δt é o incremento no tempo, uniformemente sobre o intervalo observado, e n é inteiro.

É utilizada a expressão da diferença finita centralizada para aproximar as derivadas no espaço e no tempo. A expressão (3.12) apresenta um exemplo para a primeira derivada espacial parcial de u na direção x , avaliada até o tempo $t_n = n\Delta t$:

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2, j, k}^n - u_{i-1/2, j, k}^n}{\Delta x} \quad (3.12)$$

O incremento $\pm 1/2$ no índice i da, coordenada x , da função u , denota uma diferença espacial finita de $\pm 1/2\Delta x$. A seguir é apresentada a expressão para a primeira derivada parcial no tempo de u , avaliada no ponto (i, j, k) :

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i, j, k}^{n+1/2} - u_{i, j, k}^{n-1/2}}{\Delta t} \quad (3.13)$$

Agora o incremento $\pm 1/2$ é no índice n , coordenada do tempo, para a função u , denotando uma diferença finita no tempo de $\pm 1/2\Delta t$. O objetivo desta notação é de entrelaçar as componentes de \vec{E} e \vec{H} no tempo, em intervalos de $1/2 \Delta t$, com o propósito de implementar o algoritmo do salto de sapo (“*leapfrog*”)

3.3 DIFERENÇAS FINITAS PARA AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

O objetivo é de aplicar a idéia apresentada no item 3.2 sobre as equações de Maxwell. Inicialmente, tomando-se como partido a equação da componente do campo elétrico na direção x (3.10a), tem-se:

$$\frac{E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \cdot \left(\frac{H_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - J_{Sx} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \quad (3.14)$$

Todo o campo calculado no lado direito da equação é avaliado para o passo no tempo n , inclusive o campo elétrico E_x que aparece associado à condutividade do material σ . Um caminho para a solução é através da utilização da aproximação semi-implícita, dada pela equação (3.15), onde o valor do campo elétrico E_x é assumido como a média aritmética dos valores de E_x para os passos $n-1/2$ e $n+1/2$.

$$E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n = \frac{E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} + E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{2} \quad (3.15)$$

Substituindo (3.15) em (3.14), obtém-se:

$$\begin{aligned}
& E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} = \\
& \frac{\Delta t}{\mathcal{E}_{i,j+1/2,k+1/2}} \cdot \left[\frac{H_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\
& \left. - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \left(\frac{E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} + E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{2} \right) - J_{S_x} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right]
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Os termos $E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}$ e $E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}$ aparecem nos dois lados da equação

(3.16), portanto isolando o termo $E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}$, obtém-se:

$$\begin{aligned}
& \left(1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t}{2\mathcal{E}_{i,j+1/2,k+1/2}} \right) E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t}{2\mathcal{E}_{i,j+1/2,k+1/2}} \right) E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\
& + \frac{\Delta t}{\mathcal{E}_{i,j+1/2,k+1/2}} \cdot \left[\frac{H_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right. \\
& \left. - J_{S_x} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right]
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Dividindo ambos os lados da equação por $\left(1 + \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t / 2\mathcal{E}_{i,j+1/2,k+1/2} \right)$, obtém-se

a expressão no tempo para $E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}$.

$$\begin{aligned}
E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} &= \left(\frac{1 - \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t}{2\epsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t}{2\epsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}} \right) E_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} \\
&+ \frac{\Delta t}{1 + \frac{\sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \Delta t}{2\epsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}} \cdot \left[\frac{H_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - H_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{H_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - H_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} \right] \\
&- J_{Sx} \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n
\end{aligned} \tag{3.18}$$

De forma similar, obtém-se as expressões de diferenças finitas para as componentes E_y e E_z e também para as componentes do campo magnético, H_x , H_y e H_z .

3.4 INTERPRETAÇÃO DAS LEIS DE FARADAY E AMPERE NA FORMA INTEGRAL

O algoritmo de Yee para FDTD foi originalmente interpretado como uma aproximação direta das equações de Maxwell na forma diferencial através de diferenças numéricas centrais. Apesar desta interpretação ser bastante útil no sentido de se entender os modelos de propagação de ondas através do método FDTD, a idéia é de avaliar a combinação macroscópica do campo baseando-se nas leis de Faraday e Ampere na forma integral, implementado num arranjo de contornos espaciais ortogonais, eletricamente pequenos. Estes contornos, ou malhas, proporcionam uma interpretação geométrica do acoplamento destas duas leis.

Esta abordagem permite avaliar grandezas físicas como força eletromotriz e força magnetomotriz ou fluxo magnético e corrente elétrica de deslocamento. A demonstração a seguir, representada pelas figuras (3.3) e (3.4), apresenta expressões somente para uma componente do campo, de forma a simplificar o

entendimento da metodologia. Também se assume o espaço livre sem perdas e sem fontes elétricas ou magnéticas. As figuras (3.3) e (3.4) mostram um exemplo dos contornos ortogonais entrelaçados em cadeia, na malha de Yee no espaço livre, sendo que a figura (3.3) corresponde à Lei de Ampere para o passo correspondente à E_z e a figura (3.4) corresponde à Lei de Faraday para o passo correspondente à H_z .

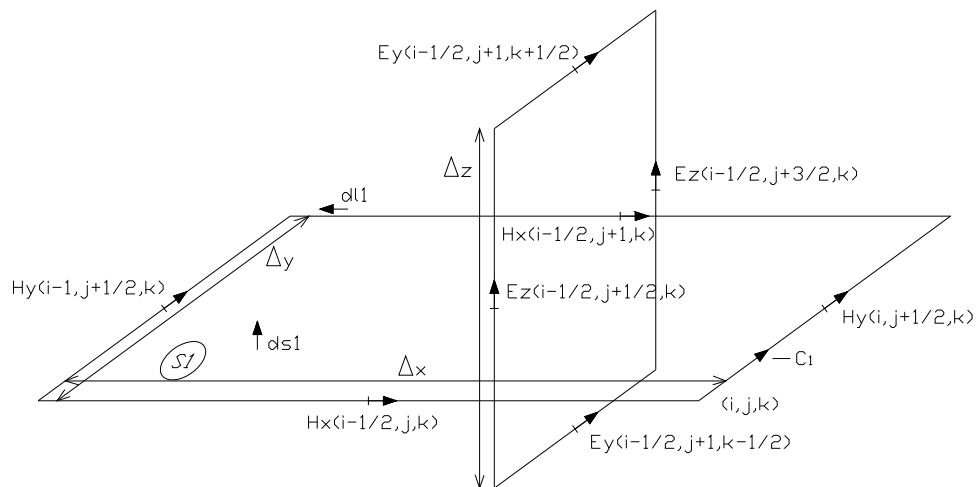


Figura 3.3 – Lei de Ampere para o passo correspondente à H_z

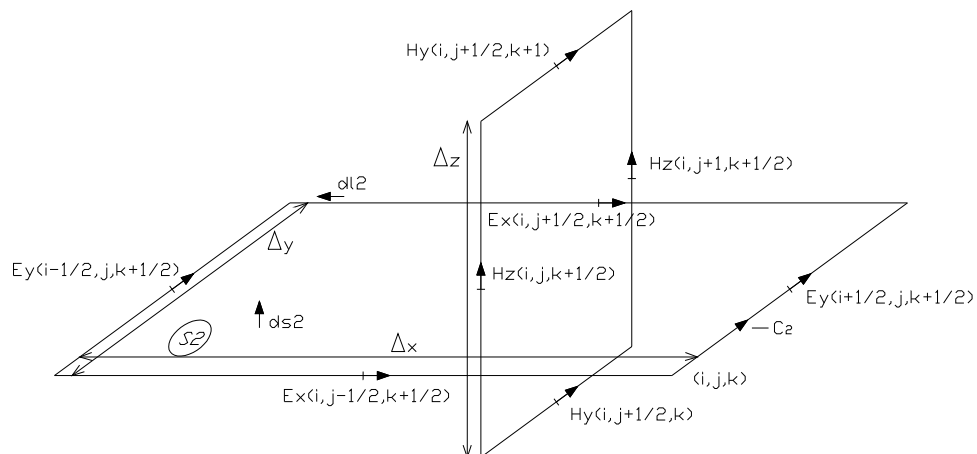


Figura 3.4 – Lei de Faraday para o passo correspondente à E_z

Aplicando a Lei de Ampere ao longo do contorno fechado C_1 da figura (3.3), assumindo que o valor do campo no ponto médio de um dos lados do contorno é igual ao valor médio da componente do campo ao longo deste lado, e utilizando-se o Teorema de Stokes, o qual estabelece uma relação entre a integral de linha de um campo vetorial ao longo de uma curva fechada C com a integral sobre uma superfície S da qual C é o bordo, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_1} \vec{D} \cdot d\vec{S}_1 = \oint_{C_1} \vec{H} \cdot d\vec{\ell}_1 \quad (3.19a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S_1} \epsilon_0 E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k} dS_1 \cong & H_x \Big|_{i-1/2, j, k} \Delta x + H_y \Big|_{i, j+1/2, k} \Delta y \\ & - H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k} \Delta x - H_y \Big|_{i-1, j+1/2, k} \Delta y \end{aligned} \quad (3.19b)$$

Assumindo que $E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}$ é igual ao valor médio de E_z sobre a superfície S_1 e a assim a derivada no tempo pode ser realizada numericamente utilizando-se a expressão da diferença central. Assim, (3.18b) resulta:

$$\begin{aligned} \epsilon_0 \Delta x \Delta y \left(\frac{E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n-1/2}}{\Delta t} \right) = & \left(H_x \Big|_{i-1/2, j, k}^n - H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k}^n \right) \Delta x \\ & + \left(H_y \Big|_{i, j+1/2, k}^n - H_y \Big|_{i-1, j+1/2, k}^n \right) \Delta y \end{aligned} \quad (3.19c)$$

Multiplicando-se ambos os lados por $\Delta t / (\epsilon_0 \Delta x \Delta y)$ e resolvendo para $E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n+1/2}$ chega-se à relação a seguir:

$$\begin{aligned}
E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} &= E_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n-1/2} + \left(H_x \Big|_{i-1/2, j, k}^n - H_x \Big|_{i-1/2, j+1, k}^n \right) \Delta t / (\epsilon_0 \Delta y) \\
&\quad + \left(H_y \Big|_{i, j+1/2, k}^n - H_y \Big|_{i-1, j+1/2, k}^n \right) \Delta t / (\epsilon_0 \Delta x)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

A equação (3.20) é simplesmente versão no espaço livre da equação (3.18), ou seja, a equação compassada no tempo para E_z , obtida diretamente pela implementação da equação do campo magnético \vec{H} com diferenças finitas.

De forma análoga pode-se aplicar a Lei de Faraday ao longo do contorno C_2 da figura (3.4) e também com a aplicação do Teorema de Stokes, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_2} \vec{B} \cdot d\vec{S}_2 = - \oint_{C_2} \vec{E} \cdot d\vec{\ell}_2 \tag{3.21a}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_{S_2} \mu_0 H_z \Big|_{i, j, k+1/2} dS_2 &\cong -E_x \Big|_{i, j-1/2, k+1/2} \Delta x - E_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2} \Delta y \\
&\quad + E_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2} \Delta x + E_y \Big|_{i-1/2, j, k+1/2} \Delta y
\end{aligned} \tag{3.21b}$$

Multiplicando-se ambos os lados por $\Delta t / (\mu_0 \Delta x \Delta y)$ e resolvendo para $H_z \Big|_{i, j, k+1/2}^{n+1/2}$ chega-se à relação a seguir:

$$\begin{aligned}
H_z \Big|_{i, j, k+1/2}^{n+1} &= H_z \Big|_{i, j, k+1/2}^n + \left(E_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i, j-1/2, k+1/2}^{n+1/2} \right) \Delta t / (\mu_0 \Delta y) \\
&\quad + \left(E_y \Big|_{i-1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} \right) \Delta t / (\mu_0 \Delta x)
\end{aligned} \tag{3.22}$$

3.5 MODELAMENTO DE SUPERFÍCIES CONDUTORAS

O modelamento de superfícies condutoras é feito através da substituição de $\sigma_{i,j+1/2,k+1/2}$ na equação (3.18) por:

$$\frac{1}{R_s \Delta_x} \quad \text{para a superfície paralela ao plano } yz \quad (3.23a)$$

$$\frac{1}{R_s \Delta_y} \quad \text{para a superfície paralela ao plano } xz \quad (3.23b)$$

$$\frac{1}{R_s \Delta_z} \quad \text{para a superfície paralela ao plano } xy \quad (3.23c)$$

onde R_s é a resistência superficial.

Para o modelamento de fio condutor $\sigma_{i,j+1/2,k+1/2}$ é substituído por:

$$\frac{1}{R_\ell \Delta_x \Delta_y} \quad \text{para fio paralelo ao eixo } z \quad (3.24a)$$

$$\frac{1}{R_\ell \Delta_x \Delta_z} \quad \text{para fio paralelo ao eixo } y \quad (3.24b)$$

$$\frac{1}{R_\ell \Delta_y \Delta_z} \quad \text{para fio paralelo ao eixo } x \quad (3.24c)$$

onde R_ℓ é a resistência linear.

No caso de condutor elétrico perfeito (PEC) utilizam-se valores extremamente baixos para R_s . Nas simulações práticas foi utilizado $R_s = 10^{-6} \Omega$.

No caso de superfícies absorventes (ABC) utiliza-se $R_s = \sqrt{\mu/\varepsilon}$, onde μ e ε são as características eletromagnéticas do meio adjacente à superfície a fim de propiciar o casamento de impedâncias para a onda eletromagnética nela incidente.

3.6 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Conforme abordado por Taflove [26], para se garantir a estabilidade do algoritmo de discretização no tempo, exemplificado nas equações (3.20) e (3.22), o passo de discretização Δt deve satisfazer a seguinte expressão:

$$v_{\max} \Delta t \leq \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (3.25)$$

onde Δx , Δy e Δz correspondem aos incrementos espaciais nas direções x , y e z respectivamente e v_{\max} corresponde à máxima velocidade esperada da onda no modelo. Aplicando a expressão (3.25) em uma malha de discretização cúbica, obtém-se a seguinte relação, denominada de critério de Courant:

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{\Delta \ell_{\min}}{\sqrt{3} \cdot c} \quad (3.26)$$

Com relação ao tamanho da célula da malha de discretização, o valor máximo que esta célula poderá assumir está definido pela equação (3.27)

$$\Delta \ell_{\max} < \frac{c}{10 \cdot f_{\max}} \quad (3.27)$$

onde f_{\max} é a frequência máxima do sistema, c é a velocidade da luz no espaço livre e $\Delta \ell_{\max}$ é o tamanho máximo da célula da malha de discretização.

Este capítulo apresentou os principais aspectos relacionados ao método computacional FDTD, utilizado como ferramenta para o cálculo das grandezas eletromagnéticas.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados das simulações práticas envolvendo os diversos parâmetros do SPDA.

4 SIMULAÇÕES

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para as diversas simulações práticas realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o qual concentrou-se na avaliação da distribuição do campo elétrico no interior de um edifício atingido por uma descarga atmosférica. Inicialmente, procurou-se estabelecer algumas comparações com os resultados obtidos por outros pesquisadores, com o objetivo de efetuar uma validação do método utilizado neste trabalho. Os itens 4.2 e 4.3 apresentam as comparações com os trabalhos apresentados por Buccella *et.al.* [28] e Panicali [29], respectivamente. Em seguida, no item 4.4, são apresentadas as avaliações para diversas configurações do SPDA com os respectivos resultados. O programa computacional utilizado como ferramenta gráfica é o GiD versão 6.1.2 e para os cálculos foi utilizado o Matlab versão 6.5.

4.1 MODELO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

O pulso de corrente utilizado nas simulações é um modelo que contém os parâmetros da descarga atmosférica como corrente de pico, tempo de subida e tempo de descida da curva. Este modelo procura representar de uma forma simplificada, o comportamento médio das descargas atmosféricas. A figura 4.1 mostra a curva correspondente ao modelo adotado nas simulações, representado pelas equações 4.1 e 4.2, função de distribuição espacial-temporal $i(0,t)$, que correspondem à corrente na base do canal do raio. Esta forma de onda é proposta pela norma internacional IEC 1312-1 [30].

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (4.1)$$

onde:

I_0 é a amplitude da corrente na base do canal do raio;

η é o fator de correção de amplitude da corrente;

τ_1 é a constante de tempo de subida;

τ_2 é a constante de tempo de decaimento;

n é o expoente (2,..., 10)

O fator de correção da amplitude da corrente do raio η é dado pela equação a seguir:

$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \right]} \quad (4.2)$$

A figura 4.1 apresenta um exemplo da corrente na base do canal do raio com os seguintes valores típicos: $I_0 = 50$ kA, $\tau_1 = 8$ μ s, $\tau_2 = 20$ μ s e $n = 2$.

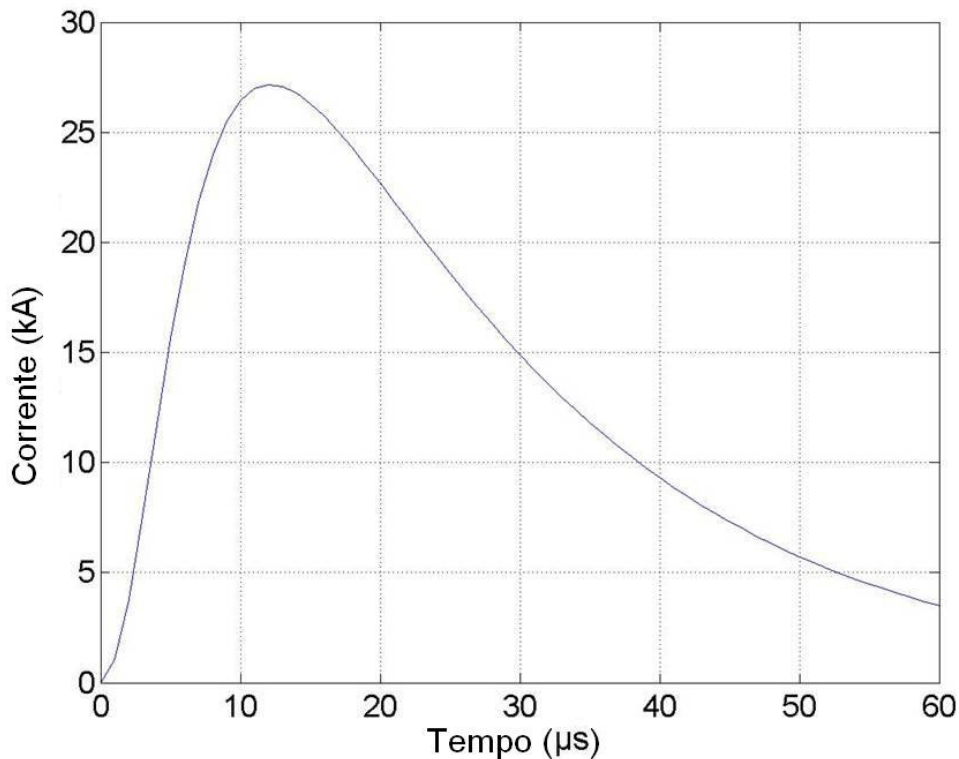


Figura 4.1 – Forma de onda da corrente do raio

No Brasil, especificamente nas regiões sul e sudeste, o valor de pico médio da corrente da descarga atmosférica é de 20 kA a 35 kA, de acordo com os estudos apresentados por Rosângela Barreto Biasi Gin *et. al.* [31 e 32] em observações efetuadas nestas regiões entre os anos de 1999 e 2001, através do sistema LPATS. Portanto o valor de pico da corrente da descarga atmosférica utilizada nas simulações está dentro dos valores esperados para uma descarga média no Brasil.

Cabe salientar que os parâmetros da descarga atmosférica utilizada neste trabalho, não constitui um fator limitante para esta pesquisa, pois o foco está na análise dos efeitos causados pela descarga em função da geometria do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

O espectro de freqüências da corrente de descarga atmosférica correspondente à equação 4.1 é mostrado na figura 4.2.

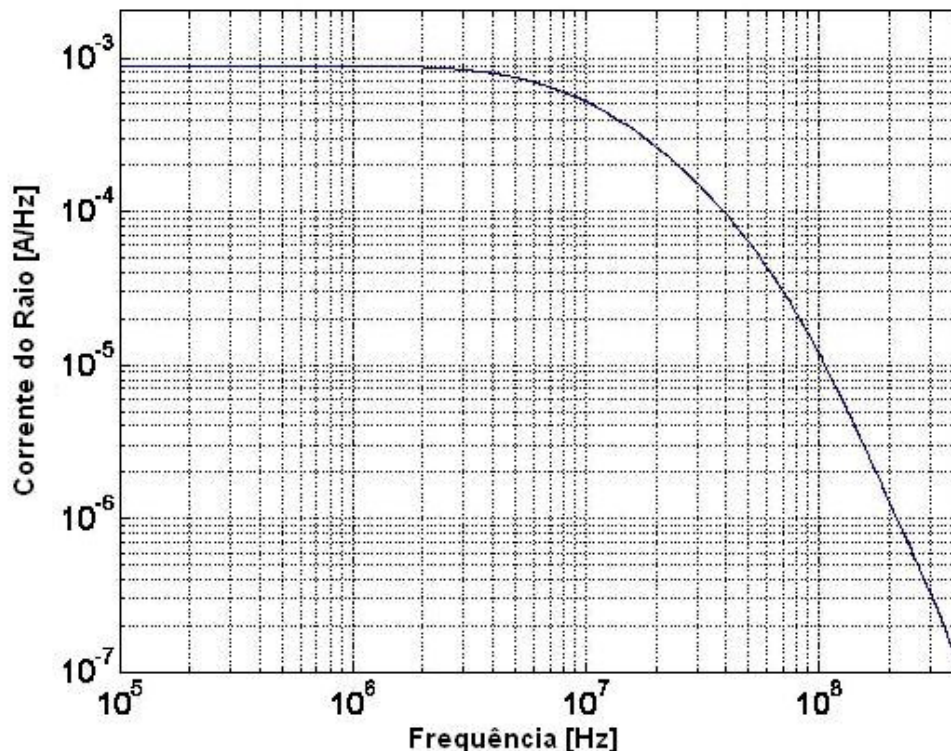


Figura 4.2 – Espectro de freqüências da corrente do raio

Outras formas de onda podem ser utilizadas para representar a corrente da descarga atmosférica. Uma delas é definida através de exponenciais duplas, apresentado inicialmente por Golde [33] e analisado posteriormente por Heidler [34].

4.2 MODELO DO ESPAÇO COMPUTACIONAL

O modelo do espaço computacional adotado nas simulações práticas segue o esquema apresentado pela figura 4.3.

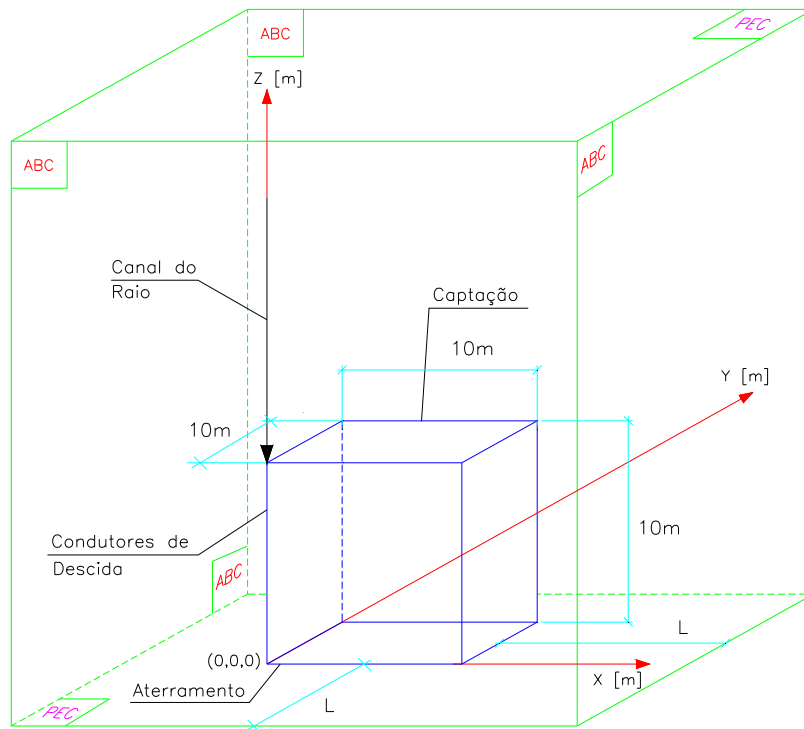


Figura 4.3 – Modelo do espaço computacional

Neste modelo as superfícies laterais que delimitam o espaço computacional são constituídas de material absorvente (ABC), cujo objetivo é de proporcionar o casamento de impedâncias para a onda eletromagnética incidente nestas superfícies, conforme ilustrado na figura 4.4. As superfícies, superior e inferior, são constituídas de condutor elétrico perfeito (PEC), conforme mostrado na figura 4.5, representando os pólos da fonte de corrente, a qual é aplicada ao modelo, simulando a corrente do raio. A superfície superior representa o plano da nuvem e a superfície inferior o plano da terra.

