



Jean Carneiro da Silva

**Modelo Determinístico de Propagação de
Ondas Milimétricas em Ambientes
Urbanos com Alta Densidade de
Espalhadores**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019



Jean Carneiro da Silva

Modelo Determinístico de Propagação de Ondas Milimétricas em Ambientes Urbanos com Alta Densidade de Espalhadores

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio do Centro Técnico Científico da PUC- Rio. Aprovado pela Comissão Examinadora.

Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Flávio José Vieira Hasselmann

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Guilherme Simon da Rosa

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Maurício Henrique Costa Dias

CEFET - RJ

Prof. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

Universidade Federal do Pará – UFPa

Prof. Cássio Gonçalves do Rego

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial da Pós-graduação do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de fevereiro de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Jean Carneiro da Silva

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UFPA (Universidade Federal do Pará) em 2005. Concluiu o Mestrado em engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2014. Trabalhou em diversas empresas na área de tecnologia e atualmente é pesquisador e professor Assistente na UNIFESSPA (Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará).

Ficha Catalográfica

Silva, Jean Carneiro da

Modelo determinístico de propagação de ondas milimétricas em ambientes urbanos com alta densidade de espalhadores / Jean Carneiro da Silva; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa. – 2019.

300 f.: il. color.; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Propagação em ondas milimétricas. 3. Comunicações móveis. 4. Traçado de raios. 5. Canais UWB. 6. 5G. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Em especial à Danielle, companheira de todas as horas, Helena e Catarina, que apesar dos poucos anos, suportaram minhas ausências em muitos momentos.

Ao meu orientador, professor Emanuel Costa, pela excelente orientação e ajuda.

Ao DEE/PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao corpo docente do CETUC e do DEE da PUC-Rio, pelos ensinamentos e ajuda prestada para a conclusão deste trabalho.

A todos os amigos e colegas que contribuíram criando sinergias que resultaram na execução deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Da Silva, Jean Carneiro; Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. **Modelo Determinístico de Propagação de Ondas Milimétricas em Ambientes Urbanos com Alta Densidade de Espalhadores**. Rio de Janeiro, 2019, 300p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A futura saturação do espectro eletromagnético atualmente alocado para as comunicações móveis tem levado a comunidade científica a considerar o uso das vastas faixas de frequência disponíveis em ondas milimétricas. Esta contribuição se insere no esforço de pesquisa para caracterização dos canais urbanos em ambientes exteriores. O modelo desenvolvido utiliza o traçado de raios 2.5D, com base nos conceitos da ótica geométrica e teoria uniforme da difração. Foram implementadas diversas técnicas consideradas em um futuro padrão de comunicações móveis 5G para a transmissão de sinais de banda ultra larga em canais com e sem visada e consideradas várias classes de espalhadores, como árvores, postes e paredes rugosas com espalhamento difuso. Adicionalmente, foram feitas simulações e comparações em ambientes onde foram realizadas campanhas de medições, nas métricas de: potência recebida, retardo médio, desvio RMS e XPD. Os resultados comparativos mostraram boa concordância geral e foram investigadas possíveis causas de erro em previsões nas métricas adotadas.

Palavras-chave

Propagação em ondas milimétricas; comunicações móveis; traçado de raios; canais *UWB*; 5G.

Abstract

Da Silva, Jean Carneiro; Costa, Emanuel Paiva de Oliveira (advisor). **Deterministic Propagation Model in Millimeter Waves over Urban Environments with High Density of Scatterers.** Rio de Janeiro, 2019, 300p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The future saturation of the electromagnetic spectrum currently allocated for mobile communications has led the scientific community to consider the use of the vast frequency bands available in millimeter waves. There are some technical obstacles limiting the immediate use of this band. In the radio propagation area, there is a research effort to characterize the outdoor urban channels. The developed model uses a 2.5D ray tracing algorithm based on geometrical optics and UTD concepts in outdoor environments. The model implements several techniques considered in a future standard of 5G mobile communications for the transmission of ultra wide band signals in LOS and NLOS channels with a high density of scatterers: trees, poles and diffuse scattering by rough building walls. In addition, simulations and comparisons were performed in environments where measurement campaigns were carried out, considering the following metrics: received power, mean delay, RMS deviation and XPD. The comparative results showed a good agreement. Possible model impairments were investigated.

Keywords

mmW propagation; mobile communications; ray tracing; UWB channels; 5G.

