

UMA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ANTENAS DIRECIONAIS  
E MÚLTIPLOS CAMINHOS EM REDES AD HOC SEM FIO

Natanael Delgado de Freitas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

---

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2008

FREITAS, NATANAEL DELGADO DE

Uma Análise da Utilização de Antenas Direcionais e Múltiplos Caminhos em Redes Ad Hoc Sem Fio [Rio de Janeiro] 2008

XVII, 94 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Antenas Direcionais
2. Múltiplos Caminhos Disjuntos
3. Redes Ad Hoc sem fio

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

*Aos meus filhos, André e Clara.*

# Agradecimentos

A Deus, razão de meu viver.

À minha esposa, Chiara, e aos meus filhos, André e Clara, por todo amor, carinho, incentivo e compreensão prestados enquanto me dediquei a este trabalho.

Aos meus pais, Clodoaldo e Maria Leonor, pelo amor incondicional e por todo esforço e dedicação ao longo da vida, sempre incentivando a educação dos filhos.

Aos meus irmãos, Clodoaldo, Cláudio, Ney, Corina e Neilson, pelo amor e apoio ao longo da minha vida.

Ao meu orientador Luís Henrique pela amizade, confiança, objetividade, paciência e orientação segura, além de sempre estar presente, para aconselhar e ajudar a superar todos os obstáculos desta jornada.

Aos professores do GTA, Otto Carlos, Aloysio, José Rezende e Leão, pela amizade, por toda a ajuda e pelos ensinamentos de como se deve aprender.

Ao amigo Miguel Elias pela amizade, sugestões, comentários úteis e idéias construtivas.

À equipe do GTA, em particular aos amigos, Danilo, Kleber, Sávio, André Sion, Rodrigo, Carina, Reinaldo, Igor, Natalia, Marcel e Carlos Henrique, pela amizade e cooperação durante o percurso até a dissertação.

Aos professores Aloysio e Marcelo Rubinstein pela presença na banca examinadora.

Ao Capitão-de-Corveta (EN) Italo Ramella, pela amizade, sempre incentivando e acreditando que meu objetivo seria alcançado.

À Marinha do Brasil pela liberação em tempo integral para o desenvolvimento deste trabalho e pelo estímulo ao constante aperfeiçoamento de seus profissionais.

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

UMA ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ANTENAS DIRECIONAIS E  
MÚLTIPLOS CAMINHOS EM REDES AD HOC SEM FIO

Natanael Delgado de Freitas

Março/2008

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Atualmente, o número de aplicações de redes *ad hoc* está crescendo. Essas redes também originaram outras tecnologias, tais como as redes em malha sem fio e as redes veiculares. Redes *ad hoc* têm custo baixo e são auto-configuráveis. As redes *ad hoc* têm sido tipicamente aplicadas em ambientes militares e de desastres. Navios de guerra, tanques, aeronaves ou combatentes individuais podem ser nós de redes táticas para uso militar em ambientes hostis. A maioria dos protocolos existentes de acesso ao meio para redes *ad hoc*, incluindo o IEEE 802.11, assumem a utilização de antenas omnidirecionais por todos os nós. Usando a transmissão omnidirecional, o desempenho da rede é limitado. A utilização de roteamento de caminho único ocorre na maioria dos protocolos de roteamento *ad hoc*. O desempenho da rede também é limitado pelo uso de roteamento de caminho único. Este trabalho analisa algoritmos de roteamento que exploram o uso de antenas direcionais e que constroem múltiplos caminhos. Ambas as técnicas privilegiam o reuso espacial e a distribuição do tráfego na rede. Neste trabalho, é definida uma métrica que reflete a utilização de cada um dos nós da rede como nó intermediário de múltiplas rotas disjuntas. Os resultados obtidos mostram melhoria significativa na distribuição do tráfego nestas redes e também comparam algoritmos de roteamento disjuntos por zona com algoritmos de roteamento disjuntos por nó, em diferentes cenários, mostrando suas vantagens e desvantagens.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AN ANALYSIS OF THE USE OF DIRECTIONAL ANTENNAS  
AND MULTIPLE PATHS IN WIRELESS AD HOC NETWORKS

Natanael Delgado de Freitas

March/2008

Advisor: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Department: Electrical Engineering

Currently, the number of applications of ad hoc networks is increasing. Many technologies have arisen from these networks, such as wireless mesh networks and vehicular wireless ad hoc networks. Ad hoc networks have low cost and are self-configuring. Ad hoc networks have been applied typically in military and disaster environments. Warships, tanks, airplane or individual combatants can be nodes of the tactical networks for military use on hostile environments. Most of the existent medium access control protocols on wireless ad hoc networks, including IEEE 802.11, assume the use of omnidirectional antennas for all nodes. Using omnidirectional transmission, the network performance is limited. Most of the routing protocols use single path routing. Using single path routing, the network performance also is limited. This work analyzes routing algorithms that explore the use of directional antennas along with multiple paths. Both techniques privilege the spatial reuse and the distribution of traffic in the network. This work defines a metric that reflects the use of each node of the network as a relay node in multiple disjoint paths. The results show a considerable improvement in the distribution of the traffic in these networks. Furthermore, this work compares zone disjoint routing algorithms with node disjoint routing algorithms in different scenarios, showing their advantage and disadvantage.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de acrônimos</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Trabalhos relacionados . . . . .	4
1.3 Objetivo . . . . .	5
1.4 Organização . . . . .	6
<b>2 Antenas</b>	<b>7</b>
2.1 Antenas omnidirecionais . . . . .	9
2.1.1 Protocolos da camada de controle de acesso ao meio . . . . .	10
2.1.2 Protocolos de roteamento . . . . .	11

2.1.3	Produtos . . . . .	12
2.2	Antenas direcionais . . . . .	13
2.2.1	Sistemas de antenas direcionais . . . . .	16
2.2.1.1	Sistemas de antenas direcionais de feixe comutado . . . . .	16
2.2.1.2	Sistemas de antena direcional de feixe direcionado . . . . .	18
2.2.2	Vantagens da utilização de antenas direcionais . . . . .	20
2.2.3	Desafios na utilização de antenas direcionais . . . . .	21
2.2.4	Protocolos da camada de controle de acesso ao meio . . . . .	25
2.2.5	Protocolos de roteamento . . . . .	26
2.2.6	Produtos . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Múltiplos caminhos disjuntos</b>	<b>30</b>
3.1	Disjunção por nó . . . . .	31
3.1.1	Exemplos de algoritmos disjuntos por nó . . . . .	32
3.2	Disjunção parcial por zona . . . . .	33
3.2.1	Exemplo de algoritmo disjunto por zona . . . . .	33
3.3	Disjunção por zona . . . . .	34
3.4	Simulador . . . . .	36
<b>4</b>	<b>O Simulador implementado</b>	<b>37</b>
4.1	Algoritmos usando múltiplas rotas disjuntas por nó . . . . .	42
4.2	Algoritmos de rotas disjuntas por zona . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Simulações</b>	<b>53</b>

5.1	Resultados . . . . .	54
5.1.1	Análise para um cenário em grade . . . . .	56
5.1.2	Análise para um cenário com distribuição aleatória dos nós . . . . .	63
5.1.3	Uma otimização . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>75</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>79</b>
<b>A</b>	<b>Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade</b>	<b>91</b>

# Lista de Figuras

1.1	Exemplo de uso militar de antena omnidirecional em rede sem fio. . . . .	2
1.2	Exemplo de uso militar de antena direcional em rede sem fio. . . . .	2
2.1	Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena isotrópica. . . .	8
2.2	Exemplo da largura de feixe de antena direcional. . . . .	8
2.3	Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena omnidirecional.	9
2.4	Exemplo de padrão de radiação bidimensional de antena omnidirecional. .	10
2.5	Exemplo de produtos que utilizam antena omnidirecional. . . . .	13
2.6	Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena direcional. . . .	14
2.7	Exemplo de padrão de radiação bidimensional de antena direcional. . . .	14
2.8	Exemplo de padrão de radiação cone e esfera de antena direcional. . . . .	15
2.9	Exemplo de padrão de radiação idealizado de antena direcional. . . . .	15
2.10	Exemplo de sistema de antenas direcionais de feixe comutado realístico. .	17
2.11	Exemplo de mudança de direção do feixe por tipo de sistema de antena direcional. . . . .	19
2.12	Exemplo de reuso espacial. . . . .	20
2.13	Exemplo de aumento do alcance de transmissão. . . . .	21
2.14	Localização de vizinhos com antenas direcionais. . . . .	22

2.15	Terminal escondido devido não perceber RTS e CTS. . . . .	23
2.16	Terminal escondido devido ganho assimétrico. . . . .	23
2.17	Surdez. . . . .	24
2.18	Comunicação em linha com antena direcional. . . . .	24
2.19	Exemplo de utilização de sistema de antenas direcionais de feixe comutado.	28
2.20	Exemplo de sistema de antena direcional de feixe direcionado vendido comercialmente. . . . .	28
2.21	Exemplo de utilização de sistema de antena direcional de feixe direcionado vendido comercialmente. . . . .	29
2.22	Exemplo de sistema de antena direcional de feixe direcionado utilizado em plataformas de testes. . . . .	29
3.1	Exemplo de rotas disjuntas por nó. . . . .	32
3.2	Exemplo de rotas parcialmente disjuntas por zona. . . . .	33
3.3	Exemplo de rotas disjuntas por zona. . . . .	35
4.1	Exemplo de sistema de antenas direcionais de feixe comutado utilizado. .	38
4.2	Exemplo de vizinhos de 1 salto. . . . .	45
4.3	Exemplo de critério de desempate no segundo salto durante a formação de rota disjunta por nó. . . . .	46
4.4	Exemplo de critério de desempate entre duas rotas durante a formação de rota disjunta por nó. . . . .	46
4.5	Exemplo de rotas disjuntas por nó. . . . .	47
4.6	Exemplo de rotas disjuntas por zona em um cenário em grade. . . . .	51
4.7	Exemplo de área iluminada por rotas disjuntas por zona em um cenário em grade. . . . .	51

5.1	Exemplo de cenário em grade com 10 nós por linha e 10 nós por coluna. . . . .	56
5.2	Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 36 nós. . . . .	57
5.3	Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 81 nós. . . . .	58
5.4	Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 169 nós. . . . .	59
5.5	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando antenas omnidirecionais. . . . .	60
5.6	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo. . . . .	61
5.7	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe estreito. . . . .	62
5.8	Exemplo de cenário com distribuição aleatória com 36 nós. . . . .	63
5.9	Utilização em cenário com distribuição aleatória com 36 nós. . . . .	64
5.10	Utilização em cenário com distribuição aleatória com 81 nós. . . . .	66
5.11	Utilização em cenário com distribuição aleatória com 169 nós. . . . .	67
5.12	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando antena omnidirecional. . . . .	68
5.13	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo. . . . .	69
5.14	Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe estreito. . . . .	70
5.15	Rotas inalcançáveis em cenário com distribuição aleatória dos nós. . . . .	72
5.16	Valor médio otimizado da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando antenas omnidirecionais. . . . .	73

5.17	Valor médio otimizado da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo com 2 feixes. . . . .	73
A.1	Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 36 nós. . . . .	91
A.2	Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 81 nós. . . . .	92
A.3	Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 169 nós. . . . .	93

# Lista de Tabelas

4.1 Alcance de recepção por tipo de sistema de antenas. . . . .	38
---	----

# Lista de Acrônimos

AA :	<i>Adaptive Array;</i>
ACK :	<i>Acknowledgment;</i>
ACR :	<i>Adaptive Communication-Aware Routing Protocols Using Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths;</i>
ANL :	<i>Active Node List;</i>
AODV :	<i>Ad Hoc On-Demand Distance Vector;</i>
CSMA :	<i>Carrier Sense Multiple Access;</i>
CTS :	<i>Clear To Send;</i>
DBTMA :	<i>Dual Busy Tone Multiple Access;</i>
D-Listen :	<i>Directional listen;</i>
DMAC-DACA :	<i>Directional MAC with Deafness Avoidance and Collision Avoidance;</i>
DNT :	<i>Deaf Neighbors Table;</i>
DoA :	<i>Direction of Arrival;</i>
DOD :	<i>Diametrically Opposite Directional;</i>
DPA :	<i>Dynamic Phased Array;</i>
DRP :	<i>Directional Routing Protocol;</i>
DRT :	<i>Directional Routing Table;</i>
DSDV :	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector;</i>
DSR :	<i>Dynamic Source Routing;</i>
DV :	<i>Deafness Vector;</i>
EDNAV :	<i>Enhanced Directional Network Allocation Vector;</i>
ESPAR :	<i>Electronically Steerable Passive Array Radiator;</i>
FAMA :	<i>Floor Acquisition Multiple Access;</i>

FD :	Sistema de antena direcional de feixe direcionado;
FFZ :	<i>Fixed Forbidden Zone;</i>
FSR :	<i>Fisheye State Routing;</i>
GLST :	<i>Global Link-State Table;</i>
GLS :	<i>Geographical Location Service;</i>
GPS :	<i>Global Positioning System;</i>
HSLs :	<i>Hazy Sighted Link-States;</i>
HRMA :	<i>Hop Reservation Multiple Access;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IMU :	<i>Inertial Management Unit;</i>
LMA :	<i>Location and Mobility Aware MAC;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
MACA :	<i>Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
MACAW :	<i>MACA for Wireless LANs;</i>
MDA :	<i>MAC Protocol for Directional Antenna;</i>
MPR :	<i>Multipoint relays;</i>
ND :	Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó;
NDD :	Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais;
NDO :	Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais;
OLSR :	<i>Optimized Link State Routing;</i>
PDS :	Processador Digital de Sinais;
RERR :	<i>Route Error;</i>
RI-BTMA :	<i>Receiver-Initiated Busy-Tone Multiple Access;</i>
RREQ :	<i>Route Request;</i>
RREP :	<i>Route Reply;</i>
RTS :	<i>Request To Send;</i>
SB :	<i>Switched Beam Antenna System ;</i>
SFZ :	<i>Shifted Forbidden Zone;</i>

- SPF : *Shortest Path First;*
- SPF-MP : *Shortest Path First - Multi-Path;*
- ToneDMAC : *Tone-Based Directional MAC;*
- UDAAN : *Utilizing Directional Antennas for Ad Hoc Networking;*
- USB : *Universal Serial Bus;*
- ZD : Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona;
- ZDD : Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais;
- ZDO : Algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais.