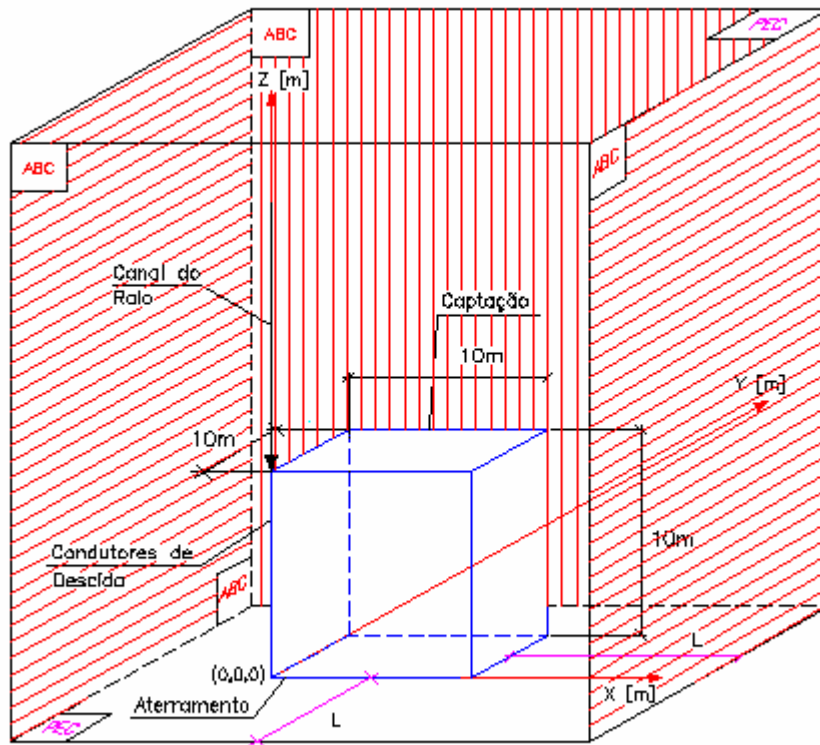


Figura 4.4 – Superfícies laterais do espaço computacional

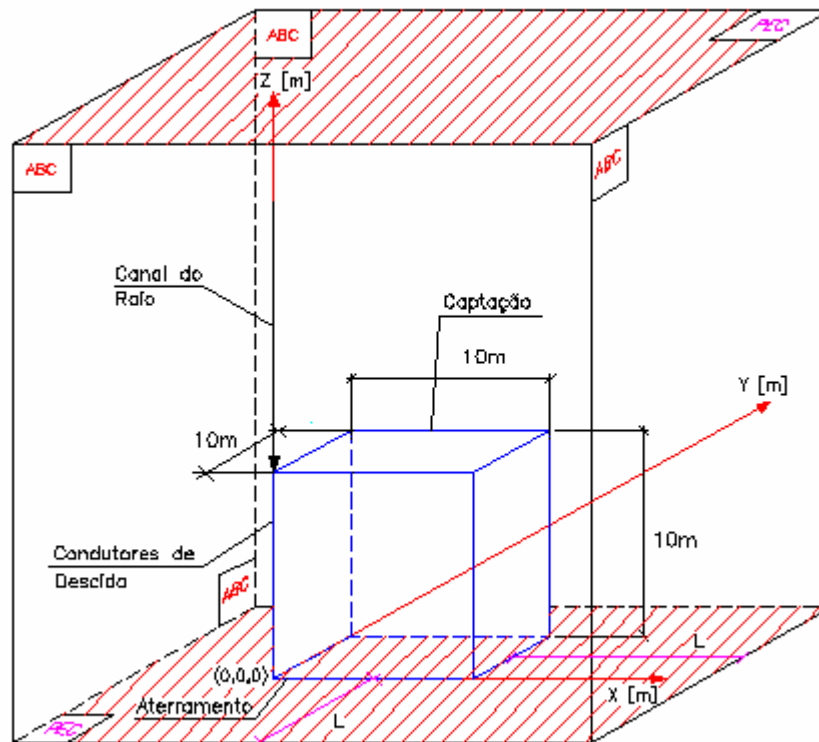


Figura 4.5 – Superfície superior e inferior do espaço computacional

Os elementos condutores do SPDA, captação, condutores de descida e aterramento, foram considerados com raio infinitesimal e de material condutor, com resistência linear de $10^{-3} \Omega/\text{mm}$. A distância L , salientada na figura 4.6, entre a extremidade do edifício e a superfície limite do espaço computacional, variou para cada edifício analisado, porém, é no mínimo a metade da largura do edifício.

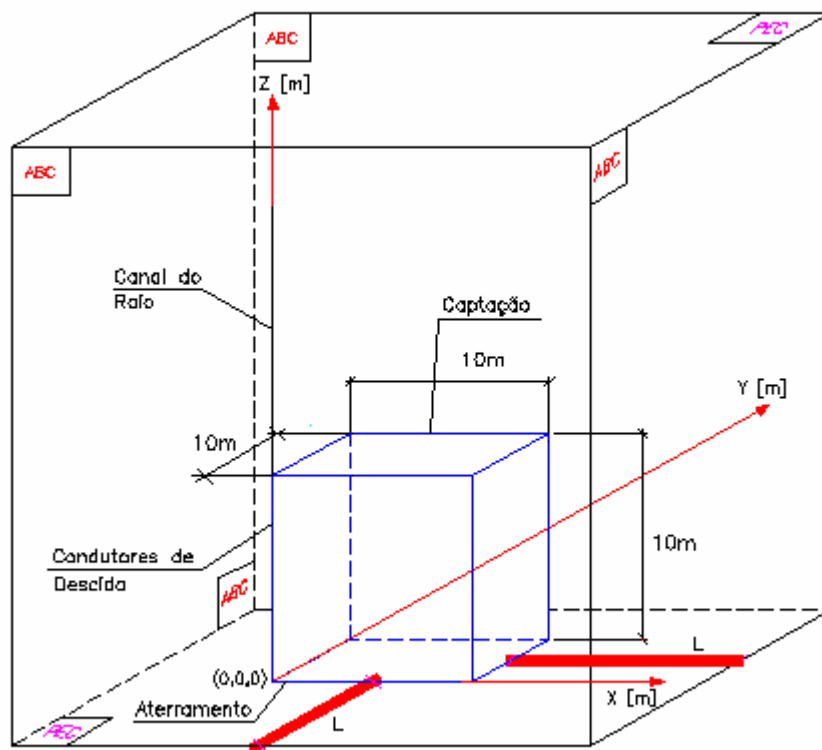


Figura 4.6 – Distância L , entre a extremidade do edifício e a superfície limite do espaço computacional

O canal do raio representa o percurso da descarga atmosférica, desde a nuvem até o ponto de impacto do raio no edifício, conforme salientado na figura 4.7. A altura mínima considerada para o canal do raio é a mesma dimensão da altura do edifício.

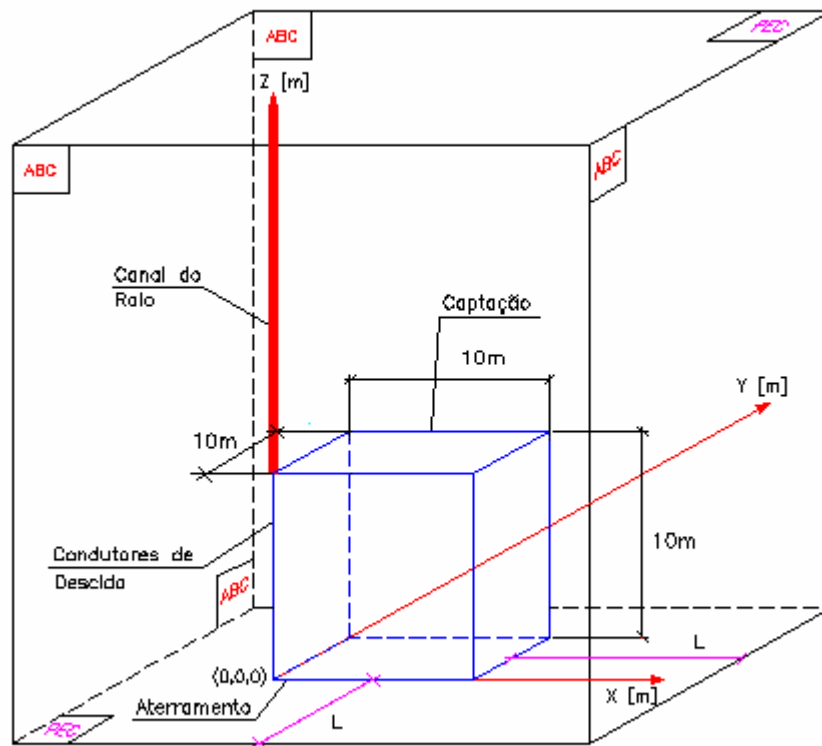


Figura 4.7 – Canal do raio

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CANAL DO RAI0

De acordo com Buccella *et. al.* [28], o campo elétrico no interior do edifício é dependente do canal do raio quando a sua altura for menor do que 10 vezes a máxima dimensão do SPDA. Isto quer dizer que o valor calculado do campo elétrico é influenciado pela altura do canal do raio e esta influência desaparece quando a relação entre a altura do canal do raio e a máxima dimensão do SPDA for maior do que 10. Esta constatação foi feita utilizando-se o método MoM como ferramenta de cálculo, portanto, este item tem por objetivo avaliar este comportamento em relação ao método FDTD. Para isto, foi utilizado um edifício com dimensões de $10 \times 10 \times 10 \text{m}^3$. Variou-se a altura do canal do raio de 10 a 150 metros e tomou-se o ponto de coordenadas $x = 1,25\text{m}$, $y = 1,25\text{m}$ e $z = 10\text{m}$ como referência para esta análise. A figura 4.8 mostra o resultado do cálculo da componente vertical

do campo elétrico, normalizada em relação ao valor máximo ocorrido no ponto de análise.

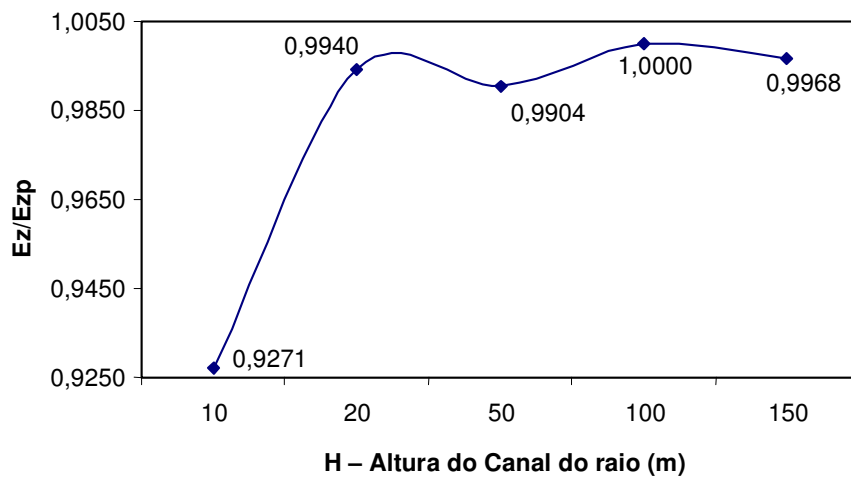


Figura 4.8 – Componente vertical normalizada (E_z/E_{zp}) do campo elétrico como função da altura (H) do canal do raio

Observando a figura 4.8 percebe-se que para o método FDTD a dependência do resultado do cálculo do campo elétrico em função da altura do canal do raio é menor do que no método MoM. Vê-se que, neste exemplo, para a altura de 20 metros já ocorre a estabilização do resultado, entretanto, mesmo para valores inferiores a 2 vezes a altura do canal do raio, o erro inserido no resultado não é tão significativo.

4.4 COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS DE BUCCELLA *ET.AL.* [28]

Com o objetivo de efetuar a comparação entre os resultados obtidos através do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) e do método dos momentos (MoM), tomou-se o trabalho publicado por Concettina Buccella *et. al.* [28], no qual é realizada uma análise no domínio da freqüência dos efeitos induzidos pelo campo eletromagnético radiado pela descarga atmosférica.

4.4.1 MODELAGEM DA SIMULAÇÃO

A corrente do raio utilizada para esta simulação, que é a fonte do campo eletromagnético no interior do edifício, é descrita pelas equações 4.1 e 4.2, sendo que os parâmetros utilizados são os seguintes:

$$I_0 = 4.600 \text{ A}$$

$$\tau_1 = 0,1 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 5 \text{ } \mu\text{s}$$

$$n = 2$$

Os valores acima adotados, são os valores utilizados por Buccella *et. al.* [28] no seu trabalho. Com isto podemos estabelecer as comparações entre os resultados obtidos pelo método FDTD e pelo método MoM. A figura 4.3 apresenta de forma esquemática a configuração do espaço computacional utilizado. As dimensões do edifício são de $24 \times 24 \times 24 \text{ m}^3$, sendo o SPDA constituído por uma malha de captação na cobertura interligada ao subsistema de aterramento através de condutores de descida.

Algumas considerações foram feitas com o objetivo de simplificar a modelagem do SPDA:

- Os condutores da malha de captação, das descidas e da malha de aterramento foram considerados como condutores elétricos perfeitos (PEC);
- Os condutores foram considerados como filamentos, sendo desprezado o seu raio;
- A resistência do plano de aterramento foi desprezada, logo considerada como PEC;
- O domínio computacional foi limitado por um plano superior PEC e sua distância até o SPDA é a altura do canal do raio (H);
- O domínio computacional foi limitado por planos laterais absorventes (ABC) a uma distância de 24 metros do SPDA.

O espaço computacional foi discretizado através de uma grade tridimensional com 4m de aresta.

Foram realizadas três simulações distintas. A primeira considerando a altura do canal do raio igual a uma vez a altura do edifício e a segunda simulação foi feita com a altura do canal do raio igual a duas vezes a altura do edifício. Uma terceira simulação foi realizada utilizando-se de uma malha com divisão gradual para o canal do raio, ou seja, ela foi dividida em espaços maiores na parte superior e espaços menores na parte inferior, variando de forma gradual.

4.4.2 COMPONENTE VERTICAL DO CAMPO ELÉTRICO

Os resultados obtidos nas simulações estão apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Para cada tabela estão mostrados os resultados da componente vertical do campo elétrico (E_z) para o SPDA com 4 e 8 condutores de descida, nas frequências de 0,5 MHz, 1 MHz e 1,5 MHz. Para a obtenção dos resultados nestas frequências, foi realizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal obtido no domínio do tempo, com um total de 2^{16} amostras. Os cálculos foram efetuados para as posições geométricas (x,y,z) referentes aos pontos P_1 (2,2,22) metros, correspondente à parte superior de estrutura, e P_2 (22,22,2) metros, correspondente à parte inferior da estrutura.

Frequência [MHz]	4 Condutores de Descida				8 Condutores de Descida			
	$E_z * 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z * 10^{-3}$ (V/m) MoM		$E_z * 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z * 10^{-3}$ (V/m) MoM	
	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)
0,5	1,261	0,469	2,511	0,598	1,215	0,045	1,729	0,618
1	0,895	0,26	3,002	0,769	0,855	0,021	1,738	0,627
1,5	0,755	0,26	2,988	1,817	0,611	0,013	1,969	0,741

Tabela 4.1 – Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio igual a 1x a altura do edifício

Frequência [MHz]	4 Condutores de Descida				8 Condutores de Descida			
	$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) MoM		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) MoM	
	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)
0,5	1,619	0,458	2,511	0,598	1,216	0,042	1,729	0,618
1	1,211	0,253	3,002	0,769	0,872	0,018	1,738	0,627
1,5	0,967	0,263	2,988	1,817	0,65	0,012	1,969	0,741

Tabela 4.2 – Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio igual a 2x a altura do edifício

Frequência [MHz]	4 Condutores de Descida				8 Condutores de Descida			
	$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) MoM		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) FDTD		$E_z \cdot 10^{-3}$ (V/m) MoM	
	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)	P_1 (2,2,22)	P_3 (22,22,2)
0,5	1,731	0,563	2,511	0,598	1,274	0,084	1,729	0,618
1	1,354	0,304	3,002	0,769	0,947	0,039	1,738	0,627
1,5	1,141	0,302	2,988	1,817	0,733	0,023	1,969	0,741

Tabela 4.3 – Resultados da componente vertical do campo elétrico para a altura do canal do raio igual a 2x a altura do edifício e com malha gradual

As colunas azuis das 3 tabelas trazem os valores da componente vertical do campo elétrico calculados através do método FDTD e as colunas verdes os valores apresentados por Buccella *et. al.* [28], calculados pelo método dos momentos (MoM). Analisando-se os valores das colunas azuis (FDTD), observa-se que ocorre uma pequena elevação na intensidade de E_z (V/m), indicando que podemos alcançar uma melhor precisão nos resultados, na medida em que se adotam alguns procedimentos, como por exemplo, elevar a altura do canal do raio, ou utilizar a configuração de malha gradual para a discretização do canal do raio, como utilizado para a obtenção dos resultados apresentados na tabela 4.3. Uma outra hipótese seria elevar o número de divisões da malha de discretização do método FDTD. De qualquer maneira, é importante salientar que se deve estabelecer um compromisso entre a precisão almejada e o custo computacional relacionado a esta precisão. Em outras palavras, o tempo de processamento, que normalmente já é bastante elevado, será aumentado em muitas vezes em função do aumento da precisão, não se mostrando vantajoso optar por esta estratégia. Por este motivo e também porque

o objetivo deste trabalho não é de se obter precisão máxima e sim de se analisar o comportamento do campo elétrico mediante diferentes situações práticas, procurou-se encontrar um equilíbrio entre precisão e tempo de processamento.

Os valores correspondentes à componente vertical do campo elétrico, para cada uma das frequências, foram obtidos através da técnica da transformada rápida de Fourier (FFT), com 2^{16} amostras, tendo em vista que o método FDTD realiza as operações no domínio do tempo. Tomando-se os valores da tabela 4.3, que apresenta os valores mais precisos, verificamos que tanto para o método FDTD como para o MoM, ocorreu uma diminuição da intensidade do campo elétrico em relação ao topo da estrutura, ponto $P_1 (2,2,22)$ até a sua base no ponto $P_2 (22,22,2)$, mostrando que os resultados estão bastante coerentes. Outros resultados interessantes são os valores da coluna azul (FDTD) para 8 condutores de descida. Estes valores apresentaram uma redução bastante importante em relação aos valores de 4 condutores de descida, mostrando uma grande influência do número de descidas na intensidade do campo elétrico.

A tabela 4.4 apresenta as principais diferenças entre o método FDTD e o MoM.

<i>FDTD</i>	<i>MoM</i>
Domínio Espacial Finito (Fechado)	Domínio Espacial Infinito (Aberto)
Domínio do Tempo	Domínio da Frequência
Considera as Múltiplas Reflexões	Não Considera as Múltiplas Reflexões
Os resultados apresentaram poucas alterações devido à altura do canal do raio	Os resultados são fortemente influenciados pela altura do canal do raio

Tabela 4.4 – Comparação entre os métodos FDTD e MoM

4.5 COMPARAÇÕES COM OS RESULTADOS DE PANICALI [29]

Este item apresenta as avaliações realizadas através da comparação entre os resultados obtidos por Panicali [29], utilizando o método dos momentos (MoM), e os resultados obtidos através do método FDTD. O objetivo destas comparações é de verificar a coerência e dos resultados obtidos pelo uso do método FDTD e a sua praticidade como ferramenta para o cálculo das grandezas eletromagnéticas.

Primeiramente foram realizadas diversas simulações computacionais com o objetivo de se determinar o percentual de corrente que escoam através dos condutores de descida do SPDA. Em seguida foi avaliada a tensão induzida entre um condutor instalado no interior da edificação e o piso de um dado pavimento

4.5.1 CORRENTES NOS CONDUTORES DE DESCIDA DO SPDA

Esta seção apresenta a avaliação das correntes que escoam através dos condutores de descida do SPDA. O espaço computacional utilizado é o mesmo da figura 4.3, com a consideração de que as distâncias entre os condutores de descida do SPDA e as superfícies laterais absorventes do espaço computacional é de 10 m e a altura do canal do raio é de 18 m. A figura 4.9 mostra a geometria do edifício utilizado para esta avaliação, sendo suas dimensões de 10x20x18 m³.

Neste caso, foram fixados 4 condutores de descida naturais, denominados A, B, C e D, representando os pilares de um edifício com 6 pavimentos, e as interligações dos pilares através de anéis horizontais condutores, representam as vigas do edifício. Os pilares e as vigas foram considerados com raio infinitesimal e constituídos de material condutor, cuja resistência linear é de $10^{-3} \Omega/\text{mm}$. Na base do pavimento térreo está representado o aterramento, constituído de PEC. Foram realizados testes alterando o material do solo para materiais com diversas resistividades, entretanto não houve alterações significativas nos valores e percentuais das correntes nos condutores de descida. Os cálculos das correntes foram realizados para as posições no topo do edifício, no meio e na sua base,

conforme indicam as setas da figura 4.9. A incidência do raio foi considerada no topo do condutor de descida A, onde há a indicação do canal do raio.

O pulso de corrente utilizado nestas simulações é dado pelas equações 4.1 e 4.2 e possui os seguintes parâmetros: $I_0 = 50 \text{ kA}$, $n = 2$, $\tau_1 = 8 \text{ ns}$ e $\tau_2 = 20 \text{ ns}$. Estas constantes de tempo tornam o processamento bastante rápido, entretanto, é perceptível que os valores de tempo de subida (τ_1) e tempo de descida (τ_2), são valores bastante reduzidos em relação aos valores usuais, da ordem de μs , entretanto, a avaliação das correntes foi realizada para a frequência específica de 670 kHz , a qual representa um tempo de subida de $1,5 \mu\text{s}$. Isto foi feito porque no trabalho publicado por Panicali [29] foi utilizado um sinal com frente de onda de $1,5 \mu\text{s}$. Como o sistema todo tem um comportamento linear, sendo a avaliação feita para uma frequência específica, qualquer alteração na forma da corrente de descarga seria proporcional a todos os valores calculados, não afetando as relações percentuais das correntes em cada condutor de descida.

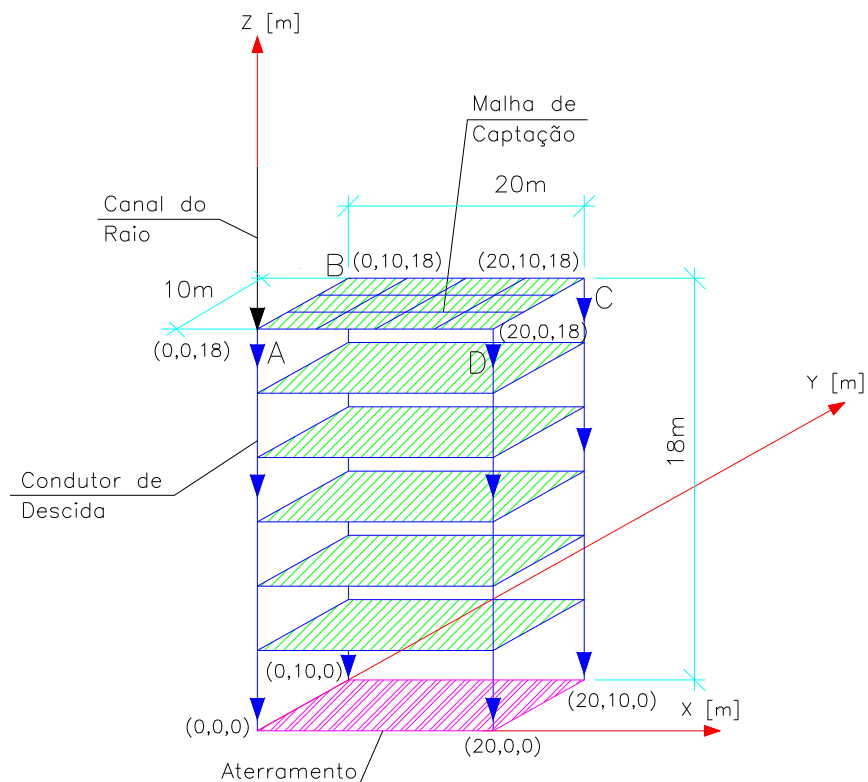


Figura 4.9 – Configuração geométrica do SPDA

A dimensão da maior célula utilizada nestas simulações é de 3 metros, a velocidade da luz $c = 300.000$ km/s, portanto, pela equação 3.24, a máxima frequência do sistema é de 10 MHz. Como a frequência de interesse é de 670 kHz, os valores satisfazem.

O valor mínimo de ΔL utilizado na discretização é de 1,11 metros, portanto, o passo de tempo máximo de simulação vale 2,13 ns, de acordo com a equação 3.23. O passo de tempo de simulação utilizado foi de 0,25 ns, garantindo a estabilidade do método FDTD.