Sumário

1. Introdução	31
1.1. Introdução	31
1.2. Motivação	32
1.3. Objetivos da Pesquisa	33
1.4. Contribuições deste Trabalho	36
1.5. Estrutura do Trabalho	37
2. Revisão da Literatura e Metodologia	39
2.1. Considerações Gerais	39
2.2. Breve Revisão da Literatura no Contexto das Comunicações Móveis	39
2.3. Ambiente e Representação Computacional	43
2.4. Propagação e Traçado de Raios	45
2.5. Sinais de Banda Ultra Larga e Canal de Propagação	51
2.6. Traçado de Raios	54
2.7. Transceptores e Função de Transferência do Canal	58
2.8. Simulação e Caracterização do Canal de Propagação	61
3. Representação do Ambiente	66
3.1. Introdução	66
3.2. Espaço e Construções	66
3.3. Árvores e Postes	71
3.3.1. Árvores	71
3.3.2. Postes	75
3.3.3. Paredes Refletores	77
3.4. Representação Final	78

4. Propagação da Onda Eletromagnética	79
4.1. Introdução	79
4.2. Raio Direto	84
4.3. Raio Refletido no Solo e em Face Lateral de Edificações	85
4.3.1. Efeitos da Rugosidade em Superfície Refletores	89
4.4. Cálculo do Campo Elétrico Associado ao Raio Refletido	91
4.5. Raio Difrato em Arestas Verticais formadas pelas Faces das Edificações	92
4.6. Algoritmo e Implementação da Difração em Arestas das Faces	99
4.7. Cálculo do Campo Elétrico Associado ao Raio Difrato	101
4.8. Raio com Espalhamento Causado por um Cilindro	103
4.8.1. Ponto de Observação na Região Iluminada	104
4.8.2. Algoritmo e Implementação da Reflexão em Cilindros	110
4.8.3. Ponto de Observação na Região de Sombra	111
4.8.4. Algoritmo e Implementação da Difração em Cilindros	116
4.8.5. Cálculo dos Campos Elétricos Espalhados por Cilindros	117
4.9. Espalhamento Causado por Árvores	119
4.9.1. Raio com Espalhamento Causado no Tronco	120
4.9.2. Raio com Espalhamento Causado pela Copa	121
4.9.3. Cálculo do Campo Elétrico Associado ao Espalhamento por Copa	124
4.9.4. Atenuação do Raio Causada pela sua Intercepção por copa de Árvore	125
4.10. Raios com Reflexão Difusa em Paredes	130
4.10.1. Cálculo do Campo Elétrico Associado à Reflexão Difusa	136
4.11. Bloqueio de um Raio por Objetos do Ambiente	137
5. Validação	139
5.1. Introdução	139
5.2. Base de Dados Reais	139
5.3. Campanha de Medições I	140
5.4. Campanha de Medições II	150
5.5. Campanha de Medições III	155

5.6. Campanha de Medições IV	161
5.7. Considerações Sobre Discrepâncias entre Resultados Medidos e Simulados	156
5.8. Campanha de Medições V	172
6. Simulações	182
6.1. Efeitos da Ordem de Interações em canais com e sem visada	182
6.2. Efeitos da Vegetação sobre a Propagação	191
6.2.1. Efeitos da Vegetação e da Variação da Altura de Transmissão	191
6.2.2. Efeitos na Propagação Causados pela Proximidade de Uma Árvore	199
6.3. Simulação em Rota Pré-definida em Ipanema	211
7. Conclusão e Trabalhos Futuros	218
7.1. O Modelo de Propagação	218
7.2. Conclusões	220
7.3. Desenvolvimento Futuro da Pesquisa	225
8. Referências Bibliográficas	226
9. Apêndice I	241
10. Apêndice II	243
11. Apêndice III	247
12. Apêndice IV	249
13. Apêndice V	251
14. Apêndice VI	253
15. Apêndice VII	257

16. Apêndice VIII	260
17. Apêndice IX	263
18. Apêndice X	265
19. Apêndice XI	267
20. Apêndice XII	270
21. Apêndice XIII	275

