



COPPE/UFRJ

UMA ABORDAGEM PARA CONTROLE DE TOPOLOGIA DE REDES DE
SENSORES SEM FIO PARA AMBIENTES COM OBSTÁCULOS

Sérgio Kostin

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientador: Claudio Luis de Amorim

Rio de Janeiro
Outubro de 2008

UMA ABORDAGEM PARA CONTROLE DE TOPOLOGIA DE REDES DE
SENSORES SEM FIO PARA AMBIENTES COM OBSTÁCULOS

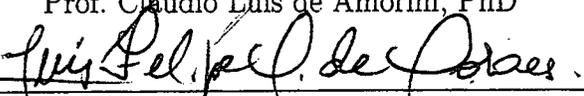
Sérgio Kostin

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO

Aprovada por:



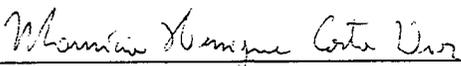
Prof. Claudio Luis de Amorim, PhD



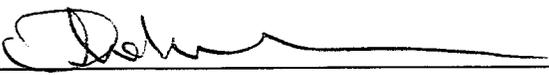
Prof. Luis Felipe Magalhães de Moraes, PhD



Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.



Prof. Maurício Henrique Costa Dias, D. Sc.



Prof. Orlando Gomes Loques Filho, PhD

RIO DE JANEIRO - RJ, BRASIL

OUTUBRO DE 2008

Kostin, Sérgio

Uma Abordagem para Controle de Topologia de Redes de Sensores sem Fio para Ambientes com Obstáculos/Sérgio Kostin. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XX, 124 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Claudio Luis de Amorim

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 113 – 124.

1. Sistemas Distribuídos. 2. Redes de Sensores. 3. Controle de Topologia. I. Amorim, Claudio Luis de . II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

(em memória)
Piotr, Fiodor, Maria e Olga

Agradecimentos

Ao Exército Brasileiro, por ter me permitido realizar os três primeiros anos deste curso em período integral. São poucas as Instituições deste país que concedem este privilégio.

Ao Professor Claudio Amorim, meu Orientador, pelo profissionalismo, por ter acreditado no meu projeto, mesmo sendo este “ousado”, pelo reconhecimento de meu esforço, me incentivado e compreendendo a minha situação de dedicação parcial, em função das minhas atividades profissionais. Sei que, sem suas características pessoais do Professor Claudio, nada disto seria possível.

Ao meu amigo Edison Ishikawa, que acompanhou e viabilizou o meu processo de requerimento ao Doutorado, ajudando-me a superar os diversos obstáculos que surgiram até a concretização da homologação pelo Exército.

Aos membros da banca, Professores Orlando, Maurício, Rezende e Luís Felipe pelas valiosas contribuições sugeridas para a correção do texto original. Ao Professor e amigo Maurício, pelas sugestões e auxílio no desenvolvimento desta tese na parte específica de Telecomunicações e no desenvolvimento de diversos artigos. Ao Professor Rezende, por ter me permitido cursar, como ouvinte, a cadeira de Redes sem Fio, fornecendo-me subsídios para a construção do Simulador. Ao Professor Luís Felipe, no tocante à análise estatística e a revisão final deste texto.

Ao Professor Claudio Esperança, do Laboratório de Computação Gráfica da UFRJ, por ter me passado os conhecimentos de Geometria Computacional e o uso da CGAL, que facilitou significativamente a construção de Zerkalo.

Ao colega e amigo Leonardo Pinho, nos desenvolvimentos e revisões dos artigos que submetemos bem como na implantação da infra-estrutura computacional necessária na parte final do trabalho.

Aos companheiros Lauro, Maltar, Marcelo, Bragato, Coser, Fábio, Rafael, João,

Diego, Arthur e demais colegas do Laboratório de Computação Paralela (sem exceção!) pela convivência harmoniosa e prazerosa que me deram nestes seis anos. Admiro-os profissionalmente e pessoalmente. Sentirei saudades.

Aos funcionários do corpo administrativo do programa de Engenharia de Sistemas e Computação (Solange, Cláudia, Sônia, Sueli e demais servidores), pelo trabalho silencioso e importante que realizam.

Aos companheiros da Subdivisão de Cursos de Pós-Graduação do Instituto Militar de Engenharia (Itamar, Edirlene, Eliane, Victória, D’Alencar, Trajano, Neves e Ferrão) pela compreensão e apoio que me prestaram nesta fase final do trabalho.

À minha amiga Maria Aparecida, pelo trabalho e carinho que dedica a mim.

Um agradecimento muitíssimo especial aos meus pais e à Simone. À Mama e ao Papa, pelo incondicional apoio que sempre me deram na vida. Tudo o que sou hoje, devo muito a eles. A minha “*mais do que querida*” Simone, pela compreensão e incentivo nestes sete anos e meio de convivência, por me “aturar” e apoiar. Sei que não há ninguém igual a ela.

Por fim, gostaria de dedicar este trabalho à memória de meus falecidos avós. Sou o primeiro da minha família a obter o título de Doutor em Ciências. Em que pese as dificuldades encontradas na execução deste trabalho (e mesmo na minha vida), nada se compara as dificuldades que meus avôs sofreram. Russos, vivenciaram a Primeira Guerra Mundial, a Revolução Russa, a Guerra Civil que a seguiu (invasão de alemães, tchecos, ingleses, franceses e norte-americanos) e a Segunda Guerra Mundial. Realizaram trabalho escravo. Vieram para o Brasil, sem falar o idioma e sem dinheiro algum, deixando um filho (meu tio) na Rússia que viemos a encontrar somente após 60 anos. Lutaram! Venceram! A estas pessoas extraordinárias, que me permitiram estar aqui hoje, dedico esta tese. *Bolshoi spaciba!*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UMA ABORDAGEM PARA CONTROLE DE TOPOLOGIA DE REDES DE
SENSORES SEM FIO PARA AMBIENTES COM OBSTÁCULOS

Sérgio Kostin

Outubro/2008

Orientador: Claudio Luis de Amorim

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Controle de Topologia (CT) de uma rede é a arte de coordenar as decisões dos nós em função dos seus alcances de transmissão, para que determinadas propriedades sejam estabelecidas, como, por exemplo, sua conectividade, enquanto reduz o consumo de energia e/ou aumenta a capacidade de transmissão da rede. A maior parte dos trabalhos da área aborda o CT de forma clássica, utilizando mecanismos de realimentação em cenários planos sem obstáculos ou de forma analítica. A principal contribuição do presente trabalho é a apresentação de técnicas para CT para cenários reais simulados que não necessitam de mecanismos de realimentação. Estas técnicas baseiam-se em duas métricas, denominadas Taxa de Bloqueio e Taxa de Utilização, aplicadas em ambiente de obstáculos conhecidos com auxílio de modelos de propagação. Estas técnicas foram simuladas em ambientes com obstáculos na implementação de protocolos de controle de topologia distribuídos (PCTD), mostrando que a técnica permite predições de comportamento de PCTD, possibilita elaborar métodos de estimação da conectividade física de entrada e de saída. Complementarmente, é apresentada uma solução determinística para o problema clássico de conectividade de k -vizinhos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

AN APPROACH FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS TOPOLOGY
CONTROL IN ENVIRONMENTS WITH OBSTACLES

Sérgio Kostin

October/2008

Advisor: Claudio Luis de Amorim

Department: Systems Engineering and Computer Science

Networking topology control is the art of coordinating the nodes' decisions regarding to their transmission range in order to establish certain properties such as the network connectivity, while reducing the energy consumption or increasing the network throughput. To this end, most research works deal with the topology control problem in the classic manner, i.e., by resorting to feedback mechanisms within plain scenarios without obstacles or using analytical formulations. With this in mind, this thesis proposes and evaluates new techniques for topology control under realistic scenarios while requiring no feedback mechanisms. The proposed techniques are based on two novel metrics, namely Blockage Rate and Useful Area Rate, applied to pre-identified environments using Site Specific Propagation models. Through simulations we evaluated the proposed techniques for environments with obstacles by implementing distributed protocols for topology control (DPTC), showing that the techniques allowed us to make predictions of DPTC behavior, and enabling to elaborate estimation methods of input/output connectivity. In addition, it was introduced a deterministic solution for the classical problem of k-neighbor connectivity.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Abreviaturas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Motivação	4
1.3 Contribuições	8
1.4 Organização da Tese	9
1.4.1 Capítulos	9
1.4.2 Apêndices	10
2 Controle de Potência de Transmissão para Redes de Sensores em Cenários com Obstáculos	11
2.1 Introdução	11
2.2 Trabalhos Relacionados	13
2.3 Perfil de Ocupação de um Cenário	14
2.4 Taxa de Bloqueio (TB)	16
2.5 Taxa de Utilização (TU)	18
2.6 Determinação da Conectividade	
Utilizando TB e TU	19
2.7 Aplicação da Técnica	20
2.8 Avaliação Experimental	20

2.8.1	Cenário Básico	20
2.8.2	Cenários Práticos	29
2.9	O Método como uma Aproximação do Valor Médio	35
2.9.1	Obtenção de Dados para Análise	35
2.9.2	Análise da Técnica como Aproximação do Valor Médio	38
2.10	Considerações Finais	41
3	Predição de Níveis de Potência de Transmissão para Protocolos de Controle de Topologia Distribuídos	42
3.1	Introdução	42
3.2	Trabalhos Relacionados	43
3.3	Predição da Distribuição dos Níveis de Potência de Transmissão	45
3.4	Avaliação Experimental	45
3.4.1	Cenário e Parâmetros de Avaliação	45
3.4.2	Conectividade	48
3.4.3	Resultados da Predição e Análise	51
3.5	Considerações Finais	53
4	Estimação do Grau de Conectividade Física de Entrada e de Saída para Redes de Sensores sem Fio em Cenários com Obstáculos	54
4.1	Introdução	54
4.2	Conectividade de Entrada e Saída para RSSF	55
4.2.1	Grau de Conectividade Lógica	56
4.2.2	Grau de Conectividade Física	56
4.3	Trabalhos Relacionados	57
4.4	Método para Estimação	58
4.4.1	Grau de Conectividade de Saída	58
4.4.2	Grau de Conectividade de Entrada	58
4.5	Avaliação Experimental	58
4.5.1	Avaliação da Predição das Potências de Transmissão	58
4.5.2	Avaliação do Grau de Conectividade de Saída	59

4.5.3	Avaliação do Grau de Conectividade de Entrada	63
4.6	Considerações Finais	64
5	Revisão do Problema de Conectividade de k-Vizinhos	66
5.1	Introdução	66
5.2	Trabalhos Relacionados	67
5.3	Avaliação Experimental	68
5.3.1	Cenários	68
5.3.2	Resultados	70
5.4	Análise	73
5.4.1	Tamanho do Escritório	74
5.4.2	Disposição dos Obstáculos e o Expoente de Perda de Percurso	75
5.4.3	Efeito do Desvanecimento por Multipercursos	75
5.5	Considerações Finais	79
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	80
6.1	Conclusões	80
6.2	Trabalhos Futuros	81
A	Propagação de Sinais de Radiofrequência	83
A.1	O Canal de Rádio-Propagação	83
A.2	Mecanismos Típicos de Propagação nas Faixas de VHF e UHF	84
A.3	Modelos de Propagação para as Faixas de VHF e UHF	87
A.4	Desvanecimento por Multipercursos	89
B	Elementos de Teoria de Grafos	93
C	Redes de Sensores sem Fio	97
C.1	Introdução	97
C.2	Exemplos de Aplicações	98
C.3	Componentes das RSSFs	99
C.4	Requisitos das RSSFs	100
C.5	Diferenças entre MANETs e RSSFs	101

D Simulador Zerkalo	103
D.1 Introdução	103
D.2 Trabalhos Relacionados	103
D.3 Zerkalo	105
D.3.1 Breve Histórico	105
D.3.2 Implementação de Zerkalo	105
Referências Bibliográficas	113

Lista de Figuras

1.1	Rede infra-estruturada	2
1.2	Rede do tipo ad hoc	3
1.3	Exemplo de um clutter map	6
2.1	Exemplo do conceito de mapa de distribuição espacial probabilístico (MDEP)	15
2.2	Exemplo de mapa de morfologia	15
2.3	Taxa de Bloqueio (TB)	16
2.4	Taxa de Utilização (TU)	18
2.5	Cenário básico para obtenção de TU e TB	21
2.6	Atenuação no cenário básico	22
2.7	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> no cenário básico	25
2.8	TB para a sala A do cenário básico	28
2.9	Primeira e segunda derivadas de TB do cenário básico	29
2.10	Razão (TB considerando multipercursos) / (TB não considerando multipercursos)	30
2.11	Cenário Kubisch	30
2.12	Cenário LCP	31
2.13	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> da sala A do cenário Kubisch	33
2.14	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> da sala B do cenário LCP	33
2.15	Taxa de Bloqueio para as salas A e B	34
2.16	Comparação dos resultados obtidos pela técnica e pela simulação em Kubisch	36
2.17	Comparação dos resultados obtidos pela técnica e pela simulação no LCP	37

2.18	Diferença entre a potência encontrada na simulação e a estimada pela técnica	39
2.19	Análise do intervalo de confiança da comparação entre a média obtida pela simulação e pela técnica	40
3.1	Cenário Jogo-da-velha	46
3.2	Perda por atenuação na sala do centro, no cenário Jogo-da-velha . . .	46
3.3	Perda por atenuação na sala lateral, no cenário Jogo-da-velha	47
3.4	Perda por atenuação na sala do canto, no cenário Jogo-da-velha . . .	47
3.5	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> da sala do centro	48
3.6	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> da sala lateral	49
3.7	<i>Conectividade</i> \times <i>Potência de Transmissão</i> da sala do canto	49
4.1	Diferença entre os graus de conectividade física e lógica: o nó T tem grau de conectividade lógica igual a 5 e grau de conectividade física igual a 10	55
4.2	Avaliação da predição de potência de transmissão no LCP com portas fechadas	60
4.3	Avaliação da predição de potência de transmissão no LCP com portas abertas	61
4.4	Predição da conectividade física de saída do LCP com portas fechadas	62
4.5	Predição da conectividade física de saída do LCP com portas abertas	62
4.6	Predição da conectividade física de entrada do LCP com portas fechadas	63
4.7	Predição da conectividade física de entrada do LCP com portas abertas	64
5.1	Cenários testes para o problema de conectividade de k -vizinhos	69
5.2	Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Vazio	71
5.3	Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Jogo-da-velha	71
5.4	Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Jogo-da-velha Pequeno	72
5.5	Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Kubisch	72

5.6	Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário LCP	73
5.7	Efeito da dimensão da área sobre k	74
5.8	Efeito da disposição dos obstáculos sobre k	75
5.9	Efeito do desvanecimento por multipercurso sobre k no cenário Jogo-da-velha	76
5.10	Efeito da variação do limiar de aceitação do desvanecimento por multipercurso sobre k	76
5.11	Exemplo de conectividade sem considerar o desvanecimento por multipercurso	77
5.12	Exemplo de conectividade considerando o desvanecimento por multipercurso	77
A.1	Mecanismos de propagação	84
A.2	Perda de percurso referente a um equipamento com $\lambda = 0,122m$	86
A.3	Reflexão de primeira e segunda ordem	87
A.4	Exemplo do cálculo de PL por traçado de raios	90
A.5	Diagrama de fases exibindo dois sinais que chegam ao receptor adicionando: construtivamente (a) ou destrutivamente (b)	91
B.1	Exemplos de grafos	94
D.1	Exemplo ilustrativo de redução de caminho relativo máximo para dentro de uma elipse	107
D.2	Modelo de propagação de sinais	108
D.3	Utilização do método das imagens para traçar um caminho de três reflexões	109
D.4	Diagrama de classes do simulador de rede	111
D.5	Diagrama de classes para o cálculo das métricas	112

Lista de Tabelas

2.1	Dados de TU e TB da sala A para o cenário básico	23
2.2	Conectividade em função da potência para sala A do cenário básico .	24
2.3	Expoente de perda de percurso dos cenários Kubisch e LCP	32
2.4	Percentual estimado pela técnica dentro do IC	38
3.1	Distribuição de potências para a sala central e $k=40$	50
3.2	Distribuição de potências para a sala lateral e $k=40$	50
3.3	Distribuição de potências para a sala do canto e $k=40$	51
4.1	Potências médias obtidas pelo método e pela simulação no LCP . . .	59
5.1	Número crítico de vizinhos para valores de N	67
5.2	Expoente de perda de percurso dos cenários	74

Lista de Símbolos

B_{CA}	Função Bloqueio Considerando Atenuação, p. 17
B_{SA}	Função Bloqueio Sem Considerar Atenuação, p. 17
T	Coefficiente de <i>Fresnel</i> de Transmissão, p. 106
U_{CO}	Função Utilização Considerando Obstáculos, p. 18
U_{SO}	Função Utilização Sem Considerar Obstáculos, p. 19
Γ	Coefficiente de <i>Fresnel</i> de Reflexão, p. 106
ε_r	Permissividade Relativa, p. 106

Lista de Abreviaturas

k	Grau de Conectividade, p. 35
AR	Área de Receptores, p. 16
AT	Área de Transmissores, p. 17
BGL	Boost Graph Library, p. 66
CTBC	Cone-Based Topology Control, p. 43
CTS	Clear To Send, p. 13
FDTD	Finite-Difference Time-Domain, p. 89
FEM	Finite Elements Method, p. 89
GSL	GNU Scientific Library, p. 110
GloMoSim	Global Mobile Information Systems Simulation Library, p. 7
IC	Intervalo de Confiança, p. 38
KNeighLev	K Neighbors Level Based, p. 44
KNeigh	K Neighbors, p. 44
LBTCP	Level-Based Topology Control Protocol, p. 44
LCP	Laboratório de Computação Paralela, p. 32
LINT	Local Information no Topology, p. 43
LMST	Local Miminum Spanning Tree, p. 43
LOS	Line-of-Sight, p. 85

MANET	Mobile Ad-hoc Network, p. 2
MANETs	Mobile Ad-hoc Networks, p. 5
MDEP	Mapa de Distribuição Espacial Probabilístico, p. 12
NP	Não-Polinomial, p. 67
NS-2	Network Simulator, p. 7
NTP	Nível de Potência de Transmissão, p. 11
OLOS	Obstructed Line-of-Sight, p. 85
PA	Ponto-Área, p. 88
PCTD	Protocolo de Controle de Topologia Distribuído, p. 43
PCTDs	Protocolos de Controle de Topologia Distribuídos, p. 43
PCT	Protocolo de Controle de Topologia, p. 66
PCTs	Protocolos de Controle de Topologia, p. 66
PDA	Personal Digital Assistants, p. 98
PP	Ponto-a-Ponto, p. 88
Parsec	Parallel Simulation Environment for Complex Systems, p. 7
RASSFs	Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio, p. 98
RFID	Radio-Frequency IDentification, p. 2
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio, p. 3
RSSFs	Redes de Sensores Sem Fio, p. 5
RSSFs	Redes de Sensores sem Fio, p. 1
RSSI	Received Strength Signal Intensity, p. 90
RTS	Ready To Send, p. 13
RT	Traçado de Raios, p. 89

S-XTC	Signal-Strength Topology Control, p. 44
SISP	Site Specific Environment Models, p. 5
TB	Taxa de Bloqueio, p. 8
TTT	Tic-Tac-Toe, p. 70
TU	Taxa de Utilização, p. 8
UHF	Ultra High Frequency, p. 84
VHF	Very High Frequency, p. 84
XML	Extensible Markup Language, p. 110
XTC	eXtreme Topology Control, p. 44
sTTT	small Tic-Tac-Toe, p. 70

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é apresentado o contexto desta tese e, em particular, sua principal motivação: propor técnicas para controle de potência em redes de sensores sem fio (RSSFs) em ambiente com obstáculos conhecidos. Em seguida, elencam-se as principais contribuições resultantes do trabalho. Por fim, descreve-se a organização dos demais capítulos que completam esta tese.

1.1 Contexto

As tecnologias de comunicação de dados sem fio disponíveis atualmente foram desenvolvidas para permitir a conexão entre diferentes pontos por meio de equipamentos que usam acústica, ótica [1] e radiofrequência.

Estas tecnologias estão cada vez mais presentes no cotidiano. Utilizar um computador em um estacionamento ou praia seria considerado algo impraticável havia dez anos. Hoje é algo corriqueiro a utilização destes equipamentos nas praias de Copacabana, interconectados a uma rede sem fio.

As redes sem fio podem ser classificadas, segundo o padrão 802.11, como infra-estruturadas e Ad Hoc.

Numa rede infra-estruturada, como a ilustrada pela Figura 1.1, é necessário alocar em cada região ao menos um ponto de acesso central para fornecer o serviço de acesso à rede para os demais nós participantes. A principal característica desta rede é que a comunicação entre os diversos pontos passa obrigatoriamente pela estação base.

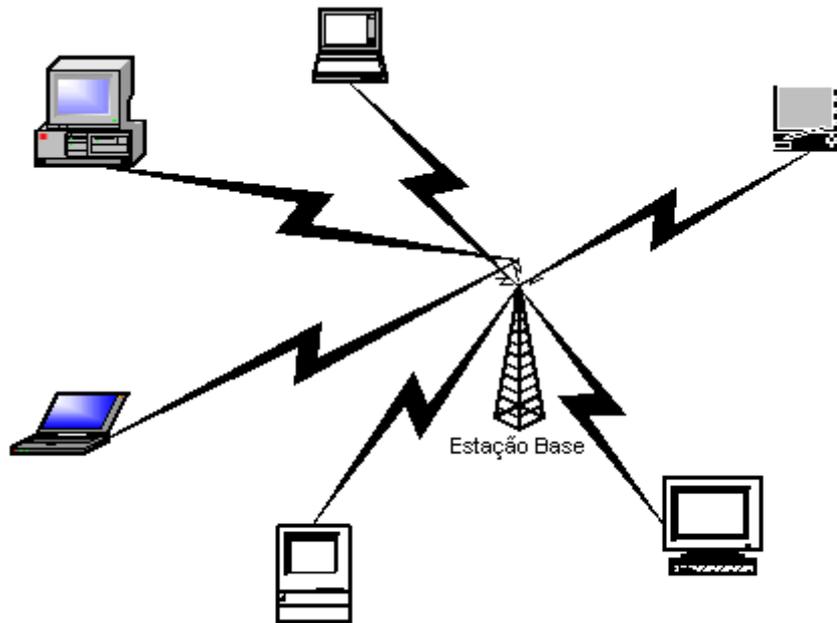


Figura 1.1: Rede infra-estruturada

Nas redes do tipo Ad Hoc ou MANET (*Mobile Ad-hoc Network*), ilustrada na Figura 1.2, os elementos participantes trocam os dados entre si por meio de um esquema *peer-to-peer* ou através um esquema de roteamento de múltiplos saltos (*multi-hop*), sem necessitar passar por um nó central.

Paralelamente, neste mesmo contexto, o avanço da indústria microeletrônica, com escala e barateamento na fabricação de componentes [2] tem permitido e estimulado a utilização de “sensores inteligentes”, no auxílio do controle de diversas áreas da indústria, no monitoramento militar, ambiental e de tráfego, na Medicina, etc..

O progresso da tecnologia tem trazido estes dispositivos cada vez mais próximos do ser humano. Não é apenas uma tendência de equipar eletroeletrônicos, mas também bens consumíveis, como os dispositivos de identificação de radiofrequência (*Radio-Frequency IDentification* - RFID).

Vislumbra-se que, futuramente, a computação irá cercar definitivamente o cotidiano, permitindo uma visão de um ambiente inteligente, onde diversos dispositivos reunirão e processarão informações das mais diferentes fontes para, ao mesmo tempo, controlar processos físicos e interagir com o ser humano.

Assim, combinando a evolução das redes sem fio com o barateamento dos com-

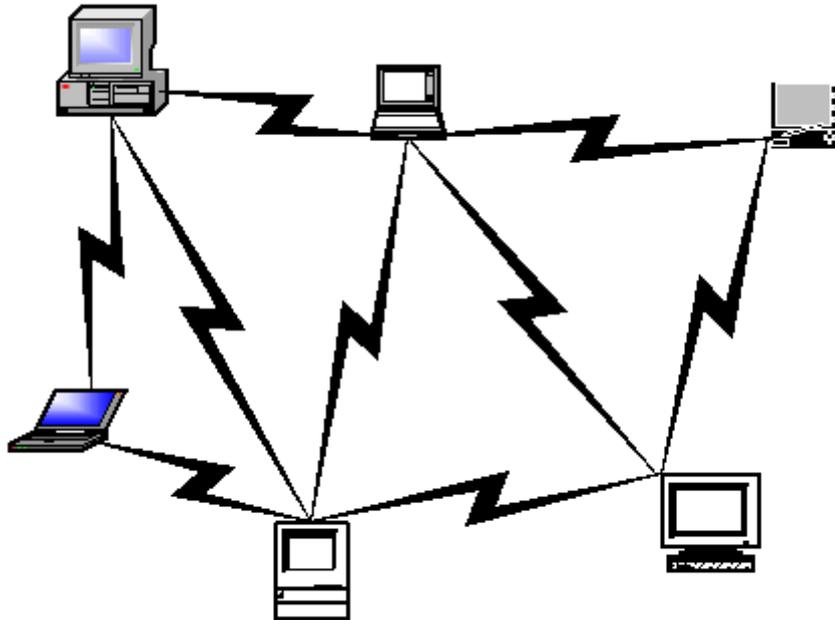


Figura 1.2: Rede do tipo ad hoc

ponentes, surgiu uma nova classe de rede: as redes de sensores sem fio (RSSFs) [2], [3].

Estas redes consistem em terminais inteligentes que são capazes de interagir com o meio ambiente pelo monitoramento ou pelo controle de parâmetros físicos[2]. Os nós participantes destas redes devem colaborar entre si para poder cumprir suas tarefas, sendo que um nó isolado é normalmente incapaz de realizar sua tarefa. Uma característica importante é que os nós utilizam tecnologia de transmissão sem fio como forma de interagirem entre si. O termo nó sensor inteligente é aplicado ao dispositivo que contém um ou mais sensores com capacidade de processamento de sinais e comunicação de dados [4].

Embora as RSSFs sejam uma evolução das redes Ad Hoc, estas diferem daquelas em vários aspectos [2], [5].

O número de nós em uma rede de sensores sem fio (RSSF) é, em tese, muito maior do que o dos nós existentes numa MANET (*Mobile Ad-hoc Network*), tendo, como consequência, uma maior densidade de transceptores por área. A RSSF é consideravelmente mais sujeita a falha, devido a menor qualidade de seus integrantes. Estas falhas fazem com que a topologia da rede altere-se com frequência superior às redes Ad Hoc, devendo possuir mecanismos de autoconfiguração. Os nós sensores

utilizam a difusão de dados como mecanismo de comunicação ao passo que as redes Ad Hoc são, em essência, baseadas no modelo ponto-a-ponto. Os nós sensores são limitados em potência, energia, capacidade computacional e memória em comparação aos componentes de uma rede Ad Hoc [2], [5].

Em função de suas aplicações, as RSSFs tendem a ser autônomas e requerem um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para elas. Os elementos participantes de RSSF são transceptores em sua essência e, como salientado anteriormente, possuem severas restrições de energia. O tempo de vida da rede depende de eficiência de cada solução de *hardware*, *software* e *middleware* que compõe sua arquitetura.

O ponto crítico de consumo de energia nas RSSFs ocorre na comunicação entre os nós, com valores muito superiores quando comparado com o gasto em processamento e sensoriamento[2].

As soluções propostas para as redes Ad Hoc não atendem completamente às necessidades das RSSFs[2], principalmente em função destas possuírem um número significativamente maior de nós e uma elevada taxa de falhas em função da pior qualidade de seus componentes devido ao seu baixo custo, além de serem extremamente limitadas em disponibilidade de energia.

1.2 Motivação

O problema de controle de potência em redes Ad Hoc e RSSF é que a escolha da potência de transmissão para cada pacote transmitido deve ser feita de um modo distinto para cada nó. Esse problema torna-se complexo pelo fato da escolha do nível de potência afetar fundamentalmente muitos aspectos da operação da rede.

O nível de potência de transmissão determina a qualidade do sinal recebido no receptor, o alcance de transmissão e a magnitude de interferência que ele ocasiona em outros receptores [6].

O controle de potência produzirá, portanto, reflexos em todas as camadas da rede[6]. Na camada física, afetará a qualidade do enlace e a relação sinal/ruído, alterando assim, também, o correto funcionamento da camada de acesso ao meio. Na camada de rede, afetará a descoberta de rotas, devido ao seu relacionamento direto

com o alcance de transmissão. Na camada de transporte, se mal utilizada, pode causar congestionamento. A escolha do nível de potência alterará a conectividade da rede [7], [8], [9] e, conseqüentemente, a funcionalidade de enviar um pacote da origem para seu destino, afetando a capacidade de transmissão da rede.

O foco deste trabalho é que parte das aplicações de MANETs (*Mobile Ad-hoc Networks*) e, particularmente, de RSSFs (Redes de Sensores Sem Fio) assume que se conheça previamente o comportamento mediano de propagação de sinais eletromagnéticos do cenário onde a rede de sensores irá operar, bem como a característica de ocupação do terreno por parte dos nós participantes. Como exemplos, tem-se o planejamento de redes sem fio em ambientes universitários [10] e aplicações de monitoramento ambiental. Em particular, a confecção de *Clutters Databases*¹ (Figura 1.3) reforça ainda mais esta realidade.

A confecção de mapas temáticos de morfologia são uma ferramenta importante no estudo da propagação dos sinais da área em questão. Este estudo é feito por meio de modelos analíticos e até modelos mais sofisticados denominados Modelos Específicos de Predição de Sinais (*Site Specific Environment Models - SISP*)[13].

SISP são modelos de análise de toda radiação eletromagnética existente entre o transmissor e o receptor. Este modelos podem ser baseados no uso de expressões analíticas ou com uso de ferramentas computacionais. Devem levar em conta a reflexão, difração e dispersão, e requerem, para tal, informações detalhadas do ambiente de operação (mapas temáticos de elevação, morfologia, etc.)[13], [14], [15].

A ocupação do cenário pelos sensores e o conhecimento da sua área de atuação podem fazer parte do planejamento da instalação de uma RSSF. Neste caso, é possível conhecer a priori como e em que quantidade os sensores irão ocupar uma determinada região.

Tendo em vista que um dos objetivos principais das RSSFs é a economia de energia, é imprescindível que seus nós tirem proveito dessas informações (distribuição

¹*Clutters Database* [11] (ou *Land-use Databases*) são bancos de dados de mapas que fornecem informações sobre características do ambiente e de ocupação do terreno. Estes mapas são entradas críticas em termos de planejamento e otimização, tendo impacto significativo em modelos de propagação (usualmente semi-empíricos) seja em termos de ajuste, seja em termos de posicionamentos dos transmissores. Estes mapas são uma classe especial de “mapa temático”[12]. Particularmente, mapas com informações do tipo indicado são conhecidos por “mapas de morfologia”

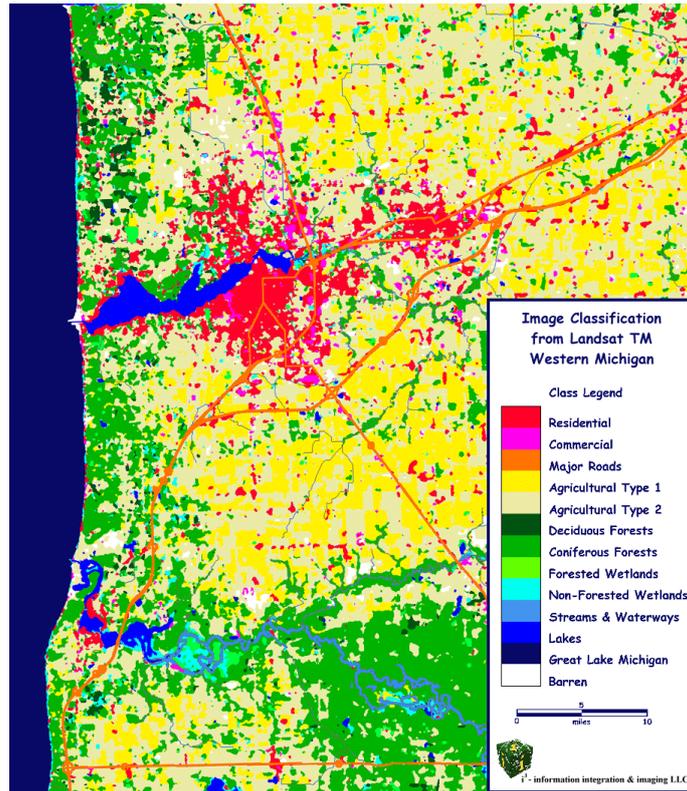


Figura 1.3: Exemplo de um clutter map

da perda da propagação eletromagnética e ocupação probabilística do terreno).

Um exemplo simplificado bem ilustrativo seria de um nó sensor móvel adentrando em uma área onde não houvesse outros nós sensores à sua volta. Caso ele soubesse que estava adentrando nesta área específica (e não precisasse obviamente estar conectado), ele poderia ficar apenas em estado de escuta ou temporariamente desligado aguardando entrar em uma área onde a comunicação com outros nós sensores fosse possível.

Outro exemplo é a transmissão de sensores em uma área onde se saiba qual a atenuação máxima existente entre dois sensores participantes da rede. Com esta informação se evitaria que os sensores participantes da rede utilizassem potências de transmissão acima das necessárias[16], embora possa haver alguma restrição a esta premissa ao se tratar de redes móveis.

Nesse sentido, a literatura sobre redes Ad Hoc, e em particular a de RSSFs, ainda não possui técnicas padronizadas que permitam aproveitar estas informações como aspectos de propagação e ocupação do terreno.

Examinando a literatura da área, observa-se que os programas de simulação de

redes utilizam, em sua maior parte, uma realidade restrita do cenário utilizado. A maior parte dos trabalhos científicos considera cenários sem obstáculos, rádios de alcances idênticos, simetria das telecomunicações (transmissão e recepção), onde a potência do sinal é uma simples função da distância [17], [18], [19].

Os simuladores de redes acadêmicos mais utilizados [20] são o NETWORK SIMULATOR (NS-2) [21] e o Global Mobile Information Systems Simulation Library (GLOMOSIM) [22].

O NS-2 é um simulador de eventos discretos destinado à pesquisa na área de Redes de Computadores. O NS-2 fornece muitas funcionalidades na simulação de redes TCP, roteamento e protocolos multicast sobre redes cabeadas e sem fio.

O GLOMOSIM é destinado a simulações de sistemas cabeados e sem fio. Ele foi projetado para utilizar a capacidade de simulação de eventos discretos paralelos fornecida pelo Parsec²[23].

Embora sejam de grande utilidade e amplamente utilizados para validação de sistemas, estes simuladores não permitem a inserção de cenários específicos [18]. Em relação à obstrução da propagação, estas ferramentas somente permitem o ajuste da variável do expoente de perda de percurso e seu desvio padrão, não permitindo verificar a eficácia dos modelos propostos em cenários práticos [17], [19], tornando menor o impacto dos resultados simulados obtidos.

Por outro lado, trabalhos mais recentes na área tendem a descrever cenários mais realísticos, com a incorporação de obstáculos aos simuladores [24], [25], [26].

A presente tese defende a utilização de cenários mais realísticos, mas propondo técnicas que permitam agregar, de forma sintética, informações sobre a ocupação de ambientes conhecidos e a propagação nestes cenários. Este conhecimento agregado aos nós sensores participantes de RSSFs, compensaria, em parte, as limitações características dos integrantes da rede, possibilitando os nós sensores a se ajustarem eficazmente ao terreno onde operam.

Estas técnicas devem agregar informações significativas do terreno, servindo de apoio para que os transceptores escolham a potência de ajuste de transmissão ade-

²Parsec (*Parallel Simulation Environment for Complex Systems*) é uma linguagem de simulação baseada em C, desenvolvida pelo Laboratório de Computação Paralela da Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA), para execução paralela e sequencial de eventos discretos. Ele também pode ser utilizado como linguagem de programação paralela.

quada mais rapidamente, além de servirem de subsídios para predição de comportamento de protocolos de controle de topologia, estimação do grau de conectividade física de entrada e de saída para RSSF. As técnicas devem sintetizar informações que permitam calcular quantitativamente e qualitativamente quanto o cenário bloqueia as transmissões no ambiente. Devem ainda conjugar dados sobre informações sobre o terreno, como área de obstáculos e regiões de pouca ocupação e o aproveitamento efetivo do sinal transmitido.

Outro aspecto desejável é que estas técnicas identifiquem barreiras de propagação e as quedas nas potências de transmissão a elas associadas, permitindo ao nó sensor saber evitar a contenção de dados e/ou superar essas barreiras.

Ressalta-se que a maior parte da literatura estudada considera mecanismos de realimentação quando aborda o problema de RSSFs. Quando se desconhece o terreno em que as RSSFs irão trabalhar, esta abordagem deve ser prioritária. Porém, em geral, as técnicas de realimentação não tiram proveito da vantagem do conhecimento do cenário que se pode ter a priori.

As técnicas propostas nesta tese são alternativas para esquemas dominantes baseados em realimentação de dados, podendo, inclusive, servir como subsídios complementares para estas soluções.

1.3 Contribuições

Em resumo, as principais contribuições presentes nesta tese são:

- Introdução de duas novas métricas para controle de potência de transmissão para cenários com obstáculos: taxa de bloqueio (TB) e taxa de utilização (TU). TB possui informações relacionadas ao aspecto quantitativo e qualitativo em relação à obstrução da propagação de sinais pelo ambiente. TU fornece informações sobre o terreno, como área de obstáculos e regiões de pouca ocupação e o aproveitamento efetivo do sinal transmitido.
- Introdução de um novo método de controle de potência para RSSF em cenários com obstáculos conhecidos permitindo associar o grau de conectividade com a potência aplicada sem utilizar mecanismos de realimentação.

- Introdução de um novo método que permita prever o comportamento de protocolos de controle de topologia distribuídos para RSSF, especificamente baseados em número de vizinhos.
- Introdução de um novo método de estimação da conectividade física de entrada e de saída para RSSF em cenários com obstáculos.
- Revisão do problema clássico de conectividade de k -vizinhos em cenários mais realistas.
- Desenvolvimento de um simulador de redes que considera as características de propagação de um cenário e permita simular eventos discretos.

1.4 Organização da Tese

Esta tese é composta por outros 5 capítulos e por 4 apêndices.

