MARCOS STEFANELLI VIEIRA

**Influência das edificações na propagação de ondas eletromagnéticas geradas
por descargas atmosféricas**

São Paulo

2016

MARCOS STEFANELLI VIEIRA

**Influência das edificações na propagação de ondas eletromagnéticas geradas
por descargas atmosféricas**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw
Janiszewski

São Paulo
2016

MARCOS STEFANELLI VIEIRA

**Influência das edificações na propagação de ondas eletromagnéticas geradas
por descargas atmosféricas**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw
Janiszewski

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Vieira, Marcos Stefanelli

Influência das edificações na propagação de ondas eletromagnéticas geradas por descargas atmosféricas / M. S. Vieira -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

138 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Descargas Atmosféricas 2.Campos Eletromagnéticos 3.Influência de Edificações 4.Simulação Computacional 5.FDTD - Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho aos meus familiares, pelo apoio incondicional em todos os momentos, e à minha esposa, mãe e meu filho, que além do constante incentivo, deram significado a esta jornada. A eles, devo minha dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a Deus.

Agradeço ao professor Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski pela orientação e apoio encorajador em todos os momentos, numa combinação elegante e estratégica de paciência, perseverança, seriedade e comprometimento.

Agradeço à meu pai pelo exemplo de vida (em memória) e à minha mãe, esposa e filho, que de diferentes maneiras me incentivaram em todos os momentos, dando sentido a esta caminhada.

Agradeço aos meus irmãos pelo exemplo de vida e dedicação, além do apoio incondicional em muitos momentos.

Agradeço o professor Dr. Marcelo Bender Perotoni da UFABC, pelo incentivo e apoio desde o início deste trabalho.

Agradeço a Universidade Presbiteriana Mackenzie, em nome do grupo da secretaria da Escola de Engenharia, pelo apoio em muitos momentos deste trabalho.

Agradeço a Ana Maria de Castro Badiali, bibliotecária da EPUSP, pela atenção e ajuda concedida para a padronização deste trabalho.

RESUMO

Descargas atmosféricas representam uma das principais causas de interrupção no fornecimento de energia para os consumidores, e embora tenham efeitos mais intensos quando incidem diretamente nas redes elétricas, é o caso das descargas indiretas que chama mais atenção, já que elas ocorrem com maior frequência. Tanto as primeiras descargas que geralmente ocorrem com maior intensidade de corrente, quanto as descargas subsequentes que têm menor tempo de frente associado, irradiam campos eletromagnéticos que ao se acoplarem com as redes elétricas geram surtos que podem causar tanto a interrupção do fornecimento de energia quanto danos a equipamentos. A presença de edifícios na região de incidência da descarga atmosférica afeta a propagação das ondas irradiadas, criando diferentes padrões de campos resultantes, os quais são responsáveis por sobreensões induzidas. Embora tanto a descarga atmosférica em si quanto a caracterização do ambiente ao seu redor sejam de natureza complexa para sua representação, ferramentas computacionais bem estruturadas podem representar o fenômeno de forma satisfatória, como é o caso da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo. O presente trabalho apresenta dois estudos para verificação da influência de edificações na propagação de campo irradiado por descargas atmosféricas. O primeiro estudo avaliou o comportamento das componentes do campo elétrico e do campo magnético irradiados, comparando resultados obtidos com e sem a presença de edificações numa pequena região. Tanto os parâmetros geométricos dos três edifícios considerados neste estudo, como a permissividade e a condutividade elétrica do solo e dos edifícios, foram variados para identificar a sua influência nos campos irradiados. Os resultados mostraram diferentes comportamentos das componentes dos campos resultantes em função da variação desses parâmetros, observando-se inversão de polaridade, oscilações na forma de onda e tanto redução quanto aumento do valor de campo. O segundo estudo avaliou um caso mais geral em que a componente vertical de campo elétrico foi tomada em nove pontos diferentes de uma região tipicamente urbana, com a presença de 102 edifícios. Os valores de campo avaliados em cada ponto, dez metros acima do solo, consideraram a incidência aleatória de 28 descargas atmosféricas distintas, cada uma atingindo o topo de um dado edifício. Os resultados desse segundo estudo mostraram que exceto nos casos em que a descarga atmosférica ocorre próximo do

ponto analisado, há reduções significativas do campo elétrico vertical. Desta forma é possível perceber que não apenas a existência de edifícios, mas a sua concentração com diferentes características elétricas e geométricas, podem influenciar significativamente a propagação de campo irradiado. Os valores calculados a partir da ferramenta desenvolvida podem ser usados em conjunto com modelos de acoplamento, para o cálculo de sobretensões induzidas em redes elétricas, em situações realistas com configurações mais complexas.

Palavras-Chave: Descargas atmosféricas. Parâmetros elétricos de edifícios. Propagação de campos eletromagnéticos. Simulação computacional. Método numérico FDTD 3D. Áreas urbanas.

ABSTRACT

Atmospheric discharges represent one of the main causes of interruption in power supply to consumers, and although they have more intense effects when direct impact on energy lines, are the case of indirect discharges that draws more attention, since they occur more frequently. Both the first discharges, occurring generally with greater intensity of current, as subsequent discharges that have shorter front time associated, radiate electromagnetic fields which engage with the electrical networks generating surges that can cause so much disruption of power supply as damage to the equipment. The presence of buildings in the lightning incident area affects the propagation of the radiated waves, creating different patterns of resultant fields, which are responsible for induced overvoltages. Although both the lightning itself and characterization of the surrounding environment are of a complex nature for its representation, structured computational tools can represent satisfactorily the phenomenon, such as the software tool developed here using the finite difference time domain method. This work presents two studies to verify the influence of buildings in the propagation of lightning irradiated field. The first study assessed the behavior of the components of the electric field and magnetic field irradiated, by comparing results obtained with and without the presence of buildings in a small region. Both the geometric parameters of the three buildings considered in this study, as the permittivity and electrical conductivity of the soil and buildings, were changed to identify their influence on radiated fields. The results showed different behaviors of the components of the resulting field due to the variation of these parameters, observing polarity inversion, oscillations in the waveform and either a reduction or increase of the field value. The second study evaluated a more general case where the vertical component of the electric field was taken at nine different points of a typical urban area, in the presence of 102 buildings. The field values evaluated at each point, ten meters above the ground, considered the effect of 28 different random lightning, which hit the top of a given building.

The results of this second study showed that except in cases where atmospheric discharge occurs near the analyzed point, there are significant reductions of the vertical electric field. Thus it can be seen that not only the existence of buildings, but its concentration with different electrical and geometrical characteristics, can significantly influence the propagation of irradiated field. The values calculated from

the developed tool can be used in conjunction with coupling models for calculating induced overvoltages on power lines, in realistic situations with complex configurations.

Keywords: Atmospheric discharges. Electrical parameters of buildings. Propagation of electromagnetic fields. Computer simulation. 3D FDTD numerical method. Urban areas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Dispersão da velocidade em função da definição da grade em pontos por comprimento.....	39
Figura 2 - Cubo de Yee	40
Figura 3 - Exemplo 1D - Algoritmo de Yee	42
Figura 4 - Alteração da disposição matricial dos campos na nova representação (a) Disposição dos campos conforme literatura, (b)-(d) Redistribuição dos campos pela nova representação proposta.....	46
Figura 5 - Discretização espacial no plano YZ para cálculo do campo elétrico E_x ...	49
Figura 6 - Lógica computacional para cálculo das constantes em função da discretização	50
Figura 7 - Representação da descarga subsequente.....	54
Figura 8 - Primeira configuração para estudo do efeito de edificações.....	57
Figura 9 - Valores de pico de E_z nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC	61
Figura 10 - Vetor campo elétrico visto em elevação, no plano xz passando pelos pontos P2, P3 e P4. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC.....	63
Figura 11 - Valores de pico de E_x nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC	64
Figura 12 - Vetor campo elétrico em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios PEC com altura 45 m, solo PEC	66
Figura 13 - Valores de pico de E_y nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC	69
Figura 14 - Vetor campo elétrico em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC	70
Figura 15 - Valores de pico de H_x nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC	71
Figura 16 - Vetor campo magnético em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios PEC com altura 45 m, solo PEC.	73

Figura 17 - Vetor campo magnético em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC.	73
Figura 18 - Valores de pico de H_y nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC	75
Figura 19 - Região de Moema - Cidade de São Paulo.....	76
Figura 20 - Segunda configuração para estudo do efeito global de edificações	77
Figura 21 - Formas de onda do Campo Elétrico nos pontos P1-L2 a P5-L2 - DA incidente em E15.....	83
Figura 22 - Valores relativos de campo elétrico vertical na linha L1 (Situação com/sem edifícios)	83
Figura 23 - Valores relativos de campo elétrico vertical na linha L2 (Situação com/sem edifícios)	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Valores de condutividade e permissividade relativa do solo e as referências correspondentes.....	52
Quadro 2 -	Valores de condutividade e permissividade relativa do solo usados nas simulações	52
Quadro 3 -	Valores de condutividade e permissividade relativa do concreto e correspondentes referências.....	53
Quadro 4 -	Valores de condutividade e permissividade relativa do concreto usados nas simulações	53
Quadro 5 -	Parâmetros para caracterização da DA ao longo do canal e referências correspondentes	55
Quadro 6 -	Parâmetros usados nas simulações.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores relativos Ez com edif./ Ez sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC	60
Tabela 2 -	Valores relativos Ex com edif./ Ex sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC	65
Tabela 3 -	Valores relativos Ey com edif./ Ey sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC	67
Tabela 4 -	Valores relativos Hx com edif./ Hx sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC	72
Tabela 5 -	Valores relativos Hy com edif./ Hy sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC	74
Tabela 6 -	Permissividade relativa e condutividade elétrica do solo e dos edifícios	78
Tabela 7 -	Valores de campo elétrico vertical - DA incidente nos edifícios E3 ao E63.....	80
Tabela 8 -	Valores de campo elétrico vertical - DA incidente nos edifícios E69 ao E125.....	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	O FENÔMENO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
2.2	MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DO CANAL DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	25
2.3	CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	26
2.4	TENSÕES INDUZIDAS A PARTIR DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS IRRADIADOS	28
2.5	INFLUÊNCIA DAS EDIFICAÇÕES NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS.....	30
2.6	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DE CAMPOS IRRADIADOS	31
2.7	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS.....	32
3	METODOLOGIA APLICADA	35
3.1	MÉTODO FDTD	35
3.2	CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	37
3.3	MÉTODO DE YEE.....	40
3.3.1	Aplicação do Método de Yee no trabalho proposto	40
3.4	TÉCNICAS ALTERNATIVAS NO MÉTODO FDTD - MELHORA NO PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL.....	44
3.4.1	Uso de "subgridding" para otimização de processamento	47
3.5	DEFINIÇÃO DOS VALORES DE PERMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE DOS MATERIAIS DOS EDIFÍCIOS E DO SOLO	51

3.5.1	Permissividade e condutividade do solo	51
3.5.2	Permissividade e condutividade dos edifícios	52
3.6	DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA DESCARGA ATMOSFÉRICA (D.A.)	54
3.7	VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	56
4	EFEITOS DOS EDIFÍCIOS - CONFIGURAÇÃO BÁSICA	57
4.1	CONFIGURAÇÃO ADOTADA	57
4.2	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO - CONFIGURAÇÃO BÁSICA	59
4.2.1	Campo elétrico vertical- E_z	60
4.2.2	Campo elétrico horizontal – E_x	63
4.2.3	Campo elétrico horizontal – E_y	67
4.2.4	Campo magnético horizontal – H_x	70
4.2.5	Campo magnético horizontal – H_y	74
5	ANÁLISE DE EFEITO GLOBAL DOS EDIFÍCIOS - REGIÃO URBANA TÍPICA	76
5.1	CONFIGURAÇÃO ADOTADA	76
5.2	RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO - CONFIGURAÇÃO GLOBAL ...	79
6	CONCLUSÃO E PROPOSTA DE ESTUDOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS.....	94
	APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PROPOSTO	104
	APÊNDICE B - FORMAS DE ONDA DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO - CONFIGURAÇÃO BÁSICA	108
	APÊNDICE C - FORMAS DE ONDA DE CAMPO ELÉTRICO VERTICAL - CONFIGURAÇÃO GLOBAL - REGIÃO URBANA TÍPICA	124

1 INTRODUÇÃO

Descargas atmosféricas (D.A.s) são grandes responsáveis por distúrbios em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. Isto acontece quando as descargas incidem diretamente nessas redes, causando elevadas sobretensões pela injeção de corrente elétrica intensa da ordem de dezenas de kiloampères, ou quando incidem no solo ou em estruturas elevadas nas vizinhanças, provocando tensões induzidas que também podem causar tanto danos em equipamentos como a interrupção do fornecimento de energia.

De modo a reduzir estes efeitos indesejados gerados pelas descargas atmosféricas, as redes de transmissão e distribuição de energia são projetadas com sistemas de proteção dimensionados a partir da densidade de raios que incidem na região, além das características da própria rede elétrica. Neste caso é importante considerar da forma mais realista possível as formas de onda da corrente da descarga atmosférica tanto na base quanto ao longo do canal, devendo-se respeitar, por exemplo, os tempos de frente e de decaimento do sinal assim como suas magnitudes típicas associadas, além da velocidade de propagação e fator de atenuação da corrente ao longo do canal. Ressalta-se também a importância em considerar as características do meio ao redor do ponto de incidência da descarga atmosférica e das linhas elétricas.

Adicionalmente, para efeito de cálculo das tensões induzidas, deve-se considerar que as ondas eletromagnéticas oriundas da descarga atmosférica nem sempre encontrarão espaço livre entre seu ponto de ocorrência e a rede elétrica em si.

Diferentes estudos já foram realizados a respeito das sobretensões induzidas em redes elétricas resultantes de descargas atmosféricas, seja por simulação computacional considerando sistemas simples como indicado por exemplo em Nucci et al. (1995), seja de forma experimental em sistemas reais como mostra Yokoyama, Miyake, Mitani (1983) ou em escala reduzida de acordo com Piantini e Janiszewski (2009).

Outros estudos foram desenvolvidos a partir de expressões matemáticas para cálculo de campos irradiados por descargas atmosféricas e tensões induzidas em linhas elétricas, sobre solos condutores perfeitos ou com perdas, sendo eles (Javor, 2010; Shoory et al., 2005; Rubinstein e Uman, 1989).

Sabe-se, no entanto, que nem todas as regiões por onde passam as linhas de transmissão ou distribuição de energia elétrica são totalmente livres de obstáculos. No caso das redes urbanas de distribuição é comum constatar em seu entorno tanto a presença de vegetação quanto principalmente a existência de pequenas e grandes edificações.

O interesse pelo estudo desses fenômenos surge, portanto, da necessidade de se conhecer a propagação dos campos eletromagnéticos em diferentes ambientes, abrindo uma nova frente de pesquisa uma vez que os campos determinados nestas condições poderão ser usados para uma avaliação mais realista das tensões induzidas.

Problemas envolvendo campos eletromagnéticos têm solução analítica viável em casos de configurações simples, em geral com algum grau de simetria, e o uso de métodos numéricos é indicado para solução de configurações mais complexas conforme indicam (Balanis, 1989, p. 671; Sadiku, 2000, p.660).

Para situações complexas, como é o caso dos efeitos das descargas atmosféricas Uman e Krider (1982), a solução teórico-analítica torna-se impraticável, sendo então recomendada a solução por simulação computacional.

Essa abordagem computacional permite considerar situações bem realistas em que a geometria não é trivial e o meio não é homogêneo como indicado em (Shu-chen, 2007; Gedney, 2011). Assim, vários métodos podem ser utilizados, tais como o das Diferenças Finitas segundo Sadiku (2004), dos Elementos Finitos apresentado em Jin (2002) e dos Momentos conforme Harrington (1968), entre outros.

Existem também ferramentas computacionais comerciais, como, por exemplo, o Comsol (2015) e o CST (2015), dentre outros, os quais podem auxiliar mesmo com certas restrições na validação da ferramenta a ser desenvolvida em Matlab nesta pesquisa, baseada no método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD).

Embora soluções numéricas possam ser obtidas tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, ao tratar de problemas com comportamento transitório (como é o caso das descargas atmosféricas) a análise no domínio da frequência é realizada com base na técnica da transformada de Fourier, compondo a solução obtida em diversas frequências do espectro do sinal transitório. Tal procedimento peca, quanto à precisão na resposta, pelo fenômeno de Gibbs (FIGUEIREDO, 1997, p.93). Assim, no caso de campos transitórios, é mais interessante obter a solução no domínio do tempo.

No entanto, é necessário que as simulações estejam baseadas em modelos matemáticos e valores de parâmetros que possam da maneira mais próxima possível representarem tanto a forma de onda da corrente elétrica associada às descargas quanto a propagação das ondas eletromagnéticas por elas irradiadas. Além disso, deve-se levar em conta, em cada caso, as características do ambiente a ser avaliado, tais como a condutividade do solo conforme indicado por (Jiménez e Mejía, 2013; Silveira et al., 2009), a posição das linhas elétricas em relação ao ponto de incidência das D.A.s conforme mostra Shoory et al. (2005), a existência de edificações, sob diferentes configurações, como mostra (Vieira e Janiszewski, 2014; Vieira e Janiszewski, 2015), e características da própria descarga atmosférica como indicado em (Bonyadi-Ram et al., 2008; Baba e Rakov, 2007).

Neste trabalho as influências desses diferentes parâmetros serão analisadas por meio de simulações a serem desenvolvidas em diferentes cenários, com variação dos parâmetros de forma isolada e em conjunto, onde uma análise dos resultados contribuirá para uma melhor compreensão do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados pelas D.A.s.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo analisar as configurações de campos eletromagnéticos (CEM) gerados por descargas atmosféricas (e responsáveis por sobretensões induzidas em redes elétricas) em regiões onde há a presença de edificações, já que estes campos podem assumir diferentes valores de pico e formas de onda em função do cenário avaliado.

Dado que o fenômeno é muito complexo para ser estudado de forma analítica devido à extensão da região considerada e à complexidade das condições de contorno a serem impostas, a análise das configurações de CEM irradiados por descargas atmosféricas em diferentes situações é realizada por meio de uma ferramenta computacional especialmente desenvolvida, permitindo variar parâmetros de interesse, tais como as características do solo, dos edifícios e da descarga atmosférica.

É parte integrante do objetivo deste trabalho avaliar a influência da condutividade e permissividade dos edifícios e do solo, além das dimensões e posicionamento dos

edifícios em relação ao ponto de incidência da descarga atmosférica (D.A.) e à linha elétrica.

Adicionalmente, regiões tipicamente urbanas serão consideradas nas simulações, diferenciadas pela concentração e altura média das edificações existentes. Essas simulações adicionais têm como objetivo verificar se os campos eletromagnéticos irradiados seguem algum padrão de comportamento, para cada tipo de região considerada.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os efeitos dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas em redes elétricas têm sido extensivamente estudados, seja por medidas em sistemas reais, seja a partir de modelos em escala reduzida, ou ainda por simulações computacionais de tensões induzidas nas linhas de distribuição, com ou sem proteção.

Por outro lado, poucos estudos estão disponíveis considerando a presença de edificações próximas às linhas de energia elétrica, as quais por sua vez podem alterar significativamente a composição de campo eletromagnético resultante, em função das diferentes situações e parâmetros em que forem analisadas.

Os poucos estudos disponíveis (Piantini et al., 2007; Borghetti et al., 2013) consideram tanto o solo quanto os edifícios como condutores elétricos perfeitos.

Neste contexto, torna-se relevante desenvolver estudos mais completos do comportamento dos CEM gerados por descargas atmosféricas em diferentes situações. Essas análises podem ser feitas a partir de ambientes de simulação mais realistas, que permitam avaliar a influência dos edifícios e do solo, com a alteração dos seus parâmetros tanto físicos quanto geométricos. Alguns estudos recentes mostram que solo com perdas e edifícios com diferentes dimensões e características elétricas influenciam a configuração de campo eletromagnético irradiado, mais acentuadamente nas componentes horizontais segundo (Vieira e Janiszewski, 2015; Vieira e Janiszewski, 2014), afetando as tensões induzidas avaliadas em (Rubinstein, 1996; Rachidi et al., 1996; Romero, Piantini, Cooray, 2014).

Justifica-se assim este trabalho, que visa contribuir para o tema em referência, tornando disponível um software para simulação de CEM (campos eletromagnéticos) originados por descargas atmosféricas, com possibilidade de caracterizar por meio

de diferentes parâmetros tanto as D.A.s quanto a região de simulação. Diferentes permissividades e condutividades tanto para o solo quanto para os edifícios podem ser consideradas, podendo as edificações serem representadas com diferentes dimensões e geometrias e em diferentes posições em relação ao ponto de incidência da descarga atmosférica e às linhas de energia elétrica.

A discussão dos resultados de simulações irá contribuir para a avaliação da influência particular de cada parâmetro em situações típicas. Além disso, a simulação de situações em que conjuntos de edifícios são considerados, num cenário tipicamente urbano, permitirá uma avaliação qualitativa do comportamento mais global dos campos gerados pelas D.A.s.

O tema proposto é interessante uma vez que está ligado à área de compatibilidade eletromagnética, em particular no aspecto de qualidade da energia entregue para os consumidores (IEEE, 2011).

Vale ressaltar que os campos assim determinados podem ser posteriormente introduzidos em modelos de acoplamento já conhecidos, tais como o de Agrawal, indicado em Nucci et al. (1995) e o modelo Rusck estendido (ERM) como mostra Piantini e Janiszewski (2009), visando o cálculo das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas nas redes de distribuição urbanas, considerando-se situações mais realistas como mostra (Borghetti et al., 2013; Piantini, 2008).

Uma vez estabelecido o objetivo do trabalho e sua justificativa, no Capítulo 2 deste texto é apresentado um resumo da bibliografia relevante, seguindo-se no Capítulo 3 a apresentação da metodologia utilizada. No Capítulo 4 é apresentada a aplicação da ferramenta computacional desenvolvida à configuração de edifícios adotada e os resultados das simulações são analisados e discutidos. No capítulo 5, visando uma avaliação mais global da influência das edificações, a metodologia é aplicada à situação específica de uma região urbana com 128 lotes nos quais 102 edifícios são distribuídos aleatoriamente, e considerando a incidência de 28 descargas atmosféricas em pontos definidos de forma também aleatória. Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

As descargas atmosféricas são objeto da atenção dos engenheiros eletricitas ligados à área de energia elétrica, uma vez que podem provocar interrupções no fornecimento de energia e falhas em equipamentos, seja das próprias linhas de distribuição e transmissão, seja dos consumidores. Quando da sua ocorrência, estas descargas atmosféricas (D.A.s) podem gerar desde simples interrupções temporárias do fornecimento de energia aos consumidores, em consequência do acionamento dos sistemas de proteção, como também gerar danos em transformadores e isoladores, dentre outros dispositivos das redes elétricas como comentado em (Eriksson, Stringfellow, Meal, 1982; Nucci, 2009; Parrish e Hill, 1991) 1991). Nestes casos não é raro constatar também, que danos foram causados aos sistemas elétricos e eletrônicos dos consumidores finais, constituindo assim um elemento importante a ser considerado quando se trata de qualidade da energia fornecida pelas concessionárias.

Embora seja comum a incidência de D.A.s diretamente nas redes de energia elétrica, sendo então denominadas "D.A.s diretas", é o caso das D.A.s indiretas (que incidem nas vizinhanças das redes elétricas) que chama a atenção, já que estas ocorrem com maior frequência, gerando campos eletromagnéticos que iluminam as linhas de distribuição provocando surtos de tensão elevados, conforme chamam atenção os trabalhos de (Piantini, 2008; Nucci et al., 1993; Nucci, 2009; Eriksson, Stringfellow, Meal, 1982; Piantini et al., 2010).