Lista de figuras

- Figura 2.1 – Exemplos de espalhamento em ondas milimétricas em ambientes urbanos. Adaptada de [1]. 42
- Figura 2.2 – Área com morfologia urbana no bairro de Ipanema, Rio de Janeiro, Brasil. Reproduzida de [89]. 44
- Figura 2.3 – Representação de Ipanema: acima visão geral do bairro, abaixo a área em destaque (a mesma área da Figura 2.2). 46
- Figura 2.4 – Método das Imagens: (a) percurso direto (visada); (b) Imagens e percursos de primeira ordem gerados nas faces; (c) imagem de terceira ordem e percurso (apenas as imagens Tx1 e Tx12 são válidas); (d) raios traçados pelos percursos. 49
- Figura 2.5 – Representação dos quarteirões por prismas retos: visão das faces laterais externas dos prismas que interagem com a onda eletromagnética. 50
- Figura 2.6 – Técnicas de aceleração: (1) a imagem C deve estar à direita da face AB para gerar C', (2) a imagem C' só criará imagens espelhadas em faces iluminadas pelo feixe AC'B (cinza). 51
- Figura 2.7 – Raios 2D e a representação de quarteirão por polígonos convexos (pretos). O transmissor (Tx) é representado por um círculo vermelho e o receptor é representado por um círculo verde. Os raios oriundos do Tx ou refletidos são representados por linhas azuis e os raios difratados em magenta. (a) Raio de primeira ordem com dois sub-raios, (b) raio de terceira ordem com quatro sub-raios. 55

- Figura 2.8 – Representação do ambiente por prismas 2.5D (cinza) e raios 2.5D. O transmissor (Tx) é representado por um círculo vermelho e o receptor por um círculo verde. Os raios oriundos do Tx ou refletidos são representados por linhas azuis e o raio difratado em magenta. (a) Raios aéreo e terrestre correspondentes ao caso (a) da Figura 2.7; (b) raios aéreo e terrestre correspondentes ao caso (b) da Figura 2.7. 56
- Figura 2.9 – Geração de quatro raios 2.5D contendo um espalhamento (no ponto verde que une os segmentos azul e verde) a partir de um raio 2D. (a) Raio 2D; (b) Quatro raios 2.5D. 57
- Figura 2.10 – Raios em um canal. O Tx é representado por um círculo vermelho, o Rx por um círculo verde, espalhadores por asteriscos vermelhos, difrações em arestas são triângulos vermelhos, raios oriundos de espalhamento por poligonais verdes e demais raios por poligonais azuis. O Rx está próximo à praça, na ausência de visibilidade. 58
- Figura 2.11 – Exemplo de diagrama de radiação: em vermelho o ganho, as linhas azuis representam a largura do feixe de meia potência (11°). Este diagrama possui ganho máximo de 24.5 dBi. Este diagrama foi usado na simulação da propagação no campus da Universidade de New York (NYU). O diagrama é simétrico em relação ao eixo do seu feixe principal. 59
- Figura 2.12 – Exemplo de funções de transferência de canal NLOS (gráfico superior) e LOS (inferior) com campos copolarizados. 64

- Figura 2.13 – Despolarização: (a) propagação de raio com seis reflexões; (b) detalhe da primeira interação, na qual a linha vermelha grossa representa a componente vertical, a linha grossa vermelha tracejada é a componente horizontal que estão incidindo na parede (cinza), similarmente as linhas em azul representam o mesmo, só que em referência ao raio que parte da parede, após a interação; (c) a representação dos campos após a quarta interação, pode-se notar o efeito de despolarização e atenuação, pelo ângulo formado entre as componentes do campo e o sistema de eixos vinculado ao raio e o menor comprimento das linhas, que são relacionadas ao módulo das componentes vertical e horizontal. Os diagramas de radiação são arbitrários. 65
- Figura 3.1 – Representação de Madri: (a) modelo simplificado utilizado pelo projeto METIS 2020 [77]; (b) região real com os mesmos nomes de ruas e aparência geral. Fonte: Google Earth. 67
- Figura 3.2 – Bairro de Ipanema, Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth. 68
- Figura 3.3 – Técnica clássica para a obtenção da envoltória convexa. 69
- Figura 3.4 – Triangulação de Delaunay. Adaptado de [97]. 69
- Figura 3.5 – Representação final do espaço e construções: acima Madri; abaixo Ipanema (a parte não plana a leste, observada na Figura 3.2, foi retirada). 70
- Figura 3.6 – Área selecionada de Ipanema para a coleta de dados. Fonte Google Earth. 72
- Figura 3.7 – Área selecionada de Madri para o levantamento dos dados. Fonte Google Earth. 73
- Figura 3.8 – Modelo de árvore, com solo em cinza, tronco em marrom e copa em verde. 75
- Figura 3.9 – Postes em Ipanema. Fonte: Google Earth. 76