1.4.1 Capítulos

- O Capítulo 2 propõe e avalia as métricas para controle de topologia, sua operacionalização e a discussão de 3 casos aplicados. Ao final, é mostrado que as métricas permitem estimar o valor médio de potência aplicada em um ambiente com obstáculos.
- O Capítulo 3 discute as técnicas de controle de topologia existentes. Este capítulo mostra que as técnicas são capazes de prever o comportamento de dois protocolos de controle de topologia baseado em número de vizinhos.
- O Capítulo 4 desenvolve um método que permite estimar o grau médio de conectividade física de entrada e de saída de uma RSSF em ambiente com obstáculos.
- O Capítulo 5, apresenta uma solução determinística para o problema clássico de conectividade de k -vizinhos.
- O Capítulo 6 conclui esta tese.

1.4.2 Apêndices

- O Apêndice A, apresenta fundamentos de propagação de sinais de radio-freqüência.
- O Apêndice B elenca definições de elementos de teoria de grafos utilizadas nesta tese.
- O Apêndice C caracteriza as RSSFs.
- O Apêndice D descreve detalhes da implementação de *Zerkalo*.

Capítulo 2

Controle de Potência de Transmissão para Redes de Sensores em Cenários com Obstáculos

2.1 Introdução

Um dos principais problemas enfrentados para a utilização eficaz de RSSF é a limitada capacidade de energia das baterias dos nós sensores. Essa restrição torna imperativo que cada nó sensor exerça um controle efetivo do Nível de Potência de Transmissão (NTP) de forma a garantir a conectividade da rede pelo máximo de tempo.

Porém, minimizar o consumo de energia ao mesmo tempo em que se tenta maximizar o desempenho da comunicação sem fio são dois objetivos conflitantes que influenciam muitos aspectos da operação da rede.

Neste Capítulo é apresentada uma técnica original [27] que permite o controle eficiente da potência de transmissão para aplicações de RSSF em cenários com obstáculos. É importante notar que a ocupação do cenário, bem como o conhecimento da área de atuação podem fazer parte do planejamento da instalação de uma RSSF. Esta ocupação pode ser aleatória, planejada ou se caracterizar por densidade de probabilidade específica [4]. Assim a técnica utiliza, primeiramente, do

fato comum a esses cenários que é possível se dispor, a priori, do seu mapa temático [12], doravante denominado Mapa de Distribuição Espacial Probabilística (MDEP). Este MDEP contém informações concernentes à propagação eletromagnética e à distribuição probabilística de transmissores e receptores no cenário com obstáculos. Segundo, a técnica apresenta duas métricas estatísticas originais formuladas matematicamente que permitem expressar quantitativamente para um dado MDEP, as características de ocupação e propagação do terreno em que a RSSF será empregada.

Para demonstrar o potencial do controle eficiente da potência de transmissão proposto, a técnica foi testada utilizando simulações detalhadas de propagação eletromagnética em três cenários de escritórios.

Os resultados obtidos mostraram que a técnica proposta permitiu associar potências de transmissão ao número de nós sensores alcançados, potências mínimas para atravessar obstáculos, bem como os níveis mínimos de potências de transmissão que, quando atingidos, permitiram aos transceptores cobrir todo o cenário. Ainda, os transceptores de uma rede de sensores podem se beneficiar das métricas propostas para ajustarem eficientemente o nível de potência de transmissão de acordo com o cenário em que forem empregados de forma a estender a vida útil de suas baterias e a conectividade da RSSF.

Em resumo, este Capítulo apresenta as seguintes contribuições: propor e avaliar métricas formuladas matematicamente para o controle eficiente de potência de transmissão em cenários de RSSF com obstáculos, considerando atenuação e interferência por multipercurso; desenvolver um método de utilização dessas métricas e demonstrar os potenciais benefícios que o método oferece, em particular, a economia de energia que o uso dele permite.

O restante deste trabalho está dividido da seguinte forma: a Seção 2.2 apresenta os trabalhos relacionados; a Seção 2.3 introduz o MDEP; as Seções 2.4 e 2.5 definem as métricas de suporte à técnica; a Seção 2.6 exhibe o cálculo da conectividade utilizando as métricas definidas anteriormente; a Seção 2.7 define como a técnica deve ser utilizada; a avaliação experimental, realizada por meio de simulações, por sua vez, é descrita na Seção 2.8; a Seção 2.9 apresenta uma avaliação da técnica como uma aproximação do valor médio da potência aplicada; e, finalmente, a Seção 2.10 apresenta as considerações finais.

2.2 Trabalhos Relacionados

A maioria dos trabalhos de controle de potência encontrados na literatura [6] adota uma das três seguintes estratégias. Na primeira, empregam-se modelos de roteamento que poupam energia (*Power-Aware Routing*) segundo um algoritmo do menor caminho, em geral o *Bellman-Ford* distribuído [28]. Na segunda, modifica-se a camada de acesso ao meio [29], [30], alterando, por exemplo, o procedimento de *handshake*, por meio das mensagens RTS (Ready To Send) e CTS (Clear To Send) do IEEE 802.11, para permitir que os nós transmitam em níveis menores de potência. Na terceira estratégia, como a adotada neste trabalho, procura-se encontrar uma potência ótima para controlar as propriedades de conectividade de toda [31] ou parte [32] de uma rede.

Em relação às métricas aplicadas ao controle de topologia, foram encontrados os seguintes trabalhos, principalmente relacionados à medida de interferência que ocorre na rede.

BUKART *et al* [33] apresentaram um modelo independente de tráfego de dados que contabiliza a interferência de uma rede como um todo. Esta métrica é denominada *maximum edge coverage*, que resulta do número máximo de nós afetados por um específico enlace da rede.

RICKENBACH *et al* [34] expandiram [33], introduzindo um modelo de interferência, baseado no receptor. Neste modelo, a cobertura de um dado nó v de um grafo de rede G é definida como o número de nós cobertos por v com seus discos induzidos pelo conjunto de transmissão para alcançar o vizinho mais distante em G . A interferência da rede como um todo é definida pela máxima cobertura de qualquer nó na rede.

MAVENI e ZIANG-YANG [35] propuseram um métrica alternativa que corresponde à interferência média da rede. Neste caso, a interferência é definida como a soma da cobertura de todos os enlaces da rede dividida pelo número de nós da rede.

IANONE *et al* [36] levaram, também, em consideração a potência de transmissão aplicada. Se o número de vizinhos for constante quando um nó aumenta ou diminui sua potência de transmissão de P_1 para P_2 , a medida de interferência deverá, também, aumentar/diminuir. Ainda, se dois vizinhos N_1 e N_2 estivessem utilizando o mesmo nível de transmissão, mas possuíssem diferentes números de vizinhos, as

interferências ocasionadas pelos nós deveriam diferir para refletir a diferença de seu número de vizinhos.

JOHANSSON e CARR-MOTYCKOVA [37] apresentaram duas métricas para computar a interferência média de caminho (*average path interference*), isto é, a soma da interferência de todos os caminhos ótimos entre dois nós, divididos pelo número dos pares de nós do grafo. Com isto, objetivava mensurar a interferência de toda a rede, ao invés do pior caso. De posse deste dado, nós que estivessem acima deste valor buscariam diminuir sua interferência, minimizando a interferência como um todo.

Ressalta-se que todas essas métricas foram propostas para cenários sem obstáculos e não foram testadas em cenários específicos.

2.3 Perfil de Ocupação de um Cenário

Basicamente, o mapa de distribuição espacial probabilístico (MDEP) é um mapa que fornece a informação probabilística da distribuição de transmissores e receptores em uma determinada área. Sistemas de localização [38], [39], [40] fazem uso deste tipo de informação. Equipamentos de computação móvel dentro de uma área tendem a formar um perfil de ocupação. Por exemplo, pedestres normalmente caminham em calçadas, praças públicas, jardins e parques. Carros circulam em ruas, avenidas e estradas. Assim, de acordo com as características de ocupação do terreno, é possível elaborar um modelo matemático que represente tal ocupação.

A Figura 2.1 ilustra um exemplo simplificado de um MDEP para transceptores em uma determinada região. As diferentes áreas hachuradas representam densidades de probabilidade distintas. A área de peso 4 representaria estradas. As áreas de peso 2 representariam calçadas por onde transitam pedestres. A área de peso 1 representaria os jardins da localidade. Os obstáculos poderiam ser, por exemplo, elevações. O modelo proposto pode representar áreas que não são obstáculos eletromagnéticos, porém não são ocupadas por nós. O lago presente na Figura 2.1 é um exemplo desta representação.

Estas informações poderiam ser, ainda, obtidas de mapas morfológicos (Figura 2.2) ou elaboradas quando do planejamento da rede. Ressalta-se ainda que o MDEP

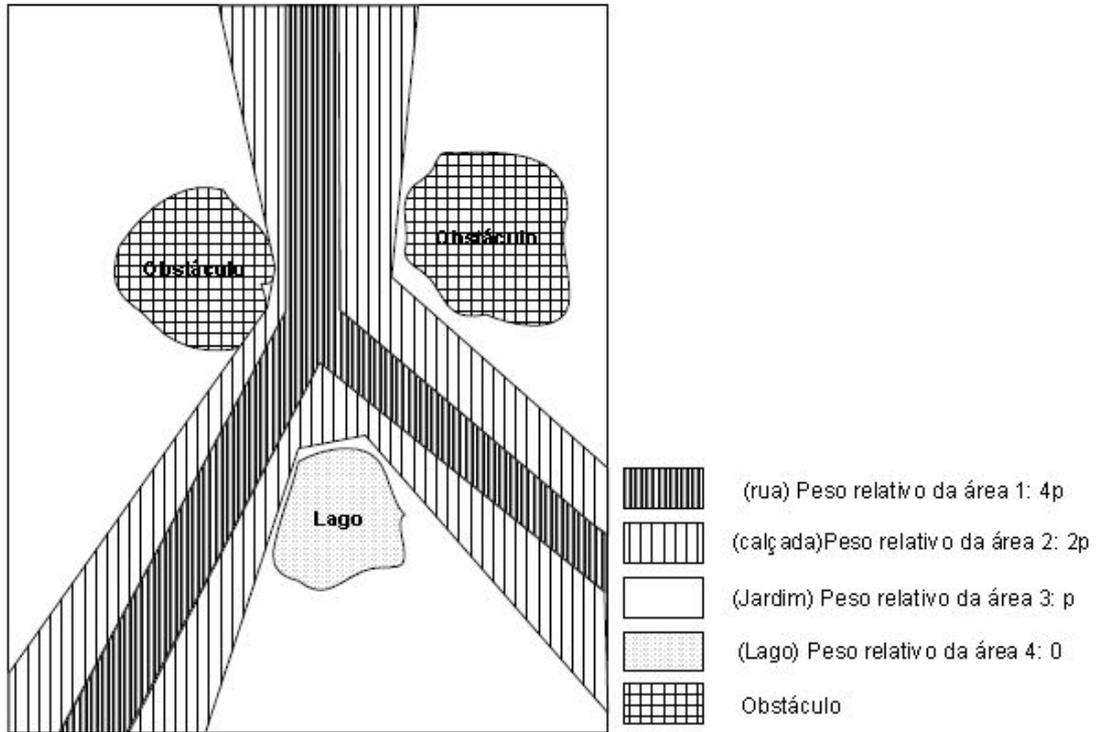


Figura 2.1: Exemplo do conceito de mapa de distribuição espacial probabilístico (MDEP)

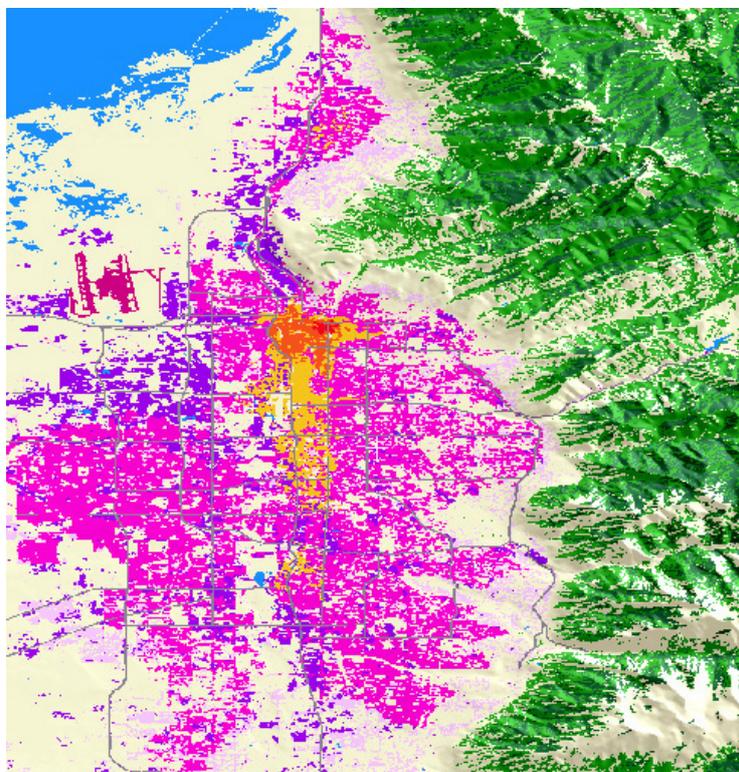


Figura 2.2: Exemplo de mapa de morfologia

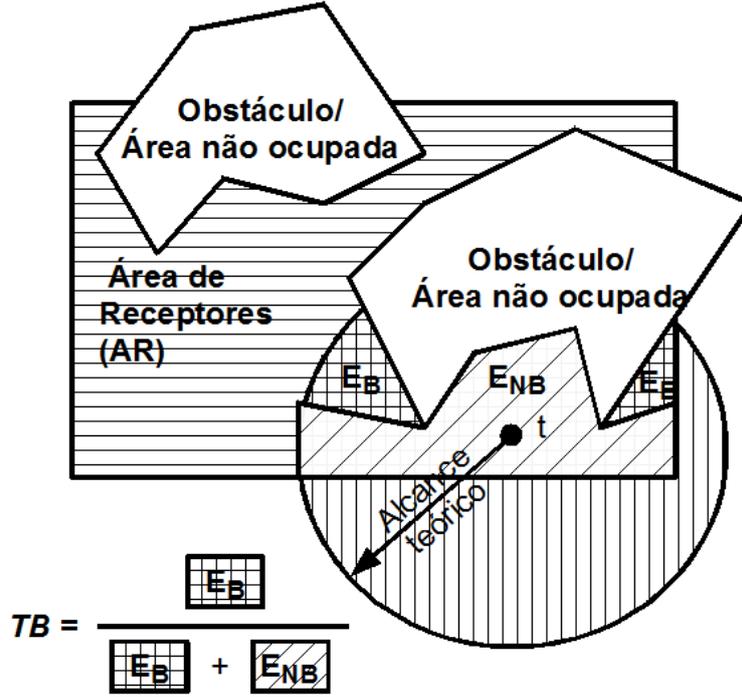


Figura 2.3: Taxa de Bloqueio (TB)

não é obrigatoriamente estático, podendo variar em função do tempo.

De posse do MDEP, é possível definir as métricas TB e TU introduzidas a seguir.

2.4 Taxa de Bloqueio (TB)

A Figura 2.3 ilustra uma situação típica onde um dado obstáculo é capaz de bloquear o sinal eletromagnético de um transmissor t , estabelecendo quatro áreas distintas em relação à qualidade de recepção do sinal: a área de receptores, AR ; a área de cobertura teórica não contida em AR ; a área de cobertura teórica contida em AR , porém bloqueada pelos obstáculos (E_B); e a área não bloqueada (E_{NB}). A Taxa de Bloqueio (TB) expressa a razão entre (E_B) e (E_B) somado a (E_{NB}).

Especificamente, TB para uma determinada classe de transmissores, localizada na posição s e aplicando determinada potência de transmissão pw_i , $TB(t(s, pw_i))$, é definida pela Equação:

$$TB(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} P(r_j(x) | t(s)) B_{CA}(t(s, pw_i), r_j(x))}{\sum_{x \in AR} P(r_j(x) | t(s)) B_{SA}(t(s, pw_i), r_j(x))} \quad (2.1)$$

AR é a região onde os receptores podem estar localizados ($x \in AR$). O numerador

representa a probabilidade condicionada de um receptor do tipo j , r_j , ser encontrado na localização x , $r_j(x)$, dado que um transmissor tipo t está na localização s ($t(s)$).

O símbolo r_j representa o tipo de receptor existente no cenário. No cálculo da métrica, devem-se considerar ganhos de transmissão e recepção das antenas (considerando seus ângulos de incidência) e a sensibilidade do equipamento.

A função B verifica a interação entre a transmissão emitida por $t(s, pw_i)$ (transmissor t , localizado na posição s , emitindo com uma potência pw_i) e $r_j(x)$ (receptor r_j na posição x), considerando ou não a atenuação que os obstáculos provocam no sistema. Os sub-índices CA e SA da função B significam “Com Atenuação” e “Sem Atenuação”.

$B_{CA} \in \{-1, 1, 0\}$. B_{CA} retorna 0 caso o receptor destino ($r_j(x)$) estiver dentro do alcance teórico e for alcançado pelo transmissor quando este aplica a potência pw_i . B_{CA} retorna 1 caso o ponto destino ($r_j(x)$) estiver dentro do alcance teórico, mas devido aos obstáculos, sua conexão é interrompida ou a taxa de erro é incompatível para a transmissão. B_{CA} retorna -1 quando o receptor originalmente não recebia o sinal, mas devido à configuração dos obstáculos permite que seja alcançado. Isto ocorre, por exemplo, em edificações com corredores [41], em função dos multipercursos.

$B_{SA} \in \{0, 1\}$. A função B_{SA} considera os obstáculos existentes no cenário, ignorando os fenômenos de propagação, e retornando 1 para todos os receptores r_j localizados em x , $r(x)$, que estão dentro do alcance teórico de $t(s, pw_i)$ e zero para os demais casos, ou seja, pontos que estiverem dentro dos obstáculos ou além do alcance teórico.

TB é calculado para uma determinada Área de Transmissores (AT), que representa a região onde os transmissores estão localizados, computando-se a média ponderada (considerando o peso de cada nó sensor estar na posição s) de todas as $TB(t(s, pw_i))$, conforme a Equação (2.2). São também agregadas informações estatísticas, especialmente desvio padrão, mediana, média, valores máximo e mínimo.

$$TB(AT, t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{s \in AT} P(t(s)).TB(t(s, pw_i))}{\sum_{s \in AT} P(t(s))} \quad (2.2)$$

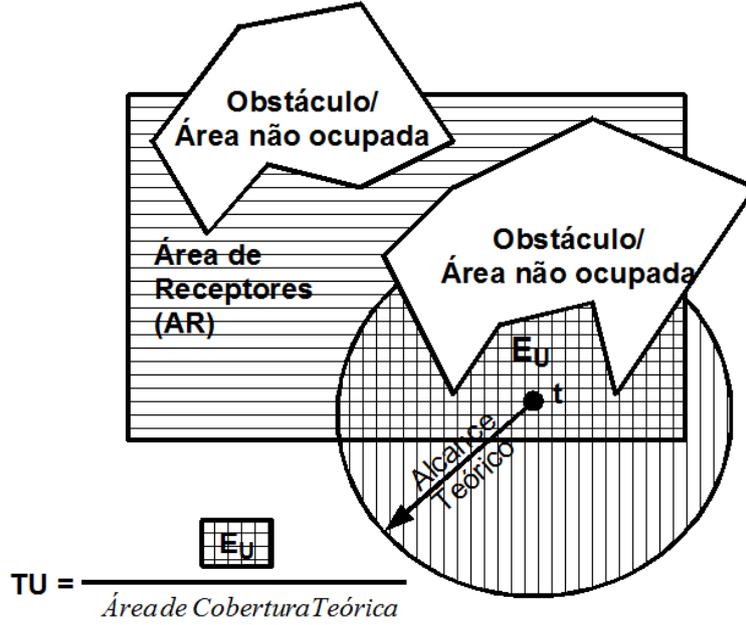


Figura 2.4: Taxa de Utilização (TU)

2.5 Taxa de Utilização (TU)

A Taxa de Utilização (TU), ilustrada na Figura 2.4, expressa a razão entre a área teórica de cobertura do transmissor contida na área de receptores alcançada pelo transmissor (excluindo-se a área de obstáculos e outras regiões sem receptores do sinal) e a área teórica de cobertura propriamente dita. Considerou-se, assim, apenas aspectos de propagação com a distância, desprezando demais efeitos eletromagnéticos.

A TU de uma determinada classe de transmissores t , localizada na posição s e aplicando uma potência de transmissão pw_i , $TU(t(s, pw_i))$, é dada pela Equação:

$$TU(t(s, pw_i)) = \frac{\sum_{x \in AR} U_{CO}(t(s, pw_i), r_j(x))}{\sum_{x \in AR} U_{SO}(t(s, pw_i), r_j(x))} \quad (2.3)$$

A função U verifica a interação entre a área de cobertura teórica e os obstáculos do cenário. Os sub-índices CO e SO da função U significam “Com Obstáculos” e “Sem Obstáculos”.

$U_{CO} \in \{0, 1\}$. A função U_{CO} verifica a interação entre a transmissão emitida por $t(s, pw_i)$ (transmissor t , emitindo com uma potência pw_i) e $r_j(x)$ (receptor r_j na posição x), considerando os obstáculos do cenário. U_{CO} retorna 1 quando o receptor

r_j estiver dentro da área de alcance teórico e 0, caso contrário.

$U_{SO} \in \{0, 1\}$. A função U_{SO} quantifica a quantidade de pontos que está dentro do alcance teórico considerando a sensibilidade do receptor r_j , retornando 1 quando está dentro da área de cobertura e 0 caso contrário. Este denominador é proporcional (considerando o numerador da equação 2.3) a área teórica de cobertura referente à emissão de potência pw_i .

A intenção da TU é computar a área de aproveitamento efetivo da propagação, não sendo necessário computar a probabilidade específica do receptor (exceto nos casos onde esta é igual a zero, o que pode representar também um obstáculo). A probabilidade de ocupação espacial de cada receptor já é considerada no cálculo da TB , tornando-se desnecessário (e equivocado) aplicar-se novamente este ponderador.

2.6 Determinação da Conectividade

Utilizando TB e TU

Seja $AC(t(s, pw), r_j)$ a área de cobertura teórica de um transmissor t , na posição s , operando em um nível de potência de transmissão pw para um determinado receptor r_j . Assuma-se D como a densidade de sensores por unidade de área e considerando a função $t(s, pw)$ igual a z . Computando estas variáveis componentes do produto para obter um determinado grau de conectividade de saída para uma determinada posição, tem-se:

$$C(z) = (1 - TB(z))TU(z)AC(z, r_j)D \quad (2.4)$$

Expandindo a Equação (2.4) para uma região, analogamente como realizado na Equação (2.2), computa-se ainda diversas variáveis estatísticas. A média, por exemplo, é computada pela Equação (2.5).

$$C(TA, t(pw), D) = \frac{\sum_{s \in TA} P(t(s))C(t(s, pw), D)}{\sum_{s \in TA} P(t(s))} \quad (2.5)$$

2.7 Aplicação da Técnica

O cômputo das métricas deve ser previamente realizado antes do início da operação da RSSF. Os valores devem ser armazenados em cada nó sensor por meio manual ou por meio de difusão de dados. Esta última é a forma preferida, pois permite tratar a inclusão/exclusão de obstáculos no cenário ou a modificação do ambiente após o início da operação da RSSF.

Outra alternativa seria a difusão destes dados por nós sensores com capacidade de localização que eventualmente participem da RSSF.

As métricas TB e TU são calculadas fora do ambiente da RSSF por computadores pessoais ou por dispositivos de alta capacidade de processamento de dados (como agrupamento de computadores), dependendo do tamanho e do ambiente de operação.

De posse dos dados, os nós sensores utilizam as tabelas com os dados de conectividade para escolher qual potência de transmissão é mais adequada. A complexidade de escolha é $O(n)$, onde n é o número de potências de transmissão disponíveis no equipamento.

As métricas devem ser utilizadas de forma organizada. O uso indiscriminado de TB e TU em um ambiente heterogêneo minimizaria os benefícios de economia de energia. O ideal seria a utilização das métricas em pequenos agrupamentos de nós sensores que poderiam ser detectados automaticamente durante o processamento de dados, por intermédio de técnicas de Mineração de Dados (por exemplo, *Clustering*) onde as localizações com TB menores são candidatos naturais para a localização de pontos de difusão da informação.

2.8 Avaliação Experimental

2.8.1 Cenário Básico

Parâmetros de simulação

Para avaliar os potenciais benefícios do método, considerou-se inicialmente a configuração de escritório mostrada na figura 2.5, doravante denominado cenário básico. O cenário básico é composto de 3 salas e um grande salão. Há um vidro de 2 cm de

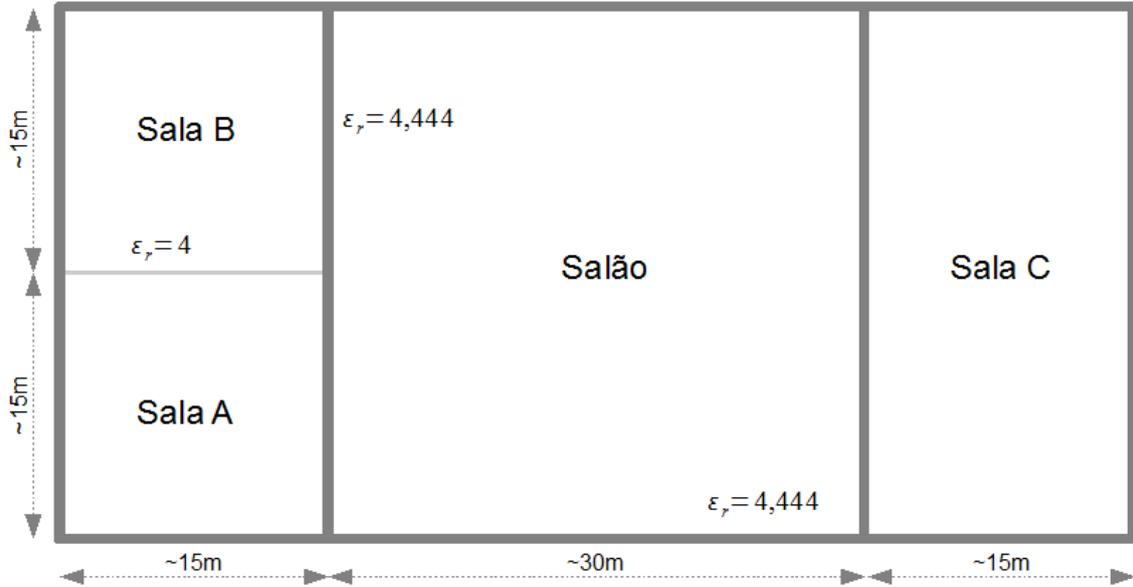
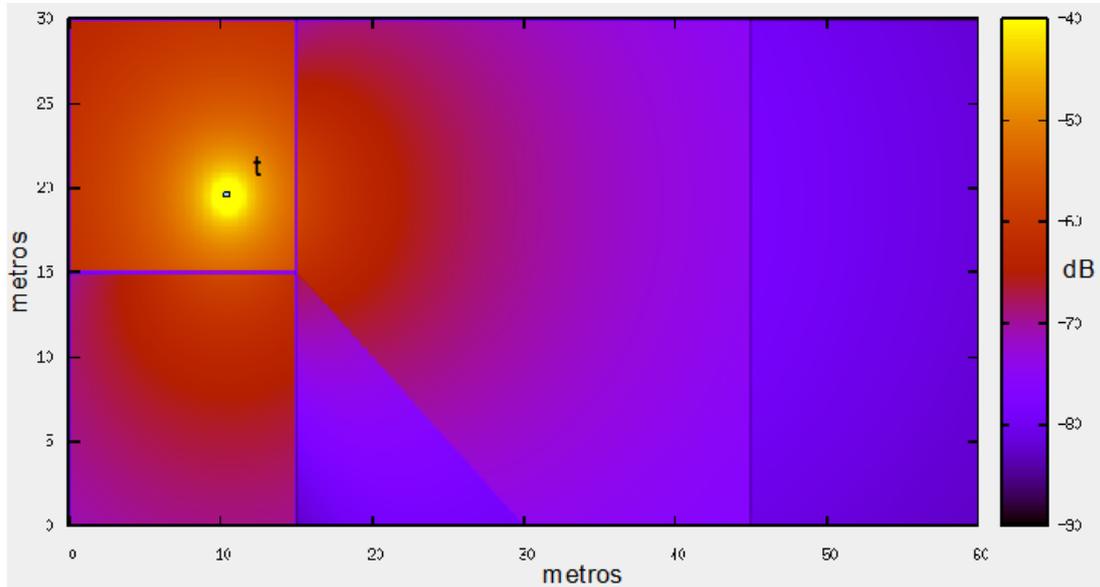


Figura 2.5: Cenário básico para obtenção de TU e TB

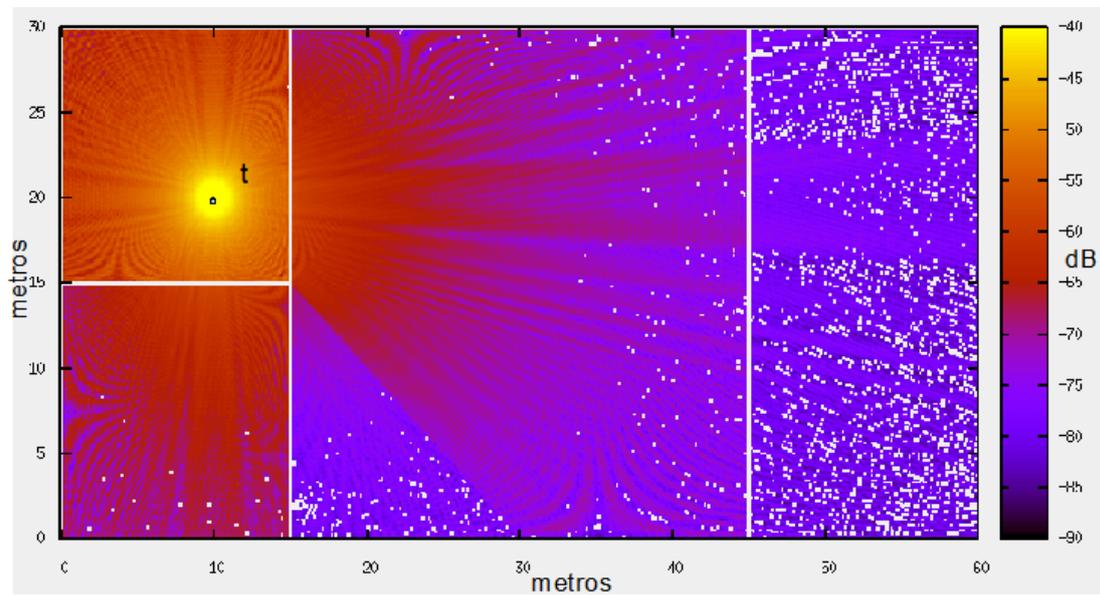
espessura entre as salas A e B, com permissividade relativa (ϵ_r) igual a 4. As paredes restantes possuem 15 cm de espessura e são de alvenaria com $\epsilon_r = 4,444$. Neste cenário, por hipótese, a densidade de ocupação do salão é igual a 0 e todo o restante do cenário tem densidade de ocupação de 0,1 sensor por metro quadrado, segundo uma distribuição uniforme e fazem parte de uma mesma RSSF. Para o cálculo das métricas, bem como da propagação, utilizou-se o simulador *Zerkalo*, desenvolvido nesta tese.

Foram computadas as métricas definidas nas Subseções 2.4 e 2.5 para transmissores da sala A e receptores nas salas A, B e C, considerando reflexões de segunda ordem. Consideraram-se também os seguintes parâmetros: comprimento de onda igual a 0,122 metros (frequência igual a 2,4GHz), sensibilidade de recepção de detecção de dados igual a -70dBm, e antenas dipolos com 1,64dB de ganho, tanto para transmissão como para recepção. Neste cenário, as antenas estão a meia altura entre o chão e o teto. Assim, os principais efeitos de propagação estão concentrados no plano horizontal, simplificando o problema de propagação em uma análise 2D.

Em relação à interferência por multipercurso, a métrica *TB* requer um parâmetro de corte para considerar ou não o resultado de desvanecimento, além da intensidade total. Para a análise em questão, é assume-se bloqueio quando a potência recebida pelo caminho principal (normalmente o caminho direto, mas não necessariamente) é



(a) Atenuação no Cenário Básico sem Considerar Multipercursos



(b) Atenuação Considerando Multipercursos no Cenário Básico

Figura 2.6: Atenuação no cenário básico

Tabela 2.1: Dados de TU e TB da sala A para o cenário básico

Pw	Alc	TU	TB	$\sigma(TB)$	TB'	TB''	TBMP	$\sigma(TBMP)$	TBMP/TB
-20	3,1	0,873	0,03	0,072	0	0	0,034	0,075	1,133
-18	3,9	0,841	0,039	0,085	0,009	0	0,056	0,098	1,436
-16	5	0,807	0,053	0,101	0,014	0,005	0,078	0,116	1,472
-14	6,2	0,75	0,068	0,102	0,015	0,001	0,113	0,118	1,662
-12	7,9	0,686	0,09	0,117	0,022	0,007	0,146	0,13	1,622
-10	9,9	0,616	0,111	0,114	0,021	-0,001	0,187	0,124	1,685
-8	12,5	0,524	0,154	0,109	0,043	0,022	0,259	0,106	1,682
-6	15,7	0,419	0,224	0,086	0,07	0,027	0,333	0,075	1,487
-4	19,8	0,314	0,288	0,04	0,064	-0,006	0,384	0,069	1,333
-2	24,9	0,222	0,269	0,095	-0,019	-0,083	0,366	0,124	1,361
0	31,3	0,146	0,167	0,117	-0,102	-0,083	0,286	0,153	1,713
2	39,4	0,104	0,144	0,12	-0,023	0,079	0,291	0,148	2,021
4	49,6	0,097	0,388	0,1	0,244	0,267	0,506	0,083	1,304
6	62,5	0,073	0,501	0,002	0,113	-0,131	0,595	0,05	1,188
8	78,6	0,046	0,496	0,011	-0,005	-0,118	0,592	0,048	1,194
10	99	0,029	0,402	0,092	-0,094	-0,089	0,523	0,093	1,301
12	124,6	0,018	0,141	0,105	-0,261	-0,167	0,358	0,126	2,539
14	156,9	0,012	0,027	0,058	-0,114	0,147	0,296	0,095	10,963
16	197,5	0,007	0,025	0,059	-0,002	0,112	0,295	0,094	11,8
18	248,7	0,005	0,018	0,04	-0,007	-0,005	0,291	0,09	16,167

menor que o dobro da soma complexa da potência recebida pelos demais caminhos, isto é, se a soma complexa de todos os fasores de multipercurso (excetuando-se o componente principal) é menor que a metade do componente principal, então $B_{CA} = 0$. Caso contrário, $B_{CA} = 1$ para interferência destrutiva e $B_{CA} = -1$ para interferência construtiva. A Figura 2.6 ilustra como *Zerkalo* calcula a perda por caminho percorrido não considerando e considerando a interferência por multipercurso, respectivamente. Os pontos em branco na Figura 2.6(b) representam os mais afetados pela interferência por multipercurso.

As Tabelas 2.1 e 2.2 mostram os resultados obtidos referentes ao cálculo de TU e TB para a sala A no cenário básico e os dados da conectividade em função da potência aplicada para a mesma sala.

As duas primeiras colunas da Tabela 2.1 representam, respectivamente, o nível

Tabela 2.2: Conectividade em função da potência para sala A do cenário básico

Pw	TU(1-TB)(média)	σ (TU(1-TB))	MP(média)	σ (MP)
-20	24	5	24	5
-18	35	8	35	9
-16	52	13	51	14
-14	83	21	80	24
-12	118	31	112	34
-10	161	33	149	40
-8	211	27	187	39
-6	247	29	214	38
-4	273	43	238	51
-2	316	56	275	66
0	374	53	321	68
2	428	27	354	56
4	448	3	363	46
6	449	2	364	45
8	453	10	367	43
10	538	83	428	83
12	772	94	578	114
14	875	52	633	85
16	876	53	634	84
18	883	36	637	81

de potência de transmissão aplicada (em dBm) e alcance teórico (em metros). Da terceira a sétima desta Tabela (TU , TB , desvio padrão de TB , a primeira derivada de TB , a segunda derivada de TB) são apresentados dados referente a TU e TB sem considerar o desvanecimento por multipercursos. A oitava coluna mostra a conectividade média em função da potência considerando multipercursos. A nona coluna apresenta o desvio padrão dos dados obtidos na sétima coluna. Por fim, a décima coluna apresenta a razão (TB considerando multipercursos) / (TB não considerando multipercursos).

As colunas da Tabela 2.2 representam, respectivamente: nível de potência de transmissão (em dBm), conectividade média (sem considerar multipercursos), desvio padrão desta conectividade, conectividade média considerando multipercursos (MP(média)) e desvio padrão da conectividade média considerando multipercursos.

Conectividade

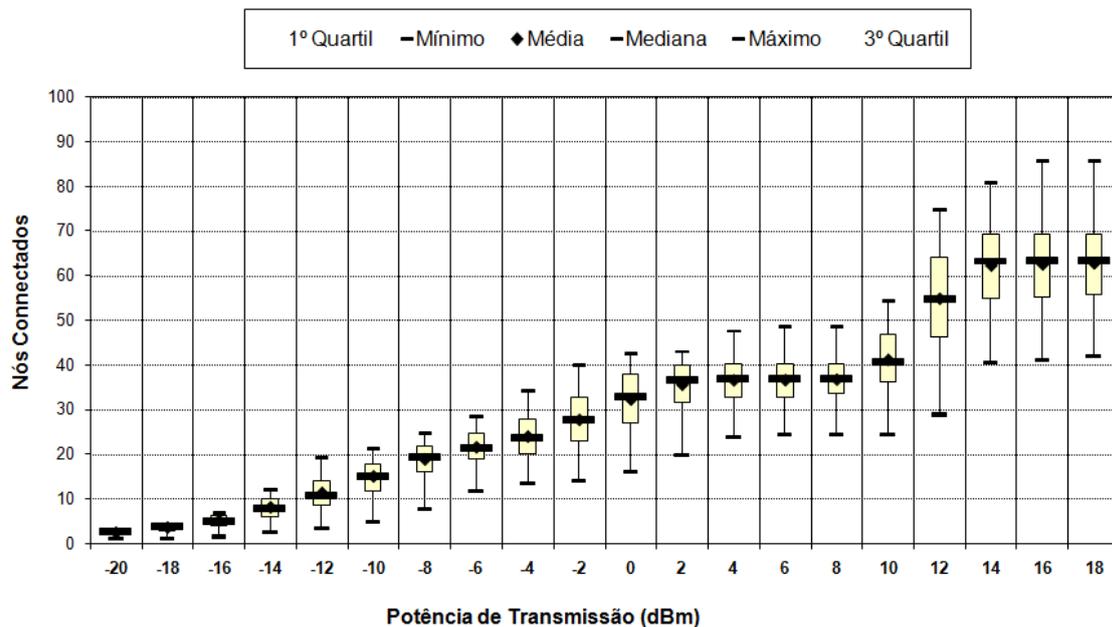


Figura 2.7: *Conectividade* \times *Potência de Transmissão* no cenário básico

Computou-se os valores da Equação (2.4), considerando as hipóteses anteriormente descritas. Neste caso foram computados os seguintes parâmetros estatísticos: valor mínimo, primeiro quartil, média, mediana, terceiro quartil e valor máximo. Para o caso em questão, há 20 linhas contendo as potências, com seis colunas es-

tatísticas. A Tabela 2.2 também é reproduzida na forma de gráfico, conforme ilustrado na Figura 2.7, acrescentando outros dados como o valores máximo, mínimo, mediana, primeiro e terceiro quartil.