Para que a proteção de uma rede elétrica seja bem dimensionada deve-se levar em conta, além da quantidade de descargas atmosféricas que atingem a região, as características das tensões induzidas na mesma. Diversos estudos têm sido desenvolvidos acerca das sobretensões induzidas por D.A.s em redes elétricas, seja por modelos em escala reduzida, seja por simulação computacional como pode ser visto em (Nucci, 2009; Eriksson, Stringfellow, Meal, 1982; Paolone et al., 2009; Ishii, Michishita, Hongo, 1999; Borghetti et al., 2011; Silveira, Conti, Visacro, 2010).

As tensões induzidas são afetadas pelo ambiente ao redor do ponto de incidência da DA como, por exemplo, em redes urbanas em que a presença de edifícios afeta a propagação das ondas eletromagnéticas geradas pelas D.A.s.

Conforme foi comentado por (Piantini et al., 2010; Borghetti et al., 2011, Vieira e Janiszewski, 2013) existem poucos estudos a respeito da influência dos edifícios na

propagação das OEM (ondas eletromagnéticas) provenientes de descargas atmosféricas indiretas, principalmente em casos mais complexos em que se queira verificar a contribuição mista de parâmetros relativos ao canal da D.A., o posicionamento e características dos edifícios, além das características de condutividade do solo.

Embora os modelos em escala reduzida sejam bastante apropriados para estudar os efeitos das D.A.s, sua utilização é mais complexa quando comparada com as simulações computacionais.

No entanto, é necessário que as simulações estejam baseadas em modelos matemáticos e valores de parâmetros que possam, da melhor maneira, representar tanto o comportamento da corrente das descargas atmosféricas quanto a propagação das OEM por elas irradiadas na presença de obstáculos (Shu-chen, 2007; Piantini et al., 2007; Borghetti et al., 2013; Borghetti et al., 2011).

Observações experimentais baseadas num modelo de escala reduzida construído na USP (Universidade de São Paulo - Brasil) mostraram que a presença de edifícios afeta significativamente os efeitos de descargas atmosféricas nas linhas de distribuição localizadas na vizinhança de edificações Piantini et al. (2007).

Estudos desenvolvidos por Borghetti et al. (2011) mostram o comportamento de sobretensões induzidas na presença de edifícios, considerando-se a variação de parâmetros tais como sua dimensão e posição em relação à linha de distribuição. Os resultados mostram que a presença de edifícios provoca redução das sobretensões induzidas. Ressalta-se que em Borghetti et al. (2011) edifícios e solo foram considerados como condutores perfeitos, enquanto em Borghetti et al. (2013) foi observada a influência de solo com perdas, mas com edifícios ainda caracterizados como condutores perfeitos.

Estudos prévios desta pesquisa mostram a influência tanto do solo como dos edifícios, nos valores resultantes de campo eletromagnéticos irradiados pelas descargas atmosféricas, tanto em casos de primeiras descargas quanto para descargas subsequentes (Vieira e Janiszewski, 2013; Vieira e Janiszewski, 2015). Nestes estudos percebe-se que os parâmetros do solo e dos edifícios influenciam significativamente as componentes de campo eletromagnético irradiadas, sendo as componentes horizontais de campo elétrico as que apresentam variações mais acentuadas incluindo inversão de polaridade, excursões negativas e oscilações.

Os resultados assim obtidos podem ser usados para determinação de tensões induzidas nas redes elétricas, com maior precisão, com o uso de modelos matemáticos já desenvolvidos (Piantini e Janiszewski, 2009; Borghetti et al., 2013; Napolitano et al., 2012; Rakov, 2010).

A seguir, são apresentadas as referências bibliográficas referentes a cada tema de interesse na pesquisa.

2.1 O FENÔMENO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas podem ser classificadas em três categorias distintas: descargas intra-nuvem - que se formam no interior de uma mesma nuvem, descargas nuvem-nuvem - que se formam entre duas ou mais nuvens carregadas e descargas nuvem-terra - que são as de maior interesse neste trabalho.

O surgimento das D.A.s nuvem-terra não ocorre num processo simples (Uman e Krider, 1982; Heidler et al., 2008; Conti e Visacro, 2007), sendo constituído de fases ocorrendo em vários intervalos no tempo, o que torna complexa a sua representação por modelos matemáticos.

Uma nuvem carregada de cargas elétricas induz a polarização do solo com cargas opostas. De acordo com a movimentação dessas nuvens e da densidade de cargas das mesmas, a densidade de cargas do solo também varia. (SHU-CHEN, 2007).

O autor ainda comenta que a própria característica de condutividade do solo pode influenciar essa densidade.

A partir de um dado instante e sob certa concentração de cargas opostas entre a nuvem e o solo, pequenas descargas elétricas começam a surgir a partir das nuvens em pequenos intervalos de tempo, constituindo o denominado "*Stepped leader*" com possíveis ramificações. Quando este "*leader*" se aproxima do solo o campo elétrico associado, de grande intensidade, provoca o início de descargas ascendentes que ao se ligarem com o "*stepped leader*" descendente (geralmente a dezenas de metros acima do solo), gera uma descarga elétrica de proporções bem maiores, denominada "*Return Stroke*". Esta descarga apresenta corrente elétrica intensa que ao se propagar em direção à nuvem vai gradativamente anulando a carga existente no canal, conforme comentado em Uman e Krider (1982).

Quando a corrente associada ao "*Return Stroke*" para de fluir no canal, se ainda houver cargas acumuladas na nuvem, um novo fluxo contínuo de corrente

denominado "*Dart Leader*" pode fluir através do canal residual da primeira descarga, iniciando as denominadas descargas subsequentes ou "*Subsequent Strokes*", as quais têm geralmente valores de corrente menos intensos mas tempo de subida menor (para ir de zero até o valor máximo) se comparado com as primeiras descargas, como afirmado em Uman e Krider (1982). O mesmo autor comenta que tanto os "*Dart Leaders*" quanto as "*Subsequent Strokes*" ocorrem sem ramificações. De acordo com IEEE, 2011 a probabilidade de a corrente do "*Return Stroke*" ultrapassar um dado valor de pico "*I*" pode ser expressa por:

$$P(I) = \frac{100}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} (\%) \quad (1)$$

Segundo as mesmas publicações, para descargas subsequentes vale a expressão:

$$P(I) = \frac{100}{1 + \left(\frac{I}{12}\right)^{2,7}} (\%) \quad (2)$$

Duas curvas de distribuição estatística são comumente usadas para determinação do valor provável de corrente das primeiras descargas (Piantini e Janiszewski, 2004; Heidler e Flisowski, 2008; Rakov, 1997).

Embora as D.A.s subsequentes tenham geralmente intensidades de corrente elétricas associadas menos intensas, se comparadas com as dos "*Return Strokes*", seu tempo de frente é menor, ou seja, atingem seu valor de pico mais rapidamente, podendo como consequência gerar efeitos mais intensos (Eriksson, Stringfellow, Meal, 1982; Piantini, 2008).

Como pode ser visto em (IEEE, 2011; Rakov, 2010; Rakov, 1997) existem parâmetros que devem ser considerados, além dos valores de pico da corrente, para caracterização das D.A.s. Estes parâmetros adicionais caracterizam a forma de onda da corrente gerada pela descarga atmosférica, com a definição de pontos específicos sobre a forma de onda (identificando intervalos de tempo para que a corrente passe de 10% ou 30% para 90% do valor de pico) e de retas que passam por estes pontos indicando as máximas taxas de variação da intensidade de corrente.

Com base nestes parâmetros é possível determinar o tempo de frente da forma de onda da corrente gerada pelas D.A.s, e o tempo de decaimento necessário para atingir 50% do valor de pico da mesma ("*time to half value*").

Informações complementares a respeito desses parâmetros e da caracterização geral das descargas atmosféricas, podem ser vistas em (Uman e Krider, 1982;

Shu-chen, 2007; Piantini e Janiszewski, 2004; Heidler e Flisowski, 2008; Conti e Visacro, 2007).

Alguns modelos matemáticos foram gerados com o intuito de representar a forma de onda da corrente elétrica associada às descargas atmosféricas nuvem-terra, na base e ao longo do canal (Javor, 2010; Rakov, 2010; Baba e Rakov, 2003, Visacro e Silveira, 2004). São bastante utilizados os modelos com duplas exponenciais e a Função de Heidler.

De acordo com Heidler et al., 2008, um par de funções Heidler é suficiente para reproduzir também com boa precisão as formas de onda de corrente de descargas subsequentes.

2.2 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DO CANAL DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Outros modelos matemáticos comumente utilizados em estudos envolvendo correntes elétricas geradas por descargas atmosféricas são os denominados "Modelos de Engenharia", que tratam do comportamento da corrente ao longo do canal, uma vez que a função de Heidler representa o comportamento da corrente em função do tempo apenas na base do canal, aqui denominada $i(0, t)$.

Alguns modelos de engenharia distintos foram propostos com o intuito de modelar o comportamento da corrente ao longo do canal, isto é, para se determinar $i(z, t)$, os quais levam em consideração a existência ou não de atenuação da corrente ao longo do canal. Além disso, também é comum encontrar estudos que levam em consideração a variação da velocidade de propagação da corrente ao longo do canal, como indicado por exemplo em Bonyadi-Ram et al., 2008.

Com o uso dos modelos de engenharia, a determinação da corrente ao longo do canal $i(z, t)$ pode ser feita a partir da corrente na base do canal $i(0, t)$, incluindo-se fatores de correção para o parâmetro relativo à atenuação da corrente.

Os valores de $i(z, t)$ podem, por sua vez, ser substituídos nas equações de campos eletromagnéticos, obtendo-se os valores de E (Campo Elétrico) e H (Campo magnético) em qualquer ponto. Preferencialmente, somente os modelos em que a corrente ao longo do canal $i(z, t)$ possa ser facilmente relacionada com a corrente na base do canal $i(0, t)$, são interessantes do ponto de vista de engenharia, uma vez que a corrente na base do canal é a única grandeza que pode ser medida

diretamente, permitindo comparações e validação. Esses modelos são geralmente subdivididos em dois grupos principais, denominados Linha de Transmissão e Fonte de Corrente Propagante. (RAKOV, 1997).

Como exemplo de uso dos modelos do tipo Linha de Transmissão, é possível citar os modelos de engenharia TL "*Transmission Line*" o qual não prevê atenuação da corrente ao longo do canal e os modelos MTLL "*Modified Transmission Line - Linear attenuation*" e MTLE "*Modified Transmission Line - Exponential attenuation*", os quais preveem atenuação linear e exponencial da corrente ao longo do canal, respectivamente, como indicado em Rakov (1997). Como exemplo dos modelos do tipo Fonte de Corrente Propagante, é possível citar o de BG "Bruce-Golde", o modelo TCS "*Travelling Current Source*", e o DU "*Diendorfer-Uman*". (RAKOV, 1997).

Os modelos do tipo linha de transmissão consideram a existência de uma fonte de corrente predefinida na base do canal, que se propaga sem que ocorra qualquer distorção ou atenuação no caso do modelo TL, ou sem distorção, mas com atenuações lineares ou exponenciais, nos modelos MTLL e MTLE respectivamente. Conforme indicado por (Baba e Rakov, 2007; Cooray, 2003; Romero, Piantini, Cooray, 2014), é importante que se usem parâmetros e técnicas apropriadas para garantir a correta representação tanto da atenuação quanto da velocidade da corrente associada à descarga atmosférica ao longo do canal, a partir do uso dos modelos de engenharia, seja pela distribuição de diversas fontes de corrente encadeadas ao longo do canal da D.A., seja pela representação mais simples em que uma única fonte de corrente excita a base do canal.

De modo geral, tanto a variação da velocidade quanto a do fator de atenuação da corrente ao longo do canal têm sido estudados por diferentes autores, mostrando que ambos os fatores influenciam a forma de onda e valores de pico resultantes dos campos irradiados (Shoory et al., 2005; Rubinstein e Uman, 1989; Javor e Rancic, 2009; Cooray, 2003; Javor, 2012a, Javor, 2012b).

2.3 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Estudos com diferentes abordagens foram desenvolvidos para análise e determinação de campos eletromagnéticos irradiados por descargas atmosféricas, a

partir da representação da corrente na base e ao longo do canal (Javor, 2010; Shoory et al., 2005; Rubinstein e Uman, 1989; Borghetti et al., 2013; Rubinstein, 1996).

Em (Javor, 2010; Shoory et al., 2005) os autores consideram o modelo de engenharia MTLE para representação do canal da D.A. e mostram que o campo eletromagnético resultante depende de parâmetros como a distância entre o ponto de incidência da D.A. e o ponto de observação dos campos, assim como do fator de atenuação da corrente considerado ao longo do canal. Em Shoory et al. (2005) o autor mostra também a contribuição da condutividade e permissividade do solo na composição dos campos irradiados.

Em Rubinstein e Uman (1989) o autor mostra como os campos eletromagnéticos são definidos em diferentes distâncias do ponto de incidência da D.A., em função da decomposição destes campos em suas diferentes componentes.

O estudo apresentado por Romero, Piantini, Cooray (2014) permite avaliar o efeito de canais com perdas sobre o comportamento dos campos elétricos irradiados em função da distância e da condutividade do solo, tanto para as componentes verticais quanto horizontais de campo irradiado.

Resultados similares, com aumento de intensidade de campo elétrico vertical irradiado após os primeiros microssegundos da forma de onda, podem ser visualizados em (Javor, 2010; Shoory et al., 2005; Javor e Rancic, 2009).

Os estudos desenvolvidos por Javor (2010) mostram formas de onda típicas tanto de campo elétrico quanto magnético a diferentes distâncias do canal da D.A., com velocidade de propagação da corrente em torno de um terço da velocidade da luz no vácuo. Os casos apresentados pela autora mostram que em pontos 500m e 5km distantes do canal, tanto o campo elétrico quanto o magnético sofrem alterações nas suas formas de onda. Para efeito de validação, o estudo ainda mostra resultados semelhantes obtidos com outro modelo, proposto por Shoory et al. (2005).

Em (Shoory et al., 2005; Chen et al., 2010) vê-se que o campo elétrico horizontal irradiado pode apresentar tanto aumento quanto atenuação em sua magnitude em função do tempo de observação, além de incursão negativa e inversão de polaridade, quando medido em distâncias diferentes em relação ao canal da DA e sobre solos com diferentes condutividades e permissividades.

No estudo apresentado por Rubinstein e Uman (1989) o autor considera duas técnicas diferentes para representação das D.A.s (antena dipolo e antena monopolo)

posicionadas verticalmente acima de um plano de terra, a partir das quais se calculam os campos elétricos e magnéticos irradiados. Como resultado percebe-se que ambas as abordagens apresentam resultados similares às apresentadas anteriormente Shoory et al. (2005), principalmente quando considerados a algumas dezenas de metros do canal da D.A..

Resultados de medidas reais são apresentados em Uman e Krider (1982) e algumas formas de onda de campos elétrico e magnético em diferentes distâncias do canal da descarga atmosférica estão disponíveis, mostrando novamente um comportamento similar aos indicados anteriormente.

No estudo apresentado por Bonyadi-Ram et al. (2008) mostra-se que o modelamento do canal com perdas e ajuste da velocidade de propagação da corrente influenciam a forma de onda dos campos elétricos e magnéticos irradiados pela D.A. e em Romero, Piantini, Cooray (2014) pode-se ver a influência da velocidade de propagação da corrente do canal nas componentes horizontais de campo elétrico, para diferentes distâncias e tipos de solo.

2.4 TENSÕES INDUZIDAS A PARTIR DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS IRRADIADOS

Os valores de campos eletromagnéticos irradiados por D.A.s indiretas, após serem calculados com algum dos métodos já mencionados, podem ser aproveitados para determinação das respectivas tensões induzidas e consequente análise do comportamento das redes elétricas, a partir do uso de outros modelos já conhecidos (aqui denominados Modelos de Acoplamento de Campo), tais como o de Agrawal, Price, Gurbaxani (1980) e o de Rusck Extendido (ERM) Piantini e Janiszewski (2009).

Como exemplo, têm-se os trabalhos desenvolvidos por (Silveira et al., 2009; Nucci et al., 1993; Eriksson, Stringfellow, Meal, 1982; Buccella, Cristina, Orlandi, 1992), os quais mostram estudos comparativos entre dados reais ou obtidos por modelos de escala reduzida, de tensões induzidas em redes elétricas por descargas atmosféricas e dados computacionais obtidos a partir dos modelos criados. Esses estudos mostram boa concordância entre os dados medidos e os calculados analiticamente pelos modelos de acoplamento de campo.

Em Piantini e Janiszewski (2004) comparam-se os resultados de tensões induzidas medidas no Japão, a partir da incidência de "*Return Strokes*", com os dados obtidos pelo modelo denominado ERM "*Extended Rusck Model*", indicando ter boa aproximação. Neste caso o modelo proposto permitiu analisar comprimentos finitos tanto do canal da descarga quanto das linhas de rede elétrica, a existência de líderes ascendentes para representação da descarga atmosférica, assim como a incidência de D.A.s em estruturas altas.

Outro modelo comumente usado para determinação computacional de tensões induzidas em linhas elétricas a partir da queda de D.A.s é o proposto por Agrawal, Price, Gurbaxani (1980), que pode ser comparado com o modelo ERM.

Em Silveira et al. (2009) pode-se perceber que tanto a variação de amplitude quanto a forma de onda dos CEM em função da distância e do solo, podem ser determinadas com boa aproximação a partir de um modelo híbrido de acoplamento, se comparadas com medidas de modelos em escala reduzida.

A importância do uso dos modelos de acoplamento para determinação de tensões induzidas em linhas elétricas é apresentada em Piantini e Janiszewski (2009). Neste estudo são comparados os resultados obtidos por um modelo em escala reduzida, com aqueles obtidos pelo modelo ERM "*Extended Rusck Model*" adaptado para D.A.s atingindo estruturas altas, possibilitando considerar configurações realistas de linhas elétricas que por sua vez implicam diferentes resultados de tensões induzidas. O estudo conclui ainda que o modelo ERM é adequado para a análise de tensões induzidas tanto para D.A.s nuvem-terra diretas, em que as descargas fluem diretamente entre a nuvem e o solo, como para o caso das D.A.s atingindo estruturas altas, levando-se em conta a presença de cabos-guarda e para-raios nas linhas de energia analisadas.

O uso de outro modelo de acoplamento de campo para determinação de tensões induzidas em redes elétricas pode ser visto em Visacro (2005), apresentando também resultados compatíveis com dados reais.

Estudos mais recentes descritos em (Borghetti et al. ,2011; Borghetti et al. ,2013), mostram que tensões induzidas em redes elétricas podem ser calculadas com boa aproximação a partir do uso de simulações computacionais, usando-se modelos de acoplamento de CEM como o proposto por Agrawal, Price, Gurbaxani (1980).

Em geral, quando as tensões induzidas em redes elétricas são definidas por simulação computacional, sua precisão depende da correta caracterização dos

campos em função das suas componentes horizontais e verticais, com o maior grau de detalhamento possível tanto temporal quanto espacial.

Ressalta-se novamente a importância da correta caracterização tanto do solo como dos edifícios para a determinação das componentes verticais e horizontais de CEM, já que principalmente essas últimas são fortemente influenciadas pelas características do ambiente.

2.5 INFLUÊNCIA DAS EDIFICAÇÕES NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para determinação de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes elétricas, mas não há muita informação disponível sobre a influência de edificações com diferentes configurações de materiais e dimensões.

Resultados baseados em um modelo de escala reduzida apresentado em Piantini et al. (2007) mostraram a influência dos edifícios na vizinhança das linhas elétricas, sobre as tensões induzidas por descargas atmosféricas. Os autores concluem que o modelo em escala reduzida pode ser usado com boa precisão, tanto para estudos em ambientes com configurações mais realistas quanto para validação de modelos analíticos existentes.

Estudos computacionais apresentados em (Borghetti et al., 2013; Borghetti et al., 2011) salientam a importância em analisar a existência de edifícios na vizinhança do ponto onde incidem as descargas atmosféricas, próximo às linhas elétricas onde se pretende avaliar as consequentes tensões induzidas. Nestes estudos os autores concluem que a presença dos edifícios, levando em conta suas dimensões e posição em relação ao canal da D.A. e da linha elétrica, geram alterações significativas na composição de campo eletromagnético resultante. Em Borghetti et al. (2013) considera-se também a influência do solo não condutor perfeito, juntamente com a presença de edifícios, para o cálculo das tensões induzidas geradas a partir das descargas atmosféricas.

Outros estudos para cálculo de campos irradiados por D.A.s foram desenvolvidos, porém com a representação aproximada do edifício a partir da sua estrutura metálica apenas, desconsiderando a existência de alvenaria ou concreto em sua constituição (Kondylis et al., 2001; Taflove, 2000).

Entretanto, resultados anteriores obtidos nesta pesquisa, mostram que a influência das edificações sobre os CEM irradiados por descargas atmosféricas depende tanto de parâmetros físicos e geométricos do solo quanto das edificações (Vieira e Janiszewski, 2015; Vieira e Janiszewski, 2014; Chen et al., 2010). Estes estudos mostram que os efeitos são mais evidentes na componente horizontal do campo elétrico, incluindo inversão de polaridade e incursão negativa nos primeiros microssegundos da forma de onda. É possível constatar também oscilações nas formas de onda dos campos elétricos e magnéticos horizontais, principalmente nos casos em que tanto o solo como os edifícios são considerados como condutores elétricos perfeitos, e tendo os edifícios 15m de altura ou mais.

2.6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA DETERMINAÇÃO DE CAMPOS IRRADIADOS

A utilização de modelos em escala reduzida nem sempre é simples, devido ao preço e à complexidade de sua construção, considerando-se, por exemplo, a necessidade de representação de diferentes parâmetros dos edifícios e do solo.

Ao mesmo tempo, problemas envolvendo campos eletromagnéticos têm solução analítica somente em casos de configuração simples e geralmente com algum grau de simetria. (SADIKU, 2004, p.590).

Assim sendo, a solução de problemas mais gerais e com maior grau de complexidade conta com o uso de métodos numéricos, como por exemplo o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) ou o método dos elementos finitos (MEF) apresentado em Jin (2014).

Outra possibilidade para se estudar o fenômeno das descargas atmosféricas baseia-se no uso de ferramentas computacionais comerciais de simulação eletromagnética, como é o caso do Comsol (2015), e do CST (2015). Estes softwares, no entanto, não estarão comumente disponíveis e seu uso exige adequações nem sempre triviais para a representação apropriada do fenômeno conforme enfatizado em (Baba e Rakov, 2007; Javor e Rancic, 2009).

Neste trabalho foi escolhido o método das diferenças finitas, devido à sua simplicidade para implementação e flexibilidade quanto à inclusão de diferentes parâmetros de interesse.

Com o aumento da capacidade de processamento e memória para armazenamento de dados dos sistemas computacionais modernos, o emprego do método das diferenças finitas no domínio do tempo FDTD para a solução de problemas eletromagnéticos tem-se tornado uma escolha cada vez mais atrativa (Gedney, 2011; Jamid, 2004; Sullivan, 2000).

2.7 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

O método numérico FDTD "*Finite Difference Time Domain*" (método das diferenças finitas no domínio do tempo) propõe a resolução de equações diferenciais mediante a aproximação das derivadas por diferenciação finita, com base no desenvolvimento da função por Série de Taylor, conforme comentado em (Schneider, 2014; Gedney, 2011).