Figura 3.10 – Postes em Madri. Fonte: Google Earth.	77
Figura 3.11 – Representação final com todos os espalhadores: acima Madri; abaixo Ipanema. As bases dos blocos (quarteirão) são representadas por polígonos convexos pretos e os espalhadores por cruces vermelhas.	78
Figura 4.1 – Representação da frente de onda no tubo de raios em posições diferentes, notando-se os efeitos sofridos pela frente de onda. Adaptado de [89].	80
Figura 4.2 – Representação do raio emitido pelo transmissor, onde se pode ver os eixos de polarização e o sistema referenciado.	81
Figura 4.3 – Representação do raio que, após todas as interações com o ambiente, atinge o receptor. Pode-se ver os eixos de polarização. O diagrama de radiação é arbitrário.	83
Figura 4.4 – Raio direto, sem obstruções entre os transceptores, sendo r a distância entre eles.	84
Figura 4.5 – Representação de um raio terrestre refletido no solo.	85
Figura 4.6 – Componentes do campo elétrico incidente e refletido.	86
Figura 4.7 – Reflexão em face, representando a parede vertical de uma edificação.	89
Figura 4.8 – Exemplo de uma diminuta porção de superfície com rugosidade (ampliada). Adaptado de [87].	89
Figura 4.9 – Representação de uma superfície rugosa.	90
Figura 4.10 – Difração em arestas verticais.	93
Figura 4.11 – Representação das regiões consideradas na <i>GTD</i> . Adaptado de [89].	93
Figura 4.12 – Representação dos campos e seus componentes no raio incidente e difratado em uma aresta vertical.	94

Figura 4.13 – Projeção dos elementos da Figura 4.12, em um plano horizontal.	96
Figura 4.14 – Módulo e fase da função de transição $F(x)$.	98
Figura 4.15 – Representação da difração em um poste.	103
Figura 4.16 – Representação das regiões iluminada e de sombra em um poste iluminado por uma fonte pontual.	104
Figura 4.17 – Representação da superfície cilíndrica. Reproduzido de [5].	105
Figura 4.18 – Representação da reflexão por um cilindro.	106
Figura 4.19 – Representação da difração por uma superfície cilíndrica, adaptada de [5].	111
Figura 4.20 – Representação da difração em cilindros: visão das componentes do campo elétrico e dos raios incidente e difratado.	112
Figura 4.21 – Planos considerados para a determinação de: $\rho_g(t')$ - plano amarelo; $\rho_g(Q_1)$ - plano azul; e $\rho_g(Q_2)$ - plano vermelho.	115
Figura 4.22 – Modelagem da árvore pelo tronco e copa: D é o diâmetro da copa, d é o diâmetro do tronco, H e h são as alturas da árvore e início da copa, respectivamente.	119
Figura 4.23 – Geometria dos raios retificados entre o Tx e o Rx.	120
Figura 4.24 – Geometria do modelo: vista do plano superior. O ângulo de partida do raio é obtido a partir do plano que contém a fonte virtual e o ponto de observação.	122
Figura 4.25 – Geometria do problema: projeção da copa (verde), projeção do sub-raio (azul). Os pontos (X_1, Y_1) e (X_2, Y_2) são as projeções dos extremos do sub-raio e o ponto (C_x, C_y) é a projeção do centro da copa.	125
Figura 4.26 – Geometria do problema em 3D: projeção da copa (cinza), e geometria da propagação.	127

- Figura 4.27 – Exemplo de aplicação do algoritmo: todos os raios (retas azuis) de um canal e as suas intercepções em copa (segmentos vermelhos). O Tx (círculo vermelho) e o Rx (círculo verde) estão em um canal sem visada. 129
- Figura 4.28 – Valores típicos da atenuação específica γ em função da frequência. 129
- Figura 4.29 – Exemplo de reflexão difusa em parede e sua geometria geral. 131
- Figura 4.30 – Espalhamento não-especular provocado por um feixe interceptando um elemento genérico de área. Os sobrescritos (i), (r) e (s), referem-se a raios: incidente, refletido especularmente e espalhado, respectivamente. Os subscritos i, r e s, referem-se aos ângulos em relação à normal: incidente, refletido e espalhado, respectivamente. Reproduzida de [106]. 133
- Figura 4.31 – Modo de particionamento da parede lateral em três seções. 135
- Figura 4.32 – Representação do bloqueio em um canal arbitrário. No painel (a) todos os raios são traçados; no painel (b) os raios bloqueados foram eliminados. 138
- Figura 5.1 – Mapa das posições do Tx e Rx. A estrela amarela grafada como TX-COL1 indica a posição do Tx e pontos vermelhos representam as posições do Rx. Reproduzido de [115]. 140
- Figura 5.2 – Imagem do campus da NYU e arredores, que possibilitou a distribuição das árvores e demais elementos espalhadores. Fonte: Google Maps. 143
- Figura 5.3 – Representação do campus da NYU. Linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas. 143