# Capítulo 1

## Introdução

A UTILIZAÇÃO de redes *ad hoc* tem crescido bastante nos últimos anos, possuindo atualmente aplicações tão diferenciadas como redes em malha sem fio [1, 2, 3, 4] e redes veiculares [5, 6]. Redes *ad hoc* sem fio são definidas por Rubinstein *et al.* [7] como uma coleção de nós sem fio que podem auto-organizar-se dinamicamente em uma topologia temporária e arbitrária para formar uma rede sem necessariamente usar qualquer infra-estrutura preexistente. A comunicação entre cada um desses nós com qualquer um dos outros pode ocorrer diretamente ou por meio de nós intermediários, no caso dos nós não estarem diretamente conectados [8]. O custo das redes *ad hoc* é reduzido e a implementação e a reconfiguração destas redes são rápidas e fáceis devido à ausência de infra-estrutura cabeada [9]. Essas redes são robustas, podendo operar em ambientes de guerra e em locais afetados por desastres naturais [10]. Cada um dos nós dessas redes funciona como um roteador e dispõe de um transceptor e de uma antena ou sistema de antenas [11]. Uma rede *ad hoc* sem fio pode ser construída para uso tático em aplicações militares. Os nós, elementos dessa rede tática militar, podem ser meios de combates tripulados ou não. Podem ser veículos aéreos ou terrestres, meios navais ou combatentes individuais portando dispositivos portáteis, que podem ser transportados na mão, ou portáteis, que são transportados normalmente nas costas [12]. Experimentos de campo foram anteriormente realizados utilizando redes sem fio em ambiente militar hostil [13, 14]. As

Figuras 1.1 <sup>1</sup> e 1.2 <sup>2</sup> ilustram o uso militar pelas Forças Armadas dos Estados Unidos da América de redes sem fio em ambiente hostil na região do oceano Pacífico. Na Figura 1.1,



Figura 1.1: Exemplo de uso militar de antena omnidirecional em rede sem fio.

o nó da rede sem fio é um veículo aéreo não tripulado com uma carga útil instalada que utiliza antenas omnidirecionais. Na Figura 1.2 o nó utiliza antenas direcionais. Dentre os principais cenários de aplicação das redes *ad hoc* estão as operações militares em campos de batalha e as redes de salvamento em caso de catástrofes [15, 16]. Ainda persistem desafios no aproveitamento das características das redes *ad hoc*. Dentre esses desafios está a necessidade de melhor aproveitar a banda passante disponível e o espectro de frequências, que são limitados. Portanto, o reaproveitamento espacial é importante, e para melhorá-lo são necessários algoritmos de controle de acesso ao meio e de roteamento mais sofisticados, bem como é necessária a utilização de sistemas de antenas direcionais que permitam aumentar o reuso espacial.



Figura 1.2: Exemplo de uso militar de antena direcional em rede sem fio.

---

<sup>1</sup>Reprodução de [14].

<sup>2</sup>Reprodução de [14].

## 1.1 Motivação

A maioria dos protocolos existentes de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) para redes *ad hoc*, incluindo o IEEE 802.11 [17], assumem a utilização de antenas omnidirecionais por todos os nós [18]. Usando a transmissão omnidirecional, o desempenho da rede é limitado [19]. Devido à radiação omnidirecional, há distribuição de energia em todas as direções de um plano, incluindo direções diferentes da direção que se deseja transmitir [20] e, portanto, não há um adequado reuso espacial, ocorrendo desperdício de energia em direções diferentes da desejada [9]. São geradas interferências em outros nós e não é aproveitada toda a capacidade agregada da rede [21]. Com a utilização de transmissão direcional, o feixe de transmissão é mais estreito, aumentando o alcance de transmissão e o reuso espacial [22] devido à concentração de energia na direção da transmissão [23]. Além disso, há redução na interferência [24], melhorando a relação sinal-ruído e a capacidade agregada da rede [25].

Outra forma de aumentar a capacidade de uma rede *ad hoc* é a utilização de múltiplos caminhos ou de múltiplas rotas. A maioria dos protocolos de roteamento *ad hoc* utiliza roteamento de caminho único [26]. A utilização de roteamento com múltiplos caminhos entre um nó origem e um nó destino melhora o desempenho da rede devido ao balanceamento de tráfego entre os vários caminhos escolhidos [27]. Assim, o efeito das perdas de enlaces é reduzido e pode ocorrer diminuição no congestionamento da rede e no atraso fim-a-fim [26].

Entretanto, não basta ter múltiplos caminhos. O ideal é que os múltiplos caminhos compartilhem o mínimo de recursos - nós e enlaces, ou esses caminhos não serão tão vantajosos. O problema de obter bons algoritmos que tentem encontrar caminhos maximamente disjuntos encontra-se em aberto. No caso de redes sem fio, o problema é mais interessante pois, além da noção de nó e de enlaces, como os enlaces são de rádio, há o problema da interferência - que em última instância faz com que um caminho reduza a capacidade do outro. Nesse contexto, utilizar antenas direcionais pode reduzir a interferência entre caminhos, porém, devem ser criados algoritmos que construam múltiplos caminhos específicos para antenas direcionais. O objetivo desta dissertação é analisar os dois tipos principais de algoritmos que usam múltiplos caminhos e sistemas de antenas

direcionais nesse contexto.

## 1.2 Trabalhos relacionados

Protocolos de roteamento que constroem múltiplos caminhos geram múltiplas rotas entre um nó origem e um nó destino, podendo ocorrer nós intermediários em comum entre rotas. Caso o protocolo de roteamento não tenha nós intermediários em comum, ele é dito protocolo que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó. Além disso, caso o protocolo utilize rotas que não tenham interferência entre si, ele é dito disjunto por zona.

O emprego de protocolos de roteamento que combinam múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho total da rede porque melhora a capacidade agregada da rede. Entretanto, podem existir interferências entre os caminhos disjuntos por nó, reduzindo a capacidade total obtida. Alguns algoritmos que utilizam caminhos disjuntos por nó tentam minimizar o efeito das interferências, entretanto não eliminam esse efeito completamente [28].

Outros tipos de algoritmos, os que constroem múltiplos caminhos parcialmente disjuntos por zona e utilizam sistemas de antenas direcionais, solucionam em parte o problema de interferência entre caminhos disjuntos [29]. Entretanto, esse problema não é totalmente solucionado pois ainda podem ocorrer interferências entre as rotas.

Os algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais, não permitem interferência entre caminhos disjuntos e aproveitam melhor as vantagens dos sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos, embora o tempo total de processamento seja maior devido à necessidade de calcular se os feixes de transmissão de outras rotas disjuntas por zona interferem na comunicação de dados de uma outra rota disjunta por zona.

Uma análise de algoritmo de roteamento que utiliza múltiplos caminhos disjuntos por nó e de algoritmo de roteamento que utiliza múltiplos caminhos parcialmente disjuntos por zona foi realizada por Roy *et al.* [27]. Entretanto, essa análise foi muito limitada pois foram analisados somente alguns pares de rotas parcialmente disjuntas por zona ou

disjuntas por zona, em nós que utilizam antena direcional com seis feixes, comparando esses pares com rotas disjuntas por nó nos mesmos nós, utilizando antenas omnidirecionais, em uma configuração de cenário, quantidade máxima de saltos e escolha dos pares de nós deveras restritiva. Nesta dissertação, é realizada uma análise mais ampla, quando comparamos os diferentes tipos de algoritmos entre si em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas.

### 1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona. Diferentemente dos trabalhos anteriores [28, 29] que propõem algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó ou disjuntos por zona e de trabalhos que realizam análises limitadas [27], este trabalho implementa um novo simulador visando comparar um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD), um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD), um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) e um algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) entre si em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas. Nos algoritmos NDO e NDD as múltiplas rotas disjuntas obtidas são disjuntas por nó, logo não há nós intermediários em comum, excetuando-se o nó origem e o nó destino dessas rotas. Nos algoritmos ZDO e ZDD as múltiplas rotas disjuntas obtidas são disjuntas por zona, logo não há nós intermediários em comum, excetuando-se o nó origem e o nó destino dessas rotas, e os nós intermediários de uma rota não podem ser iluminados por feixes de transmissão em uso pelos nós intermediários de outra rota disjunta por zona. Nos algoritmos NDO e ZDO todos os nós utilizam antenas omnidirecionais. Nos algoritmos NDD e ZDD todos os nós utilizam sistemas de antenas direcionais com a mesma quantidade de feixes. A análise comprova a vantagem do emprego de algoritmo ZDD em comparação ao algoritmo NDD [30], embora o tempo total de processamento do algoritmo ZDD seja maior. Além disso, é comprovado que os algoritmos

ZDD e NDD têm melhor desempenho em um cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade comumente usado em análise de redes *ad hoc* com antenas direcionais [31, 32, 33, 34, 35, 36]. Nos cenários avaliados foi verificado também que a utilização de sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho da rede, sendo obtidos melhores resultados nos algoritmos ZDD e NDD em comparação com os algoritmos ZDO e NDO [30].

## 1.4 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte forma. No Capítulo 2 são apresentadas características de antenas, em particular características físicas de antenas omnidirecionais e de antenas direcionais. São apresentados também protocolos das camadas de controle de acesso ao meio e de roteamento que utilizam antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais. Em seguida, no Capítulo 3, os algoritmos de roteamento que visam a melhoria do balanceamento de rotas e do reuso espacial, com a utilização de múltiplos caminhos e antenas direcionais, são abordados. O estado da arte em algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas com sistemas de antenas direcionais é analisado, destacando os algoritmos que utilizam disjunção por nó ou disjunção por zona. O simulador implementado neste trabalho é apresentado no Capítulo 4. Tanto o algoritmo de rotas disjuntas por nó quanto o algoritmo de rotas disjuntas por zona são apresentados nesse capítulo. No Capítulo 5 são analisados os resultados de simulações. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre este trabalho e a direção dos trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Antenas

O CRESCIMENTO da utilização de redes *ad hoc* sem fio tem estimulado a pesquisa de maneiras diversas para melhorar o desempenho dessas redes. Um modo de aumentar a vazão agregada dessas redes, que a cada dia têm mais usuários, é empregar sistemas de antenas direcionais que podem permitir o aumento dessa vazão ao proporcionar um maior reuso espacial. Nos últimos anos, o estudo do uso de diversos tipos desses sistemas de antenas tem aumentado. Portanto, é necessário conhecer algumas características das antenas e de seus sistemas.

As Definições Padrões IEEE de Termos para Antenas [37] definem uma antena como parte de um sistema transmissor ou receptor que é projetado para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas. A energia eletromagnética é acoplada de um meio para outro através da antena [38, 39].

Uma antena é um dispositivo recíproco, linear e passivo. Devido a essa característica de reciprocidade, quando uma antena é utilizada para transmissão, assume-se implicitamente seu uso para recepção, a menos que seja especificado o contrário [40].

O padrão de radiação é a distribuição espacial de uma quantidade que caracteriza o campo eletromagnético gerado por uma antena [37]. Essa distribuição espacial pode ser expressa por meio de uma função matemática ou de uma representação gráfica [41].

Uma antena hipotética de baixa perda é definida como isotrópica quando ela irradia

com intensidade igual em todas as direções [42, 43, 44, 45]. O padrão de radiação dessa antena é esférico [46]. A Figura 2.1 <sup>3</sup> ilustra esse padrão de radiação, onde a antena isotrópica é representada por um ponto no centro da esfera e tem alcance de transmissão  $r$ . Esse tipo de antena ideal é utilizado somente para propósitos analíticos [48].

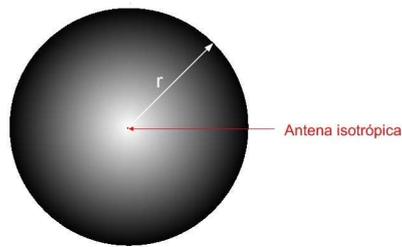


Figura 2.1: Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena isotrópica.

Um feixe é definido como o lóbulo principal do padrão de radiação de uma antena [37]. A largura do feixe, também denominada largura do feixe de meia potência, é definida como o ângulo entre as duas direções nas quais a intensidade de radiação é metade do valor máximo [47]. A Figura 2.2 <sup>4</sup> ilustra o lóbulo principal e a largura de feixe  $\alpha$  de uma antena direcional em um padrão de radiação plotado em potência, na escala de watts.

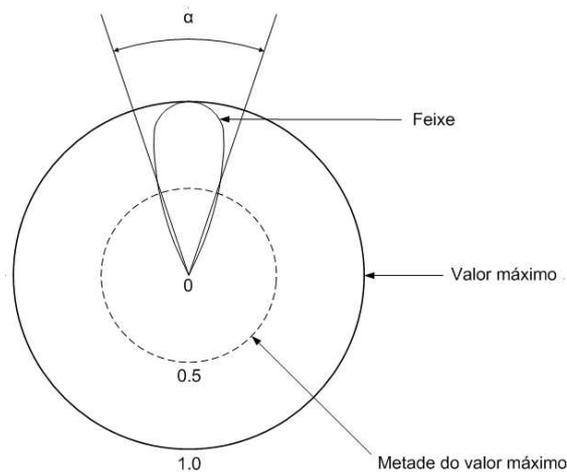


Figura 2.2: Exemplo da largura de feixe de antena direcional.

A razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média de todas as outras direções é denominada diretividade [37].

<sup>3</sup>Adaptação de [47].

<sup>4</sup>Adaptação de [47].

O ganho é a razão da intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação que deveria ser obtida se a potência aceita por uma antena fosse isotropicamente irradiada [47].

Nesse capítulo, são caracterizadas as antenas direcionais e os sistemas que empregam esse tipo de antena, utilizados em alguns dos algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos deste trabalho. Em primeiro lugar, são apresentadas algumas características das antenas omnidirecionais. Aspectos da camada física, protocolos da camada de controle de acesso ao meio (MAC) e protocolos de roteamento que assumem o uso desse tipo de antena são abordados.

## 2.1 Antenas omnidirecionais

Uma antena que tem um padrão de radiação essencialmente não direcional em um dado plano da antena e um padrão de radiação direcional em qualquer outro plano ortogonal é denominada antena omnidirecional [37].

A Figura 2.3<sup>5</sup> ilustra o padrão de radiação desse tipo de antena. Nessa figura, a antena está posicionada no centro do padrão de radiação. Pode ser observado nessa figura que o padrão é não direcional no plano do azimutal e direcional no plano elevação. Equivocadamente, vários autores consideram que antena omnidirecional e antena isotrópica são sinônimos. Nesse Capítulo foram apresentadas definições e padrões de radiação, ilustrados nas Figuras 2.1 e 2.3, que confirmam que essas antenas são de tipos diferentes.

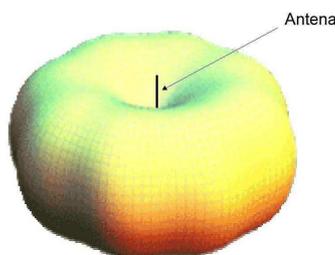


Figura 2.3: Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena omnidirecional.

---

<sup>5</sup>Reprodução de [49].

Algumas características das antenas omnidirecionais foram descritas no Capítulo 1. Utilizando esse tipo de antena, o nó é capaz de transmitir e receber em 360 graus ao redor dele próprio, em qualquer outro plano ortogonal a um dado plano da antena cujo padrão de radiação seja não direcional. A Figura 2.4<sup>6</sup> ilustra o padrão de radiação bidimensional de uma antena omnidirecional. Pode ser observado na Figura 2.4(b) que é circular a área ao redor do nó coberta pelo alcance de transmissão desse nó. Dessa maneira, todos os nós vizinhos a um par de nós que estão em comunicação, devem permanecer em silêncio enquanto a comunicação perdurar. Os nós vizinhos são aqueles que estão dentro do alcance de transmissão do par comunicante [7, 51].

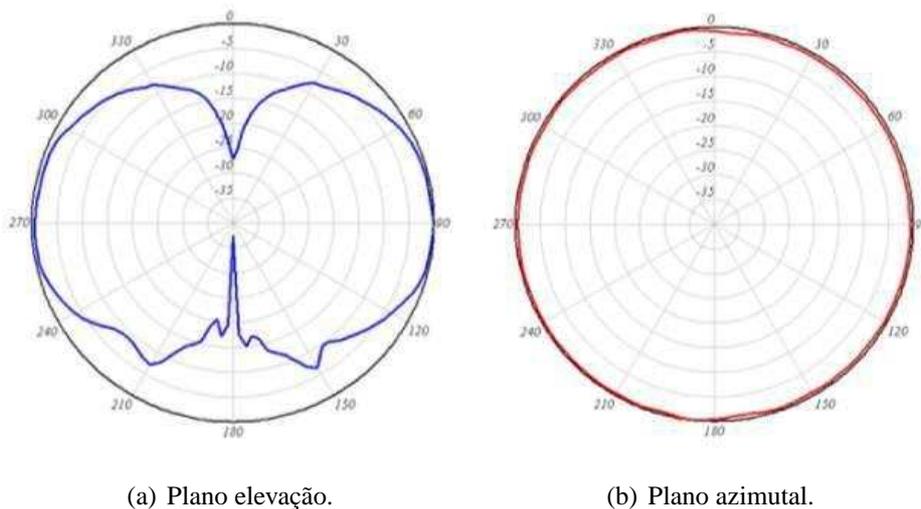


Figura 2.4: Exemplo de padrão de radiação bidimensional de antena omnidirecional.

### 2.1.1 Protocolos da camada de controle de acesso ao meio

Em acréscimo ao mais utilizado protocolo IEEE 802.11 [17], outros protocolos de controle de acesso ao meio para redes *ad hoc* utilizam antenas omnidirecionais. Dentre esses protocolos podemos citar os protocolos *Multiple Access with Collision Avoidance* (MACA) [52], *MACA for Wireless LANs* (MACAW) [53] e *Floor Acquisition Multiple Access* (FAMA) [54] que também utilizam um único canal para transmissão dos quadros de dados e de controle [7]. O MACA executa percepção virtual do meio através de procedimento de troca de pacotes de requisição para envio (*Request To Send* - RTS) e de

---

<sup>6</sup>Reprodução de [50].

livre para envio (*Clear To Send* - CTS), ao invés de executar percepção física de portadora. Uma estratégia de *backoff* exponencial binário é utilizada para solucionar colisões. O MACAW acrescenta o pacote de aviso de recebimento (*Acknowledgment* - ACK) no procedimento de troca de pacotes RTS-CTS do MACA, visando reconhecer mais rápido a perda de pacotes. Um esquema de *backoff* diferente é incluído para aumentar a justiça. Nesse novo esquema, de modo a reduzir a probabilidade de colisão e solucionar as colisões, caso elas ocorram, a transmissão do RTS é atrasada por um número aleatório de *slots*. Diferente do MACA, o FAMA utiliza tanto a percepção física como a percepção virtual do meio. O FAMA utiliza procedimento de troca de pacotes RTS-CTS e intervalos de tempo entre uma recepção e a próxima transmissão, para prevenir colisões no meio.

Os protocolos *Receiver-Initiated Busy-Tone Multiple Access* (RI-BTMA) [55], *Hop Reservation Multiple Access* (HRMA) [56], *Multi-Channel Carrier Sense Multiple Access* (Multi-Channel CSMA) [57] e *Dual Busy Tone Multiple Access* (DBTMA) [58] são exemplos de protocolos que utilizam antenas omnidirecionais e múltiplos canais [7]. O RI-BTMA divide a largura de banda em dois canais. O canal de dados é utilizado para transmissão de dados e o canal de tom é utilizado para envio de pacotes de controle. Um pacote preâmbulo e um pacote tom de ocupado são utilizados para reserva do meio. O HRMA divide a largura de banda em vários canais e utiliza salto de frequência para que um par de nós possa se comunicar sem interferência. Além do pacote de reserva de salto, são utilizados pacotes RTS e CTS. O Multi-Channel CSMA divide a largura de banda em vários canais não sobrepostos e seleciona aleatoriamente um canal livre. Um procedimento de detecção de canal livre e de reserva de canal livre é utilizado. O DBTMA divide a largura de banda em dois canais. Um sinal de tom de ocupado no transmissor é utilizado para proteger o RTS e um sinal de tom de ocupado no receptor protege os pacotes de dados.

## 2.1.2 Protocolos de roteamento

A maioria dos protocolos de roteamento existentes para redes *ad hoc* assumem a utilização de antenas omnidirecionais por todos os nós. Os protocolos de roteamento baseados em topologia pode ser classificados em proativos ou reativos [7].

O *Destination-Sequenced Distance-Vector* (DSDV) [59] e o *Optimized Link State Routing* (OLSR) [60, 61] são exemplos de protocolos proativos que utilizam antenas omnidirecionais. O DSDV é uma versão modificada do algoritmo Bellman-Ford para adequá-lo às redes *ad hoc*. A tabela de roteamento do DSDV é similar a do Bellman-Ford onde é inserido um número seqüencial na tabela de roteamento para evitar a criação de laços (*loops*). O OLSR é baseado em algoritmo de estado de enlace. Ele utiliza um mecanismo de descoberta de vizinhança baseado na troca periódica de pacotes de *hello* com seus vizinhos e um mecanismo eficiente de controle de inundação baseado em intermediários multipontos (*multipoint relays* - MPR).

O *Dynamic Source Routing* (DSR) [62] e o *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) [63] são exemplos de protocolos reativos mais largamente utilizados que empregam antenas omnidirecionais [64]. O DSR utiliza algoritmo de roteamento pela fonte e somente realiza descoberta de rota quando necessário. O nó origem determina a rota completa até o destino. A lista dos nós componentes da rota é inserida no cabeçalho de cada pacote, visando identificar o nó vizinho do próximo salto. Na descoberta de rota são utilizados pacotes de requisição de rota (*Route Request* - RREQ) e de resposta de rota (*Route Reply* - RREP). Na manutenção da rota é utilizado um pacote de erro de rota (*Route Error* - RERR). O AODV é baseado no algoritmo Bellman-Ford. Como no DSR, o AODV somente realiza descoberta de rota quando necessário. Entretanto, diferentemente do DSR, o AODV utiliza tabela de roteamento. Números seqüenciais são utilizados para verificar se as informações armazenadas na tabela são novas e para evitar laços.

### 2.1.3 Produtos

Atualmente, há diversas antenas omnidirecionais disponíveis no mercado para implementação de redes *ad hoc* sem fio. Essas antenas podem ser conectadas diretamente às estações ou ligadas às estações por meio de cabo e montadas em ambiente interno ou externo, como por exemplo teto de prédios. Há placas adaptadoras que contém antenas que são ligadas diretamente às estações. A Figura 2.5(a)<sup>7</sup> ilustra modelo dessa placa contendo antena omnidirecional.

---

<sup>7</sup>Reprodução de [65].

Antenas omnidirecionais são montadas também em adaptadores USB (*Universal Serial Bus*). É apresentado na Figura 2.5(b) <sup>8</sup> um modelo de adaptador USB contendo esse tipo de antena.



(a) Placa adaptadora com antena omnidirecional.



(b) Adaptador USB com antena omnidirecional.

Figura 2.5: Exemplo de produtos <sup>8</sup> que utilizam antena omnidirecional.

## 2.2 Antenas direcionais

Antena direcional é aquela que tem a propriedade de irradiar ou receber ondas eletromagnéticas mais eficientemente em algumas direções que em outras [37]. A diretividade máxima dessa antena é significativamente maior do que a de uma antena dipolo de meia onda [41].

Foram descritas no Capítulo 1 algumas características das antenas direcionais. A Figura 2.6 <sup>9</sup> ilustra o padrão de radiação real desse tipo de antena. Pode ser observado nessa figura que o padrão é direcional, com o lóbulo principal tendo maior intensidade. Há também lóbulos laterais e traseiros de menor intensidade. As Figuras 2.7(a) <sup>10</sup> e 2.7(b) <sup>11</sup> ilustram o padrão de radiação bidimensional de uma antena direcional comercializada atualmente. Pode ser observado em ambas as figuras que o lóbulo principal tem largura de feixe estreito e intensidade superior aos diversos lóbulos laterais e traseiros.

A maioria do trabalhos que utilizam antenas direcionais em redes *ad hoc* sem fio não utiliza o padrão de radiação real das antenas. Modelos simplificados de radiação são

---

<sup>8</sup>Reprodução de [66].

<sup>9</sup>Reprodução de [49].

<sup>10</sup>Reprodução de [50].

<sup>11</sup>Reprodução de [50].

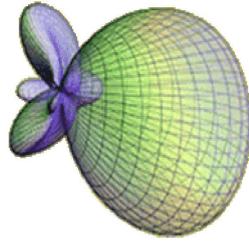
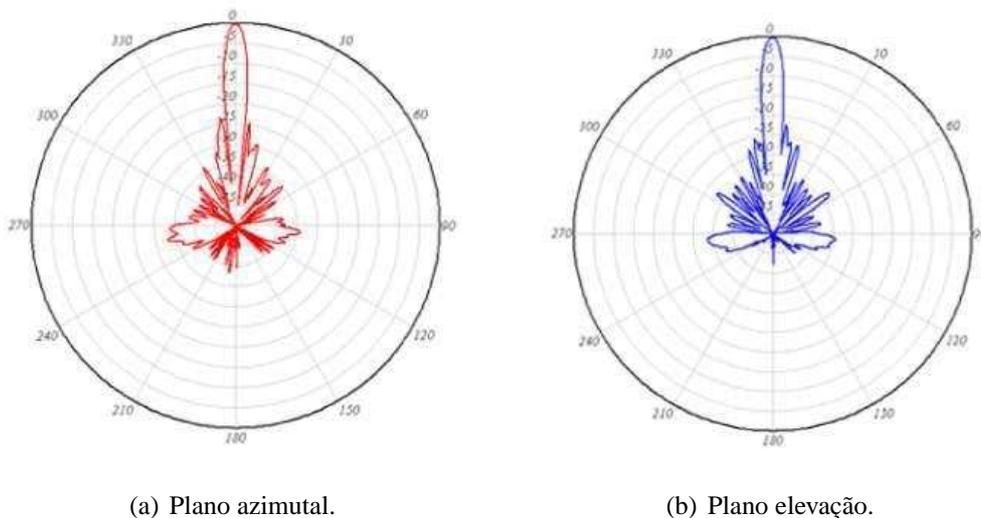


Figura 2.6: Exemplo de padrão de radiação tridimensional de antena direcional.

utilizados devido à dificuldade de modelar com precisão os complexos lóbulos principal, laterais e traseiros de uma antena real. Cone e Esfera [21] e Idealizado [67] são os modelos simplificados mais comuns de padrão de radiação de antenas direcionais utilizados em protocolos MAC [68].