Suponha-se, por hipótese, que os sensores busquem conectar-se com outros 40 nós. De acordo com o método proposto, checar-se-ia sua tabela, no intuito de encontrar os valores que permitam alcançar tal conectividade. No cenário em questão, apenas para níveis de potência de transmissão maiores ou iguais a 0dBm, este objetivo será alcançado com probabilidade maior que zero. Caso 0dBm for o Nível de Potência de Transmissão (NPT) escolhido, haverá uma chance menor que 0,25 de alcançar os 40 nós. Entre 2dBm e 8dBm, a chance é de 0,25. Neste sentido, se 0,25 é uma probabilidade aceitável, a melhor escolha seria 2dBm, dado que o consumo de energia seria menor. Seguindo no gráfico, se fosse escolhido 10dBm, a probabilidade cresceria para 0,50. Escolhendo 12dBm, a probabilidade seria maior que 0,75. Finalmente, de 14dBm em diante, a conectividade desejada seria sempre, em teoria, alcançada.

Outro exemplo: caso o objetivo de conectividade fosse 10 nós, aplicar-se-ia -14dBm, com probabilidade aproximada de 0,25. Comparando o gráfico, os níveis de potência de transmissão e sua probabilidade de conectividade seriam: -12dBm com algum valor entre 0,50 e 0,70, -10dBm com probabilidade entre 0,75 e 1, -8dBm próximo de 1. Para níveis de potência de transmissão superiores a -6dBm, a conectividade de 10 seria, em tese, alcançada.

É necessário mencionar que no presente método, o nível de potência de transmissão é escolhido em uma única tentativa, sem necessitar de mecanismos de realimentação de outros nós sensores, o que acarreta em economia não só de energia como de tempo. Uma variação deste método seria utilizar mecanismos de realimentação. Neste caso, o uso da potência sugerida pelo método pode ser o mais indicado como primeira tentativa, ajustando-se posteriormente o nível de potência mais adequado.

Como salientado anteriormente, a técnica poderia ser utilizada complementarmente em algoritmos que utilizam realimentação. Considere que um nó sensor deseja conectar-se a 3 nós, enviando um *probe* (ou SYNC) com o nível mais baixo de energia disponível (no caso -20dBm), computando o número de respostas recebidas. Denominar-se-á esta tentativa de *rodada*. Ao final de cada *rodada*, caso não atinja

a conectividade desejada, o nó sensor aumentaria a potência de transmissão, nível a nível (-20dBm , -18dBm , -16dBm , etc.), até se atingir o objetivo desejado. Seja $1ue$ a unidade de energia gasta em uma transmissão de -20dBm multiplicada pelo tempo de transmissão de um *probe*. O incremento de 2dB na potência de transmissão corresponderia a um acréscimo de $1,585$ de unidades de energia (ue), caracterizando uma progressão geométrica. Assim, relacionado $i = 1$ para uma potência de -20dBm , $i = 2$ para potência de transmissão de -18dBm e assim sucessivamente, obter-se-ia a Equação (2.6), que calcula o total de energia gasto por um algoritmo conservador até que se atinja o grau de conectividade desejado, onde *alvo* é o índice i correspondente a potência a qual a conectividade desejada é efetivamente alcançada.

$$\text{Total de energia consumida} = \sum_{i=1}^{\text{alvo}} 1,585^{i-1}ue \quad (2.6)$$

Para alcançar o grau de conectividade 3, consultando-se a Tabela 2.1, considerando o caso médio do cenário básico, este algoritmo conservador em termos de energia consumiria um total de $25,387ue$, até alcançar o objetivo. Aplicando-se o método, no caso médio, gastar-se-ia $10ue$ e apenas uma *rodada*. O algoritmo conservador gastaria $25,387ue$ e 6 *rodadas* para alcançar a conectividade desejada, levando em conta apenas o gasto energético do nó sensor mestre. Assim, a aplicação do método permite a economia média de $15,387ue$ e 5 *rodadas*. A economia é ainda maior se considerar a energia gasta pelos nós sensores que enviam a resposta e a ocorrência de eventuais casos de colisão. Aplicando-se a política conservadora do método ($-12\text{ dBm} = 6,310ue$) para a primeira tentativa, ainda economizar-se-ia $9,078ue$ e 4 *rodadas*. Priorizando a conectividade (considerando uma abordagem pessimista), partindo do nível de potência mais alto disponível (18 dBm), o custo inicial seria de $6310 ue$. O método transmitiria a 0 dBm , com custo de $100ue$.

O total economizado seria função da posição do nó sensor, mas previamente seria possível saber quais seriam os parâmetros de contorno.

Dado que considerável parte das RSSF utiliza o protocolo de acesso ao meio SMAC[42], B-MAC[43] ou assemelhado, operando parte substancial do tempo em modo *sleep*, o controle de potência de transmissão de um sensor após ele acordar é significativo para o tempo de vida útil da bateria. Nesta situação, os benefícios

potenciais da TU e da TB serão expressivos quando se deseja alcançar, em uma única rodada, determinado grau de conectividade de forma rápida e simples.

Aspectos de Bloqueio

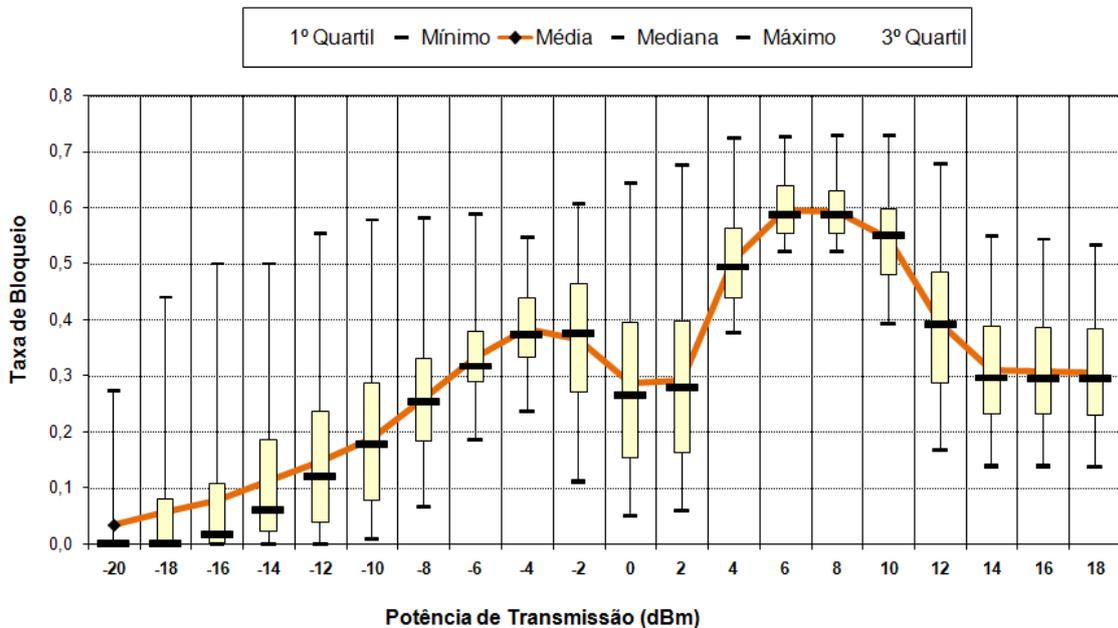


Figura 2.8: TB para a sala A do cenário básico

Além da conectividade, o método permite fazer inferências sobre bloqueio e limites para superar barreiras de propagação, simplesmente pela interpretação de TB . No cenário básico, há quatro importantes barreiras separando a sala A das salas B e C : a parede de vidro, as paredes do salão vazio e o espaço deste salão.

De acordo com os valores de TB calculados para a sala A mostrados na Figura 2.8 e suas derivadas, mostradas na Figura 2.9, pode-se perceber que devido ao vidro entre as salas A e B , TB cresce continuamente até o NPT de -6dBm ($BR'' = 0$), quando a barreira é ligeiramente ultrapassada. A primeira derivada de TB em -2dBm ($TB' < 0$) mostra a inversão de TB , o que significa que em níveis de potência de transmissão desta magnitude, a parede de vidro será efetivamente ultrapassada.

Ve-se na Figura 2.7, que a conectividade entre 2dBm e 8dBm é muito semelhante. Isto é devido às paredes e ao espaço vazio existentes no salão. Analisando TB' a 8dBm , observa-se um novo ponto de inflexão, que significa que a irradiação eletromagnética começa a superar estas barreiras. A partir de 10dBm , o sinal al-

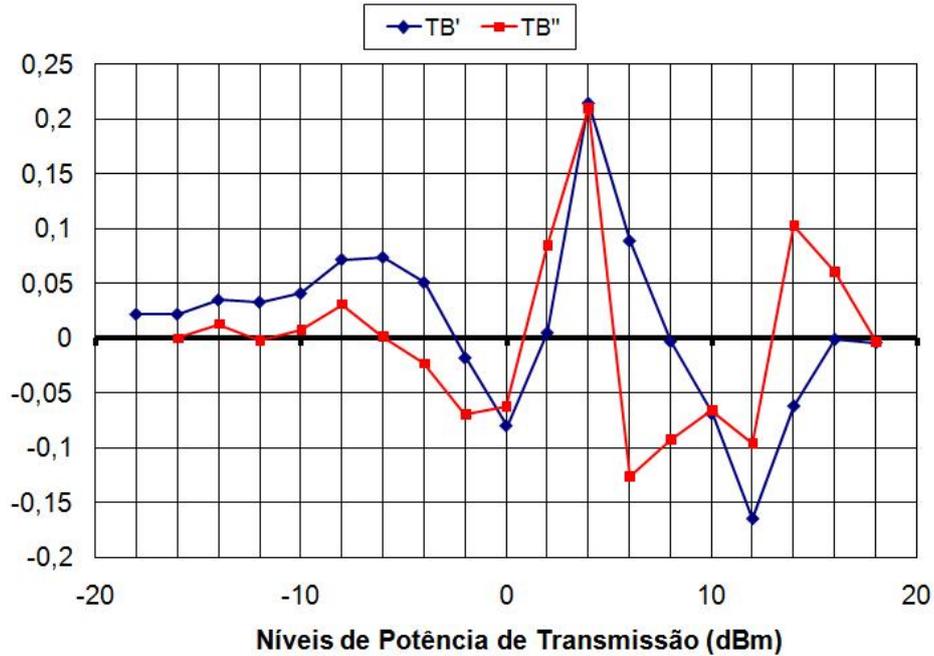


Figura 2.9: Primeira e segunda derivadas de TB do cenário básico

cança a sala C , decrementando o valor de TB e incrementando a conectividade. Por outro lado, as barreiras ajudam a evitar colisões, por ajudar a confinar os sinais transmitidos pelo nó sensor dentro destas barreiras.

Uma importante observação é que a interferência por multipercursos aumenta o valor de TB quando comparado com o cálculo de TB sem considerar este fenômeno. A razão entre TB calculada em ambas as situações (sem considerar e considerando a interferência por multipercurso) foi sempre maior que 1 em todos os níveis de potência de transmissão (de -20dBm até 18dBm), variando de 1,1 até 16,2, como se pode ver na Figura 2.10, obtidos da Tabela 2.1. Em outras palavras, o método oferece uma forma simples de se levar em consideração os efeitos de multipercursos na conectividade da rede, corrigindo eventuais predições otimistas que poderiam surgir da análise da perda de percursos simples.

2.8.2 Cenários Práticos

Embora seja útil para o entendimento das métricas e o método em si, o cenário anterior não é um exemplo extraído de um caso real. Por isso, são apresentados dois cenários reais: Kubisch [44] (Figura 2.11) e o do Laboratório de Computação

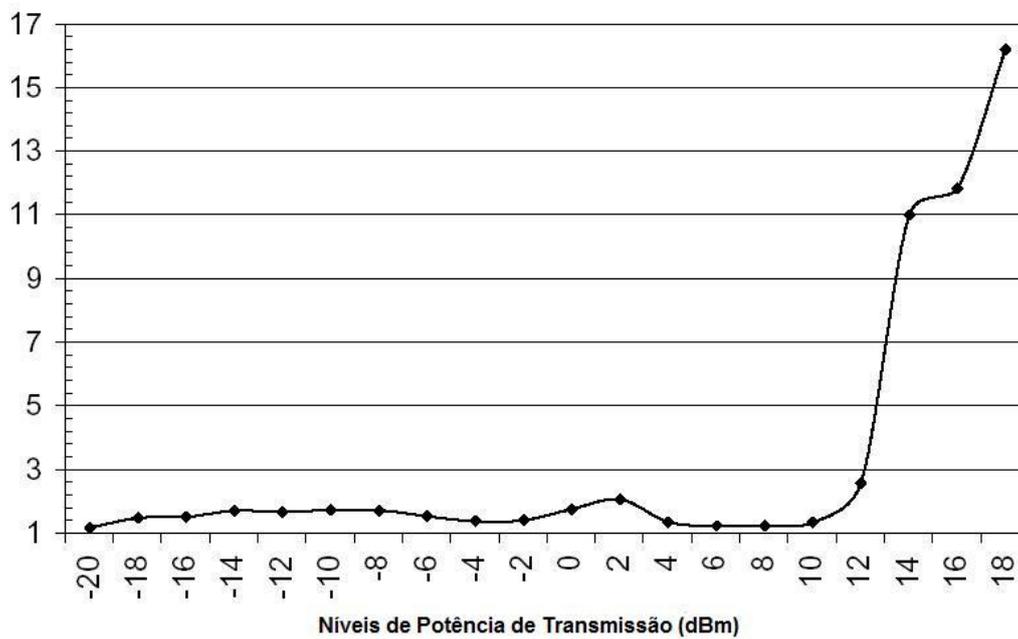


Figura 2.10: Razão (TB considerando multipercursos) / (TB não considerando multipercursos)

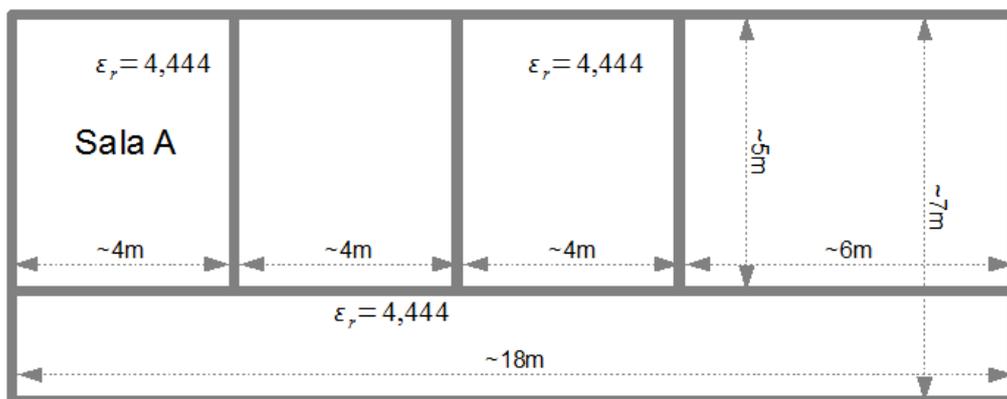


Figura 2.11: Cenário Kubisch

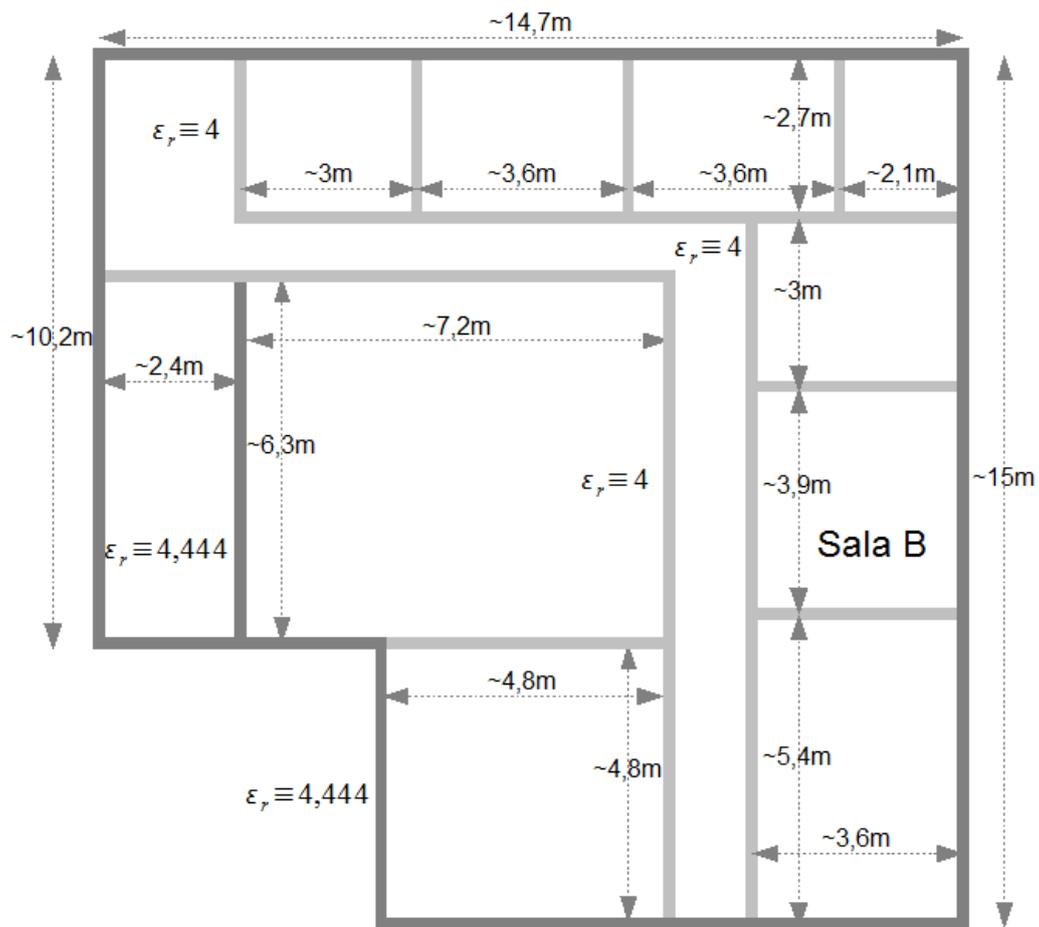


Figura 2.12: Cenário LCP

CENARIO	Expoente de Perda de percurso
Kubisch	3,08
LCP	3,69

Tabela 2.3: Expoente de perda de percurso dos cenários Kubisch e LCP

Paralela (LCP) da COPPE (Figura 2.12).

Parâmetros de simulação

Utilizaram-se os mesmos parâmetros apresentados na Seção anterior: comprimento de onda igual a 0,122 metros, sensibilidade de recepção de detecção de dados igual a -70dBm, e antenas dipolos com 1,64dB de ganho, tanto para transmissão como para recepção. Neste cenário, como no cenário básico, as antenas estão a meia altura entre o chão e o teto, tal qual os principais efeitos de propagação estão concentrados no plano horizontal, simplificando o problema de propagação em uma análise 2D. O limiar de corte para desvanecimento por multipercurso é de 3dB. Para fazer uma análise em termos de área de cobertura, utilizou-se a densidade de sensores igual a 1 sensor por metro quadrado, segundo uma distribuição uniforme. Os valores dos expoentes de perda de percurso para este cenários, calculados por Zerkalo, estão descritos na Tabela 2.3.

Conectividade

Os resultados obtidos para a Equação (2.4) são mostrados nas Figuras 2.13 e 2.14.

A técnica é proposta para trabalhar com a densidade do ambiente. Suponha, por hipótese, uma densidade de 0,1 sensor por m^2 . Neste caso, seria necessário dividir o eixo vertical das Figuras 2.13 e 2.14 por 10. Suponha ainda que o objetivo fosse conectar 6 sensores. De acordo com o método, se o sensor estivesse na sala A do cenário Kubisch, e aplicasse uma potência de -4dBm a probabilidade seria de aproximadamente 20% de alcançar o objetivo pretendido. Se fosse aplicado 0dBm, esta probabilidade sobe para 50%. Para níveis de potência maiores que 4dBm, esta probabilidade ultrapassa 75%, mas não há garantia que este objetivo seja alcançado, mesmo se for aplicada a máxima potência disponível.

Aplicando a mesma abordagem para o cenário do LCP, se fosse aplicado um

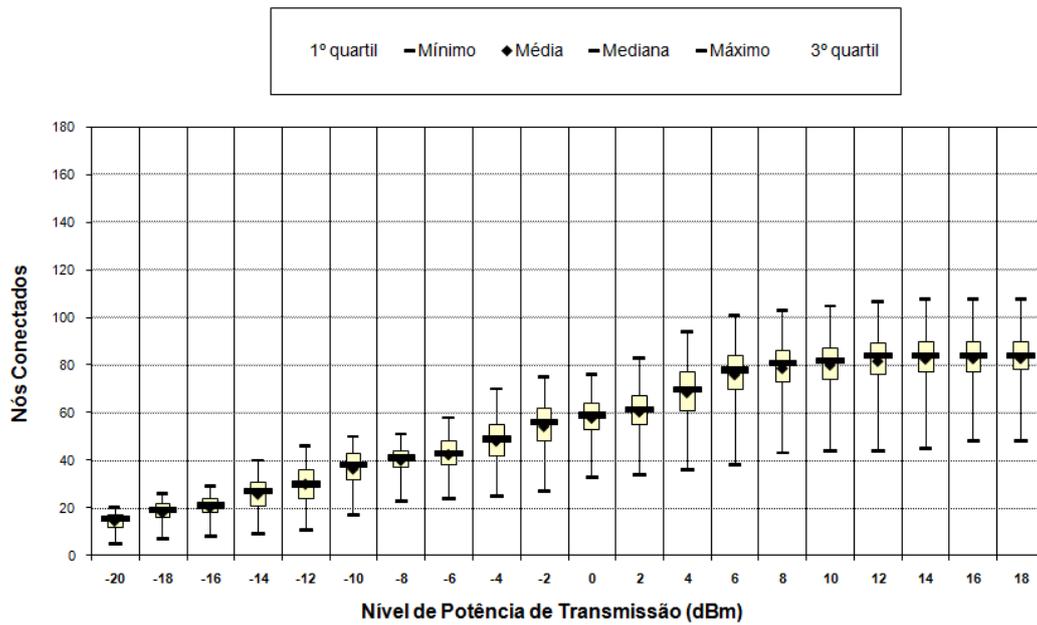


Figura 2.13: *Conectividade × Potência de Transmissão* da sala A do cenário Kubisch

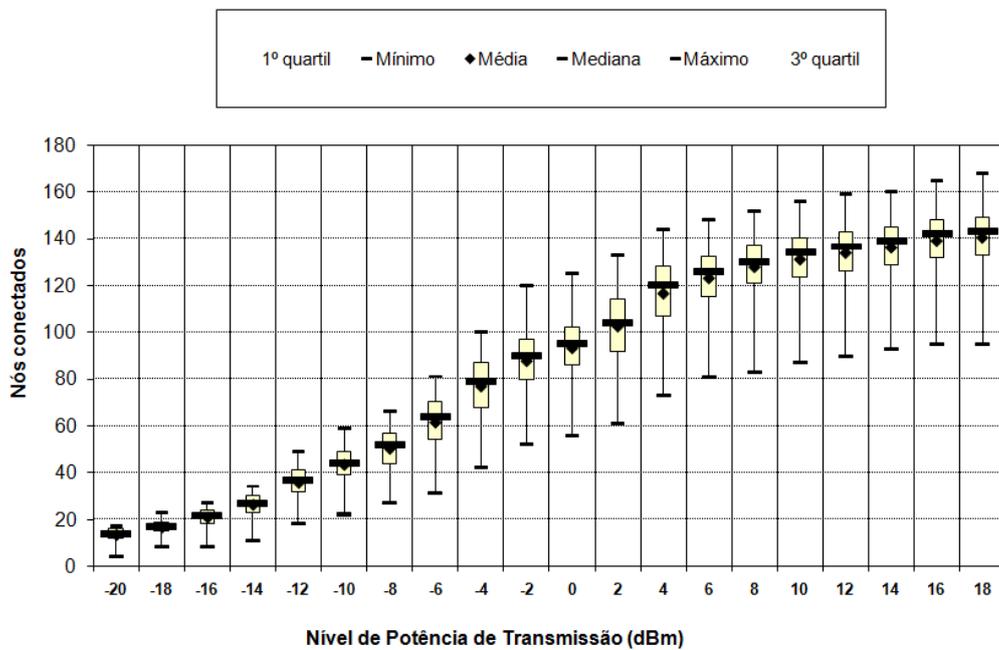


Figura 2.14: *Conectividade × Potência de Transmissão* da sala B do cenário LCP

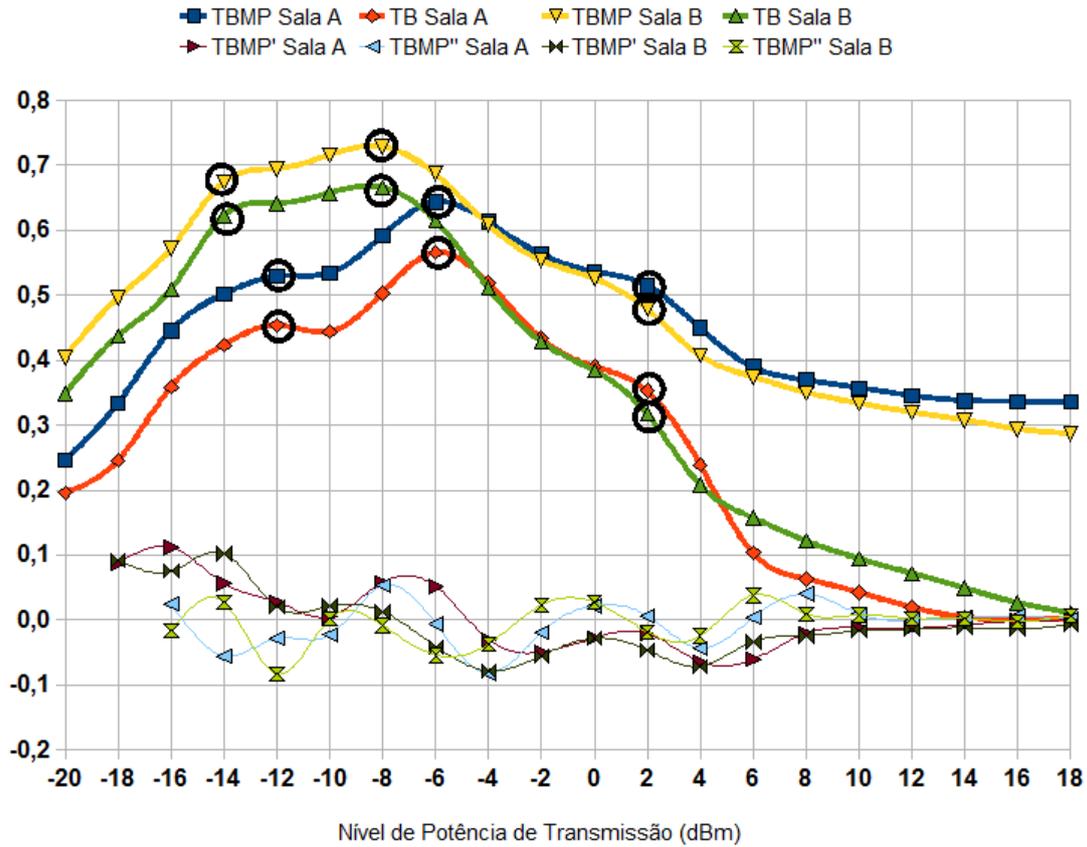


Figura 2.15: Taxa de Bloqueio para as salas A e B

NPT de -8dBm, ter-se-ia uma probabilidade de 20% de alcançar 6 nós. Por outro lado, com -6dBm, esta probabilidade subiria para 50% e com 2dBm, provavelmente alcançando o objetivo desejado.

Apesar do fato que o expoente de perda de percurso de Kubisch seja menor que o do LCP, devido à posição do quarto B no leiaute do LCP bem como o leiaute por si só (observação: o LCP tem um formato aproximadamente quadrado ao passo que Kubisch tem um formato retangular), o LCP apresenta um desempenho melhor em termos de conectividade, especialmente em função da métrica TU , mais afetada pela forma do ambiente (*quadrangular* \times *retangular*), o que pode ser observado por meio da comparação das Figuras 2.13 e 2.14.

Aspectos de Bloqueio

Os resultados da Equação (2.2), para ambos os cenários são mostrados na Figura 2.15. Neste cômputo, foram executados os cálculos duas vezes, considerando e não

considerando a interferência por multipercurso. Como esperado, devido ao fato de Kubisch ter expoente de perda de percurso menor, seu TB é, principalmente nas potências menores, menor que o TB do cenário LCP. Observando a Figura 2.15 cuidadosamente, observa-se a ultrapassagem de paredes, especialmente para a sala A, onde o fenômeno ocorre nas potências de -12dBm, -6dBm e 2dBm, fato que pode ser confirmado pela análise da primeira derivada e da segunda derivada de TB . Embora não haja paredes tão claras a serem ultrapassadas no cenário do LCP, nota-se três obstáculos “implícitos” neste cenário, principalmente nas potências de -14dBm, -8dBm e finalmente a 2dBm.

Como o que ocorreu no cenário básico, conforme pode ser observado na Figura 2.15, observa-se que a interferência por multipercurso aumenta os valores de TB , o que ratifica que este fenômeno não pode ser descartado.

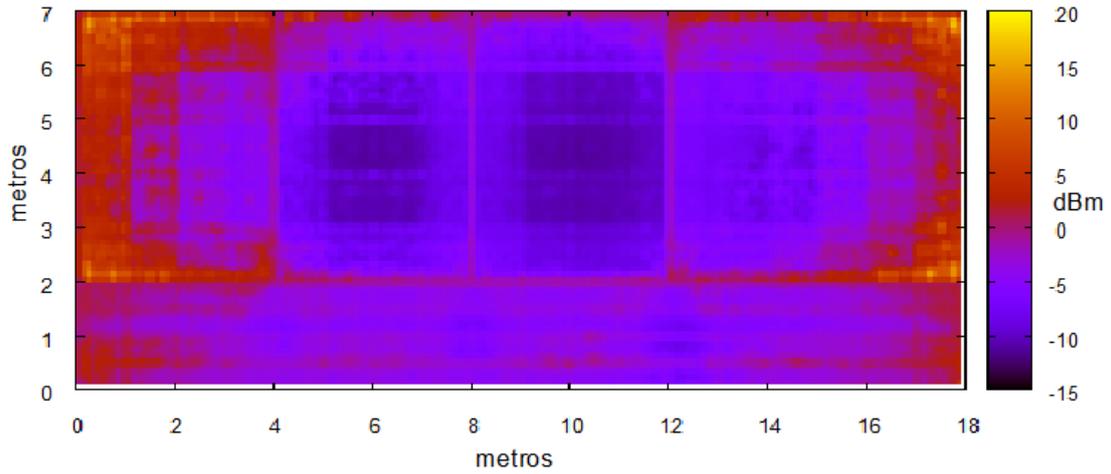
2.9 O Método como uma Aproximação do Valor Médio

A intuição inicial é que a técnica proposta nesta tese representaria a aproximação do valor médio de uma simulação de múltiplas alocações aleatórias espaciais. Adaptou-se o protocolo S-XTC[45] para uma abordagem assimétrica, atingindo a conectividade em um único salto, onde cada nó deveria alcançar ao menos um determinado número de nós, sem que a outra parte fosse obrigada a completar a comunicação simétrica. Eliminou-se para esta estimativa o problema de colisões¹, sincronizando-se no tempo a transmissão dos nós sensores.

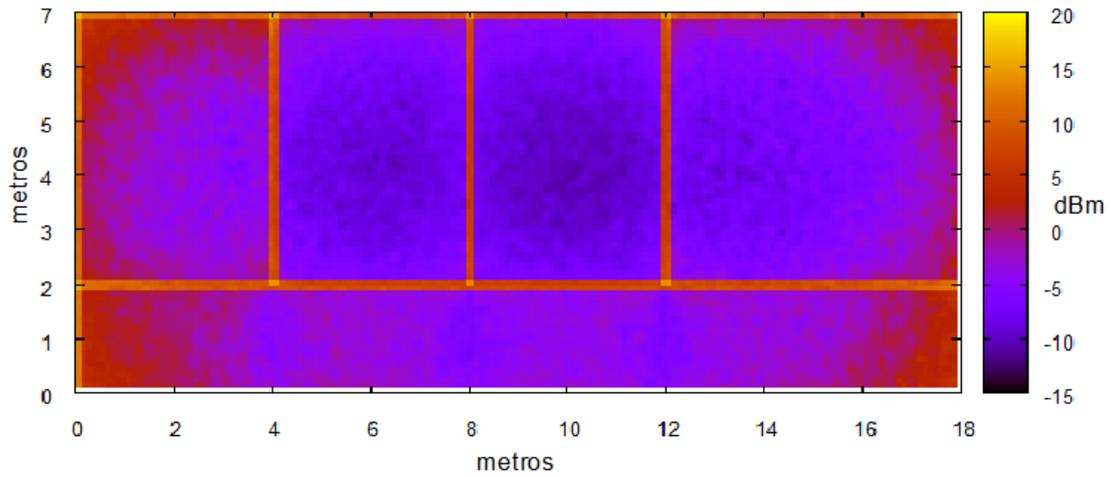
2.9.1 Obtenção de Dados para Análise

No caso em questão utilizou-se grau de conectividade (k) de saída igual a 6 ($k = 6$) e conduziu-se 2.000.000 de simulações aleatórias, variando-se a posição dos sensores a cada rodada da simulação, em uma distribuição uniforme. Posteriormente, computou-se o valor médio do nível de potência de transmissão (em dBm). Os resultados são descritos nas Figuras 2.16 e 2.17.

¹O problema de colisões é tratado no Capítulo 3

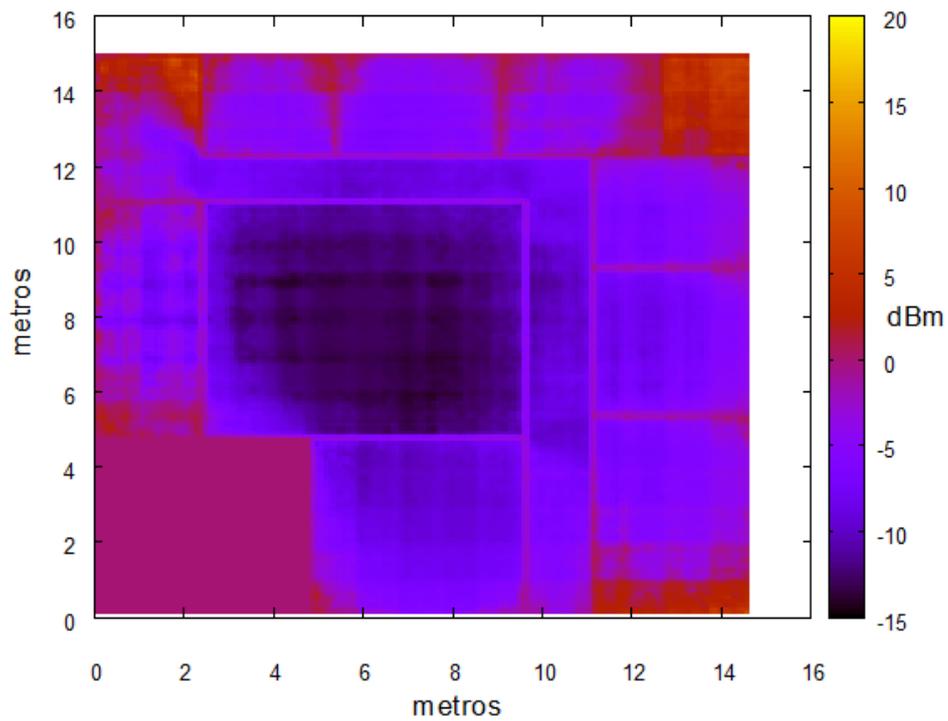


(a) Resultado da técnica proposta em Kubisch

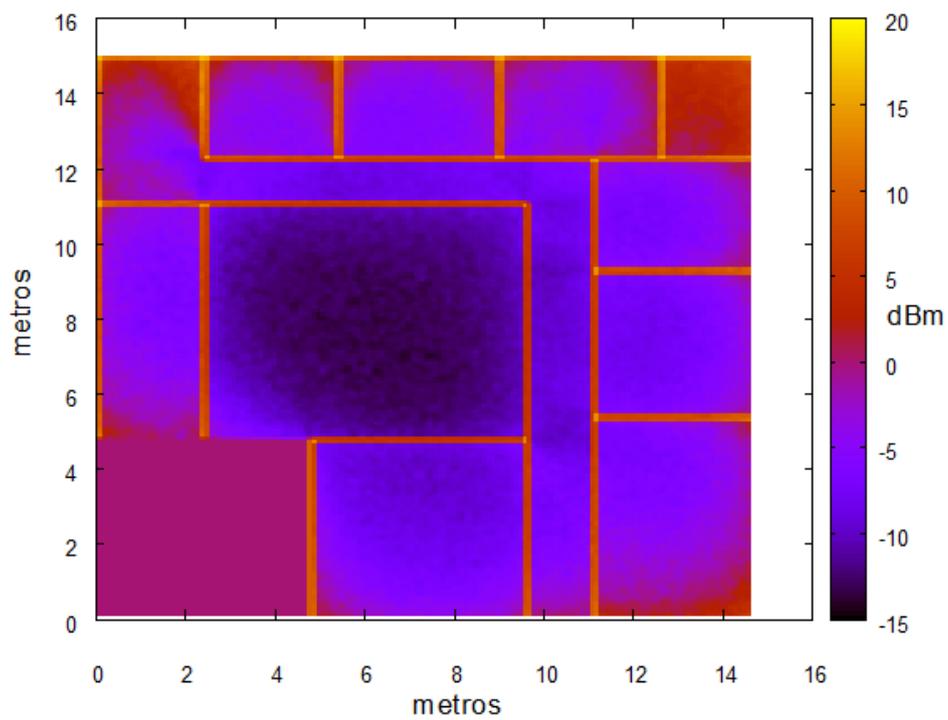


(b) Resultado da simulação para obtenção do valor médio em Kubisch

Figura 2.16: Comparação dos resultados obtidos pela técnica e pela simulação em Kubisch



(a) Resultado da técnica proposta no LCP



(b) Resultado da simulação para obtenção do valor médio no LCP

Figura 2.17: Comparação dos resultados obtidos pela técnica e pela simulação no LCP

Cenário	Percentual dentro do IC
Kubisch	58,2%
LCP	65,7%

Tabela 2.4: Percentual estimado pela técnica dentro do IC

Em seguida, foram calculadas as diferenças entre a potência encontrada pela simulação e a estimada pela técnica proposta. Os resultados estão descritos na Figura 2.18.