Figura 5.4 – Traçado de raios nos canais (eixos em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam os resultados dos traçados de raios no: (a) canal 2; (b) canal 4; (c) canal 13; (d) canal 14; (e) canal 17; e (f) canal 15, que não apresentou sinal na medição. 144

Figura 5.5 – Traçado de Raios nos canais (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 9; (b) canal 10; (c) canal 18; (d) canal 19; (e) canal 24; e (f) canal 25. 145

Figura 5.6 – Função de transferência e perfil de potência e retardos para o canal 2. 148

Figura 5.7 – Função de transferência e perfil de potência e retardos para o canal 3. 149

Figura 5.8 – Comparação entre os valores simulados e medidos apresentados na referência [115]. 149

Figura 5.9 – Traçado de Raios nos canais (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 4, (b) canal 10, (c) canal 14, (d) canal 19, (e) canal 21 e (f) canal 31. 150

Figura 5.10 – Traçado de Raios nos canais onde não foi detectado sinal na campanha de medições (escalas em metros), as linhas pretas são as faces dos prismas, linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 1, (b) canal 3, (c) canal 5, (d) canal 6, (e) canal 15 e (f) canal 17. 151

- Figura 5.11 – Gráfico da perda em propagação, baseado nas medições nos canais da simulação KAU. Reproduzida de [115]. 153
- Figura 5.12 – Função de transferência e perfil de potência e retardos do canal 10. 153
- Figura 5.13 – Função de transferência e perfil de potência e retardos do canal 11. 154
- Figura 5.14 – Gráfico Comparativo entre valores medidos e simulados para a perda de percurso nos canais associados ao Tx em KAU. 154
- Figura 5.15 – Mapa do distrito de Nihonbashi, no centro de Tóquio e as rotas utilizadas na campanha de medições, com escalas em metros. O painel superior mostra que, para a altura do Rx igual a 2,5 m, foi utilizada uma antena posicionada em cima de um automóvel e, para a altura de 1,5 m, foi utilizado um pequeno carro movido por um técnico. O painel inferior mostra o posicionamento do Tx em um tripé em cima de um caminhão, para as alturas de 1,5 m e superiores. Reproduzida de [112]. 155
- Figura 5.16 – Panorama geral da região de Nihonbashi, densamente urbanizada. Fonte: Google Maps. 156
- Figura 5.17 – Panorama aproximado da região de Nihonbashi, com árvores localizadas principalmente nas avenidas. Fonte: Google Maps. 157
- Figura 5.18 – Representação do ambiente utilizado na simulação III, com prédios no entorno da avenida utilizada na rota NLOS 1. As linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas que representam as paredes dos prédios. 158

- Figura 5.19 – Traçado de raios em alguns canais (escalas em metros). As linhas pretas são as faces dos prismas, as linhas azuis, verdes e magentas, são raios oriundos da reflexão especular, espalhamento e difração, respectivamente. Os asteriscos vermelhos são espalhadores. Os painéis representam: (a) canal 5; (b) canal 7; (c) canal 9; (d) canal 13; (e) canal 15; (f) canal 20; (g) canal 21; e (f) canal 22. 159
- Figura 5.20 – Comparação entre valores da perda de percurso medidos e simulados para a rota NLOS 1 em Tóquio, adaptado da referência [112]. 160
- Figura 5.21 – Mapa das posições do Tx e Rx no campus da NYU. Estrelas amarelas indicam as posições do Tx e pontos vermelhos as posições do Rx. Reproduzida de [119]. 161
- Figura 5.22 – Traçado de raios, função de transferência e *PDP* para o canal 4. 163
- Figura 5.23 – Traçado de raios, função de transferência e *PDP* no canal 8. 164
- Figura 5.24 – Comparação entre os valores simulados e medidos da perda de percurso em diversos canais do campus da NYU na frequência de 73 GHz, adaptada da referência [111]. 166
- Figura 5.25 – Geometria geral do canal 5, com escalas em metros. As posições do Rx e Tx estão marcadas em vermelho. Adaptado de imagens do Google Earth. 167
- Figura 5.26 – *PDP* simulado para o canal 5. 167
- Figura 5.27 – Raio mais forte na simulação do canal 5. 168
- Figura 5.28 – *PDP* do canal 5, reproduzido da referência [119]. 168
- Figura 5.29 – *PDP* do canal 5 sem os raios refletidos no prédio do dormitório e no prédio a oeste do Tx. A área marcada em verde representa o mesmo conjunto de raios. 169