No padrão de radiação Cone e Esfera, o lóbulo principal é um cone de ganho uniforme e o ganho dos lóbulos laterais e traseiros têm valor reduzido e são agregados em uma esfera com ganho constante, na base desse cone, conforme ilustrado na Figura 2.8 <sup>12</sup>. Dentre os trabalhos que utilizam esse padrão podemos citar Ramanathan [21], Choudhury e Vaidya [69], Choudhury *et al.* [70], Yi *et al.* [71], Choudhury e Vaidya [36], Choudhury e Vaidya [72] e Ramella [73].



(a) Plano azimutal.

(b) Plano elevação.

Figura 2.7: Exemplo de padrão de radiação bidimensional de antena direcional.

O padrão de radiação Idealizado é o modelo de padrão de radiação mais simplificado

<sup>12</sup>Adaptação de [21].

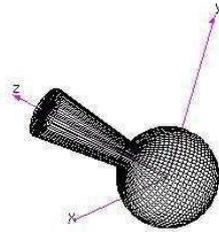


Figura 2.8: Exemplo de padrão de radiação cone e esfera de antena direcional.

e também o mais utilizado. Nesse modelo, todas as direções dentro da largura de feixe do lóbulo principal têm um ganho constante. Nenhuma potência é irradiada ou absorvida das outras direções, sendo desprezados os ganhos dos demais lóbulos [40, 67, 74], conforme ilustrado na Figura 2.9<sup>13</sup>. Exemplos de trabalhos que utilizam padrão de radiação Idealizado são Zander *et al.* [75], Nasipuri *et al.* [76], Nasipuri *et al.* [77], Huang *et al.* [78], Wieselthier *et al.* [67], Yi *et al.* [71], Korakis *et al.* [34], Kolar [51], Rocha [8], Carvalho e Garcia-Luna-Aceves [79] e Amorim e Rezende [80].

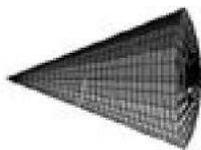


Figura 2.9: Exemplo de padrão de radiação idealizado de antena direcional.

Quando um par de nós está em comunicação, somente os vizinhos cobertos pelos feixes direcionais desses nós devem permanecer em silêncio enquanto a comunicação perdurar. Na maioria dos casos, para uma mesma potência de transmissão, quanto mais diretiva for a antena, mais estreita será a largura do seu feixe e maior será o alcance obtido na transmissão [81]. Desse modo, nós que estiverem fora do alcance de um nó que transmita omnidirecionalmente, podem ser alcançados em um salto por um nó transmitindo direcionalmente [51].

Em redes *ad hoc* uma única antena com feixe estreito direcional não consegue cobrir os 360 graus ao redor do próprio nó, de modo que seja possível estabelecer comunicações

---

<sup>13</sup>Adaptação de [8].

em todas as direções do plano azimutal [82]. Desse modo, faz-se necessário o uso de sistema de antenas direcionais que permitam direcionar o feixe de transmissão conforme necessário [82].

### **2.2.1 Sistemas de antenas direcionais**

Um sistema de antenas é uma combinação de uma antena ou grupo de antenas com elementos de circuito que são ativos, não lineares ou não recíprocos [37]. Os sistemas de antenas direcionais inteligentes são sistemas de antenas que utilizam antenas direcionais e normalmente são providos de um Processador Digital de Sinais (PDS), de modo que esses sistemas são capazes de direcionar um feixe de transmissão do sistema na direção do nó alvo [82, 83]. Os dois principais tipos de sistemas de antenas direcionais inteligentes, ou simplesmente sistema de antenas, são o feixe comutado (*Switched Beam Antenna System* - SB) e o feixe direcionado (*Steerable Beam Antenna System* - FD) [84]. Alguns autores [25, 48, 82, 83, 85] preferem denominar os sistemas de antenas de feixe direcionado como sistemas de antenas ou antenas Arranjo Adaptativo. Neste trabalho a segunda denominação é julgada imprecisa, sendo preferida a primeira classificação.

#### **2.2.1.1 Sistemas de antenas direcionais de feixe comutado**

Um sistema *Switched Beam* (SB), ou de feixe comutado, é um sistema de antenas que é capaz de comutar eletronicamente a direção do feixe que está transmitindo, dentre um conjunto finito de feixes [20]. Um sistema SB é composto por um conjunto finito de  $n_f$  feixes direcionais, onde cada feixe é apontado para uma direção fixa [86]. Cada um desses feixes ilumina um setor de largura de feixe  $2\pi/n_f$  radianos [87]. O formato do feixe depende do modelo de padrão de radiação. Ramanathan [21], Choudhury e Vaidya [69], Choudhury e Vaidya [72], Ramella [73] e Choudhury e Vaidya [36] são exemplos de trabalhos que utilizam padrão de radiação Cone e Esfera em sistemas SB. Nasipuri *et al.* [76], Nasipuri *et al.* [77] e Korakis *et al.* [34] são exemplos de trabalhos que utilizam padrão de radiação Idealizado com setor cônico. Dentre os trabalhos que utilizam padrão de radiação Idealizado com setor circular podemos citar Huang e Shen [33],

Rocha *et al.* [88], Huang *et al.* [78], Amorim e Rezende [80], Carvalho e Garcia-Luna-Aceves [79] e Rocha [8].

O sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) ilumina os 360 graus equivalentes a uma antena omnidirecional, cobrindo o plano azimutal por inteiro [36], conforme ilustra a Figura 2.10<sup>14</sup> para um sistema com 16 feixes.

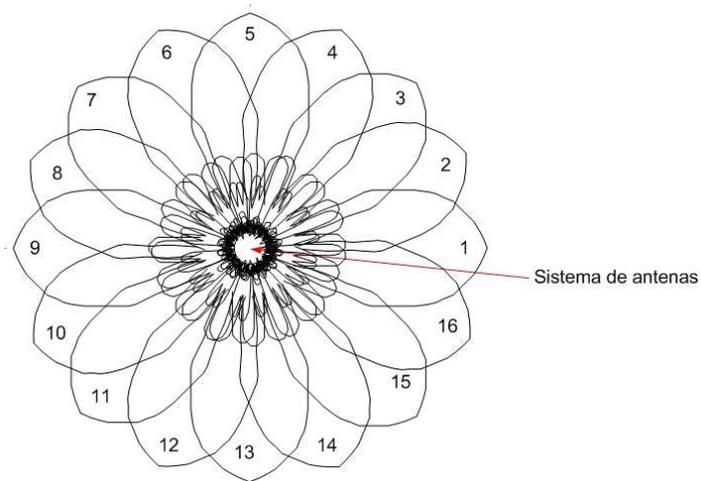


Figura 2.10: Exemplo de sistema de antenas direcionais de feixe comutado realístico.

Esse sistema detecta os sinais, escolhe o feixe onde a potência do sinal recebido é maior e migra eletronicamente para esse feixe [25]. A Figura 2.11(a)<sup>15</sup> ilustra a seleção do padrão de radiação de um feixe determinado desse tipo de sistema. É observado que o centro do feixe não está apontado para o centro da direção de chegada (*Direction of Arrival* - DoA) do sinal recebido do nó alvo e as interferências não são anuladas. Em cada instante somente um feixe é empregado para transmissão e recepção [85]. O sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) não é capaz de anular as interferências e os efeitos do multipercurso. Embora não rastreie continuamente o nó em movimento, esse sistema é mais barato e mais simples que o sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD) [9].

<sup>14</sup>Adaptação de [51, 83, 89].

<sup>15</sup>Adaptação de [25, 48, 83].

### 2.2.1.2 Sistemas de antena direcional de feixe direcionado

As Definições Padrões IEEE de Termos para Antenas [37] definem sistema de feixe direcionado (FD), ou *Steerable Beam*, como uma antena com uma abertura sem movimento para a qual a direção do lóbulo principal pode ser mudada eletronicamente, alterando a excitação da abertura, ou mecanicamente, movendo um alimentador da antena. Esse lóbulo principal (feixe) pode ser direcionado para qualquer direção [20]. Geralmente, este direcionamento é realizado por meio de técnicas que utilizam a direção de chegada do sinal recebido do nó alvo [25]. O sistema FD tem custo maior e é mais complexo que o sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) [21].

Os tipos de sistemas de antena direcional de feixe direcionado são classificados por Ramanathan [21] em Arranjo Faseado Dinâmico (*Dynamic Phased Array - DPA*) e Arranjo Adaptativo (*Adaptive Array - AA*). No sistema DPA os ganhos do sinal recebido do nó alvo são maximizados, entretanto, as interferências não são anuladas [21]. A Figura 2.11(b) <sup>16</sup> ilustra a seleção do padrão de radiação desse tipo de sistema. É observado que o centro do feixe está apontado para o centro da DoA do sinal recebido do nó alvo, mas os sinais interferentes não são anulados.

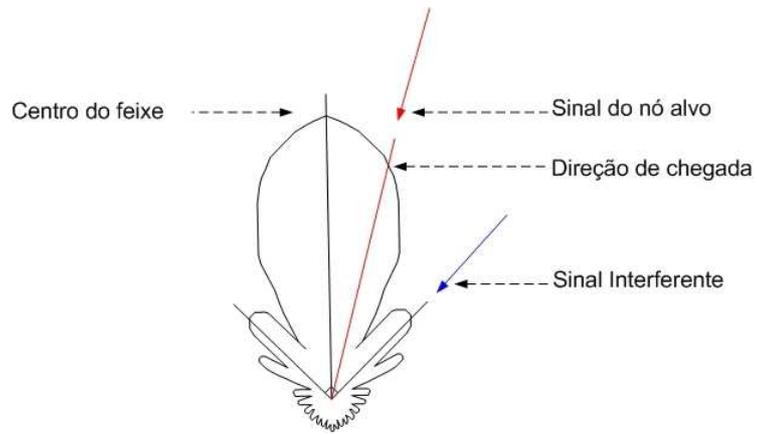
Um sistema de Antena Adaptativo é definido como um sistema de antena tendo elementos de circuito associados com seus elementos irradiadores de modo que uma ou mais das propriedades da antena são controladas pelo sinal recebido [37]. No sistema AA o padrão de radiação pode ser modificado para se ajustar ao ruído, à interferência e ao multipercurso [9]. O ganho na direção do alvo pode ser maximizado, melhorando o sinal recebido e transmitido, e a interferência pode ser reduzida ou anulada, ao produzir nulos na direção das fontes interferentes [48]. O padrão de radiação também pode ser ajustado para continuamente rastrear o nó alvo [20]. A Figura 2.11(c) <sup>17</sup> ilustra a seleção do padrão de radiação desse tipo de sistema. É observado que o centro do feixe está apontado para o centro da DoA do sinal recebido do nó alvo e os lóbulos laterais são modificados para reduzir ou anular os sinais interferentes. Dentre os vários trabalhos de pesquisa que utilizam sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD) podemos citar Takai *et al.* [74],

---

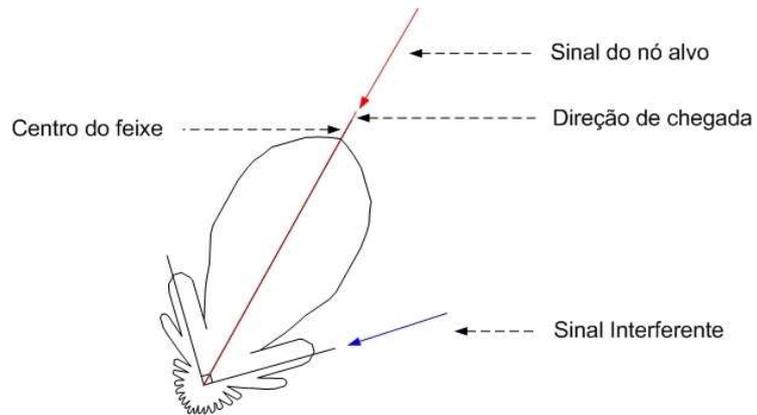
<sup>16</sup>Adaptação de [25, 48, 83].

<sup>17</sup>Adaptação de [25, 48, 83].

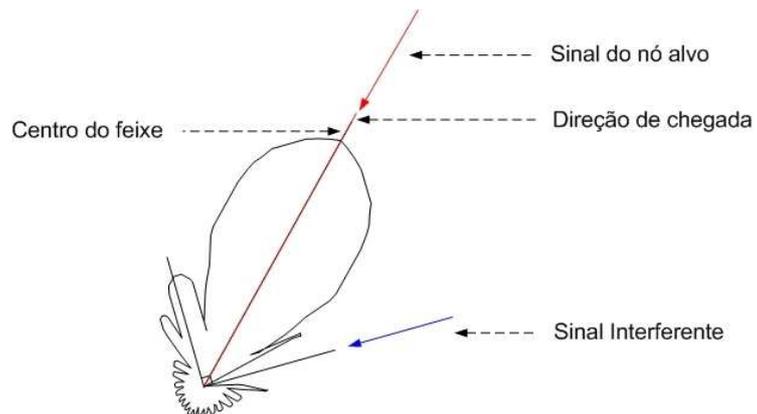
Ramella [82], Choudhury *et al.* [32], Ramanathan *et al.* [20] e Choudhury [89].



(a) Feixe comutado.



(b) Arranjo Faseado Dinâmico.



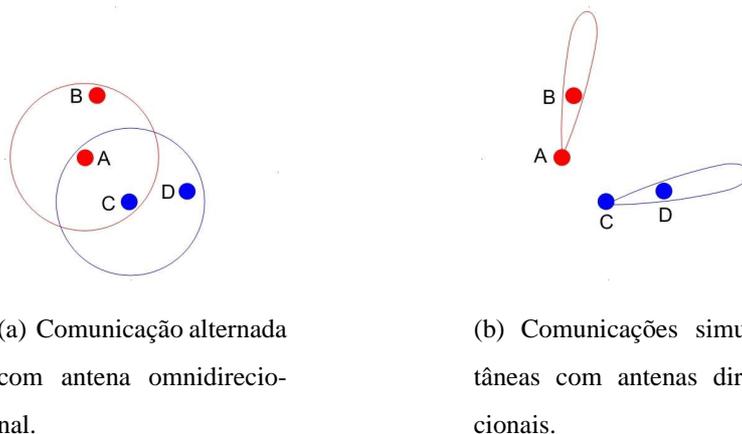
(c) Arranjo Adaptativo.