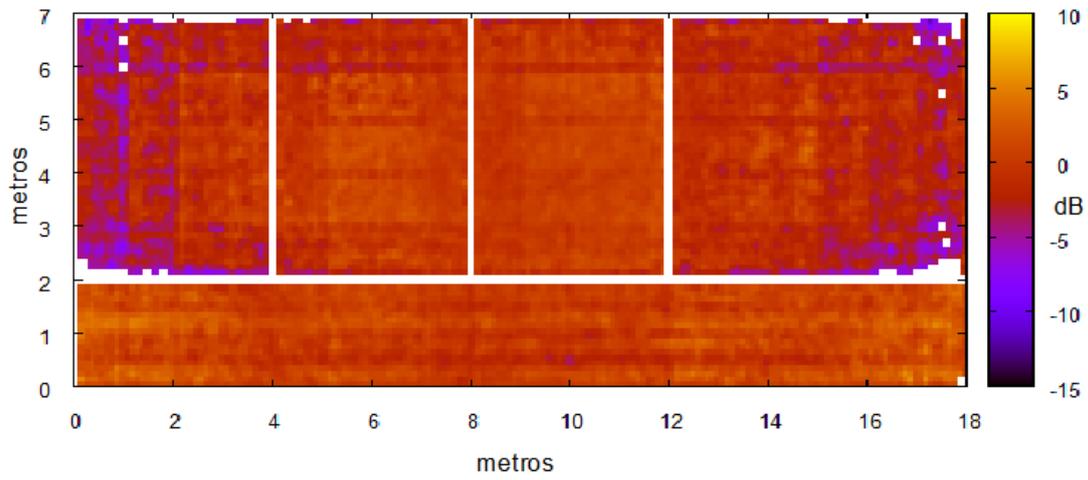
2.9.2 Análise da Técnica como Aproximação do Valor Médio

Para fins de análise, calculou-se o Intervalo de Confiança (IC) entre os valores obtidos na simulação, com coeficiente de confiança igual a 0,95 e 35 amostras para cada localização ($t_{34;0,025} = 2,0322$). Os resultados desta análise estão descritos encontrados na Tabela 2.4 e na Figura 2.19. O eixo z da Figura 2.19 representa a probabilidade do ponto não estar dentro do intervalo de confiança (os pontos mais escuros são aqueles com maior probabilidade de estar dentro do intervalo de confiança).

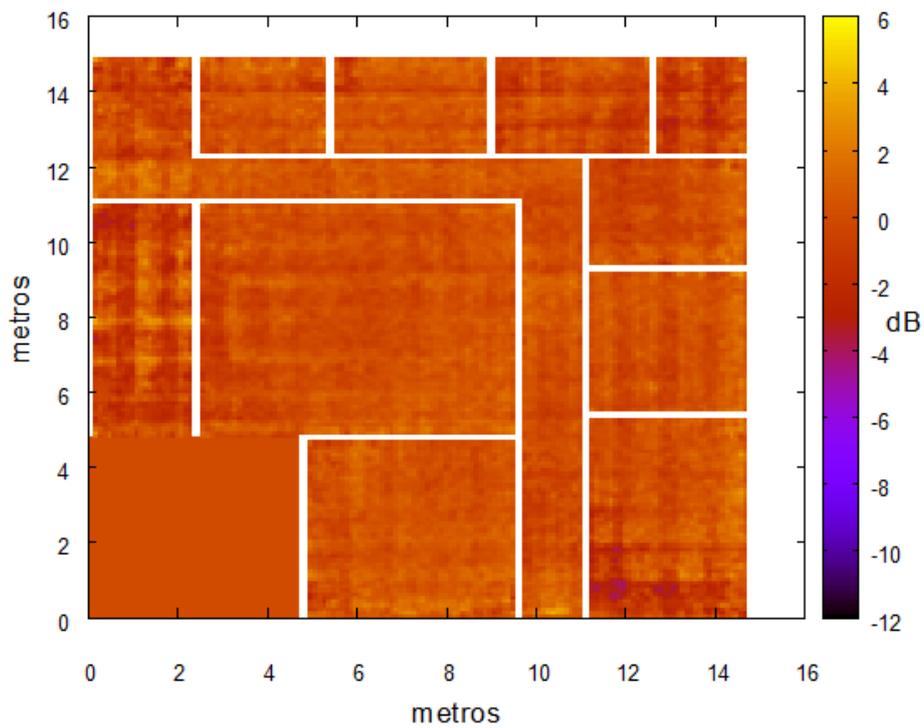
De acordo com a Figura 2.19, verifica-se que os pontos centrais obtiveram melhor desempenho. Isto se deve, principalmente, a menos influência do desvanecimento por multipercursos (que são altamente sensíveis ao posicionamento), diminuindo a imprevisibilidade do cálculo.

Outras razões para as eventuais diferenças observadas são: à utilização de níveis discretos de potência (-20dBm, -18dBm, etc.); ao fato da simulação refletir o resultado médio (contínuo, por definição); e à granularidade do processo de integração da técnica (quanto menor a granularidade do processo utilizado, melhores serão os resultados).

A conclusão mais importante é que os resultados corroboraram com a expectativa de que as métricas refletiam aproximadamente o comportamento médio. Deve ser observado que a técnica permite estimar os resultados sem rodar as simulações, sem utilizar mecanismos de realimentação, levando em consideração fenômenos complexos, como o desvanecimento por multipercursos.

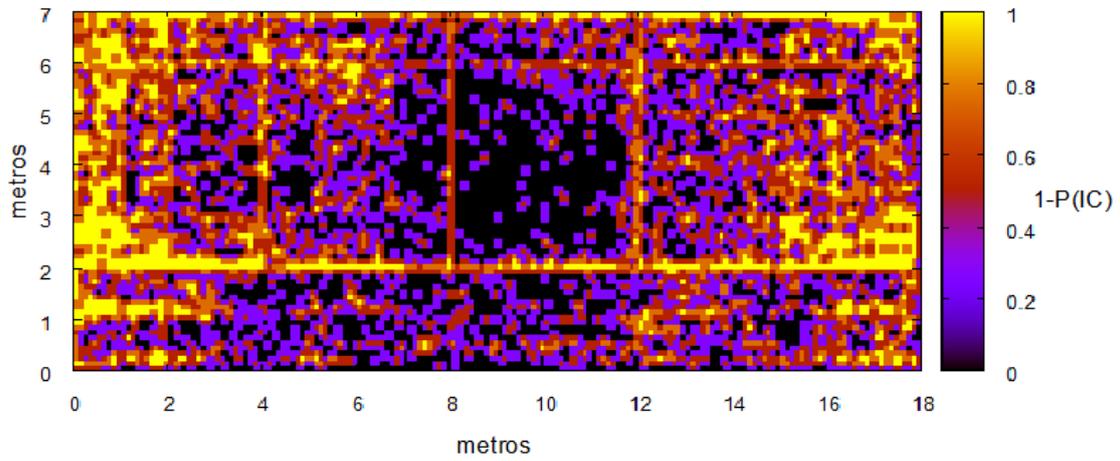


(a) Diferença entre a potência encontrada na simulação e a estimada pela técnica no cenário Kubisch

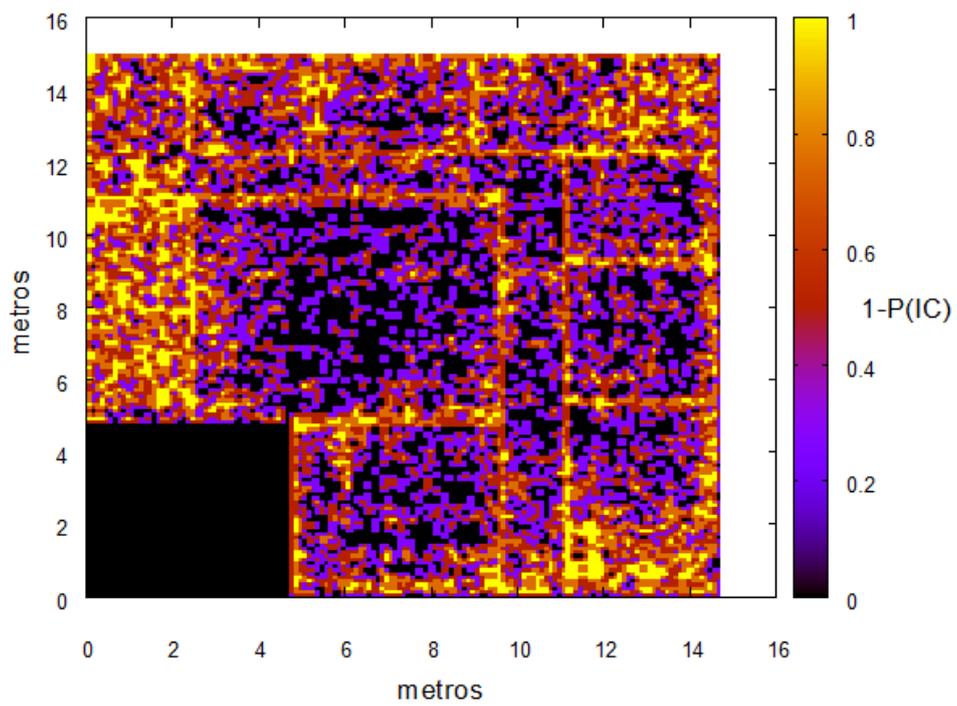


(b) Diferença entre a potência encontrada na simulação e a estimada pela técnica no cenário LCP

Figura 2.18: Diferença entre a potência encontrada na simulação e a estimada pela técnica



(a) Cenário Kubisch



(b) Cenário LCP

Figura 2.19: Análise do intervalo de confiança da comparação entre a média obtida pela simulação e pela técnica

2.10 Considerações Finais

Neste Capítulo foram descritas as métricas para controle de topologia para RSSF considerando um ambiente com obstáculos e aplicadas em três cenários distintos. Mostrou-se que as métricas combinadas conseguem estimar de forma relacional a potência de transmissão e o número de nós conectados sem utilizar mecanismos de realimentação. Permitem ainda relacionar potência de transmissão com ultrapassagem de barreiras. Foi mostrado ainda que o valor médio estimado pelo método aproxima-se do valor médio encontrado na simulação.

Capítulo 3

Predição de Níveis de Potência de Transmissão para Protocolos de Controle de Topologia Distribuídos

3.1 Introdução

Defende-se nesta tese a idéia de que, se o ambiente é conhecido e as características de propagação do local onde está a RSSF se encontra, não se deve abrir mão dessas informações no intuito de otimizar o consumo de energia. Os protocolos de Controle de Topologia são, em sua grande maioria, baseados em sistemas de realimentação para fazer o acerto de seus níveis de potência de transmissão. Isto demanda tempo e, no caso de RSSFs móveis, pode tornar o trabalho inviável, pois a topologia da rede poderá mudar rapidamente em função do tempo, congestionando a rede com mensagens de controle.

Seria também interessante analisar o comportamento da técnica proposta em ambientes distribuídos, analisando fenômenos como contenção e o problema do terminal escondido afetando o comportamento da estimativa de conectividade em função da potência.

Neste Capítulo é apresentado como a técnica proposta permite estimar valores de potência de transmissão para protocolos existentes [46]. Outro resultado interessante

é o estudo de como fenômenos tais quais colisões interferem na estimativa da técnica proposta, sendo, talvez, o resultado mais relevante da presente análise.

Esta parte da Tese está organizada da seguinte forma: a Seção 3.2 realiza uma revisão da literatura referente a protocolos de controle de topologia distribuídos; a Seção 3.3 adapta a técnica proposta descrita no Capítulo 2 para permitir a previsão do nível de potência de transmissão (NPT); posteriormente, a Seção 3.4 avalia experimentalmente a técnica proposta; finalmente, a Seção 3.5 apresenta as considerações finais.

3.2 Trabalhos Relacionados

Os protocolos distribuídos de controle de topologia (PDCT) podem ser classificados em quatro diferentes tipos [47]:

- Baseados em localização (*Location-based*);
- Baseados em direção (*Direction-based*);
- Baseados em mobilidade (*Mobile-based*); e
- Baseados em número de vizinhos (*Neighbor-based*)

Nos Protocolos de controle de topologia baseados em localização (por exemplo LMST (*Local Minimum Spanning Tree*)[48]), um subconjunto de nós pode estimar suas posições ou pela troca de mensagens com nós âncoras ou por nós que são equipados com dispositivos GPS. Conhecendo suas posições relativas, eles são capazes de construir um grafo baseado nestas informações.

Protocolos de controle de topologia baseados em direção (por exemplo, CTBC (*Cone-Based Topology Control*) [49]) confiam na habilidade dos nós em estimarem a direção relativa de seus vizinhos, com base em dispositivos com mais de uma antena direcional.

Protocolos baseados em mobilidade (por exemplo, LINT (Local Information no Topology)[50] e MOBILEGRID[51]) devem ser rápidos, de forma que possam captar as mudanças que ocorrem na rede.

Protocolos de controle de topologia baseados no número de vizinhos baseiam-se na habilidade dos nós em determinar a quantidade de vizinhos e identificar os

que estão dentro da sua área de alcance e construir um conjunto ordenado de nós (baseado na distância, tais como o KNEIGH (*K Neighbors*) [52] ou na qualidade do enlace, como o KNEIGHLEV (*K Neighbors Level Based*)[53], XTC (eXtreme Topology Control) [54] e o S-XTC (Signal-Strength Topology Control) [45]). Pelo senso comum, esta parece ser a quantidade mínima de informação necessária pelos nós participantes da rede em construir uma topologia de rede, permitindo a construção de redes baseados em nós mais simples. A idéia comum dos protocolos baseados em número de vizinhos é trocar a conectividade física pela conectividade lógica, possibilitando a conexão entre dois pontos por meio de múltiplos saltos. Considerando a baixa confiabilidade dos nós participantes das RSSFs, utiliza-se a abordagem de conectividade em dois saltos.

Em relação à potência de transmissão inicial utilizada, os PCTDs utilizam abordagens *bottom-up* ou *top-down*. No CTBC [49] e no KNEIGHLEV [53], os sensores iniciam no nível de potência mais baixo, aumentando o nível até alcançar o nível de potência mais apropriado. Este tipo de abordagem é normalmente mais econômico, porém gasta mais tempo para convergir. Outros protocolos, como o KNEIGH [52] e o S-XTC[45], iniciam nos níveis de potência mais alto, diminuindo até alcançar o nível de potência mais adequado, gastando mais energia, com o benefício de convergir mais rapidamente.

Entretanto, freqüentemente, os níveis de potência de transmissão não podem ser escolhidos de um valor arbitrário. Eles são limitados a escolher entre um número limitado de níveis de potência de transmissão pré-definidos. Os DTCPs que se encaixam nesta categoria são denominados Level-Based Topology Control Protocols (LBTCP)[47]. São soluções LBTCP: CLUSTERPOW[6], KNEIGHLEV[53] e o S-XTC[45].

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é apresentar uma forma de prever a distribuição dos níveis de potência utilizados por LBTCP em cenários internos, utilizando o XTC e o KNEIGHLEV como referências, em virtude dos mesmos serem exemplos significativos de protocolos estado-da-arte que podem ser facilmente implementados em equipamentos comerciais.

3.3 Predição da Distribuição dos Níveis de Potência de Transmissão

Utilizando as informações referentes à técnica proposta, a predição da distribuição passa a ser um problema trivial. Basta aplicar a Equação (3.1).

$$Dist(AT, k, pw_i) = P(AT, k, pw_i) - P(AT, k, pw_{i-1}) \quad (3.1)$$

$Dist(AT, k, pw_i)$ é a porcentagem de transmissores que está inserida na AT , que objetivam conectar-se a k nós, utilizando o nível de potência pw_i . Seria o equivalente ao cálculo da função massa de probabilidade.

$P(AT, k, pw_i)$ é a probabilidade de um sensor nó s estar conectado a k vizinhos transmitindo a um nível de potência pw_i . Corresponderia ao equivalente do cálculo da função densidade de probabilidade.

3.4 Avaliação Experimental

3.4.1 Cenário e Parâmetros de Avaliação

O cenário de avaliação, ilustrado na Figura 3.1, é composto de 9 salas ($15 \times 15 m^2$ cada), dispostas como no Jogo-da-velha. As salas estão separadas por paredes de alvenaria com 15 cm de espessura, com permissividade relativa (ϵ_r) igual a 4,444[13]. O padrão de irradiação deste cenário pode ser observado nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4.

Este cenário foi escolhido em virtude do mesmo poder representar de forma genérica qualquer tipo de obstáculo. Por exemplo, num cenário sem obstáculos, ao dividirmos a área de transmissores em nove subáreas, uma ao centro, quatro nos cantos e outras quatro entre esses cantos, é obtido um cenário de Jogo-da-velha, semelhante ao proposto neste Capítulo. Para manter determinado grau de conectividade, os nós localizados no centro precisarão de menor energia do que os localizados nos lados, os quais, por sua vez, precisarão de menor energia do que os localizados nos cantos.

Os parâmetros dos equipamentos e os limiares referentes ao desvanecimento por multipercursos são os mesmos do Capítulo 2, variando apenas a densidade de sensores por metro quadrado que no caso em questão foi de 0,05 sensores por metro

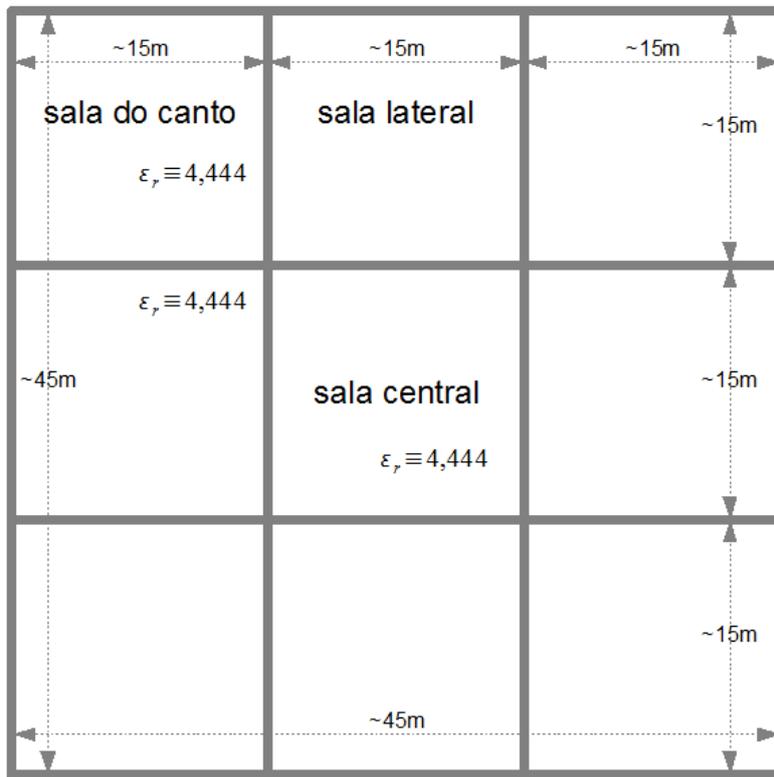


Figura 3.1: Cenário Jogo-da-velha

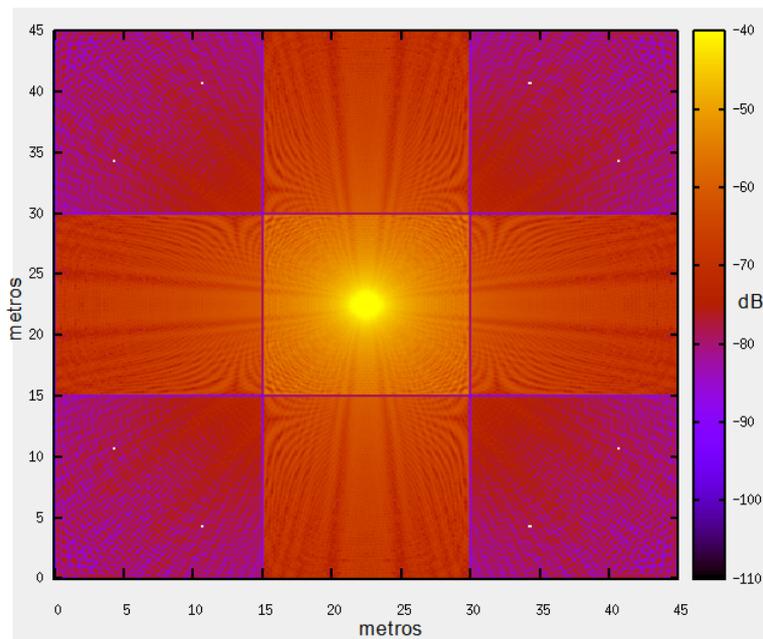


Figura 3.2: Perda por atenuação na sala do centro, no cenário Jogo-da-velha

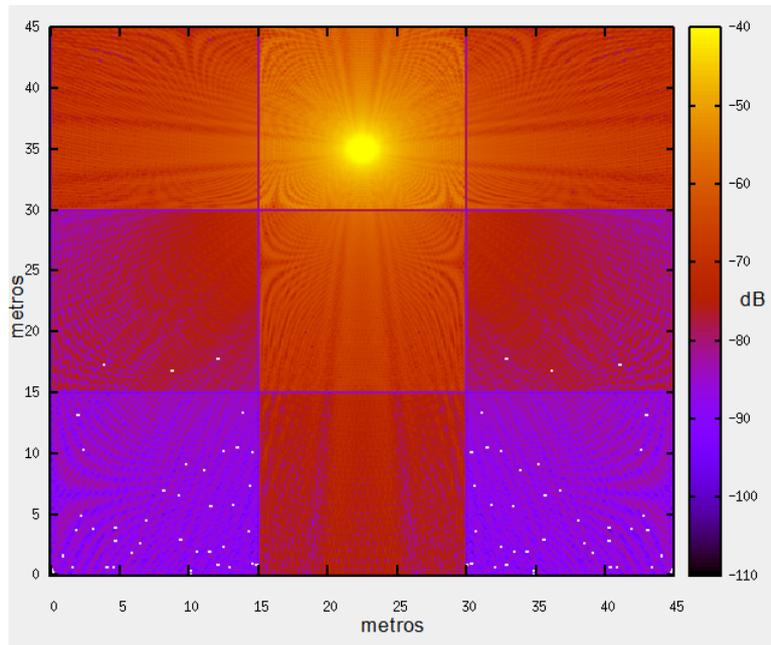


Figura 3.3: Perda por atenuação na sala lateral, no cenário Jogo-da-velha

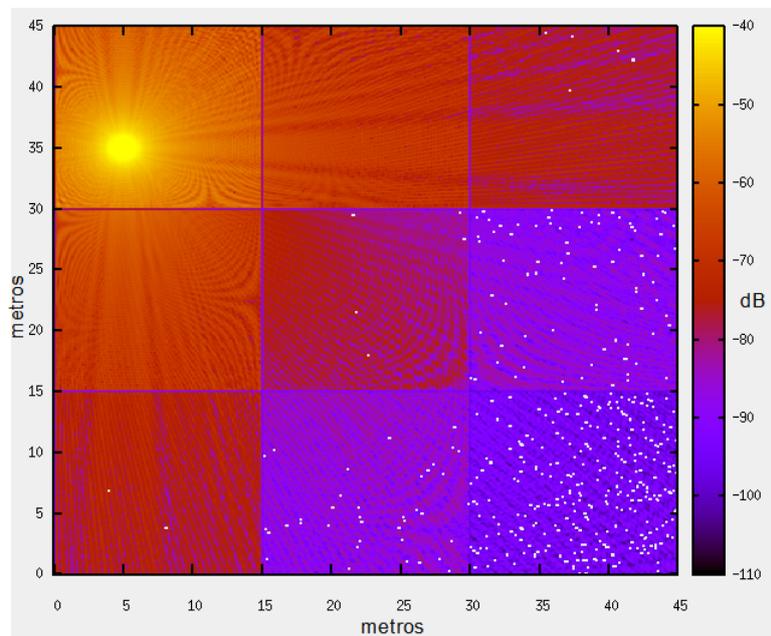


Figura 3.4: Perda por atenuação na sala do canto, no cenário Jogo-da-velha

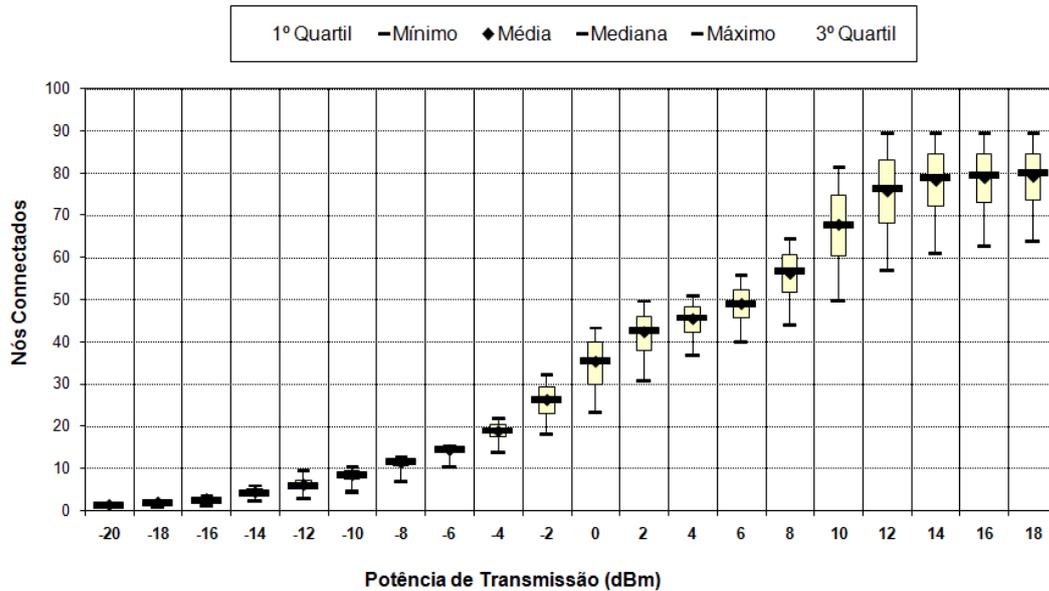


Figura 3.5: *Conectividade* \times *Potência de Transmissão* da sala do centro

quadrado, seguindo ainda uma distribuição uniforme, totalizando 101 sensores presentes no cenário.

3.4.2 Conectividade

Solucionou-se a Equação (2.4) com os critérios especificados. Os resultados obtidos estão representados graficamente nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

A interpretação é a mesma que foi realizada no Capítulo anterior. Supondo-se que um dado sensor localizado na sala central desejasse conectar-se com outros 40 sensores. De acordo com a técnica proposta nesta tese, o sensor consultaria sua tabela de conectividade no intuito de alcançar esta conectividade. Como sugere a Figura 3.5, apenas níveis de potência de transmissão (NTP) superiores a -2dBm conseguiriam atingir tal conectividade, com probabilidade maior que zero. Caso 2dBm fosse escolhido, a probabilidade seria de cerca de 65%. Para 4dBm , a probabilidade seria de aproximadamente 85%. Por fim, de 8dBm em diante, a conectividade de 40 nós seria quase sempre alcançada, com exceção, é claro, de *outliers*, que podem ocorrer, por exemplo, para $k > 40$ com $NPT < 0\text{dBm}$ e $k < 40$ com $NPT \geq 8\text{dBm}$.

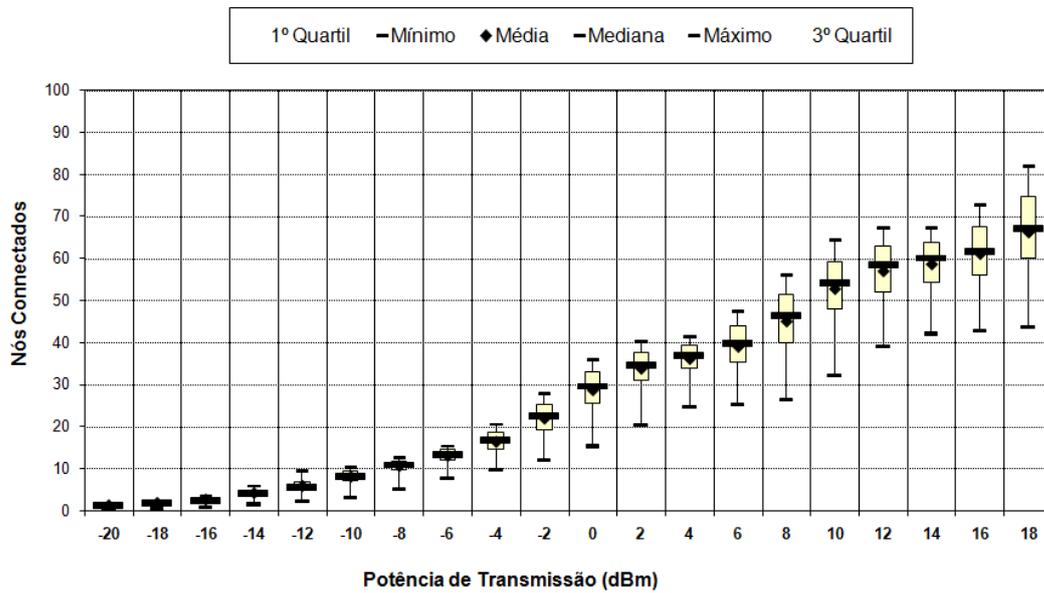


Figura 3.6: *Conectividade × Potência de Transmissão* da sala lateral

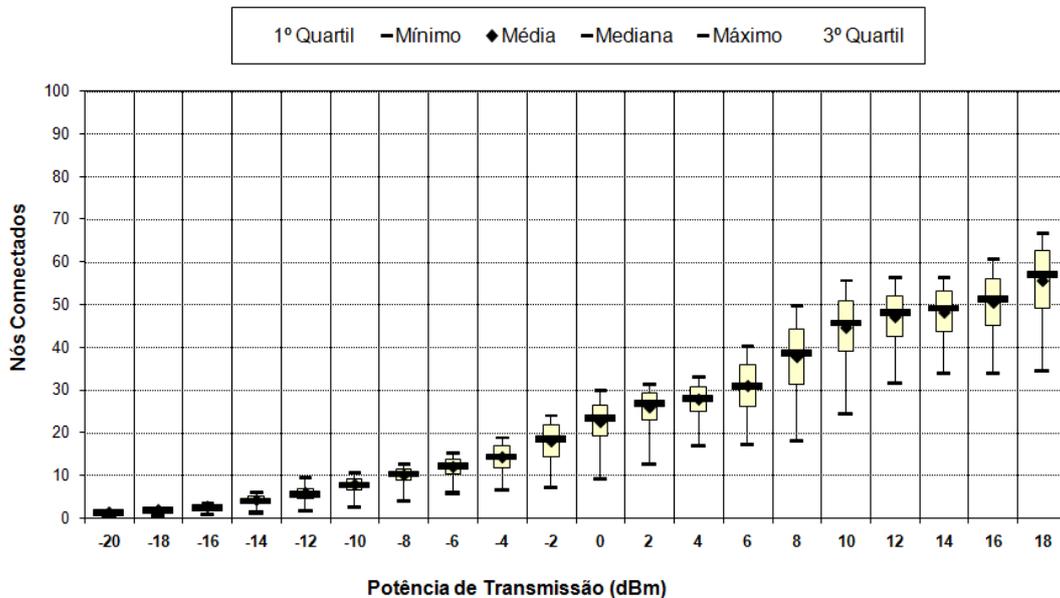


Figura 3.7: *Conectividade × Potência de Transmissão* da sala do canto

Tabela 3.1: Distribuição de potências para a sala central e $k=40$

NPT	P(Ce)	D(Ce)	D(XTC)	D(KNL)
-2	-	-	-	0,08
0	0,25	0,25	-	0,25
2	0,65	0,40	0,02	0,51
4	0,85	0,20	0,07	0,14
6	0,98	0,13	0,25	0,02
8	1	0,02	0,30	-
10	1	-	0,24	-
12	1	-	0,07	-
14	1	-	0,05	-
16	1	-	-	-
18	1	-	-	-
>18	1	-	-	-

Tabela 3.2: Distribuição de potências para a sala lateral e $k=40$

NPT	P(L)	D(L)	D(XTC)	D(KNL)
-2	-	-	-	-
0	-	-	-	0,02
2	0,02	0,02	0,04	0,22
4	0,14	0,12	0,09	0,48
6	0,47	0,33	0,02	0,23
8	0,73	0,26	0,03	0,05
10	0,91	0,18	0,18	-
12	0,99	0,08	0,26	-
14	1	0,01	0,21	-
16	1	-	0,09	-
18	1	-	0,05	-
>18	1	-	0,03	-

Tabela 3.3: Distribuição de potências para a sala do canto e $k=40$

NPT	P(C)	D(C)	D(XTC)	D(KNL)
-2	-	-	-	-
0	-	-	-	-
2	-	-	-	-
4	-	-	-	0,10
6	0,02	0,02	-	0,22
8	0,40	0,38	-	0,36
10	0,67	0,17	0,07	0,24
12	0,80	0,13	0,28	0,06
14	0,83	0,03	0,18	0,02
16	0,86	0,03	0,08	-
18	0,88	0,02	0,12	-
>18	1	0,12	0,27	-

3.4.3 Resultados da Predição e Análise

Considerando que a metodologia proposta está concentrada na abordagem de vizinhos, as comparações mais úteis seriam em relação a Protocolos de Controle de Topologia baseados em Vizinhos, tais como o KNEIGHLEV [53] (abordagem *bottom-up*) e o XTC[54] (abordagem *top-down*). Ambos protocolos são consideravelmente semelhante, pois trocam a conectividade física pela conectividade lógica. Com a finalidade de checar a correção da técnica proposta (conectividade baseada em um único salto), adaptou-se a implementação do XTC sem utilizar a otimização do segundo salto (conectividade lógica). O protocolo XTC preserva a conectividade da rede no pior caso enquanto que o protocolo KNEIGHLEV garante apenas uma probabilidade na conectividade da rede. Os dois são baseados no conceito de “qualidade do enlace”. No caso em questão, a “qualidade do enlace” corresponde a uma combinação da intensidade do sinal recebido e o desvanecimento por multipercorso descrito anteriormente. Foram conduzidas 30 simulações aleatórias em relação aos posicionamentos dos nós sensores, segundo uma distribuição uniforme, para cada PDTC com os parâmetros utilizados no Capítulo anterior.

Os resultados para os três tipos de sala: Central (Ce), Lateral (L) e Canto (C) são mostrados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. A primeira coluna (NPT) representa o nível de potência de transmissão aplicado (em dBm). A segunda coluna exibe a distribuição probabilística discreta acumulada de alcançar um determinado grau de conectividade de acordo com o método proposto. A terceira coluna representa o valor computado para a Equação (3.1). A quarta e a quinta coluna mostram a distribuição NPT para o XTC e o KNEIGHLEV (KNL). A soma da terceira, da quarta e da quinta coluna são menores ou iguais a 1.

As estimativas de predição encaixam-se entre ambas distribuições. Os resultados referentes à implementação de um salto do XTC (relacionado ao pior caso) são os limites superiores das estimativas da técnica e à implementação da otimização referente ao enlace em dois saltos são o limite inferior da técnica de predição. Como esperado, a otimização proposta pela utilização de um enlace lógico em dois saltos iria ocasionar benefício em termos de energia. Na verdade, trata-se de uma conectividade lógica e não física. Ressalta-se, novamente, que o método proposto utiliza um único salto para atingir a conectividade desejada e a utilização de dois saltos diminui esta garantia.

Os valores maiores referentes à implementação particular do XTC (conectividade em um único salto) são devidos principalmente ao problema do terminal escondido que ocorre nos protocolos CSMA/CA, que é agravado em cenários com obstáculos, em virtude dos nós transmissores não conseguirem perceber a atividade um do outro. Considerando que o XTC inicia aplicando-se a potência máxima, este protocolo será mais afetado que o KNEIGHLEV.

DIER *et al* [45] apresentaram um exemplo de aplicação real da utilização do Protocolo S-XTC de uma RSSF em ambiente com obstáculos, onde há 15 nós dentro do alcance de um nó. As medidas mostraram que são necessários 70 segundos até que a rede seja formada, o que pode ser um tempo consideravelmente longo para a formação da rede, além de demandar técnicas de sincronização de tempo entre os nós sensores participantes da RSSF.

A técnica proposta nesta tese permite a construção de protocolos baseados no planejamento de utilização de NPT, em lugar de utilizar mecanismos de realimentação. Isto é particularmente útil em ambientes móveis. Como afirmado por SANTI[47],

PCTDs móveis devem ser rápidos na construção de sua topologia de forma que possam capturar as mudanças que ocorrem na rede. Para ser rápido, um protocolo deveria trocar poucas mensagens com seus vizinhos e executar algoritmos simples na computação do conjunto de vizinhos. Estas duas características são fornecidas pelo método proposto.

3.5 Considerações Finais

Neste Capítulo foi proposto um método de predição da distribuição para RSSF em cenários com obstáculos. Esta técnica de predição é baseada nas métricas propostas nesta tese, que são capazes de correlacionar o grau de conectividade de uma RSSF com a potência de transmissão aplicada, considerando efeitos de barreiras e desvanecimento por multipercurso.

Para avaliar o potencial da técnica proposta, simulou-se a propagação eletromagnética de uma RSSF em um cenário teste. Os resultados mostraram que a técnica proposta pode estimar com relativa precisão a distribuição nestes tipos de ambiente.