- Figura 5.30 – Traçado de raios associado ao conjunto da Figura 5.29 (em amarelo). Estes raios são oriundos da difração nas arestas do prédio a oeste do Tx e do espalhamento nas árvores próximas. 170
- Figura 5.31 – Raios associados ao conjunto da Figura 5.29. Em amarelo, raios difratados nas arestas da edificação. Em azul, raios resultantes do espalhamento nas árvores a oeste do Tx. Adaptado do Google Earth. 170
- Figura 5.32 – Comparação entre PDPs simulado e medido para o canal 5. Adaptado de [119]. 171
- Figura 5.33 – Vista da rua Eerikinkatu, Finlândia. Adaptado do Google Maps. 173
- Figura 5.34 – Local das medições, com as posições do Tx e Rx. Adaptado do Google Maps. 174
- Figura 5.35 – Representação do local das medições da campanha V. As linhas pretas são faces de prismas, círculos verdes são árvores, círculos pretos são postes e asteriscos vermelhos são locais de espalhamento difuso nas faces dos prismas que representam as paredes dos prédios. 175
- Figura 5.36 – Resultado do traçado de raios no canal. Os asteriscos vermelhos são pontos de reflexão difusa, triângulos vermelhos são pontos de difração, polígonos pretos são a projeção dos prismas, os círculos vermelho e verde são o Tx e Rx, respectivamente. Os raios oriundos de reflexão especular são linhas azuis, os raios oriundos de difração são de cor magenta e os raios oriundos de espalhamento são verdes. 176
- Figura 5.37 – Função de transferência simulada. Observe que as cores usuais de representação das componentes do campo foram alteradas para facilitar a comparação com a Figura 5.38. 177
- Figura 5.38 – Função de transferência obtida com os resultados da campanha de medições. Reproduzida da referência [113]. 177

Figura 5.39 – Perfil de potência e retardos simulado.	178
Figura 5.40 – Perfil de potência e retardos simulado e normalizado pelo tempo de chegada.	178
Figura 5.41 – Perfil de potência e retardos obtido dos dados da campanha. Normalizado pelo raio mais intenso (direto). Reproduzido de [113].	179
Figura 5.42 – Perfil de potência e retardo obtido pela simulação.	180
Figura 5.43 – Perfil de potência e retardo obtido pela simulação, com a mudança na escala de retardos e normalização pelo raio mais intenso (direto).	180
Figura 5.44 – Perfil de potência e retardos obtido pela campanha de medições e normalizado pelo raio mais forte. Reproduzido de [113].	181
Figura 6.1 – Gráfico comparativo entre o número de raios traçados e do tempo de processamento total, como funções do número máximo de interações dos raios com o ambiente.	184
Figura 6.2 – Canal LOS e sua função de transferência para vários valores de ordem máxima: (a) oitava ordem, (b) sétima ordem, (c) sexta ordem e (d) quinta ordem. O eixo vertical representa o módulo da FT e não sua potência.	185
Figura 6.3 – Isolamento no canal LOS em função da quantidade máxima de interações dos raios traçados com o ambiente.	185
Figura 6.4 – Perfil de potência e retardos no canal LOS: (a) até a oitava ordem, (b) até a sétima ordem, (c) até a sexta ordem e (d) até a quinta ordem.	186
Figura 6.5 – Gráfico comparativo, ordem máxima por número de raios traçado, com indicação do tempo de processamento total.	187
Figura 6.6 – Canal NLOS e sua função de transferência para vários valores de ordem máxima: (a) oitava ordem, (b) sétima ordem, (c) sexta ordem e (d) quinta ordem.	188

- Figura 6.7 – Isolamento no canal NLOS em função da quantidade máxima de ordens dos raios traçados. 188
- Figura 6.8 – Perfil de potência e retardos no canal NLOS: (a) até a oitava ordem, (b) até a sétima ordem, (c) até a sexta ordem e (d) até a quinta ordem. 189
- Figura 6.9 – Canal utilizado para a simulação de efeitos da vegetação: (a) vista geral, com escalas em metros, as árvores em verde, o Tx é um círculo vermelho, o Rx é um círculo verde, a projeção dos quarteirões no solo são polígonos com linhas pretas; (b) vista aproximada do canal, sem escalas. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização. 192
- Figura 6.10 – Traçado de raios com Tx a 3 m do solo, sendo as faces laterais dos prismas removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente. 193
- Figura 6.11 – Função de transferência do canal, na simulação com o Tx a 3 m do solo. Observa-se grande isolamento entre as polarizações ortogonais. 193
- Figura 6.12 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 3 m do solo. 194
- Figura 6.13 – Traçado de raios com Tx a 8 m do solo. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente. 195
- Figura 6.14 – Função de transferência do canal com o Tx a 8 m do solo. 195
- Figura 6.15 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 8 m do solo. 196