Figura 2.11: Exemplo de mudança de direção do feixe por tipo de sistema de antena direcional.

## 2.2.2 Vantagens da utilização de antenas direcionais

Vários benefícios são advindos do uso de sistemas de antenas direcionais em redes *ad hoc* devido às características das antenas direcionais descritas no Capítulo 1 e nesse capítulo.

O principal benefício é o aumento do reuso espacial, permitindo assim um aumento na quantidade de comunicações simultâneas em uma mesma área e um aumento da capacidade agregada da rede. A Figura 2.12(a) <sup>18</sup> apresenta uma rede *ad hoc* onde todos os nós utilizam antenas omnidirecionais. Necessitando *A* se comunicar com *B* e *C* com *D*, estas comunicações não podem ser simultâneas devido a *C* ser vizinho na área circular de *A*. Logo, quando *A* estiver transmitindo para *B*, *C* estará recebendo a transmissão e permanecerá impossibilitado de se comunicar com *D*. Entretanto, se todos os nós utilizarem antenas direcionais, como ilustrado na Figura 2.12(b) <sup>19</sup> para um sistema de antenas direcionais de feixe comutado com 16 feixes, os pares comunicantes *A – B* e *C – D* podem se comunicar ao mesmo tempo, pois os feixes direcionais de um par não interferem na comunicação do outro par. Nesse exemplo, *A* utiliza o feixe 4 e *B* o seu feixe 12 para se comunicarem, enquanto *C* utiliza seu feixe 1 e *D* o seu feixe 9. Convém observar que a comunicação de um par de nós não interfere na comunicação do outro par, permitindo as comunicações simultâneas e aumentando a capacidade agregada da rede.



(a) Comunicação alternada com antena omnidirecional.

(b) Comunicações simultâneas com antenas direcionais.

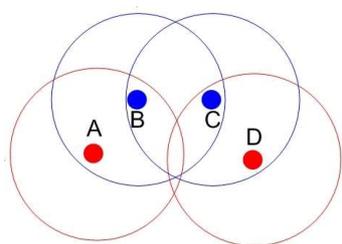
Figura 2.12: Exemplo de reuso espacial.

Outra grande benefício é o aumento do alcance de transmissão de um nó que utiliza

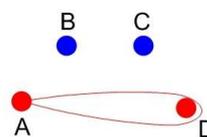
<sup>18</sup>Adaptação de [8].

<sup>19</sup>Adaptação de [8].

sistema de antenas direcionais, ao se comparar com um nó que utiliza a mesma potência irradiada por meio de uma antena omnidirecional. Com o aumento do alcance, nós mais distantes podem ser alcançados em um único salto, permitindo a diminuição da quantidade de saltos em rotas de múltiplos saltos. A Figura 2.13(a) <sup>20</sup> apresenta uma rede *ad hoc* onde o nó *A* necessita se comunicar com o nó *D*. Se todos os nós utilizam antenas omnidirecionais, a rota *A – B – C – D* terá 3 saltos. Caso seja utilizado sistema de antena direcional, a rota será *A – D*, sem nós intermediários, devido ao maior alcance do feixe direcional, conforme ilustrado na Figura 2.13(b) <sup>21</sup>.



(a) Comunicação múltiplos saltos com antena omnidirecional.



(b) Comunicação direta com antenas direcionais.

Figura 2.13: Exemplo de aumento do alcance de transmissão.

A redução no consumo de energia é outro benefício que pode ocorrer se houver um adequado controle de potência da transmissão [8], devido ao nó transmissor poder controlar a potência emitida em cada direção e utilizar diferentes níveis de potência para atingir nós alvos que estejam em diferentes alcances de transmissão.

### 2.2.3 Desafios na utilização de antenas direcionais

Apesar das grandes vantagens da utilização de sistemas de antenas direcionais em redes *ad hoc*, existem desafios para utilizar essas vantagens visando melhorar o desempenho de redes *ad hoc* sem fio.

Um desses desafios é a necessidade do nó saber a localização dos seus vizinhos e a direção do feixe [32, 51]. Ao se utilizar uma antena omnidirecional, são vizinhos de um

<sup>20</sup> Adaptação de [8].

<sup>21</sup> Adaptação de [8].

nó todos aqueles nós que estão dentro do alcance da sua área de transmissão circular. Todavia, quando são utilizadas antenas direcionais, é necessário distinguir os vizinhos para cada feixe direcional. Esse desafio é maior quando ocorre mobilidade dos nós, que não é o foco deste trabalho. Quando a localização dos nós é conhecida ou os nós são estacionários o desafio é mais facilmente solucionado. A Figura 2.14 <sup>22</sup> apresenta uma rede onde, utilizando antena omnidirecional, *A* necessita conhecer que *B* e *C* são seus vizinhos. Entretanto, ao empregar um sistema de antenas direcionais de feixe comutado com 16 feixes, *A* necessita conhecer que *B* e *D* são seus vizinhos pelo seu feixe 16 e que o nó *C* é seu vizinho pelo seu feixe 4.

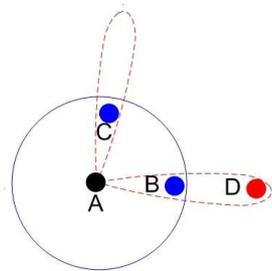


Figura 2.14: Localização de vizinhos com antenas direcionais.

Outro novo desafio é o terminal escondido devido não perceber pacotes de requisição para envio (RTS) e de livre para envio (CTS) [9, 32]. Esse novo desafio ocorre devido ao feixe direcional ter um ganho maior em uma direção específica e um ganho menor ou nulo nas outras direções. A Figura 2.15 <sup>23</sup> apresenta uma rede onde está havendo comunicação no par de nós *A – B*. O nó *C* desejando se comunicar com *D*, envia um RTS para *D*. O nó *D* responde com um CTS que não é escutado por *B*, que está em comunicação com *A* por outro feixe direcional. Desse modo, os pares *A – B* e *C – D* realizam comunicação. Após *B* concluir a comunicação com *A*, *B* deseja se comunicar com *E*. Nesse caso, o RTS enviado de *B* para *E* poderá interferir nos pacotes de dados enviados por *C* para *D*, ocasionando colisão em *D*.

O problema do terminal escondido devido à assimetria do ganho ocorre quando um nó utiliza antena omnidirecional e outro nó utiliza antena direcional [9, 32]. Esse novo desafio ocorre porque o feixe direcional tem um ganho maior que o ganho da antena

<sup>22</sup>Adaptação de [51].

<sup>23</sup>Adaptação de [9].

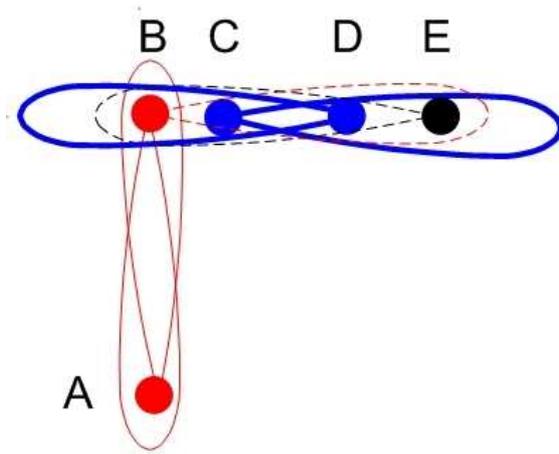


Figura 2.15: Terminal escondido devido não perceber RTS e CTS.

omnidirecional. A Figura 2.16<sup>24</sup> apresenta uma rede onde está havendo comunicação direcional no par de nós  $A - B$  e  $C$  está escutando omnidirecionalmente. Desse modo,  $C$  não percebe a comunicação que está ocorrendo. Quando  $C$  envia um pacote de requisição para envio (RTS) utilizando um feixe direcional de ganho bem maior que o ganho da antena direcional, desejando se comunicar com  $A$ , poderá interferir nos pacotes de dados enviado por  $A$  para  $B$ , ocasionando colisão em  $B$ .

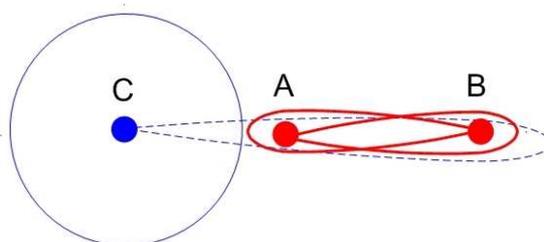


Figura 2.16: Terminal escondido devido ganho assimétrico.

A surdez é um fenômeno que ocorre quando um nó não escuta as comunicações oriundas de direções diferentes daquela em que esse nó está executando uma comunicação direcional [7, 9, 32]. Desse modo, o nó não é interferido por sinais provenientes de direções diferentes daquela para qual o seu feixe direcional está direcionado. A Figura 2.17<sup>25</sup> apresenta uma rede onde o par  $A - B$  está em comunicação. O nó  $B$  está surdo para direções diferentes da direção de  $A$ . Logo, quando  $C$  envia um pacote de requisição para

<sup>24</sup>Adaptação de [9].

<sup>25</sup>Adaptação de [9].

envio (RTS) desejando se comunicar com  $B$ ,  $B$  não escuta a requisição e não responde com um pacote de livre para envio (CTS). O nó  $C$  poderá então eventualmente aumentar sua janela de *backoff* e, repetidamente, enviar RTS e aumentar sua janela, até que a comunicação do par  $A - B$  seja concluída.

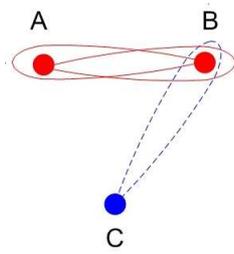


Figura 2.17: Surdez.

Uma área de silêncio ocorre quando nós são colocados em uma topologia em linha [8]. Essa área ocorre devido ao maior alcance do feixe direcional. A Figura 2.18<sup>26</sup> apresenta um cenário onde os pares  $A - B$  e  $E - F$  podem se comunicar utilizando antenas omnidirecionais. Entretanto, caso os nós  $A$  e  $F$  desejem se comunicar, utilizando feixe direcional, os nós intermediários  $B, C, D$  e  $E$  ficarão impossibilitados de se comunicar nas direções dos feixes anteriormente em comunicação. Caso esses pares desejem se comunicar utilizando antenas direcionais, as comunicações não poderão ocorrer simultaneamente, pois a transmissão de  $A$  para  $B$  poderá causar colisão em  $F$ , se  $E$  estiver transmitindo para  $F$ .

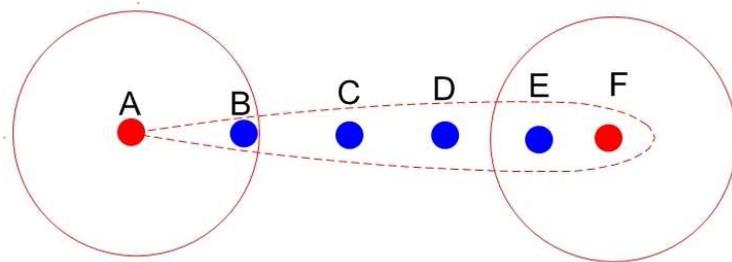


Figura 2.18: Comunicação em linha com antena direcional.

O uso de mecanismos de descoberta de rota omnidirecional é ineficaz quando se empregam antenas direcionais. Esses mecanismos não descobrem os nós vizinhos que estão no alcance de transmissão dessas antenas. Desse modo, não há redução do número de saltos com o uso dessas antenas.

<sup>26</sup>Adaptação de [8].

A difusão (*broadcast*) omnidirecional é ineficaz no roteamento quando se utiliza antenas direcionais. Há desperdício de potência na descoberta da rota e uso ineficiente do canal [9]. Pacotes de roteamento podem ser transmitidos em redundância e pode ocorrer sobrecarga desnecessária no roteamento.

## 2.2.4 Protocolos da camada de controle de acesso ao meio

Utilizar sistemas de antenas direcionais com protocolos MAC desenvolvidos para o uso de antenas omnidirecionais na camada física não permite o aproveitamento total das vantagens que esses sistemas têm [74]. Nos últimos anos várias pesquisas têm sido realizadas para desenvolver protocolos MAC que aproveitem as vantagens das antenas direcionais e solucionem algum dos desafios citados na Subseção 2.2.3.

O protocolo *Circular Directional RTS MAC* [34] propõe o uso de varredura (*sweeping*) para solucionar os desafios de localização de vizinhança, de surdez e do terminal escondido. O pacote de requisição para envio (RTS) é transmitido direcionalmente em todos os feixes do sistema de antenas direcionais, de modo que os vizinhos em todas as direções ao redor do nó emissor fiquem cientes da futura comunicação. Entretanto, há um aumento da quantidade de pacotes de controle no meio, devido a varredura circular.

O protocolo *MAC Protocol for Directional Antenna* (MDA) [90] propõe uma tabela de vizinhança direcional (*Directional Neighbor Table* - DNT) e um procedimento de transmissão de RTS e CTS Direcional Oposto Diametralmente (*Diametrically Opposite Directional* - DOD) para solucionar os desafios de localização de vizinhança, de surdez e do terminal escondido. Por meio do DOD, os pacotes são transmitidos somente para os feixes direcionais que têm vizinhos, diminuindo a quantidade de pacotes de controle na varredura. É implementado também um vetor de alocação de rede direcional aprimorado (*Enhanced Directional Network Allocation Vector* - EDNAV) para melhorar o reuso espacial.