Os resultados foram obtidos para três hipóteses distintas do SPDA, considerando:

1. O piso da cobertura do edifício e os pisos dos pavimentos intermediários como condutor elétrico perfeito (PEC);
2. A malha de captação na cobertura de material condutor e os pavimentos intermediários de PEC;
3. Somente os pilares, as vigas externas e as vigas internas dos pavimentos, de material condutor, cuja resistência linear é de 10^{-3} Ω/mm .

A tabela 4.5 apresenta um quadro geral com os percentuais de correntes em cada condutor de descida em relação à corrente total da descarga atmosférica, para as três alturas indicadas com setas na figura 4.9 (topo, meio e base do edifício) para as três hipóteses anteriores e também o resultado de Panicali [29].

	Corrente no Topo do Edifício (%)				Corrente no Meio do Edifício (%)				Corrente na Base do Edifício (%)			
	Condutor A	Condutor B	Condutor C	Condutor D	Condutor A	Condutor B	Condutor C	Condutor D	Condutor A	Condutor B	Condutor C	Condutor D
Hipótese 1	35,29	22,97	21,30	20,44	26,82	25,03	24,24	23,91	25,03	24,98	25,02	24,97
Hipótese 2	45,75	18,94	17,77	17,54	27,34	24,95	24,06	23,64	25,20	25,04	24,85	24,91
Hipótese 3	44,30	19,59	18,24	17,87	27,71	24,83	23,89	23,57	25,27	25,10	24,82	24,82
Panicalli	50,00	20,00	15,00	15,00	32,00	26,00	20,00	22,00	29,00	26,00	22,00	23,00

Tabela 4.5 – Percentual de corrente em cada condutor de descida em relação à corrente total da descarga atmosférica

Apenas para a hipótese 1 ocorreu uma diferença significativa em relação aos valores encontrados por Panicali [29]. Isto se deve porque nesta simulação foi atribuída a toda a superfície do piso do pavimento da cobertura o material perfeitamente condutor (PEC), forçando uma maior distribuição da corrente no topo do edifício. Nas outras duas hipóteses (2 e 3), as quais se aproximam mais da situação real, os valores ficaram bastante próximos aos obtido pelo método MoM.

Outro fator bastante importante a ser salientado é a distribuição da corrente na medida em que esta desce pela estrutura, fazendo com ocorra um equilíbrio entre cada um dos quatro condutores de descida, de forma que os percentuais tendem a se igualar, ou seja, 25% da corrente total para cada condutor, demonstrando o efeito da equalização de potenciais proporcionada pelos anéis condutores horizontais, conforme descrito na seção 2.2.1 do capítulo 2.

4.5.2 AVALIAÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA

O objetivo deste item é de avaliar a tensão induzida na extremidade de um condutor instalado no interior do edifício, elevando-se desde a sua base, até o quinto pavimento, representando um alimentador elétrico instalado na prumada do prédio. A figura 4.10 apresenta a configuração do SPDA, a geometria do edifício e o espaço computacional.

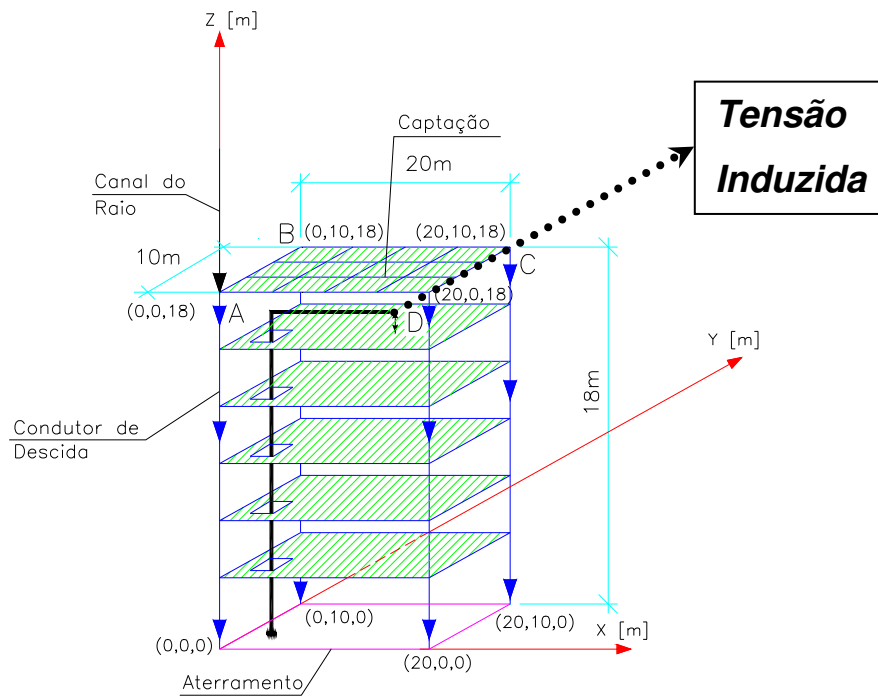


Figura 4.10 – Configuração geométrica do SPDA com a extremidade do condutor em aberto

O cálculo da tensão induzida entre a extremidade do condutor indicado e o piso do quinto pavimento foi realizado na frequência específica de 670 kHz. Para tanto, foi feita a transformada rápida de Fourier (FFT) do pulso da corrente do raio, com 2^{16} amostras, e o cálculo foi referenciado ao valor de pico da corrente na frequência de 670 kHz. Os parâmetros da corrente do raio utilizados, conforme a equação 4.1 são: $I_0 = 8,84 \text{ MA}$, $n = 2$, $\tau_1 = 0,25 \mu\text{s}$ e $\tau_2 = 2,5 \mu\text{s}$. O valor de I_0 foi reajustado a fim de se obter um valor de 50 kA RMS na frequência de 670 kHz, correspondente à amplitude utilizada por Panicali [29] nos seus cálculos.

4.5.3 AVALIAÇÃO DA CORRENTE INDUZIDA

Uma outra avaliação também foi realizada. Imagine-se que este condutor não estivesse com a sua extremidade aberta, e sim ligado ao piso do quinto

pavimento. A figura 4.11 mostra esta nova configuração. A intenção deste cálculo é de estimar qual a corrente que circularia neste condutor nesta situação.

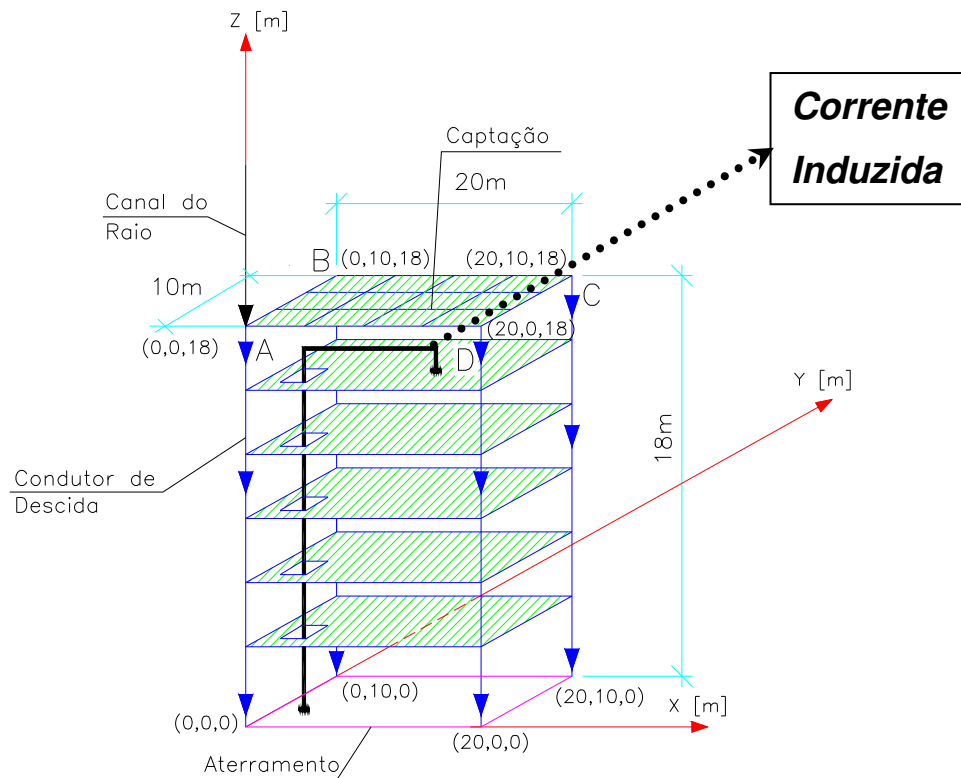


Figura 4.11 – Configuração geométrica do SPDA com o condutor conectado ao piso do 5º pavimento

Foi realizado o cálculo da corrente, através do mesmo procedimento do cálculo da tensão induzida, ou seja, a corrente para a frequência de 670 kHz foi referenciada a 50 kA.

A tabela 4.6 apresenta um quadro comparativo entre os resultados obtidos por Panicali [29], através da utilização do método MoM e os resultados alcançados pelo método FDTD.

	FDTD	MoM
Tensão induzida na extremidade do condutor	353,5 kV	330 kV
Corrente induzida no condutor	4,42 kA	4,5 kA

Tabela 4.6 – Resultados comparativos entre FDTD x MoM

Os valores mostrados na tabela 4.6 estão bastante próximos, portanto, a conclusão que se faz é de que estes resultados estão coerentes e reproduzem de forma satisfatória a ordem de grandeza da tensão e da corrente, induzidas no condutor analisado.

4.6 ANÁLISE DO CAMPO ELÉTRICO NUMA EDIFICAÇÃO TÍPICA

Este item tem por objetivo apresentar os resultados das diversas simulações computacionais efetuadas no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa. Elas visam analisar o comportamento da distribuição do campo elétrico no interior de uma edificação típica atingida por descarga atmosférica. Para a realização desta tarefa foram utilizadas diversas configurações geométricas distintas do SPDA, de forma a possibilitar a avaliação do comportamento do campo elétrico como função das características do SPDA.

O edifício utilizado como modelo para as simulações possui as dimensões de 20 metros de comprimento, 10 metros de largura e 40 metros de altura, ou seja, $(20 \times 10 \times 40) \text{ m}^3$. O espaço computacional utilizado é o mesmo apresentado na figura 4.3. Os parâmetros adotados para estas simulações são os seguintes:

- Tempo de aplicação da fonte → 0,2 μs
- Tempo de simulação → 2 μs

- Passo de simulação → 1 ns
- Resistência linear do material condutor → $10^{-3} \Omega/\text{mm}$
- Resistência superficial do ar → $377 \Omega/\text{mm}^2$
- Resistência superficial do solo → $50 \Omega/\text{mm}^2$
- Parâmetros da corrente do raio, referente às equações 4.1 e 4.2:

$$I_0 = 50 \text{ kA}$$

$$n = 2$$

$$\tau_1 = 8 \text{ ns}$$

$$\tau_2 = 20 \text{ ns}$$

As constantes de tempo τ_1 e τ_2 são bastante reduzidas, o que contribuiu muito para que o tempo de processamento não fosse muito grande. Os cálculos do campo elétrico foram efetuados para duas paredes laterais do edifício e para três níveis de alturas diferentes (0, 20 e 40 metros de altura). Os valores de campo elétrico correspondem aos valores máximos ocorridos em cada ponto calculado.

Foram utilizadas 8 configurações diferentes do SPDA para efeito das simulações práticas. Com relação à malha de captação foi adotada a malha de captação simples e com 4 divisões, e com relação aos condutores de descida, foram utilizados 4 ou 8 condutores de descida, como mostrado na figura 4.12. Também se avaliou a influência dos anéis de equalização de potenciais e da resistência de aterramento.

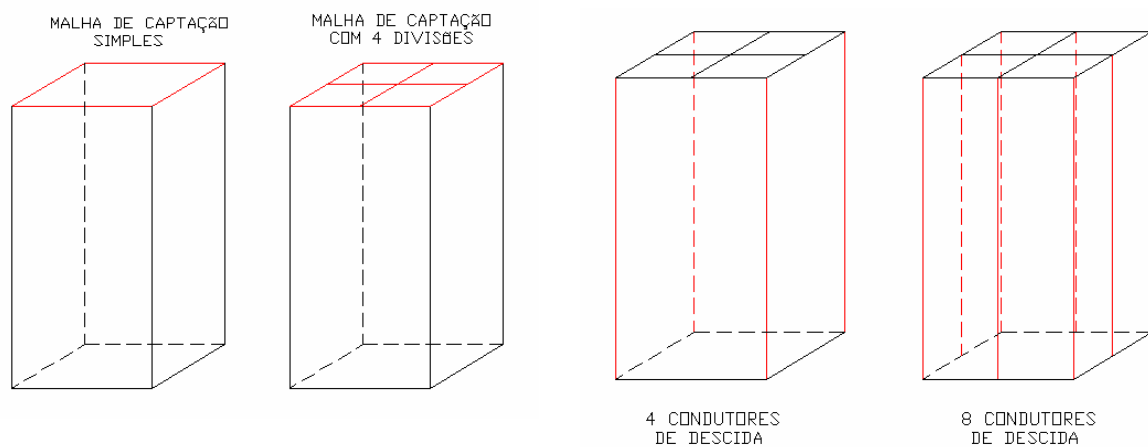


Figura 4.12 – Geometrias do SPDA

A avaliação da distribuição do campo elétrico tangencial às superfícies do edifício teve sua motivação impulsionada pela característica de que as instalações elétricas presentes em uma edificação são instaladas nestas superfícies, e estão sujeitas às influências causadas pelo campo eletromagnético gerado pela incidência de uma descarga atmosférica na edificação.

O ponto de impacto da descarga atmosférica para estas simulações está localizado nas coordenadas (0, 0, 40) m.

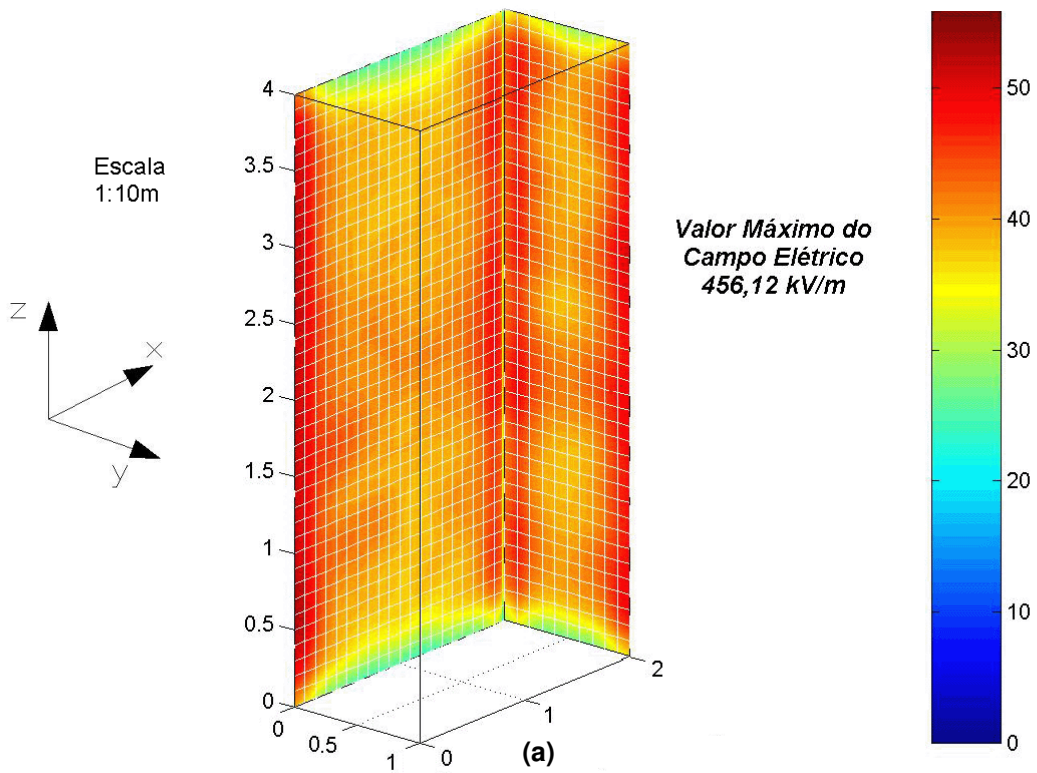
Configuração 1:

SPDA com 4 condutores de descida, malha de captação simples e solo PEC.

A figura 4.13a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.13b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.14a e 4.14b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.

Distribuição do Campo Elétrico Máximo tangencial às paredes do edifício



Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção z

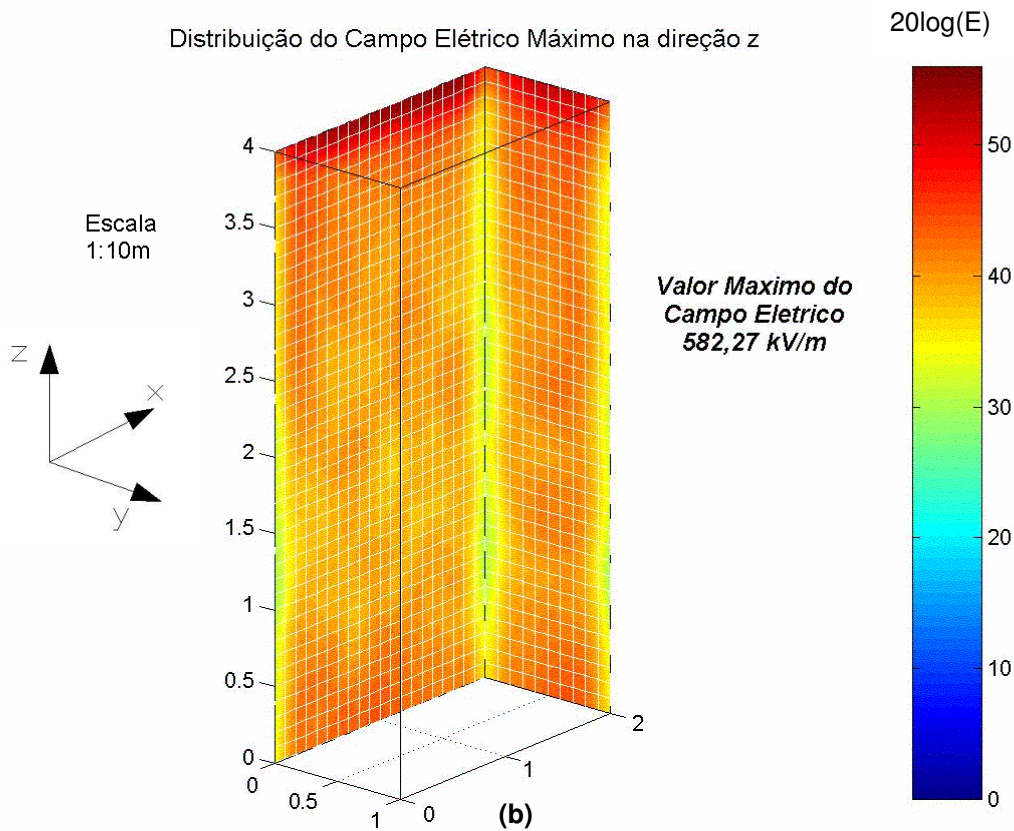
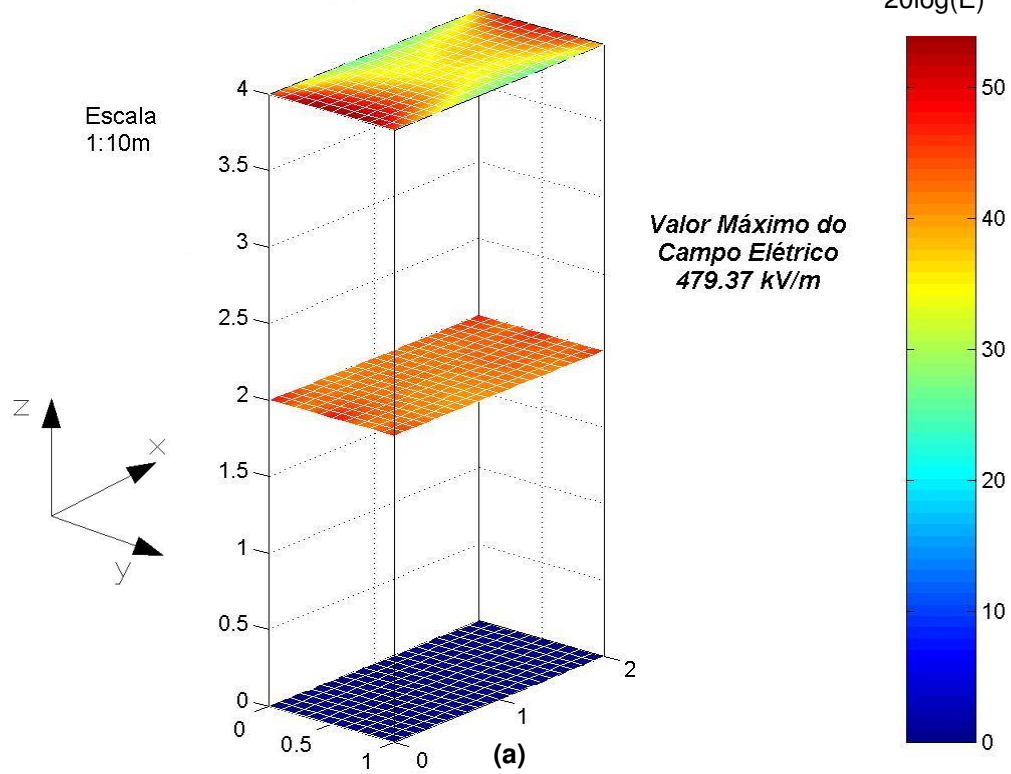


Figura 4.13 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)

Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção x



Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção y

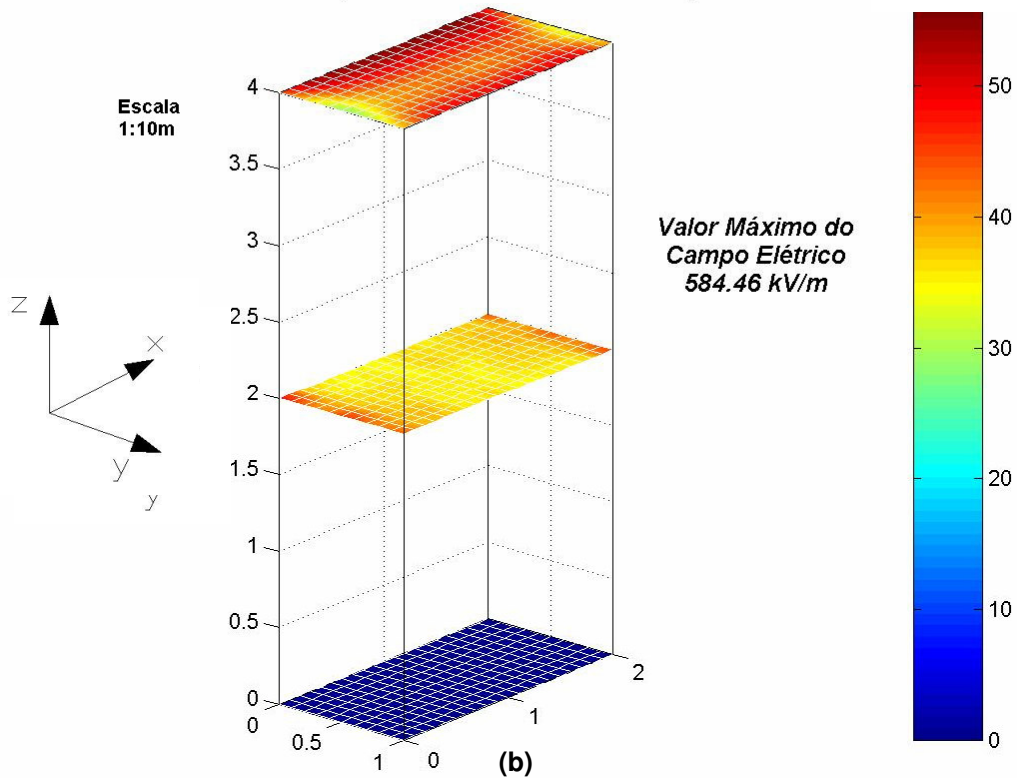


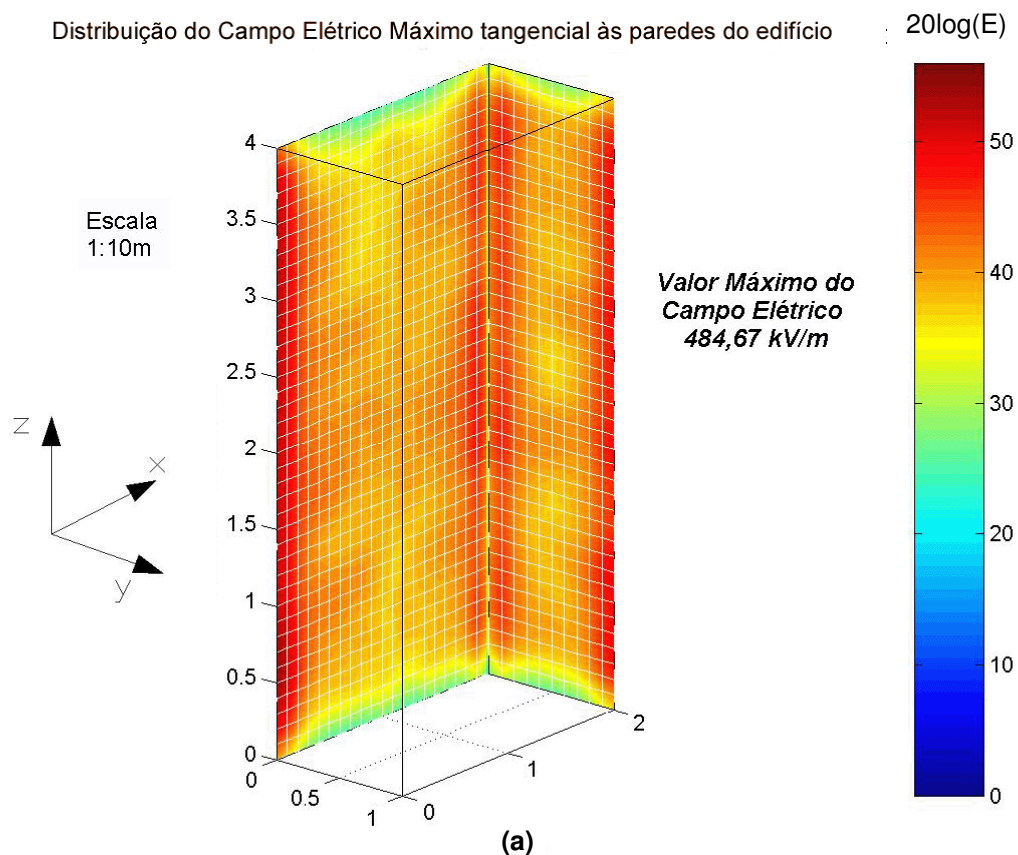
Figura 4.14 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y

Configuração 2:

SPDA com 4 condutores de descida, malha de captação com 4 divisões e solo PEC.