Conforme comentado em (Kondylis et al., 2001; Yang et al., 2005; Berenger, 1994) o FDTD é uma opção muito atrativa para a análise de campos eletromagnéticos devido principalmente à simplicidade de seu algoritmo.

Para sua aplicação, no entanto, uma grade conveniente de discretização espacial deve ser usada, além de um incremento de tempo adequado. (TAFLOVE, 2000, p.55).

Mesmo que métodos numéricos alternativos como o FEM "*Finite Element Method*" (método dos elementos finitos) possam ser usados, permitindo uma discretização arbitrária do volume computacional para redução da quantidade de pontos a serem analisados, tem-se por outro lado uma lógica de programação mais complexa, além da necessidade de inversão de grandes matrizes, implicando um processamento computacional também elevado, como indicado em Kondylis et al. (2001).

Embora em Sullivan (2000) o autor tenha optado por usar a linguagem C para exemplificar o uso do FDTD, este método numérico pode ser aplicado com qualquer outra linguagem de programação. Em Yang et al. (2005), por exemplo, o autor mostra que o Matlab (escolhido neste trabalho para desenvolver as simulações), pode ser usado convenientemente em diversas aplicações, incluindo os casos de análises matemáticas associadas com diferenciação e integração numéricas, análises estatísticas e fenômenos com comportamentos caóticos, além dos casos em que o uso de grandes matrizes seja necessário.

Outras aplicações de uso do Matlab podem ser encontradas em Otto e Denier (2005), incluindo exemplos de sistemas com equações lineares e não lineares, equações diferenciais e exemplos do próprio método FDTD.

O método das diferenças finitas define, portanto, uma poderosa ferramenta de cálculo para o desenvolvimento de trabalhos tanto de configurações simples, quanto de configurações mais complicadas onde o domínio de simulação pode variar em geometria e materiais (meio não homogêneo, com ou sem perdas), lineares ou não lineares, incluindo a consideração de meios dispersivos, conforme comentado em Gedney (2011).

Nas situações de meios não homogêneos pode ser necessário um refinamento bem maior para melhor caracterizar determinadas regiões. Neste caso, manter o mesmo grau de discretização em todo o domínio de simulação poderá comprometer o tempo de simulação, inviabilizando o uso do FDTD.

Assim, conforme comentado em Gedney (2011), tem-se a possibilidade de usar as técnicas para subdivisão local da grade inicial, denominadas "*subgridding*", em que os elementos da grade FDTD permanecem os mesmos na sua forma, diferenciando-se entre si apenas pelo tamanho. O refinamento da grade será então aplicado apenas em regiões definidas, resultando maior precisão na aproximação das derivadas nos pontos necessários.

Uma limitação do FDTD advém da necessidade de se definir limites em sistemas abertos, ou seja, quando o domínio a ser analisado torna-se muito grande e fica inviável analisar toda a região. Para esta situação, o uso de camadas absorvedoras garante que toda a energia oriunda da OEM incidente seja absorvida nos limites do volume analisado e não retorne por reflexão para a grade FDTD, como indica Taflove (2000, p.235). A denominada ABC "*Absorbing Boundary Condition*" foi proposta por G. Mur em 1981 e posteriormente otimizada por outros pesquisadores, conforme comentado em Gedney (2011, p. 101-133). Uma nova proposta de camada absorvedora ainda mais eficiente, denominada PML "*Perfectly Matched Layer*". (BERENGER, 1994).

Mesmo que se usem camadas absorvedoras, alguma quantidade de onda refletida ainda pode retornar para dentro da grade. No entanto, durante a implementação da PML, seus parâmetros podem ser ajustados para garantir que seu desempenho seja otimizado minimizando ao máximo as ondas refletidas, conforme indicado por Jamid (2004).

Para garantir que os resultados da aplicação do método FDTD sejam consistentes, alguns critérios devem ser atendidos, relativos à dispersão da velocidade de propagação e à estabilidade numérica.

Num sistema real sem dispersão, a velocidade de propagação não depende da frequência. Isto não acontece na grade FDTD em que resulta uma velocidade computacional dependente da discretização espacial. O critério pode ser apresentado de forma mais simples, segundo Gedney (2011, p.25), considerando-se um sinal monocromático em uma dimensão. Como descrito em Taflove (2000), a dispersão de velocidade pode ser reduzida desde que o incremento espacial seja pequeno comparado com o comprimento de onda do sinal.

Por outro lado, para que a solução computacional seja estável, Taflove (2000, p.55) comenta que o critério de estabilidade impõe que os parâmetros da discretização espacial e o incremento temporal estejam relacionados, conforme o chamado Número de Courant. Assim, é definido um incremento temporal máximo para uma dada discretização espacial a fim de garantir que a solução computacional seja convergente para a solução correta.

A estabilidade pode ser analisada de forma simples por meio do método de Von Neumann como indicado em (Ganta et al., 2011; Ding, Zhang, Wu, 2010).

As referências apresentadas, relevantes ao estudo dos efeitos das descargas atmosféricas, mostram por um lado a importância do tema da Tese e, por outro lado, indicam a existência de poucos trabalhos a respeito da influência de edificações sobre os campos eletromagnéticos dessas descargas. O presente estudo visa uma análise mais completa do assunto.

3 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada para o estudo proposto será apresentada neste item, indicando os principais aspectos do procedimento computacional considerado nas simulações (FDTD), as características da descarga atmosférica e do solo, além da caracterização dos materiais dos edifícios.

3.1 MÉTODO FDTD

Para uma função $\phi(x)$ qualquer, pode-se obter a aproximação de $d\phi/dx$ no método FDTD a partir do desenvolvimento em Série de Taylor. Sendo Δx a distância entre dois pontos vizinhos (que define a discretização da malha FDTD), pode-se escrever:

$$\phi(x_0 + \Delta x) = \phi(x_0) + \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x_0} \cdot \Delta x + \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^2 + \frac{1}{3!} \cdot \left. \frac{d^3\phi}{dx^3} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^3 + \frac{1}{4!} \cdot \left. \frac{d^4\phi}{dx^4} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^4 + \dots \quad (3)$$

De modo similar, na direção oposta da grade, resulta:

$$\phi(x_0 - \Delta x) = \phi(x_0) - \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x_0} \cdot \Delta x + \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^2 - \frac{1}{3!} \cdot \left. \frac{d^3\phi}{dx^3} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^3 + \frac{1}{4!} \cdot \left. \frac{d^4\phi}{dx^4} \right|_{x_0} \cdot \Delta x^4 \dots \quad (4)$$

Assim sendo, podem-se definir três possíveis aproximações:

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x_0} \approx \frac{\phi(x_0 + \Delta x) - \phi(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x); \quad (5)$$

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x_0} \approx \frac{\phi(x_0) - \phi(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} + O(\Delta x); \quad (6)$$

$$\left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x_0} \approx \frac{\phi(x_0 + \Delta x) - \phi(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} + O(\Delta x^2); \quad (7)$$

Também pode ser obtida uma aproximação para a derivada de segunda ordem:

$$\left. \frac{d^2\phi}{dx^2} \right|_{x_0} \approx \frac{\phi(x_0 + \Delta x) + \phi(x_0 - \Delta x) - 2\phi(x_0)}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2) \quad (8)$$

Deve-se notar que $O(\Delta x)$ e $O(\Delta x^2)$ indicam, respectivamente, erros de truncamento de primeira e segunda ordem.

A partir dessas aproximações a equação diferencial que descreve o fenômeno pode ser reescrita em forma de diferenças finitas, para determinação dos valores da função em cada ponto da malha em instantes $t=k.\Delta t$, sendo Δt a discretização temporal adotada.

Embora este método numérico apresente erros devido ao truncamento na representação por série de Taylor da função a ser analisada (o que também ocorre com os demais métodos), estes erros são controlados e podem ser minimizados a partir do refinamento da malha utilizada. A definição da malha FDTD dever ser feita,

portanto, adequando-a a cada caso de interesse, em que as condições de contorno e o ambiente de simulação irão impor condições que deverão ser atendidas para permitir a correta caracterização do fenômeno a ser estudado e garantir resultados suficientemente precisos. Cada elemento (ou subdivisão) da grade FDTD poderá inicialmente ter o mesmo formato, o que facilitará visualização e interpretação dos resultados.

Nas situações de meios não homogêneos pode ser necessário um refinamento bem maior para melhor caracterizar determinadas regiões. Neste caso, manter o mesmo grau de discretização em todo o domínio de simulação poderá comprometer o tempo de simulação, inviabilizando o uso do FDTD. Assim, conforme comentado em Gedney (2011, p.137), tem-se a possibilidade de usar as técnicas para subdivisão local da grade inicial, denominadas "*subgridding*", em que os elementos da grade FDTD permanecem os mesmos na sua forma, diferenciando-se entre si apenas pelo tamanho. O refinamento da grade será então aplicado apenas em regiões definidas, resultando maior precisão na aproximação das derivadas nos pontos necessários.

Uma limitação do FDTD advém da necessidade de se definir limites em sistemas abertos. Uma solução possível seria criar um ambiente de simulação bem maior do que aquele em que a solução é desejada, de modo que os campos refletidos no final da grade não interfiram nos pontos mais internos. Assim, considerando-se inicialmente um certo volume finito de simulação, ele é aumentado gradativamente até que não se percebam mudanças significativas nos sucessivos resultados.

No entanto, este processo novamente recai no problema de tempo de simulação, que pode em muitos casos inviabilizar sua aplicação na solução de problemas complexos.

Outra forma mais eficiente de contornar este problema, trata de limitar a região de simulação através de paredes absorvedoras (PML), que possibilitam que a energia oriunda da OEM incidente seja absorvida nos limites do volume analisado e não retorne por reflexão para a grade FDTD conforme (Gedney, 2011; Berenger, 1994). Deve-se ressaltar que na implementação da PML seus parâmetros devem ser ajustados para garantir que seja minimizada a energia refletida, conforme indicado por Jamid (2004).

3.2 CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Para garantir que os resultados da aplicação do método FDTD sejam consistentes, alguns critérios devem ser atendidos, relativos à estabilidade numérica e à dispersão da velocidade de propagação.

O **critério de estabilidade** estabelece uma relação entre a discretização espacial e a temporal para assegurar a convergência da solução numérica para a solução exata.

Um parâmetro utilizado para definição da condição de estabilidade é o Número de Courant, definido por:

$$S = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \quad (9)$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo.

Segundo Taflove (2000, p.55) uma solução numérica é estável se produz resultados limitados, para valores de entrada também limitados.

De modo geral pode-se definir que uma solução será estável se cada termo da série de Fourier associado à resposta tiver um fator de crescimento menor ou igual a 1 a cada incremento de tempo, durante a simulação numérica.

A estabilidade da solução pode ser verificada pelo procedimento proposto por Von Neumann, segundo Min e Teng (2001). Para a equação de onda, por exemplo, considerando uma solução do tipo $E_i^n = A^n \cdot e^{ji\beta\Delta x}$ e substituindo-a na equação discretizada:

$$\frac{E_{i+1}^n + E_{i-1}^n - 2E_i^n}{\Delta x^2} = \mu\epsilon \frac{E_i^{n+1} + E_i^{n-1} - 2E_i^n}{\Delta t^2} \quad (10)$$

obtem-se:

$$\frac{A^n \cdot e^{j(i+1)\beta\Delta x} + A^n \cdot e^{j(i-1)\beta\Delta x} - 2A^n \cdot e^{ji\beta\Delta x}}{\Delta x^2} = \mu\epsilon \frac{A^{n+1} \cdot e^{ji\beta\Delta x} + A^{n-1} \cdot e^{ji\beta\Delta x} - 2A^n \cdot e^{ji\beta\Delta x}}{\Delta t^2} \quad (11)$$

Uma manipulação algébrica leva a:

$$A^2 - 2A \left[1 + \frac{\Delta t^2}{\mu\epsilon\Delta x^2} (\cos(\beta\Delta x) - 1) \right] + 1 = 0 \quad (12)$$

Analisando-se a expressão (12) em A , pode-se concluir que haverá estabilidade numérica se o termo $\frac{\Delta t^2}{\mu\epsilon\Delta x^2} \leq 1$, garantindo que $|A| \leq 1$. Assim o critério de estabilidade impõe que deverá ocorrer

$$S = \frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (13)$$

Conforme definido em Gedney (2011, p.51), para uma grade FDTD com três dimensões no sistema de coordenadas cartesianas, o critério de estabilidade pode ser atendido se o incremento de tempo Δt da grade FDTD atender a condição:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (14)$$

Para malhas cúbicas com igual discretização Δ nas três direções do sistema de coordenadas, pode-se redefinir a condição (14) como:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

e, de modo análogo, para malhas uniformes de duas dimensões, a condição de estabilidade é:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

O critério da dispersão da velocidade está relacionado com a variação da velocidade de propagação v com a frequência angular ω . Num sistema real sem dispersão, a velocidade de propagação é constante, enquanto que na grade FDTD resulta uma velocidade computacional dependente da discretização espacial.

Considerando-se um sinal monocromático em uma dimensão como indicado em Gedney (2011), da forma $u(x, t) = e^{j(\omega t - kx)}$, em que ω define a frequência angular e $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, a equação de onda escalar correspondente é:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (17)$$

Da solução da equação (17) resulta que a velocidade de fase da onda é dada por $v_f = \omega/k = c$, independente da frequência.

Nessas condições, a propagação de ondas eletromagnéticas é não dispersiva e não ocorre alteração da forma de onda mesmo após haver propagação por longas distâncias.

Para verificar o critério de dispersão, considera-se o sinal anteriormente definido na forma discretizada:

$$u_i^n = u(x_i, t_n) = e^{j(\omega n \Delta t - \hat{k} i \Delta x)} \quad (18)$$

em que $\hat{k}$ representa o número de onda da simulação computacional.

Por outro lado, a equação (17) discretizada, tem a forma:

$$u_i^{n+1} + u_i^{n-1} - 2u_i^n = c^2 \Delta t^2 \left[\frac{u_{i+1}^n + u_{i-1}^n - 2u_i^n}{\Delta x^2} \right] \quad (19)$$

Substituindo a solução discretizada (18) em (19), após manipulação algébrica obtém-se a equação geral que mostra o comportamento do número de onda discreto em função da frequência como indicado em Taflove (2000):

$$\hat{k} = \frac{1}{\Delta x} \cos^{-1} \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta x}{c\Delta t} \right)^2 \cdot [\cos(\omega\Delta t) - 1] \right\} \quad (20)$$

Percebe-se neste caso que $\hat{k}$ está definido em função da frequência e três situações podem ser avaliadas: a) caso mais simples em que $c \cdot \Delta t = \Delta x$ - "Magic Time Step", quando não há dispersão; b) caso em que $\Delta t \rightarrow 0$ e $\Delta x \rightarrow 0$, quando os números de onda físico e numérico resultam iguais no limite ($\hat{k} = k = \pm \frac{\omega}{c}$), independentemente da frequência (propagação não dispersiva); c) caso menos favorável em que $c \cdot \Delta t \neq \Delta x$, quando resultam diferenças significativas entre $\hat{k}$ e k , caracterizando a diferença entre as velocidades real e de simulação. Verifica-se que esta diferença será tanto menor quanto mais refinada for a discretização espacial, definida pelo número de pontos da grade por comprimento de onda $N\lambda$. Ela depende, também, da relação $\frac{\Delta x}{c\Delta t} = \frac{1}{S}$, sendo S o Número de Courant, já definido. A figura 1 mostra o erro de velocidade em função de $N\lambda$, para o caso de $S = \frac{1}{2}$.

Figura 1- Dispersão da velocidade em função da definição da grade em pontos por comprimento de onda $N\lambda$. ($S=0,5$).

Fonte: Adaptado de Taflove (2000).

Verifica-se na figura 1 que a velocidade de fase numérica é 1,3% inferior à velocidade real c (no vácuo), quando se considera $S = 0,5$ com $N\lambda=10$ ($\Delta x = \frac{\lambda_0}{10}$, sendo λ_0 o comprimento de onda no vácuo).

3.3 MÉTODO DE YEE

Uma forma conveniente de analisar a propagação de CEM em três dimensões consiste em adotar o procedimento proposto por Yee (1966).

Nessa proposta o autor sugere a discretização com o uso de elementos com a forma de cubos, representados em coordenadas cartesianas, tendo campos elétricos normais e magnéticos tangenciais, associados respectivamente às suas faces e arestas.

Dessa forma as equações de Maxwell são substituídas por um conjunto de equações de diferenças finitas, as quais podem ser adequadas em uma, duas ou três dimensões. Em seu trabalho Yee (1966) comenta que a partir da escolha apropriada dos pontos em que as várias componentes de campo serão avaliadas, o conjunto de equações por diferenças finitas pode ser resolvido e a solução irá atender as condições de contorno impostas pelo problema analisado.

O cubo visto na figura 2 representa um dado elemento da grade de discretização.

Figura 2 - Cubo de Yee

Fonte: Adaptado de Yee (1966)

A dimensão do cubo deve atender os critérios de dispersão de velocidade de propagação e de estabilidade da solução, conforme já comentado no item 3.2.

3.3.1 Aplicação do Método de Yee no trabalho proposto

Para definição dos campos eletromagnéticos (CEM) parte-se das equações de Maxwell:

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = -\nabla \times \bar{E} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \nabla \times \bar{H} - \bar{J} \quad (22)$$

Para o caso a ser analisado valem as relações constitutivas em que $\bar{D} = \varepsilon \bar{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \bar{E}$ e $\bar{B} = \mu \bar{H} = \mu_0 \mu_r \bar{H}$.

Na equação (22) o termo $\bar{J}$ representa a densidade de corrente, que pode considerar também fontes independentes. Assim,

$$\bar{J} = \bar{J}_{\text{fonte}} + \sigma \bar{E} \quad (23)$$

sendo σ a condutividade elétrica (S/m).

Dessa forma obtêm-se as equações de campo elétrico e magnético que serão posteriormente discretizadas no domínio do tempo usando-se o método FDTD.

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{E} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \bar{H} - \frac{1}{\varepsilon} (\bar{J}_{\text{fonte}} + \sigma \bar{E}) \quad (25)$$

A partir das expressões (24) e (25) é possível obter as equações para cada componente de campo elétrico e magnético, nas três direções do sistema de coordenadas.

Como exemplo indica-se a seguir as componentes de campo elétrico e magnético respectivamente, na direção do eixo x. Expressões similares são definidas nas direções dos eixos y e z.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - (\bar{J}_{\text{fonte}_x} + \sigma E_x) \right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right] \quad (27)$$

As seis equações de CEM discretizadas a partir do modelo do cubo proposto por Yee, formam a base do método numérico FDTD para problemas envolvendo ondas eletromagnéticas em ambientes de três dimensões.

Em Taflove (2000, p.87) chama-se a atenção para o fato que a continuidade dos campos tangenciais $\bar{E}$ e $\bar{H}$ é naturalmente mantida através de interfaces de materiais com características físicas diferentes, se estas interfaces forem paralelas a um dos eixos do sistema de coordenadas cartesianas. Basta que se definam inicialmente as características físicas (permeabilidade e permissividade relativa) do material, em cada posição da grade onde se pretende calcular os campos elétricos e magnéticos.

As equações de Maxwell são então discretizadas, como indicado em Taflove (2000), com o campo elétrico tomado no ponto central de cada face do cubo, enquanto que o campo magnético é considerado nas suas arestas.

Para um sistema em uma dimensão ter-se-ia o esquema indicado na Figura 3 - Exemplo 1D - Algoritmo de Yee.

Fonte: Adaptado de Taflove (2000)

Na figura 3, o termo Δx indica a discretização da grade na direção x do sistema de coordenadas cartesianas. Por sua vez Δt representa o incremento de tempo.

Assim sendo é possível indicar qualquer função em um ponto discreto da grade e num instante de tempo por $f(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)$ ou $f_{i,j,k}^n$, sendo i, j, k e n , números inteiros. Como exemplo apresenta-se a expressão aproximada da derivada parcial de uma função $f(x, y, z, t)$ na direção do eixo x , no ponto $x = i\Delta x$ e no instante $t = n\Delta t$:

$$\frac{df}{dx}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{f_{i+1/2,j,k}^n - f_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (28)$$

Os incrementos $\pm 1/2$ no índice i na equação (28) retratam o incremento espacial de $\pm(1/2)\Delta x$. Os pontos de definição dos valores de campo elétrico estão $(1/2)\Delta x$ distantes dos pontos de campo magnético vizinhos.

Usando-se a notação proposta, é possível obter as 6 equações discretizadas de campo eletromagnético em três dimensões.

A equação discretizada de campo elétrico, por exemplo na direção do eixo x , em coordenadas cartesianas, fica:

$$\frac{Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}} \cdot \left(\frac{Hz|_{i,j+1,k+1/2}^n - Hz|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{Hy|_{i,j+1/2,k+1}^n - Hy|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} - J_{fonte_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - \sigma_{i,j+1/2,k+1/2} \cdot Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right) \quad (29)$$

A equação (29) mostra os campos elétricos definidos nos instantes de tempo $n \pm 1/2$, à exceção do último termo que aparece indicado no instante n , e que é aproximado por:

$$Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^n = \frac{Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} + Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2}}{2} \quad (30)$$

A partir das equações (29) e (30) com manipulação algébrica conveniente obtém-se finalmente a equação básica da componente de campo elétrico discretizada na direção do eixo x.

$$Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma_{i,j+1/2,k+1/2}}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}}{1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma_{i,j+1/2,k+1/2}}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}} \right) \cdot Ex|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + \left(\frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}}{1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma_{i,j+1/2,k+1/2}}{2\varepsilon_{i,j+1/2,k+1/2}}} \right) \cdot \left[\frac{Hz|_{i,j+1,k+1/2}^n - Hz|_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta y} - \frac{Hy|_{i,j+1/2,k+1}^n - Hy|_{i,j+1/2,k}^n}{\Delta z} - J_{fonte_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n \right] \quad (31)$$

Percebe-se na equação (31) a existência do termo $J_{fonte_x}|_{i,j+1/2,k+1/2}^n$ representando uma fonte independente que, neste trabalho, corresponderá à corrente da descarga atmosférica, tanto na base quanto ao longo do canal.

Para cada ponto da grade que possua coordenada coincidente com as dos pontos que irão representar o canal da D.A., o termo $J_{fonte_x}|_{i,j,k}^n$ terá seus valores atualizados em função do tempo, de forma a representar adequadamente a corrente do canal, com velocidade de propagação igual a uma fração da velocidade da luz "c" (em torno de 0,5.c), com ou sem atenuação ao longo do canal.

Se a excitação fosse aplicada nas equações pela imposição de valores de campo elétrico $\bar{E}$ ou magnético $\bar{H}$, poderiam ocorrer erros de processamento dependendo do método de inserção. Nesses casos estas fontes de excitação são denominadas "Hard-Source" ou "Soft-Source", dependendo do método como são inseridas, e requerem atenção especial para implementação conforme comentam (Gedney, 2011, p.79; Sullivan, 2000, p.7). Assim, neste trabalho optou-se por inserir a excitação a partir do termo $(J_{fonte_x}|_{i,j,k}^n)$.

Finalmente, de modo similar ao que foi feito para definição da equação (31) de campo elétrico na direção do eixo x , obtém-se as expressões relativas às componentes de campo elétrico nas direções dos eixos y e z , e às componentes de campo magnético nas três direções.