Os resultados deste Capítulo também serviram para mostrar os efeitos que uma rede distribuída proporciona na técnica proposta, especialmente no tocante ao problema do terminal escondido, que faz com que a técnica, na média, estime para menos a quantidade correta de nós alcançados.

Capítulo 4

Estimação do Grau de Conectividade Física de Entrada e de Saída para Redes de Sensores sem Fio em Cenários com Obstáculos

4.1 Introdução

O grau de conectividade física em Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) resultante de protocolos de controle de topologia é um parâmetro importante no desempenho da rede, determinando, principalmente, o grau de interferência que um determinado nó ocasionará e/ou receberá dos demais membros da rede. Será útil no planejamento, conhecer previamente quais as regiões mais e menos conectadas no momento em que esta rede começar a operar.

Este capítulo propõe e avalia um método efetivo de estimação do grau de conectividade de entrada e saída para RSSFs [55] que, diferentemente de outros métodos existentes, é capaz de capturar o efeito de obstáculos presentes no cenário estudado. Os resultados obtidos mostraram que o método pôde estimar com sucesso o grau de conectividade de entrada e saída de RSSFs em ambientes reais.

A estimação de conectividade é útil, por exemplo, para estimar o consumo de

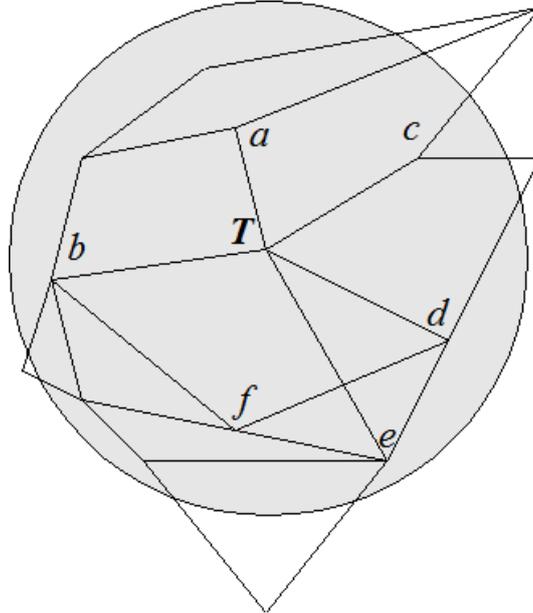


Figura 4.1: Diferença entre os graus de conectividade física e lógica: o nó T tem grau de conectividade lógica igual a 5 e grau de conectividade física igual a 10

recepção dos nós e para algoritmos de localização baseados em múltiplos saltos [56], [57], [58] [59], [60], [61], onde a conectividade é parâmetro importante na precisão dos algoritmos.

O capítulo é organizado da seguinte forma: a Seção 4.2 introduz o assunto e faz a definição de conectividade física de entrada e saída para RSSF; a Seção 4.3 elenca os trabalhos relacionados; a Seção 4.4 define o método para estimação; a seguir, a Seção 4.5 avalia experimentalmente o método. Por fim, na Seção 4.6 analisa o método e apresenta uma conclusão parcial.

4.2 Conectividade de Entrada e Saída para RSSF

Uma medida típica utilizada para quantificar a interferência é o grau de conectividade de um nó. Se um nó T possui um pequeno grau, poucos nós sofrerão influência durante a transmissão de T .

De acordo com sua posição, um nó pode ser mais afetado do que outro. Exemplificando: os nós localizados no centro, usualmente estarão sujeitos a mais interferências do que aqueles localizados nas bordas. Em função do efeito da interferência, é necessário fazer distinção entre graus de conectividade física e lógico, de entrada e de

saída, conceitos estes ilustrados na Figura 4.1 e explicados na seqüência, adaptando os conceitos de [52].

4.2.1 Grau de Conectividade Lógica

Grau de Conectividade Lógica de Saída

Seja $G_P = (N, E_P)$ o grafo de comunicação direcional (digrafo) gerado por determinado protocolo de controle de topologia P . Para um dado nó u , tal que $u \in N$, o *grau de conectividade lógica de saída de u* , ($L_S\text{Grau}|u|$) em N , é o número de arestas que saem de u .

$$L_S\text{Grau}|u| = |\{v \in N : (u, v) \in E_P\}| \quad (4.1)$$

Grau de Conectividade Lógica de Entrada

Seja $G_P = (N, E_P)$ o grafo de comunicação direcional (digrafo) gerado por determinado protocolo de controle de topologia P . Para um dado nó u , tal que $u \in N$, o *grau de conectividade lógica de entrada de u* , ($L_E\text{Grau}|u|$) em N , é o número de arestas ou arcos que tem como destino o nó u .

$$L_E\text{Grau}|u| = |\{v \in N : (v, u) \in E_P\}| \quad (4.2)$$

4.2.2 Grau de Conectividade Física

Após a configuração de uma rede distribuída, cada nó componente da rede constrói sua visão local do grafo de comunicação, definindo o seu grau lógico de conectividade como o número de nós aos quais está conectado.

Note que parte dos nós, embora estejam dentro do raio de alcance do nó, podem não pertencer a sua lista de enlaces lógicos, caso estejam sob a interferência ou interferindo sobre os demais. SANTI [47] denomina este fenômeno como grau de conectividade física, que pode ser dividido em grau de conectividade física de entrada e grau de conectividade física de saída.

Grau de Conectividade Física de Saída

Seja $G_P = (N, E_P)$ o grafo de comunicação direcional gerado por determinado protocolo de controle de topologia P . Seja $\delta(u, v)$ a potência necessária para que o sinal emitido por u seja decodificado (ou detectado) por v . Seja $pw(u, P)$ a potência utilizada por u , em decorrência do protocolo de controle de topologia P . Então o grau de conectividade física de saída de u , associada a potência $pw(u, P)$, será o número de nós que conseguem decodificar (ou detectar) o sinal emitido por u .

$$P_S\text{Grau}(u) = |\{v \in N : \delta(u, v) \leq pw(u, P)\}| \quad (4.3)$$

Grau de Conectividade Física de Entrada

Define-se o grau de conectividade física de entrada de um nó u como a quantidade de nós que causam interferência em u , decorrente da potência de transmissão aplicada em virtude do protocolo de controle de topologia P .

$$P_E\text{Grau}(u) = |\{v \in N : \delta(v, u) \leq pw(v, P)\}| \quad (4.4)$$

4.3 Trabalhos Relacionados

SANTI e BLOUGH [62] descrevem como o raio de alcance físico impacta o número de nós com os quais um nó da rede é capaz de se comunicar.

DOUSSE e THIRAN [63] estudam a conectividade em uma área finita variando a quantidade de nós até encontrar a situação em que a rede esteja fortemente conectada.

BADONNEL *et al* [64] consideram a conectividade no meio físico e focam o número de nós com os quais nós participantes da rede podem ser comunicar em um único salto.

YONEKI *et al* [65] mostram quando o comportamento humano exhibe as características de rede na formação de comunidades, descrevendo o caráter de maior conectividade dos nós centrais.

Cabe afirmar também que, com base no levantamento bibliográfico realizado, existem poucos artigos que abordam cenários reais e que não foi encontrado ne-

nhum que tratasse da conectividade neste tipo de ambiente, nem mesmo entre os brevemente descritos acima.

4.4 Método para Estimação

4.4.1 Grau de Conectividade de Saída

O grau de conectividade de saída associado a uma potência de transmissão específica (pw) de um nó sensor u é o número de vizinhos dentro da área de cobertura de u quando este aplica pw .

Trata-se da simples aplicação da fórmula (2.4), novamente abaixo reproduzida.

$$C(z) = (1 - TB(z))TU(z)AC(z, r_j)D \quad (4.5)$$

4.4.2 Grau de Conectividade de Entrada

O grau de conectividade de entrada associado a um sensor u é o número de vizinhos que irá enviar mensagens para u . Se u está localizado em uma posição central, provavelmente seu grau de conectividade física será superior à média do conjunto dos nós localizados naquela região em questão. Caso esteja localizado nos cantos, bordas ou próximo de obstáculos, o comportamento será inverso.

De acordo com a Equação (4.5), para alcançar um determinado grau de conectividade lógica específico, cada ponto transmitirá uma determinada potência de transmissão.

No caso deste trabalho, restringiu-se a pequenos espaços, onde a potência média permite dar uma idéia se o grau de conectividade é maior ou menor que os demais.

Devido ao princípio de reciprocidade de antenas, pode-se considerar que a conectividade de entrada será a substituição da potência média na Equação (4.5).

4.5 Avaliação Experimental

4.5.1 Avaliação da Predição das Potências de Transmissão

Para avaliar a efetividade da predição das potências de transmissão, fundamental para o cálculo da estimação dos graus de conectividade, tanto de entrada como

Configuração	Método	Simulação
Portas fechadas	-2,7041 dBm	-3,2604 dBm
Portas abertas	-3,3671dBm	-3,8547 dBm

Tabela 4.1: Potências médias obtidas pelo método e pela simulação no LCP

de saída, foram realizadas simulações considerando as hipóteses dos equipamentos descritos no Capítulo 2. O cenário de avaliação foi o LCP, com duas configurações, uma considerando as portas fechadas e a outra com portas abertas. Ambas as configurações possuem densidade de ocupação de 0,1 sensores por metro quadrado, em uma distribuição uniforme, totalizando 20 sensores. Conduziram-se 2.000.000 de simulações uniformemente distribuídas, com diferentes posicionamentos dos sensores a cada simulação e computou-se a média da potência de transmissão (em dBm) para cada ponto (com aproximação na ordem de 0,1 m). Os resultados estão descritos nas Figuras 4.2 e 4.3 e na Tabela 4.1.

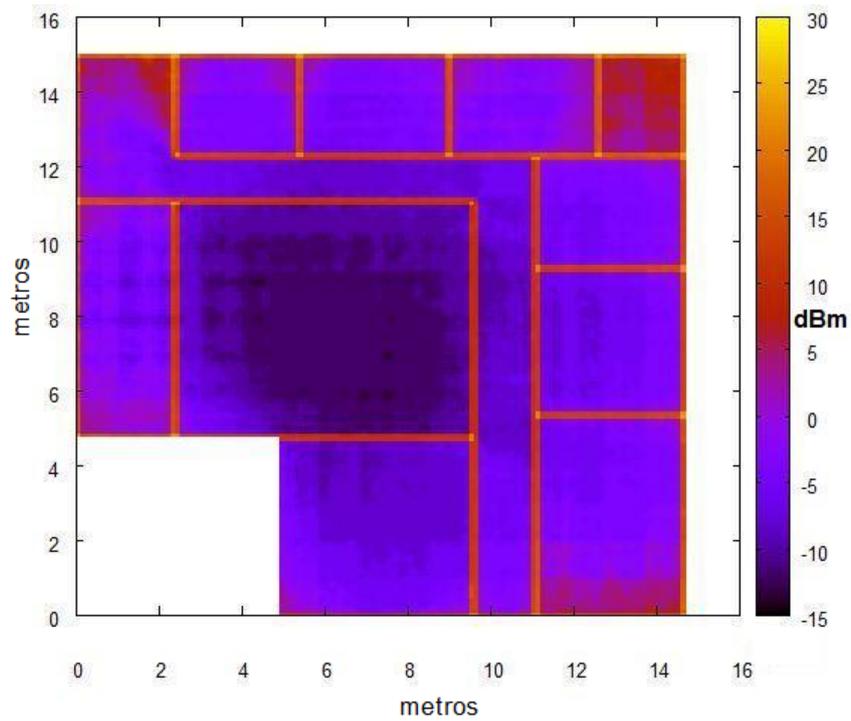
Os resultados das Figuras 4.2(a) e 4.3(a) correspondem à aplicação da técnica e os resultados das Figuras 4.2(b) e 4.3(b) correspondem ao valor médio obtido pela simulação extensiva ¹.

Como se pode observar nas Figuras a semelhança dos resultados. As pequenas diferenças observadas são devidas ao fato da granularidade do cálculo numérico estar embutida no processo de integração da Equação e também porque considerou-se as potências de transmissão saltando de duas em duas unidades de potência nas Figuras 4.2(a) e 4.3(a), ao passo que nas Figuras 4.2(b) e 4.3(b) foi computada com base na média, inclusive em casas decimais, o que torna o gráfico mais suave.

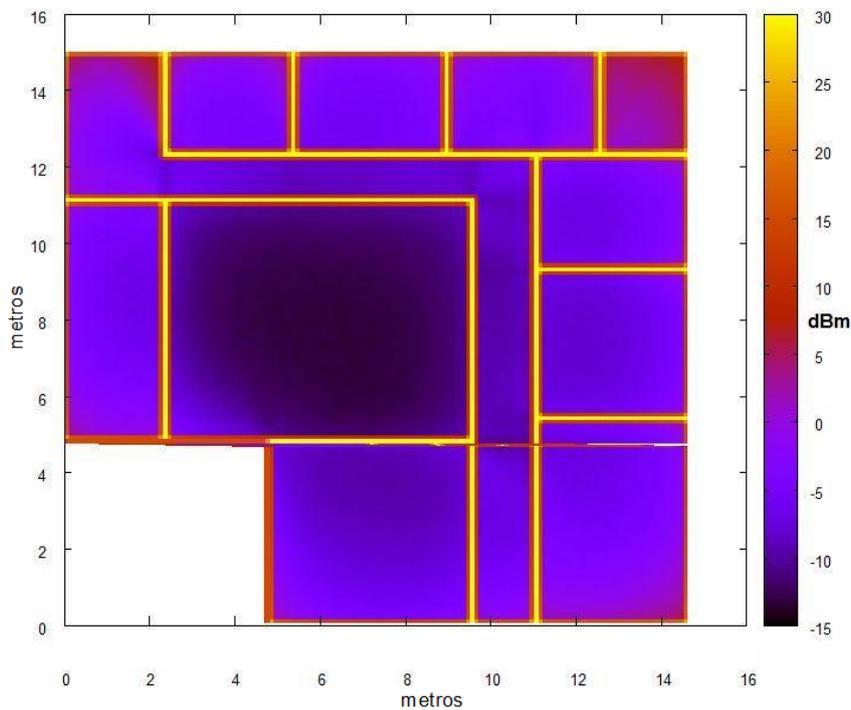
4.5.2 Avaliação do Grau de Conectividade de Saída

Tome-se, como hipótese, a obtenção de 6 como grau de conectividade de saída lógico da simulação. Considerando que o grau de conectividade física é sempre igual ou maior ao grau de conectividade lógica. Desta forma, considerando as hipóteses do cenário, já abordadas anteriormente, foram obtidos os seguintes graus de conectividade de saída mostrados nas Figuras 4.4 (configuração do LCP de portas fechadas) e 4.5 (configuração do LCP de portas abertas).

¹A análise do *método como valor médio* foi discutida na página 35

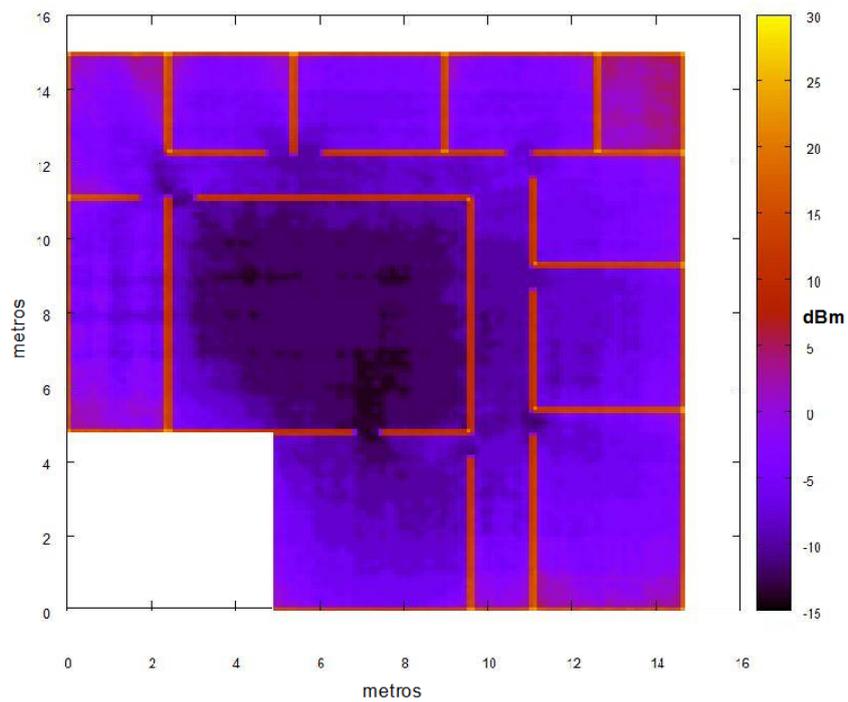


(a) Resultado da técnica proposta no LCP com portas fechadas

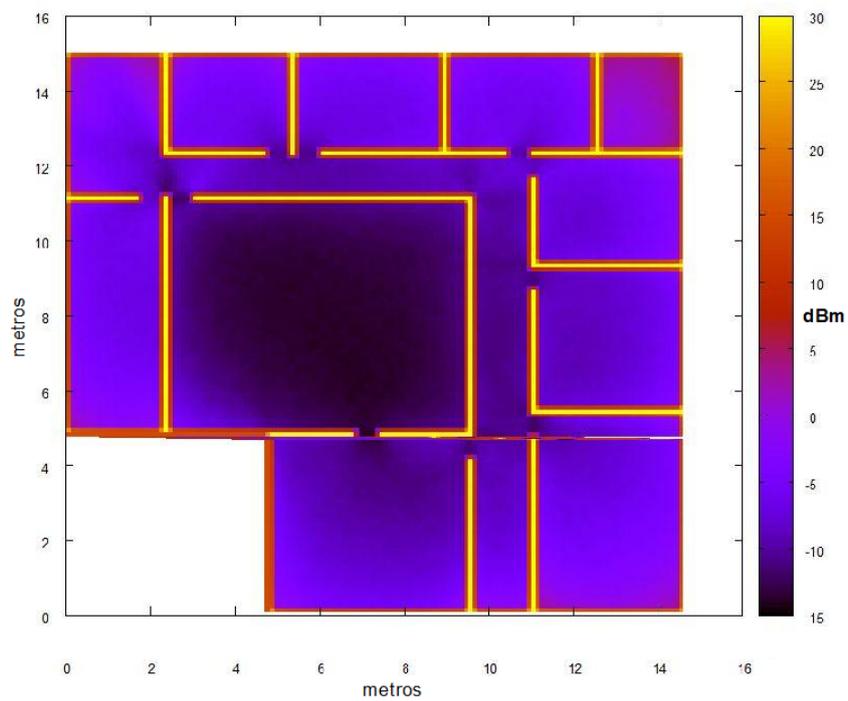


(b) Resultado da simulação para obtenção do valor médio no LCP com portas fechadas

Figura 4.2: Avaliação da predição de potência de transmissão no LCP com portas fechadas



(a) Resultado da técnica proposta no LCP com portas abertas



(b) Resultado da simulação para obtenção do valor médio no LCP com portas abertas

Figura 4.3: Avaliação da predição de potência de transmissão no LCP com portas abertas

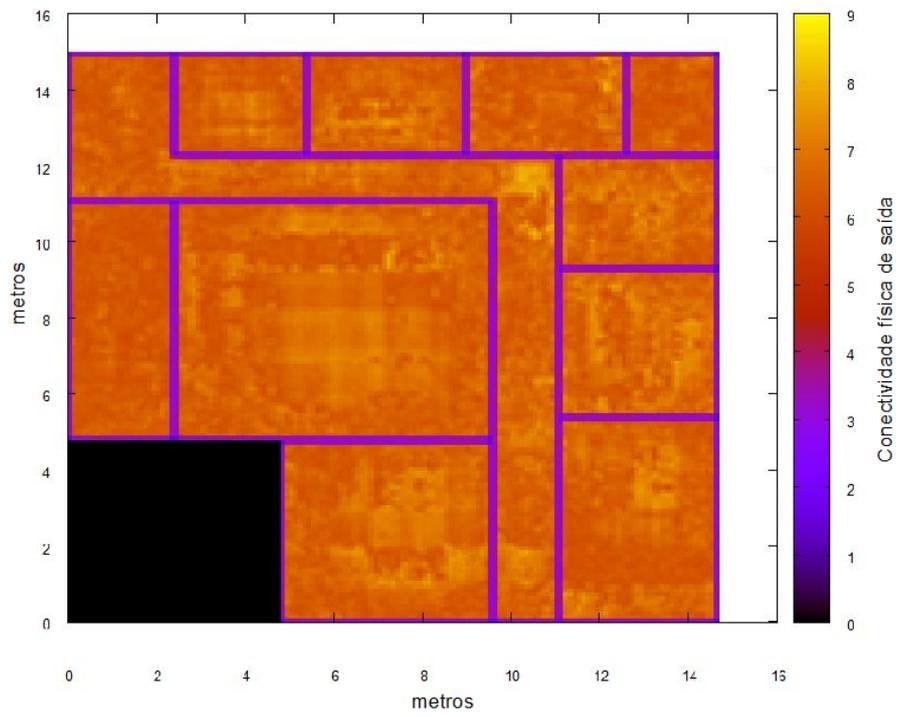


Figura 4.4: Predição da conectividade física de saída do LCP com portas fechadas

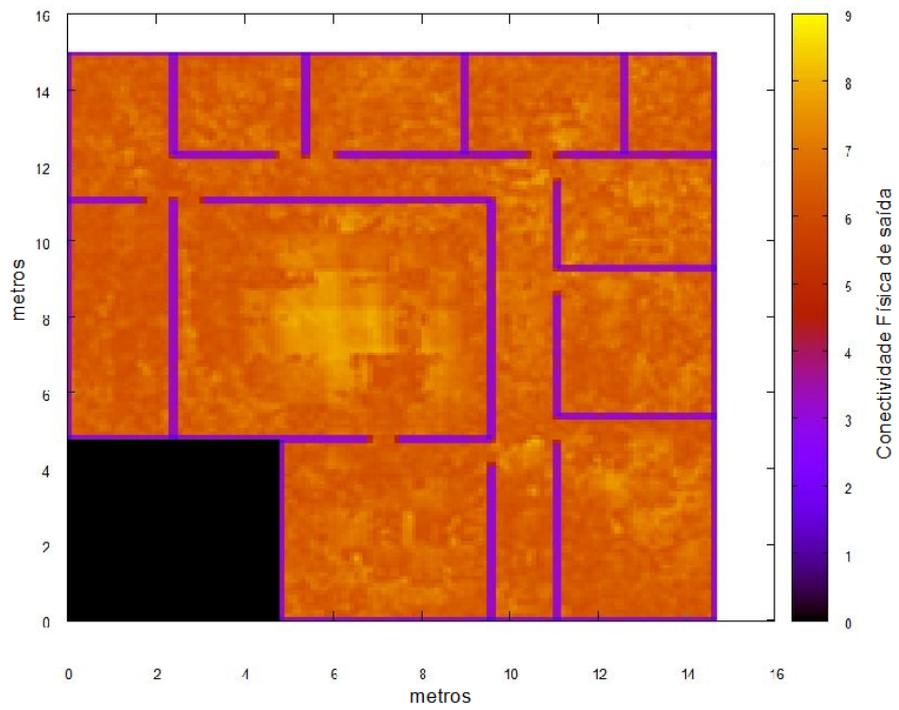


Figura 4.5: Predição da conectividade física de saída do LCP com portas abertas

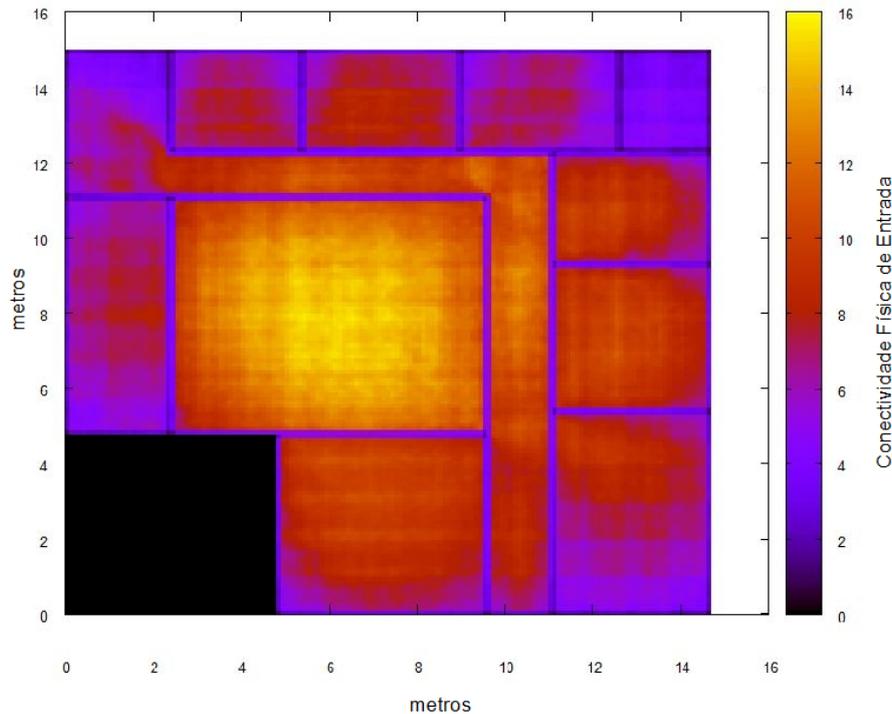


Figura 4.6: Predição da conectividade física de entrada do LCP com portas fechadas

Pode-se observar que devido à configuração dos obstáculos, a variação do grau de conectividade de saída não foi alto, partindo do valor mínimo estipulado de 6 nós e alcançando o valor máximo de 9 nós, em ambos os cenários. Isto é devido à pequena variação das potências disponíveis, correspondentes ao intervalo de 2dB. Caso houvesse uma diferença maior nos níveis de potência, o comportamento seria diferente, ocorrendo uma maior variação.

Um dado interessante é que a existência de aberturas faz com que existam mais pontos com conectividade de saída igual a 9 do que no cenário fechado.

4.5.3 Avaliação do Grau de Conectividade de Entrada

A conectividade de entrada é função da conectividade de saída. Tomando a mesma hipótese da subseção anterior (6 como grau de conectividade de saída lógico da simulação), foram obtidos os graus de conectividade de entrada ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7.

Como era de se esperar, existe a tendência natural da conectividade ser maior na parte central. Entretanto, devido à existência de obstáculos, mais especificamente das paredes, esta tendência é quebrada. Pode-se ver na configuração 2 (Figura 4.7),

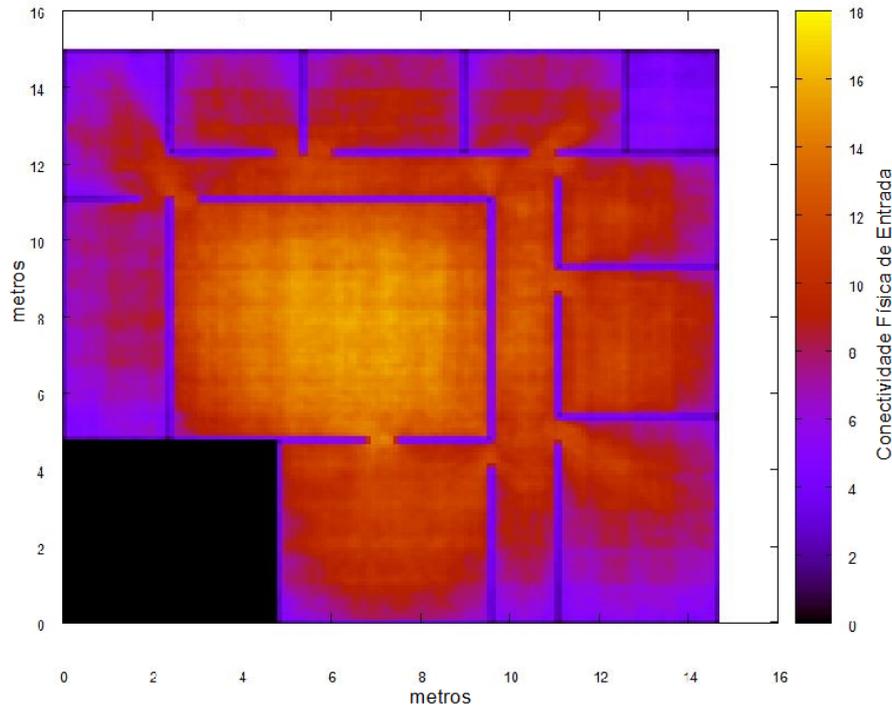


Figura 4.7: Predição da conectividade física de entrada do LCP com portas abertas

a quebra da concentração do centro, sendo parte dela espalhada para a região de ligação entre os recintos. Outro aspecto relevante é a variação do grau de conectividade. No grau de conectividade de saída, tinha-se uma variação de três unidades. Já no grau de conectividade de entrada, foi obtida uma variação de duas até dezoito unidades. Observa-se ainda que existe uma variação maior na configuração 2 (de 2 a 18) do que na configuração 1 (de 2 a 16).

Observe que estes resultados podem ser utilizados como parâmetro de decisão em sistemas de localização por múltiplos saltos, já citados anteriormente.

4.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou um novo método para predição do grau de conectividade física de entrada e de saída para RSSFs em cenários com obstáculos. O método proposto tem por base a predição de transmissão de potências, suportado pelas métricas de Taxa de Bloqueio e Taxa de Utilização, que são capazes de correlacionar o grau de conectividade da RSSF sob efeitos de barreiras de propagação e desvanecimento por multipercursos.

Para avaliar o potencial do método proposto, simulou-se detalhadamente a propagação eletromagnética de um cenário real com duas configurações distintas. Os resultados obtidos pela simulação mostraram ser capazes de estimar com relativa precisão os graus de conectividade física de entrada e de saída no ambiente de avaliação. Com base nesta informação precisa, torna-se possível realizar uma diferenciação entre os nós sensores do ponto de vista de recursos, de tal forma que, por exemplo, possam ser usados sensores com diferentes capacidades de bateria, os quais seriam instalados respeitando o grau de conectividade, isto é, locais com maiores graus de conectividade receberiam sensores com maior capacidade de bateria, enquanto que nos locais com menores graus poderiam ser instalados os de menor capacidade. Como resultado, este balanceamento de recursos proporcionará uma rede significativamente mais robusta, com vida prolongada.

Capítulo 5

Revisão do Problema de Conectividade de k -Vizinhos

5.1 Introdução

Um dos problemas principais nos Protocolos de Controle de Topologia (PCTs) é determinar qual a quantidade mínima de vizinhos necessária para construir uma rede plenamente conectada. Este problema é conhecido como o problema de conectividade de k -vizinhos [47] (*k -neighbors connectivity problem*).

Este problema é definido da seguinte forma:

Dado um conjunto de N nós, qual o valor mínimo de k para que um grafo G_k de k -vizinhos esteja fortemente conectado?

Na prática, quanto maior o valor de k , melhor será a conectividade da rede. Por outro lado, um valor menor de k é desejável por permitir o reuso espacial. Assim, a escolha ótima de k é o menor valor de k que corresponde ao grafo G_k conectado.

Minimizar o consumo de energia e manter a conectividade de uma RSSF são objetivos conflitantes que influenciam outros aspectos da operação dos nós participantes da rede, como a qualidade do sinal recebido, o alcance de transmissão disponível e a magnitude de interferência entre os diversos nós sensores vizinhos, entre outras.

Utilizou-se Zerkalo para simular a operação de uma RSSF em cenários de escritórios, com o objetivo de determinar qual o menor valor de k [66], utilizando a Biblioteca *Boost Graph Library* (BGL) [67] para determinar a porcentagem do grafo formado pelo protocolo de controle de topologia gerado pelo S-XTC, com enlace

N	$k(P>0,95)$	$k(P=1)$	N	$k(P>0,95)$	$k(P=1)$
10	6	6	100	7	9
20	7	8	250	7	9
25	7	8	500	6	9
50	7	9	1000	6	10

Tabela 5.1: Número crítico de vizinhos para valores de N

assimétricos.

Para atingir este objetivo, este Capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 5.2 descreve os trabalhos relacionados; em seguida, a Seção 5.3 apresenta a avaliação experimental; analisa-se os dados obtidos na Seção 5.4; por fim, a Seção 5.5 apresenta as considerações finais.

5.2 Trabalhos Relacionados

Trabalhos nas décadas de 1970 e 1980 sugeriam que um “número mágico” de vizinhos deveria estar entre seis [68] e oito [69]. Resultados similares utilizando outros parâmetros foram encontrados em [70]. Entretanto, foi reconhecido que o problema de conectividade de k -vizinhos é um problema Não-Polinomial (NP) completo e foi resolvido apenas recentemente [71]. Assumindo N nós aleatoriamente posicionados em um cenário plano, XUE e KUMAR [71] mostraram que k é limitado por $k = c \cdot \log_{10} N$ para alguma constante c , com $0,074 \leq c \leq 5,17774 + \epsilon$ onde ϵ é um valor positivo arbitrariamente pequeno.

O problema de k -vizinhos é investigado por [52], que simula um cenário plano, obtendo valores compatíveis com [71]. A tabela 5.1 mostra os resultados relatados para os menores valores de k que garantem uma topologia conectada com probabilidade maior ou igual a 0,95.

Normalmente, este problema é analisado de forma analítica.

BETTSTETTER e HARTMANN [72] analisaram a conectividade de redes de rádio de múltiplos saltos em um ambiente de desvanecimento *log-normal*, assumindo que os nós têm capacidade de transmissão semelhante e estão distribuídos aleatoriamente de acordo com um processo homogêneo de *Poisson*. Com isso, calcularam

a densidade mínima necessária para que uma rede dentro de uma área limitada de tamanho específico esteja quase completamente conectada.

Nesta mesma linha, MIORANDI e ALTMAN [73] apresentaram um procedimento analítico para cálculo da probabilidade de encontrar um nó isolado na presença de um canal aleatório, considerando fenômenos de sombreamento e desvanecimento. Os resultados obtidos foram utilizados para obter uma estimativa de característica de conectividade em redes muito densas. Entretanto, os autores não aplicam o caso em cenários realísticos.

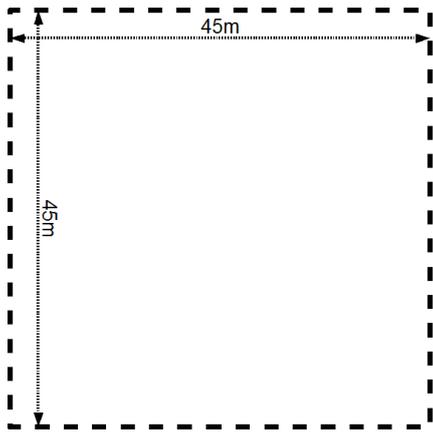
Como salientado anteriormente, não foram encontrados na literatura pesquisada exemplos que analisem de forma determinística o problema de conectividade de k -vizinhos

5.3 Avaliação Experimental

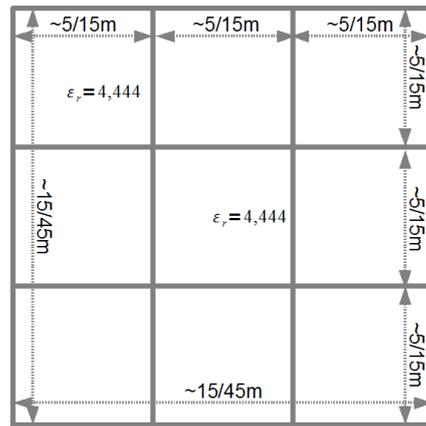
Nesta seção são calculados os valores de k em relação a N para cada ambiente e analisados os efeitos nos resultados isoladamente e em relação ao tamanho do ambiente, leiaute, expoente de perda de percurso e desvanecimento por multipercursos nos resultados. Foram considerados, ainda, os mesmos parâmetros de comunicações utilizados nas outras Seções: comprimento de onda igual a 0,122 metros (frequência igual a 2,4GHz), sensibilidade de recepção de detecção de dados igual a -70dBm, e antenas dipolos com 1,64dB de ganho, tanto para transmissão como para recepção. Nos cenário, as antenas estão a meia altura entre o chão e o teto. No caso do cenário plano, desprezou-se a reflexão do solo. Desta forma, os principais efeitos de propagação estão concentrados no plano horizontal, simplificando o problema de propagação em uma análise 2D. O protocolo de controle de topologia utilizado foi o S-XTC [45], com abordagem assimétrica.

5.3.1 Cenários

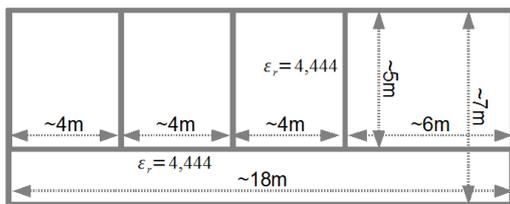
Como cenários de avaliação, foram utilizados quatro cenários internos, ilustrados na Figura 5.1, e um cenário plano.



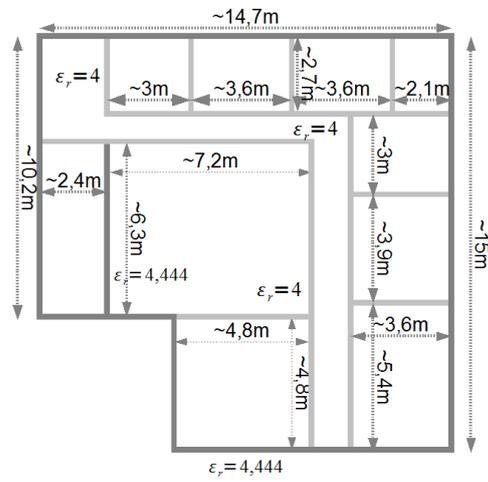
(a) Cenário plano



(b) Cenário Jogo-da-velha (pequeno e normal)



(c) Cenário Kubisch



(d) Cenário LCP

Figura 5.1: Cenários testes para o problema de conectividade de k-vizinhos

Cenário Plano

Foi escolhido um cenário plano de dimensões de $45 \times 45m^2$ com o objetivo de comparar os resultados com aqueles nos quais há a existência de obstáculos, permitindo examinar as diferenças que os obstáculos podem ocasionar no problema de conectividade de k -vizinhos.

Cenário Jogo-da-velha

O cenário mostrado na Figura 5.1(b) é composto de nove salas, dispostas na forma do Jogo-da-velha (*Tic-Tac-Toe* game). As salas são separadas por paredes de alvenaria de 15 cm de espessura, com permissividade relativa (ϵ_r) igual a 4,444[13]. Foram utilizados dois diferentes cenários de Jogo-da-velha com a finalidade de comparar os efeitos do tamanho do cenário sobre k . O primeiro cenário, aqui denominado Jogo-da-velha normal (TTT), onde cada sala tem dimensão igual a $15 \times 15m^2$. O segundo, chamado de Jogo-da-velha pequeno (sTTT - *small Tic-Tac-Toe*), é composto de salas com dimensões de $5 \times 5m^2$.