A figura 4.15a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.15b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.16a e 4.16b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.



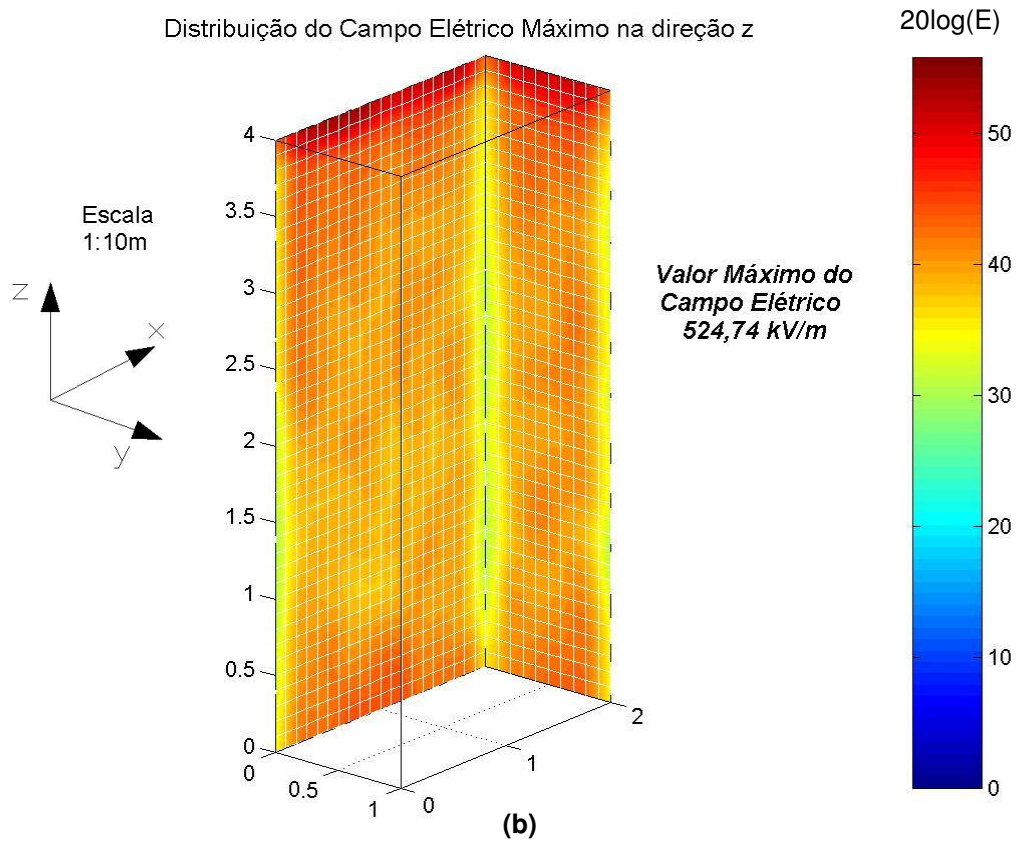
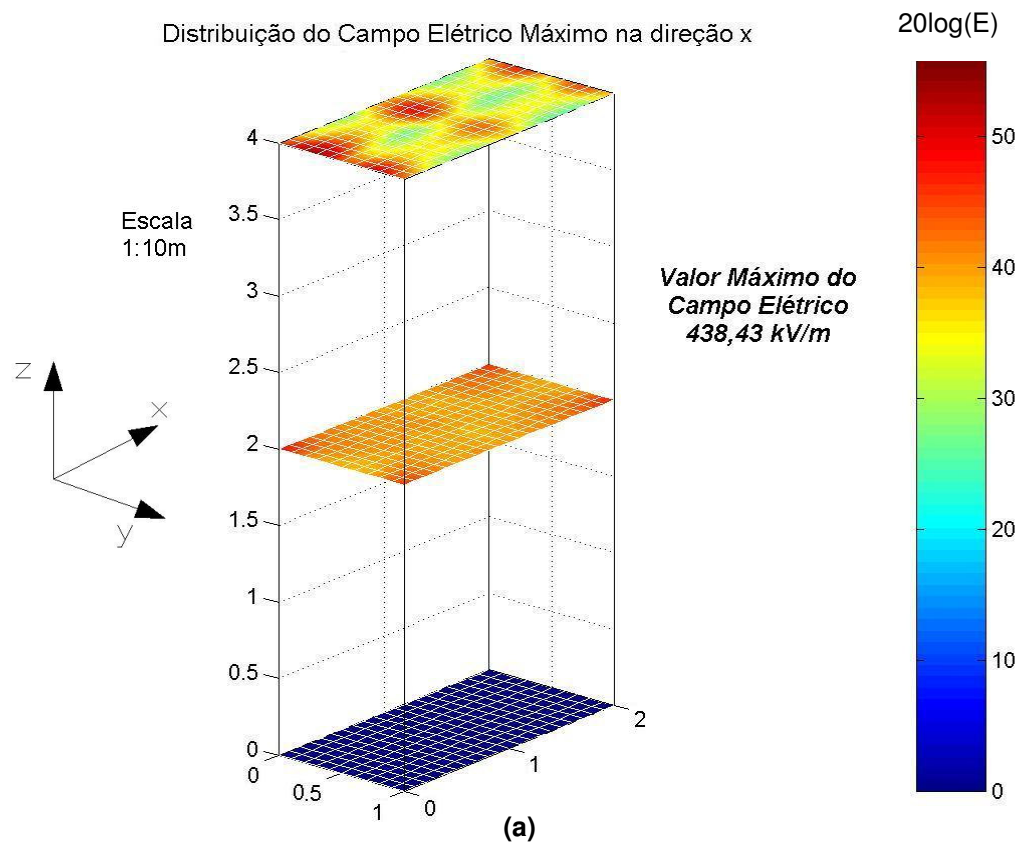


Figura 4.15 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)



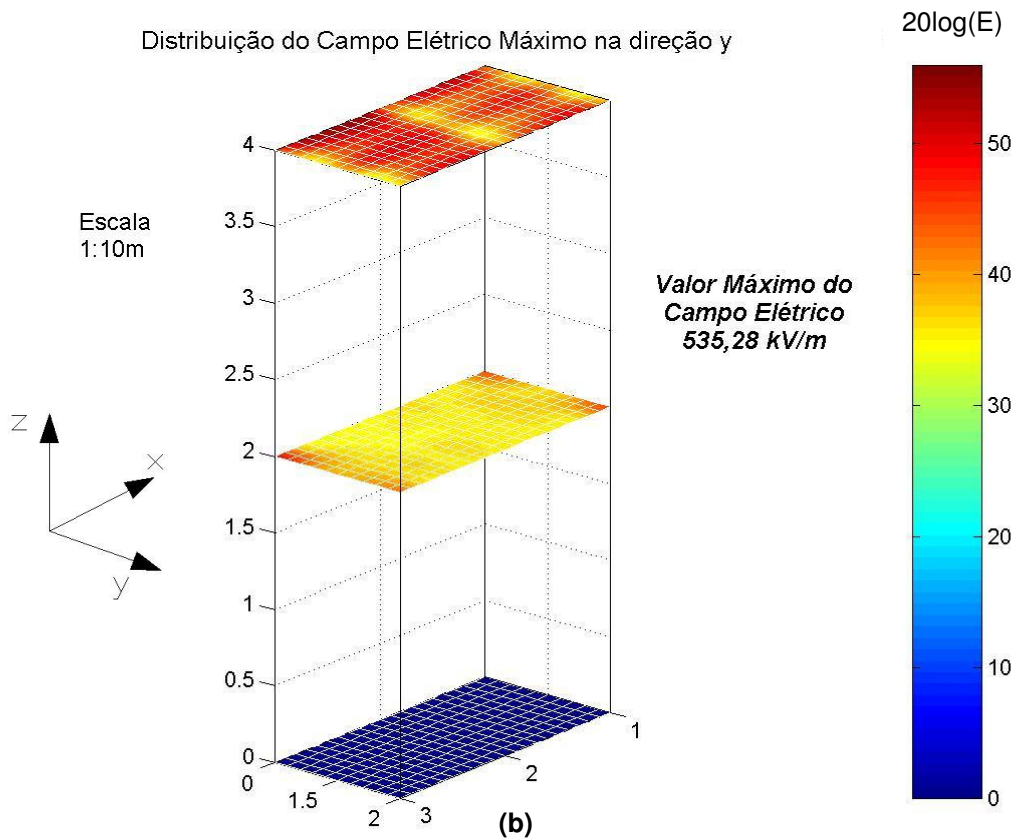


Figura 4.16 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y

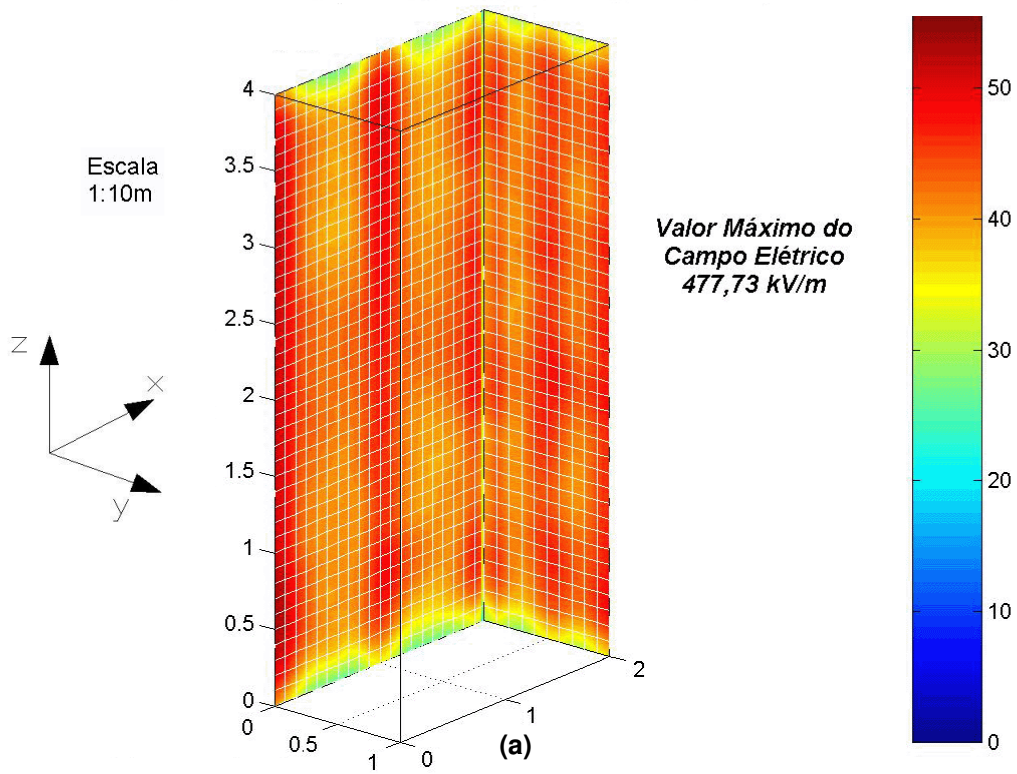
Configuração 3:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação simples e solo PEC.

A figura 4.17a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.17b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.18a e 4.18b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.

Distribuição do Campo Elétrico Máximo tangencial às paredes do edifício



Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção z

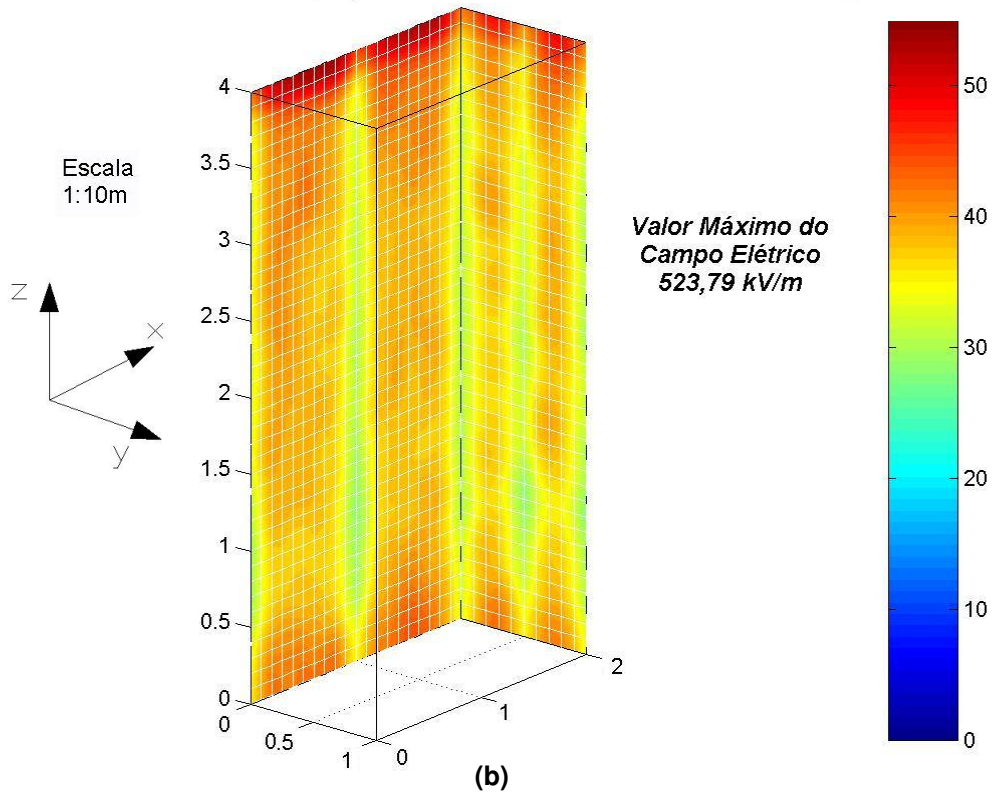


Figura 4.17 - Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)

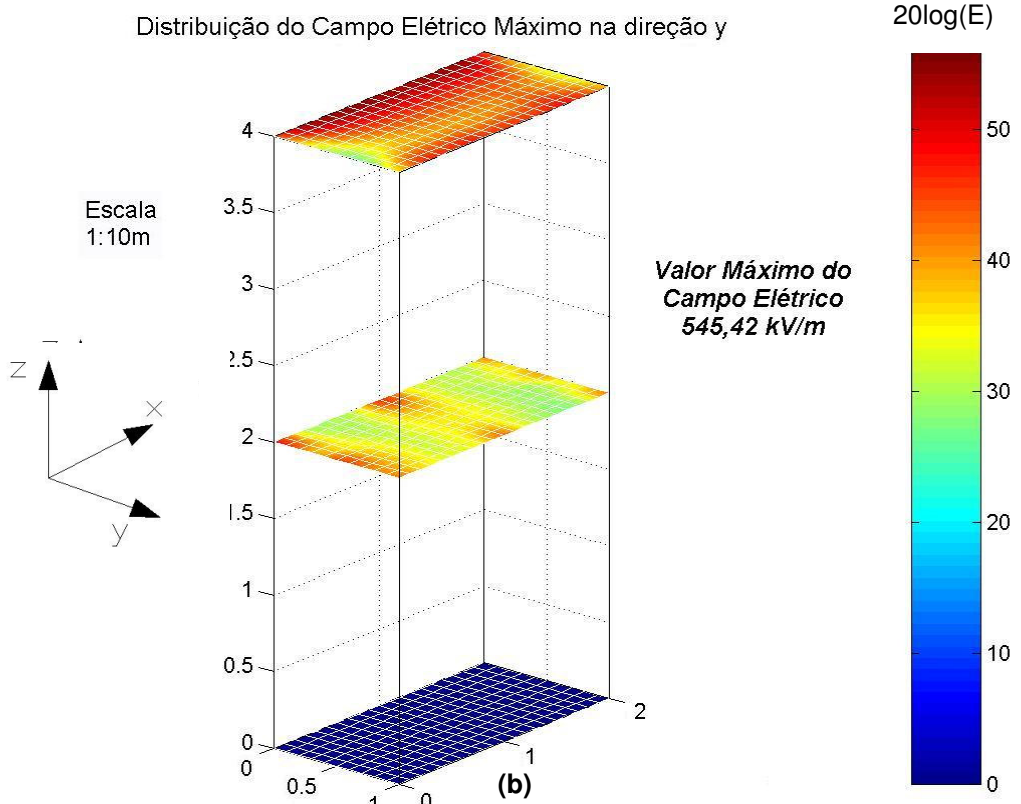
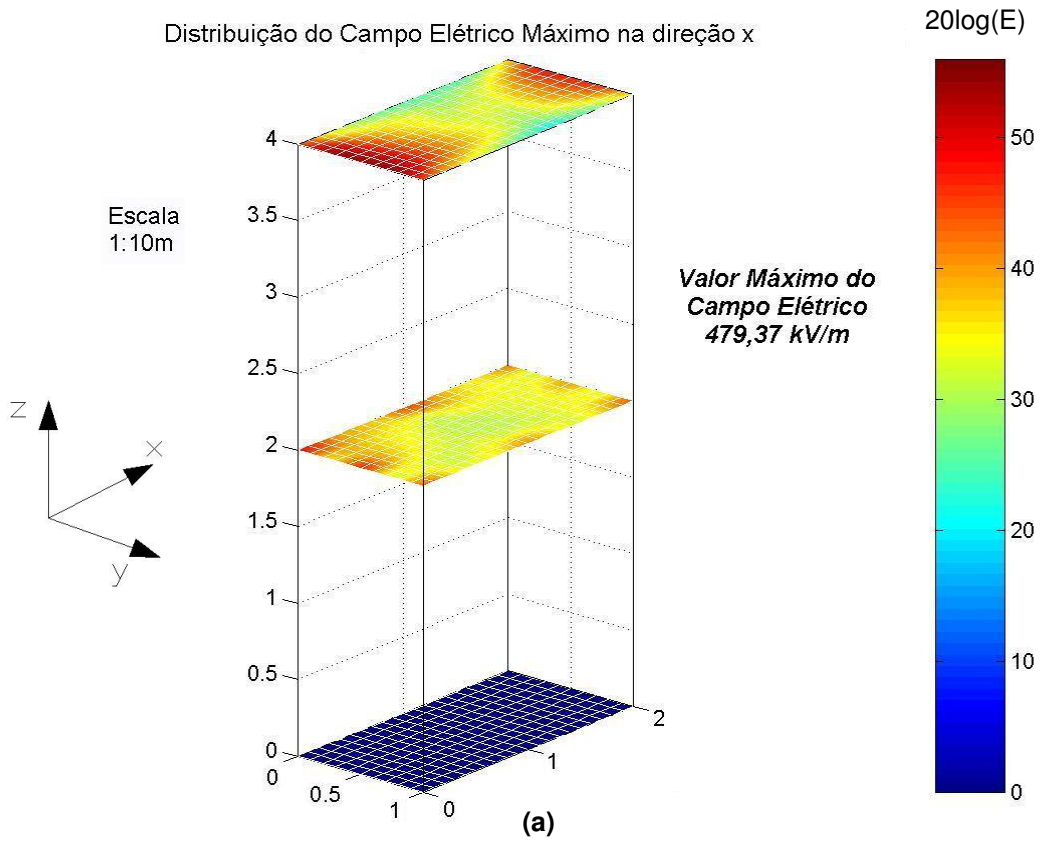


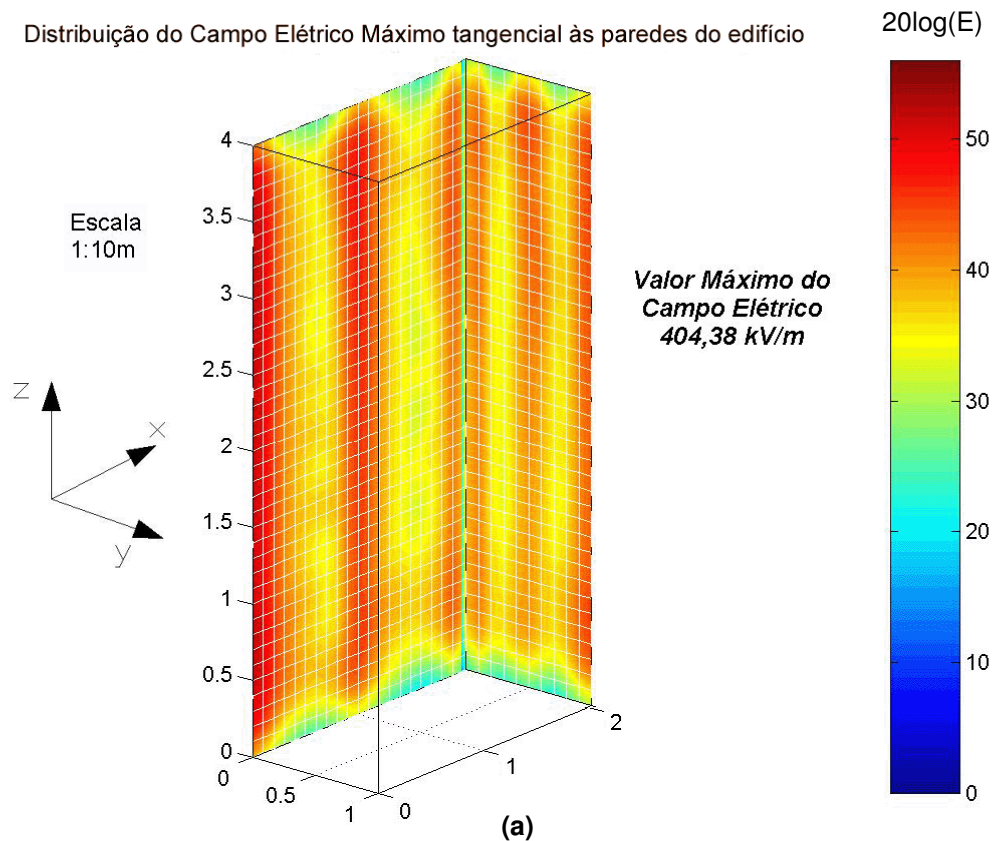
Figura 4.18 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y

Configuração 4:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação com 4 divisões e solo PEC.

A figura 4.19a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.19b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.20a e 4.20b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.