Como exemplo apresenta-se a seguir a expressão do campo magnético na direção do eixo x .

$$Hx|_{i-1/2,j+1,k+1}^{n+1} = Hx|_{i-1/2,j+1,k+1}^n + \frac{\Delta t}{\mu_{i-1/2,j+1,k+1}} \cdot \left[\frac{Ey|_{i-1/2,j+1,k+3/2}^{n+1/2} - Ey|_{i-1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} - \frac{Ez|_{i-1/2,j+3/2,k+1}^{n+1/2} - Ez|_{i-1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2}}{\Delta y} \right] \quad (32)$$

3.4 TÉCNICAS ALTERNATIVAS NO MÉTODO FDTD - MELHORA NO PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL

Umas das contribuições deste trabalho refere-se a uma sistemática particular de cálculo tanto das constantes referentes a todo o domínio quanto dos campos eletromagnéticos irradiados. Além disso, uma forma particular de armazenamento dos valores de campo elétrico e magnético foi desenvolvida.

Para acelerar o processamento computacional e reduzir a quantidade de dados para armazenamento, conforme proposto em Taflove (2000, p.85), o domínio de simulação pode permitir adequações nas equações (31) e (32) assim como nas equações similares referentes às outras direções do sistema de coordenadas. Isto pode ser feito a partir do cálculo prévio de um conjunto de constantes que caracterizem o meio em função da posição espacial, dependendo do modo como ocorre a variação das propriedades dos materiais que compõem o domínio de simulação. Em certos casos estas constantes podem ser previamente calculadas, sendo posteriormente agregadas às equações gerais de campo, a exemplo das constantes usadas para cálculo de campo elétrico, indicadas nas equações (33) e (34):

$$C_{E1}|_{i,j,k} = \left(1 - \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) / \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) \quad (33)$$

$$C_{E2}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\Delta \varepsilon_{i,j,k}}\right) / \left(1 + \frac{\sigma_{i,j,k}\Delta t}{2\varepsilon_{i,j,k}}\right) \quad (34)$$

Em (34) o símbolo Δ representa de forma genérica o correspondente incremento espacial Δx , Δy ou Δz .

De forma similar, são calculadas as constantes relativas ao campo magnético, como mostra por exemplo a equação (35):

$$C_{H1}|_{i,j,k} = \left(\frac{\Delta t}{\Delta \mu_{i,j,k}} \right) \quad (35)$$

Outro fato importante a ser considerado durante o desenvolvimento do software, é a existência de índices fracionários representando os incrementos para posição e tempo. Dependendo da linguagem de programação a ser usada, como é o caso por exemplo do Matlab, percebe-se que estes incrementos deverão ser manipulados, uma vez que na simulação os vetores correspondentes são tratados comumente por rotinas do tipo "*loop-for*". Nestes casos são aceitos apenas valores inteiros e maiores que zero para incremento de tempo e espaço, não sendo possível iniciar os cálculos no instante inicial zero, nem na posição espacial zero, além de não ser possível a utilização de índices fracionários (por exemplo $i+1/2$).

Neste trabalho foi considerada uma forma alternativa de simulação para solucionar este problema, usando-se vetores de incremento de espaço e de tempo, ao invés do uso das estruturas clássicas do tipo "*loop-for*", conforme proposto por Ganta et al. (2011). Como exemplo, a equação 36 mostra a forma alternativa proposta para o cálculo de campo magnético na direção do eixo-y:

$$Hy(n1:n2,n11:n21) = Hy(n1:n2,n11:n21) + (Dtg/Dsg)*(Ez(\mathbf{n1+1:n2+1,n11:n21}) - Ez(n1:n2,n11:n21)) ./ (mi(n1:n2,n11:n21)); \quad (36)$$

Pode-se notar que todos os termos da equação (36) possuem a mesma coordenada espacial do termo a ser calculado, exceto a componente de campo elétrico destacada em negrito. Embora esta condição sugira inicialmente que as componentes de campo são calculadas nos mesmos pontos espaciais, ressalta-se que matrizes independentes são geradas para armazenar separadamente valores de campo elétrico e magnético. O termo *Dtg* indica o incremento de tempo na nova notação, enquanto os índices $n1:n2$ e $n11:n21$ indicam os limites iniciais e finais do domínio computacional.

Dessa forma, é possível realizar os incrementos espaciais entre os próprios campos elétricos e magnéticos a cada $1\Delta x$ (ou $1\Delta y$ ou $1\Delta z$), aqui indicados por *Dsg*. Além disso, nota-se que a variável temporal pode ser desconsiderada, já que a cada incremento de tempo na simulação, os valores novos de cada campo são tomados com base nos valores anteriormente gravados nas respectivas matrizes, fazendo valer automaticamente os incrementos de tempo pré-estabelecidos.

Neste trabalho, portanto, usa-se uma sintaxe mista entre a proposta feita por Taflove (2000) e a apresentada em Ganta et al. (2011).

A equação (37) indica a notação utilizada neste trabalho para o cálculo, por exemplo, da componente de campo elétrico na direção do eixo-z incluindo a sintaxe usada na definição das constantes multiplicativas dos campos elétricos e magnéticos além dos incrementos espaciais Dsg e temporais Dtg .

$$\underline{Ez(nxi+1:nxf+1,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1)} = Ce1z.*Ez(nxi+1:nxf+1,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1) + Ce2zx.*(Hy(nxi+1:nxf+1,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1) - \mathbf{Hy(nxi:nxf,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1)}) - Ce2zy.*(Hx(nxi+1:nxf+1,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1) - \mathbf{Hx(nxi+1:nxf+1,nyi:nyf,nzi+1:nzf+1)}) - Ce2zy.*Dsgy.*Js(nxi+1:nxf+1,nyi+1:nyf+1,nzi+1:nzf+1); \quad (37)$$

Novamente apenas os termos destacados em negrito diferenciam-se dos demais pelas suas coordenadas e a variável temporal não aparece. Cada constante indicada é calculada antecipadamente levando em conta as direções de variação dos campos elétrico ou magnéticos relacionados. Equações similares podem ser escritas para todas as outras componentes de campo.

Para facilitar a visualização das matrizes de campo utilizadas nesta representação alternativa, um exemplo de matrizes em 2 dimensões é indicado na figura 4.

Figura 4 - Alteração da disposição matricial dos campos na nova representação (a) Disposição dos campos conforme literatura, (b)-(d) Redistribuição dos campos pela nova representação proposta

Matriz 2D - Disposição dos campos						
	1	2	3	4	5	6
1		Hy12		Hy14		Hy16
2	Hx21	Ez22	Hx23	Ez24	Hx25	Ez26
3		Hy32		Hy34		Hy36
4	Hx41	Ez42	Hx43	Ez44	Hx45	Ez46
5		Hy52		Hy54		Hy56
6	Hx61	Ez62	Hx63	Ez64	Hx65	Ez66

(a)

Matriz 2D - Campo Ez (Nova disposição)			
	1	2	3
1	Antigo Ez22	Antigo Ez24	Antigo Ez26
	Novo Ez11	Novo Ez12	Novo Ez13
2	Antigo Ez42	Antigo Ez44	Antigo Ez46
	Novo Ez21	Novo Ez22	Novo Ez23
3	Antigo Ez62	Antigo Ez64	Antigo Ez66
	Novo Ez31	Novo Ez32	Novo Ez33

(b)

Matriz 2D - Campo Hx (Nova disposição)				Matriz 2D - Campo Hy (Nova disposição)			
	1	2	3		1	2	3
1	Antigo Hx21 Novo Hx11	Antigo Hx23 Novo Hx12	Antigo Hx25 Novo Hx13	1	Antigo Hy12 Novo Hy11	Antigo Hy14 Novo Hy12	Antigo Hy16 Novo Hy13
2	Antigo Hx41 Novo Hx21	Antigo Hx43 Novo Hx22	Antigo Hx45 Novo Hx23	2	Antigo Hy32 Novo Hy21	Antigo Hy34 Novo Hy22	Antigo Hy36 Novo Hy23
3	Antigo Hx61 Novo Hx31	Antigo Hx63 Novo Hx32	Antigo Hx65 Novo Hx33	3	Antigo Hy52 Novo Hy31	Antigo Hy54 Novo Hy32	Antigo Hy56 Novo Hy33

(c)

(d)

Fonte: do autor

Como pode ser observado na figura 4(a), de acordo com a representação proposta por Taflove (2000), a matriz para disposição dos campos elétricos e magnéticos tem várias posições "em branco" as quais devem ser preenchidas com "zeros", sendo portanto, inadequada computacionalmente já que implica maior espaço de armazenamento. Este mesmo problema ocorreria se matrizes independentes de campo elétrico e magnético fossem criadas para as simulações, já que deveriam obedecer ao esquema de coordenadas originalmente proposto.

As readequações indicadas na figura (4.b-d) indicam, por sua vez, que a representação proposta elimina estes espaços vazios das matrizes de campo, otimizando o espaço necessário para armazenamento.

Para garantir que este procedimento seja eficiente os campos devem ser readequados nas respectivas matrizes obedecendo igualmente a nova regra de posicionamento e respeitando, principalmente, os índices de início e término das coordenadas em que os mesmos poderão ser calculados.

3.4.1 Uso de "subgridding" para otimização de processamento

Dada a geometria complexa da região de simulação, o uso de técnicas de "subgridding" é recomendado, tendo como objetivo subdividir a região de simulação de modo não uniforme, usando uma maior discretização do ambiente apenas em regiões nas quais se necessita representar com maior exatidão os pontos analisados.

Neste trabalho considerou-se uma técnica particular de “*subgridding*”, permitindo representar com maior detalhamento tanto o canal da descarga atmosférica quanto os edifícios, otimizando o processamento das informações.

Esta técnica é indicada para otimização do sistema proposto neste trabalho já que o ambiente de simulação deve representar o solo e os edifícios, além da própria descarga atmosférica, com um maior grau de refinamento para sua correta caracterização, enquanto toda a região restante é composta de espaço livre e uma representação menos refinada é suficiente.

Nesse caso, as constantes previamente definidas sem considerar o uso de “*subgridding*”, devem ser redefinidas em função de cada ponto do ambiente de simulação.

Para o cálculo do campo elétrico horizontal $\bar{E}_x$, por exemplo, duas constantes deverão ser redefinidas em função da grade espacial, sendo elas indicadas por $Ce2xy$ e $Ce2xz$, relacionadas às variações de campo magnético $\bar{H}_z$ na direção do eixo y e de campo magnético $\bar{H}_y$ na direção do eixo z , respectivamente.

Usando-se a representação definida para este trabalho a constante $Ce2xy$, por exemplo, é dada por:

$$Ce2xy = \left[\frac{\frac{\Delta t}{\epsilon}}{1 + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{2 \cdot \epsilon}} \right] \cdot \frac{1}{\Delta y} \quad (38)$$

Pode-se notar que a equação (38) depende de Δt (constante para todo o domínio de simulação), de Δy (definido no ponto considerado pela técnica de “*subgridding*”), e da permissividade relativa e condutividade do material (no ponto considerado).

Como exemplo, uma representação parcial bidimensional pode ser usada para visualização das constantes $Ce2xy$ e $Ce2xz$, como mostra a figura 5, já que as mesmas tratam do cálculo do campo elétrico $\bar{E}_x$ que por sua vez depende das variações do campo magnético nas direções y e z , que podem ter diferentes incrementos Δy e Δz .

Figura 5 - Discretização espacial no plano YZ para cálculo do campo elétrico $\vec{E}_x$

Fonte: do autor

Neste caso dois vetores são tomados como referência para definição do sistema computacional, sendo:

- vetor espacial na direção do eixo y indicando a discretização ponto a ponto Δy ;
- vetor espacial na direção do eixo z indicando a discretização ponto a ponto Δz ;

De modo análogo outras constantes deverão ser redefinidas para o cálculo de cada componente de campo, em função dos incrementos espaciais em cada direção.

Para que esta definição das constantes seja feita ponto a ponto no domínio de simulação, alguma lógica de programação adicional foi incluída no código computacional.

Cabe ressaltar que para atender o critério de estabilidade mencionado anteriormente, o incremento de tempo Dtg foi definido com base na menor discretização espacial ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta_{min}$) usada no domínio de simulação, conforme indicado na equação (39).

$$Dtg = \frac{\Delta_{min}}{\sqrt{3}c} \quad (39)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo.

A seguir a figura 6 indica um resumo do código computacional usado para definição das constantes $Ce2xy$ e $Ce2xz$.

 Figura 6 - Lógica computacional para cálculo das constantes em função da discretização

```

a1=Dtg/eps;
b1=1+((sigma.*a1)./2);
c1=a1./b1;
Ce2xy=c1;
for j=1:1:Npgy;
    for k=1:1:Npgz;
        Ce2xy(:,j,k)=Ce2xy(:,j,k)/Dsgy(1,j);
    end;
end;
Ce2xz=c1;
for k=1:1:Npgz;
    Ce2xz(:,k)=Ce2xz(:,k)/Dsgz(1,k);
end;
  
```

Fonte: do autor

No quadro 1 acima os termos $a1$, $b1$, $c1$ são usados pontualmente para calcular as constantes $Ce2xy$ e $Ce2xz$, enquanto eps define a permissividade do meio, Dtg é o incremento temporal base e os termos $Dsgy$ e $Dsgz$ são os vetores que definem a discretização espacial no plano z-y.

A equação (40) a seguir mostra um exemplo de cálculo do campo elétrico $\bar{E}_x$ usando as constantes já definidas e sendo os termos nxi , $nxzf$, nyi , $nyzf$, nzi e $nzzf$ as coordenadas iniciais e finais dos pontos adotados para o cálculo do campo, envolvendo todo o domínio computacional nas três direções.

$$\begin{aligned}
 Ex(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1)= \\
 & Ce1x(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1). * Ex(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1) + \\
 & Ce2xy(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1). * (Hz(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1) - \\
 & Hz(nxi+1:nxzf+1,nyi:nyzf,nzi+1:nzzf+1)) - \\
 & Ce2xz(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1). * \\
 & (Hy(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi+1:nzzf+1) - Hy(nxi+1:nxzf+1,nyi+1:nyzf+1,nzi:nzzf))
 \end{aligned} \tag{40}$$

De modo análogo as outras constantes são redefinidas para o cálculo de cada componente de campo, em função dos incrementos espaciais em cada direção.

3.5 DEFINIÇÃO DOS VALORES DE PERMISSIVIDADE E CONDUTIVIDADE DOS MATERIAIS DOS EDIFÍCIOS E DO SOLO

Para o cálculo dos campos eletromagnéticos é necessário que os valores dos parâmetros relativos a condutividade e permissividade dos materiais utilizados no ambiente de simulação sejam previamente definidos. Estes valores serão usados para representação de diferentes cenários de simulação com o objetivo de estudar a influência do solo e dos edifícios com diferentes características na configuração dos CEM irradiados por descargas atmosféricas.

Análise de algumas pesquisas existentes mostrou que pouca informação está disponível a respeito da permissividade e condutividade do solo e dos edifícios na faixa de frequências de interesse deste trabalho.

Dessa forma, foram adotados valores que podem ser considerados representativos da faixa de valores disponíveis na literatura para a permissividade e a condutividade do solo e dos edifícios. As situações sem edifícios e com edifícios considerados como condutores perfeitos (PEC) também foram avaliadas para efeito de comparação e identificação das situações limites, assim como foram feitas simulações com o solo considerado como condutor perfeito, para efeito de comparação.

Valores adotados em softwares comerciais de simulação eletromagnética, como é o caso do CST - Design Studio Suite, contribuem adicionalmente para a definição dos valores de permissividade e condutividade (CST, 2015; Vieira e Janiszewski, 2013).

3.5.1 Permissividade e condutividade do solo

Nesta análise o solo será considerado plano e homogêneo em toda a área de simulação.

O quadro 1 mostra alguns valores de condutividade e permissividade relativa existentes na literatura consultada.

Quadro 1 - Valores de condutividade e permissividade relativa do solo e as referências correspondentes

Condutividade do solo: σ_{solo} (S/m)	Permissividade relativa do solo: $\epsilon_{\text{r-solo}}$	Referência
2×10^{-4} (mau condutor)	1 a 3	Romero, Piantini, Cooray (2014)
2×10^{-2} (bom condutor)	4 a 30	
1×10^{-4} a 1×10^{-3}	10	Ding, Zhang, Wu (2010)
6×10^{-2}	10	Ishii, Michishita, Hongo (1999)
1×10^{-3} a 1×10^{-2}	1 a 10	Rachidi et al. (1996)
1×10^{-4} a 1×10^{-2}	10	Rubinstein (1996)
PEC (Condutor Elétrico Perfeito)		(Borghetti et al. ,2011; Cooray ,2003; Javor e Rancic, 2009; Javor, 2012b)

Fonte: do autor

Tendo como base os valores do quadro 1, para as simulações neste trabalho o solo foi caracterizado conforme indicado no quadro 2. O solo também foi considerado como condutor elétrico perfeito para analisar uma condição limite.

Quadro 2 - Valores de condutividade e permissividade relativa do solo usados nas simulações

Tipos de solos considerados	Condutividade do solo: σ_{solo} (S/m)	Permissividade relativa do solo: $\epsilon_{\text{r-solo}}$
Solo 1	2×10^{-4}	3
Solo 2	1×10^{-2}	15
Solo 3	PEC (condutor elétrico perfeito)	

Fonte: do autor

3.5.2 Permissividade e condutividade dos edifícios

Dentre as informações disponíveis para caracterização dos parâmetros elétricos dos edifícios, pouco material existe relativo à faixa de frequências de interesse.

A maior parte dos trabalhos encontrados caracterizam os edifícios em frequências bem superiores àquelas contidas no espectro das descargas atmosféricas. Justamente por isso foi comum encontrar os edifícios caracterizados apenas pela sua estrutura metálica, desprezando-se a existência de concreto ou alvenaria, dado que esta condição atendia com boa aproximação as expectativas dos autores (Chen et al., 2010; Buccella, Cristina, Orlandi, 1992).

De modo análogo ao que foi feito para caracterização do solo, os estudos existentes indicam uma possível faixa de valores para caracterização tanto da condutividade quanto da permissividade, conforme pode ser visualizado no quadro 3 apresentado a seguir.

Quadro 3 - Valores de condutividade e permissividade relativa do concreto e correspondentes referências.

Condutividade do edifício: σ -edifício (S/m)	Permissividade relativa do edifício: ϵ_r -edifício	Referência
$2,8 \times 10^{-5}$ a $4,45 \times 10^{-4}$	5,4 a 14,5	Xiao et al. (2014)
1×10^{-2}	3	Pîslaru-Dănescu et al. (2013)
1×10^{-2}	13	Zhang et al. (2008)
-	4,8 a 12,8 ⁽¹⁾	Ogunsola, Reggiani, Sandrolini (2006)
$2,5 \times 10^{-3}$	8,2 ⁽²⁾	Qiwei, Lihua, Cheng (2002)
$2,3 \times 10^{-2}$	6	Hintamai e Hokierti (2004)
$5,4 \times 10^{-4}$	13	Villain, Ihamouten, Dérobert (2011)
PEC (condutor elétrico perfeito)		(Borghetti et al. ,2011; Piantini et al., 2010; Borghetti at al., 2013; Metwally e Heidler, 2008)
⁽¹⁾ Variação dos valores em função da umidade do concreto.		
⁽²⁾ O valor 24,97 foi citado em Hintamai e Hokierti (2004) como referência para frequência inferior.		

Fonte: do autor

Embora nem todos os trabalhos indicados (Pîslaru-Dănescu et al., 2013; Qiwei, Lihua, Cheng, 2002; Hintamai e Hokierti, 2004) tenham os valores determinados na faixa de frequências do espectro das descargas atmosféricas, servem de base para identificar a tendência de magnitude dos parâmetros elétricos, para frequências um pouco acima do espectro a ser avaliado.

Igualmente ao que ocorre para o solo, é comum encontrar trabalhos representando os edifícios como condutores perfeitos (Piantini et al., 2007; Borghetti at al., 2013; Borghetti et al., 2011; Chen et al., 2010).

O quadro 4 indica os valores considerados neste trabalho para representação dos edifícios nas simulações desenvolvidas.

Quadro 4 - Valores de condutividade e permissividade relativa do concreto usados nas simulações

Tipos de edifícios considerados	Condutividade do edifício: σ -edifício (S/m)	Permissividade relativa do edifício: ϵ_r -edifício
Edifício 1	1×10^{-5}	5
Edifício 2	5×10^{-3}	20
Edifício 3	PEC (condutor elétrico perfeito)	

Fonte: do autor

3.6 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA DESCARGA ATMOSFÉRICA (D.A.)

Dois aspectos foram considerados para caracterização da descarga atmosférica considerada nas simulações deste trabalho.

O primeiro aspecto diz respeito à caracterização da corrente na base do canal da D.A.. Neste trabalho optou-se por considerar uma descarga subsequente.

Conforme apresentado em (Vieira e Janiszewski, 2013; Vieira e Janiszewski, 2015), os edifícios mostram efeitos similares, para campo elétrico vertical e campo magnético, nos casos de primeira descarga e descarga subsequente. Por outro lado, com relação ao campo elétrico horizontal, as descargas subsequentes mostraram efeitos mais acentuados, principalmente com edifícios de maior condutividade.

A soma de duas funções de Heidler foi usada para representação da descarga subsequente, com parâmetros considerados de acordo com aqueles comumente utilizados na literatura (Borghetti et al., 2013; Silveira, Conti, Visacro, 2010; Conti e Visacro, 2007): $I_{01}=10,7$ kA, $\tau_{11}=0,25$ μ s, $\tau_{21}=2,5$ μ s, $n_1=2$, $\eta_1 = 0,6394$, $I_{02}=6,5$ kA, $\tau_{21}=2,1$ μ s, $\tau_{22}=230$ μ s, $n_2=2$, $\eta_2=0,8736$.

A figura 7 mostra as curvas de cada uma das funções de Heidler geradas a partir dos parâmetros indicados anteriormente, e a curva em destaque representa a forma de onda da descarga subsequente utilizada nas simulações.

O segundo aspecto está ligado à caracterização da corrente da D.A. ao longo do canal, definindo a velocidade de propagação e a existência ou não de atenuação.

Considerando o modelo MTLE, o quadro 5 a seguir indica alguns valores típicos de altura do canal da descarga atmosférica, fatores de atenuação e velocidade de propagação da corrente encontrados na literatura, assim como alguns casos sem atenuação no canal para efeito de comparação.

Quadro 5 - Parâmetros para caracterização da D.A. ao longo do canal e referências correspondentes

Altura do canal (m)	5000	4000	1500	1500	2300	4500	2500	1200
Coeficiente de atenuação	2000	2000	2000	Sem	Sem	2600	Sem	3000
Velocidade da corrente (m/s)	1×10^8	$1,5 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8$	$1,5 \times 10^8$	$1,25 \times 10^8$	$1,3 \times 10^8$	$1,1 \times 10^8$	1×10^8
Referências	Cooray (2003)	Romero, Piantini, Cooray (2014)	Mimouni et al. (2007)	Borghetti et al. (2013)	Jiménez e Mejía (2013)	Javor (2010)	Ding, Zhang, Wu (2010)	Yang et al. (2004)

Fonte: do autor

Assim sendo, com base na faixa de valores usados em estudos existentes e indicados no quadro 6, o valor escolhido foi $v_c = 1,5 \times 10^8$ (m/s), sendo suposto um canal de 1800m de altura, suficiente para análise do comportamento dos campos eletromagnéticos irradiados.

As simulações foram desenvolvidas considerando a corrente do canal sem e com atenuação, caso em que foi adotado um fator de atenuação $\lambda = 2000\text{m}$.