O protocolo *Location and Mobility Aware MAC* (LMA) [91] propõe um mecanismo de escuta direcional (*directional listen* - D-Listen) para solucionar o desafio da surdez. Nesse protocolo é assumido que a localização de cada nó é obtida da camada de rede e

que os nós se movem com velocidade constante.

O uso de um novo mecanismo de varredura RTS/CTS, de uma tabela de vizinhos surdos (*Deaf Neighbors Table* - DNT), de um vetor surdez (*Deafness Vector* - DV) e de um mecanismo de prevenção de colisão (*Collision Avoidance* - CA) é proposto no protocolo *Directional MAC with Deafness Avoidance and Collision Avoidance* (DMAC-DACA) [92] para solucionar os desafios da surdez e dos terminais escondidos. Esse novo mecanismo de varredura evita que a varredura seja realizada nos feixes onde não é permitida a transmissão. Esse protocolo necessita de informações provenientes de dispositivo de sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* - GPS).

### 2.2.5 Protocolos de roteamento

Utilizar sistemas de antenas direcionais com protocolos de roteamento desenvolvidos para o uso de antenas omnidirecionais na camada física não permite o aproveitamento total das vantagens que esses sistemas têm. Nos últimos anos, várias pesquisas têm sido realizadas para desenvolver protocolos de roteamento que aproveitem essas vantagens.

O Protocolo *Adaptive Communication-Aware Routing Protocols Using Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths* (ACR) [29] é um exemplo de protocolo proativo que utiliza sistemas de antenas direcionais. Esse protocolo seleciona rotas de menor caminho zona-disjunta maximizadas, visando diminuir o efeito do acoplamento de rotas e garantir o balanceamento de carga.

O *Utilizing Directional Antennas for Ad Hoc Networking* (UDAAN) [20] é uma solução completa que emprega um protocolo proativo que utiliza sistemas de antenas direcionais. Essa solução propõe mecanismos de camada MAC e de roteamento para solucionar os desafios de localização de vizinhança e também solucionar os desafios de uso de mecanismos de descoberta de rota e difusão de pacotes de roteamento eficazes. Uma unidade de gerenciamento inercial (*Inertial Management Unit* - IMU) fornece a localização do próprio nó e, junto com o padrão tridimensional das antenas, fornece o ganho do sistema de antenas direcionais em cada direção. O protocolo MAC utiliza um novo procedimento de *backoff* e controla a potência emitida em cada direção. Um novo mecanismo

de descoberta de vizinhança direcional utiliza os métodos de descoberta informada e de descoberta cega. O algoritmo de roteamento do UDAAN é baseado no protocolo *Hazy Sighted Link-State* (HSLs) [93, 94]. O HSLs é um protocolo proativo, não hierárquico e escalável, baseado no protocolo *Fisheye State Routing* (FSR) [95].

O *Directional Routing Protocol* (DRP) [31, 90] é um exemplo de protocolo reativo que utiliza antenas direcionais e emprega o protocolo MDA, citado na Subseção 2.2.4, para solucionar os desafios da localização de vizinhança, da surdez e do terminal escondido. O DRP propõe uma interação de camadas cruzada entre as camadas MAC e de roteamento para solucionar os desafios de uso de mecanismos de descoberta de rota e difusão de pacotes de roteamento eficazes. Um novo mecanismo de descoberta de rota utiliza a tabela DNT, retransmitindo o pacote de requisição de rota (RREQ) somente nas direções diferentes daquelas em que o pacote foi recebido. A redifusão (*rebroadcast*) do RREQ ocorre inicialmente nos feixes que são diametralmente opostos ao feixe onde o nó recebeu o RREQ. É empregada uma tabela de roteamento direcional (*Directional Routing Table* - DRT) que armazena as identidades dos nós e dos respectivos feixes utilizados na rota a partir do nó origem. Um novo mecanismo de recuperação de rota direcional limita a zona na qual o RREQ é propagado.

## 2.2.6 Produtos

Nos últimos anos, antenas direcionais e sistemas de antenas direcionais foram implementados em plataformas de testes e experimentos de campo de redes *ad hoc* sem fio.

A empresa BBN Technologies [96] desenvolveu e implementou o UDAAN, que é uma solução completa que foi testada em experimento de campo com um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) para redes *ad hoc* sem fio. A Figura 2.19<sup>27</sup> ilustra o exemplo da utilização de um sistema de antenas direcionais de feixe comutado. No topo dos veículos há um sistema SB com quatro antenas direcionais, uma antena omnidirecional e um dispositivo GPS.

Dentre as empresas que oferecem sistemas FDs que podem ser utilizados em redes

---

<sup>27</sup>Reprodução de [20].



Figura 2.19: Exemplo de utilização de sistema de antenas direcionais de feixe comutado.

*ad hoc* sem fio, podemos citar a Fidelity Comtech [49], que além de sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD), fornece antenas e amplificadores. A Figura 2.20<sup>28</sup> ilustra o modelo de sistema FD vendido comercialmente.

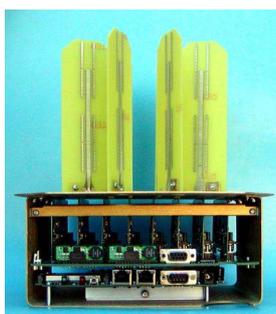


Figura 2.20: Exemplo de sistema de antena direcional de feixe direcionado vendido comercialmente.

A Figura 2.21<sup>29</sup> ilustra exemplo da utilização de sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD) em experimento de campo realizado por Timm *et al.* [97].

A corporação Advanced Telecommunications Research Institute International [98] desenvolveu um sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD) denominado Arranjo de Irradiadores Passivos Eletronicamente Dirigíveis (*Electronically Steerable Passive Array Radiator* - ESPAR) utilizado em plataformas de testes. A Figura 2.22<sup>30</sup> ilustra modelo desse sistema FD.

Foram apresentadas nesse capítulo características de antenas, abordando antenas omni-

---

<sup>28</sup>Reprodução de [49].

<sup>29</sup>Reprodução de [97].

<sup>30</sup>Reprodução de [89].



Figura 2.21: Exemplo de utilização de sistema de antena direcional de feixe direcionado vendido comercialmente.

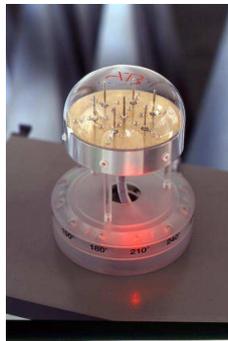


Figura 2.22: Exemplo de sistema de antena direcional de feixe direcionado utilizado em plataformas de testes.

direcionais e sistemas de antenas direcionais. Sistema de antenas direcionais de feixe comutado e de feixe direcionado foram destacados. O próximo capítulo analisará algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas com sistemas de antenas direcionais, destacando os algoritmos que utilizam disjunção por nó ou disjunção por zona.

## Capítulo 3

# Múltiplos caminhos disjuntos

O DESEMPENHO de uma rede *ad hoc* sem fio pode ser melhorado com a utilização de algoritmos de roteamento eficazes. Os algoritmos de roteamento determinam os melhores caminhos, também denominados rotas, que os pacotes percorrem entre os nós origem e destino. O roteamento envolve todos os nós de uma rede *ad hoc* sem fio, cujas interações por meio de protocolos de roteamento determinam as rotas que os pacotes devem seguir [11]. Pesquisas têm sido realizadas nos últimos anos visando melhorar o desempenho dessa rede por meio da utilização de algoritmos de roteamento que determinam múltiplos caminhos disjuntos e empregam antenas direcionais. Logo, é necessário conhecer características desses algoritmos.

Nesse trabalho serão apresentados algoritmos que realizam disjunção por nó, parcialmente por zona e por zona. A disjunção entre rotas é um fator importante em algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos porque diminui o efeito do acoplamento entre as rotas e pode promover o balanceamento da carga de uma rede [29]. O acoplamento entre rotas é a interferência mútua entre rotas existentes em redes sem fio devido à proximidade entre elas, restringindo a possibilidade de ocorrência de comunicação simultânea entre as diferentes rotas [29]. Ao invés de acoplamento, Abbas e Jain [28] preferem o termo correlação, que é definida como a quantidade de enlaces unindo dois caminhos nós-disjuntos. É vantajoso o nó origem conhecer mais de um caminho para o destino em redes *ad hoc*. Se um caminho falha, a comunicação pode prosseguir por um dos caminhos alternativos. O balanceamento da carga também pode evitar a concentração de carga so-

bre um conjunto de nós, reduzindo a possibilidade de depleção da energia de um conjunto de nós severamente utilizados [29]. Com a utilização de sistemas de antenas direcionais, a energia é concentrada somente na direção que se deseja transmitir. Desse modo, há menor acoplamento entre as rotas, devido a menor interferência mútua entre as rotas, maior alcance de transmissão de cada nó, maior número de comunicações simultâneas, melhor reuso espacial e maior capacidade agregada da rede [20, 26, 29, 82].

Nesse capítulo, algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas disjuntas parcialmente por zona e que empregam antenas direcionais são caracterizados. São descritos também algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas disjuntas por zona e que empregam esse tipo de antenas. Em primeiro lugar, são apresentadas características de roteamento que constroem múltiplas rotas disjuntas por nó e empregam antenas direcionais.

### 3.1 Disjunção por nó

Múltiplas rotas são definidas como rotas disjuntas por nó se e somente as várias rotas encontradas entre um nó origem e um nó destino não têm nós em comum, excetuando-se o nó origem e o nó destino. As rotas disjuntas por nó são denominadas rotas nós-disjuntas em Abbas e Jain [28]. Se caminhos descobertos entre um par de nós são disjuntos por nó, a frequência da descoberta de rota pode ser reduzida em protocolos reativos, e se múltiplos caminhos disjuntos por nó são usados simultaneamente para a transferência de dados entre um par de nós, a vazão pode ser aumentada [28]. Caso ocorra congestionamento nas filas de uma rota, o fluxo dos dados poderá ocorrer por outras rotas disjuntas por nó.

No cenário descrito na Figura 3.1<sup>31</sup>,  $O$  é o nó origem que deseja manter comunicação com  $D$  que é o nó destino. Sendo definido o custo, como o número de saltos entre os nós origem e destino, uma rota possível de menor custo é o caminho  $O - I_1 - I_2 - D$ . Outros caminhos possíveis de menor custo são  $O - I_3 - I_4 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$ . Excetuando-se o nó origem e o nó destino, os caminhos não têm nós em comum. Logo, essas rotas são disjuntas por nó. Desse modo, caso os três caminhos disjuntos por nó

---

<sup>31</sup> adaptação de [29].

sejam utilizados simultaneamente, ocorrerá balanceamento de carga. Entretanto, caso seja utilizada transmissão omnidirecional, poderá ocorrer interferência. Se for utilizada transmissão direcional, também poderá haver interferência, dependendo da geometria do cenário.

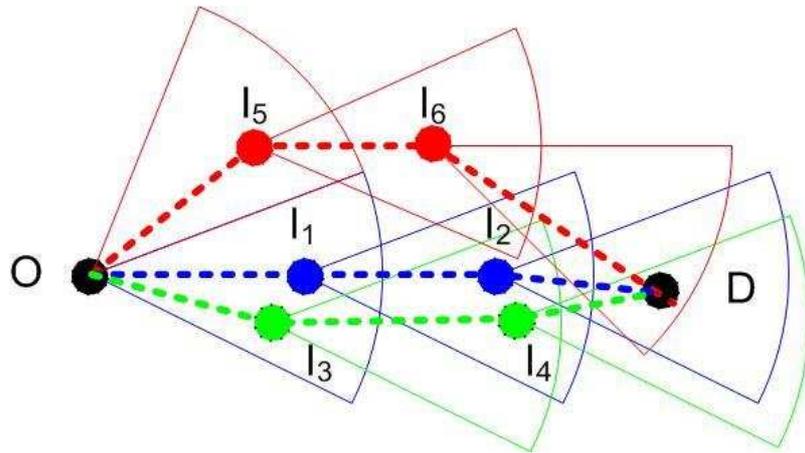


Figura 3.1: Exemplo de rotas disjuntas por nó.

### 3.1.1 Exemplos de algoritmos disjuntos por nó

*Fixed Forbidden Zone (FFZ)* [28] e *Shifted Forbidden Zone (SFZ)* [28] são exemplos de algoritmos que empregam roteamento com múltiplos caminhos disjuntos por nó. Esses algoritmos utilizam um sistema de antenas baseado no modelo de antena semi-direcional, onde há uma Zona de Transmissão (*Transmission Zone*) e uma Zona Proibida (*Forbidden Zone*), visando diminuir o acoplamento entre as duas rotas disjuntas por nó, por meio do distanciamento entre as rotas. A Zona Proibida ocupa os feixes centrais do semicírculo, por exemplo de 315 graus até 45 graus, enquanto a Zona de Transmissão ocupa dois trechos na extremidade do semicírculo, por exemplo de 270 graus até 315 graus e de 45 graus até 90 graus. No FFZ, a Zona Proibida para a transmissão é fixa, enquanto no SFZ essa Zona é deslocada. No SFZ, o nó origem e os seus vizinhos transmitem na Zona de Transmissão, similar ao que ocorre no FFZ. Entretanto, diferentemente do FFZ, os demais nós intermediários transmitem na Zona Proibida. A descoberta de rota em ambos os algoritmos é realizada por meio de inundação da rede, através de pacotes de requisição de rota (RREQ). Nessa descoberta de rota, são utilizados também um Serviço de Localização

Geográfica (*Geographical Location Service* - GLS) e informações provenientes de um dispositivo de sistema de posicionamento global (GPS).

## 3.2 Disjunção parcial por zona

Rotas parcialmente disjuntas por zona são definidas como rotas disjuntas por nó que são minimamente acopladas, onde a comunicação de dados de uma rota interfere minimamente na outra rota. As rotas parcialmente disjuntas por zona são denominadas rotas zonas-disjuntas por Ueda *et al.* [29].