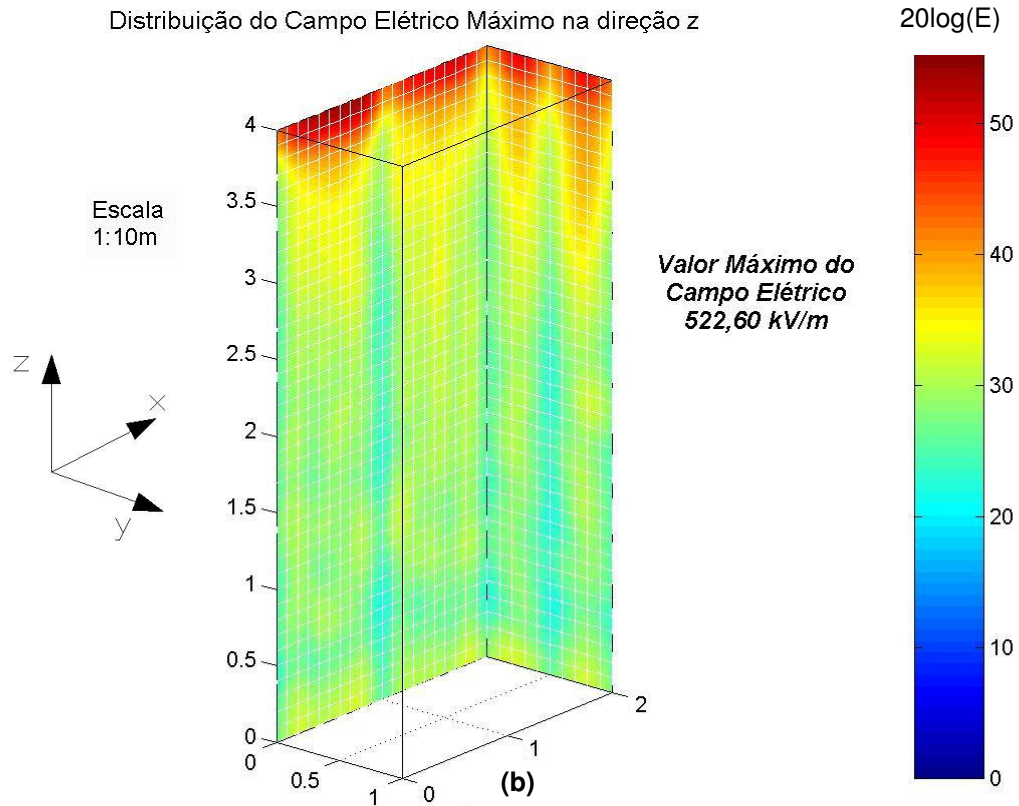
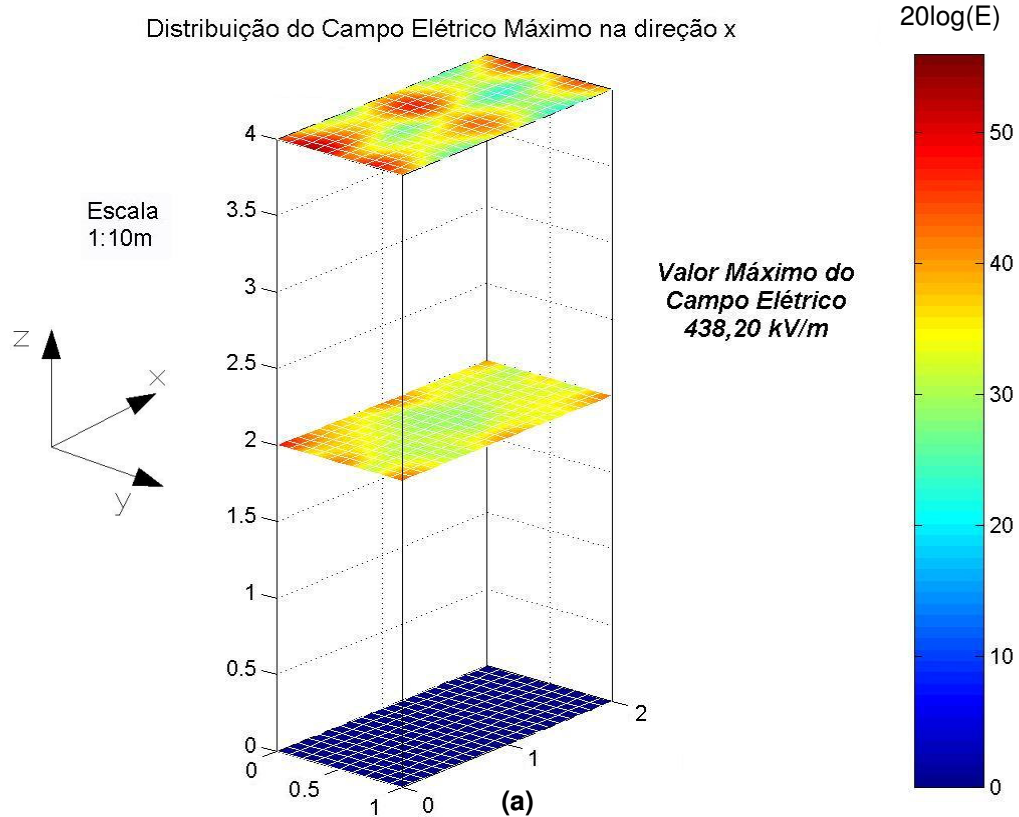
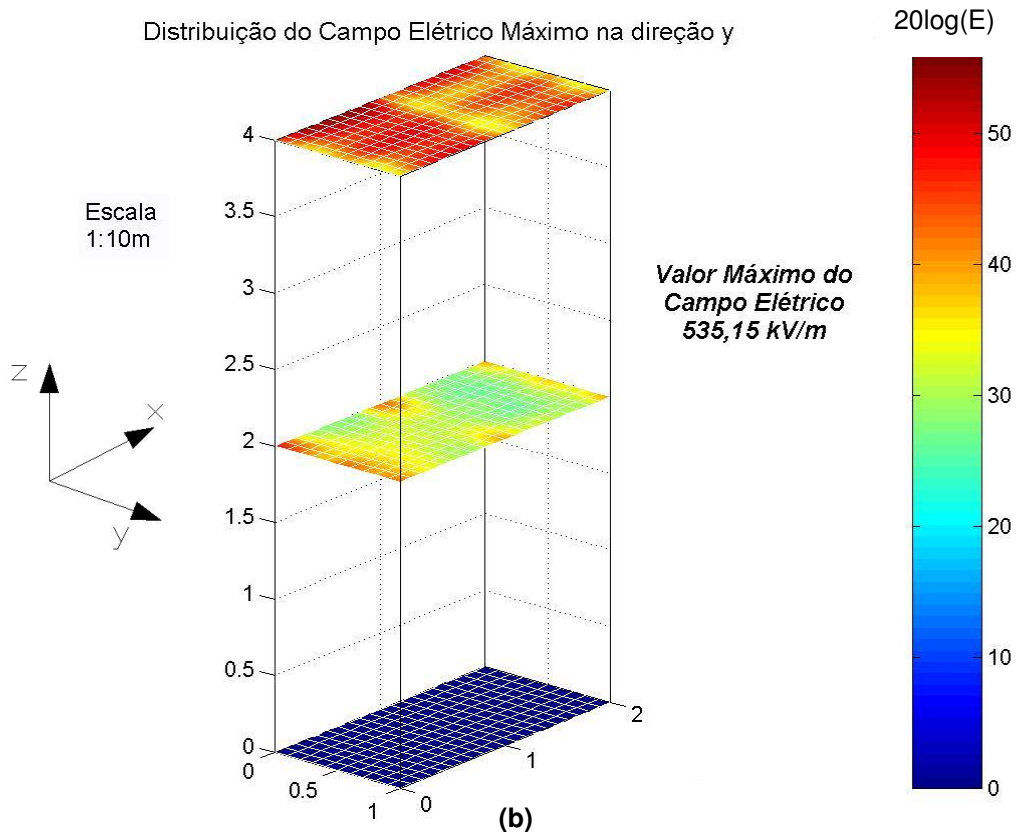


Figura 4.19 - Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)





**Figura 4.20 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y**

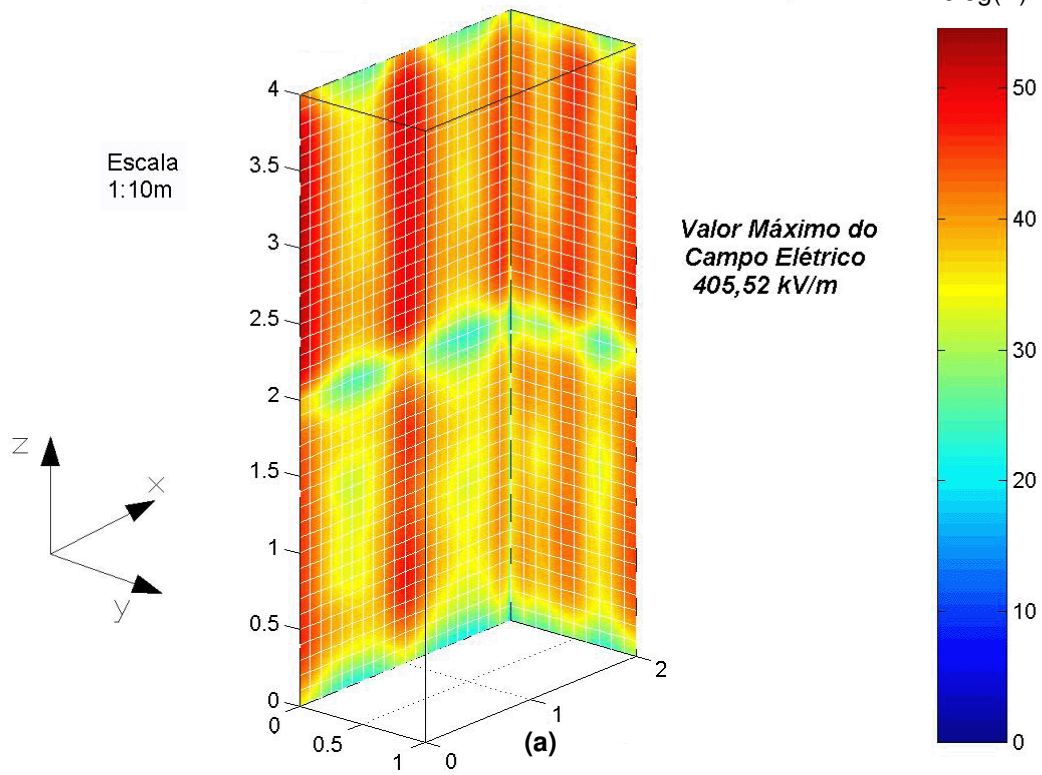
Configuração 5:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação simples, anel de equalização de potenciais a 20 m de altura e solo condutor perfeito (PEC).

A figura 4.21a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.21b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.22a e 4.22b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.

Distribuição do Campo Elétrico Máximo tangencial às paredes do edifício



Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção z

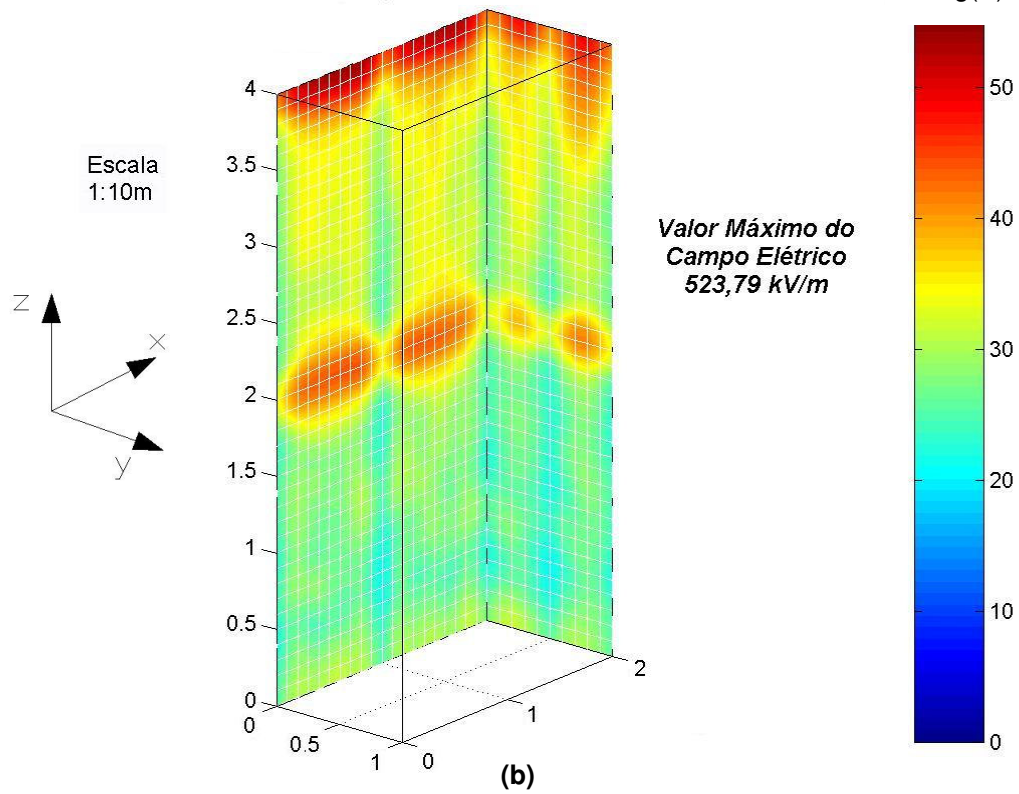


Figura 4.21 - Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)

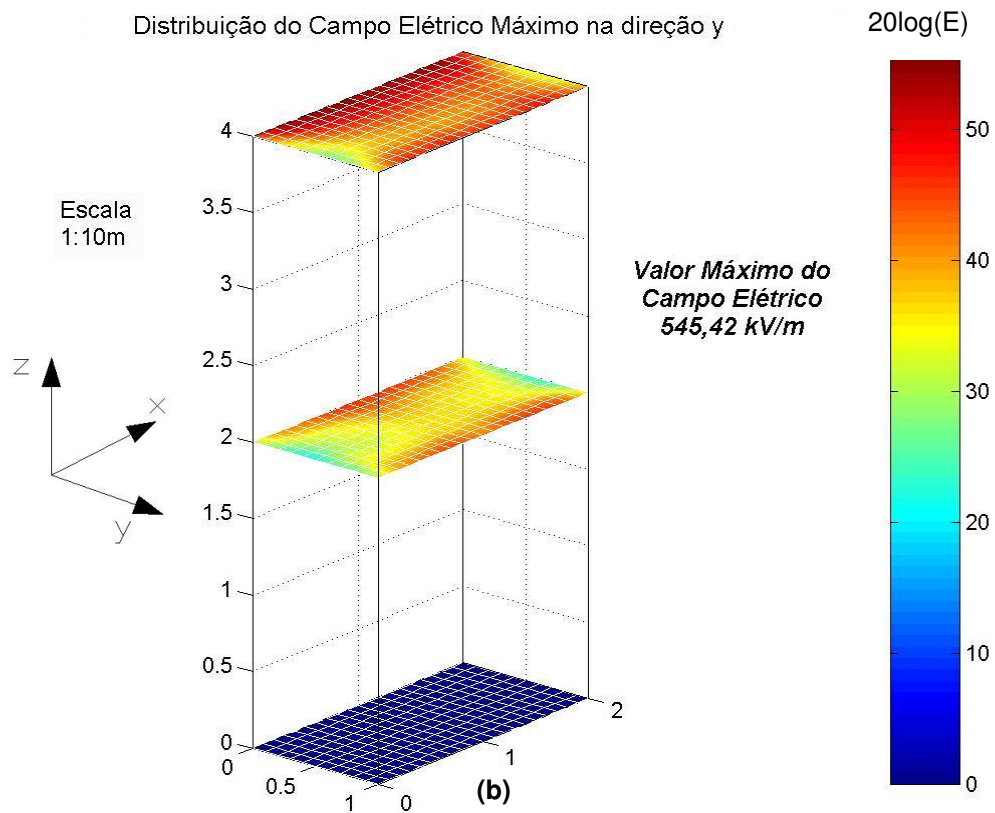
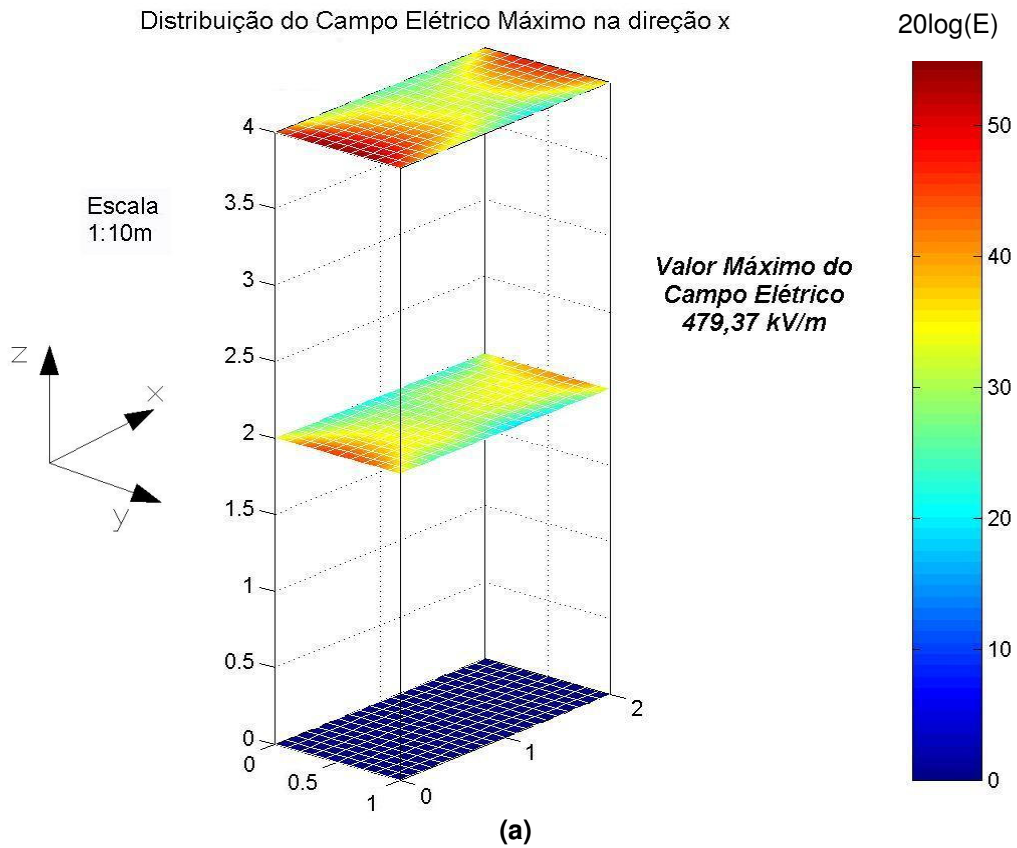


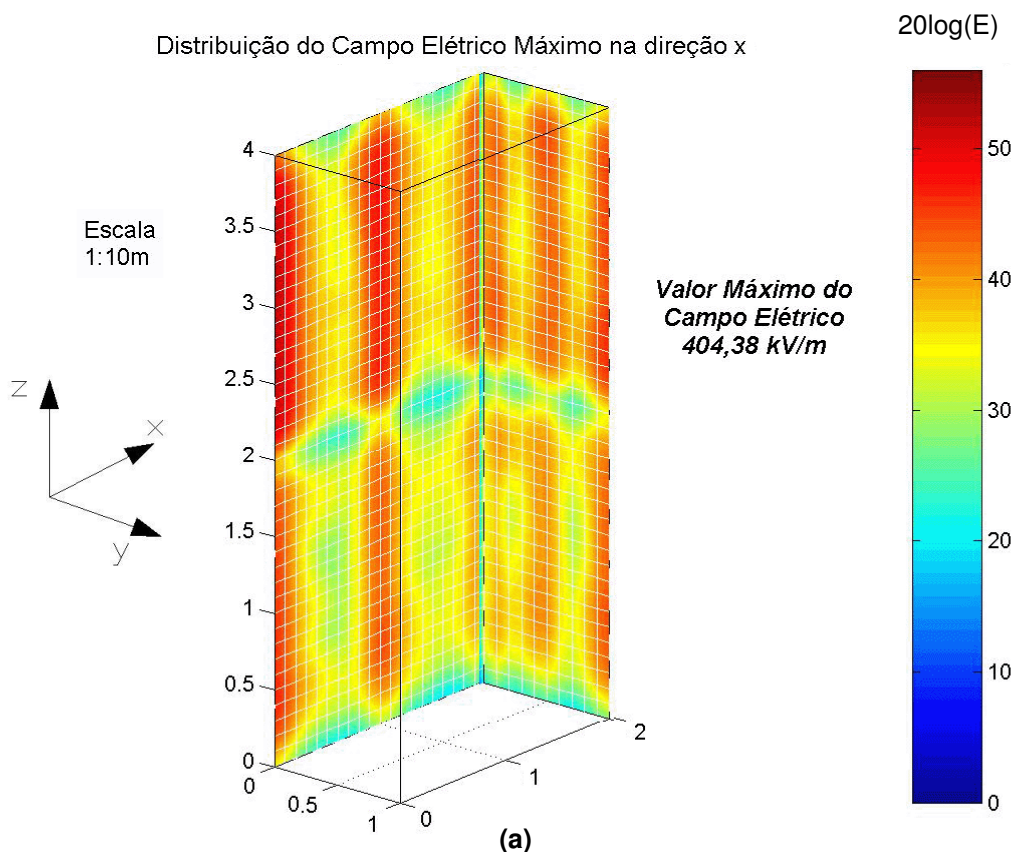
Figura 4.22 - Distribuição do campo elétrico máximo:
 (a) na direção x e (b) na direção y

Configuração 6:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação com 4 divisões, anel de equalização de potenciais a 20 m de altura e solo PEC.

A figura 4.23a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.23b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.24a e 4.24b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.