- Figura 6.16 – Traçado de raios com Tx a 20 m do solo. As faces laterais dos prismas foram removidas para melhor visualização. As linhas azuis, magentas e verdes representam raios oriundos de reflexão, difração e espalhamento, respectivamente. 196
- Figura 6.17 – Função de transferência do canal com o Tx a 20 m do solo. 197
- Figura 6.18 – Perfil de potência e retardos para a simulação com o Tx a 20 m do solo. 197
- Figura 6.19 – Canais utilizados na simulação: o Tx é um círculo vermelho, o Rx no ponto inicial da rota é um círculo verde e os demais pontos e direção da rota estão representados por uma linha com seta verde. As árvores estão em verde e as projeções dos prismas no solo são polígonos com linhas pretas. As faces laterais dos prismas foram removidas. As escalas estão em metros. 199
- Figura 6.20 – Canais utilizados na simulação. Os círculos vermelho e verde são o Tx e Rx, respectivamente. Uma linha vermelha foi traçada entre os transceptores; (a) visão geral do canal 1; (b) detalhe da posição relativa entre o Rx do canal 17 e o tronco da árvore próxima; (c), (d) e (e) são detalhes da posição relativa entre o Rx e o tronco da árvore próxima nos canais 18, 22 e 23, respectivamente. 200
- Figura 6.21 – Potência recebida nas componentes copolarizadas do campo nos canais. 201
- Figura 6.22 – Função de transferência e PDP do canal 1, em LOS. 202
- Figura 6.23 – Função de transferência e PDP do canal 20, em NLOS. 203
- Figura 6.24 – XPD nos canais. O isolamento é calculado pela diferença da potência recebida pelas componentes co- e cruzada do campo. 204
- Figura 6.25 – Retardo médio e Desvio RMS nos canais simulados. 204

Figura 6.26 – Detalhe do canal 10: uma linha vermelha foi traçada entre os transceptores. Pode-se ver o percurso do raio direto atravessando a copa da árvore selecionada. As árvores estão em verde e as linhas pretas são as projeções dos prismas.	205
Figura 6.27 – Canal 1, onde há visada, sem bloqueios ou propagação do raio direto através de copas.	206
Figura 6.28 – Canal 30, onde há visada sem bloqueios, mas com a propagação do raio direto através de copas.	207
Figura 6.29 – Canal 20, onde há visada e bloqueio do raio terrestre e a propagação em copas do raio direto.	208
Figura 6.30 – Potência recebida nas componentes copolarizadas do campo nos canais.	209
Figura 6.31 – XPD nos canais.	210
Figura 6.32 – Retardo médio e Desvio RMS nos canais simulados.	210
Figura 6.33 – Canais utilizados na simulação: O Tx é um círculo vermelho, o Rx no ponto inicial da rota é um círculo verde e os demais pontos e direção da rota estão representados por uma linha tracejada com seta vermelha. As árvores estão em verde e as projeções dos prismas no solo são polígonos com linhas pretas. As faces laterais dos prismas foram removidas. As escalas estão em metros.	211
Figura 6.34 – Potência recebida por canal.	212
Figura 6.35 – XPD entre as componentes copolarizadas e cruzadas do campo.	213
Figura 6.36 – Retardo médio e Desvio RMS nos canais para a componente vertical do campo.	214
Figura 6.37 – Perfil de potência e retardos para os canais de 1 a 7, próximos à praça e na polarização vertical.	215