No cenário descrito na Figura 3.2<sup>32</sup> as rotas  $O - I_1 - I_2 - D$ ,  $O - I_3 - I_4 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$  entre o nó origem  $O$  e o nó destino  $D$  são disjuntas por nó entre si. Todavia, as rotas  $O - I_1 - I_2 - D$  e  $O - I_3 - I_4 - D$  estão fisicamente muito próximas uma da outra, de modo que uma rota interfere na comunicação de dados da outra. Logo, há acoplamento entre essas duas rotas que são parcialmente disjuntas por zona.

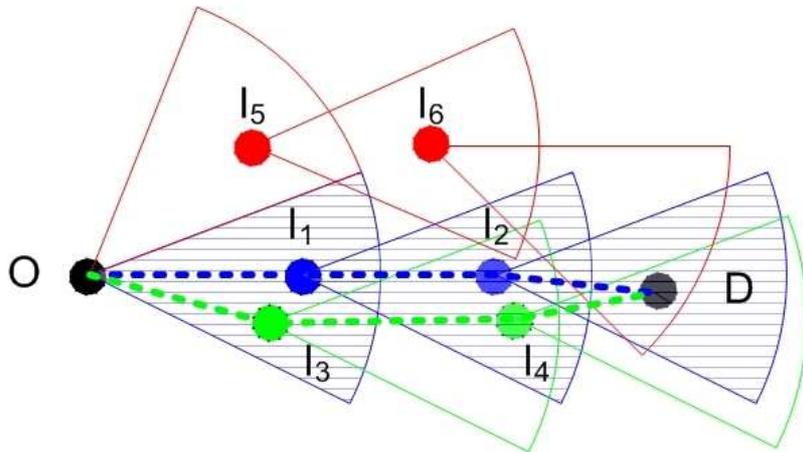


Figura 3.2: Exemplo de rotas parcialmente disjuntas por zona.

### 3.2.1 Exemplo de algoritmo disjunto por zona

O *Adaptive Communication-Aware Routing Protocols Using Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths* (ACR) [29] é um algoritmo de roteamento adaptativo que emprega rotas

<sup>32</sup>adaptação de [29].

parcialmente disjuntas por zona.

Em Ueda *et al.* [29] o algoritmo ACR foi utilizado com um sistema de antena direcional de feixe direcionado (FD) denominado Arranjo de Irradiadores Passivos Eletronicamente Dirigíveis ( *Electronically Steerable Passive Array Radiator* - ESPAR). A localização dos nós vizinhos é obtida pela coleta de pacotes de *beacon* periódicos. É utilizada uma Lista de Nós Ativos ( *Active Node List* - ANL) que armazena a percepção de um nó  $n$  sobre quais nós estão participando ativamente de uma comunicação em um intervalo de tempo. Uma Tabela de Estado de Enlace Global ( *Global Link-State Table* - GLST) armazena a percepção de um nó  $n$  sobre a topologia global da rede. Periodicamente, num intervalo de tempo  $T_A$ , cada nó difunde sua lista ANL. A partir da lista ANL recebida, cada nó forma sua tabela GLST. A lista ANL recebida serve também como *beacon*. Em um intervalo de tempo  $T_G$ , maior que  $T_A$ , a tabela GLST é difundida por cada nó. Ao receber a tabela GLST, cada nó atualiza sua própria tabela GLST. A partir da lista ANL e da tabela GLST, cada nó intermediário tenta selecionar a rota usando como métricas o fator de correlação do caminho e a contagem de saltos propagados. O custo do enlace é um soma de um peso de inicialização, de um fator de correlação e do produto de um fator peso pela contagem dos saltos propagados. Caso o fator de correlação seja nulo, a rota será disjunta por zona. Entretanto, o fator de correlação pode ter um valor diferente de zero. Nesse caso, a rota zona-disjunta não será disjunta por zona. Logo, embora objective diminuir o efeito do acoplamento de rotas, o algoritmo ACR não elimina esse efeito completamente nos casos em que o fator de correlação não é nulo.

### 3.3 Disjunção por zona

Múltiplas rotas são definidas como rotas disjuntas por zona se e somente se as várias rotas encontradas entre um nó origem e um nó destino empregam rotas totalmente disjuntas por zona. Essas rotas são também disjuntas por nó. Os nós intermediários  $n_{in}$  dessas rotas não podem ser iluminados por feixe de transmissão em uso pelos nós intermediários de outras rotas disjuntas por zona. A comunicação de dados de uma rota não interfere na comunicação de dados de outra rota disjunta por zona. O algoritmo de roteamento

usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) é um tipo de algoritmo que emprega rotas totalmente disjuntas por zona e aproveita melhor as vantagens disponibilizadas pelo uso de sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos.

As rotas  $O - I_1 - I_2 - D$ ,  $O - I_3 - I_4 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$ , entre o nó origem  $O$  e o nó destino  $D$ , visualizadas no cenário descrito na Figura 3.3<sup>33</sup> são disjuntas por nó entre si. Caso todos os nós desse cenário utilizassem antenas omnidirecionais, não existiriam as rotas disjuntas por nó  $O - I_3 - I_4 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$ , pois os nós intermediários  $I_3, I_4, I_5$  e  $I_6$  estão dentro do alcance de pelo menos um dos nós intermediários  $I_1$  e  $I_2$  da primeira rota obtida.

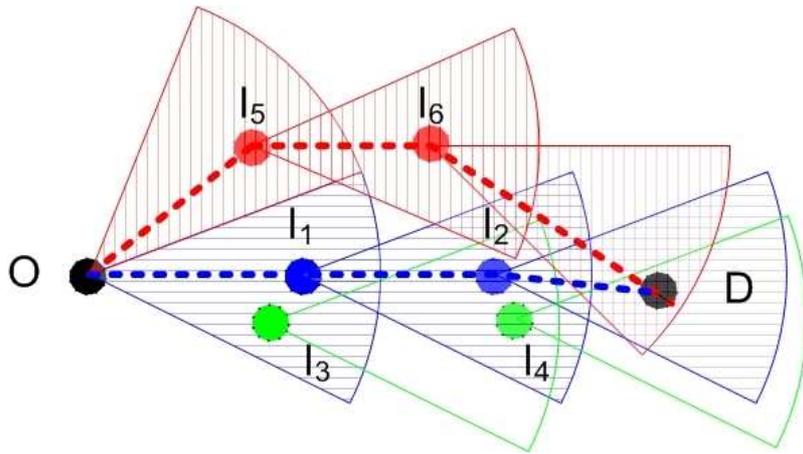


Figura 3.3: Exemplo de rotas disjuntas por zona.

Utilizando sistemas de antenas direcionais podemos observar que os nós intermediários ( $n_{in}$ )  $I_3$  e  $I_4$  são iluminados por feixe de transmissão em uso de  $n_{in}$  da rota  $O - I_1 - I_2 - D$ . Logo, a rota  $O - I_3 - I_4 - D$  não é disjunta por zona com a rota  $O - I_1 - I_2 - D$ . Entretanto, os  $n_{in}$  das rotas  $O - I_1 - I_2 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$  não são iluminados por feixe de transmissão em uso de  $n_{in}$  da outra rota. Logo, as rotas  $O - I_1 - I_2 - D$  e  $O - I_5 - I_6 - D$  são disjuntas por zona entre si.

Cabe salientar que rotas podem ser acopladas e disjuntas por nó se os nós utilizarem antena omnidirecional e desacopladas e disjuntas por zona se utilizarem sistemas de antenas direcionais. Rotas também podem ser disjuntas por nó, ter carga balanceada, mas

<sup>33</sup> adaptação de [29].

serem acopladas, implicando uma rota disjunta por nó interferir na outra e aumentar o atraso fim-a-fim. Em rotas de menor caminho, normalmente, o atraso fim-a-fim é menor. A utilização de caminhos múltiplos reduz o congestionamento e, em alguns cenários, reduz o atraso fim-a-fim [29].

### **3.4 Simulador**

Não havia na literatura pesquisada uma análise ampla comparando algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, em diferentes cenários e em diferentes configurações de feixes de antenas. O uso dos simuladores existentes não permitia uma análise exclusiva desses algoritmos de roteamento, sem a necessária independência das camadas física e MAC. Desse modo, um simulador foi desenvolvido para permitir uma análise exclusiva desses algoritmos de roteamento.

Foram apresentadas nesse capítulo características dos algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas disjuntas por nó, dos algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas parcialmente disjuntas por zona e dos algoritmos de roteamento que constroem múltiplas rotas disjuntas por zona, ambos empregando sistemas de antenas direcionais.

O próximo capítulo apresentará o simulador implementado que analisa algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona.

## Capítulo 4

# O Simulador implementado

Os simuladores existentes não permitem uma análise exclusiva dos algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e dos algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, independentemente das camadas física e MAC. Esses simuladores colocariam na análise variáveis da camada física e MAC que são indesejáveis para a análise dos algoritmos. Desse modo, para analisar esses algoritmos de roteamento que combinam múltiplas rotas e sistemas de antenas direcionais, foi implementado um simulador utilizando a linguagem de programação C++. Esse simulador implementado isola o problema das características das camadas física e MAC.

O simulador implementado modela um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB), conforme descrito no Capítulo 2, bem como permite a utilização de antenas omnidirecionais. É utilizado um padrão de radiação idealizado cujo formato do setor iluminado por cada um dos feixes é circular, como empregado em Huang e Shen [33], Rocha *et al.* [88], Huang *et al.* [78], Amorim e Rezende [80], Carvalho e Garcia-Luna-Aceves [79] e Rocha [8].

Os feixes desse sistema são numerados de 1 a  $n_f$  no sentido anti-horário, começando na posição horizontal de 3 horas, conforme ilustrado na Figura 4.1 para um sistema com 16 feixes.

Embora cada nó disponha de um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) com a mesma quantidade de feixes fixos, supõe-se que cada nó somente pode transmi-

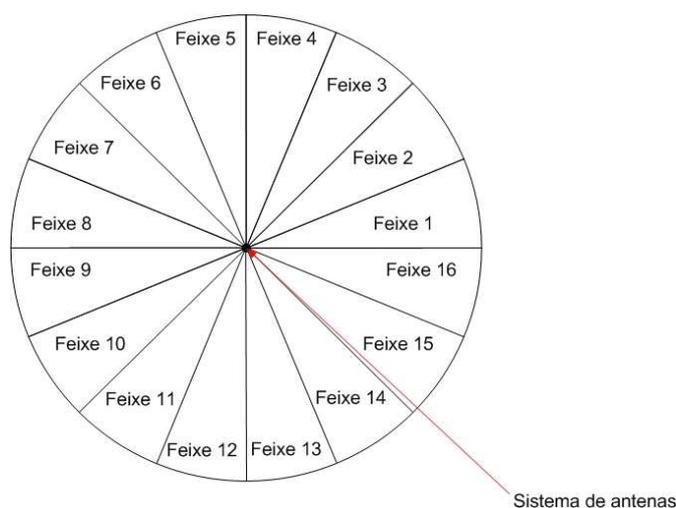


Figura 4.1: Exemplo de sistema de antenas direcionais de feixe comutado utilizado.

tir ou receber em uma única direção em um dado instante, pois só possui um transceptor [8, 76, 88].

Quantidade de feixes por sistema	Alcance de recepção
1 (omnidirecional)	250 m
2	297 m
4	353 m
8	420 m
16	500 m

Tabela 4.1: Alcance de recepção por tipo de sistema de antenas.

Como o sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) tem desempenho similar em redes *ad hoc* ao sistema de antenas direcionais de feixe dirigido (FD) [8, 21], o simulador pode ser facilmente utilizado com um sistema FD.

O modelo de transmissão utilizado foi o *Two-Ray Ground*, que simula a propagação no espaço livre, similar ao utilizado em Rocha [8] para distâncias maiores que uma distância de corte. Nesse modelo, a potência recebida pelo nó será uma combinação da transmissão direta e da reflexão no solo. Considerou-se neste trabalho que o alcance das comunicações utilizando antenas omnidirecionais é de 250 metros [8]. Esse valor é típico para o IEEE 802.11b na taxa de 2 Mbps [35, 70, 72, 99]. O alcance de recepção utilizado para cada sistema de antenas direcionais de feixe comutado, obtido de Rocha [8],

é apresentado na Tabela 4.1.

O algoritmo de Dijkstra de primeiro caminho mais curto (*Shortest Path First - SPF*) permite calcular o caminho mais curto entre um nó e todos os outros nós de uma rede [100]. Neste trabalho será utilizada uma adaptação da implementação do algoritmo SPF usada por Huitema [100], para a qual é definida a seguinte notação:

$n$ : quantidade de nós da rede.

$m$ : quantidade de enlaces da rede.

$n_o$ : nó origem.

$V$ : conjunto que contém todos os  $n$  nós da rede.

$C$ : conjunto dos nós para os quais o caminho mais curto é conhecido.

$R$ : conjunto dos nós restantes, para os quais o caminho mais curto é desconhecido.

$O$ : lista ordenada de caminhos.

$P$ : primeiro caminho da lista  $O$ . É o caminho mais curto entre o nó origem  $n_o$  e o nó  $n_u$ .

$n_u$ : último nó do caminho  $P$ .

O pseudocódigo Algoritmo 1, adaptado de Huitema [100], ilustra o funcionamento do algoritmo SPF para o cálculo do caminho mais curto do nó origem  $n_o$  para todos os demais nós da rede.