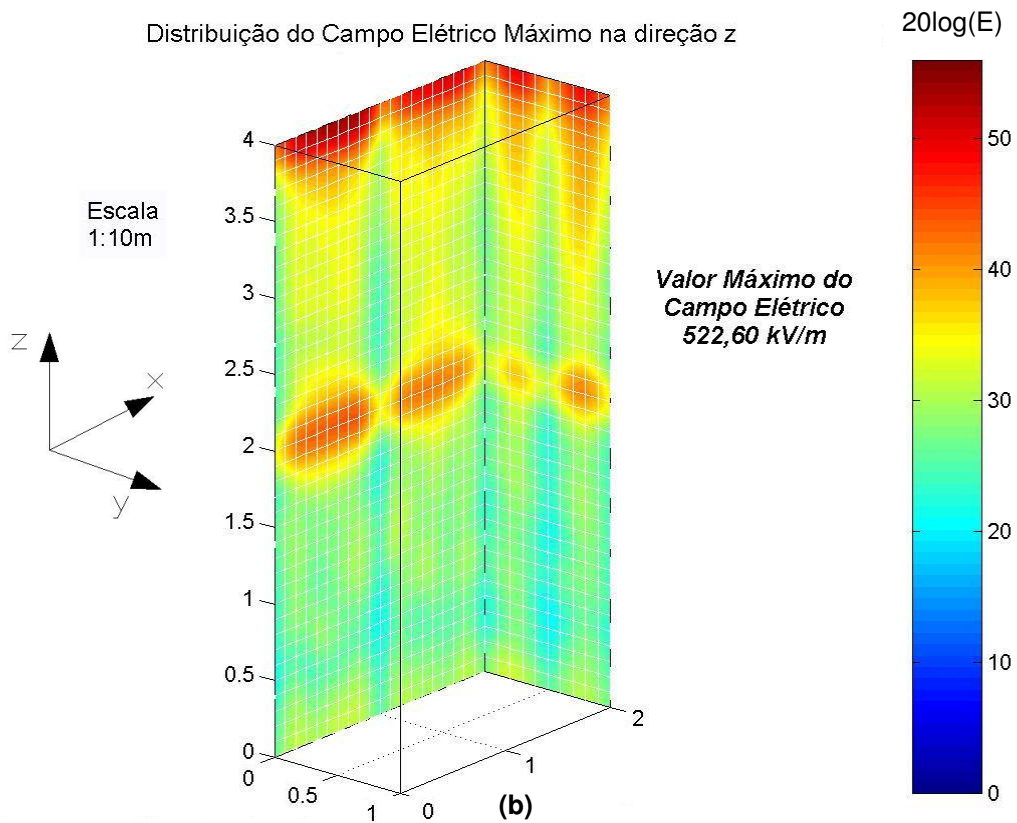
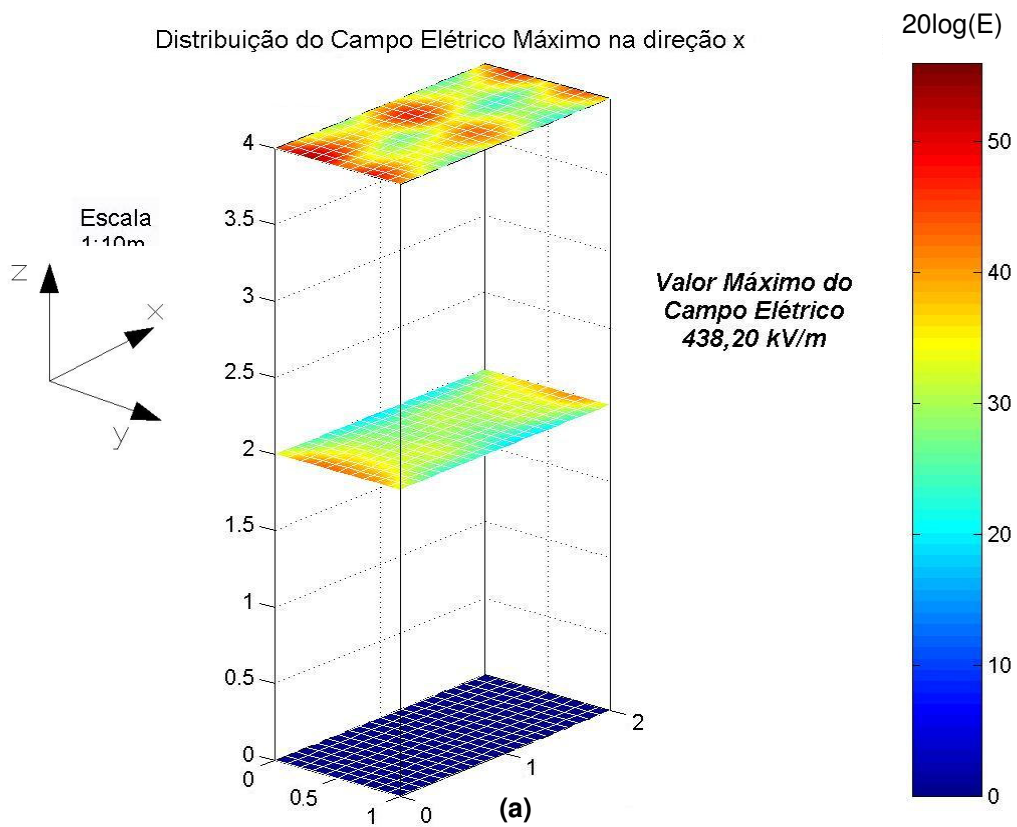
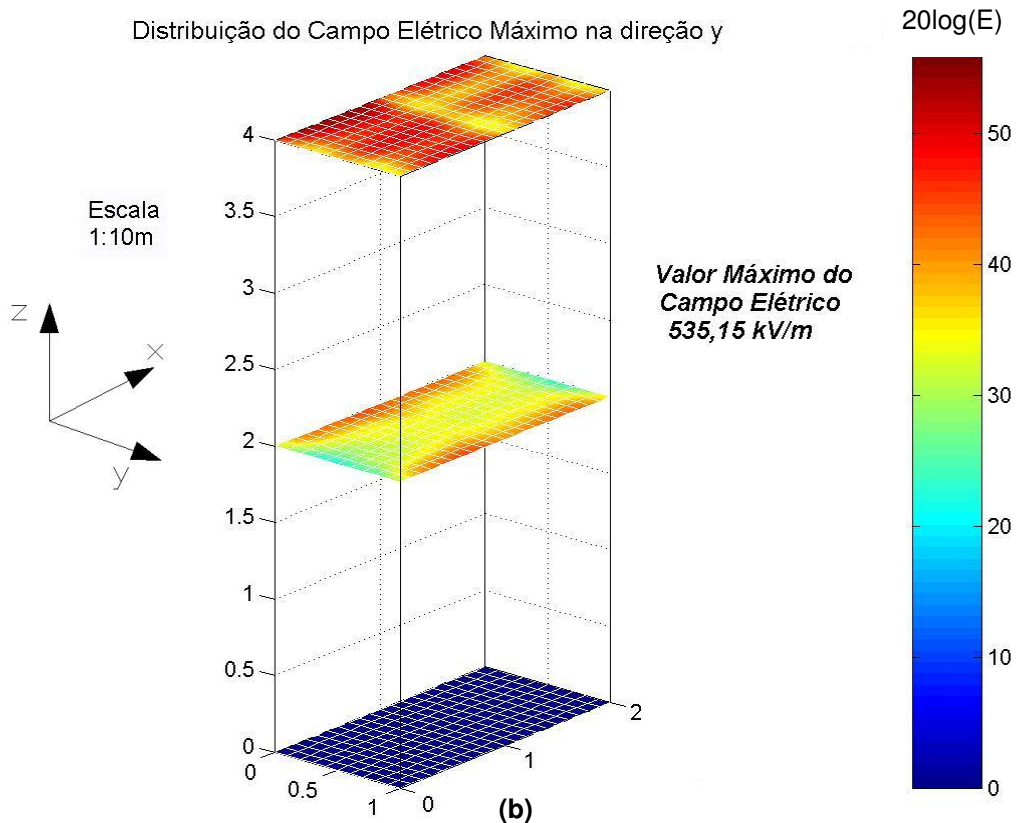


Figura 4.23 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)





**Figura 4.24 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y**

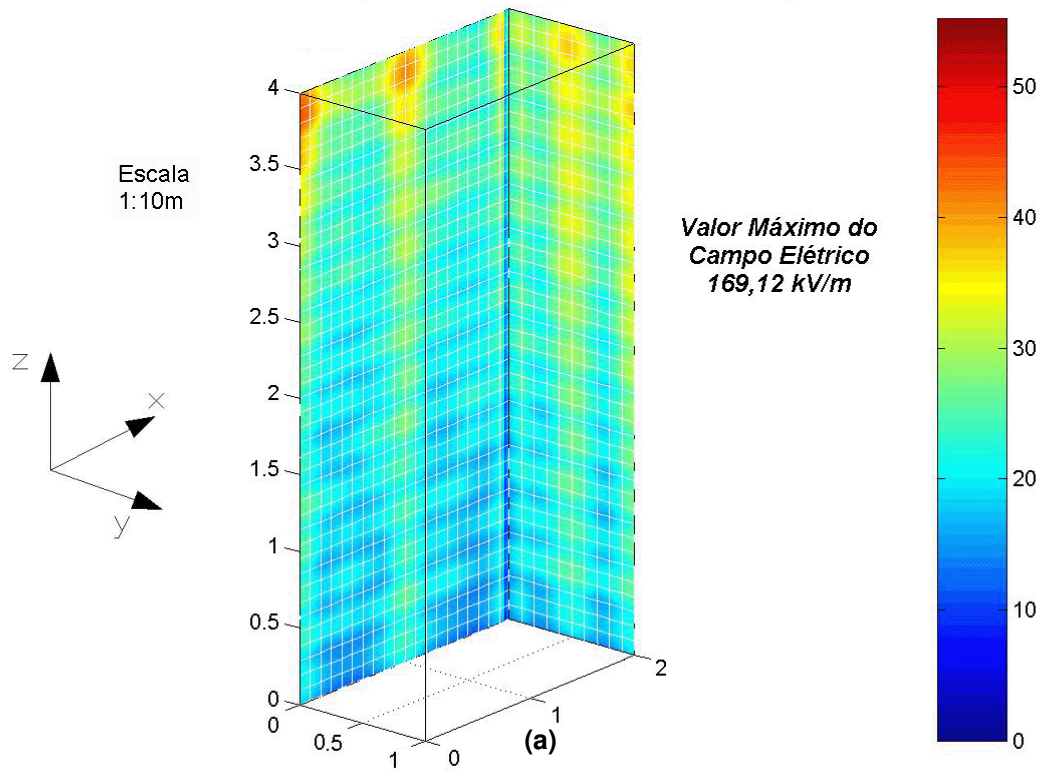
Configuração 7:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação com 4 divisões, anel de equalização de potenciais a cada 2,85 m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω .

A figura 4.25a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.25b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.26a e 4.26b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.

Distribuição do Campo Elétrico Máximo tangencial às paredes do edifício



Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção z

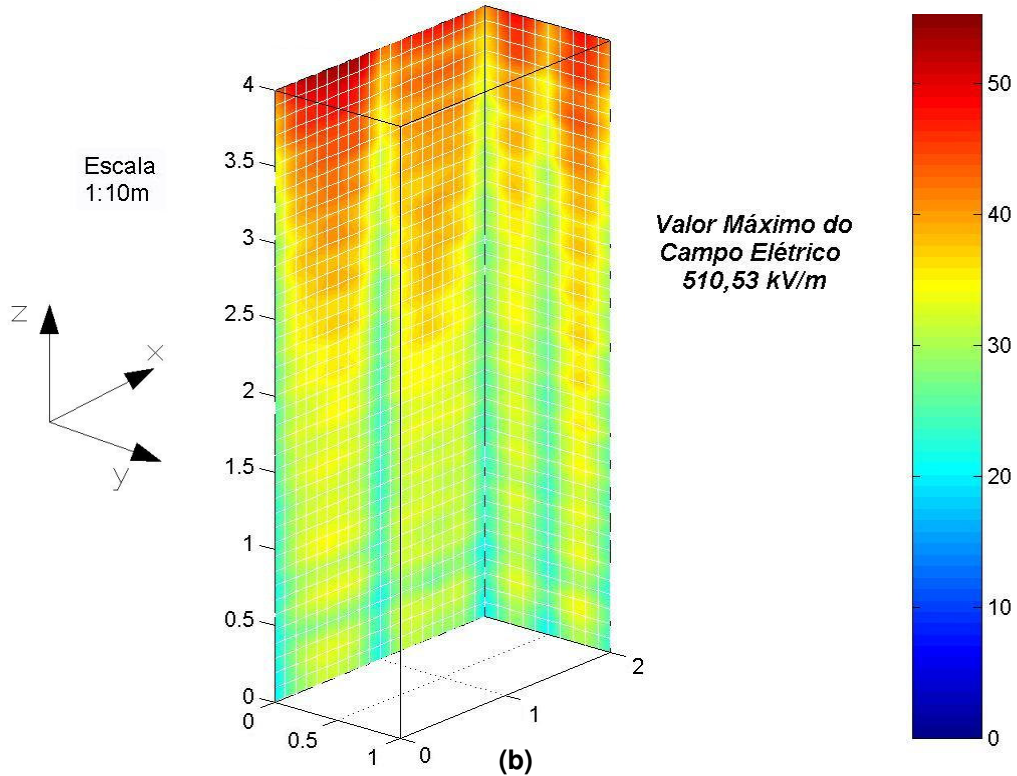


Figura 4.25- Distribuição do campo elétrico máximo: (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)

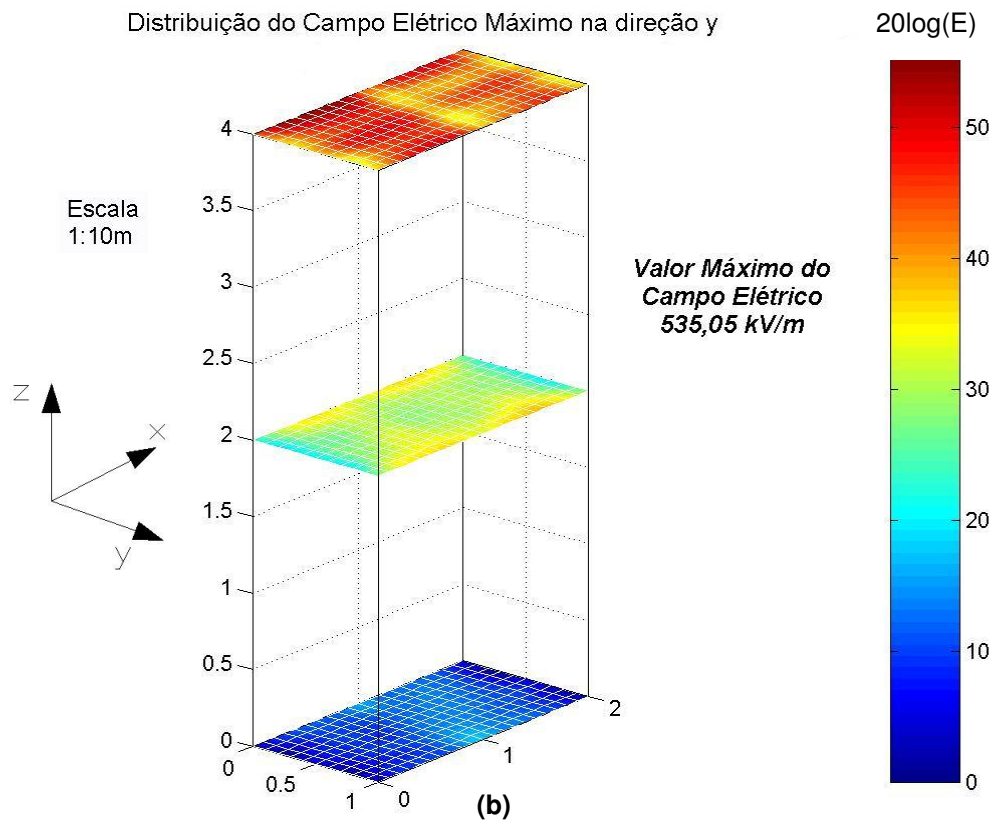
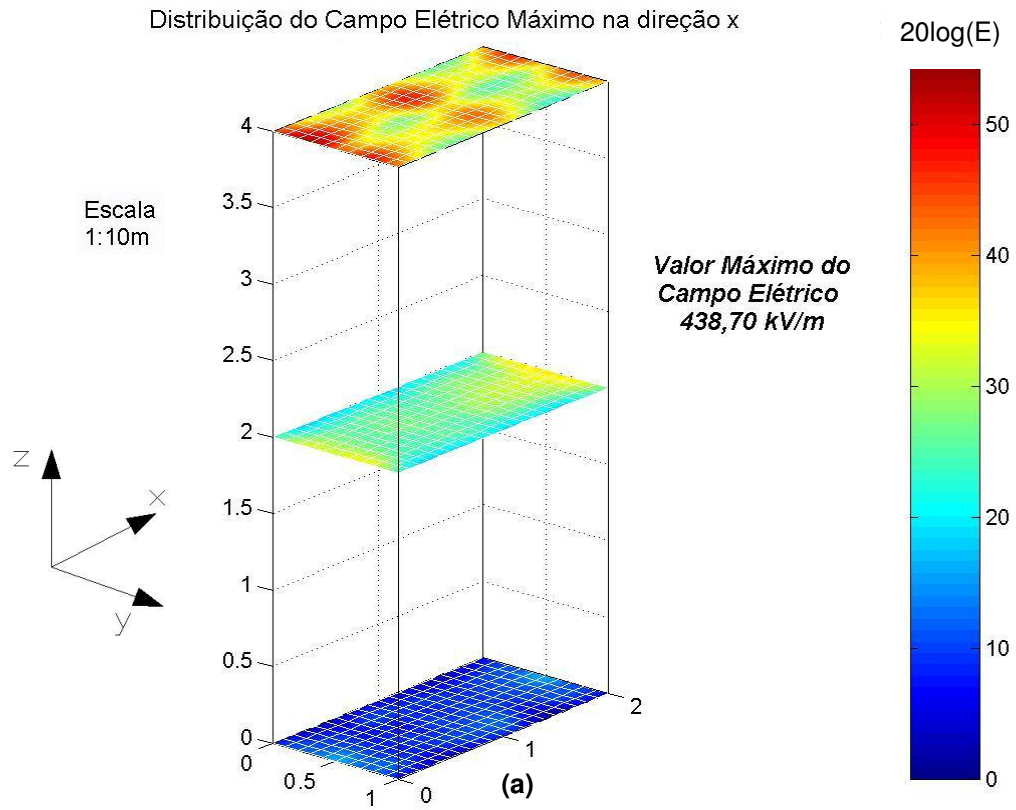


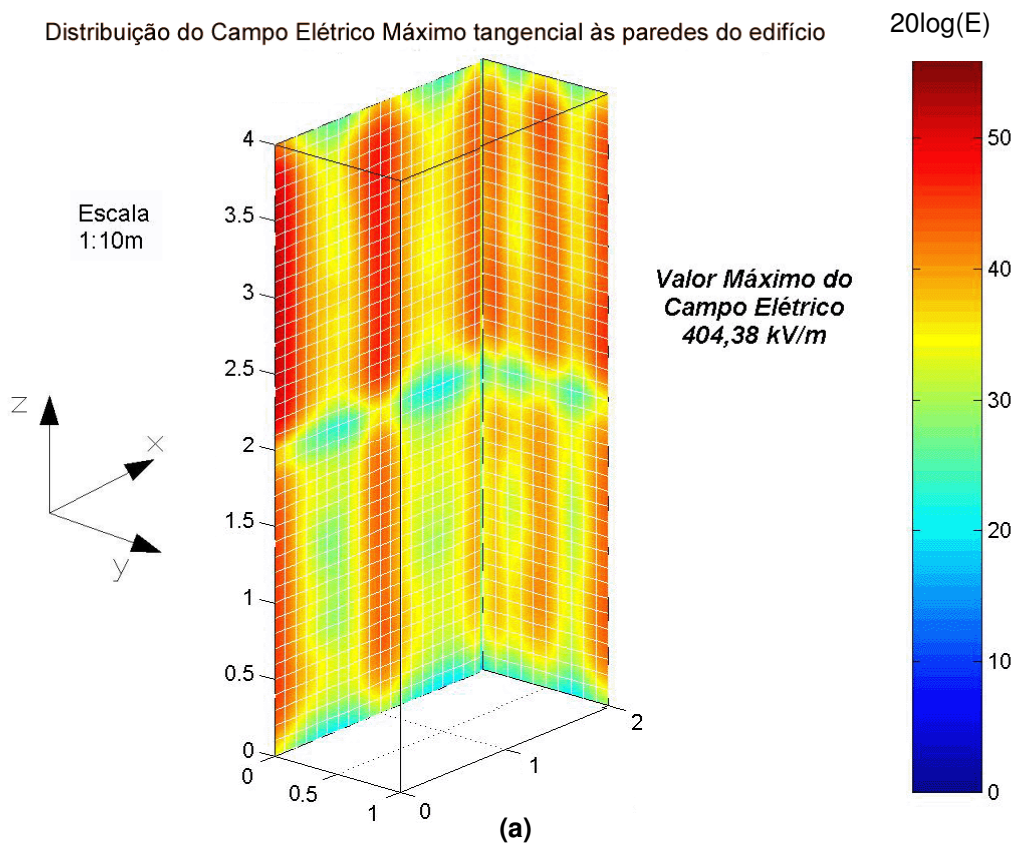
Figura 4.26 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y

Configuração 8:

SPDA com 8 condutores de descida, malha de captação com 4 divisões, anel de equalização de potenciais a 20 m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω .

A figura 4.27a apresenta a distribuição do campo elétrico máximo tangencial às superfícies laterais do edifício, nas direções x e y, e a figura 4.27b a distribuição do campo elétrico máximo na direção z.

As figuras 4.28a e 4.28b apresentam a distribuição do campo elétrico máximo nas direções x e y, respectivamente, para três alturas distintas (topo, meio e base do edifício). Não foi avaliada a distribuição do campo elétrico na direção z.



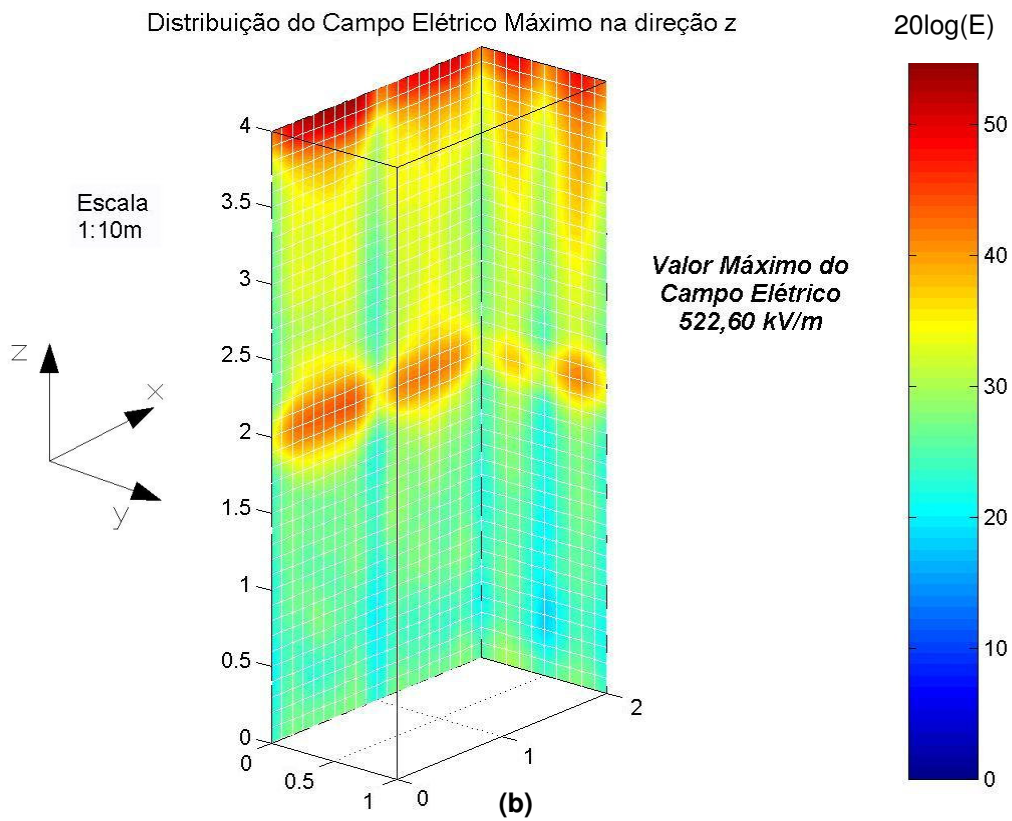
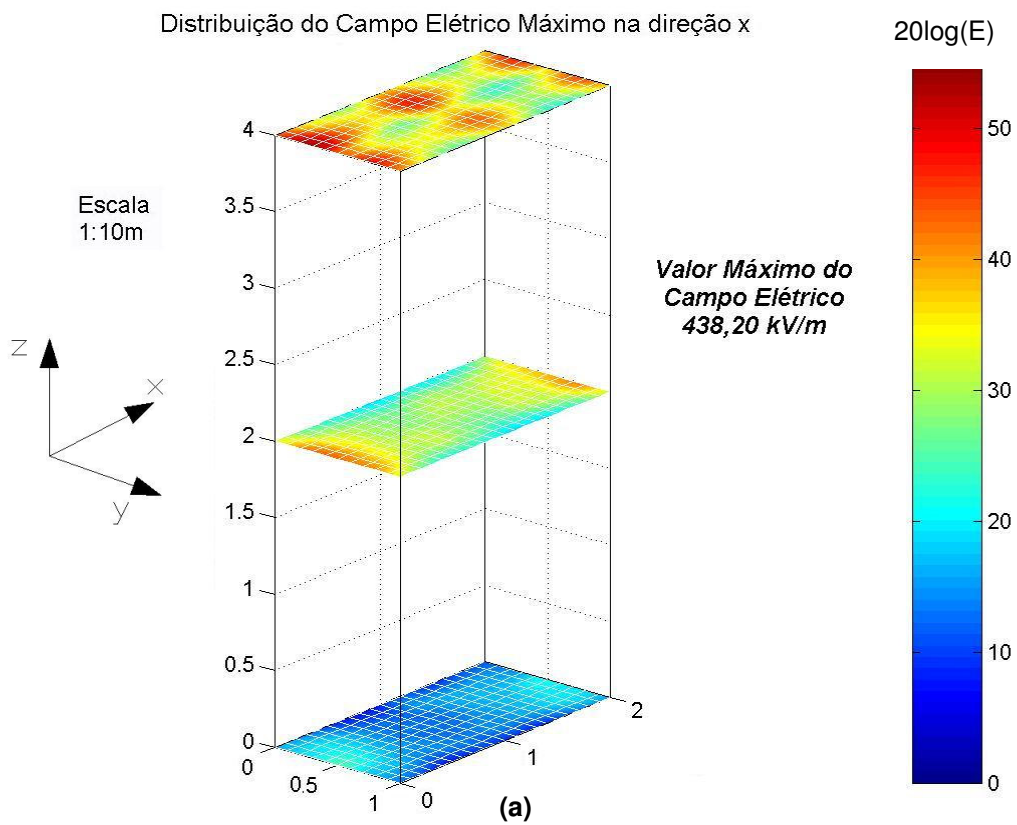
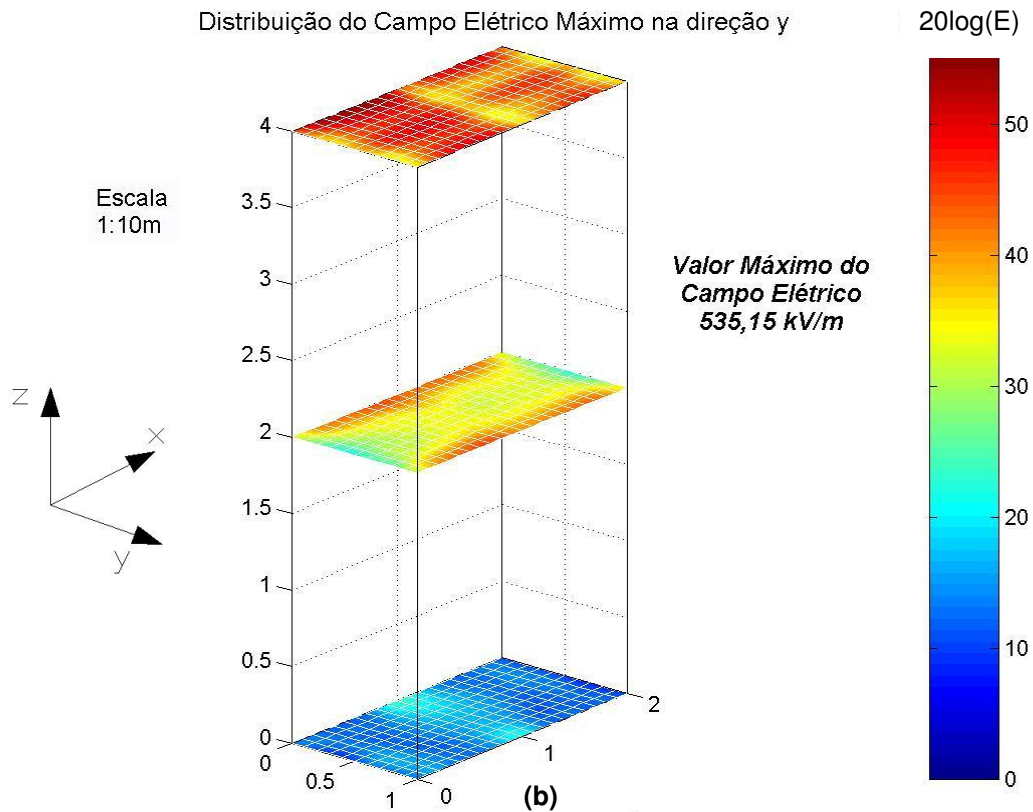


Figura 4.27 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)





**Figura 4.28 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y**

4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos através dos gráficos da distribuição do campo elétrico, figuras 4.13 a 4.28, referentes às configurações 1 a 8 do SPDA, e também com relação às tabelas 4.7 e 4.8 que reúnem os valores máximos do campo elétrico obtidos para as direções x, y e z.