Cenário Kubisch

O cenário Kubisch, mostrado na Figura 5.1(c), foi obtido de [44]. A disposição física ($18 \times 7m^2$) consiste de quatro salas conectadas por um corredor. As paredes de alvenaria são as mesmas do cenário Jogo-da-velha, com $\epsilon_r = 4,444$ [13].

Laboratório de Computação Paralela (LCP)

O Laboratório de Computação Paralela (LCP), mostrado na Figura 5.1(d), é um escritório tradicional ($14,7 \times 15m^2$), cujas salas são separadas por paredes de alvenaria ($\epsilon_r = 4,444$), divisórias de madeira ($\epsilon_r = 4,000$) e vidro ($\epsilon_r = 4,000$).

5.3.2 Resultados

Para solucionar o problema de conectividade de k -vizinhos, foram conduzidas 200 simulações uniformemente distribuídas para cada par $k \times N$. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, cada qual considerando e não considerando o fenômeno do desvanecimento por multipercursos. As curvas relativas a 0,95

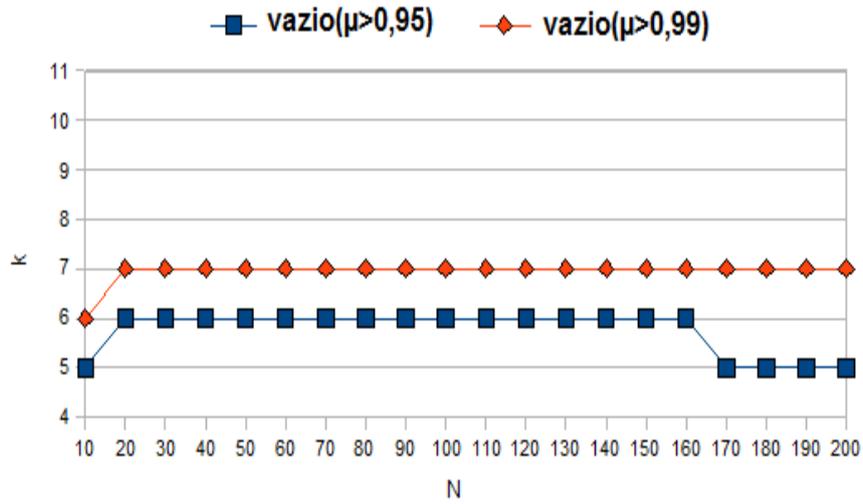


Figura 5.2: Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Vazio

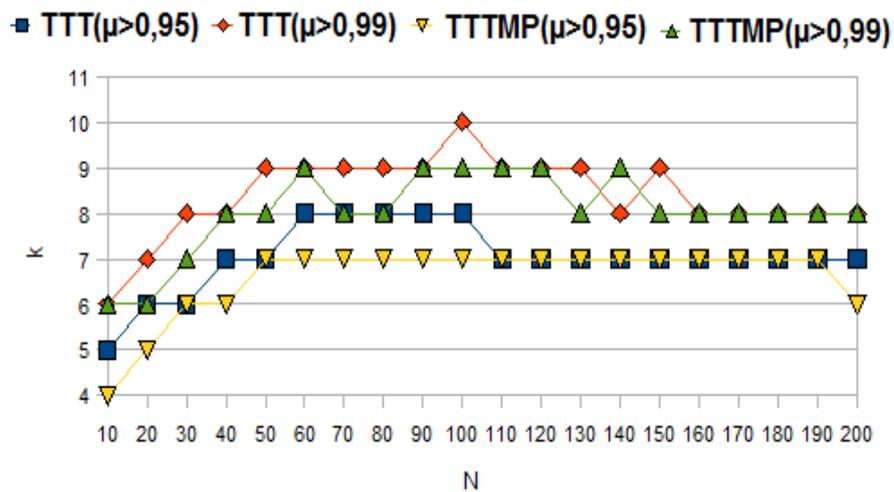


Figura 5.3: Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Jogo-da-velha

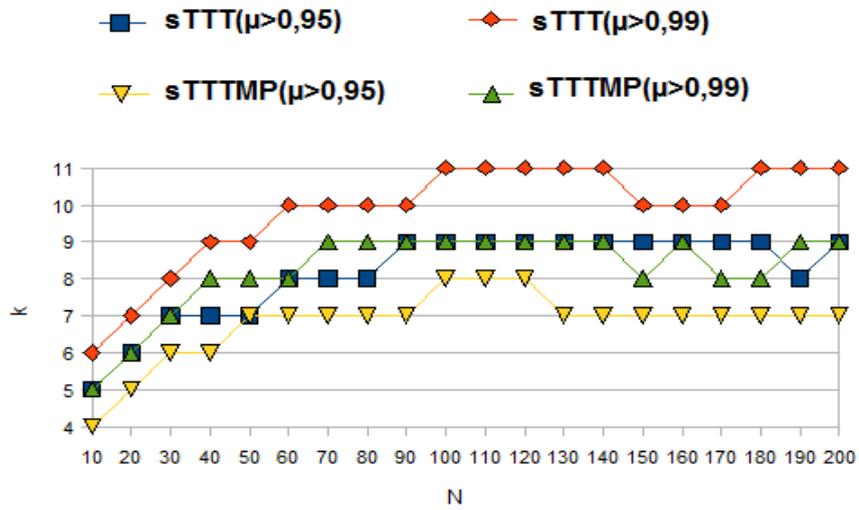


Figura 5.4: Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Jogo-da-velha Pequeno

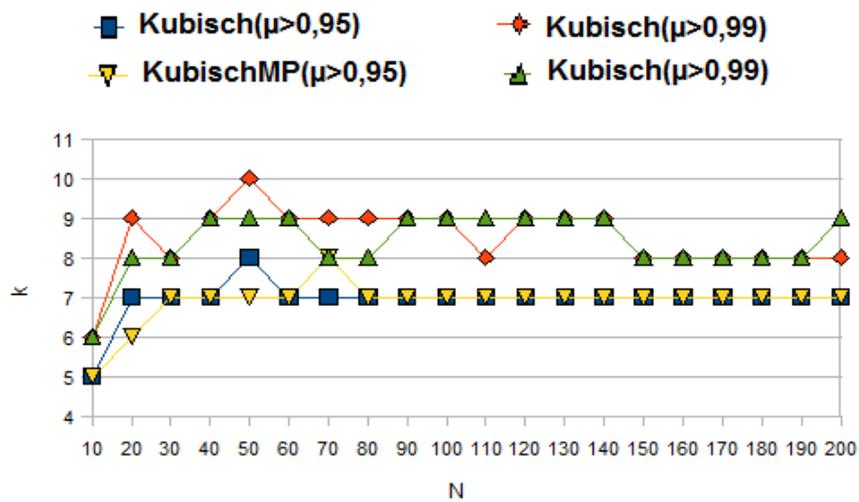


Figura 5.5: Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário Kubisch

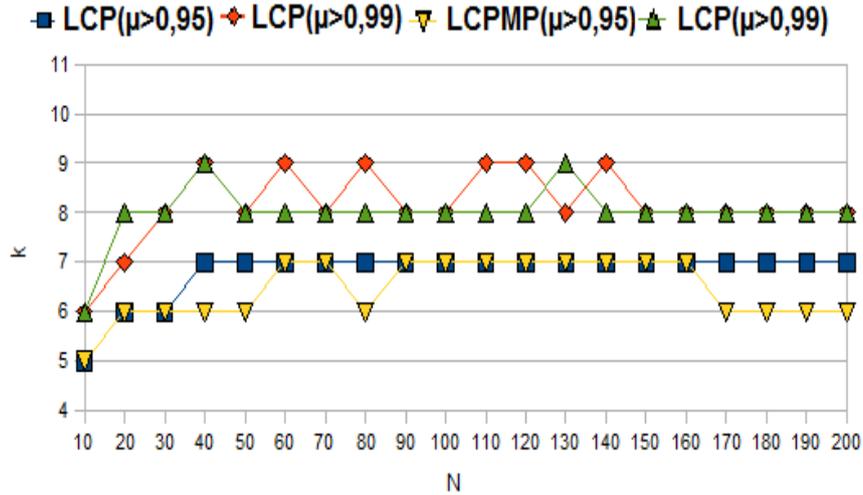


Figura 5.6: Solução do problema de conectividade de k -vizinhos para o cenário LCP

e 0,99 correspondem ao valor médio computado sobre os valores coletados quando a porcentagem dos nós participantes da rede superou 95% e 99% do número total de nós.

Há uma pequena diferença entre os resultados obtidos na Tabela 5.1 e os valores do gráfico do cenário plano. No caso da tese, considerou-se a conectividade assimétrica, permitindo valores menores que as simétricas. Os dados permitem intuitivamente confirmar que os obstáculos aumentam o valor de k . Em todos os cenários, foram obtidos valores de k maiores que os do cenário plano sem obstáculos. Este resultado, por si só, motiva o estudo do problema de conectividade de k -vizinhos em cenários parametrizados.

5.4 Análise

Nesta seção são analisados os resultados apresentados anteriormente. Os resultados das Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 foram utilizados para plotar os gráficos mostrados nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10. Com base nestas figuras, são analisados: o impacto do tamanho da área onde estão os receptores; a disposição dos obstáculos; e o desvanecimento por multipercursos sobre o problema de conectividade de k -vizinhos. O expoente de perda de percurso para cada cenário é mostrado na Tabela 5.2.

CENÁRIO	Expoente de perda de percurso (α)
Plano	2,00
<i>Jogo-da-velha</i> (TTT)	3,68
<i>Jogo-da-velha pequeno</i> (sTTT)	3,86
Kubisch	3,08
LCP	3,69

Tabela 5.2: Expoente de perda de percurso dos cenários

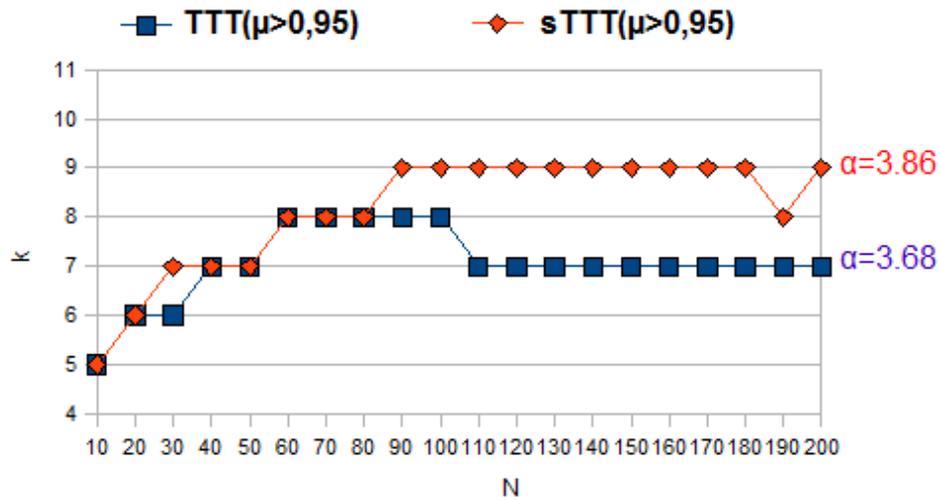


Figura 5.7: Efeito da dimensão da área sobre k

5.4.1 Tamanho do Escritório

De acordo com a Figura 5.7, nota-se que cenários com a mesma disposição mas com tamanhos diferentes fazem com que o comportamento do gráfico difira. Cenários maiores necessitam de valores de k menores para manter a rede conectada. Isto reflete diretamente no valor do expoente de perda de percurso. No caso em questão, o cenário Jogo-da-velha normal tem valor de $n = 3,68$ menor que sTTT ($n = 3,86$). Este resultado poderia induzir a premissa de que cenários com n menores necessitariam valores menores de k , mas os resultados obtidos na próxima subseção demonstraram que isto nem sempre ocorre. Paralelamente, foram feitos experimentos com outros tipos de materiais que constatou que à medida que ε_r cresce, o valor de k aumenta.

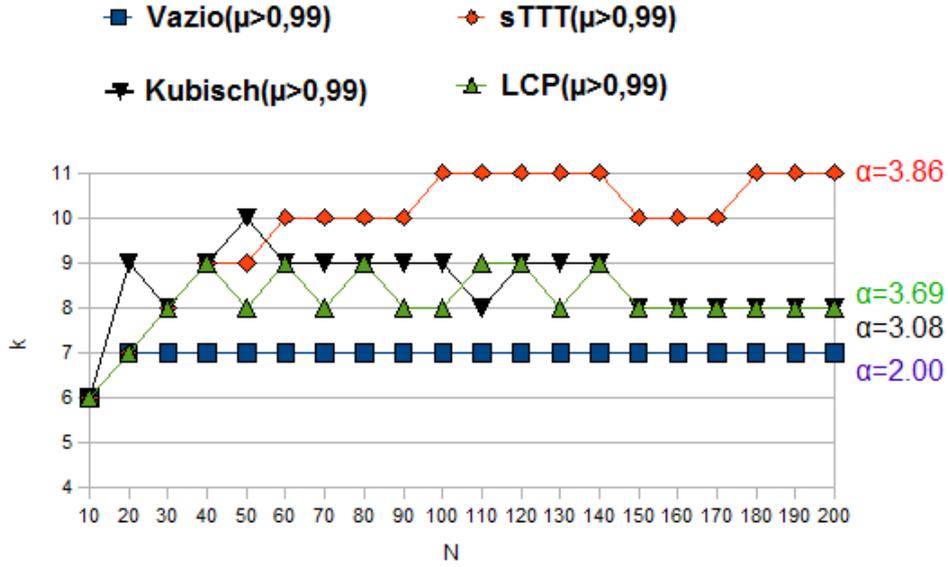


Figura 5.8: Efeito da disposição dos obstáculos sobre k

5.4.2 Disposição dos Obstáculos e o Expoente de Perda de Percurso

A disposição dos obstáculos influencia decisivamente os resultados como se pode observar na Figura 5.8. Embora os expoentes de perda de percurso de Kubisch ($\alpha = 3,08$) e do LCP ($\alpha = 3,69$) sejam significativamente diferentes, os valores de k para ambos os casos são muito semelhantes. Ao considerar a média ponderada $\sum k_i \cdot N_i / \sum N_i$, os resultados do LCP são ligeiramente superiores. Disto, pode-se concluir que, embora importante, o expoente de Perda de Percurso não pode ser considerado como o principal parâmetro, sendo necessário levar em consideração a especificidade do ambiente para estes parâmetros de rede.

5.4.3 Efeito do Desvanecimento por Multipercursos

O desvanecimento por multipercursos apresenta dois comportamentos em RSSF. Quando há poucos sensores, ele causa um efeito negativo sobre a relação $k - N$, obrigando os nós a aumentar o valor de k . Entretanto, quando o valor de N aumenta, a diferença entre as duas abordagens (considerando e não considerando a interferência por multipercursos) favorece os cenários que levam em conta o citado fenômeno. Isto ocorre porque o desvanecimento por multipercursos obstrui os enla-

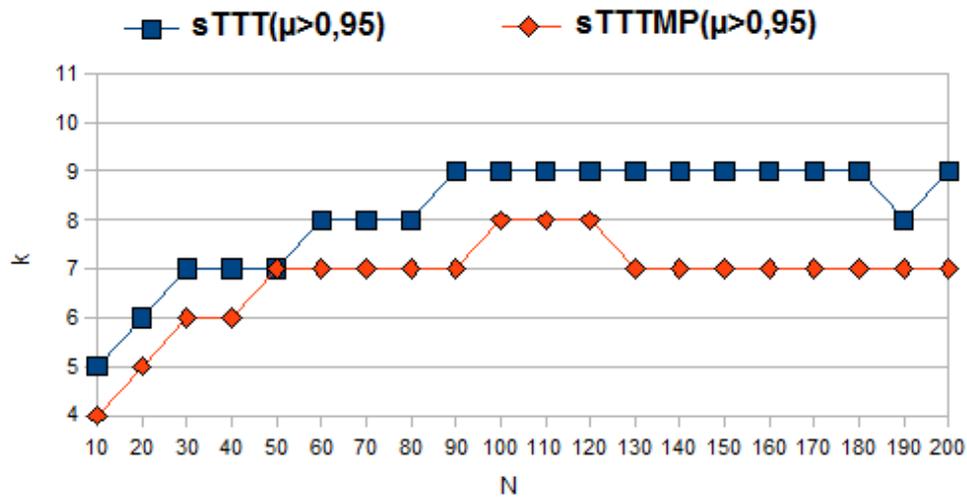


Figura 5.9: Efeito do desvanecimento por multipercuro sobre k no cenário Jogo-da-velha

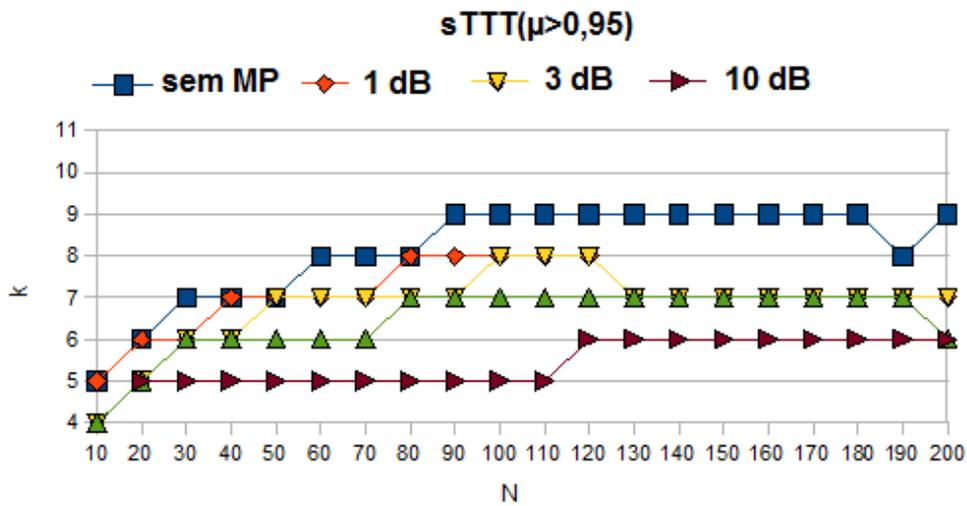


Figura 5.10: Efeito da variação do limiar de aceitação do desvanecimento por multipercuro sobre k

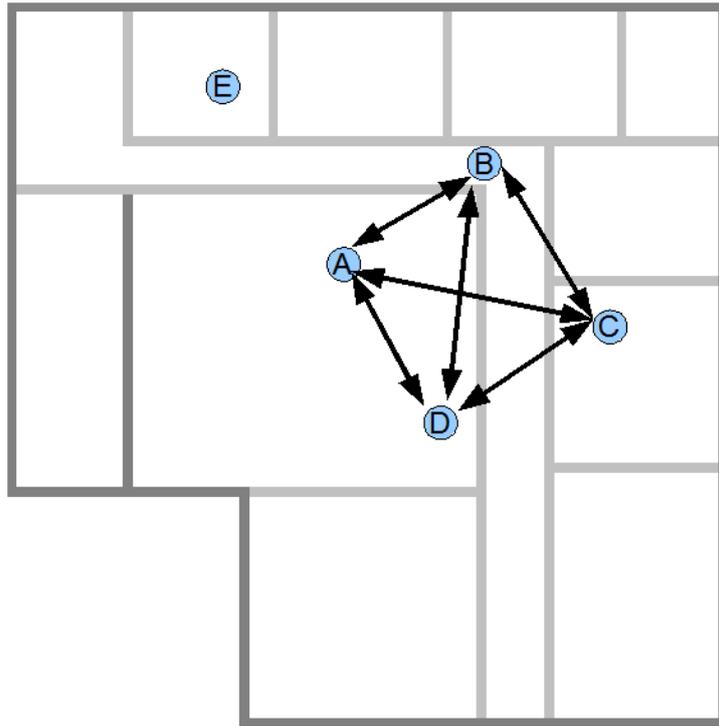


Figura 5.11: Exemplo de conectividade sem considerar o desvanecimento por multipercorso

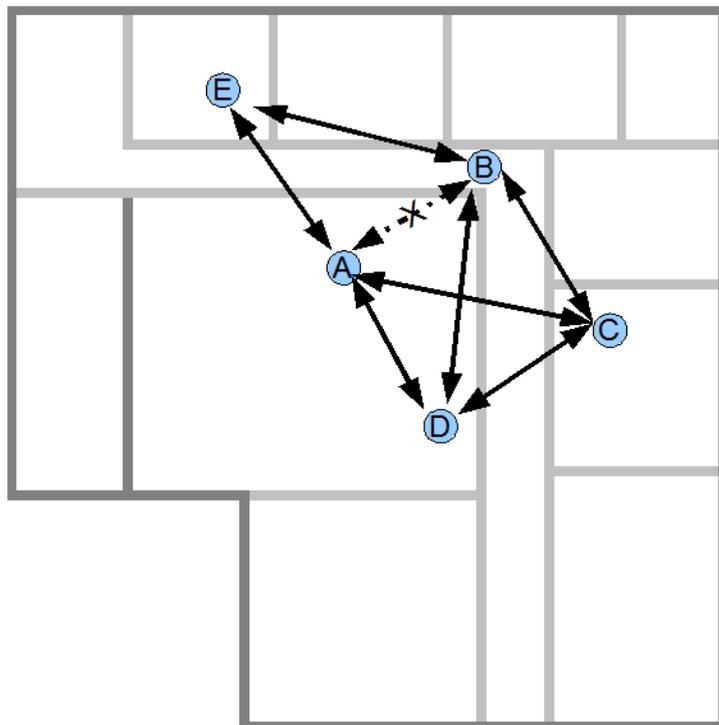


Figura 5.12: Exemplo de conectividade considerando o desvanecimento por multipercorso

ces que estão relativamente próximos, obrigando os sensores a aumentar o nível de potência, aumentando sua área de cobertura. Isto ocorrendo faz com que haja uma maior sobreposição de coberturas no sistema, aumentando a conectividade da rede, embora aumente também o consumo de energia. O efeito benéfico da interferência por multipercursos é claro no cenário Jogo-da-velha, como pode ser visto na Figura 5.9, mas é um pouco menor no cenário do laboratório de computação paralela e menor ainda no cenário Kubisch.

Os nós participantes de uma RSSF possuem diversas técnicas que permitem tratar o problema da interferência por multipercursos, dependendo do preço do equipamento. Assim, os valores de k dependerão desta qualidade. Foram realizados outros testes com outros parâmetros de limiar de interferência por multipercursos (dB maiores) e os resultados conduziram a menores valores de k (ver Figura 5.10). Porém, para RSSF com poucos nós, valores significativos de limiares conduziram a inviabilidade de conexão da rede.

Uma explicação possível para estes resultados pode ser entendida com a ajuda das Figuras 5.11 e 5.12. Supondo um cenário com cinco nós e que k , por hipótese, seja igual a três. Por hipótese, estejam estes quatro nós (A, B, C e D) formando uma rede e E, devido à hipótese de $k = 3$, não faça parte da rede. Segundo a hipótese descrita, o nó E somente faria parte da rede caso $k = 4$ ao invés de $k = 3$.

Entretanto, ao considerar o efeito do desvanecimento por multipercursos, o enlace entre A e B poderia ser desfeito, conforme ilustrado na Figura 5.12. Considerando que eles precisam conectar a 3 vizinhos, A e B aumentariam seu nível de potência até contactar o nó E (gastando mais energia), formando assim novos enlaces. Neste exemplo, onde foi considerado o desvanecimento por multipercursos, $k = 3$ foi suficiente para manter toda a rede conectada.

Embora os resultados estejam baseados em uma pequena quantidade de ambientes internos, eles são suficientes para demonstrar que em casos reais, devido aos efeitos eletromagnéticos ocasionados pelos obstáculos, as respostas obtidas podem contradizer o senso comum, como mostrado no último exemplo. Ferramentas SISF determinísticas, tais como *Zerkalo* podem ser aplicadas em qualquer cenário que permite ao usuário fazer uma aproximação do ambiente real (traduzido em uma área de simulação com determinada quantidade de obstáculos, de diferentes tama-

nhos, formas e permissividade relativa), cujo comportamento pode ser antecipado. Como dito anteriormente, pesquisadores de rede preveem que, no futuro, os modelos determinísticos irão prevalecer como ferramentas de predição de propagação, mesmo em ambientes externos [13].

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma análise determinística do problema de conectividade de k -vizinhos para RSSF em cenários na presença de obstáculos. Foram computados os valores de k para quatro cenários internos e um cenário plano, discutindo-se os efeitos do tamanho do cenário, disposição dos obstáculos, expoente de perda de percurso e o desvanecimento por multipercursos sobre o problema de conectividade de k -vizinhos.

Os resultados revelaram que obstáculos aumentam o valor de k e que tais incrementos são devidos à combinação do expoente de perda de percurso, tamanho do escritório e disposição dos obstáculos. Foi constatado que cenários com de diferenças significativas entre seus expoente de perda de percurso podem possuir o mesmo valor de k devido a suas configurações de tamanho e disposição. Observou-se que os efeitos de desvanecimento por multipercursos “ajudaria” os protocolos de controle de topologia a utilizar valores menores de k , com a contrapartida de utilizar maiores valores de potência de transmissão. Estes resultados aprimoraram este problema clássico, normalmente baseados em cenários sem obstáculos ou solucionados de forma analítica.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Esta tese apresentou a importância de buscar retratar mais fielmente o cenário de operação de redes sem fio e também da escolha do controle de potência como elemento determinante da rede. Para auxiliar esse controle de potência, propõem-se duas novas métricas de referência, denominadas *Taxa de Bloqueio* (TB) e *Taxa de Utilização* (TU). TB está relacionada com a “*impedância*” do cenário, isto é, com a interferência que os obstáculos do ambiente ocasionam na propagação eletromagnética. TU está ligada à alcançabilidade da emissão eletromagnética, fornecendo a relação entre o que é efetivamente transmitido e o que se dispersa no cenário.

Estas métricas permitiram:

- Elaborar um método de controle de potência para RSSF em cenários com obstáculos que permite associar o grau de conectividade com a potência aplicada sem utilizar mecanismos de realimentação. O método de controle proposto no Capítulo 2 permite ainda a identificação de barreiras de propagação e as potências de transmissão a ela associadas, permitindo ao nó sensor saber evitar a contenção de dados e/ou a superação destas barreiras. Verificou-se também que as métricas correspondem ao comportamento médio do sistema.
- Descrever um método que permita prever o comportamento de protocolos de controle de topologia distribuídos para RSSF, especificamente baseados em número de vizinhos. Pelo método apresentado no Capítulo 3, além da

predição, a simulação permitiu perceber o comportamento das métricas em ambientes distribuídos. Verificou-se como o problema do terminal escondido afeta o comportamento das métricas bem como avaliou-se o comportamento de abordagens *top-down* e *bottom-up*. Mostrou-se que as métricas propostas possuem o benefício de logo atingir a conectividade desejada, sendo propícias para ambiente de mobilidade, por não necessitar realimentação.

- Propor um método de estimação da conectividade física de entrada e de saída para RSSF em cenários com obstáculos. No Capítulo 4, aplicou-se este método em dois cenários distintos e comparou-se os resultados da predição com os resultados da simulação. Mostrou-se que o resultado é fator da granularidade da integração do processo, bem como do número de potências disponíveis para os transceptores.

Paralelamente, revisou-se no Capítulo 5 o problema clássico de conectividade de k -vizinhos em cenários reais simulados. Calculou-se deterministicamente o número de vizinhos necessários para que uma rede esteja com graus de conexão superior a 95% e 99%. Analisaram-se o impacto da dimensão do ambiente, da disposição dos obstáculos e do efeito do desvanecimento por multipercursos sobre o valor de k . Mostrou-se que, contrariamente ao que diz o senso comum, o desvanecimento por multipercursos pode diminuir o valor de k .

6.2 Trabalhos Futuros

A extensão da tese para um modelo 3D seria a continuação natural no que tange à investigação científica.

Visualiza-se como outro trabalho futuro a incorporação de modelos de mobilidade. Para tanto, seria necessário agregar o efeito *Doppler* em no modelo de propagação, bem como considerar a irregularidade de propagação das antenas.

Outras atividades seriam relacionadas com a predição de protocolos de controle de topologia, descritos no Capítulo 3, como o CTBC. Para tal, seria uma aplicação estatística da métrica, haja vista que as antenas direcionais poderiam estar aleatoriamente dispostas nos cenários.

Ainda, como trabalho futuro, em relação ao Capítulo 4, é necessário avaliar estatisticamente este grau de acerto, incorporando as variações estatísticas. Trabalhos relacionados à localização de sensores por múltiplos saltos baseados em conectividade poderiam valer-se das informações referentes ao método de conectividade de entrada e saída descritos neste Capítulo.

Em relação ao problema de conectividade de k -vizinhos, descrito no Capítulo 5, poder-se-ia estender a análise deste mesmo problema em cenários também em 3D, considerando ainda mobilidade e irregularidade, já anteriormente citadas nesta Seção.

Destacou-se reiteradamente, como questão de pesquisa, a necessidade de utilizar modelos de simulação mais realísticos. O estágio atual da computação permite que sejam programas mais sofisticados que aproximem a realidade física da virtual. Da mesma forma, deve-se tomar proveito das informações do local onde os equipamentos irão trabalhar, elaborando métodos que possibilitem a otimização de operação destes dispositivos, em função das características do ambiente.

Apêndice A

Propagação de Sinais de Radiofrequência

A.1 O Canal de Rádio-Propagação

Redes e sistemas de comunicações sem fio são projetados e operados para atuar em diversos cenários e aplicações atualmente. A telefonia celular, por exemplo, prevê o funcionamento de seus terminais em ambientes externos e internos, mas também possibilita a operação em mobilidade, até mesmo a altas velocidades. Outro exemplo representativo atual é o das redes locais sem fio, usualmente associadas a aplicações no interior de edificações, com mobilidade restrita, mas que aos poucos também vêm sendo utilizadas na rua. Em todos esses cenários, o desempenho desses sistemas é fortemente dependente do comportamento dos sinais de rádio no canal de propagação respectivo, que é tipicamente variante no tempo.

A variabilidade do canal de propagação é usualmente dividida de forma didática em duas partes. A variação de grande escala é aquela observada em intervalos largos de tempo, ou equivalentemente, em longos deslocamentos de um terminal móvel, por exemplo. As flutuações rápidas ou de curta duração que se sobrepõem ao comportamento mediano da resposta do canal, por outro lado, caracterizam a variação de pequena escala [13].

As variações de grande ou larga escala da resposta do canal estão associadas ao comportamento médio de decaimento da potência do sinal de RF com a distância e com os demais parâmetros relevantes do sistema e do cenário ou ambiente em

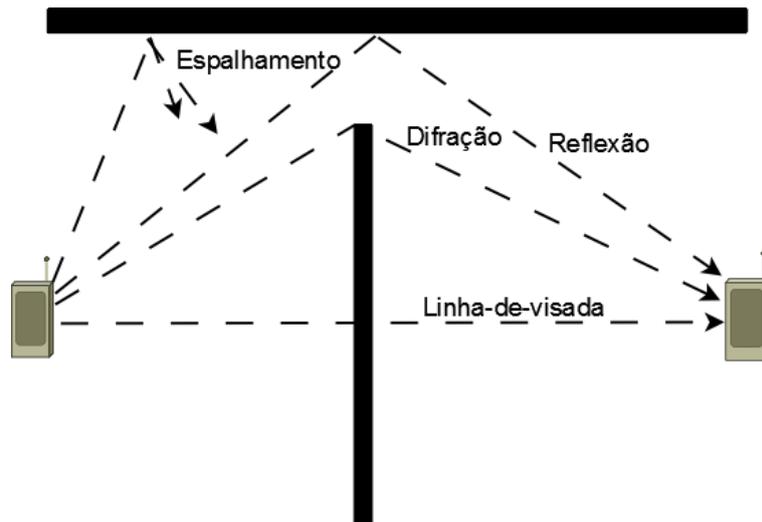


Figura A.1: Mecanismos de propagação

questão. É neste contexto que se destacam os modelos de (perda de) propagação. As abordagens gerais típicas são: a semi-empírica (ou empírica, ou experimental); a determinística (ou teórica, ou por simulação); e a modelagem numérica das equações de *Maxwell* ou de *Helmholtz* propriamente ditas no cenário conhecido.

A análise das variações de pequena escala tem forte relação com dois fenômenos típicos do canal de propagação rádio-móvel: os múltiplos percursos de propagação (ou multipercursos); e o efeito *Doppler*, associado à variação temporal da resposta de canal. O impacto desses mecanismos no desempenho de redes de dados e sistemas de transmissão digital é significativo, podendo levar a aumentos da taxa de erro de bits acima da capacidade de correção ou compensação do sistema. A escolha das técnicas de mitigação dos efeitos do canal a serem incorporadas em sistemas sem fio digitais é função principalmente das características de pequena escala do canal.

A.2 Mecanismos Típicos de Propagação nas Faixas de VHF e UHF

Quando uma onda de rádio atinge uma superfície que não é nem um perfeito isolante nem um perfeito condutor, alguma parte da energia passa pelo material, outra é absorvida e o restante refletida.

Estas características físicas dão origem a quatro tipos de rotas (Figura A.1)

pelas quais um sinal de rádio frequência (RF) pode percorrer do transmissor para o receptor. Estes caminhos podem ser o direto ¹, o refletido, o difratado e o espalhado.

A fórmula de *Friis* [13]:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (\text{A.1})$$

é utilizada quando existe um caminho sem obstáculos (LOS) entre transmissor e receptor. P_r é a potência de recepção. P_t é a potência de transmissão. G_t é o ganho da antena de transmissão. G_r é o ganho da antena de recepção. λ é o comprimento de onda do sinal transmitido. P_t e P_r devem ser expressos na mesma unidade, enquanto G_t e G_r são grandezas adimensionais. O parâmetro L se refere a fatores tais como perdas em filtros e antenas do sistema.

Em telecomunicações utiliza-se o termo *dB* (*decibéis*) ao invés de números absolutos por três razões: a propagação de radiofrequência exibe características logarítmicas em diversos aspectos; variação de intensidade de sinais mais significativa pode ser expressa por um pequeno conjunto de números; multiplicações matemáticas tornam-se adições tornando o cálculo mental mais fácil.

Em termos de *dB*, a potência é calculada por:

$$P(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{A.2})$$

onde P_2 e P_1 são as duas potências sendo comparadas.

Convertendo-se a equação (A.1) na sua forma *dBm* equivalente tem-se:

$$P_{r(\text{dBm})} = P_{r(\text{dBm})} + G_{t(\text{dB})} + G_{r(\text{dB})} + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) + 10n \log \left(\frac{1}{d} \right) - L(\text{dB}) \quad (\text{A.3})$$

Assim, as potências de transmissão e recepção são expressas em *dBm*, que é a potência relativa a um *miliwatt*. Nota-se na equação A.3 um novo fator n , denominado *expoente de perda de percurso*. No espaço livre, $n = 2$.

¹O caminho direto pode ser classificado como linha-de-visada (LOS - *Line-of-Sight*) se não existirem obstáculos entre o transmissor e o receptor ou Linha de Visada Obstruída (OLOS - *Obstructed Line-of-Sight*) se o sinal passa por um ou mais objetos na direção do receptor.

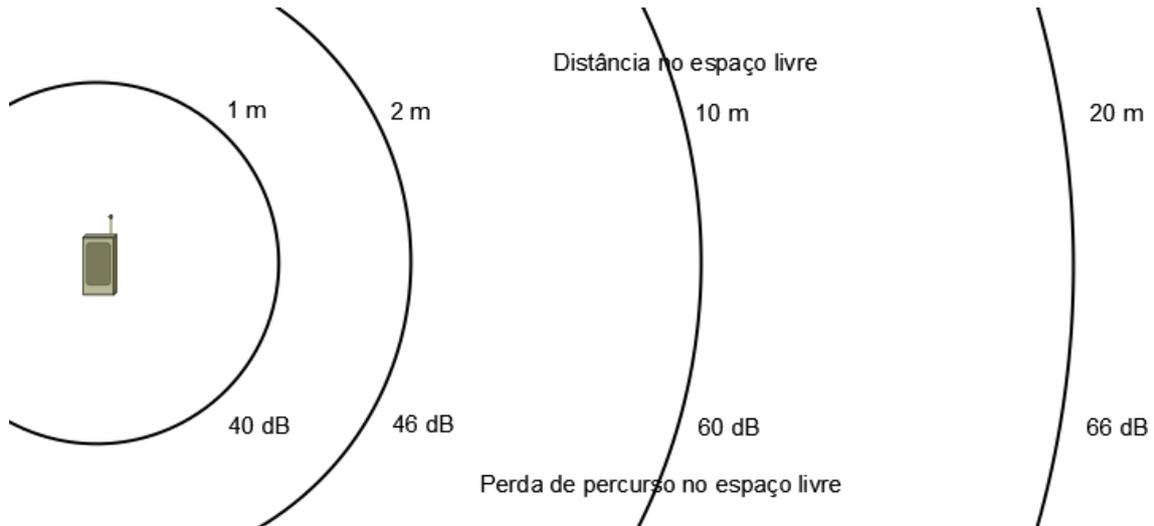


Figura A.2: Perda de percurso referente a um equipamento com $\lambda = 0,122m$

O modelo das equações (A.1) e (A.3) somente é válido para distâncias maiores que a distância de *Fraunhofer*:

$$D_f = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (\text{A.4})$$

onde D é a maior dimensão linear da antena de transmissão e $D_f > \lambda$.

Focando-se somente na perda de energia ocorrida no caminho entre o transmissor e o receptor, cujo termo técnico é denominado “perda de percurso” (PL - *Path Loss*), da Equação (A.3) tem-se:

$$PL(dB) = 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10.n\log(d) \quad (\text{A.5})$$

para $d > D_f$. Observa-se que equação está expressa agora só em dB , pois a parte referente às potências foi excluída da equação.

Como ilustrado na Figura A.1, quando uma onda de rádio atinge a superfície de uma obstrução, parte da energia passa através da obstrução e continua o seu caminho. Uma parte da energia é absorvida pelo material e a energia restante é espalhada em todas as direções. Quando o obstáculo é caracterizado por uma superfície grande (com relação ao comprimento de onda) e lisa, há uma direção preferencial única de espalhamento, que corresponde ao mecanismo de reflexão.