Nas simulações realizadas considerando a corrente com atenuação as formas de onda obtidas não foram muito adequadas para a comparação das situações com e sem edifícios, para análise da influência de edificações nos campos eletromagnéticos. Isto porque embora as formas de onda de campo elétrico tenham indicado o comportamento geral esperado, não apresentaram um pico definido dentro de um intervalo de tempo razoável de simulação, adotado neste trabalho como $18\mu\text{s}$, maior do que de estudos disponíveis na literatura que adotam tempos da ordem de $10\mu\text{s}$ ou menores (Jiménez e Mejía, 2013; Borghetti et al., 2013; Romero, Piantini, Cooray, 2014).

Como, por outro lado, os campos devidos à corrente da descarga sem atenuação apresentam um valor de pico definido na parte inicial das formas de onda e permitem uma melhor comparação entre os casos com e sem edifícios, os

resultados e respectiva análise apresentados nos capítulos a seguir referem-se a esta representação (corrente definida pelo modelo TL).

Vale observar que alguns casos de simulações considerando a corrente com atenuação foram analisados, sendo feita a comparação das formas de onda com e sem edifícios segundo um critério de “fator de escala”. Os resultados indicaram conclusões similares àsquelas obtidas pela comparação dos valores de pico das formas de onda sem atenuação.

3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Tendo-se definido todos os parâmetros do domínio de simulação e do código computacional FDTD desenvolvido neste trabalho, o procedimento foi validado.

Inicialmente foi feita uma validação qualitativa, considerando apenas o comportamento dos campos eletromagnéticos obtidos pelo modelo proposto, comparado ao dos resultados existentes na literatura. Foi considerada a variação de parâmetros tais como a existência ou não de atenuação da corrente ao longo do canal da D.A., o valor da condutividade do solo e a incidência da descarga atmosférica em estruturas altas.

Posteriormente foi feita uma validação quantitativa do modelo, a partir da constatação de valores das componentes verticais e horizontais de campo elétrico, com e sem a presença de edifícios.

Os resultados dessas validações são apresentados no Apêndice A, com os respectivos comentários.

4 Efeitos dos edifícios - Configuração básica

A ferramenta computacional desenvolvida foi utilizada para o cálculo das componentes do campo elétrico e magnético, inicialmente numa pequena região típica urbana.

4.1 CONFIGURAÇÃO ADOTADA

Foram considerados sete pontos distribuídos ao redor de três edifícios, próximos ao ponto de incidência da D.A., conforme mostra a figura 8 a seguir. Os pontos em que os campos eletromagnéticos são calculados, estão indicados por P1 a P7 e a posição da descarga atmosférica está representada por DA. Em todos os sete pontos os campos são calculados a uma altura de dez metros do solo. Os edifícios E1, E2 e E3 têm área da base igual a 25mx25m e alturas $H_b=15\text{m}$ e $H_b=45\text{m}$.

Figura 8 - Primeira configuração para estudo do efeito de edificações

Os pontos P2 e P6 permitem observar o efeito “na frente” dos edifícios, enquanto que P3 e P5 estão situados “entre” os edifícios. O ponto P1 está “ao lado” de um edifício e P4 e P7 permitem visualizar o efeito “atrás” dos edifícios.

Simulações prévias desenvolvidas nesta pesquisa (Vieira e Janiszewski, 2014; Vieira e Janiszewski, 2015) mostram que, exceto para alguns casos de campo elétrico horizontal, construções baixas com altura igual a $H_b=5\text{m}$, praticamente não afetam os campos irradiados pela descarga atmosférica.

Por outro lado, edifícios mais altos que 45m, mostram efeitos mais acentuados, mas com o mesmo comportamento, como verificado em simulações adicionais com edifícios de 80m. Para a configuração assim definida e com base nos quadros 3 e 5 apresentados no capítulo 3, um conjunto de simulações foi desenvolvido com o objetivo de mostrar a influência individual e/ou conjunta de cada parâmetro do solo e dos edifícios.

O ambiente de simulação conta com a técnica de "*subgridding*" para melhoria de desempenho e os limites do domínio são iguais a 4500mx4500mx1800m, nas direções (x, y e z) do sistema de coordenadas cartesianas, respectivamente.

A plataforma computacional conta com um processador Intel Core I5 - Quarta Geração com 16GB de memória RAM e cada simulação, nestas condições, necessita aproximadamente de 5 horas para finalização.

É possível notar que os limites do domínio computacional estão distantes dos pontos P1 a P7 (onde são tomados os valores de campo irradiado pela D.A.), para garantir que reflexões indesejadas não influenciem os valores resultantes de campo calculados, já que neste caso a técnica de camada absorvedora não foi implementada.

Se por um lado este processo requer um maior volume computacional para desenvolver as análises, aumentando por consequência o tempo de simulação, o código computacional fica bastante simplificado e pode-se garantir que nenhuma reflexão influencie os resultados dentro do tempo de observação desejado.

Nesta primeira configuração, 21 casos distintos foram simulados de acordo com o quadro 6 a seguir.

Quadro 6 - Parâmetros usados nas simulações

Edifícios → Solo ↓	Sem Edifícios	Edifício - Material 1 $\sigma_E=1 \times 10^{-5}$ (S/m) $\epsilon_{psE}=5$		Edifício - Material 2 $\sigma_E=5 \times 10^{-3}$ (S/m) $\epsilon_{psE}=20$		Edifício - Material 3 (PEC)	
		Hb=15m	Hb=45m	Hb=15m	Hb=45m	Hb=15m	Hb=45m
Solo 1 ($\epsilon_{psS}=3$; $\sigma_S=2 \times 10^{-4}$ S/m)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Solo 2 ($\epsilon_{psS}=15$; $\sigma_S=1 \times 10^{-2}$ S/m)	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14
Solo 3 (PEC)	Caso 15	Caso 16	Caso 17	Caso 18	Caso 19	Caso 20	Caso 21
σ_E : condutividades dos edifícios; σ_S : condutividade do solo; ϵ_{psE} : permissividades dos edifícios; ϵ_{psS} : permissividade do solo; PEC: condutor elétrico perfeito; Hb= altura dos edifícios.							

Fonte: do autor

Conforme já discutido anteriormente, foi adotada a descarga atmosférica subsequente indicada na figura 7, com velocidade igual a $1,5 \times 10^8$ m/s, sem atenuação e um canal com 1800m de altura.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO - CONFIGURAÇÃO BÁSICA

Para melhor visualizar o comportamento dos campos sob a influência dos edifícios (de alturas 15m e 45 m) os resultados das simulações são apresentados a seguir em duas formas alternativas: gráficos de barras e tabelas. Essas duas formas de apresentação resultaram da análise das formas de onda, com e sem edifícios, que são apresentadas no Apêndice B deste trabalho. Os resultados referem-se às componentes x, y e z do campo elétrico e x e y do campo magnético.

Os gráficos de barras indicam os valores de pico positivos e/ou negativos das formas de onda, em cor cinza para a situação sem edifícios (N_ED) – valores representados por PXNB (X é um algarismo indicando o ponto considerado) - e na cor preta com edifícios (ED) – valores representados por PXB (novamente X indica o ponto considerado). Nos gráficos o tipo de edifício é representado por E1 ($\epsilon_r=5$, $\sigma=10^{-5}$ S/m), E2 ($\epsilon_r=20$, $\sigma=5 \times 10^{-3}$ S/m) e EP (condutor elétrico perfeito - PEC). S1, S2 e SP representam, respectivamente, solo tipo 1 ($\epsilon_r=3$, $\sigma=2 \times 10^{-4}$ S/m), solo tipo 2 ($\epsilon_r=15$, $\sigma=10^{-2}$ S/m) e solo condutor perfeito (PEC).

As tabelas 1 a 5 foram construídas apresentando-se, para cada ponto, o valor referente à relação entre os valores de pico das formas de onda com e sem edifícios, quando estas apresentam mesmo comportamento. Assim, um valor maior do que 1,00, positivo, indica que houve aumento do valor de pico do campo, causado pela presença dos edifícios, sem ocorrer inversão; do mesmo modo, um valor negativo indica inversão. Quando a forma de onda apresenta uma excursão inicial com polaridade oposta, o valor de pico da excursão é apresentado como porcentagem do valor de pico principal (que aparece após essa excursão inicial) e o fato é indicado pelo símbolo * (excursão negativa em forma de onda positiva) e ** (excursão positiva em forma de onda negativa). A presença de oscilações é indicada nas tabelas pelo símbolo #.

Ainda, no caso de a forma de onda não apresentar um pico definido dentro do intervalo de simulação (fato observado em algumas situações referentes às componentes x e y do campo elétrico), a tabela apresenta a relação entre o valor do

campo com edifícios no instante $t=18\mu s$ (final da simulação) e o valor de pico do campo sem edifícios. Essa situação é indicada pelo símbolo ♦.

Considerando a posição do ponto de incidência da D.A., a componente y do campo elétrico (E_y) e a componente x do campo magnético (H_x) sem edifícios têm valor nulo nos pontos P2, P3 e P4; devido à presença de edifícios, surge nesses pontos um valor muito pequeno, mas não é possível representá-lo por uma relação na tabela e isso é indicado pelo símbolo §.

4.2.1 Campo elétrico vertical- Ez

A figura 9 apresenta o gráfico de barras dos valores de Ez e a tabela 1 mostra a relação entre os valores com e sem edifícios nos sete pontos considerados.

Os gráficos de barras permitem uma rápida visão do comportamento do campo, enquanto que a análise da tabela 1 permite uma discussão mais detalhada.

Tabela 1 - Valores relativos Ez com edif./ Ez sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC

	EZ - EDIFÍCIO 1 - 15m							EZ - EDIFÍCIO 1 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,83	0,89	0,70	0,80	0,72	0,87	0,78	0,77	0,83	0,68	0,75	0,67	0,79	0,74
S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,83	0,89	0,70	0,80	0,72	0,87	0,78	0,77	0,82	0,68	0,75	0,67	0,79	0,74
SP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,83	0,89	0,70	0,80	0,72	0,87	0,78	0,77	0,82	0,68	0,75	0,67	0,79	0,74

	EZ - EDIFÍCIO 2 - 15m							EZ - EDIFÍCIO 2 - 45m						
	P1	P3	P4	P5	P6	P7		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
	0,72	0,81	0,49	0,67	0,52	0,77	0,63	0,38	0,58	0,15	0,27	0,19	0,49	0,22
S2	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
	0,71	0,80	0,49	0,66	0,51	0,77	0,62	0,33	0,53	0,04	0,25	0,07	0,44	0,16
SP	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
	0,72	0,80	0,49	0,66	0,51	0,77	0,62	0,33	0,52	0,04	0,25	0,07	0,44	0,17

	EZ - EDIFÍCIO PEC - 15m							EZ - EDIFÍCIO PEC - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,72	0,81	0,49	0,67	0,52	0,77	0,63	0,36	0,57	0,14	0,27	0,17	0,47	0,22
S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,72	0,80	0,49	0,66	0,51	0,77	0,62	0,33	0,53	0,04	0,25	0,07	0,44	0,16
SP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,72	0,80	0,49	0,66	0,51	0,77	0,62	0,33	0,52	0,04	0,25	0,07	0,44	0,17

Fonte: do autor

Figura 9 - Valores de pico de Ez nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC

Fonte: do autor

Verifica-se na tabela 1 que em todas as situações e em todos os pontos ocorre uma redução no valor de Ez, sem inversão de polaridade. A redução é maior com

edifícios mais altos e mais condutivos. Nota-se também que quando a condutividade dos mesmos aumenta, seu efeito tende a aproximar-se do efeito de edifícios PEC.

As características do solo não têm influência significativa sobre o efeito dos edifícios, com exceção dos pontos entre edifícios (P3 e P5), em que com edifícios mais altos e mais condutivos a redução é bem maior com solo mais condutor.

A menor redução (da ordem de 10%) é observada em frente à descarga (pontos P2 e P6), com edifícios pouco condutores e mais baixos (15m). A máxima redução observada é maior do que 90%, entre edifícios (pontos P3 e P5), com edifícios mais condutivos e mais altos e com solo mais condutivo. Os pontos P4 e P7 (atrás dos edifícios) apresentam redução significativa de valor semelhante, sendo um pouco maior em P7. No ponto P1 (“ao lado” de edifício) a redução é semelhante à do ponto P6 para edifícios mais baixos ou edifícios de 45m pouco condutores e torna-se maior do que a do ponto P6 para edifícios mais altos e mais condutores.

Os gráficos de barras da figura 9 auxiliam a visualização da redução geral do campo elétrico vertical em função da presença dos edifícios (barras na cor preta) em relação à situação sem edifícios (barras na cor cinza), sendo que as maiores reduções ocorrem nos pontos P3 e P5, seguidos pelo ponto P4, indicando respectivamente as posições entre e após os edifícios.

O efeito dos edifícios pode ser explicado pela deformação da configuração do campo causada pela imposição de condições de contorno nas interfaces ar-edifício, como é mostrado na figura 10, que apresenta o vetor campo elétrico no plano xz que passa pelos pontos P2, P3 e P4 (em frente à descarga atmosférica), no instante $t=18\mu s$. Pode ser visto o perfil dos edifícios 1 e 2, considerados como tipo 2 com 45m de altura e o solo é PEC. Observe-se, por exemplo, a redução do campo elétrico vertical E_z no ponto P2, devido à mudança de direção do vetor causada pelo edifício E1 e a forte redução do valor de E_z entre os edifícios (ponto P3).

Figura 10 - Vetor campo elétrico visto em elevação, no plano xz passando pelos pontos P2, P3 e P4. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC.

Fonte: do autor

4.2.2 Campo elétrico horizontal – Ex

A figura 11 e a tabela 2 mostram o efeito dos edifícios sobre a componente x do campo elétrico. Pode-se agora observar que o comportamento é muito mais complexo do que o da componente vertical: dependendo da condição particular, pode ocorrer inversão, aparecimento de excursão de polaridade oposta, oscilação e redução ou aumento do campo. Nos casos em que a excursão “oposta” já ocorre sem a presença de edifícios (como previsto para as condições do estudo e que pode ser observada nos gráficos de barras), ela não aparece na tabela.

Figura 11 - Valores de pico de Ex nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC

Fonte: do autor

Tabela 2 - Valores relativos Ex com edif./ Ex sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC

	EX - EDIFÍCIO 1 - 15m							EX - EDIFÍCIO 1 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,94	1,74	♦	♦	0,86	2,32	♦	0,81	1,41	1,23	♦	0,63	1,82	♦
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,94	1,46	-0,56	♦	0,86	2,06	♦	0,81	1,29	1,13	♦	0,64	1,62	♦
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	0,94	1,43	♦	♦	0,86	1,97	♦	0,81	1,27	1,17	♦	0,66	1,54	♦
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	EX - EDIFÍCIO 2 - 15m							EX - EDIFÍCIO 2 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,91	2,32	-2,22	-3,66	0,74	3,25	-3,09	0,79	2,18	-0,43	-2,23	0,47	2,87	-1,43
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,88	1,83	-1,24	-4,06	0,71	2,82	-3,22	0,76	1,76	#	#	0,46	2,57	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	0,88	1,78	-0,96	-3,54	0,72	2,69	-2,85	0,76	1,71	#	#	0,47	2,46	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	EX - EDIFÍCIO PEC - 15m							EX - EDIFÍCIO PEC - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,91	2,32	-2,16	-3,64	0,75	3,25	-3,09	0,79	2,17	-0,57	-2,23	0,47	2,87	-1,43
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,89	1,82	-1,13	-4,10	0,73	2,81	-3,24	0,77	1,77	#	#	0,48	2,58	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	0,88	1,78	-0,89	-3,56	0,72	2,69	-2,86	0,76	1,74	#	#	0,48	2,49	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: do autor

♦ forma de onda diferente do padrão geral, com inversão e sem valor de pico definido; considera-se na tabela a relação entre o valor com edifícios em $t=18\mu s$ e o valor de pico sem edifícios.

forma de onda com oscilação.

A análise dos valores da tabela 2 mostra que nos pontos P1 e P5 sempre ocorre redução de Ex, praticamente independente do tipo de solo, mais efetivamente com edifícios mais condutivos e mais altos.

Nos pontos P2 e P6 ocorre sempre um aumento do valor de Ex, menor com solos mais condutivos. Com edifícios de maior condutividade o aumento é maior, e sendo praticamente o mesmo com edifícios tipo 2 e PEC.

Nos pontos “atrás” de edifícios, P4 e P7, ocorre inversão com aumento de valor, exceto em P7 para edifícios de 45m de baixa condutividade (em que ocorre redução). O efeito varia pouco com o tipo de solo e apenas a mudança de edifícios

do tipo 1 para tipo 2 causa alteração no efeito: edifícios de maior condutividade ou edifícios PEC apresentam o mesmo efeito. Finalmente, no ponto P3 o comportamento de E_x com edifícios é bastante complexo, apresentando inversão, exceto com edifícios de 45m pouco condutivos. Aumentar a condutividade do solo tende a mudar o efeito de aumento para redução dos valores de campo. Novamente, edifícios do tipo 2 e PEC causam efeitos bastante semelhantes.

A tabela 2 mostra, ainda, que para edifícios mais altos e mais condutivos e solos mais condutivos surgem oscilações nos pontos P3, P4 e P7.

O comportamento de E_x e, em especial, as inversões são visíveis na figura 12 que mostra o vetor campo elétrico em torno dos edifícios PEC de 45 m, no plano xy à altura de 10m acima do solo PEC, no instante $t=18\mu s$. Pode-se observar, por exemplo, que devido às condições de contorno introduzidas pelos edifícios (vetor E normal às suas paredes), a nova configuração de campo elétrico causa a inversão de E_x em P3, P4 e P7, aumento de E_x em P2 e P6 e redução em P1 e P5.

Figura 12 - Vetor campo elétrico em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios PEC com altura 45 m, solo PEC

Fonte: do autor

As maiores relações de aumento de E_x são observadas em P4, com edifícios mais condutivos de altura 15m (em torno de 4 vezes). A maior redução de E_x é observada no ponto P5 com edifícios mais altos e mais condutivos (cerca de 50% no máximo).

4.2.3 Campo elétrico horizontal – Ey

Os resultados referentes à componente y do campo elétrico estão apresentados na figura 13 e na tabela 3. Observa-se, tal como no caso de Ex, um comportamento bastante complexo.

Tabela 3 - Valores relativos Ey com edif./ Ey sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC

	EY - EDIFÍCIO 1 - 15m							EY - EDIFÍCIO 1 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-5,69♦	§	§	§	-2,17	0,85	0,49	-3,43♦	§	§	§	1,02	0,71	0,27
	-	-	-	-	-	* 13%	* 124%	* 10%	-	-	-	* 29%	* 14%	* 201%
S2	-4,80♦	§	§	§	-1,74	0,88	0,44	-2,91♦	§	§	§	0,92	0,76	0,21
	-	-	-	-	-	* 1%	-	* 2%	-	-	-	* 19%	* 1%	* 250%
SP	-4,51♦	§	§	§	-1,66	0,89	0,51	-2,73♦	§	§	§	1,00	0,78	0,33
	-	-	-	-	-	-	-	* 2%	-	-	-	* 18%	-	* 147%
	EY - EDIFÍCIO 2 - 15m							EY - EDIFÍCIO 2 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-7,75	§	§	§	-3,02	0,78	0,18	-5,81	§	§	§	-0,90	0,45	-0,69
	-	-	-	-	-	* 11%	* 277%	-	-	-	-	** 72%	* 18%	-
S2	-6,63	§	§	§	-2,50	0,80	0,12	-4,95	§	§	§	-1,28	0,55	-0,73
	-	-	-	-	-	* 1%	* 121%	-	-	-	-	** 2%	* 1%	-
SP	-6,12	§	§	§	-2,25	0,81	0,19	-4,56	§	§	§	-1,03	0,58	-0,61
	-	-	-	-	-	-	* 42%	-	-	-	-	** 2%	-	-
	EY - EDIFÍCIO PEC - 15m							EY - EDIFÍCIO PEC - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	-7,75	§	§	§	-3,02	0,78	0,18	-5,81	§	§	§	-0,91	0,45	-0,70
	-	-	-	-	-	* 9%	* 265%	* 27%	-	-	-	** 66%	* 18%	-
S2	-6,63	§	§	§	-2,51	0,81	0,14	-5,07	§	§	§	-1,41	0,57	-0,72
	-	-	-	-	-	-	* 57%	* 1%	-	-	-	-	-	-
SP	-6,14	§	§	§	-2,26	0,81	0,20	-4,76	§	§	§	-1,13	0,59	-0,64
	-	-	-	-	-	-	* 27%	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: do autor

- § valores nulos sem edifícios e valores muito pequenos com edifícios; não é possível apresentar relação de valores
- ♦ forma de onda diferente do padrão geral, com inversão e sem valor de pico definido; considera-se na tabela a relação entre o valor com edifícios em $t=18\mu s$ e o valor de pico sem edifícios.
- * porcentagem representativa da relação entre o valor de pico da excursão negativa inicial e o valor de pico principal da forma de onda, ambos com edifícios.

****** quando ocorre inversão, porcentagem representativa da relação entre o valor de pico da excursão positiva inicial e o valor de pico principal da forma de onda (negativo), ambos com edifícios.

Inicialmente, numa análise global da tabela 3, observa-se que edifícios tipo 2 (mais condutivos) e PEC, apresentam efeitos praticamente iguais, mas bem distintos daqueles dos edifícios tipo 1 (baixa condutividade).

Analisando os valores referentes ao ponto P1, ao lado do edifício, vê-se que ocorre inversão de E_y (originalmente negativo) e aumento acentuado de seu valor devido à presença dos edifícios; o aumento é menor com edifícios mais altos e solos mais condutivos. Com edifícios mais condutivos o aumento é maior, mas não há diferença entre edifícios tipo 2 e PEC.

Com a configuração de campos alterada pela presença de edifícios, nos pontos P2, P3 e P4 surgem na simulação valores muito pequenos de E_y , dificilmente observáveis na figura 12 do item anterior ou na figura 14 a ser apresentada adiante. Dado que sem edifícios tais valores são nulos, não é possível apresentar uma relação na tabela 3.

Com referência ao ponto P5, para edifícios de 15m observa-se que ocorre aumento significativo (até 3 vezes) com inversão. Com edifícios de 45m, observa-se aumento ou redução, ambos pequenos, excursão negativa, indicada por *, e, no caso de edifícios mais condutivos, inversão. Nesse caso, a forma de onda (negativa) apresenta uma excursão para o lado positivo, indicada por **.

No ponto P6 pode-se notar o aparecimento de excursão negativa em certos casos e redução de E_y . A redução é maior com edifícios mais altos.

Finalmente, no ponto P7 ocorre redução e, para edifícios mais condutivos com 45m, ocorre também inversão. Observa-se ainda o aparecimento de excursão negativa em alguns casos.

Os maiores aumentos de E_y são observados no ponto P1, atingindo um fator próximo a 8 vezes, no caso de edifícios tipo 1 ou PEC de 15m de altura e solo menos condutivo. A definição dos maiores valores de redução fica complexa pois normalmente nessas situações ocorre excursão oposta significativa.

Figura 13 - Valores de pico de Ey nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC

Fonte: do autor

Para ilustração da análise do comportamento de Ey sob a influência das edificações a figura 14 mostra a configuração do vetor campo elétrico horizontal a 10m do solo, no instante $t=18\mu s$, com edifícios tipo 2, de 45m, e solo PEC. Na figura 12, que

considera edifícios PEC, praticamente o mesmo comportamento pode ser observado, mas com campo elétrico nulo no interior dos mesmos.

Figura 14 - Vetor campo elétrico em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC

Fonte: do autor

4.2.4 Campo magnético horizontal – H_x

A figura 15 e a tabela 4 mostram, respectivamente, os valores de pico positivo e negativo de H_x em forma de gráfico de barras e a relação entre os valores de pico de H_x com e sem edifícios.