4.7.1 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS

Com o objetivo de facilitar a análise e a visualização da variação da distribuição do campo elétrico em função das diferentes configurações avaliadas do SPDA, foram selecionados os resultados referentes à configuração 1, que é a mais simples de todas as configurações avaliadas, e os resultados das configurações 6 e

7, que representam as configurações mais completas. As figuras 4.29 a 4.30 trazem estes resultados agrupados.

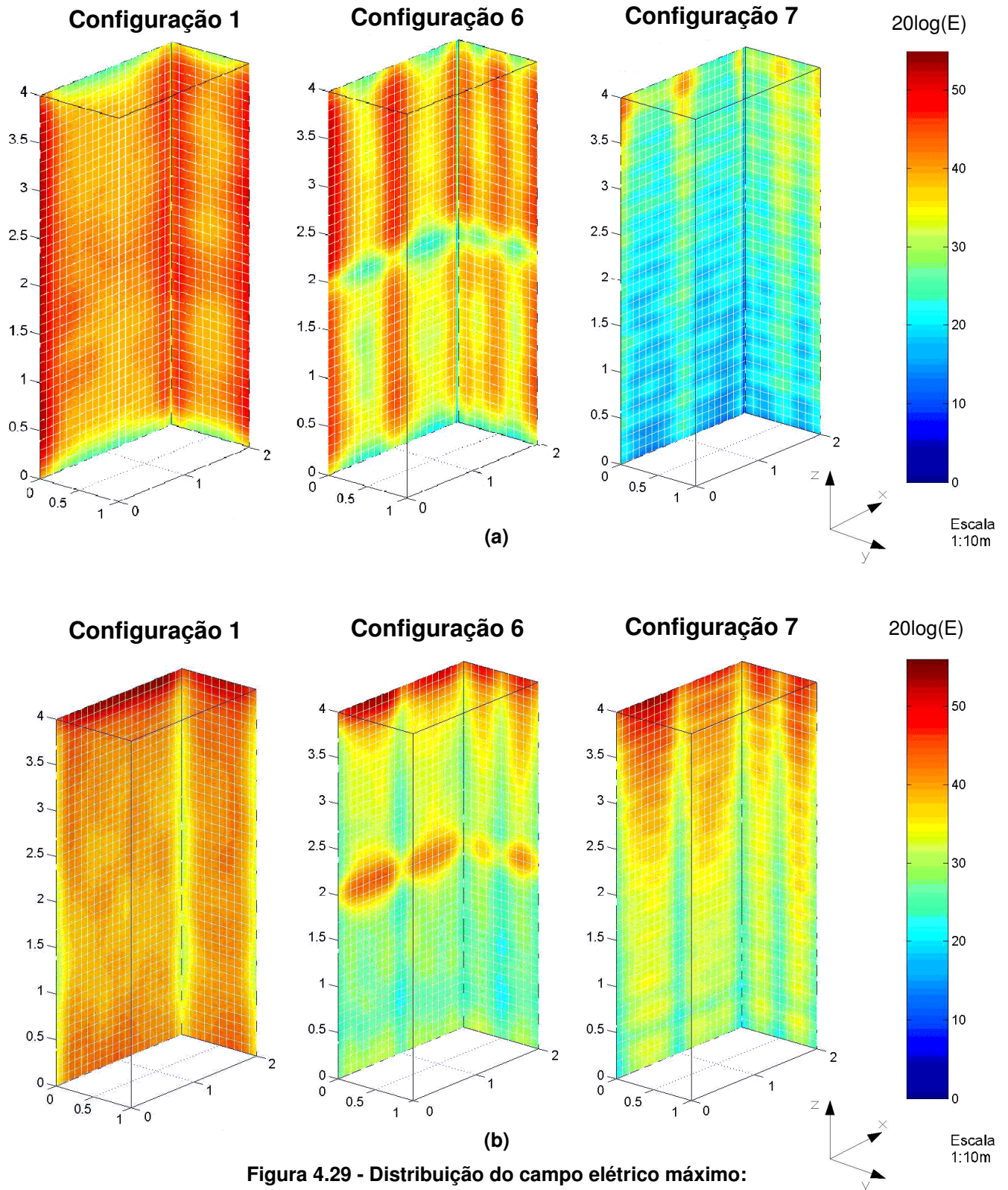
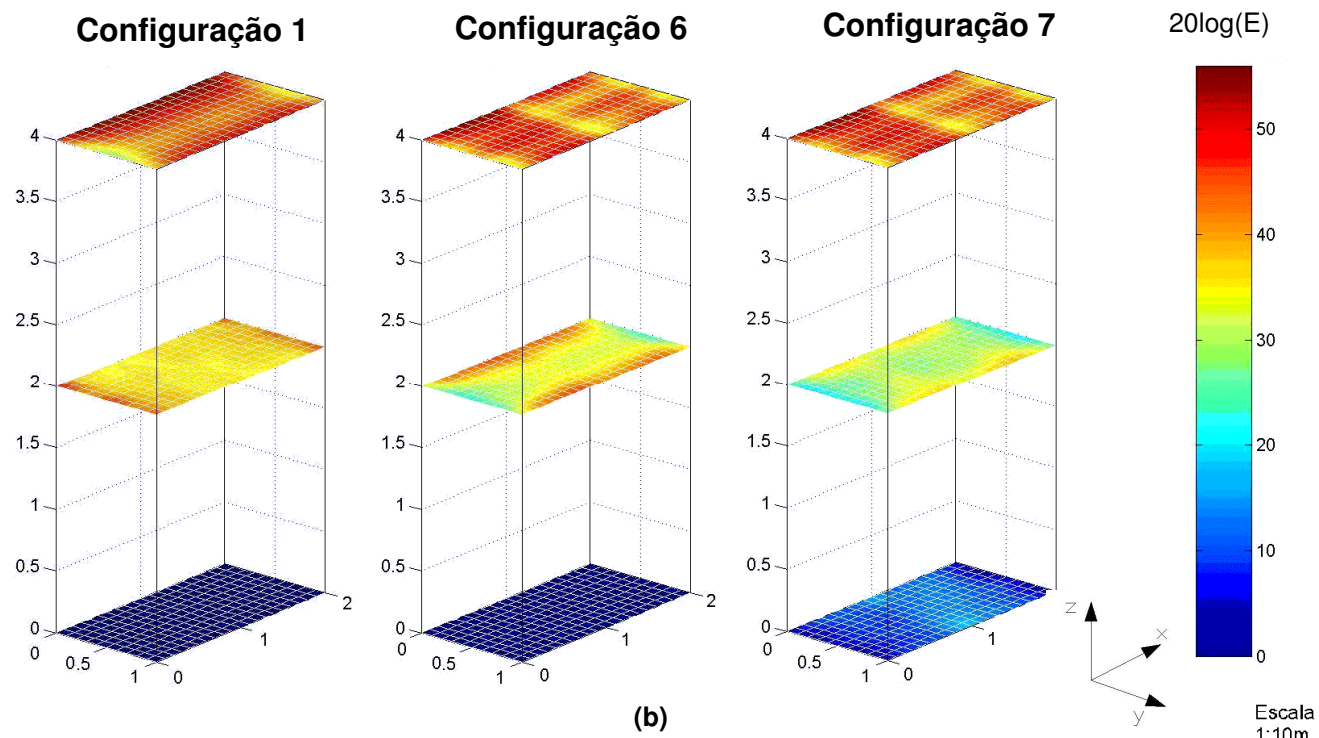
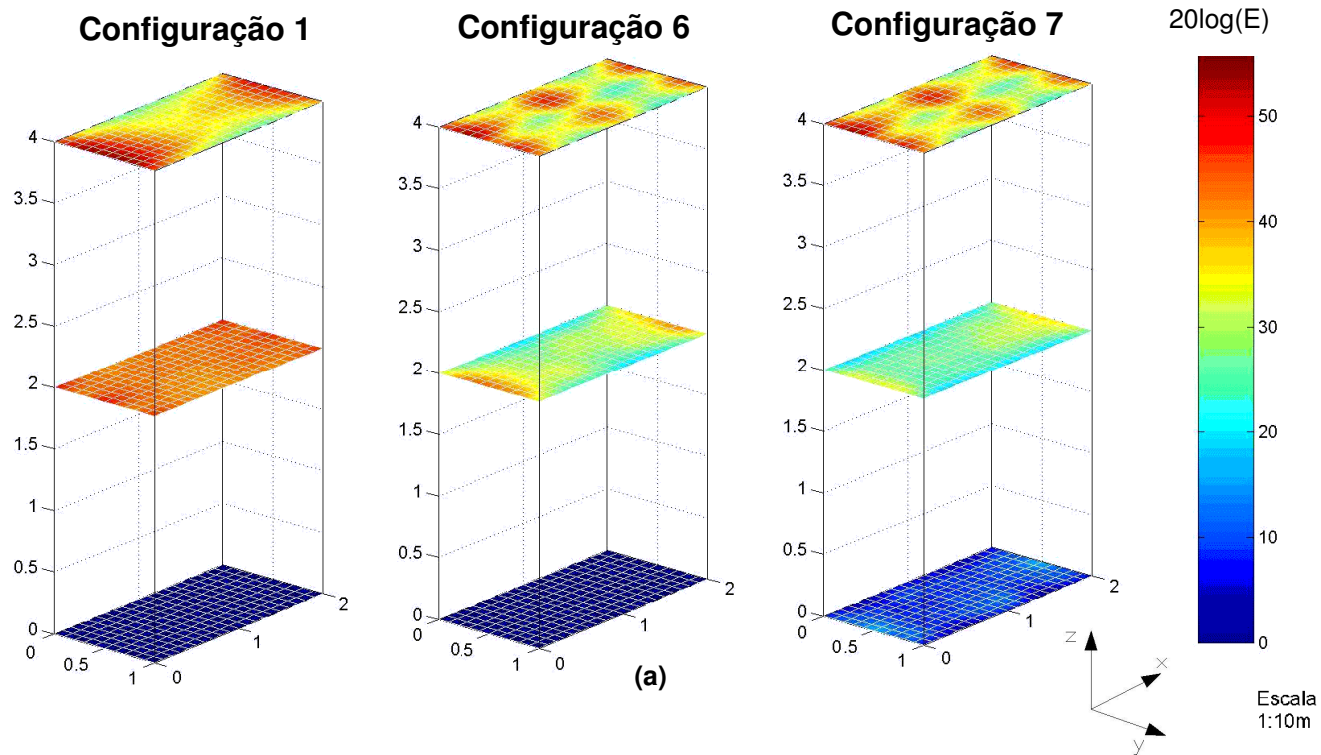


Figura 4.29 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)



**Figura 4.30 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y**

	Ex [kV/m]	Ey [kV/m]	Ez [kV/m]	Obs.:
Configuração 1	456,12	341,01	582,27	Malha simples, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 2	484,67	297,93	524,74	Malha c/ 4 divisões, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 3	477,73	279,84	523,79	Malha simples e, 8 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 4	404,38	187,36	522,60	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 5	405,52	227,72	523,79	Malha simples, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de altura
Configuração 6	404,38	213,44	522,60	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de Altura
Configuração 7	169,12	76,15	510,53	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 2,85m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω
Configuração 8	404,38	213,44	522,60	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida, com anel de equalização de potenciais a 20m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω

Tabela 4.7 - Resultados do campo elétrico máximo nas duas paredes do edifício, para as direções x (Ex), y (Ey) e z (Ez)

	Ex [kV/m]	Ey [kV/m]	Obs.:
Configuração 1	479,37	584,46	Malha simples, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 2	438,43	535,28	Malha c/ 4 divisões, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 3	479,37	545,42	Malha simples e, 8 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 4	438,20	535,15	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 5	479,37	545,42	Malha simples, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de altura
Configuração 6	438,20	535,15	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de altura
Configuração 7	438,70	535,05	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 2,85m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω
Configuração 8	438,20	535,15	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω

Tabela 4.8 - Resultados do campo elétrico máximo nas três alturas do edifício, para as direções x (Ex) e y (Ey)

As tabelas 4.7 e 4.8 mostram que os valores máximos do campo elétrico diminuem quando se altera a geometria do SPDA. Seja através da alteração da malha de captação, de uma configuração simples para uma configuração com 4 divisões, seja através da alteração do número de condutores de descida, de 4 condutores para 8 condutores, ou também através da inclusão dos anéis de equalização de potenciais, a 20 m de altura, ou a cada 2,85 m. Além dos valores máximos, pode-se observar através das figuras 4.13 a 4.28, que mostram a distribuição do campo elétrico, que ocorre uma melhoria nesta distribuição, diminuindo gradativamente as regiões vermelhas, de maior intensidade de campo, e surgindo regiões amarelas, ou até mesmo azuis, a cada melhoria implementada no SPDA. O único caso em que não houve a diminuição do valor máximo do campo elétrico foi na mudança da configuração 1 para a configuração 3, o valor do campo elétrico na direção x, onde houve um pequeno aumento do campo elétrico máximo (E_x).

Estes resultados convergem com as recomendações da norma brasileira NBR 5419 [20], conforme mostrado na tabela 2.1, que determina que para edificações com altura de 40m, nível de proteção 2, deve-se ter uma malha de captação com as dimensões $10 \times 20 \text{ m}^2$, como utilizado na configuração 1. No caso desta mesma edificação ter nível de proteção 1, ou seja, necessitar de uma proteção mais eficiente, a malha de captação deverá ter as divisões com dimensões de $5 \times 10 \text{ m}^2$, como na configuração 2. Com os resultados alcançados, pode-se verificar que de fato ocorre uma diminuição na intensidade e uma distribuição mais homogênea do campo elétrico ao longo do edifício, na medida em que se aumentam as divisões, ou seja, diminuem-se as dimensões da malha de captação do SPDA.

Com relação à equalização de potenciais realizada através de anéis horizontais ao longo da altura do edifício, percebe-se, comparando as figuras das configurações 3 e 5 e das configurações 4 e 6, que esta equalização de potenciais exerce uma forte influência na intensidade máxima do campo elétrico nas paredes do edifício para as direções x e y, entretanto esta influência é praticamente nula em relação aos pavimentos horizontais analisados.

Com relação à análise do aterramento não foi constatada variação significativa entre os resultados obtidos para a configuração 6, que utiliza o solo com

material PEC e a configuração 8, onde o solo é constituído de material condutor com resistência superficial de 50Ω . Assim, não foi possível avaliar de forma satisfatória a influência do subsistema de aterramento, necessitando para isto de uma modelagem mais detalhada.

4.7.2 RESULTADOS PARA UM PULSO COM TEMPOS DE 0,25/2,5 μs

Os resultados apresentados anteriormente, utilizam nas simulações, um pulso de descarga atmosférica com tempos de 8/20 ns, ou seja, mil vezes mais rápido do que uma descarga atmosférica típica, a qual apresenta tempos de subida e descida na ordem de 8/20 μs . Como o objetivo dos resultados é de avaliar o comportamento do campo elétrico no interior da edificação, em relação às diversas configurações do sistema de proteção contra descargas atmosféricas, e não o valor absoluto do campo elétrico, portanto, optou-se em utilizar um pulso mais rápido, como forma de reduzir o tempo de cada simulação. Nesta seção, entretanto, as configurações 1, 6 e 7 são reavaliadas, considerando um pulso de descarga atmosférica com tempos de 0,25/2,5 μs , de forma a se obterem valores de campo elétrico mais próximos da realidade. Os parâmetros adotados para estas simulações são os seguintes:

- Tempo de aplicação da fonte $\rightarrow 5 \mu\text{s}$
- Tempo de simulação $\rightarrow 7,5 \mu\text{s}$
- Passo de simulação $\rightarrow 1 \text{ ns}$
- Resistência linear do material condutor $\rightarrow 10^{-3} \Omega/\text{mm}$
- Resistência superficial do ar $\rightarrow 377 \Omega/\text{mm}^2$
- Resistência superficial do solo $\rightarrow 50 \Omega/\text{mm}^2$
- Parâmetros da corrente do raio, referente às equações 4.1 e 4.2:

$$I_0 = 50 \text{ kA}$$

$$n = 2$$

$$\tau_1 = 0,25 \mu\text{s}$$

$$\tau_2 = 2,5 \mu\text{s}$$

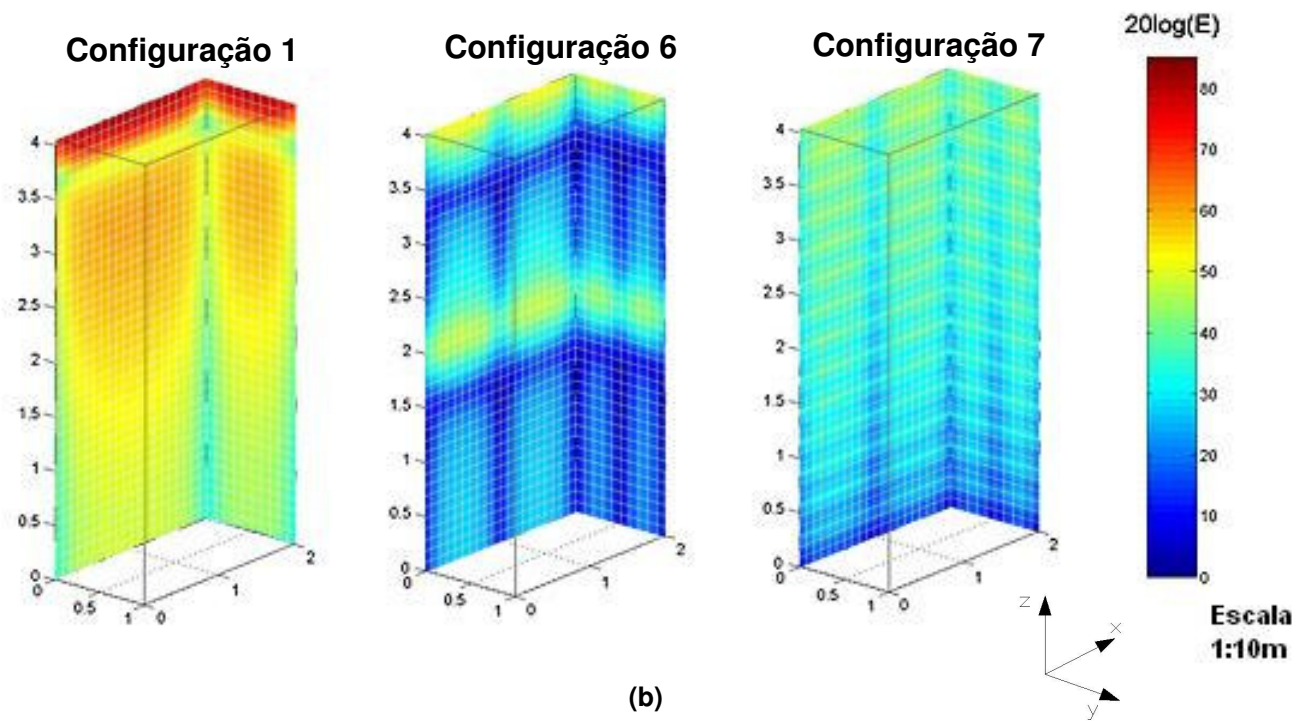
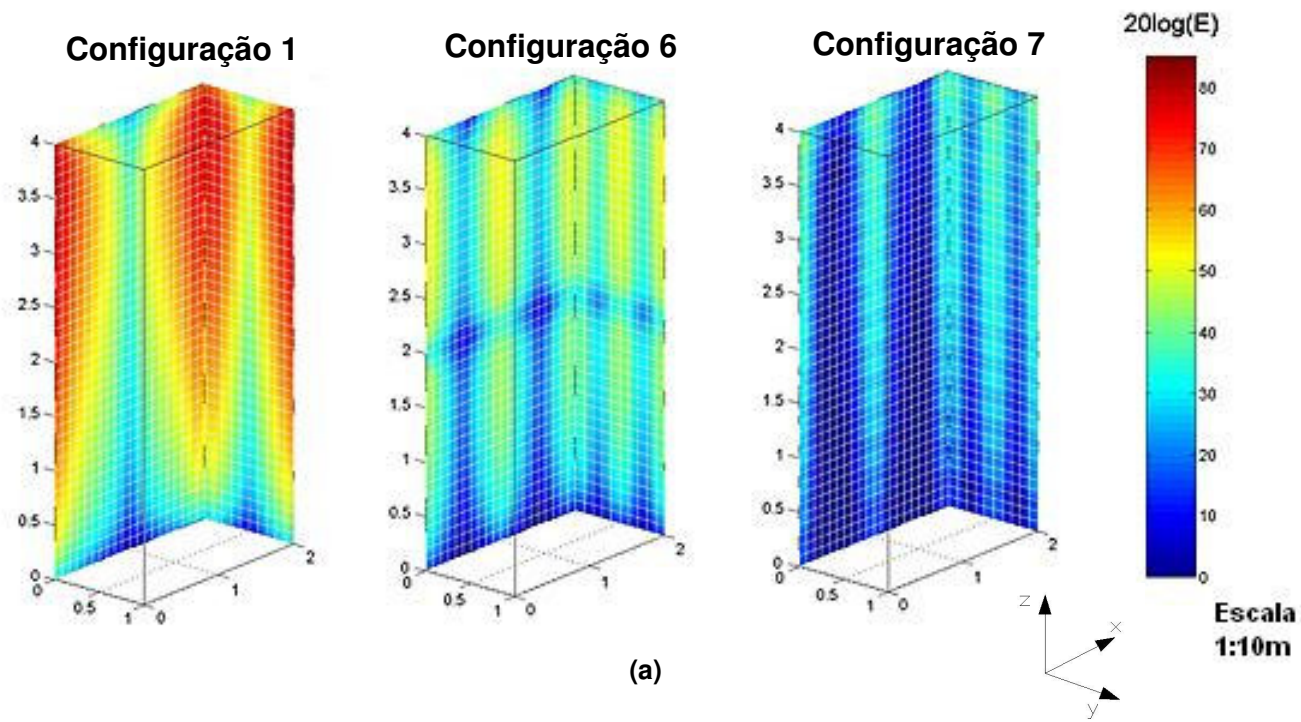


Figura 4.31 - Distribuição do campo elétrico máximo:
 (a) tangencial às paredes na direção horizontal (x e y) e (b) na direção vertical (z)