A intensidade da onda refletida pode ser obtida através do coeficiente de reflexão de *Fresnel*, Γ , que depende do ângulo de incidência e das propriedade elétricas dos

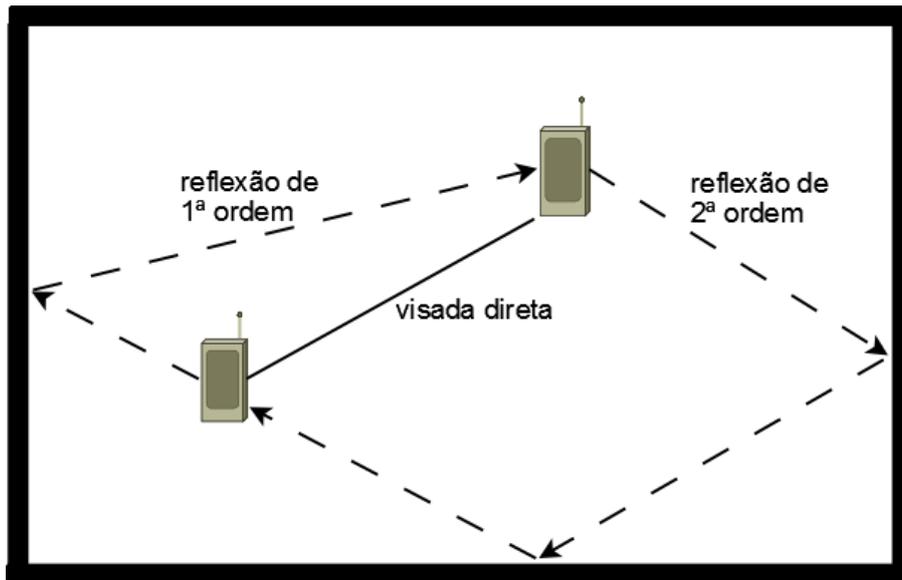


Figura A.3: Reflexão de primeira e segunda ordem

meios envolvidos.

O fenômeno da difração permite que as ondas eletromagnéticas contornem obstáculos, propagando-se em regiões de sombra com relação ao transmissor. A difração ocorre quando a onda de rádio encontra algum obstáculo agudo, como proximidade de portas e outras aberturas. Contudo, este fenômeno é menos significativo do que a transmissão direta ou refletida, em grande parte dos casos.

A dispersão ou espalhamento (*scattering*) sempre ocorre, pois a princípio, a onda incidente é espalhada por um obstáculo qualquer em todas as direções com diferentes intensidades. Entretanto, como na difração, a energia dos sinais dispersados é menos significativa que a energia direta ou refletida.

A.3 Modelos de Propagação para as Faixas de VHF e UHF

Como previamente mencionado, os modelos de propagação são usualmente abordagens semi-empíricas ou determinísticas. Em alguns cenários, é possível ainda modelar os efeitos da propagação por métodos numéricos para solução das próprias equações de *Maxwell* e/ou de onda (*Helmholtz*). Cada uma destas abordagens apresenta vantagens e desvantagens de uso, dependendo do cenário de aplicação.

Os modelos semi-empíricos são expressões analíticas fechadas que estimam a perda média ou mediana de propagação em função de uma série de parâmetros. Normalmente, a modelagem se baseia em dados experimentais representativos de certas condições e cenários. As expressões finais são dependentes de parâmetros de sistemas e ambientais como: distâncias do enlace, frequência de operação, altura das antenas e morfologia.

Via de regra, os modelos semi-empíricos são também *Ponto-Área* (PA), podendo ser utilizados para predições generalizadas para um dado ambiente, sem necessariamente dispor de informações detalhadas do cenário específico em questão. Esta abordagem é bastante adequada para cenários com topologia regular e morfologia uniforme. Entretanto, há situações em que a informação detalhada do cenário faz diferença. Em terrenos muito acidentados, por exemplo, a difração é um fenômeno freqüente, mas não contemplado pela abordagem PA. Para se obter estimativas mais próximas da realidade, quando as informações estão disponíveis, é conveniente adotar a abordagem *Ponto-a-Ponto* (PP) do cálculo de perda média de propagação.

A modelagem semi-empírica, embora inerentemente PA, também pode ser utilizada como base para análise PP, se acrescida de extensões que levam em consideração peculiaridade relevantes do cenário. A extensão mais comum se refere à presença ou não de obstáculos elevados que provoquem difração do sinal de RF. Variações de altura do terreno, contabilização do efeito da vegetação, entre outros, também podem ser considerados.

O modelo semi-empírico mais simples é o de decaimento com a distância dado por:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (\text{A.6})$$

onde d_0 é uma distância de referência inicial, d a distância ao ponto de observação e n o índice de decaimento. Esta modelagem PA, apesar de simples, é uma das mais utilizadas, seja para grandes cenários externos, seja para ambientes interiores. O índice de decaimento n reflete o grau de obstrução do ambiente à propagação de RF. A condição de espaço livre é representada por $n = 2$. Valores típicos de n para ambientes internos ficam na faixa de 3 a 6.

Outra abordagem típica de modelagem de propagação é a determinística. Nesta

abordagem, que também é PP, dispõe-se de informações detalhadas do ambiente em questão e a perda é modelada essencialmente com base na propagação direta e na reflexão das ondas eletromagnéticas em todos os obstáculos que constam na base de dados do cenário tratado. Os modelos determinísticos são também conhecidos como *Traçado de Raios* (RT - *Ray Tracing*), pois prevêem a determinação das principais trajetórias de propagação (raios). A implementação se dá usualmente por “força bruta” ou com base no método das imagens [74], e em ambos os casos requer grande esforço computacional. A Figura A.4 ilustra uma implementação de traçado de raios por “força bruta”. Em função disso, esta é uma técnica de modelagem normalmente mais adequada a ambientes internos, ou de pequenas dimensões. Os modelos de traçado de raios podem incorporar também a difração e o espalhamento.

Por fim, uma abordagem ainda mais pesada em termos computacionais é o cálculo das soluções das equações de Maxwell ou das equações de onda correspondentes em um cenário específico, usando métodos numéricos. Em Eletromagnetismo, destacam-se os métodos *Finite-Difference Time-Domain* (FDTD) [75] e *Finite Elements Method* (FEM) [76]. Entretanto o esforço numérico limita esta forma de estimar a perda de propagação a ambientes de dimensões ainda mais reduzidas do que o traçado de raios.

A.4 Desvanecimento por Multipercursos

Quando múltiplas cópias do mesmo sinal transmitido chegam no receptor devido aos fenômenos anteriormente citados, cada cópia tem sua própria amplitude, fase e polarização associadas ao sinal. Cada sinal de entrada é representado por um vetor cuja magnitude é equivalente à intensidade do campo elétrico da onda. O total recebido na antena receptora é a soma vetorial de todos os componentes e o quadrado desta soma vetorial é proporcional à potência recebida pelo receptor. O problema é, portanto, vetorial e fasorial. Dependendo da simetria do cenário, entretanto, o aspecto vetorial pode apresentar poucas variações. Neste caso, o problema pode ser encarado como aproximadamente fasorial. Um exemplo típico ocorre quando as antenas transmissora e receptora estão posicionadas a uma mesma altura intermediária em um ambiente fechado e a polarização predominante é a vertical com

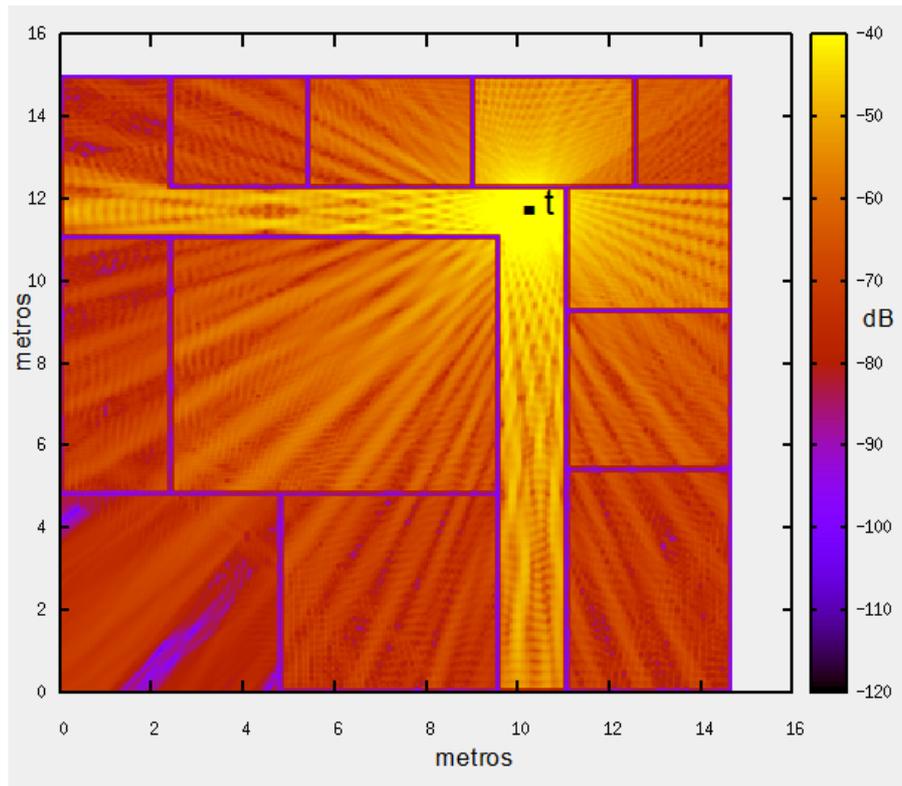
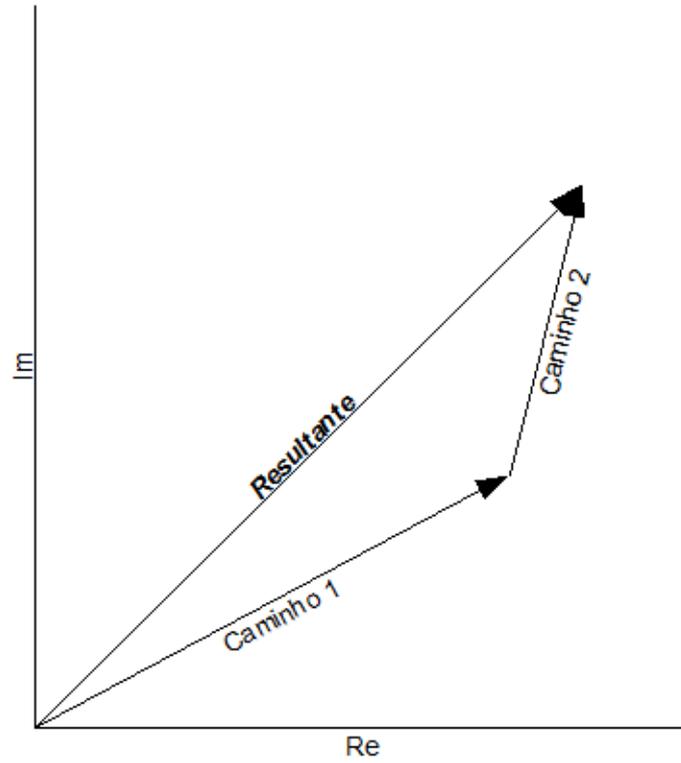


Figura A.4: Exemplo do cálculo de PL por traçado de raios

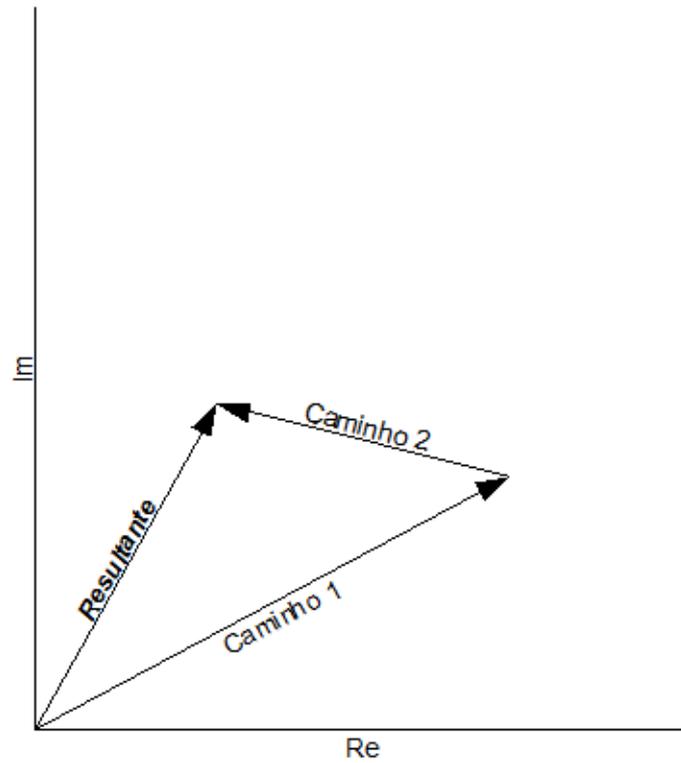
relação ao solo.

No problema fasorial, para capturar o quadro naquele momento, é necessário apenas da amplitude e da fase em um gráfico bidimensional. A abscissa é denominada eixo real e a ordenada é denominada eixo imaginário. A Figura A.5 mostra um exemplo de dois sinais chegando no receptor, cada qual com sua magnitude e fase. A Figura A.5(a) mostra uma situação onde a potência total recebida é maior do que a potência de quaisquer dos dois sinais incidentes, sendo que, neste caso, o multipercursos contribui positivamente (interferência construtiva) na composição do sinal final recebido (RSSI - *Received Strength Signal Intensity*). A Figura A.5(b) apresenta um caso onde a potência total é menor que a potência da componente principal, contribuindo negativamente (interferência destrutiva).

Como anteriormente exposto, quando um sinal é transmitido em um canal de rádio com obstáculos, no receptor tem-se réplicas desse sinal oriundas de vários multipercursos. O resultado é um espalhamento temporal do sinal, espalhamento este que pode ser quantificado através do perfil de potência de retardo, do qual se obtém o espalhamento de retardos entre os multipercursos ou simplesmente espa-



(a) Efeito positivo do multipercurso



(b) Efeito negativo do multipercurso

Figura A.5: Diagrama de fases exibindo dois sinais que chegam ao receptor adicionando: construtivamente (a) ou destrutivamente (b)

lhamento temporal.

Quando ocorre o espalhamento temporal pode haver a alteração de amplitude das várias componentes do espectro do sinal transmitido. Esta alteração poderá ocorrer de maneira uniforme em toda faixa de frequências do sinal, configurando o chamado *desvanecimento plano*, ou poderá afetar somente uma determinada faixa de frequências, configurando o que é conhecido como *desvanecimento seletivo*. A possibilidade de ocorrência de desvanecimento plano ou seletivo pode ser determinada pela largura de faixa de coerência do canal. Este parâmetro fornece uma medida estatística da faixa de frequências em que o canal pode ser considerado plano ou, de forma análoga, é a faixa de frequências dentro da qual as componentes espectrais do sinal recebido possuem grande correlação de amplitude[13].

O espalhamento temporal possibilita a ocorrência de desvanecimento seletivo e, nessa situação, em sistemas digitais, pode ocorrer o que é conhecido como *interferência intersimbólica*. Essa interferência é a sobreposição temporal de símbolos vizinhos recebidos na “saída” do canal no momento de decisão dos *bits* e leva à necessidade de redução da taxa de transmissão através desse canal ou ao desenvolvimento de técnicas que minimizem os seus efeitos.

Por fim, deve-se lembrar que o canal de propagação também é variante no tempo. Com isso, mesmo na situação menos crítica de desvanecimento plano, as variações da resposta do canal podem ser grandes o bastante para gerar desvanecimentos profundos. Estes desvanecimentos são significativos para o desempenho de redes ou sistemas de comunicações, e também devem ser monitorados para fins de mitigação de seus efeitos.

Apêndice B

Elementos de Teoria de Grafos

Definição B. 1 Grafo: Um grafo $G(V, E)$ é definido pelo par de conjuntos V e E , $G = (V, E)$ ¹.

Definição B. 2 Vértices: V é um conjunto não vazio cujos elementos são denominados vértices (ou nodos ou pontos) do grafo.

Definição B. 3 Arestas: Os elementos E são as arestas (ou linhas) do grafo. Por definição $E \subseteq V \times V$, ou seja, é o conjunto de pares ordenados de vértices dos grafos, (v, w) onde $v, w \in V$.

Definição B. 4 $V(G)$, $E(G)$: Um grafo com um conjunto de vértices V é dito ser um grafo em V . O conjunto de vértices de um grafo G é referido como $V(G)$ e seu conjunto de arestas como $E(G)$.

Definição B. 5 Número de Vértices e Arestas: O número de vértices de um grafo G é sua ordem, e escrito como $|G|$. O número de arestas é referido como $||G||$.

Definição B. 6 Grafo não-direcional: Um grafo $G = (V, E)$ é não-direcional (Figura B.1(a)) se o conjunto de arestas é composto de par de vértices não ordenados, ou seja, $(u, v) \equiv (v, u)$.

¹Para se evitar ambigüidades, assume-se tacitamente que $V \cap E = \phi$

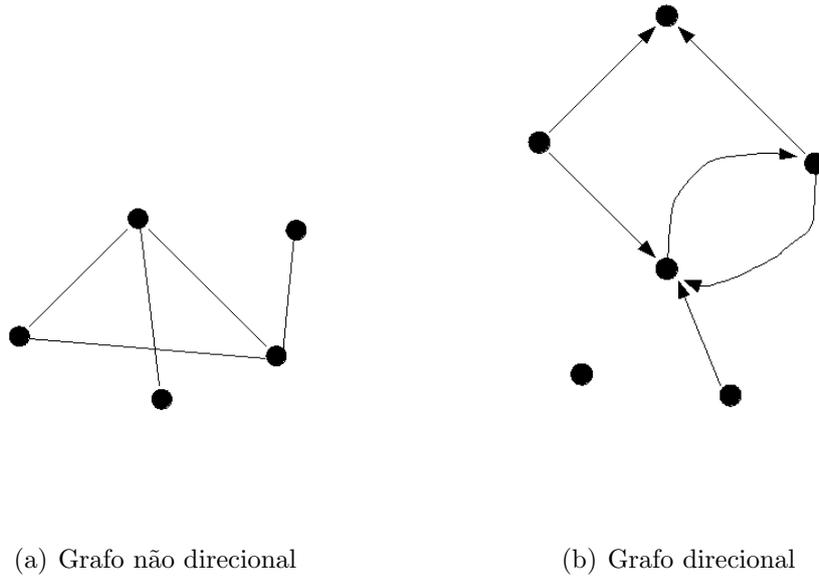


Figura B.1: Exemplos de grafos

Definição B. 7 Grafo direcional: Um grafo $G = (V, E)$ é direcional (ou digrafo ou orientado - Figura B.1(b)) se o conjunto de arestas é composto de par de vértices ordenados, ou seja, $(u, v) \neq (v, u)$. As conexões entre os vértices neste caso também são denominadas como arcos. A notação (u, v) significa que o arco sai de u com destino a v .

Definição B. 8 Vértices adjacentes: Dois vértices u, v de um grafo G são adjacentes ou vizinhos, se $(u, v) \in E(G)$, ou seja, se (u, v) seja uma aresta de G .

Definição B. 9 Grau ou conectividade (lógica) de um vértice: O grau de um vértice é dado pelo número de arestas que lhe são incidentes. Formalmente, pode-se definir como $\text{grau}(u) = |\{v \in V : (u, v) \in E\}|$

No caso do grafo ser dirigido, a noção de grau é especializada em:

Grau de emissão ou conectividade de saída de um vértice v corresponde ao número de arestas (ou arcos) que partem de v . Formalmente, pode-se definir como $C_S(v) = |\{u, v \in V : (v, u) \in E\}|$.

Grau de recepção ou conectividade de entrada de um vértice v corresponde ao número de arestas (ou arcos) que chegam a v . Formalmente, pode-se definir como $C_E(v) = |\{u, v \in V : (u, v) \in E\}|$.

Definição B. 10 Caminho: Dado um grafo $G = (V, E)$ e dado dois vértices $u, v \in V$, um caminho conectando u e v em G é uma seqüência de vértices $\{u = u_0, u_1, \dots, u_{k-1}, u_k = v\}$ tal que para cada $i = 0, \dots, k - 1, (u_i, u_{i+1}) \in E$.

Definição B. 11 Subgrafo: Dado um grafo $G = (V, E)$, um subgrafo de G é qualquer grafo $G' = (V', E')$ tal que $V' \subseteq V$ e $E' \subseteq E$. Dado algum subconjunto V' de vértices em G , o subgrafo de G induzindo por N' é definido como $G_{N'} = (N', E(N'))$, onde $E(N') = \{(u, v) \in E : u, v \in N'\}$.

Definição B. 12 Grafo conectado: Um grafo $G = (V, E)$ está conectado se para quaisquer dois vértices $u, v \in V$ exista um caminho de u para v em G .

Definição B. 13 Digrafo fortemente conectado: Se G for um digrafo, ele será fortemente conectado se entre dois vértices $u, v \in V$ exista um caminho de u para v e também um caminho de v para u em G .

Definição B. 14 Grafo k -conectado: Um grafo $G = (V, E)$ é dito k -(nós)-conectado (k -node-connected), para algum $k \geq 2$, se quaisquer $k - 1$ nós forem removidos do grafo, o mesmo permanece conectado.

Definição B. 15 Grafo k -arestas-conectado: Um grafo $G = (V, E)$ é dito k -arestas-conectado (k -edge-connected), para algum $k \geq 2$ se quaisquer $k - 1$ arestas forem removidas do grafo, o mesmo permanece conectado.

Definição B. 16 Conectividade (de vértice) de um grafo: A conectividade (de vértice) de um grafo $G = (V, E)$, denotada como $\kappa(G)$, é o valor máximo de k tal que G está k -conectado.

Definição B. 17 Conectividade de arestas de um grafo: A conectividade de arestas de G , denotada como $\lambda(G)$, é o valor máximo de k tal que G esteja k -arestas-conectado (k -edge-connected).

Definição B. 18 Grafos de proximidade: Grafos de proximidade são uma classe de grafos introduzidas pela Geometria Computacional que são baseadas pela relação de proximidade entre os nós.

Definição B. 19 Grafo de k -vizinhos: Dado um conjunto de V pontos dentro do espaço d -dimensional, com $d = 1, 2, 3$, e um inteiro $k \geq 1$, o grafo de k -vizinhos (k -neighbors graph) é o digrafo $G_k = (V, E_k)$, onde $(u, v) \in E_k$ se e somente se v é um dos k vizinhos mais próximos do nó u .

Definição B. 20 Grafo de comunicação: O grafo de comunicação define a topologia da rede, isto é, o conjunto de enlace sem fios que os vértices (transceptores) pode utilizar para comunicarem entre si. A presença de um enlace entre dois nó u e v dentro da rede depende: (i) da distância relativa entre u e v ; (ii) da potência de transmissão utilizada para enviar dados; (iii) do cenário onde a rede está operando; e (iv) das características e posição da antena utilizada. O conjunto de arestas criadas pela topologia da rede também pode ser denominada E_P .

Apêndice C

Redes de Sensores sem Fio

C.1 Introdução

A evolução tecnológica na área de micro-processadores e comunicação sem fio tem possibilitado o desenvolvimento e uso de sensores “inteligentes” em diversas áreas ligadas ao conhecimento científico. O termo “sensor inteligente” é aplicado ao *chip* que contém um ou mais sensores com capacidade de processamento de sinais e comunicação de dados, usualmente sem fio. A tendência atual é produzir esses dispositivos em larga escala, barateando o seu custo, incrementando sua qualidade e capacidade de processamento. Isto permitirá que em futuro próximo se concretize a visão de um “*ambiente inteligente*”, onde diferentes dispositivos reunirão e processarão informações das mais diversas fontes, como o controle de processos físicos e a interação com usuários. Para a concretização deste “ambiente inteligente”, além da computação e do controle, torna-se imperativa a comunicação, de forma a permitir que todas as fontes de informação sejam capazes de transferir os dados coletados para onde sejam necessários como, por exemplo, um *nó sensor atuador* ou um usuário.

O sensoriamento remoto já é aplicado extensivamente de forma cabeada. Entretanto, para alguns cenários, a comunicação de dados por fio pode constituir um grande obstáculo para o monitoramento do “ambiente inteligente”. Considerando, por exemplo, uma área com muitos sensores, o cabeamento de interligação entre estes equipamentos pode incrementar financeiramente o valor do sistema, além de trazer problemas de manutenção, impossibilitando (ou dificultando) a movimentação dos participantes da rede, inviabilizando, por vezes, os atuadores ou os nós sensores de

estarem próximos do local de monitoração. Portanto, a comunicação sem fio entre os diversos dispositivos, em muitos casos, é um requisito indispensável.

Assim, da conjugação destes fatores, surgiu uma nova classe de rede: as redes de sensores sem fio (RSSFs). Estas redes constituem-se de nós que são capazes de interagir com o ambiente, monitorando ou controlando parâmetros físicos, colaborando entre si para o cumprimento de suas missões. Um nó isolado é normalmente incapaz de cumprir sua tarefa, necessitando da utilização da comunicação sem fio com seus pares para possibilitar o realizar o seu trabalho.

Embora, eventualmente, estas redes incluam *atuadores*, o termo RSSF tornou-se a terminologia mais utilizada. Porém, outros nomes como *redes de atuadores e sensores sem fio* (RASSFs) podem também ser encontrados na literatura[77].

C.2 Exemplos de Aplicações

Muitos sensores de parâmetros físicos podem ser integrados aos *chips* dos nós participantes de uma RSSF. Os mais populares seriam os de temperatura, umidade, luz infravermelha, acústico, vibração, pressão, etc..

Os atuadores de uma RSSF podem controlar dispositivos mecânicos ou elétricos, como um interruptor, uma lâmpada ou ainda um outro dispositivo.

As aplicações de RSSFs mais freqüentemente mencionadas são as operações de prevenção de desastres, tipicamente aquelas voltadas à detecção de incêndios. Por exemplo, os nós sensores são dispostos em uma floresta, produzindo “coletivamente” um mapa de temperatura que pode ser acessado por bombeiros equipados com PDA (*Personal Digital Assistants*)[5].

RSSFs podem ser parte integral de sistemas C4ISRT (*command, control, communications, computing, intelligence, surveillance, reconnaissance and targeting*). A rápida instalação destes equipamentos no campo de batalha, a auto-organização e as características de tolerância a falhas tornam as RSSFs uma tecnologia bastante promissora no campo militar. Por exemplo, sensores de detecção podem informar o movimento de tropas inimigas. Neste caso, ele deveria ser de baixo custo para permitir a instalação em larga escala de nós sensores em uma grande área. Poderiam, ainda, monitorar as tropas aliadas, suas condições e a disponibilidade de

equipamentos[2].

A aplicação de RSSFs na agricultura permitiria a irrigação e fertilização baseada no sensoriamento da umidade do solo. De modo análogo, o controle de pesticidas contra pragas da lavoura poderia também ser apoiado por sensores de monitoramento.

RSSFs podem ser utilizadas no controle ambiental e mapeamento de biodiversidades, com respeito, por exemplo, a poluentes químicos. Outro caso seria a vigilância do solo marinho em relação ao processo de erosão, dado importante na construção de geradores baseados em energia eólica.

As edificações desperdiçam grandes quantidades de energia pelo uso ineficiente da umidade, ventilação e uso do ar-condicionado. Um monitoramento de precisão de temperatura, fluxo de ar, umidade e outros parâmetros físicos em um edifício por meio de RSSFs poderia consideravelmente melhorar o conforto de seus ocupantes e reduzir o consumo de energia.

Em termos de logística, RSSFs poderiam ser utilizadas no controle de inventário de material. Diferentemente dos dispositivos RFIDs (*Radio Frequency Identification*), que possuem somente funcionalidade passiva, sensores ativos poderiam ser utilizados para armazenar informações a respeito do histórico do material, como, por exemplo, os diversos locais por onde este passou. Parcialmente, ainda relacionado com logística, RSSFs podem ser utilizadas no monitoramento das condições de tráfego, alertando as autoridades de trânsito sobre a iminência do início de congestionamentos[5].

Pode-se citar ainda detecção de material nuclear, biológico e químico, de enchentes, monitoramento de médicos e pacientes em hospitais, museus, segurança de veículos, etc.[2].

C.3 Componentes das RSSFs

A principal característica que pode diferir os nós participantes de uma RSSFs é em relação a sua atuação como *fonte* (*source*) de dados ou como *sorvedouros* (*sinks*). Um nó sorvedouro onde é o destino para o qual os dados coletados pela RSSF devem ser enviados. Os sorvedouros são, em regra, parte da RSSF, embora, por

vezes possam ser classificados como sistemas “fora” da rede[5].

Os padrões de interação mais relevantes entre fontes e sorvedouros são: detecção de eventos; medidas periódicas; funções de aproximação e detecção de bordas; e rastreamento.

A forma mais elementar de interação entre área de monitoração e a RSSF é a detecção de eventos pelos nós fontes e conseqüente envio para os sorvedouros. Alternativamente, o envio dos dados poderia ser realizado de forma periódica.

O modo como um parâmetro físico se altera de uma posição para outra pode ser considerado como uma função da localização. Uma RSSF pode ser utilizada para aproximar esta função desconhecida (extraindo suas características espaciais), utilizando um número de amostras obtidas por cada sensor, sendo que o mapeamento aproximado deveria estar disponível no sorvedouro. Outro problema relevante seria encontrar áreas ou pontos de um determinado valor, como a detecção de bordas de incêndios em uma floresta (detecção de bordas).

A fonte de um evento pode ser móvel. RSSFs podem ser utilizadas para reportar atualizações da posição do evento para o sorvedouro, estimando parâmetros como velocidade e direção.

C.4 Requisitos das RSSFs

Para realizar as tarefas descritas anteriormente, vários requisitos de operação são demandados das RSSFs, alguns deles citados a seguir.

Como os nós participantes das RSSFs são pequenos e dispõem de pouca energia, normalmente utilizam faixas de frequência elevadas. Assim, comunicações a longa distância em um único salto necessitariam de altos níveis de potência. O uso de nós intermediários permite a comunicação por meio de múltiplos saltos, reduzindo a potência total requerida.

Em muitos casos, os nós sensores serão colocados em áreas remotas, o que não permitindo o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida de um sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs devem considerar a quantidade de energia consumida.

Em algumas aplicações, um nó sensor autônomo não é capaz de perceber se um determinado evento aconteceu, necessitando de colaboração e processamento em rede. Por exemplo, caso se deseje descobrir qual a maior temperatura em uma área é necessário consultar todos os nós sensores que atuam naquele ambiente.

Redes tradicionais são projetadas para transferir dados entre dois dispositivos específicos, cada qual possuindo um endereço de rede. Este paradigma de operação é denominado *centrado em endereços* (*address-centric*). Nas RSSFs, os nós são dispostos de forma redundante de forma a compensar possíveis falhas dos participantes da rede ou para compensar a baixa qualidade individual dos equipamentos, tornando, eventualmente, a identidade do nó irrelevante, sendo os dados enviados pelos nós mais importantes que o próprio endereço. Este paradigma é *centrado em dados* (*data-centric*)[2].

Sensores numa RSSF podem ser perdidos por causa de sua destruição física ou falta de energia. Sensores também podem ficar incomunicáveis devido, por exemplo, a problemas no canal de comunicação sem fio. Por outro lado, sensores inativos se tornarem ativos ou novos sensores passarem a fazer parte da rede. Estas hipóteses requerem mecanismos de auto-organização para que a RSSF continue operante.

Nas aplicações militares, os requisitos de segurança podem ser fundamentais. Os dados são criptografados e submetidos a processos de assinatura digital. As dimensões são extremamente reduzidas e podem utilizar nós sensores móveis como os transportados por robôs[2].

Ressalta-se, entretanto, que não existe um conjunto simples de requisitos que claramente identifique todas as RSSFs e também uma solução técnica para todo tipo de necessidade. Por exemplo, em várias aplicações de RSSFs, os nós individuais participantes da rede podem possuir sérias restrições de energia, sendo o aspecto crucial de operação. Em outros casos, a energia pode não possuir restrições significativas, ao passo que a acuracidade dos resultados seja o aspecto mais relevante.

C.5 Diferenças entre MANETs e RSSFs

Em MANETs (*Mobile Ad Hoc Networks*), um terminal tem capacidade de processamento e energia consideravelmente superior às RSSFs.

A diversidade de possíveis aplicações específicas para RSSFs mostra que é praticamente impossível construir uma arquitetura que atenda todas as demandas. Por exemplo, RSSFs podem possuir diferentes densidades, desde as mais esparsas até ambientes densamente ocupados, que requererão protocolos diferentes ou ao menos auto-adaptativos. Esta diversidade, embora presente, não é tão marcante em MANETs[5].

As RSSFs interagem com o ambiente e suas características de tráfego são diferentes daquelas baseadas na interação com o ser humano. Como consequência, as RSSFs possuem taxas de transmissão inferiores, embora estejam sujeitas ao tráfego de rajada. As MANETs são utilizadas para aplicações convencionais (WWW, voz, etc.), com características de tráfego bem mais estudadas que as existentes para as RSSFs.

Em tese, as RSSFs possuem um número muito maior de participantes da rede que as MANETs, requerendo soluções escaláveis.

A energia é um fator crítico tanto para RSSFs como para MANETs. Entretanto, as RSSFs possuem restrições bem mais severas que as MANETs. Isto impacta profundamente a arquitetura de sistema das RSSFs

As RSSFs são tipicamente compostas de nós com as mesmas características, especialmente no tocante aos dispositivos de telecomunicações. Uma exceção especial a esta regra é quando diferentes tipos de sensores inteligentes são usados em uma mesma rede, como, por exemplo, alguns poucos “super-nós” (com maior capacidade de processamento/memória e alcance maior de transmissão), que, utilizados em combinação com os demais nós, objetivam aumentar a capacidade de monitoramento da rede[5].

Diferentemente dos casos das MANETs, os nós que compõem as RSSFs são tipicamente estacionários, ou de baixa velocidade. Deve-se considerar que isto não é uma regra absoluta, haja vista a grande diversidade de tipos de RSSFs.

A flexibilidade, tolerância a falhas e baixo custo das RSSFs criam expectativas de novas áreas de aplicação para o sensoriamento remoto. Futuramente, uma grande variedade de área de aplicações fará com que as RSSFs incorporem-se ao cotidiano. Entretanto, existem ainda muitos obstáculos a serem superados, em função dos requisitos intrínsecos às RSSFs.

Apêndice D

Simulador Zerkalo

D.1 Introdução

Como citado no Capítulo 1, a demanda por velocidade das telecomunicações e sua ubiqüidade cresce ininterruptamente. A mobilidade e a facilidade de instalação de dispositivos sem fio faz com que sistemas que utilizem esta tecnologia sejam cada vez mais requisitados. Essa demanda colocou a necessidade de se desenvolver sistemas que pudessem prever o comportamento dos canais de rádio, por meio de métodos computacionais.

Pode-se dizer que a maturação dos sistemas de predição de sinais em ambientes controlados baseados em cálculos computacionais permite que os resultados empíricos aproximem-se cada vez mais daqueles previstos computacionalmente.

O principal objetivo deste Capítulo é descrever a ferramenta *Zerkalo* - (espelho, em russo) e suas características. Antes, na próxima Seção é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de ferramentas de predição de atenuação de sinais eletromagnéticos por meio de métodos computacionais.

D.2 Trabalhos Relacionados

Entre o final da década de 80 e o início da década de 90 foram propostos vários trabalhos [78], [79] destinados à predição de propagação em ambientes microcelulares.

SEIDEL *et al* [14] fizeram a primeira comparação com um grande volume de dados entre esses modelos de propagação e os resultados empíricos, demonstrando

o grande potencial dessas ferramentas.

As principais características do RT são sua complexidade e intensidade computacional, que fazem com que as ferramentas de predição sejam, embora precisas, lentas, ainda mais se comparadas com as ferramentas analíticas.

Estas características motivaram significativo esforço na busca de métodos alternativos, como *Fast RT*[80] na tentativa da otimização da complexidade computacional.

HASSAN-ALI e PAHLAVAN [81] publicaram um trabalho de referência na área, compilando boa parte das otimizações propostas nesta área do conhecimento, além de propor técnicas que permitem mesclar a abordagem analítica com a determinística.

Os trabalhos de predição de sinal posteriores, como JI *et al*[82] e LI *et al*[83], apesar do enfoque principal na localização de transceptores, trouxeram contribuições incrementais. Ressalta-se, ainda, a dificuldade de obter-se o código fonte dessas ferramentas de predição.

Até 2003, os programas de simulação de redes trabalhavam com uma realidade bastante restrita do cenário utilizado pelas redes. Parte significativa desses trabalhos considerou cenários planos, rádios de alcances idênticos, simetria das telecomunicações (transmissão e recepção), onde a potência do sinal era uma simples função da distância. CAVILLA *et al* [18], KOTZ *et al* [17] e ZHOU *et al* [19] mostraram que a simplificação da camada física diminuiu significativamente o impacto dos resultados de trabalhos que utilizaram modelos mais simples de propagação no tocante à camada física.

JARDOSH *et al* [24] apresentaram um modelo rudimentar de propagação, pois seu enfoque aplicava-se a modelos de mobilidade. Em tal trabalho, a propagação era considerada como bloqueada se não houvesse uma linha-de-visada entre o transmissor e receptor, com a ressalva de que poucos artigos abordavam a realidade dos cenários.

Voltado para o simulador NS-2, DICROT e DE DONKER [25] propuseram um modelo que combina RT, cadeias de *Markov* e medidas empíricas. Devido à demora do processo e à necessidade de comparação com medidas empíricas, este modelo não se adaptou às necessidades das técnicas que a serem propostas.

Também destinado ao NS-2, SOULEY e CHERKAOUI [84] introduziram um

modelo de propagação e mobilidade alegadamente superior, que não necessitava de uma abordagem semi-empírica, além de mais rápido, entretanto, sem disponibilizar sua ferramenta.

Essas limitações apresentadas pelos simuladores existentes motivaram o desenvolvimento de um simulador específico de propagação.

D.3 Zerkalo

D.3.1 Breve Histórico

A idéia de se construir um simulador de redes sem fio para cenários com obstáculos surgiu com a leitura de JARDOSH *et al* [24]. Verificou-se que, até então, existiam muito poucos simuladores que tratavam de obstáculos.

A primeira versão do simulador sem fio foi implementada em 2004 [85], onde o ambiente era bem simples e considerava apenas se havia ou não uma linha-de-visada (LOS - Line-of-Sight) entre o transmissor e o receptor. Caso houvesse um obstáculo entre transmissor e receptor, considerava a transmissão como interrompida. Esta versão era baseada exclusivamente em C++ e não possuía bibliotecas de apoio.