Figura 15 - Valores de pico de Hx nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC

Fonte: do autor

Tabela 4 - Valores relativos Hx com edif./ Hx sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC

	HX - EDIFÍCIO 1 - 15m							HX - EDIFÍCIO 1 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,98	§	§	§	0,99	1,00	1,00	0,94	§	§	§	0,98	1,00	0,99
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,98	§	§	§	0,99	1,00	0,99	0,93	§	§	§	1,01	1,00	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	* 7%	-	-	-	-	-	-
SP	0,98	§	§	§	0,99	1,00	0,99	0,93	§	§	§	1,03	1,00	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	* 8%	-	-	-	-	-	-

	HX - EDIFÍCIO 2 - 15m							HX - EDIFÍCIO 2 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,98	§	§	§	1,00	1,00	1,00	0,98	§	§	§	1,00	0,98	1,00
	-	-	-	-	-	-	-	* 52%	-	-	-	-	-	-
S2	0,97	§	§	§	1,01	0,98	0,98	0,99	§	§	§	1,10	0,98	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	* 98%	-	-	-	-	-	-
SP	0,98	§	§	§	1,00	1,00	0,99	0,99	§	§	§	1,10	0,99	0,99
	-	-	-	-	-	-	-	* 100%	-	-	-	-	-	-

	HX - EDIFÍCIO PEC - 15m							HX - EDIFÍCIO PEC - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,99	§	§	§	1,08	0,88	0,78	0,96	§	§	§	1,20	0,74	0,61
	-	-	-	-	-	-	-	* 48%	-	-	-	-	-	-
S2	0,96	§	§	§	1,14	0,84	0,74	0,97	§	§	§	1,50 #	0,71	0,56
	-	-	-	-	-	-	-	* 99% #	-	-	-	-	-	-
SP	0,98	§	§	§	1,17	0,82	0,70	1,02	§	§	§	1,69 #	0,68	0,52
	-	-	-	-	-	-	-	* 96% #	-	-	-	-	-	-

Fonte: do autor

§ valores nulos sem edifícios e valores muito pequenos com edifícios; não é possível apresentar relação de valores

* porcentagem representativa da relação entre o valor de pico da excursão negativa inicial e o valor de pico principal da forma de onda, ambos com edifícios.

forma de onda com oscilação.

Observando a tabela 4, verifica-se que os edifícios tipo 1 têm efeito muito pequeno, enquanto que edifícios PEC causam grande deformação na configuração de campo magnético pela imposição da condição de contorno $H_n=0$ nas suas paredes. Nesse caso, com maior intensidade para edifícios de 45m, ocorre redução de Hx nos pontos P6 e P7 (cerca de 50% no máximo) e aumento em P5 (cerca de 70% no máximo). Tais fatos podem ser vistos na figura 16, que mostra o vetor campo magnético horizontal em torno dos edifícios de 45m, a 10m do solo, em $t=18\mu s$, com solo PEC. Observe-se neste caso que o campo magnético é nulo no interior dos edifícios.

À descontinuidade da componente tangencial do campo magnético estão associadas correntes superficiais nas paredes dos edifícios. Simulações adicionais mostraram que as oscilações dessas correntes são responsáveis pelas oscilações observadas em H_x e H_y .

Figura 16 - Vetor campo magnético em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios PEC com altura 45 m, solo PEC.

Fonte: do autor

A diferença de comportamento com edifícios não condutores perfeitos pode ser observada na figura 17 que considera edifícios do tipo - Material 2. A configuração de campo magnético, neste caso, tem alteração muito pequena, resultando efeitos de menor intensidade.

Figura 17 - Vetor campo magnético em torno dos edifícios no plano xy a 10 m do solo. Edifícios tipo 2 com altura 45 m, solo PEC.

Fonte: do autor

4.2.5 Campo magnético horizontal – Hy

Os resultados das simulações são vistos na figura 18 e na tabela 5.

Tabela 5 - Valores relativos Hy com edif./ Hy sem edif. nos pontos P1 a P7. S1, S2, SP: solo 1, solo 2 e solo PEC

	HY - EDIFÍCIO 1 - 15m							HY - EDIFÍCIO 1 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	1,00	1,01	1,00	0,99	1,00	1,01	0,99	1,01	1,03	0,99	0,98	1,01	1,04	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	1,00	1,01	1,00	0,99	1,00	1,01	0,99	1,01	1,02	0,99	0,98	1,01	1,03	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,01	0,99	1,01	1,02	1,00	0,98	1,02	1,03	0,98
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	HY - EDIFÍCIO 2 - 15m							HY - EDIFÍCIO 2 - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,02	0,99	1,03	1,15	1,01	1,00	1,03	1,25	0,97
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,99	1,02	1,02	1,01	0,98	1,02	1,00	0,99	1,20	#1,17	#1,08	0,97	#1,29	#1,01
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	1,00	1,01	1,00	0,99	1,00	1,01	0,99	1,01	1,19	#1,17	#1,06	1,00	#1,28	#0,99
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	HY - EDIFÍCIO PEC - 15m							HY - EDIFÍCIO PEC - 45m						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
S1	0,83	1,04	1,09	1,06	0,69	1,05	1,03	0,69	1,21	1,22	1,18	0,48	1,29	1,05
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	0,79	1,07	1,16	1,12	0,64	1,06	1,05	0,63	1,25	# 1,49	# 1,35	0,41	#	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SP	0,76	1,07	1,16	1,12	0,59	1,06	1,05	0,58	#	# 1,61	# 1,38	0,35	#	#
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: do autor

forma de onda com oscilação.

Analogamente ao observado na análise de Hx, os edifícios têm pouco efeito sobre Hy, exceto quando são tipo 2 e PEC, com efeito mais intenso para esses últimos.

Este fato pode ser visualizado na figura 16 (apresentada no item 4.2.4), observando que a componente Hy: tem redução no ponto P5 e aumento nos pontos P6 e P7, contrariamente ao que se observa com relação a Hx. Ainda na mesma figura nota-se que a nova configuração de campo causa redução de Hy no ponto P1, como aparece na tabela 5.

As oscilações estão presentes no caso de edifícios mais altos e mais condutivos, com solos também mais condutivos.

A maior redução é observada no ponto P5: 65% com edifício PEC de 45m e solo PEC. Nos pontos em que ocorre oscilação aparecem os maiores aumentos, com um máximo de 61% no ponto P3, com edifícios PEC de 45m e solo PEC.

Figura 18 - Valores de pico de Hy nos pontos P1 a P7 sem edifícios (N_ED) e com edifícios (ED). S1, S2 e SP: solos 1,2 e PEC; E1, E2 e EP: edifícios tipo 1, 2 e PEC

Fonte: do autor

Desse modo 16 quarteirões foram considerados para conter os 128 lotes nos quais os edifícios foram distribuídos, totalizando uma área de análise de aproximadamente um quarto de quilômetro quadrado, conforme indica a figura 20.

Figura 20 - Segunda configuração para estudo do efeito global de edificações

Fonte: do autor

Para representar esta região de interesse optou-se por definir aproximadamente 40% dos lotes com 51 edifícios de 45m de altura (indicados em amarelo), e outros 40% com 51 edifícios de 75m de altura (indicados em azul), restando então 20% dos lotes sem edifícios (indicados em branco), o que auxilia a caracterização de regiões

urbanas de modo geral. Como se pode observar na figura 20, todos os edifícios são considerados com 20m de frente por 40m de profundidade.

Neste novo conjunto de simulações tanto as características elétricas do solo quanto dos edifícios foram mantidas iguais em todas as situações avaliadas, com valores indicados na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Permissividade relativa e condutividade elétrica do solo e dos edifícios

Características elétricas	Solo	Edifícios
Permissividade relativa	10	12
Condutividade	2×10^{-3} (S/m)	1×10^{-4} (S/m)

Fonte: do autor

Ressalta-se que em todas as simulações o solo foi suposto plano e homogêneo em todo o domínio de simulação.

Foram considerados 28 pontos de incidência das descargas atmosféricas, destacados em vermelho na figura 20.

Ressalta-se que os 28 pontos foram distribuídos de modo aleatório entre os 128 lotes, a partir de um sorteio de 30 pontos iniciais, dos quais 2 resultaram em repetição.

Pode-se perceber que em sua maioria as descargas atmosféricas são supostas atingindo o topo dos edifícios com 75m de altura, à exceção dos casos em que atingem o topo dos edifícios E3, E22, E112 e E120. Estes casos foram assim definidos quando o sorteio coincidiu com um lote “sem a existência de edifícios” e/ou sem um edifício de 75m na vizinhança mais próxima. É possível perceber na figura 20, que todos os pontos considerados para incidência da D.A., estão posicionados no fundo e do lado esquerdo dos edifícios, quando os mesmos são vistos de frente. Nestes pontos considera-se a existência de uma barra de material condutor perfeito que se estende do topo até a base do edifício, penetrando 10m no solo.

O mesmo modelo de descarga subsequente considerado nas simulações do Capítulo 4 foi utilizado para desenvolver os 28 casos analisados neste capítulo, sendo o canal da descarga atmosférica novamente definido pelo modelo TL (sem perdas) e tendo a corrente velocidade igual a $1,5 \times 10^8$ m/s. Para a simulação desses casos as 28 descargas atmosféricas atingem o topo dos edifícios, onde se considera a existência da barra condutora.

Nove pontos foram escolhidos para análise do campo elétrico vertical, indicados em preto na figura 20. Esses são tomados 10m acima do solo, e posicionados em duas

supostas linhas de distribuição perpendiculares entre si. Desse modo, cinco deles, nomeados P1-L1 a P5-L1, são pertencentes à linha L1 (indicada verticalmente) na figura 20, e os outros 5 pontos, denominados P1-L2 a P5-L2, pertencem à linha L2 (indicada horizontalmente). Vale ressaltar que P3-L2 é coincidente com P4-L1.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO - CONFIGURAÇÃO GLOBAL

Para melhor visualizar a influência dos edifícios no comportamento dos campos elétricos verticais irradiados nesta configuração global, os resultados obtidos são apresentados inicialmente em forma de tabelas em que aparecem os valores de pico positivos e/ou negativos nas situações "com edifícios" e "sem edifícios", sendo que esta última considera apenas a existência do edifício no qual incide a descarga atmosférica.

Posteriormente estes resultados são apresentados em forma de gráficos mostrando para cada ponto das linhas de distribuição L1 e L2, a razão de valores de campo elétrico "com edifícios" e "sem edifícios", para as 28 descargas atmosféricas. Assim, é possível visualizar de forma geral a influência da mudança do local de incidência da descarga atmosférica no campo elétrico em cada ponto das supostas linhas de distribuição da região analisada. Dessa forma, um ponto do gráfico com valor 0,5 indica que a intensidade de campo elétrico é metade daquela que seria medida na situação "sem edifícios".

Em geral, as formas de onda de campo elétrico vertical resultantes nos nove pontos analisados apresentam oscilações e os valores tomados para definição da tabela em cada ponto consideram, portanto, o maior valor de pico encontrado na forma de onda, no intervalo de tempo analisado de $8\mu\text{s}$.

Todas as formas de onda obtidas estão apresentadas no Apêndice C deste trabalho. A tabela 7 e a tabela 8 indicadas a seguir mostram os valores de pico das formas de onda do campo elétrico vertical quando as D.A.s atingem os edifícios E3 ao E63, e os edifícios E69 ao E125, respectivamente, para todos os pontos analisados nas duas linhas consideradas (L1 e L2).

Tabela 7 - Valores de campo elétrico vertical - DA incidente nos edifícios E3 ao E63

LINHA 1	P1	P2	P3	P4	P5	LINHA 2	P1	P2	P3	P4	P5
D.A. em E3	-	-	-	-	-	D.A. em E3	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1911,5	-1441,2	-733,7	-665,7	-487,5	Com Edifícios	-832,6	-688,6	-665,7	-449,2	-474,1
D.A. em E3	-	-	-	-	-	D.A. em E3	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-4261,9	-4615,1	-3337,2	-2225,2	-1772,3	Sem edifícios	-2680,1	-2604,6	-2225,2	-1989,7	-1385,5
D.A. em E4	-	-	-	-	-	D.A. em E4	-	14,2	-	-	-
Com Edifícios	-1883,0	-1458,6	-847,7	-800,9	-574,4	Com Edifícios	-966,6	-797,7	-800,9	-523,7	-541,3
D.A. em E4	-	-	-	-	-	D.A. em E4	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3965,5	-4645,6	-3739,9	-2593,5	-2082,7	Sem edifícios	-3131,2	-3055,2	-2593,5	-2322,8	-1641,9
D.A. em E7	-	-	-	-	-	D.A. em E7	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1326,1	-1225,8	-1076,1	-1146,6	-771,4	Com Edifícios	-1549,4	-1256,6	-1146,6	-673,5	-595,7
D.A. em E7	-	-	-	-	-	D.A. em E7	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3027,9	-4178,1	-4544,4	-3446,0	-2721,6	Sem edifícios	-4852,1	-4610,6	-3446,0	-2900,4	-1825,0
D.A. em E10	-	-	-	-	-	D.A. em E10	-	16,4	-	-	-
Com Edifícios	-1025,7	-954,9	-1036,1	-1495,8	-1054,8	Com Edifícios	-2873,2	-2052,1	-1495,8	-798,1	-669,1
D.A. em E10	-	-	-	-	-	D.A. em E10	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2299,4	-3210,8	-4394,7	-4349,7	-3612,4	Sem edifícios	-7217,7	-7072,8	-4349,7	-3418,3	-1957,1
D.A. em E15	-	-	-	-	-	D.A. em E15	-	-	-	62,7	-
Com Edifícios	711,9	600,5	-624,0	2,749-655	-1719,6	Com Edifícios	-2143,5	-1879,3	-1512,7	-889,6	-691,0
D.A. em E15	-	-	-	-	-	D.A. em E15	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1571,0	-2056,9	-2916,6	-4116,7	-4574,7	Sem edifícios	-5878,7	-6105,3	-4116,7	-3297,9	-1932,3
D.A. em E22	-	-	-	-	-	D.A. em E22	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1391,0	-1339,0	-864,8	-784,2	-558,3	Com Edifícios	-1149,8	-892,7	-784,2	-493,2	-469,9
D.A. em E22	-	-	-	-	-	D.A. em E22	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3559,1	-4857,5	-4398,3	-2947,0	-2279,6	Sem edifícios	-3806,0	-3693,7	-2947,0	-2527,1	-1619,1
D.A. em E24	-	-	-	-	-	D.A. em E24	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1269,0	-1152,1	-889,6	-1005,9	-702,9	Com Edifícios	-1484,3	-1136,5	-1005,9	-598,1	-549,1
D.A. em E24	-	-	-	-	-	D.A. em E24	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2834,8	-3904,2	-4192,7	-3289,1	-2608,3	Sem edifícios	-4511,1	-4278,1	-3289,1	-2778,6	-1710,7
D.A. em E25	-	-	-	-	-	D.A. em E25	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1130,8	-1061,9	-922,1	-1137,5	-797,6	Com Edifícios	-1700,0	-1300,5	-1137,5	-645,1	-580,9
D.A. em E25	-	-	-	-	-	D.A. em E25	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2530,2	-3546,5	-4267,4	-3639,8	-2952,1	Sem edifícios	-5207,3	-4806,9	-3639,8	-3010,2	-1776,1
D.A. em E27	-	-	-	-	-	D.A. em E27	-	81,6	-	-	-
Com Edifícios	-995,0	-899,8	-902,2	-1264,0	-925,6	Com Edifícios	-967,9	-645,4	-1264,0	-686,3	-607,8
D.A. em E27	-	-	-	-	-	D.A. em E27	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2154,8	-3011,9	-4077,8	-4038,5	-3462,2	Sem edifícios	-3790,5	-3574,6	-4038,5	-3268,2	-1835,2
D.A. em E31	-	-	-	-	-	D.A. em E31	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-732,1	-604,1	-614,7	-1451,7	-1477,5	Com Edifícios	-2733,9	-1697,5	-1451,7	-821,7	-630,1
D.A. em E31	-	-	-	-	-	D.A. em E31	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1569,6	-2082,0	-2975,5	-4047,3	-4207,5	Sem edifícios	-6409,6	-5526,8	-4047,3	-3243,6	-1834,9
D.A. em E32	-	-	-	-	-	D.A. em E32	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-692,1	-567,1	-568,6	-1398,5	-1506,5	Com Edifícios	-2439,6	-1693,1	-1398,5	-820,0	-620,7
D.A. em E32	-	-	-	-	-	D.A. em E32	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1472,8	-1930,9	-2732,7	-3842,1	-4217,6	Sem edifícios	-6188,4	-5565,3	-3842,1	-3109,4	-1807,1
D.A. em E41	-	-	-	-	-	D.A. em E41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Com Edifícios	-1121,7	-1441,3	-2145,0	-2270,9	-1245,8	Com Edifícios	-1246,3	-1913,7	-2270,9	-1291,2	-865,8
D.A. em E41	-	-	-	-	-	D.A. em E41	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2834,5	-4566,2	-7013,2	-6301,1	-4348,4	Sem edifícios	-5134,7	-6125,2	-6301,1	-5162,8	-2677,9
D.A. em E42	-	-	-	-	-	D.A. em E42	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Com Edifícios	-1011,0	-1213,3	-2101,2	-2849,3	-1500,8	Com Edifícios	-1339,9	-2239,9	-2849,3	-1457,7	-913,1
D.A. em E42	-	-	-	-	-	D.A. em E42	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2571,9	-4021,8	-6661,6	-7022,9	-4973,7	Sem edifícios	-5409,6	-6305,3	-7022,9	-5613,6	-2750,8
D.A. em E44	-	-	-	-	-	D.A. em E44	0,0	1561,5	0,0	0,0	0,0
Com Edifícios	-851,8	-907,5	-1469,5	-3757,5	-2273,8	Com Edifícios	-1286,4	-2,5	-3757,5	-1685,8	-958,5
D.A. em E44	-	-	-	-	-	D.A. em E44	-	870,9	-	-	-
Sem edifícios	-2152,8	-3179,1	-5436,3	-7310,7	-6444,3	Sem edifícios	-5305,3	-2756,3	-7310,7	-6074,5	-2812,6
D.A. em E45	-	-	-	-	-	D.A. em E45	0,0	1275,4	0,0	0,0	0,0
Com Edifícios	-763,2	-748,6	-1091,3	-3406,0	-3026,4	Com Edifícios	-1337,2	-438,4	-3406,0	-1649,8	-980,9
D.A. em E45	-	-	-	-	-	D.A. em E45	-	1356,7	-	-	-
Sem edifícios	-1928,4	-2746,2	-4555,5	-6979,3	-7302,6	Sem edifícios	-5225,0	-3208,7	-6979,3	-5929,9	-2802,7
D.A. em E52	-	3133,9	-	-	-	D.A. em E52	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-2905,8	-	-1126,8	-707,2	-530,8	Com Edifícios	-682,5	-633,5	-707,2	-550,6	-587,9
D.A. em E52	-	4749,2	-	-	-	D.A. em E52	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-5678,8	-	-4282,1	-2618,5	-2023,0	Sem edifícios	-2499,9	-2636,4	-2618,5	-2466,6	-1836,2
D.A. em E63	-	-	-	-	6432,8	D.A. em E63	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-705,1	-653,7	-842,0	-2659,0	-	Com Edifícios	-1354,2	-2190,6	-2659,0	-1439,9	-895,4
D.A. em E63	-	-	-	-	8798,4	D.A. em E63	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1676,0	-2332,2	-3757,4	-5477,6	-	Sem edifícios	-5301,5	-6503,9	-5477,6	-4921,2	-2627,4

Fonte: do autor

Tabela 8 - Valores de campo elétrico vertical - DA incidente nos edifícios E69 ao E125

LINHA 1	P1	P2	P3	P4	P5	LINHA 2	P1	P2	P3	P4	P5
D.A. em E69	-	1202,1	-	-	-	D.A. em E69	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1943,2	-582,3	-2138,1	-853,4	-688,4	Com Edifícios	-576,5	-674,3	-853,4	-884,1	-956,4
D.A. em E69	-	1357,1	-	-	-	D.A. em E69	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-4626,0	-3214,3	-6109,4	-3570,0	-2634,0	Sem edifícios	-2572,9	-2924,5	-3570,0	-3667,4	-2892,3
D.A. em E79	-	-	-	-	2292,1	D.A. em E79	-	-	-	7,9	-
Com Edifícios	-659,0	-613,4	-873,4	-1753,6	0,0	Com Edifícios	-808,9	-1098,8	-1753,6	-2386,8	-1525,5
D.A. em E79	-	-	-	-	4362,8	D.A. em E79	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1634,0	-2242,2	-3509,1	-5395,8	-1884,0	Sem edifícios	-3252,6	-3968,1	-5395,8	-5826,7	-4109,1
D.A. em E88	-	-	-	-	-	D.A. em E88	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1391,1	-2210,6	-2517,2	-1228,5	-897,4	Com Edifícios	-608,9	-774,9	-1228,5	-1222,2	-1076,9
D.A. em E88	-	-	-	-	-	D.A. em E88	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3462,6	-5916,3	-6219,9	-4319,4	-3089,3	Sem edifícios	-2761,9	-3270,9	-4319,4	-4455,9	-3290,9
D.A. em E90	-	-	-	-	-	D.A. em E90	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1059,1	-1402,8	-2356,6	-1767,6	-1293,4	Com Edifícios	-654,9	-976,5	-1767,6	-1572,6	-1250,5
D.A. em E90	-	-	-	-	-	D.A. em E90	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2651,5	-4315,9	-6844,5	-5625,7	-4128,7	Sem edifícios	-3133,5	-3890,3	-5625,7	-5066,7	-3855,2
D.A. em E92	-	-	-	-	-	D.A. em E92	-	-	-	4133,0	-
Com Edifícios	-874,8	-1020,3	-1825,1	-1831,6	-1838,0	Com Edifícios	-711,2	-1084,8	-1831,6	-25,4	-1420,6
D.A. em E92	-	-	-	-	-	D.A. em E92	-	-	-	5749,1	-
Sem edifícios	-2195,0	-3353,9	-5906,7	-6191,6	-5240,2	Sem edifícios	-3327,2	-4256,6	-6191,6	-2,1	-4156,6
D.A. em E101	-	-	-	-	-	D.A. em E101	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1405,6	-1356,1	-1097,4	-675,1	-673,5	Com Edifícios	-399,1	-471,2	-675,1	-853,3	-1375,5
D.A. em E101	-	-	-	-	-	D.A. em E101	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3460,1	-4354,4	-4066,1	-2894,3	-2293,1	Sem edifícios	-1941,4	-2198,9	-2894,3	-3255,5	-3540,3
D.A. em E110	-	-	-	-	-	D.A. em E110	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-706,1	-636,4	-849,5	-1209,7	-1638,0	Com Edifícios	-537,0	-684,0	-1209,7	-1628,6	-3214,4
D.A. em E110	-	-	-	-	-	D.A. em E110	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1630,2	-2164,8	-3090,0	-4147,4	-4373,9	Sem edifícios	-2275,1	-2709,7	-4147,4	-5007,8	-6542,6
D.A. em E112	-	-	-	-	-	D.A. em E112	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-583,8	-529,5	-687,1	-1155,0	-1674,4	Com Edifícios	-497,1	-643,0	-1155,0	-1539,4	-2765,8
D.A. em E112	-	-	-	-	-	D.A. em E112	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-1296,8	-1791,0	-2630,5	-3994,0	-4777,6	Sem edifícios	-2124,4	-2566,2	-3994,0	-5049,2	-6083,1
D.A. em E118	-	-	-	-	-	D.A. em E118	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1463,3	-1391,0	-1088,5	-674,8	-681,0	Com Edifícios	-415,0	-485,6	-674,8	-840,4	-1242,2
D.A. em E118	-	-	-	-	-	D.A. em E118	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-3294,6	-4260,3	-3874,5	-2733,0	-2173,3	Sem edifícios	-1841,2	-2085,1	-2733,0	-3083,8	-3376,9
D.A. em E120	-	-	-	-	-	D.A. em E120	-	-	-	-	-
Com Edifícios	-1124,2	-1162,1	-1144,8	-819,3	-777,9	Com Edifícios	-397,5	-512,5	-819,3	-1082,9	-1562,8
D.A. em E120	-	-	-	-	-	D.A. em E120	-	-	-	-	-
Sem edifícios	-2786,6	-4011,5	-4530,3	-3375,8	-2625,3	Sem edifícios	-1934,2	-2294,1	-3375,8	-4085,6	-4911,8
D.A. em E125	-	-	-	-	-	D.A. em E125	-	-	-	-	4662,2
Com Edifícios	-803,1	-756,0	-1006,5	-1214,7	-1439,8	Com Edifícios	-537,1	-697,1	-1214,7	-1817,2	-74,3
D.A. em E125	-	-	-	-	-	D.A. em E125	-	-	-	-	4748,8
Sem edifícios	-1785,9	-2424,5	-3470,1	-4286,3	-4002,7	Sem edifícios	-2208,8	-2647,8	-4286,3	-5699,2	-20,9

Fonte: do autor

Ao analisar a tabela 7 e a tabela 8 é possível perceber que não ocorrem inversões de polaridade exceto nos casos destacados em vermelho, confirmando que as mesmas ocorrem apenas quando os pontos avaliados têm certa proximidade em relação ao ponto de incidência da descarga atmosférica. Assim sendo, na linha L1 estes casos ocorrem no ponto P2-L1, quando a D.A. incide nos edifícios E52 e E69, e no ponto P5-L1 quando a D.A. incide nos edifícios E63 e E79. Da mesma forma, essas inversões de polaridade estão presentes na linha L2 no ponto P2-L2, quando a D.A. incide nos edifícios E44 e E45, no ponto P4-L2 quando a D.A. incide no edifício E92 e no ponto P5-L2 quando a D.A. incidente no edifício E125. Note-se que

em alguns desses casos aparecem também excursões de polaridade oposta, com valores significativos.