Figura 6.38 – Perfil de potência e retardos para os canais de 1 a 7, próximos à praça e na polarização horizontal.	215
Figura 6.39 – Perfil de potência e retardos para os canais de 8 a 16, na rua cercada por prédios e na polarização vertical.	216
Figura 6.40 – Perfil de potência e retardos para os canais de 8 a 16, na rua cercada por prédios e na polarização horizontal.	216
Figura 6.41 – Perfil de potência e retardos para os canais de 17 a 25, na rua cercada por prédios e na polarização vertical.	217
Figura 6.42 – Perfil de potência e retardos para os canais de 17 a 25, na rua cercada por prédios e na polarização horizontal.	217
Figura II.1 – Atenuações específicas devidas aos gases atmosféricos. Adaptada de [16].	243
Figura IV.1 – Plano horizontal com as projeções da fonte e cilindro.	249
Figura VI.1 – Vistas da reflexão em um cilindro: painel (a), vista superior; painel (b), vista lateral e painel (c) vista em perspectiva.	255
Figura VI.2 – Vistas da reflexão em outro cilindro: painel (a), vista superior; painel (b), vista lateral e painel (c) vista em perspectiva.	265
Figura VII.1 – A geometria do problema: \hat{N} é o unitário normal à superfície no ponto P, \hat{t} é o unitário tangente à superfície no ponto P em uma dada direção e C é a linha de interseção entre o plano formado por \hat{N} e \hat{t} e a superfície Σ . Reproduzida de [126].	257
Figura VII.2 – A geometria do problema para um cilindro reto de raio a, com ângulo α entre o vetor tang. \hat{t} e o plano horizontal. Reproduzida de [126].	258
Figura VII.3 – Planos considerados para a determinação de: $\rho_g(t')$ plano amarelo, $\rho_g(Q_1)$ - plano azul e $\rho_g(Q_2)$ - plano vermelho.	258
Figura VIII.1 – Geometria geral do problema.	260
Figura VIII.2 – Geometria das projeções sobre o plano horizontal.	260

Figura VIII.3 – Distâncias retificadas. Observa-se a diferença de altura Δh entre Tx e Rx.	261
Figura XI.1 – Geometria proposta para o problema.	267
Figura XII.1 – Teste do modelo Lambertiano.	271
Figura XII.2 – Teste do modelo Diretivo, para $\alpha_r = 5$.	273
Figura XII.3 – Conceito do espalhamento Misto. Adaptado de [129].	274
Figura XII.4 – Espalhamento Misto. Feixe principal e ganho plano combinados.	274
Figura XIII.1 – Canal 1.	275
Figura XIII.2 – Canal 2.	277
Figura XIII.3 – Canal 3.	278
Figura XIII.4 – Canal 4.	279
Figura XIII.5 – Canal 5.	280
Figura XIII.6 – Canal 6.	281
Figura XIII.7 – Canal 7.	282
Figura XIII.8 – Canal 8.	283
Figura XIII.9 – Canal 9.	284
Figura XIII.10 – Canal 10.	285
Figura XIII.11 – Canal 11.	286
Figura XIII.12 – Canal 12.	287
Figura XIII.13 – Canal 13.	288
Figura XIII.14 – Canal 14.	289
Figura XIII.15 – Canal 15.	290

Figura XIII.16 – Canal 16.	291
Figura XIII.17 – Canal 17.	292
Figura XIII.18 – Canal 18.	293
Figura XIII.19 – Canal 19.	294
Figura XIII.20 – Canal 20.	295
Figura XIII.21 – Canal 21.	296
Figura XIII.22 – Canal 22.	297
Figura XIII.23 – Canal 23.	298
Figura XIII.24 – Canal 24.	299
Figura XIII.25 – Canal 25.	300

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Árvores no trecho da rua Redentor.	73
Tabela 3.2 – Dados obtidos na calle Gran Via.	74
Tabela 4.1 – Valores e zeros da função de Airy e sua derivada. Extraída de [95].	109
Tabela 4.2 – Valores da Refletividade para alguns tipos de paredes típicas.	164
Tabela 5.1 – Localizações do Tx em coord. fornecidas pelo GPS.	141
Tabela 5.2 – Identificação e localização dos locais do Rx e suas situações em relação ao Tx COL1 (com ou sem visada).	142
Tabela 5.3 – Parâmetros de configuração da simulação.	146
Tabela 5.4 – Comparações entre dados medidos e simulados para cada posição do Rx.	147
Tabela 5.5 – Comparações entre dados medidos e simulados para KAU.	152
Tabela 5.6 – Parâmetros de configuração da simulação em Nihonbashi.	158
Tabela 5.7 – Parâmetros de configuração da simulação.	162
Tabela 5.8 – Comparações entre dados medidos e simulados para cada posição do Rx.	165
Tabela 6.1 – Parâmetros de configuração da simulação.	183
Tabela 6.2 – Comparativo da variação de ordem máxima nas métricas apresentadas.	186
Tabela 6.3 – Comparativo da variação das métricas apresentadas em função da ordem máxima.	190
Tabela 6.4 – Comparativo entre as métricas em todas as simulações de altura do Tx.	198
Tabela I.1 – Possíveis combinações de raios únicos.	241
Tabela V.1 – Valores de $P^*(\xi^d)$ e $Q^*(\xi^d)$ obtidos por integr. numérica.	251

Tabela IX.1 – Lista de Parâmetros de medidas. Adaptado de [111]. 263

A ciência desenha a onda, a poesia enche-a de água.

Teixeira de Pascoaes