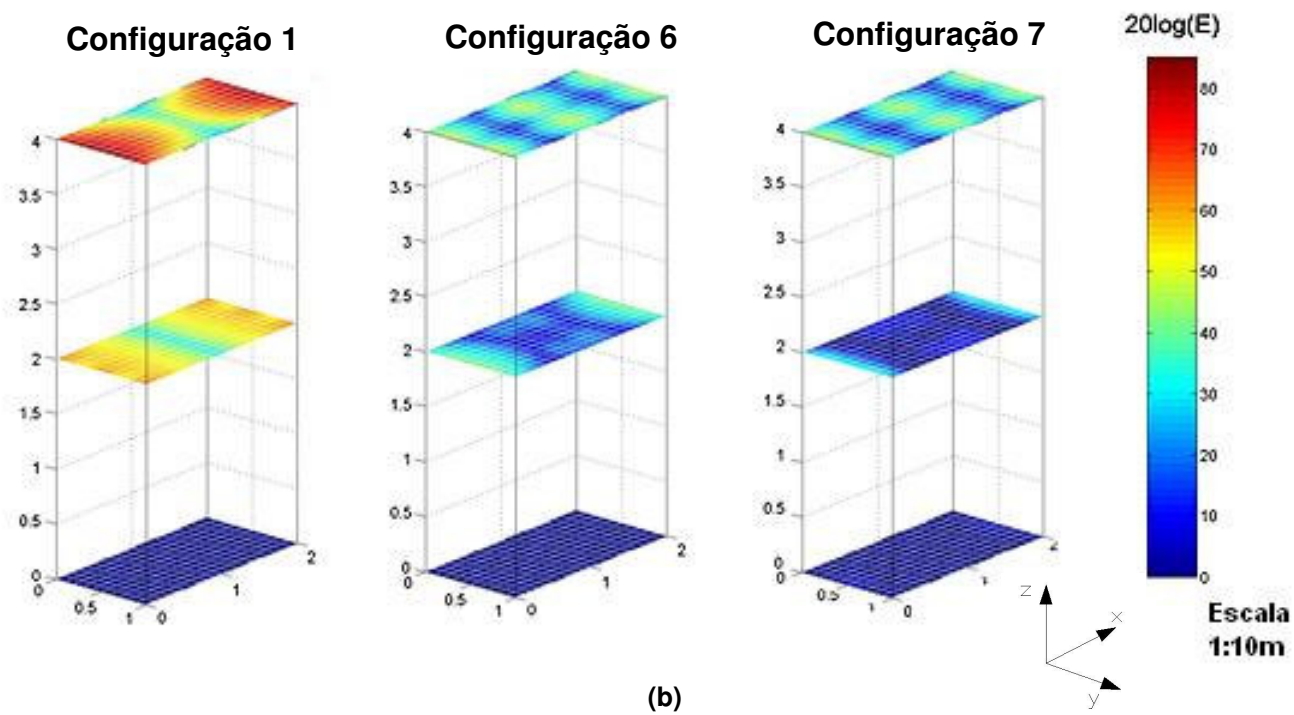
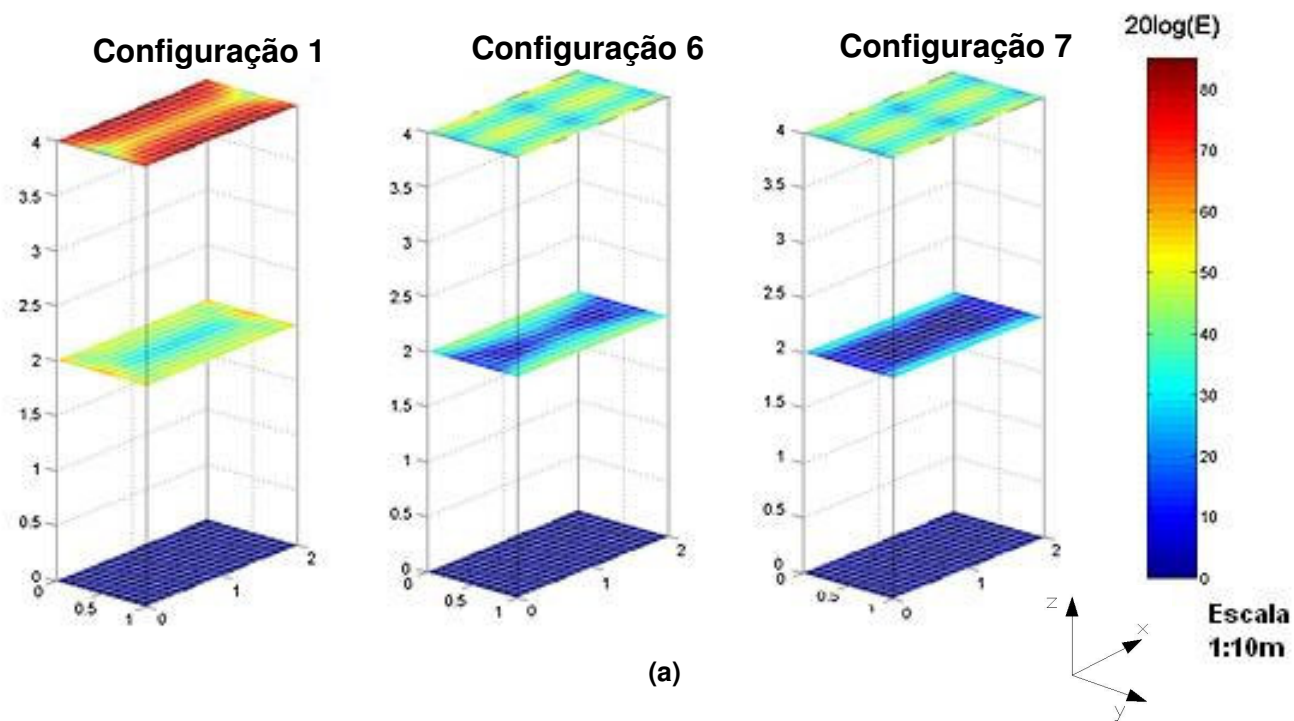


Figura 4.32 - Distribuição do campo elétrico máximo:
(a) na direção x e (b) na direção y

	Ex [kV/m]	Ey [kV/m]	Ez [kV/m]	Obs.:
Configuração 1	9.017,5	8.877	12.228	Malha simples, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 6	476,91	396,55	446,82	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de Altura
Configuração 7	140,64	130,09	256,95	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 2,85m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω

Tabela 4.9 - Resultados do campo elétrico máximo nas duas paredes do edifício, para as direções x (Ex), y (Ey) e z (Ez)

	Ex [kV/m]	Ey [kV/m]	Obs.:
Configuração 1	10.850	13.608	Malha simples, 4 condutores de descida e sem anel de equalização de potenciais
Configuração 6	228,81	304,87	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 20m de altura
Configuração 7	194,77	249,78	Malha c/ 4 divisões, 8 condutores de descida e com anel de equalização de potenciais a 2,85m de altura e solo com resistência superficial de 50Ω

Tabela 4.10 - Resultados do campo elétrico máximo nas três alturas do edifício, para as direções x (Ex) e y (Ey)

Algumas diferenças importantes podem ser verificadas entre os resultados obtidos para as configurações 1, 6 e 7 quando da incidência da descarga atmosférica com forma de onda de 8/20ns e para a descarga com forma de onda de 0,25/2,5 μ s. Inicialmente percebe-se que houve uma elevação significativa nos valores máximos do campo elétrico para a configuração 1, chegando a valores da ordem de MV/m, quando da incidência do pulso de descarga atmosférica com tempos de 0,25/2,5 μ s. Para as configurações 6 e 7, entretanto, os valores máximos do campo elétrico mantiveram-se nos mesmos patamares anteriores, ou seja, com valores da ordem de algumas centenas de kV/m.

Este comportamento mostra que para freqüências mais baixas (pulso mais longo) o campo elétrico reduz-se drasticamente com o aumento da complexidade do SPDA, mas para freqüências mais altas (pulso mais curto) este aumento não é suficiente. Neste caso, a configuração do SPDA deveria ser mais densa para produzir o mesmo efeito observado em baixas freqüências

Estes resultados demonstram que os sistemas de proteção utilizados nas configurações 6 e 7 têm um comportamento ainda mais significativo, no que se refere a reduzir a intensidade do campo elétrico no interior da edificação, quando da incidência de uma descarga atmosférica com tempos de subida e de descida maiores. Os resultados também indicam que as configurações 6 e 7, às quais representam um modelo aproximado para o sistema de proteção contra descargas atmosféricas utilizando-se a estrutura de concreto do edifício como elemento natural do sistema de condutores de descida e do aterramento, pode contribuir no que se refere à proteção contra sobretensões.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Diversas configurações da geometria do SPDA foram avaliadas neste trabalho, sendo que a principal contribuição desta pesquisa está relacionada à melhor compreensão do comportamento do campo eletromagnético em função das diferentes configurações do SPDA. Outro aspecto bastante importante é a influência que cada subsistema do SPDA exerce sobre o comportamento global do sistema de pára-raios. Neste sentido, este trabalho apresenta resultados bastante relevantes e que possibilitam uma melhor compreensão destas influências.

Quanto aos resultados, pôde-se observar que cada subsistema do SPDA, seja o subsistema de captação, subsistema de condutores de descida, subsistema de aterramento ou o subsistema de equalização de potências, exerce uma influência própria sobre o resultado final da distribuição do campo elétrico ao longo do edifício. Isto está explicitado nas figuras 4.13 a 4.28 da seção 4.6, onde se verificou a variação ocorrida na distribuição do campo elétrico em função das características do SPDA.

Com relação ao método FDTD pôde-se constatar que os resultados obtidos apresentaram pouca dependência com relação à altura do canal do raio. Outros fatores bastante importantes, e que se tornam limitantes no desenvolvimento da pesquisa, são o tempo de processamento das simulações computacionais, que se mostrou sempre bastante elevado, e também a memória computacional exigida nos cálculos.

Com relação às divergências entre os resultados obtidos entre o método FDTD e o método MoM, pôde-se constatar que estas divergências foram maiores nas avaliações realizadas em estruturas mais simplificadas.

Alguns aspectos relacionados à modelagem do SPDA foram utilizados de forma simplificada. A espessura dos condutores foi desprezada, ou seja, foram considerados como elementos filamentosos. Portanto, isto se constitui em um fator limitante para a obtenção de resultados mais precisos.

Do ponto de vista da distribuição do campo elétrico, a melhor situação obtida foi através da utilização conjunta de todos os subsistemas do SPDA, ou seja, a configuração que apresentou uma distribuição do campo elétrico, com componentes de intensidades inferiores, é aquela que agrega as melhorias de cada subsistema. Este resultado está mostrado nas figuras 4.25 e 4.26 da configuração 7, na qual o SPDA é formado por uma malha de captação com 4 divisões, 8 condutores de descida, anel de equalização a cada 2,85 m de altura e solo PEC. Esta configuração do SPDA é um modelo aproximado para a situação onde se utilizam as ferragens de concreto armado das vigas e pilares de um edifício como elementos naturais do SPDA. Assim, tendo sido os resultados para esta configuração os melhores dentre todas as configurações testadas, conclui-se que a utilização das ferragens de concreto armado das edificações constitui-se na melhor configuração de um SPDA, ou seja, proporciona uma melhor proteção da estrutura contra descargas atmosféricas, o que está em conformidade com as recomendações das normas de proteção contra descargas atmosféricas vigentes. Este fato fica ainda mais evidente com os resultados obtidos para o pulso de descarga com tempos mais próximos de um raio típico. Isto se constitui em um fato bastante relevante do ponto de vista da construção civil, levando-se em consideração que existe uma oposição muito severa dos Engenheiros Civis responsáveis pelas construções e pelo cálculo estrutural das edificações, em se utilizar as ferragens da estrutura de concreto armado como elemento natural constituinte do SPDA.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com relação a trabalhos futuros, muitos aspectos devem ser abordados no sentido de aprimorar o conhecimento dos sistemas de proteção contra raios. Entre os mais relevantes estão os seguintes:

- Análise detalhada da influência do aterramento sobre o comportamento do SPDA, tanto com relação à geometria do aterramento, como com relação à utilização das fundações das edificações como aterramento

natural, ou seja, aterramento formado por elementos da própria edificação;

- Modelagem mais detalhada da estrutura do edifício, com a utilização das ferragens de concreto armado como elemento constituinte do subsistema de condutores de descida, além da inclusão de outros elementos mais complexos, como as diversas instalações presentes no edifício, sejam as tubulações de água, gás, sistema de distribuição de energia elétrica ou sistema de telecomunicações;
- Avaliação de edificações e estruturas com outras dimensões e com formas geométricas variadas;
- Avaliação para pulsos de descarga atmosférica com tempos de subida e de descida mais próximos das descargas reais, em torno de $8/20 \mu\text{s}$, e considerando as descargas subseqüentes.

REFERÊNCIAS

- [1] Martin A. Uman, "Natural Lightning", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 30, no. 3, pp. 785-790, 1994.
- [2] Martin A. Uman, "Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test Standards" *Proceeding of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1548-1565, December 1998.
- [3] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, Glen R. Hoffman, Michael W. Masters and Marx Brook, "Burst of Pulses in Lightning Electromagnetic Radiation: Observations and Implications for Lightning Test Standards", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, no. 2, pp.156-164, 1996.
- [4] Pritindra Chowdhury, "Parameters of Lightning Strokes and Their Effects on Power Systems", *Transmission and Distribution Conference and Exposition – IEEE/PES*, vol. 2, pp. 1047-1051, 2001.
- [5] V. Shostak, W. Janischewskyj, A. M. Hussein and B. Kordi, "Characteristics of return Stroke Current and Electromagnetic Field Waveforms Observed in Multistroke Lightning flashes to a Tall Tower", *High Voltage Engineering Symposium*, Conference Publication no. 467, pp. 2.389-2.392, 22-27 August 1999.
- [6] Giorgio Baldo, "Lightning Protection and the Physics of Discharge", *High Voltage Engineering Symposium*, Conference Publication no. 467, pp. 2.169-2.176, August 1999.
- [7] Takatoshi Shindo and Yoshinori Aihara, "A Shielding Theory for Upward Lightning", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 318-324, January 1993.
- [8] Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, Mark I. Fernandez, Carlos T. Mata, Keith J. Rambo, Michael V. Stapleton and Rafael R. Sutil, "Direct Lightning Strikes to The Lightning Protective System of a Residential Building: Triggered Lightning

- Experiments”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 575-586, April 2002.
- [9] Marvin E. Morris, Richard J. Fisher, George H. Schnetzer, Kimball O. Merewether and Roy E. Jorgenson“, *IEEE Transactions on Industry Applications*”, vol. 30, no. 3, pp. 791-804, May/June 1994.
- [10] Gerhard Diendorfer, Wolfgang Schulz and V. A. Rakov, “Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Location System”, *IEEE Transactions on Electromagnetics Compatibility*, vol. 40, no. 4, pp. 452-464, November 1998.
- [11] Horácio Torres, Daniel Rondón, Willinam Briceño and Leonardo Barreto, “Lightning Peak Current Estimation Analysis from Field Measurements in Tropical Zones”, *23rd International Conference on Lightning Protection*, vol. 1, pp. 181-185, 23-27 September 1996.
- [12] E. Katz, A. Segev, “The Lightning Position and Tracking System (LPATS), in Israel: First Results”, *18^o Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 3.1.5/5, 1995.
- [13] Serguey A. Fedoseev and Alexander S. Fedoseev, “Tropical Lightning Stroke Data Collected and Analyzed by Computer Based Lightning Detection Station”, *IEEE EMC Symposium*, pp. 845-848, 2001.
- [14] A. P. Sakis Meliopoulos, “Lightning: Safety and Protection”, *The Institution of Electrical Engineers*, Savoy Place, London, UK, 1997.
- [15] A. P. Sakis Meliopoulos and Ron Cooper, “Transmission Line Lightning Performance Based Design”, *IEEE EMC Symposium*, pp. 2898-2903, 2000.
- [16] Alexandre Piantini e Jorge M. Janiszewski, “Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Linhas com Diferentes Configurações”, *II Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão*, Belo Horizonte, Brasil, 1997.

- [17] Thomas A. Short, "Lightning Protection: Analysing Distribution Designs", *IEEE EMC Symposium*, pp. 51-55, April 1992.
- [18] D. E. McDermott and V. J. Longo, "Advanced Computational Method in Lightning Performance – The EPRI Lightning Protection Design Workstation", *IEEE EMC Symposium*, pp. 2425-2430, 2000.
- [19] S. Pustilnick and W. A. Artuzi Jr., "Analysis of the distribution of the electric field in a building struck by lightning", VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 181-184, November 2003.
- [20] **NBR 5419**: "Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas", Fevereiro 2001.
- [21] **IEC 61024-1**: "Protection of Structures Against Lightning - Part 1: General Principles", 1990.
- [22] **IEC 61024-1-1 - Guide A**: "Protection of Structures Against Lightning - Part 1- Section 1: General Principles - Guide A - Selection of Protective Levels for Lightning Protection Systems", 1991.
- [23] **IEC 61024-1-2 - Guide B**: "Protection of Structures Against Lightning - Part 1- Section 2: General Principles - Guide B - Design, Installation, Maintenance and Inspection of Lightning Protection System", 1998.
- [24] **NBR 5410**: "Instalações Elétricas de Baixa Tensão", 1997.
- [25] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media", *IEEE Transactions Antennas Propagation*, vol. AP-14, pp. 302-307, May 1966.
- [26] Allen Taflove and Morris E. Brodwin, "Numerical Solutions of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equation", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-23, no. 8, pp. 623 – 630, August 1975.

- [27] Allen Taflove, Susan C. Hagness, "*Computational electrodynamics : the finite-difference time-domain method – 2nd ed.*", Artech House, Inc., 2000.
- [28] Concettina Buccella, Saverio Cristina and Antonio Orlandi, "Frequency Analysis of the Induced Effects Due to the Lightning Stroke Radiated Electromagnetic Field", *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol. 34, no. 3, pp. 338-344, August 1992.
- [29] Antonio Panicali, "Proteção Interna", *Workshop Internacional de Instalações Elétricas*, pp. 35-52, maio 1999.
- [30] **IEC 1312-1**: "Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse (LEMP) – Part 1: General Principles", 1995.
- [31] R. B. B. Gin and C. A. A. Beneti, "*Cloud-to-ground lightning flash density in the south and southeastern of Brasil: 1999-2001*", VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 10-13, November 2003.
- [32] R. B. B. Gin, C. A. A. Beneti and A. J. P. Filho, "*Cloud-to-ground lightning flashes in the southeastern Brasil in 2001*", VII International Symposium on Lightning Protection, pp. 31-34, November 2003.
- [33] R. H. Golde, "Lightning", Vol. 1 & 2, London, Academic Press Inc, 1977.
- [34] F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic, "Calculation of Lightning Current Parameters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp.399 – 404, April 1999.

ANEXOS

ANEXO A

Gráficos da corrente do raio e seu espectro de freqüências e da corrente e tensão no condutor em análise e seus espectros de freqüências

```
Io    = 50000; %Valor de pico da corrente do raio [A]
Tal1  = 250;  %Constante de tempo de subida [ns]
Tal2  = 2500; %Constante de tempo de descida [ns]
n1    = 2;    %Expoente n
Eta   = exp((-Tal1/Tal2)*(n1*Tal1/Tal2)^(1/n1)); %Fator de correção da amplitude da corrente
do raio
dt    = 1;    %Passo de tempo [ns]
N     = 20000;

for n=1:N
    p(n) = (Io/Eta)*(((n*dt/Tal1)^n1)/(1+(n*dt/Tal1)^n1))*(exp(-n*dt/Tal2));
end

%Plotagem da Corrente do Raio
figure(1)
n=[1:20000];
p1=p/1000;
plot(n,p1)
axis([0 5000 0 40]);
xlabel('Tempo [ns]');
ylabel('Corrente do Raio [kA]');
title('Pulso 0,25/2,5 us');
grid;

%Plotagem do Espectro de Freqüências da Corrente do Raio
p_fft=abs(fft((p),2^16))*dt*10^(-9);
F=[0:(2^16-1)]/dt/(2^16);
figure(2)
```

```

loglog(F,p_fft);
axis([100000 10000000 0.0000001 2]);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Corrente do Raio [A/Hz]');
grid;

%Plotagem da Corrente no Condutor em Analise
figure(3)
load Ez; %Campo Elétrico no condutor em analise em V/mm
n=[1:20000];
Iz=Ez*1000; %Corrente no Condutor [A] = Campo Elétrico [V/mm] / Resistência do Condutor
(10^-3)[ohm/mm]
plot(n,Iz)
axis([0 8000 -4000 4000]);
xlabel('Tempo [ns]');
ylabel('Corrente no Condutor [A]');
grid;

%Plotagem do Espectro de Frequências da Corrente no Condutor em Analise
Iz_fft=abs(fft((Iz),2^16))*1*10^(-9); %FFT * dt (usado no GID)
F=[0:(2^16-1)]/(1*10^(-9))/(2^16);
figure(4)
loglog(F,Iz_fft);
axis([100000 10000000 0.0000001 0.02]);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Corrente no Condutor [A/Hz]');
grid;

%Plotagem da Tensão Induzida na Extremidade do Condutor em Analise
figure(5)
load Ez1; %Campo Elétrico no condutor em analise em V/mm
Vz=Ez1*1000; %Tensão na Extremidade do Condutor [V] = Campo Elétrico [V/mm] *
Comprimento da amostra [mm]
plot(n,Vz)
axis([0 8000 -400000 400000]);

```

```
xlabel('Tempo [ns]');
ylabel('Tensão Entre o Condutor e o Piso [V]');
grid;

%Plotagem do Espectro de Frequências da Tensão na Extremidade do Condutor em Análise
Vz_fft=abs(fft((Vz),2^16))*0.25*10^(-9); %FFT * dt (usado no GID)
F1=[0:(2^16-1)]/(0.25*10^(-9))/(2^16);
figure(6)
loglog(F1,Vz_fft);
axis([100000 10000000 0.00001 0.2]);
xlabel('Frequência [Hz]');
ylabel('Tensão entre o Condutor e o Piso [V/Hz]');
grid;
```

ANEXO B

Distribuição do campo elétrico máximo nasa direções x, y e z

```
vertices = size(s2d,2);
D = zeros(nn2d,4);

for i=1:nn2d
d = P(s2d(i,:),:)-ones(vertices,3)*diag(mean(P(s2d(i,:),:)));
D(i,:) = sqrt(dot(d',d'));
end

total = sparse(1,s2d,1./D,1,nn);
total = total+(total==0);

Ex1 = max(abs(Ex));
Ey1 = max(abs(Ey));
Ez1 = max(abs(Ez));

Exn=sparse(1,s2d,diag(Ex1)*(1./D),1,nn)./total;
Eyn=sparse(1,s2d,diag(Ey1)*(1./D),1,nn)./total;
Ezn=sparse(1,s2d,diag(Ez1)*(1./D),1,nn)./total;

A(1)=0;
A(2)=0;
A(3)=0;

%Gráfico em x
figure(1)
for i=1:size(s2d,1)
    intensity1 = sqrt(abs(full(Exn(s2d(i,:))))).^2);
    intensity2 = sqrt(abs(full(Eyn(s2d(i,:))))).^2);
    intensity3 = sqrt(abs(full(Ezn(s2d(i,:))))).^2);
    if A(1) < max(intensity1)
        A(1)=max(intensity1);
    end
end
```

```

end
if A(2) < max(intensity2)
    A(2)=max(intensity2);
end
if A(3) < max(intensity3)
    A(3)=max(intensity3);
end
patch(P(s2d(i,:),1),P(s2d(i,:),2),P(s2d(i,:),3),20*log10(intensity1),'EdgeColor',[1 1 1]);
end
axis([10000 30000 10000 20000 0 40000]);
B=20*log10(max(A)); %Calcula o valor máximo do campo elétrico (em dB)
colormap(jet)
caxis([0 56])
colorbar;
view(130,20)
grid
title('Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção x - Log');
xlabel('Comprimento x - 20 metros [mm]');
ylabel('Largura y - 10 metros [mm]');
zlabel('Altura z - 40 metros [mm]');
axis equal
box on
legend('dB = 20*log(kV/m)')

%Gráfico em y
figure(2)
for i=1:size(s2d,1)
    intensity2 = sqrt(abs(full(Eyn(s2d(i,:))))).^2);
    patch(P(s2d(i,:),1),P(s2d(i,:),2),P(s2d(i,:),3),20*log10(intensity2),'EdgeColor',[1 1 1]);
end
axis([10000 30000 10000 20000 0 40000]);
colormap(jet)
caxis([0 56])
colorbar('vert');
view(130,20)

```

```

grid
title('Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção y - Log');
xlabel('Comprimento x - 20 metros [mm]');
ylabel('Largura y - 10 metros [mm]');
zlabel('Altura z - 40 metros [mm]');
axis equal
box on
legend('dB = 20*log(kV/m)')

%Gráfico em z
figure(3)
for i=1:size(s2d,1)
    intensity3 = sqrt(abs(full(Ezn(s2d(i,:))))).^2);
    patch(P(s2d(i,:),1),P(s2d(i,:),2),P(s2d(i,:),3),20*log10(intensity3),'EdgeColor',[1 1 1]);
end
axis([10000 30000 10000 20000 0 40000]);
colormap(jet)
caxis([0 56])
colorbar('vert');
view(130,20)
grid
title('Distribuição do Campo Elétrico Máximo na direção z - Log');
xlabel('Comprimento x - 20 metros [mm]');
ylabel('Largura y - 10 metros [mm]');
zlabel('Altura z - 40 metros [mm]');
axis equal
box on
legend('dB = 20*log(kV/m)')

```