A inversão de polaridade pode ser atribuída ao fato da descarga atmosférica atingir o topo do edifício onde se pressupõe a existência de uma barra condutora, ao invés de atingir o solo diretamente como suposto no Capítulo 4 deste trabalho. Tal inversão é analisada em Mosaddeghi et al. (2007), que mostra ser a inversão dependente da distância em que o campo foi avaliado.

Simulações adicionais realizadas neste estudo mostraram que a distância em que se observa a inversão pode variar em função da altura, largura e profundidade do edifício, além da existência ou não de barras estruturais condutoras, nas quais incide a descarga atmosférica.

A tabela 7 destaca adicionalmente em azul, dois pontos da linha L2 em que uma pequena excursão positiva ocorre num curto intervalo de tempo da forma de onda, na situação "com edifícios": P2-L2 quando a DA incide nos edifícios E4, E10 e E27, e P4-L2 quando a descarga atmosférica incide no edifício E15.

A figura 21 (a) apresenta a forma de onda do campo elétrico vertical nos cinco pontos analisados da linha L2, para a situação "sem edifícios" e a descarga atmosférica incidindo no edifício E15. A figura 21 (b) por sua vez mostra a situação "com edifícios" onde é possível perceber a presença de uma pequena excursão positiva no ponto P4-L2, num curto intervalo de tempo, conforme destaca o círculo vermelho tracejado. As oscilações já presentes na condição "sem edifícios" são devidas às reflexões da corrente da barra condutora no solo e no topo do edifício. Estas reflexões são provocadas pelas diferentes características elétricas presentes nas interfaces superior (canal da descarga – barra condutora) e inferior (barra condutora - solo).

Com a presença de todos os edifícios, as correntes superficiais que surgem nos mesmos apresentam oscilações, o que também contribui para o acentuado caráter oscilatório das formas de onda do campo.

Figura 21 - Formas de onda do Campo Elétrico nos pontos P1-L2 a P5-L2 - DA incidente em E15.
(a) Situação "sem edifícios" (b) Situação "com edifícios"

Fonte: do autor

Com o intuito de avaliar de modo geral a influência dos edifícios na propagação de campo elétrico vertical, a figura 22 (a) a (e) apresenta uma comparação dos valores relativos de campo elétrico (módulo) obtidos na situação "com edifícios" em relação ao caso "sem edifícios", nos pontos P1-L1 a P5-L1 respectivamente, para todos os 28 pontos de incidência da descarga atmosférica.

Figura 22 - Valores relativos de campo elétrico vertical na linha L1 (Situação com/sem edifícios)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Fonte: do autor

É possível observar de modo geral a ocorrência de uma redução significativa (máximo de até 80%) no valor do campo elétrico relativo em todos os pontos P1L1 a P5L1 para quase todos os pontos de incidência das descargas atmosféricas, exceto nos casos em que a D.A. tenha ocorrido próxima do ponto analisado. Ao observar a figura 22 (a) a (e) é possível constatar mais especificamente esses casos: os valores relativos de campo elétrico, na comparação com/sem edifícios, são iguais a 51% para o ponto P1-L1, 66% para o ponto P2-L1, 40% em P3-L1, 51% para P4-L1 e 73% no ponto P5-L1, sendo este último ponto o que apresenta a menor redução, isto é 27%.

Analisando a figura 20, juntamente com os casos (a) e (b) da figura 22, é possível observar que no caso (a) o ponto analisado P1-L1 está mais distante das 28 descargas atmosféricas analisadas, se comparado com o caso (b) em que o ponto P2-L1 está relativamente mais próximo dos edifícios E52 e E69, onde incidem descargas atmosféricas. Assim sendo, percebe-se que na figura 22 (a) o campo elétrico em P1-L1 tem redução mais uniforme em relação a todos os pontos de incidência das descargas atmosféricas, sendo da ordem de 55%. Por sua vez a figura 22 (b) mostra claramente que a redução do campo elétrico vertical é bem menor, quando a descarga atmosférica atinge o edifício E52.

Também vale ressaltar que embora os edifícios E52 e E69 tenham a mesma distância em relação ao ponto P2-L2, seus entornos são diferentes, de modo que a

configuração de campos irradiados no caso de descarga incidir em E52 resulta em valor de campo maior do que no caso da descarga ocorrer em E69.

Observe-se, também, que como P2-L1 está “entre” edifícios altos a atenuação “média” do campo (exceto para D.A.s próximas) é maior do que no caso de P1-L1, isto é, em geral em torno de 70%. Isto confirma os resultados obtidos com a configuração de poucos edifícios analisada no capítulo 4.

É interessante, ainda, observar o comportamento do campo no ponto P3-L1 na Figura 22 (c), quando as D.A.s incidem nos edifícios E3 a E32 e tem-se a maior redução (pouco abaixo de 80%), pois nestes casos as descargas estão mais afastadas do ponto. Por outro lado, quando as D.A.s ocorrem em E69, e entre E88 a E92, estão relativamente mais próximas do ponto e as resultantes reduções são menores.

Considerações similares podem ser feitas para os outros pontos da linha L1 a partir da análise das correspondentes figuras.

Passando à linha L2, a Figura 23 (a) a (e) mostra os valores relativos de campo elétrico nos pontos P1-L2 a P5-L2 respectivamente, na comparação com/sem edifícios. Verifica-se que para D.A.s próximas dos pontos considerados, as menores reduções são iguais a 57% no ponto P1-L2, 43% no ponto P2-L2, 49% em P3-L2, 28% em P4-L2 e apenas 2% no ponto e P5-L2. Estes dois últimos pontos indicam ainda, as menores reduções de campo elétrico entre todos os casos analisados.

Figura 23 - Valores relativos de campo elétrico vertical na linha L2 (Situação com/sem edifícios)

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Fonte: do autor

Deve-se lembrar que o ponto P3-L2 é coincidente com o ponto P4-L1 e seu gráfico é aqui apresentado para permitir uma visão de conjunto da linha L2.

É possível notar novamente que há uma redução geral nos valores de campo elétrico relativos ao comparar as situações "com edifícios" e "sem edifícios".

À exceção dos casos em que a descarga atmosférica incide nas proximidades do ponto analisado, estes valores relativos de campo apresentados estão na faixa de 20% a 40% (redução entre 60% e 80%) para todos os pontos analisados.

As menores reduções dos valores relativos de campo elétrico vertical ("picos" nos gráficos), presentes nos pontos P4L2 e P5-L2, estão relacionadas à menor distância entre o ponto de observação analisado e o ponto de incidência da descarga atmosférica e, no caso de P5-L2, também à vizinhança livre de edificações tendendo, portanto, à situação "sem edifícios".

Considerando a análise realizada, nota-se que a redução dos valores de campo elétrico vertical é influenciada pela configuração de edifícios na vizinhança do ponto, bem como pela altura desses edifícios e pela posição da descarga em relação ao ponto considerado.

As conclusões obtidas permitem uma visão mais ampla do comportamento do campo irradiado pela D.A.s, generalizando, de certa forma, o conhecimento obtido no capítulo quatro.

6 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE ESTUDOS FUTUROS

Descargas atmosféricas são a causa de indução de sobretensões em linhas de distribuição de energia e, no caso de regiões urbanas, a presença de edificações complica o cálculo dessas sobretensões, pois afeta os campos eletromagnéticos associados às descargas. Dada a existência de poucos trabalhos a respeito do assunto, o presente trabalho teve como objetivo apresentar uma análise do efeito de edificações sobre os campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas, utilizando uma ferramenta computacional desenvolvida com base no método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). O estudo foi realizado em duas etapas: na primeira, procurou-se obter uma visão mais detalhada do efeito de poucos edifícios e, em seguida, foram realizadas simulações visando dar uma visão mais global de um grande conjunto de edifícios distribuídos de forma aleatória em quarteirões, de uma região típica urbana.

Na análise da configuração menor, foram considerados três edifícios situados na proximidade de uma descarga atmosférica nuvem-solo e foi verificado o seu efeito sobre os campos elétrico e magnético em sete pontos, distribuídos de maneira a considerar a situação “na frente”, “ao lado”, “entre” e “atrás” dos edifícios. Para modelar os edifícios e o solo alguns trabalhos disponíveis foram consultados, a partir dos quais dois valores de permissividade e condutividade foram adotados nas simulações, representativos das situações “baixa condutividade” e “alta condutividade” dentro da faixa de valores apresentados nesses trabalhos. Para analisar uma condição limite, foram também considerados edifícios e solo condutores perfeitos. As alturas dos edifícios, 15m e 45m, foram adotadas com base em estudo prévio. Uma descarga subsequente foi considerada, com corrente do canal propagando-se sem atenuação e com velocidade de propagação $1,5 \times 10^8$ m/s. Da análise dos resultados das simulações foi possível avaliar o efeito das edificações nas componentes E_z , E_x e E_y do campo elétrico, assim como de H_x e H_y do campo magnético associados à descarga atmosférica.

Todos os resultados podem ser justificados tendo como base a nova configuração de campos eletromagnéticos definida pelas condições de contorno introduzidas pelos edifícios, como foi mostrado no texto.

Uma conclusão global sobre o efeito dos edifícios na propagação dos CEM irradiados, mostram as seguintes alterações nas formas de onda de campo

resultantes nos pontos avaliados, na comparação das situações com e sem edifícios:

- Há redução geral de campo elétrico vertical em todos os pontos, mais acentuadamente para os edifícios mais altos e mais condutivos, e sem inversão de polaridade.
- Há tanto redução quanto aumento no valor de campo elétrico horizontal, em função de qual componente horizontal (E_x ou E_y) é avaliada, para cada ponto considerado. Nestes casos o solo também apresenta contribuição para o aumento ou diminuição dos valores de campo, em função de qual componente é analisada em cada ponto.
- De modo geral as duas componentes de campo magnético horizontal (H_x e H_y) têm pouca alteração no valor resultante, para a maioria dos pontos analisados. Um aumento significativo do campo magnético horizontal H_x ocorreu apenas no ponto P5 (entre edifícios) mais acentuadamente para edifícios mais altos, onde a presença de oscilações na forma de onda contribui para esta alteração. Por sua vez, reduções significativas desta componente de campo ocorrem apenas nos pontos na frente a atrás do edifício 3 (que está deslocado em relação ao ponto de incidência da descarga) e quando este é mais condutivo.
- Não se observou alteração significativa na componente horizontal de campo magnético H_y .

A partir da avaliação deste caso particular - configuração menor - foi possível validar o modelo criado e confirmar a importância da caracterização mais realista do solo e dos edifícios, pois foi possível constatar que dependendo do ponto analisado tanto o campo elétrico quanto o magnético, podem sofrer alterações significativas com aumento e diminuição do valor, inversão de polaridade e oscilações na forma de onda.

A seguir são apresentadas de forma mais detalhada as conclusões relevantes para cada componente de campo.

1. E_z - Os edifícios causam redução do valor de E_z em todas as situações e em todos os pontos, sem inversão de polaridade. A redução é maior com edifícios mais altos e mais condutivos. Nota-se pouca diferença de efeito entre os edifícios mais condutivos ($\epsilon_r=20$, $\sigma = 5 \times 10^{-3}$ S/m) e edifícios PEC.

As características do solo não têm influência significativa, com exceção dos pontos entre edifícios (P3 e P5), em que com edifícios mais altos e mais condutivos a redução é bem maior com solo mais condutor ($\epsilon_r=15$, $\sigma=1 \times 10^{-2}$ S/m) e solo PEC.

A menor redução (da ordem de 10%) é observada na frente dos edifícios, com edifícios pouco condutores e mais baixos. A máxima redução observada é maior do que 90%, entre edifícios, com edifícios mais condutivos e mais altos e com solo mais condutivo.

2.Ex - O efeito das edificações neste caso é muito mais complexo e, dependendo da situação particular, pode haver redução ou aumento do valor do campo, inversão de polaridade ou aparecimento de oscilação. Em geral edifícios de maior condutividade ($\epsilon_r=20$, $\sigma=5 \times 10^{-3}$ S/m) apresentam efeito muito próximo dos edifícios PEC.

Na frente dos edifícios ocorre sempre um aumento do valor de Ex, menor com solos mais condutivos, e sendo maior com edifícios mais condutivos e PEC. Por outro lado, nos pontos ao lado do edifício mais próximo da descarga, sempre ocorre redução de Ex, praticamente independente do tipo de solo, sendo maior com edifícios mais condutivos e mais altos

Nos pontos atrás dos edifícios ocorre inversão, em geral com aumento de valor, mas com redução no ponto mais próximo da descarga e para edifícios de 45 m de baixa condutividade.

Para edifícios mais altos e mais condutivos e solos mais condutivos surgem oscilações nos pontos localizados atrás dos edifícios.

Os maiores valores de aumento de Ex (cerca de 4 vezes, no máximo) são observados atrás do edifício mais afastado da descarga, com edifícios mais condutivos de altura 15m. A maior redução de Ex (cerca de 50% no máximo) é observada no ponto lateral entre edifícios, com edifícios mais altos e mais condutivos.

3.Ey - Analogamente ao caso de Ex, o comportamento da componente horizontal Ey é muito complexo, com inversão de polaridade, aparecimento de excursão de polaridade oposta nos instantes iniciais das formas de onda e, em certos casos, forma de onda bem distinta das usuais, sem pico definido.

Novamente, observou-se que edifícios mais condutivos ($\epsilon_r=20$, $\sigma=5 \times 10^{-3}$ S/m) e PEC apresentam efeitos praticamente iguais, mas bem distintos daqueles provenientes dos edifícios de baixa condutividade ($\epsilon_r=5$, $\sigma=1 \times 10^{-5}$ S/m).

No ponto ao lado do edifício mais próximo da descarga, em que Ey na situação sem edifícios era negativo, ocorre inversão e aumento acentuado. Entre os edifícios situados na frente da descarga, observa-se aumento significativo (até 3 vezes) com inversão, para edifícios mais baixos. Com edifícios de 45m, observa-se aumento ou

redução, ambos pequenos, e ainda inversão e excursão de polaridade oposta, dependendo da situação.

Ocorre redução do valor de E_y nos pontos na frente e atrás do edifício situado à frente e ao lado da descarga. Podem, ainda, ocorrer excursão negativa ou inversão, dependendo da situação específica.

Nos pontos alinhados com a descarga, em que E_y é nulo sem edifícios, devido à distorção de campo na situação com edifícios, aparecem valores muito pequenos.

Os maiores aumentos de E_y são observados no ponto ao lado do edifício na frente da descarga, atingindo um fator próximo a 8 vezes, no caso de edifícios mais condutivos ou PEC de 15m de altura e solo menos condutivo. Desconsiderando a excursão oposta significativa, verificam-se maiores reduções (mais de 80%), atrás do edifício (mais condutivo e PEC, 15m de altura) situado à frente e ao lado da descarga.

4.Hx - Enquanto que edifícios pouco condutivos têm efeito muito pequeno, edifícios PEC alteram de maneira significativa a configuração de campo magnético pela imposição da condição de contorno $H_n=0$ (componente normal) nas suas paredes. A descontinuidade de H_{tg} (componente tangencial) está associada a correntes na superfície dos edifícios, cuja oscilação explica a oscilação de H_x presente em certos casos.

Com maior intensidade para edifícios de 45m, ocorre redução de H_x (cerca de 50% no máximo) nos pontos na frente e atrás do edifício ao lado da descarga e aumento (cerca de 70% no máximo) entre os edifícios situados à frente da descarga. No ponto ao lado do edifício situado na frente da descarga praticamente não há alteração de amplitude, mas para edifícios mais altos e mais condutivos aparece excursão negativa grande.

5.Hy - Analogamente ao observado na análise de H_x , os edifícios têm pouco efeito sobre H_y , exceto quando são mais condutivos ou PEC, com efeito mais intenso para esses últimos, pela sua grande influência na configuração do campo magnético. Assim, com edifícios PEC, a componente H_y tem redução (máxima de 65%) no ponto entre os edifícios situados à frente da descarga e no ponto ao lado do edifício em frente à descarga. Em todos os outros pontos ocorre aumento, com um máximo de 61% com edifícios de 45m e solo PEC.

Oscilações estão presentes no caso de edifícios mais altos e mais condutivos, com solos também mais condutivos.

Na segunda configuração analisada, procurou-se obter uma visão mais global do efeito dos edifícios. Para isto, foram considerados quarteirões com um total de 128 lotes de terrenos nos quais foram atribuídas de forma aleatória (por sorteio) as situações: sem edifício (26 lotes), com edifício de 45m (51 lotes) e com edifício de 75m (51 lotes).

Duas linhas de distribuição perpendiculares entre si foram supostas na região analisada: uma passando pelo meio da configuração e outra mais próxima do limite da região analisada. Foi avaliado o efeito dos edifícios sobre o campo elétrico vertical em 5 pontos de cada uma das linhas, considerando 28 descargas atmosféricas incidentes em edifícios determinados por sorteio.

Para a linha localizada no meio da configuração observou-se de modo geral a ocorrência de uma redução significativa (máximo de até 80%) no valor do campo elétrico relativo em todos os pontos para quase todos os locais de incidência das descargas atmosféricas, exceto nos casos em que a D.A. tenha ocorrido próxima do ponto analisado (redução mínima obtida igual a 27%). Os resultados confirmaram o fato observado com a configuração básica de que pontos “entre” edifícios apresentam redução significativa.

Para a linha situada mais próximo do limite da região o comportamento é análogo, com diferenças devidas à nova posição relativa linha-descargas. Observou-se novamente que para descargas próximas dos pontos considerados ocorrem as menores reduções, sendo de apenas 2% a redução mínima observada num ponto situado no limite da região (ponto sem edifícios de um lado). À exceção dos casos em que a descarga atmosférica incide nas proximidades do ponto analisado, resultou redução entre 60% e 80% para todos os pontos analisados.

Da análise dos resultados, conclui-se que a redução dos valores de campo elétrico vertical é influenciada pela configuração de edifícios na vizinhança do ponto, bem como pela altura desses edifícios e pela posição da descarga em relação ao ponto considerado.

Uma vez apresentadas as conclusões relevantes, pode-se avaliar que o presente trabalho contribui, primeiramente no Capítulo 4, para uma compreensão da influência de edifícios sobre os campos gerados por descargas atmosféricas pelo estudo em detalhe do comportamento dos campos com poucos edifícios. O estudo realizado no Capítulo 5, considerando uma região urbana relativamente ampla, contribui para uma visão global do efeito e pode ser útil para a análise de

sobretensões em linhas de distribuição urbanas, desde que utilizado em conjunto com um adequado modelo de acoplamento de campos com as linhas.

O código desenvolvido para aplicação do método FDTD, de livre utilização, também representa uma contribuição, permitindo o estudo dos campos eletromagnéticos das D.A.s de forma eficiente em situações complexas.

Como indicação de temas para estudos mais avançados pode-se citar:

- Aprimoramento da ferramenta computacional, com a introdução de mais recursos e usando outras linguagens de programação;
- Simulação de mais casos com grande número de edifícios em diferentes configurações, com estudo estatístico de resultados;
- Realização do estudo considerando outras características da D.A., tais como perdas, inclinação do canal, e variação da velocidade de propagação;
- Consideração de solo não plano, estratificado e com características variáveis com a frequência;
- Introdução dos campos afetados pelas edificações em modelo de acoplamento para cálculo de tensões induzidas.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, A.; PRICE, H.; GURBAXANI, S. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field. In: ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY INTERNATIONAL SYMPOSIUM. **Symposium...** v. 18, p.432–435. Quebec, May 1980. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1148283>>. DOI: 10.1109/APS.1980.1148283 . Acesso em: Set. 2015.

BABA, Y.; RAKOV, V. A. Electromagnetic models of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 112, n. D04102, p. 1-17, Feb 2007. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/content/books/10.1049/pbpo062e_ch8>. DOI: 10.1049/pbpo062e_ch8. Acesso em: Set. 2015.

BABA, Y.; RAKOV, V. A. On the transmission line model for lightning return stroke representation. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 24, p. ASC 13.1 - 13.4, Dec 2003. Disponível em: <<http://DOI:.wiley.com/10.1029/2003GL018407>>. DOI: 10.1029/2003GL018407. Acesso em: Set. 2015.

BALANIS, C. **Advanced engineering electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

BERENGER, J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. **Journal of Computational Physics**, v. 114, n. 2, p. 185–200, 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021999184711594>>. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159. Acesso em: Set. 2015.

BONYADI-RAM, S.; MOINI, R.; SADEGHI, S. H. H.; RAKOV, V. A. On representation of lightning return stroke as a lossy monopole antenna with inductive loading. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, n. 1, p. 118–127, Feb. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4444634>>. DOI: 10.1109/TEM.2007.913221. Acesso em: Set. 2015.

BORGHETTI, A.; NAPOLITANO, F.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. Calculation of lightning-induced voltages on an overhead line taking into account the presence of nearby buildings. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING. 7. **Conference...** p. 833–839, Chengdu. IEEE, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6110243>>. DOI: 10.1109/APL.2011.6110243. Acesso em: Set. 2015.