Com as sugestões de [86] e os modelos propostos por [14], implementou-se um modelo mais aprimorado [87], considerando ambiente de escritórios e as atenuações padrão existentes nestes tipos de ambientes [13], [86]. Nesta versão, incorporou-se o uso da biblioteca de computação geométrica *Computational Geometry Algorithms Library* (CGAL) [88], então na sua versão 3.0.

Melhorou-se o modelo em abril de 2006, incorporando a interferência por multipercurso e ângulos de incidência, inserindo a biblioteca no NS-2. O trabalho foi aprimorado e faz ainda uso intensivo da biblioteca BOOST [67].

D.3.2 Implementação de Zerkalo

Por ser baseado em RT, Zerkalo calcula a propagação de rádio em um número finito de raios originados do transmissor. O simulador foi projetado para abordagens 2D e 3D, embora o enfoque do trabalho desta tese ser em 2D. Cada raio encontra reflexões e transmissões quando intercepta algum obstáculo, como paredes, portas e janelas,

sendo que o modelo de propagação obedece à geometria dos obstáculos existentes no ambiente. O objetivo desta subseção é mostrar como Zerkalo calcula a potência recebida.

Cálculo da potência e o número de reflexões e transmissões

Quando uma onda eletromagnética atinge um obstáculo, parte do campo eletromagnético será refletida e outra transmitida, com conseqüente decaimento da energia. Assim, cada perda deve ser computada até o percurso final. Supondo que, neste caminho único ocorram k intersecções, decorrentes das i reflexões (Γ) e j transmissões (T), ou seja, $k = i + j$. Zerkalo calcula a potência recebida pelo receptor r de um l -ésimo caminho segundo a seguinte fórmula:

$$P_l = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \prod_{x=0}^i \Gamma_x^2 \prod_{y=0}^j T_y^2 \quad (\text{D.1})$$

onde

P_l : potência recebida referente ao l -ésimo caminho;

P_t : potência transmitida em Watts;

G_t, G_r : ganho das antenas de recepção e transmissão, nas direções de chegada e de partida do raio k , respectivamente;

λ : comprimento de onda em metros;

d : total do caminho percorrido em metros;

Γ, T : Coeficientes de *Fresnel* de Reflexão e Transmissão. Por definição $\Gamma_0 = 1$ e $T_0 = 1$.

Os coeficientes de *Fresnel* são baseados no ângulo (θ) formado entre o percurso onda incidente com a normal do obstáculo. É dependente ainda do coeficiente de permissividade relativa (ε_r) do meio.

$$\Gamma_i(\varepsilon_r, \theta) = \begin{cases} \Gamma_{\perp} = \frac{\text{sen}\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}}{\text{sen}\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}}; & \text{polarização perpendicular} \\ \Gamma_{\parallel} = \frac{\varepsilon_r \text{sen}\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}}{\varepsilon_r \text{sen}\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \cos^2\theta}}; & \text{polarização paralela} \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

Zerkalo considera a abordagem tradicional ($T_i(\varepsilon_r, \theta) = 1 - \Gamma_i(\varepsilon_r, \theta)$) [13], entretanto, existem outras abordagens, como $T(\varepsilon_r, \theta) = \sqrt{\chi(1 - \Gamma_i^2(\varepsilon_r, \theta))}$ [89], para superfícies muito rugosas, sendo que χ depende do material.

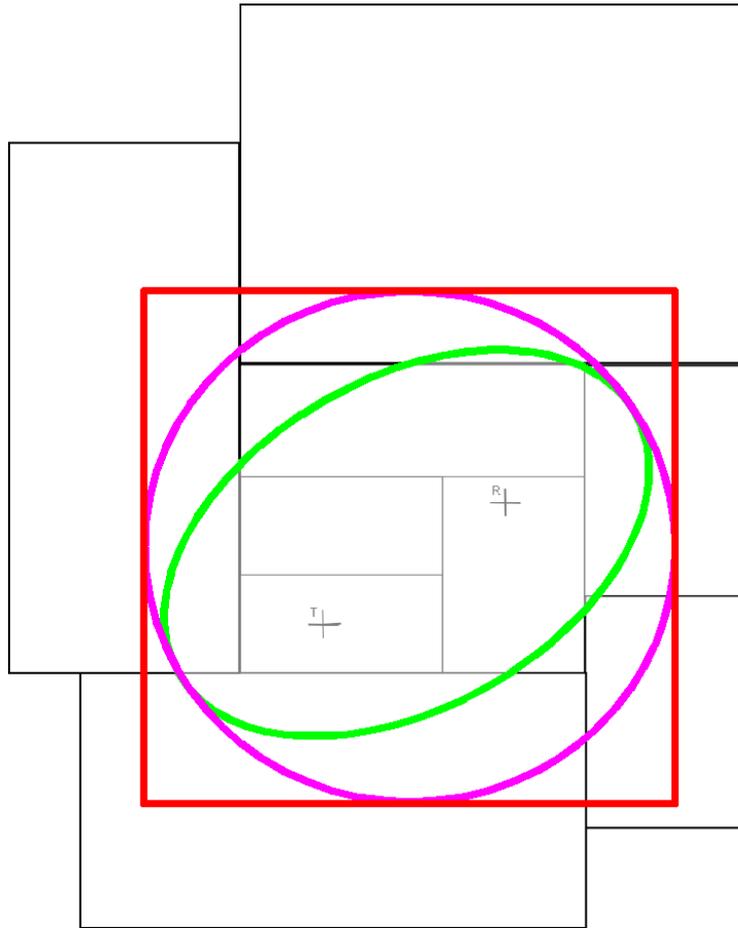


Figura D.1: Exemplo ilustrativo de redução de caminho relativo máximo para dentro de uma elipse

Método das imagens

Quando se deseja calcular a atenuação dois pontos, é necessário determinar quais obstáculos participarão dos diversos caminhos possíveis que ligam estes dois pontos [90]. Com base na geometria ótica, é possível se há ou não um percurso entre dois pontos determinando por meio de reflexões e transmissões, considerando os obstáculos envolvidos.

Pela força bruta, seria necessário envolver todos os obstáculos do cenário, o que poderia deixar o processo computacional inviável, pois o processo de RT é de complexidade computacional $O(n^r)$, onde n é o número de obstáculos e r é a ordem de reflexão utilizada. Pode-se, entretanto, confinar o sinal em uma área que contenha o transmissor e o receptor. ERTEL *et al* [91] propõem um método que consiste em confinar o sinal dentro de uma elipse que contenha o transmissor e o

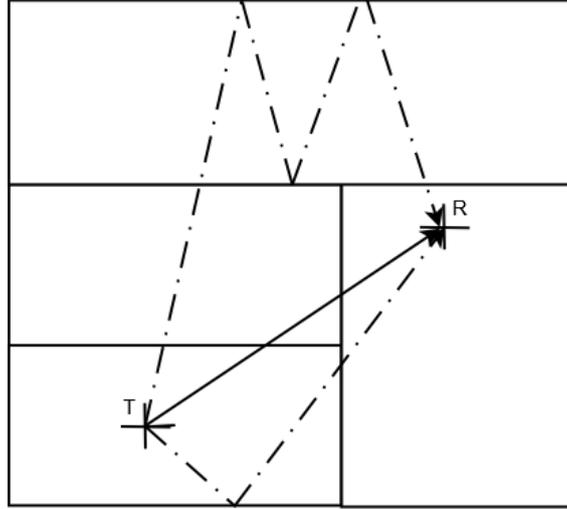


Figura D.2: Modelo de propagação de sinais

receptor, conforme ilustrado na Figura D.1. Com a elipse, descobrem-se quais são os obstáculos que estarão envolvidos na transmissão. Vê-se na Figura D.2, um exemplo de como a radiação eletromagnética pode chegar de um ponto a outro.

Zerkalo faz uma generalização deste cálculo. Calculando o centro da elipse (o ponto situado no meio do segmento de reta que une o transmissor e o receptor), determinando, assim, o tamanho do eixo maior, e calculando o *bound-box* cujo centro é o próprio centro da elipse e tem o lado igual ao diâmetro do círculo que envolveria a elipse. A generalização deste cálculo pode ser observada na Figura D.1.

Todos os obstáculos que estejam dentro deste *bound-box* ou que se intersectem com ele estarão envolvidos na transmissão de dados entre o receptor e transmissor. A partir de então se determina todos os caminhos existentes entre o transmissor e o receptor.

O primeiro caminho (normalmente o que representará a componente principal) é a linha-de-visada entre o transmissor e o receptor, que pode ou não estar obstruído. Neste caso, o número de reflexões da Equação (D.1) é igual a zero ($i = 0$), $j = k$ e $\prod_{x=0}^0 \Gamma_x = 1$.

Posteriormente, devem-se considerar as reflexões. Tendo em vista que os algoritmos de RT tem complexidade computacional igual a $O(n^r)$, considerar um número infinito de reflexões torna o processo inviável. VALENZUELA *et al* [92] mostraram que ordens de reflexão superior a 3 modificavam em muito pouco a predição de sinais, questionando o trabalho de [93], que considerava apenas reflexões de primeira

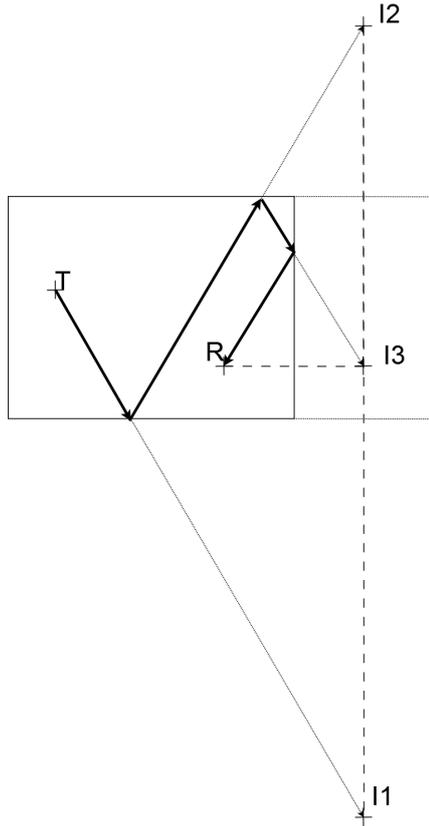


Figura D.3: Utilização do método das imagens para traçar um caminho de três reflexões

ordem. Da análise dos resultados de [92], pode-se verificar que reflexões de segunda ordem já apresentam resultados muito próximos das reflexões de terceira ordem.

Definido a ordem de reflexões, computa-se cada percurso, envolvendo todos os obstáculos citados anteriormente. Calcula-se as reflexões de primeira, segunda e, eventualmente, terceira ordem, considerando o conjunto e fazendo todas as permutações possíveis entre os obstáculos selecionados.

Desvanecimento por multipercursos

Utilizando a relação entre os campos elétricos e sua potência, o método de soma de fasores pode ser mostrado para calcular a potência P_r , em função de k diferentes percursos, em uma determinada localização como:

$$P_r = \left| \sum_{l=1}^k \sqrt{P_l} e^{-j\phi_l} \right|^2 \quad (\text{D.3})$$

onde P_l é a potência obtida pela Equação (D.1) e ϕ_l é o ângulo de fase do l – ésimo

caminho em radianos. O cálculo da fase do percurso (ϕ_l) quando este alcança a antena receptora é função das distâncias dos caminhos, das reflexões entre os vários obstáculos e da frequência de operação, sendo altamente sensível à posição.

Simulação de Eventos Discretos e Algoritmo de Simulação de Acesso à Camada Física e de Enlace

O simulador utiliza apenas um *thread*, utilizando máquina de estados, escalonando no tempo o comportamento de cada nó sensor ao transmitir e/ou receber, considerando os vários níveis de potência de transmissão aplicados.

Implementou-se, ainda, os algoritmos tradicionais de CSMA/CA [94] referentes à disputa de acesso ao meio.

Foram implementados os algoritmos do KNEIGHLEV[53], XTC[54] e S-XTC[45] para avaliação do comportamento da técnica proposta em ambientes distribuídos.

A entrada dos dados é em forma de texto ou arquivo do tipo XML (*Extensible Markup Language*), com auxílio da biblioteca Xerces C++ 2.8.0 [95]. Esta entrada define as características do cenário de utilização, necessárias tanto para a obtenção dos dados referentes às métricas propostas, bem como para a simulação de rede expostas no corpo desta tese. É necessário também a instalação da GNU *Scientific Library*, [96] na versão 1.8. As saídas também são na forma de arquivo de texto, normalmente do tipo CSV (*Comma Separated Value*) ou DAT, compatível com o Gnuplot[97].

Os diagramas de classe resumido do simulador de rede e para cálculo das métricas são mostrados nas Figuras D.4 e D.5, respectivamente.

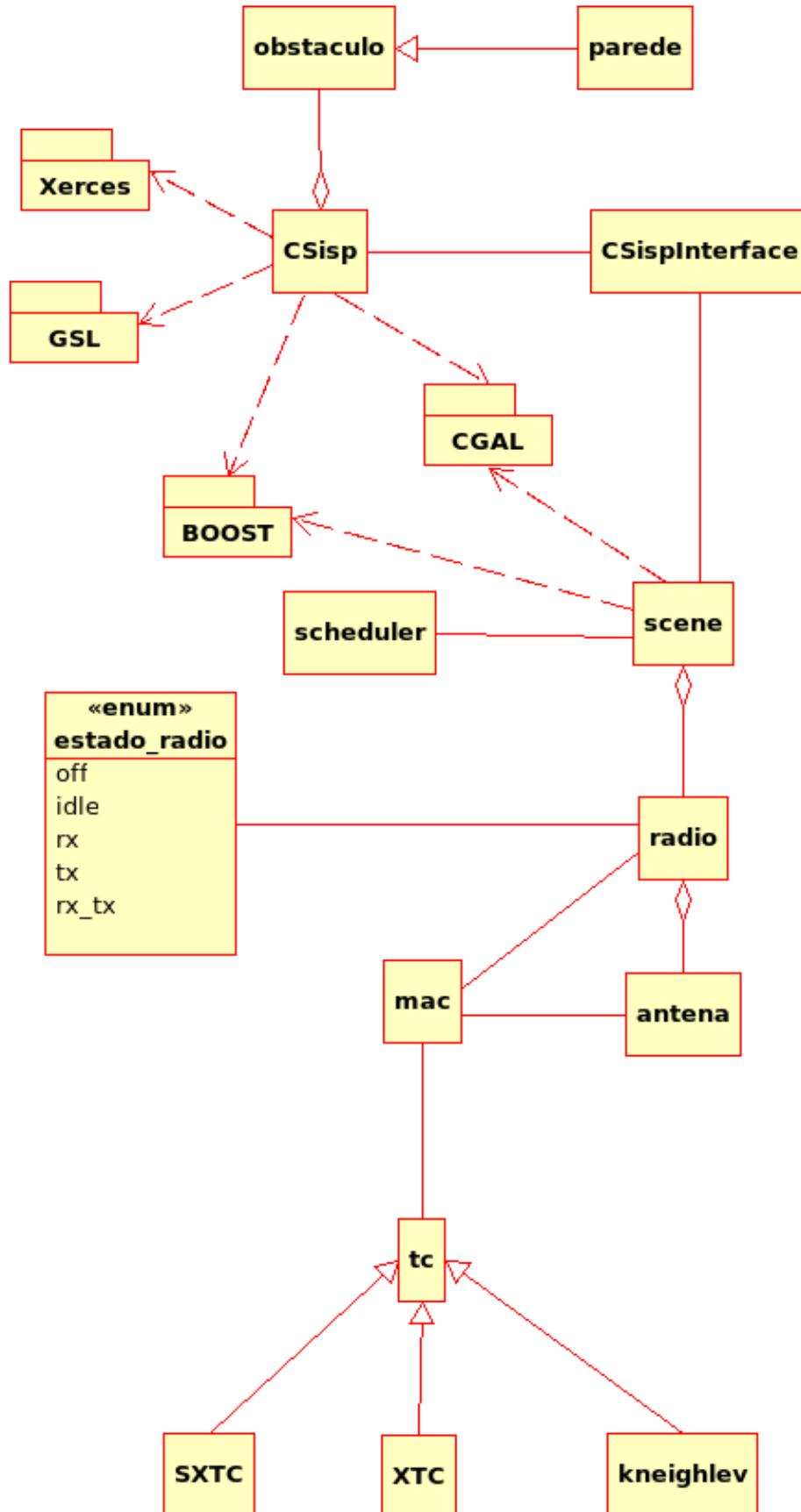


Figura D.4: Diagrama de classes do simulador de rede

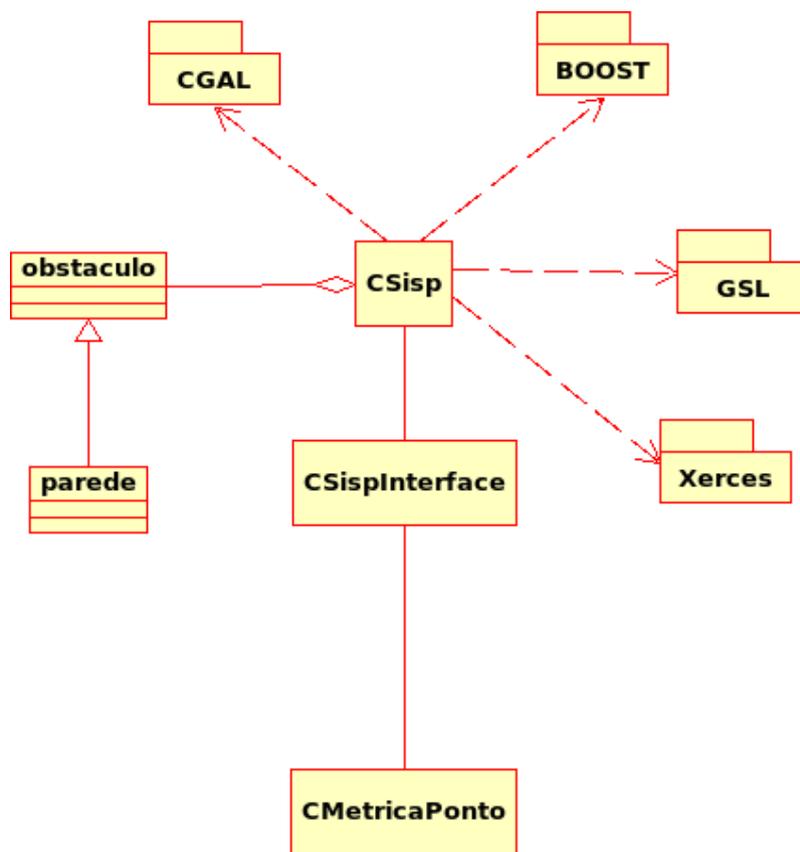


Figura D.5: Diagrama de classes para o cálculo das métricas

Referências Bibliográficas

- [1] LITTLE, T., DIB, P., SHAH, K., et al., “Using LED Lighting for Ubiquitous Indoor Wireless Networking”. In: *4th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (Wi-Mob 2008)*, Avignon, France, October 2008.
- [2] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., et al., “Wireless Sensor Networks: A Survey”, *Computer Networks*, v. 38, n. 4, pp. 393–422, 2002.
- [3] POTTIE, G. J., KAISER, W. J., “Wireless Integrated Network Sensors”, *Communications of the ACM*, v. 43, n. 5, pp. 51–58, May 2000.
- [4] LOUREIRO, A. A., NOGUEIRA, J. M. S., RUIZ, L. B., et al., “Redes de Sensores Sem Fio”, Texto do Minicurso apresentado no SBRC2003, Março 2003, disponível em <http://www.dcc.ufmg.br/loureiro/cm/docs/sbrc03.pdf>.
- [5] KARL, H., WILLIG, A., *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [6] KAWADIA, V., KUMAR, P., “Principles and Protocols for Power Control in Wireless Ad Hoc Networks”, *IEEE Journal on Wireless Ad Hoc Networks*, v. 23, n. 1, pp. 76–86, January 2005.
- [7] GUPTA, P., KUMAR, P., “Critical Power for Asymptotic Connectivity”, *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, v. 1, pp. 1106–1110 vol.1, 1998.

- [8] XUE, F., KUMAR, P. R., “On the θ -Coverage and Connectivity of Large Random Networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networks.*, v. 14, n. SI, pp. 2289–2299, 2006.
- [9] BLOUGH, D. M., RESTA, G., SANTI, P., “A Statistical Analysis of the Long-Run Node Spatial Distribution in Mobile Ad Hoc Networks”, *Wireless Networks*, v. 10, n. 5, pp. 543–554, September 2004.
- [10] WERNER-ALLEN, G., SWIESKOWSKI, P., WELSH, M., “Motelab: a Wireless Sensor Network Testbed”. In: *IPSN '05: Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, p. 68, IEEE Press: Piscataway, NJ, USA, 2005.
- [11] LEWENZ, R., RIDDOCH, F., KING, D., “Enhanced Uhf Propagation Predictions in Rural Areas using a High Resolution Clutterdatabase”. In: *Proceedings of 10th International Conference on Antennas and Propagation*, pp. 2210–2213, April 1997.
- [12] DENT, B. D., *Principles of Thematic Map Design*. Addison Wesley Longman Publishing Co, 1985.
- [13] RAPPAPORT, T. S., *Wireless Communication: Principles and Practice*. 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
- [14] SEIDEL, S., RAPPAPORT, T., “Site-Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 43, n. 4, pp. 879–891, November 1994.
- [15] NESKOVIC, A., NESKOVIC, N., PAUNOVIC, G., “Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment”, *IEEE Communications Surveys*, v. 3, n. 3, pp. 2 – 13, September 2000.
- [16] DOHLER, M., “Wireless Sensor Networks: The Biggest Cross-Community Design Exercise To-Date”, *Recent Patents on Computer Science*, v. 1, n. 1, pp. 9–25, January 2008.

- [17] KOTZ, D., NEWPORT, C., GRAY, R. S., et al., “Experimental Evaluation of Wireless Simulation Assumptions”. In: *MSWiM '04: Proceedings Of The 7th Acm International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 78–82, ACM: New York, NY, USA, 2004.
- [18] CAVILLA, A., BARON, G., HART, T., et al., “Simplified Simulation Models for Indoor Manet Evaluation are Not Robust”. In: *First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, v. 4, pp. 610–620, 2004.
- [19] ZHOU, G., HE, T., KRISHNAMURTHY, S., et al., “Models and Solutions for Radio Irregularity in Wireless Sensor Networks”, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, v. 2, n. 2, pp. 221–262, May 2006.
- [20] KURKOWSKI, S., CAMP, T., MUSHELL, N., et al., “A Visualization and Analysis Tool for NS-2 Wireless Simulations: iNSpect”. In: *MASCOTS '05: Proceedings of the 13th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, pp. 503–506, IEEE Computer Society, September 2005.
- [21] “Network Simulator 2 (NS2)”, Internet, 2008, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, acesso em outubro de 2008.
- [22] “Global Mobile Information Systems Simulation (GLOMoSIM) Library”, Internet, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>, acesso em setembro de 2008.
- [23] “Parsec - Parallel Simulation Environment for Complex Systems”, Internet, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/parsec/>, acesso em setembro de 2008.
- [24] JARDOSH, A., BELDING-ROYER, E. M., ALMEROOTH, K. C., et al., “Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad Hoc Networks”. In: *Mobicom '03: Proceedings Of The 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 217–229, ACM Press: New York, NY, USA, September 2003.

- [25] DRICOT, J., DONCKER, P., “High-Accuracy Physical Layer Model for Wireless Network Simulations in NS-2”. In: *Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, pp. 249 – 253, June 2004.
- [26] JARDOSH, A., BELDING-ROYER, E., ALMERTH, K., et al., “Real-World Environment Models for Mobile Network Evaluation”, *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, v. 23, n. 3, pp. 622–632, March 2005.
- [27] KOSTIN, S., DE AMORIM, C. L., “Controle de Potência de Transmissão para Redes de Sensores em Cenários Obstáculos”. In: *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, v. 1, pp. 337–350, Belém, PA, Brasil, May-June 2007.
- [28] LI, Q., ASLAM, J., RUS, D., “Online Power-Aware Routing in Wireless Ad-Hoc Networks”. In: *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking MobiCom*, pp. 97 – 107, ACM Press, July 2001.
- [29] CORREIA, L. H. A., MACEDO, D. F., SILVA, D. A. C., et al., “Transmission Power Control in MAC Protocols for Wireless Sensor Networks”. In: *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM)*, pp. 282–289, ACM Press, October 2005.
- [30] PIRES, A. A., REZENDE, J., et al., “FN-ALCA: Esquema de Controle de Potência para Economia de Energia e Aumento de Capacidade de Redes Ad Hoc”. In: *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2005*, pp. 1–14, 2005.
- [31] NARAYANASWAMY, S., KAWADIA, V., SREENIVAS, R., et al., “Power Control in Ad-Hoc networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol”. In: *Proceedings of European Wireless Conference (EW)*, pp. 156–162, Florence, Italy, February 2002.
- [32] KAWADIA, V., KUMAR, P., “Power Control and Clustering in Ad Hoc Networks”. In: *Proceedings of 22nd Joint Conference of the IEEE Compu-*

ter and Communications Societies (INFOCOM), v. 1, pp. 459–469, March 2003.

- [33] BURKHART, M., VON RICKENBACH, P., WATTENHOFER, R., et al., “Does Topology control reduce interference”. In: *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc)*, pp. 9–19, ACM: New York, NY, USA, 2004.
- [34] VON RICKENBACH, P., SCHMID, S., WATTENHOFER, R., et al., “A Robust Interference Model for Wireless Ad-Hoc Networks”. In: *IPDPS '05: Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05) - Workshop 12*, p. 239.1, IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2005.
- [35] MAVENI-NEJAD, K., LI, X.-Y., “Low-Interference Topology Control for Wireless Ad Hoc Networks”, *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, v. 1, pp. 41–64, March 2005.
- [36] IANNONE, L., KHALILI, R., SALAMATIAN, K., et al., “Cross-Layer Routing in Wireless Mesh Networks”. In: *1st International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 319–323, Sept. 2004.
- [37] JOHANSSON, T., CARR-MOTYCKOVA, L., “Reducing Interference in Ad Hoc Networks through Topology Control”. In: *DIALM-POMC '05: Proceedings of the 2005 joint Workshop on Foundations of Mobile Computing*, pp. 17–23, ACM: New York, NY, USA, 2005.
- [38] HIGHTOWER, J., BORRIELLO, G., “Location Systems for Ubiquitous Computing”, *IEEE Computer*, v. 34, n. 8, pp. 57–66, August 2001.
- [39] COPETTI, A., LEITE, J. C. B., LOQUES, O., “Localização Tolerante a Falhas de Usuários Móveis em Ambientes Fechados”. In: *WTF 2006 - VII Workshop de Testes e Tolerância a Falhas*, pp. 1–12, Curitiba, PR, 2006.
- [40] NUNES, B. A. A., DE MORAES, L. F., FERNANDES, R. M. S., “Utilizando Características do Ambiente Monitorado para Aumentar a Precisão na Localização de Dispositivos Wi-Fi Evitando a Calibragem”. In: *XXVI*

SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, pp. 481–494, Rio de Janeiro, RJ, Maio 2008.

- [41] PORRAT, D., COX, D. C., “UHF Propagation in Indoor Hallways”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 3, n. 4, pp. 1188–1198, July 2004.
- [42] YE, W., HEIDEMANN, J., ESTRIN, D., “An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks”. In: *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, v. 3, pp. 1567–1576, 2002.
- [43] POLASTRE, J., HILL, J., CULLER, D., “Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks”. In: *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems SenSys*, pp. 97–107, 2004.
- [44] KUBISCH, M., KARL, H., WOLISZ, A., et al., “Distributed Algorithms for Transmission Power Control in Wireless Sensor Networks”. In: *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 558–563, USA, March 2003.
- [45] DYER, M., BEUTEL, J., THIELE, L., “S-XTC: A Signal-Strength Based Topology Control Algorithm for Sensor Networks”. In: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS)*, pp. 508–518, IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2007.
- [46] KOSTIN, S., DE PINHO, L. B., AMORIM, C., “Transmission Power Levels Prediction for Distributed Topology Control Protocols within Parameterized Scenarios”. In: *ICT '08: Proceedings of the 15th International Conference on Telecommunications*, pp. 1–7, St. Petersburg, Russia, June 2008.
- [47] SANTI, P., *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. 1st ed. Wiley, September 2005.

- [48] LI, N., HOU, J., SHA, L., “Design and Analysis of an MST-based Topology Control Algorithm”, *Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2003)*, v. 3, pp. 1702–1712 vol.3, 30 March-3 April 2003.
- [49] LI, L., HALPERN, J. Y., BAHL, P., et al., “A Cone-Based Distributed Topology-Control Algorithm for Wireless Multi-Hop Networks”, *IEEE/ACM Trans. Netw.*, v. 13, n. 1, pp. 147–159, February 2005.
- [50] RAMANATHAN, R., HAIN, R., “Topology Control of Multihop Wireless Networks Using Transmit Power Adjustment”. In: *Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000)*, pp. 404–413, March 2000.
- [51] LIU, J., LI, B., “Mobilegrid: Capacity-Aware Topology Control in Mobile Ad Hoc Networks”. In: *Proceedings of the Eleventh IEEE International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 570–574, Miami, FL, USA, October 2002.
- [52] BLOUGH, D., LEONCINI, M., RESTA, G., et al., “The Lit K-Neigh Protocol for Symmetric Topology Control in Ad Hoc Networks”. In: *Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp. 141–152, Annapolis, Maryland, USA, October 2003.
- [53] BLOUGH, D., HARVEST, C., RESTA, G., et al., “A Simulation-Based Study on the Throughput Capacity of Topology Control in CSMA/CA Networks”. In: *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 13–17, IEEE Computer Society: Pisa, Italy, March 2006.
- [54] WATTENHOFER, R., ZOLLINGER, A., “XTC: A Practical Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Networks”. In: *Proceedings of 4th International Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor*

Networks (WMAN), pp. 216–223, Santa Fe, New Mexico, USA, April 2004.

- [55] KOSTIN, S., PINHO, L. B., AMORIM, C. L., “Método para Estimação do Grau de Conectividade Física de Entrada e de Saída para Redes de Sensores sem Fio em Cenários com Obstáculos”. In: *Anais do XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional 2008 (SBPO)*, pp. 1–12, João Pessoa, PB, Brasil, Setembro 2008.
- [56] NICULESCU, D., NATH, B., “Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA”. In: *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, v. 3, pp. 1734–1743, March-3 April 2003.
- [57] NICULESCU, D., NATH, B., “Error Characteristics of Ad Hoc Positioning Systems (APS)”. In: *MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pp. 20–30, ACM: New York, NY, USA, May 2004.
- [58] WU, H., WANG, C., TZENG, N.-F., “Novel Self-Configurable Positioning Technique for Multihop Wireless Networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 13, n. 3, pp. 609–622, June 2005.
- [59] SHANG, Y., RUML, W., “Improved MDS-based localization”. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM 2004*, pp. 2640–2651, Hong-Kong, China, 2004.
- [60] RUML, W., “Localization from Connectivity in Sensor Networks”, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, v. 15, n. 11, pp. 961–974, 2004, Member-Yi Shang and Member-Ying Zhang and Member-Markus Fromherz.
- [61] WANG, C., XIAO, L., “Sensor Localization in Concave Environments”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 4, n. 1, pp. 1–31, January 2008.
- [62] SANTI, P., BLOUGH, D. M., “An Evaluation of Connectivity in Mobile Wireless Ad Hoc Networks”. In: *DSN '02: Proceedings of the 2002 International Conference on Dependable Systems and Networks*, pp. 89–102, IEEE Computer Society: Washington, DC, USA, 2002.

- [63] DOUSSE, O., THIRAN, P., “Connectivity Vs Capacity li Dense Ad Hoc Networks”, *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, v. 1, pp. 486, March 2004.
- [64] BADONNEL, R., STATE, R., FESTOR, O., et al., “A Framework for Optimizing End-to-End Connectivity Degree in Mobile Ad-Hoc Networks”, *Journal of Network and Systems Management*, v. 13, n. 4, pp. 479–497, December 2005.
- [65] YONEKI, E., HUI, P., CHAN, S., et al., “A Socio-Aware Overlay for Publish/Subscribe Communication in Delay Tolerant Networks”. In: *MSWiM '07: Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 225–234, ACM: New York, NY, USA, 2007.
- [66] KOSTIN, S., PINHO, L. B., AMORIM, C. L., *The Impact of Office Dimension, Layout, Path Loss Exponent, and Multipath Fading on the k-Neighbors Connectivity Problem*, Tech. Rep. ES-717/08, COPPE/UFRJ Systems Engineering Program, March 2008.
- [67] “Boost C++ Libraries”, <http://www.boost.org/>, acesso em outubro de 2008.
- [68] KLEINROCK, L., SILVESTER, J., “Optimum Transmission Radii for Packet Radio Networks or Why Six is a Magic Number”. In: *Proceedings of IEEE Natural Telecommunications Conference*, pp. 431–435, December 1978.
- [69] TAKAGI, H., KLEINROCK, L., “Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 32, pp. 246–257, 1984.
- [70] HOU, T.-C., LI, V., “Transmission Range Control in Multihop Packet Radio Networks”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 34, n. 1, pp. 38–44, January 1986.

- [71] XUE, F., KUMAR, P., “The Number of Neighbors Needed for Connectivity of Wireless Networks”, *Wireless Networks*, v. 10, n. 2, pp. 169 – 181, March 2004.
- [72] BETTSTETTER, C., HARTMANN, C., “Connectivity of Wireless Multihop Networks in a Shadow Fading Environment”, *Wireless Networks*, v. 11, n. 5, pp. 571–579, 2005.
- [73] MIORANDI, D., ALTMAN, E., “Coverage and Connectivity of Ad Hoc Networks Presence of Channel Randomness”, *INFOCOM 2005. Proceedings IEEE of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, v. 1, pp. 491–502, March 2005.
- [74] BALANIS, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd ed. Wiley-Interscience, April 2005.
- [75] TAFLOVE, A., *Computational Electrodynamics - The Finite-Difference Time-Domain Method*. 3rd ed. Artech House Publishers, 2005.
- [76] JIN, J., *The Finite Element Method in Electromagnetics*. Wiley-Interscience, 2002.
- [77] ARAUJO, R., VILLAS, L., BOUKERCHE, A., “Uma Solução de QoS com Processamento Centrado para Redes de Autuadores e Sensores semFio”. In: *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, v. 1, pp. 309–322, Belém, PA, Brasil, May-June 2007.
- [78] IKEGAMI, F., TAKEUCHI, T., YOSHIDA, S., “Theoretical Prediction of Mean Field Strength for Urban Mobile Radio”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 39, pp. 299–391, March 1991.
- [79] ROSSI, J., BIC, J., LEVY, A., et al., “A Ray Launching Method for Radio-Mobile Propagation in Urban Area”. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium*, v. 3, pp. 1540–1543, Jun 1991.
- [80] FORTUNE, S. J., GAY, D. M., KERNIGHAN, B. W., et al., “WISE Design of Indoor Wireless Systems: Practical Computation and Optimization”,

IEEE Computational Science and Engineering, v. 02, n. 1, pp. 58–68, 1995.

- [81] HASSAN-ALI, M., PAHLAVAN, K., “A New Statistical Model for Site-Specific Indoor Radio Propagation Prediction Based on Geometric Optics and Geometric Probability”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 1, n. 1, pp. 112–124, January 2002.
- [82] JI, Y., BIAZ, S., PANDEY, S., et al., “ARIADNE: A Dynamic Indoor Signal Map Construction And Localization System”. In: *Mobisys '06: Proceedings of the 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, pp. 151–164, ACM: New York, NY, USA, 2006.
- [83] LI, H., SHEN, X., ZHAO, J., et al., “INEMO: Distributed RF-Based Indoor Location Determination with Confidence Indicator”, *EURASIP Journal of Advance Signal Process*, v. 8, n. 1, pp. 1–11, 2008.
- [84] SOULEY, A.-K. H., CHERKAOUI, S., “Realistic Urban Scenarios Simulation for Ad Hoc Networks”. In: *International Conference on Innovations in Information Technology (IIT'05)*, pp. 1 – 10, October 2005.
- [85] KOSTIN, S., BRANCO, L. M. C., PINHO, L. B., et al., *Transceptores Inteligentes para Cenários com Obstáculos*, Tech. Rep. ES-670/04, COPPE/UFRJ, Dezembro 2004.
- [86] MORROW, R., *Bluetooth Operaton and Use*. McGraw-Hill: Centerville, Indiana, 2002.
- [87] KOSTIN, S., AMORIM, C. L., *Métricas para Controle Eficiente de Potência de Transmissão em Cenários de Redes de Sensores com Obstáculos*, Tech. Rep. ES-692/06, COPPE/UFRJ Systems Engineering Program, Fevereiro 2006.
- [88] “CGAL, Computational Geometry Algorithms Library”, <http://www.cgal.org>, acesso em setembro de 2008.

- [89] BERTONI, H., HONCHARENKO, W., MACEL, L., et al., “UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications”, *Proceedings of the IEEE*, v. 82, n. 9, pp. 1333–1359, Sep 1994.
- [90] DIAS, M. H. C. ., RAMOS, G. L., SIQUEIRA, G. L., “Ray-tracing analysis of 3.5 GHz propagation at a typical urban environment for FWA systems”, *Microwave and Optoelectronics Conference, 2001. IMOC 2001. Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International*, v. 1, pp. 203–207 vol.1, 2001.
- [91] ERTEL, R., CARDIERI, P., SOWERBY, K., et al., “Overview of Spatial Channel Models for Antenna Array Communication Systems”, *IEEE Personal Communications*, v. 5, n. 1, pp. 10–22, Feb 1998.
- [92] VALENZUELA, R. A., FORTUNE, S., LING, J., “Indoor Propagation Prediction Accuracy and Speed Versus Number of Reflections in Image-Based 3-D Ray-Tracing”. In: *VTC 98. Proceeding of 48th IEEE Vehicular Technology Conference.*, v. 1, pp. 539–543, May 1998.
- [93] PAHLAVAN, K., LEVESQUE, A. H., *Wireless Information Networks*. Wiley-Interscience: New York, 1995.
- [94] STALLINGS, W., *Wireless Communications and Networks*. 2nd ed. Prentice Hall, 2005.
- [95] “XERCES”, 2008, <http://xerces.apache.org/>, acesso em outubro de 2008.
- [96] “GNU Scientific Library (GSL)”, Internet, 2008, <http://www.gnu.org/software/gsl>, acesso em outubro de 2008.
- [97] “Gnuplot”, <http://www.gnuplot.info/>, acesso em outubro de 2008.