BORGHETTI, A.; NAPOLITANO, F.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. Effects of nearby buildings on lightning induced voltages on overhead power distribution lines. **Electric Power Systems Research**, v. 94, p. 38–45, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779612001356>>. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.05.008. Acesso em: Set. 2015.

BUCCELLA, C. ; CRISTINA, S. ; ORLANDI, A. Shielding performances of reinforced walls to the field radiated by lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. 8. **Conference...** . p.60–66, Edinburgh: IET. 1992. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=187199&url=http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=187199>. Acesso em: Set. 2015.

CHEN, J.; ZHOU, B.; ZHAO, F.; QIU, S. Finite-difference time-domain analysis of the electromagnetic environment in a reinforced concrete structure when struck by lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 52, n. 4, p. 914–920, Nov. 2010. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5433060>> DOI: 10.1109/TEMC.2010.2043437. Acesso em: Set. 2015.

COMSOL. **Multiphysics Software Product Suite**, 2015. Disponível em:

<<https://www.comsol.com/products>>. Acesso em: Set. 2015.

CONTI, A.; VISACRO, S. Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 49, n. 2, p. 448–451, May 2007. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4244585>>. DOI: 10.1109/TEMC.2007.897153. Acesso em: Set. 2015.

COORAY, V. On the concepts used in return stroke models applied in engineering practice. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 45, n. 1, p. 101–108, Feb. 2003. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1180398>>. DOI: 10.1109/TEMC.2002.808041. Acesso em: Set. 2015.

CST. **Computer Simulation Technology**, 2015. CST Design Studio Suite.

Disponível em: <<https://www.cst.com/Products/CSTS2>>. Acesso em: Set. 2015.

DING TONGYU; SHAOQING ZHANG; QUN WU. Effects of channel length on calculation accuracy of lightning return stroke electromagnetic fields. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.

Symposium... . p.374–377, IEEE, Jul 2010. Fort Lauderdale. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5711303>>. DOI: 10.1109/ISEMC.2010.5711303. Acesso em: Set. 2015.

ERIKSSON, A. J.; MEAL, D. V.; STRINGFELLOW, M. F. Lightning-induced overvoltages on overhead distribution lines. **IEEE Power Engineering Review**, v. PER-2, n. 4, p. 41–41, Apr. 1982. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5519421>>. DOI: 10.1109/MPER.1982.5519421. Acesso em: Set. 2015.

FIGUEIREDO, D. G. **Análise de Fourier e equações diferenciais parciais**. 3. ed. Rio de Janeiro: Impa, 1997.

GEDNEY, S. D. **Introduction to the finite-difference time-domain (FDTD) method for electromagnetics**. Arizona: Morgan&Claypool Publisher, 2011.

GOOGLE MAPS. **Visualização parcial do bairro de Moema na cidade de São Paulo**. São Paulo, 2015. 1 mapa, colorido. Escala 1:50. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-23.6043494,-46.6656736,18z?hl=pt-BR>> Acesso em: Out. 2015.

HARRINGTON, R. F. **Field computation by moment methods**. New York: Oxford University Press 1996.

HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; FLISOWSKI, Z.; BOUQUEGNEAU, C.; MAZZETTI, C. Parameters of Lightning Current given in IEC 62305 – Background, Experience and Outlook. In: **ICLP - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION**, 29. **Conference...**, p. 1–22, Uppsala - Sweden, Jun 2008. Disponível em: <<http://www.iclp-centre.org/pdf/Invited-Lecture-3.pdf>> Acesso em: Out. 2015.

HINTAMAI, S.; HOKIERTI, J. Surge impedance of concrete pole due to effect of the electrical properties of concrete. In: **TENCON - IEEE REGION - CONFERENCE TENCON 2004**. 10. **Conference...** . v. 3, p.397–400, 2004. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1414791>>. DOI: 10.1109/TENCON.2004.1414791. Acesso em: Out. 2015.

IEEE STD 1410-2010 (Revision of IEEE std 1410-2004) IEEE POWER&ENERGY SOCIETY. Sponsored by the transmission and distribution committee. **IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines**. New York, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5706451>>. DOI: 10.1109/IEEESTD.2011.5706451. Acesso em: Out. 2015.

ISHII, M.; MICHISHITA, K.; HONGO, Y. Experimental study of lightning-induced voltage on an overhead wire over lossy ground. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 41, n. 1, p. 39–45, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=748135>>. DOI: 10.1109/15.748135. Acesso em: Out. 2015.

JAMID, H. A. Enhanced PML performance using higher order approximation. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 52, n. 4, p. 1166 - 1174, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1284786>>. DOI: 10.1109/TMTT.2004.825643. Acesso em: Out. 2015.

JAVOR, V. Near electromagnetic field results for engineering models of lightning strokes. In: **TELFOR - TELECOMMUNICATIONS FORUM**, 20. **Forum...** . v. 7, p.1197–1200. Serbia, Belgrade: IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6419429>>. DOI: 10.1109/TELFOR.2012.6419429. Acesso em: Out. 2015.

JAVOR, V. Some integrals and integral transformations of lightning pulse functions. In: **SoftCOM - INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS. Conference...** p.92–96, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=5623677>>. E-ISBN : 978-953-290-004-0

JAVOR, V. Electromagnetic field estimation using modified transmission line models of lightning strokes. In: **SoftCOM - INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS, 20. Conference...** p.1–4, 2012. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6347583>>. DOI: 10.12988/ams.2015.5159. Acesso em: Out. 2015.

JAVOR, V.; RANCIC, P. D. On the choice of the lightning channel current decay constant in the Modified Transmission Line Model with Exponential Decay. **Journal of Communications Software and Systems**, v. 5, n. 4, p. 135–139, 2010.

JIMENEZ-MEJIA, R. E.; HERRERA-MURCIA, J. Lightning induced voltages on overhead lines above an inhomogeneous ground. In: **SIPDA - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, XII. Symposium...** p.241–248, 2013. IEEE. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/sipda.2013.6729217>>. DOI: 10.1109/sipda.2013.6729217. Acesso em: Out. 2015.

JIN, J. **The finite element method in electromagnetics**. 3. ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2014.

KONDYLIS, G. D.; DE FLAVIIS, F.; POTTIE, G. J.; ITOH, T. A memory-efficient formulation of the finite-difference time-domain method for the solution of Maxwell equations. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 49, n. 7, p. 1310–1320, 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=932252>>. DOI: 10.1109/22.932252. Acesso em: Out. 2015.

METWALLY, I. A.; HEIDLER, F. H. Reduction of lightning-induced magnetic fields and voltages inside struck double-layer grid-like shields. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, n. 4, p. 905–912, 2008. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4663118>. DOI: 10.1109/TEMC.2008.2002575. Acesso em: Out. 2015.

MIMOUNI, A.; DELFINO, F.; PROCOPIO, R.; RACHIDI, F. On the Computation of underground Electromagnetic Fields Generated by Lightning: A Comparison between Different Approaches. In: IEEE LAUSANNE POWER TECH. **Conference...** . p.772–777, 2007. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4538413>>. DOI: 10.1109/pct.2007.4538413. Acesso em: Out. 2015.

MIN, M. S.; TENG, C. H. The instability of the Yee scheme for the “magic time step”. **Journal of Computational Physics**, v. 166, n. 2, p. 418–424, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2000.6650>>. DOI: 10.1006/jcph.2000.6650. Acesso em: Out. 2015.

MOSADDEGHI, A.; PAVANELLO, D.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M. On the inversion of polarity of the electric field at very close range from a tower struck by lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. D19, p. D19113, 2007. Disponível em: <<http://DOI: .wiley.com/10.1029/2006JD008350>>. DOI: 10.1029/2006jd008350. Acesso em: Out. 2015.

NUCCI, C. A. A survey on Cigre and IEEE procedures for the estimation of the lightning performance of overhead transmission and distribution lines. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. **Symposium...** . p.1124–1133, 2010. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5475698>> DOI: 10.1109/apemc.2010.5475698. Acesso em: Out. 2015.

NUCCI, C. A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C. Comparison of two coupling models for lightning-induced overvoltage calculations. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 1, p. 330–339, 1995. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=368381>>. DOI: 10.1109/61.368381. Acesso em: Out. 2015.

NUCCI, C. A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M. V.; MAZZETTI, C. Lightning-induced voltages on overhead lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 35, n. 1, p. 75–86, 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=249398>>. DOI: 10.1109/15.249398. Acesso em: Out. 2015.

OGUNSOLA, A.; REGGIANI, U.; SANDROLINI, L. Modelling shielding properties of concrete. In: INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. 17. **Symposium...** p.34–37, 2006. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1629552>>. DOI: 10.1109/emczur.2006.214862. Acesso em: Out. 2015.

OTTO, S.R.; DENIER, J. P. **An Introduction to programming and numerical methods in MATLAB**. USA: Springer Science & Business Media, 2005.

PAOLONE, M. et al. Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, Numerical Simulations, and Experimental Validation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 532–547, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5196718>>. DOI: 10.1109/temc.2009.2025958. Acesso em: Out. 2015.

PARRISH, D. E. Lightning-caused distribution transformer outages on a Florida distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 2, p. 880–887, 1991. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=131148>>. DOI: 10.1109/61.131148. Acesso em: Out. 2015.

PIANTINI, A. Lightning protection of overhead power distribution lines. In: **ICLP - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION**. 29.

Conference... p.1–29, 2008. Disponível em: <

https://www.researchgate.net/publication/228643930_Lightning_protection_of_overhead_power_distribution_lines#full-text>. Acesso em: Out. 2015.

PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An improved model for lightning induced voltages calculations. In: **IEEE/PES - TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: Latin America**. IEEE n. 04EX956. **Conference...** p.554–559, 2004. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1432439>>. DOI: 10.1109/tdc.2004.1432439. Acesso em: Out. 2015.

PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Lightning-Induced voltages on overhead lines - application of the Extended Rusck model. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 548–558, 2009. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5136194>>. DOI: 10.1109/temc.2009.2023514. Acesso em: Out. 2015.

PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.; BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. A scale model for the study of the lemp response of complex power distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 710–720, 2007. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4039464>>. DOI: 10.1109/tpwr.2006.881410. Acesso em: Out. 2015.

PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.; BRAZ, C. P. Utilization of reduced models for the analysis of lightning induced overvoltages on overhead lines. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION**. **Conference...** p.160–163, 2010. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5640839>>. DOI: 10.1109/ichve.2010.5640839. Acesso em: Out. 2015.

PISLARU-DANESCU, L.; MOREGA, A. M.; MOREGA, M.; STOICA, V. New concept of measurement apparatus for the in situ electrical resistivity of concrete structures. In: **(ATEE) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING**. 8. **Symposium...** p.1–6, 2013. Bucharest - Romania: IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6563531>>. DOI: 10.1109/atee.2013.6563531. Acesso em: Out. 2015.

RACHIDI, F.; NUCCI, C. A.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C. Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 38, n. 3, p. 250–264, 1996. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=536054>>. DOI: 10.1109/15.536054.

RAKOV, V. A. Lightning electromagnetic fields: modeling and measurements. In: INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. **Symposium...** p. 59–64, 1997. Disponível em: <www.lightning.ece.ufl.edu/PDF/Zurich/digest97c.pdf>. Acesso em: Out. 2015.

RAKOV, V. A. Lightning parameters for engineering applications (keynote speech). In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. **Symposium...** . p.1120–1123, 2010. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5475697>>. DOI: 10.1109/apemc.2010.5475697. Acesso em: Out. 2015.

ROMERO, F.; PIANTINI, A.; COORAY, V. On the influence of stroke current propagation velocity on lightning horizontal electric fields. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, n. 4, p. 940–948, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6704800>>. DOI: 10.1109/temc.2013.2295916. Acesso em: Out. 2015.

RUBINSTEIN, M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 38, n. 3, p. 531–535, 1996. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=536087>>. DOI: 10.1109/15.536087. Acesso em: Out. 2015.

RUBINSTEIN, M.; UMAN, M. A. Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 31, n. 2, p. 183–189, May 1989. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=18788>>. DOI: 10.1109/15.18788 . Acesso em: Out. 2015.

SADIKU, M. N. O. **Numerical techniques in electromagnetic**. 2. ed. USA: CRC PRESS LLC, 2000.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SCHNEIDER, J. B. **Understanding the finite-difference time-domain method**. Lecture Notes, Washington: 2014. Disponível em: <http://www.eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd/ufdtd.pdf>. Acesso em: Out. 2015.

SHOORY, A.; MOINI, R.; SADEGHI, S. H. H.; RAKOV, V. A. Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in the vicinity of lossy ground. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 47, n. 1, p. 131–145, Feb. 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1396360>>. DOI: 10.1109/TEMC.2004.842104. Acesso em: Out. 2015.

SHU-CHEN, L.; WEI, H.; BA-LIN, X.; XIAO-RUI, F.; KUN-PENG, F. Relations of the thunder-stroke selectivity and earth resistivity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. **Symposium...** p.39–42, 2007. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4413426>>. DOI: 10.1109/ELMAGC.2007.4413426. Acesso em: Out. 2015.

SILVEIRA, F. H.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 52, n. 4, p. 929–935, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5437248>>. DOI: 10.1109/TEMC.2010.2044042. Acesso em: Out. 2015.

SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; HERRERA, J.; TORRES, H. Evaluation of lightning-induced voltages over a lossy ground by the hybrid electromagnetic model. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 1, p. 156–160, 2009. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4785243>>. DOI: 10.1109/TEMC.2008.2010403. Acesso em: Out. 2015.

SULLIVAN, D. M. **Electromagnetic simulation using the FDTD method**. New York: Wiley-IEEE Press, 2000.

TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. C. **Computational electrodynamics the finite-difference time-domain method**. 2. ed. Norwood, MA: Artech House, 2000.

UMAN, M.; KRIDER, E. A review of natural lightning: experimental data and modeling. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. EMC-24, n. 2, p. 79–112, 1982. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4091535>>. DOI: 10.1109/TEMC.1982.304006. Acesso em: Out. 2015.

VIEIRA, M. S.; JANISZEWSKI, J. M. The influence of buildings on the propagation of electromagnetic waves generated by lightning. In: **SIPDA - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, XII. Symposium...** . p.157–161, 2013. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6729193>>. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729193. Acesso em: Out. 2015.

VIEIRA, M. S.; JANISZEWSKI, J. M. Lightning electromagnetic fields in urban areas. In: **SBMO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICRO-ONDAS E OPTOELETRÔNICA, 16. Simpósio...** p. 455–460, 2014. Curitiba. ISBN: 978-85-7014-112-5.

VIEIRA, M. S.; JANISZEWSKI, J. M. Propagation of lightning electromagnetic fields in the presence of buildings. **Electric Power Systems Research**, v. 118, p. 101–109, 2015. Elsevier B.V. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779614002806>>. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.07.025. Acesso em: Out. 2015.

VILLAIN, G.; IHAMOUTEN, A.; DEROBERT, X. Use of frequency power law to link the results of two EM testing methods for the characterization of humid concretes. In: **IWAGPR - INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED GROUND PENETRATING RADAR**, 6. **Conference...** v. 1, p.1–5, Jun. 2011. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5963901>>. DOI: 10.1109/IWAGPR.2011.5963901. Acesso em: Out. 2015.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. **Journal of Electrostatics**, v. 60, n. 2-4, p. 111–120, Mar. 2004. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388604000324>>. DOI: 10.1016/j.elstat.2004.01.018. Acesso em: Out. 2015.

VISACRO, S.; SOARES, A. HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1206–1208, 2005. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1413374>>. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839743. Acesso em: Out. 2015.

XIAO, X.; IHAMOUTEN, A.; VILLAIN, G.; DEROBERT, X. Parametric study on processing GPR signals to get a dispersion curve. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, 15. **Proceedings...** p.575–580, Jun. 2014. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6970490>>. DOI: 10.1109/icgpr.2014.6970490. Acesso em: Out. 2015.

QIWEI, X.; LIHUA, S.; CHENG, G. Measurement of the electromagnetic constants of concrete materials by time-domain reflectometry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 3. **Symposium...** p.230–233, 2002. IEEE. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1177412>>. DOI: 10.1109/ELMAGC.2002.1177412. Acesso em: Out. 2015.

YANG, C.; ZHOU, B.; SHI, L.; GAO, C. Modification of engineering return-stroke models to include dispersion effects. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 46, n. 3, p. 493–496, Aug. 2004. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1325805>>. DOI: 10.1109/TEMC.2004.831909. Acesso em: Out. 2015.

YANG, W. Y.; CAO, W.; CHUNG, T.; MORRIS, J. **Applied numerical methods using MATLAB**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

YEE, K. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 14, n. 3, p. 302–307, May 1966. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1138693>>. DOI: 10.1109/TAP.1966.1138693. Acesso em: Out. 2015.

YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; TAKANISHI, A. Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n. 8, p. 2420–2429, Aug. 1983. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4112234>. DOI: 10.1109/TPAS.1983.317741. Acesso em: Out. 2015.

ZHANG, M.; CUI, X.; CHEN, J.; ZHAO, Z. Analysis of lightning-radiated electromagnetic fields in reinforced concrete structures by using the method of moment. In: ASIA-PACIFIC SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY; INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 19. **Symposium...** p.666–669, May 2008. Singapoure. IEEE. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4559963>. DOI: 10.1109/APEMC.2008.4559963. Acesso em: Out. 2015.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PROPOSTO

Uma validação qualitativa pode ser vista nas figuras I a III, em que se pode comparar o comportamento dos campos obtidos na literatura e pelo modelo proposto.

São consideradas diferentes situações: existência de atenuação da corrente ao longo do canal da D.A., valor da condutividade do solo, e incidência da descarga atmosférica em estruturas altas.

Figura I - Formas de onda de CEM em função da perda no canal da D.A.

Na figura I-(a) Shoory et al., 2005 mostra que a existência de atenuação da corrente ao longo do canal da D.A. impõe que a forma de onda do campo elétrico vertical não tem valor de pico definido nos primeiros 18 μ s analisados. Resultado similar foi encontrado na simulação deste trabalho, conforme mostra a figura I-(c).

Shoory et al., 2005 também apresenta formas de onda de campo magnético para um canal com perdas, como mostra a figura I-(b), desta vez com valor de pico definido

dentro do intervalo de tempo analisado. Esse comportamento também foi encontrado nas simulações deste trabalho, como mostra a figura I-(d).

Ressalte-se que a inversão de polaridade vista no campo elétrico vertical simulado, em relação ao que é apresentado por Shoory et al., 2005, é devido ao referencial adotado para as simulações.

Figura II - Formas de onda do campo elétrico em função da condutividade do solo

A figura II-(a) apresenta as formas de onda de campo elétrico horizontal, calculadas em função da condutividade do solo, a uma distância de 3m do ponto de incidência da D.A. Percebe-se que quanto menor é a condutividade do solo, maior é a excursão negativa nos primeiros microssegundos da forma de onda.

Resultados similares foram encontrados nas simulações propostas neste trabalho, em diferentes distâncias do ponto de incidência da D.A. (P1 a P7). Neste caso, a figura II-(b) mostra que o solo S1 menos condutivo ($\sigma=2 \times 10^{-4}$ S/m) impõe excursões significativas na forma de onda, diferentemente do que ocorre na figura II-(c) em que o solo S2 tem maior condutividade ($\sigma=1 \times 10^{-2}$ S/m).

Figura III - Formas de onda de CEM com D.A. em estrutura alta

Na figura III-(a), Mosaddeghi et al. (2007) mostra que o fato da D.A. incidir numa estrutura alta, ao invés de incidir diretamente no solo, impõe inversão de polaridade no campo elétrico vertical em pontos próximos da D.A..

Os resultados simulados neste trabalho mostram estar coerentes, como pode observado ao comparar as figuras III-(b) com III-(c).

Em III-(b) o campo elétrico tem mesma polaridade em todos os pontos analisados (P1-L1 a P5-L1) já que neste caso todos esses pontos estão distantes da D.A.

Por outro lado, a figura III-(c) mostra que há inversão de polaridade apenas no ponto P5-L1, já que neste caso este ponto está mais próximo do local de incidência da D.A. se comparado com os pontos P1-L1 a P4-L1.

Uma validação qualitativa é vista na figura IV.

Figura IV - Formas de onda de CEM em função da presença de edifícios

Ao comparar as figuras IV-(a) com IV-(d) é possível verificar mais uma vez a consistência dos resultados obtidos neste trabalho. Na figura IV-(a) Borghetti et al. (2011) mostra que o campo elétrico horizontal a 50m de distância da D.A., 10m acima de um solo condutor perfeito e sem a presença de edifícios, é de aproximadamente 5500 V/m. O mesmo resultado foi encontrado nas simulações deste trabalho, para as mesmas condições, como mostra a figura IV-(d) na curva em azul indicada na legenda por P2 (50m distante da D.A.).

De modo similar pode-se validar o valor do campo elétrico vertical simulado nas mesmas circunstâncias, de aproximadamente -23500 V/m. Neste caso as figuras IV-(b) e IV-(e) apresentam, respectivamente, o resultado obtido por Borghetti et al. (2011) e aquele obtido pelo código FDTD proposto neste trabalho. Novamente neste caso deve considerar a forma de onda indicada em azul relativa ao ponto P2.

Adicionalmente, as figuras IV-(c) e IV-(f) indicam a redução no valor do campo elétrico devido à presença de edifício entre o ponto de incidência da D.A. e do ponto analisado. Tanto no trabalho citado como neste estudo pode-se notar que há redução no valor do campo elétrico, sem inversão de polaridade. Os diferentes valores da redução devem-se ao fato de que em Borghetti et al. (2011) tem-se apenas um edifício, enquanto que neste trabalho havia três.

APÊNDICE B - FORMAS DE ONDA DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO - CONFIGURAÇÃO BÁSICA

Nas páginas 109 a 123 a seguir, são apresentadas as formas de ondas de campo eletromagnético H_y , H_x , E_z , E_x e E_y , para os casos simulados na configuração definida no capítulo 4 deste trabalho.

Assim sendo é possível visualizar os resultados de todos os casos simulados, de modo a identificar a contribuição dos parâmetros variados nas simulações.

Campos Magnéticos (Hy) - Edifício 1

Campos Magnéticos (Hx) - Edifício 1

Campos Elétricos (Ez) - Edifício 1

Campos Elétricos (Ex) - Edifício 1

Campos Elétricos (Ey) - Edifício 1

Campos Magnéticos (Hy) - Edifício 2

Campos Magnéticos (Hx) - Edifício 2

Campos Elétricos (Ez) - Edifício 2

Campos Elétricos (Ex) - Edifício 2

Campos Elétricos (Ey) - Edifício 2

Campos Magnéticos (Hy) - Edifício PEC

Campos Magnéticos (Hx) - Edifício PEC

Campos Elétricos (Ez) - Edifício PEC

Campos Elétricos (Ex) - Edifício PEC

Campos Elétricos (Ey) - Edifício PEC

APÊNDICE C - FORMAS DE ONDA DE CAMPO ELÉTRICO VERTICAL - CONFIGURAÇÃO GLOBAL - REGIÃO URBANA TÍPICA

Nas páginas 125 a 138 a seguir, são apresentadas as formas de ondas de campo elétrico vertical E_z nos cinco pontos de cada linha, agrupadas aos pares "sem" e "com" edifícios, para cada uma das descargas atmosféricas consideradas, na configuração definida no capítulo 5.

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E3 e E4

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E7 e E10

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E15 e E22

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E24 e E25

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E27 e E31

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E32 e E41

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E42 e E44

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E45 e E52

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E63 e E69

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E79 e E88

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E90 e E92

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E101 e E110

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E112 e E118

Campo elétrico vertical - Linhas L1 e L2 - DA incidente nos edifícios E120 e E125