Para o algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF), inicialmente, inicialize o conjunto  $C$  para conter somente o nó origem  $n_o$ . Inicialize o conjunto  $R$  para conter todos os outros nós da rede. Logo, o conjunto  $R$  será formado pelo conjunto  $V$  excluído o nó  $n_o$ . Inicialize a lista  $O$  para conter os caminhos de 1 salto entre o nó origem  $n_o$  e os nós vizinhos ligados diretamente a ele, ordenados em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace. Inicialize os demais nós, que não são vizinhos do nó origem  $n_o$ , com custo do caminho igual a infinito. Enquanto a lista  $O$  e o conjunto  $R$  não forem vazios e o custo do caminho  $P$  não for infinito, remova o caminho  $P$  da lista  $O$ . Depois, verifique se  $n_u$  pertence ao conjunto  $C$ . Caso não pertença,  $P$  será o caminho mais curto a partir do nó origem  $n_o$  até o nó  $n_u$ . Mova então o nó  $n_u$  do conjunto  $R$  para o conjunto  $C$  e construa caminhos candidatos pela concatenação do caminho  $P$  aos enlaces a partir do nó  $n_u$ . Insira esses caminhos concatenados na lista  $O$ . Caso  $n_u$  pertença ao

---

---

**Algoritmo 1** ALGORITMO SPF EXECUTADO PELO NÓ  $n_o$ .

---

---

$C = \{n_o\};$   
 $R = V - \{n_o\};$   
 $O = \{\text{caminhos de 1 salto a partir de } n_o\};$   
enquanto (  $O \neq \emptyset$  e  $R \neq \emptyset$  e  $\text{Custo}(P) \neq \infty$  ) então  
    remova  $P$  de  $O$ ;  
    se (  $n_u \notin C$  ) então  
         $P$  é caminho mais curto de  $n_o$  até  $n_u$ ;  
        mova  $n_u$  de  $R$  para  $C$ ;  
        concatene  $P$  aos enlaces a partir de  $n_u$ ;  
        insira caminhos concatenados em  $O$ ;  
    fim do se  
fim do enquanto

---

conjunto  $C$ , a condição *se* é concluída. Quando o algoritmo SPF é concluído, é obtido o caminho mais curto do nó origem  $n_o$  para todos os demais nós da rede.

O número total de caminhos obtidos é igual ao número de enlaces  $m$  da rede e, conforme apresentado por Huitema [100], o algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) é equivalente a uma ordenação desses caminhos. Dessa maneira, conforme apresentado por Huitema [100], a complexidade computacional dessa implementação do algoritmo SPF será a complexidade computacional da construção de uma lista ordenada que é  $O(m \log m)$  [101], onde  $m$  é o número de enlaces da rede.

Já o algoritmo primeiro caminho mais curto - múltiplos caminhos (*Shortest Path First - Multi-Path* - SPF-MP) calcula os caminhos mais curtos entre um nó e todos os outros nós de uma rede. Conforme apresentado por Huitema [100], os caminhos mais curtos obtidos por meio do algoritmo SPF-MP entre um nó origem e um nó destino têm o mesmo custo.

Uma possibilidade de calcular todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes em uma rede que utiliza antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais seria utilizar o algoritmo de força bruta, de modo que ele conseguisse reconhecer o alcance de recepção de cada feixe de um sistema de antenas direcionais e

obtivesse todos os caminhos mais curtos entre um nó origem e um nó destino que não obrigatoriamente tivessem o mesmo custo. Entretanto, a complexidade computacional desse algoritmo é  $O(nn!)$ , onde  $n$  é o número de nós da rede, e ao implementar esta tentativa observou-se que o tempo de simulação era demasiado.

Utilizar o algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) ou o algoritmo primeiro caminho mais curto - múltiplos caminhos (SPF-MP) sem modificações para o cálculo de todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes, não seria viável. A solução para calcular todas as múltiplas rotas disjuntas por nó que podem ter custos diferentes foi utilizar o algoritmo SPF e executá-lo até a descoberta de uma rota entre o nó origem e o nó destino. Desse modo, o algoritmo SPF modificado não calcula todas as rotas entre o nó origem e todos os demais nós da rede. Após o cálculo dessa rota entre os nós origem e destino, o algoritmo primeiro caminho mais curto modificado é novamente executado com a exclusão dos nós intermediários do mapa da topologia, conforme será detalhado na Seção 4.1.

Cabe salientar que o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO), o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD), o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) não são novos algoritmos, sendo somente formalizações dos conceitos de algoritmos disjuntos por nó e disjuntos por zona que utilizam antenas direcionais existentes na literatura pesquisada, com adaptações para permitir uma comparação entre esses algoritmos em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas.

Nesse capítulo, o módulo do simulador implementado que analisa algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona será apresentado. Em primeiro lugar, é apresentado o módulo do simulador que analisa algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó.

## 4.1 Algoritmos usando múltiplas rotas disjuntas por nó

Visando diminuir o tempo para calcular múltiplos caminhos, foram implementados o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) baseados no algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF). O algoritmo SPF foi modificado de modo a considerar o alcance de recepção de cada feixe de um sistema de antenas direcionais, além do usual alcance de antena omnidirecional. Desse modo, cada nó armazena a informação do número identificador do nó vizinho e do número do feixe pelo qual ele é vizinho, similar ao utilizado em Gosain *et al.* [31]. Para a implementação dos algoritmos NDD e NDO é definida a seguinte notação:

$n_o$ : nó origem.

$n_d$ : nó destino.

$n_{in}$ : nós intermediários.

$r$ : rota com o caminho mais curto entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$ .

$r_{nd}$ : rotas disjuntas por nó.

$l_{nd}$ : lista de rotas disjuntas por nó. Armazena as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  que podem ter custo não obrigatoriamente igual.

SPF modificado: algoritmo SPF com modificação para considerar o alcance de recepção de antenas omnidirecionais e direcionais e parar ao obter uma rota entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ .

O pseudocódigo Algoritmo 2 ilustra o funcionamento do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) e do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) para o cálculo das múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$ , considerando o cálculo realizado pelo nó origem  $n_o$ .

Por hipótese, cada nó possui o mapa completo da topologia da rede e tem condições de calcular a menor rota na direção do nó destino  $n_d$ , executando o algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado. Inicialmente, inicialize a lista de rotas disjuntas

---

---

**Algoritmo 2** ALGORITMO DE DESCOBERTA DE MÚLTIPLAS ROTAS DISJUNTAS  
POR NÓ EXECUTADO PELO NÓ  $n_o$  (NDD OU NDO).

---

---

```
SPF modificado();
enquanto (existir  $r$  entre  $n_o$  e  $n_d$ ) então
     $r$  é uma rota disjunta por nó;
    armazena na  $l_{nd}(r)$ ;
    exclui da cópia do mapa da topologia os  $n_{in}$  das  $r_{nd}$  armazenadas na  $l_{nd}$ ;
    SPF modificado();
fim do enquanto
```

---

por nó  $l_{nd}$ , tornando-a vazia. Depois, inicialize as condições iniciais do algoritmo SPF modificado, inicializando o conjunto  $C$ , o conjunto  $R$ , a lista  $O$  e o custo dos demais nós, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 1 e observando para o cálculo dos vizinhos o alcance de recepção do tipo de sistema de antenas utilizado. Caso esteja calculando o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO), utilize o alcance de recepção de antenas omnidirecionais. Caso esteja calculando o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD), utilize o alcance de recepção de acordo com a quantidade de feixes do sistema de antenas, conforme apresentado na Tabela 4.1. Execute o algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 1, até a obtenção de rota entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ . Enquanto houver rota  $r$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ , essa rota será uma rota disjunta por nó de menor custo. Armazene essa rota disjunta por nó na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Exclua da cópia do mapa da topologia da rede, e do conjunto  $V$  do algoritmo SPF modificado, os nós intermediários  $n_{in}$  dessa rota. Execute novamente o algoritmo SPF modificado. Execute o laço (*loop*) enquanto houver rota  $r$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ . Quando o algoritmo NDO ou NDD é concluído, são obtidas as múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ . Essas múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  estarão armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , ordenadas em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace que é a menor quantidade de saltos. Caso haja rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  de mesmo

custo, elas serão ordenadas em ordem crescente de numeração dos nós na rota.

Cabe salientar que as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  calculadas entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$  não têm nós intermediários  $n_{in}$  em comum e que na execução do algoritmo SPF modificado o critério de desempate utilizado durante a formação de rota é o número mais baixo do identificador do nó.

A complexidade computacional dessa implementação do algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado é  $O(m \log m)$ , que é igual a complexidade computacional do algoritmo SPF apresentada por Huitema [100]. O número total de caminhos obtidos permanece igual ao número de enlaces  $m$  da rede e o algoritmo SPF modificado também é equivalente a uma ordenação desses caminhos. Dessa maneira, as modificações no algoritmo SPF para considerar o alcance de recepção de antenas omnidirecionais e direcionais e parar ao obter uma rota entre o nó  $n_o$  e o nó  $n_d$  não aumentam a complexidade computacional. Logo, a complexidade computacional dessa implementação do algoritmo SPF modificado será igual a complexidade computacional da construção de uma lista ordenada que é  $O(m \log m)$ , onde  $m$  é o número de enlaces da rede.

Podem ser necessárias, no pior caso, até  $(m-1)$  execuções do algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado para o cálculo do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) e do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD), onde  $m$  é o número de enlaces da rede. Como a complexidade do algoritmo SPF modificado é  $O(m \log m)$ , logo a complexidade dos algoritmos NDD e NDO é  $O(m^2 \log m)$ .

A Figura 4.2 apresenta um cenário em grade, com 36 nós igualmente espaçados em uma área de 1000 quilômetros quadrados. No cenário apresentado nessa figura, cada nó está separado lateralmente do seu primeiro vizinho por 200 metros e separado por 282,84 metros do seu primeiro vizinho na diagonal. Conforme apresentado na Tabela 4.1, o alcance de recepção é de 500 metros para um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) com 16 feixes. No exemplo apresentado nessa figura é desejado descobrir as múltiplas rotas disjuntas por nó entre o nó origem  $n_o$ , nó 1, e o nó destino  $n_d$ , nó 36, considerando que todos os nós utilizam um sistema SB com 16 feixes. Convém observar

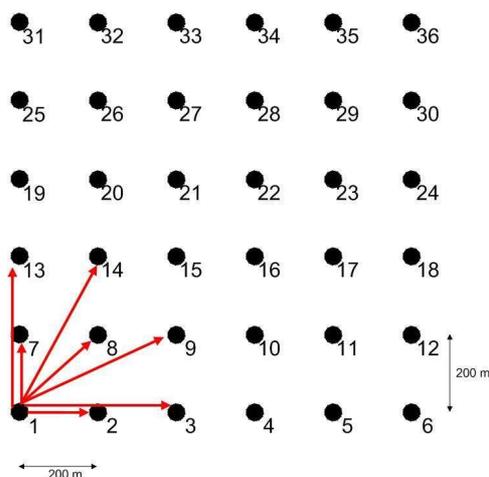


Figura 4.2: Exemplo de vizinhos de 1 salto.

que o número de vizinhos de um nó varia de acordo com a quantidade de feixes utilizados em um sistema de antenas direcionais de feixe comutado. Nessas condições de alcance de recepção do feixe direcional e de distância entre os nós, os vizinhos de 1 salto do nó 1 são os nós intermediários 2, 3, 7, 8, 9, 13 e 14. Logo, para o cálculo da primeira rota  $n_o-n_d$  os caminhos com 1 salto entre o nó origem  $n_o$  e os nós vizinhos ligados diretamente a ele, ordenados em ordem crescente de custo e em ordem crescente de numeração dos nós na rota, são 1 – 2, 1 – 3, 1 – 7, 1 – 8, 1 – 9, 1 – 13 e 1 – 14. Na inicialização, esses caminhos são armazenados na lista ordenada de caminhos  $O$  do algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado.

Os caminhos com dois saltos apresentados na Figura 4.3, formados a partir do caminho 1 – 2, são 1 – 2 – 3, 1 – 2 – 4, 1 – 2 – 7, 1 – 2 – 8, 1 – 2 – 9, 1 – 2 – 10, 1 – 2 – 13, 1 – 2 – 14 e 1 – 2 – 15.

Pode ser observado na Figura 4.4 que os nós 10 e 15 são vizinhos do nó 23 e que o nó 23 é vizinho do nó 36. Logo, as rotas 1 – 2 – 10 – 23 – 36 e 1 – 2 – 15 – 23 – 36 são rotas possíveis de mesmo custo, conforme apresentado nessa figura.

Entretanto, devido ao critério de desempate do algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) modificado utilizado durante a formação de rota ser o número mais baixo do identificador do nó, a rota 1 – 2 – 10 – 23 – 36 é a escolhida pelo simulador. As outras rotas disjuntas por nó obtidas nesse cenário seriam as rotas 1 – 3 – 11 – 24 – 36, 1 – 7 – 15 – 28 – 36, 1 – 8 – 16 – 29 – 36, 1 – 9 – 17 – 30 – 36, 1 – 13 – 21 – 34 – 36 e 1 – 14 – 22 – 35 – 36,

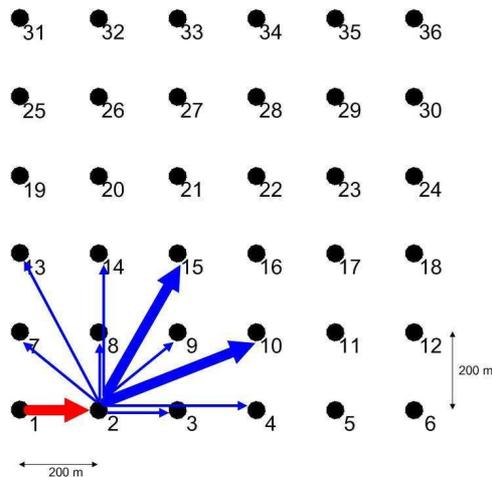


Figura 4.3: Exemplo de critério de desempate no segundo salto durante a formação de rota disjunta por nó.

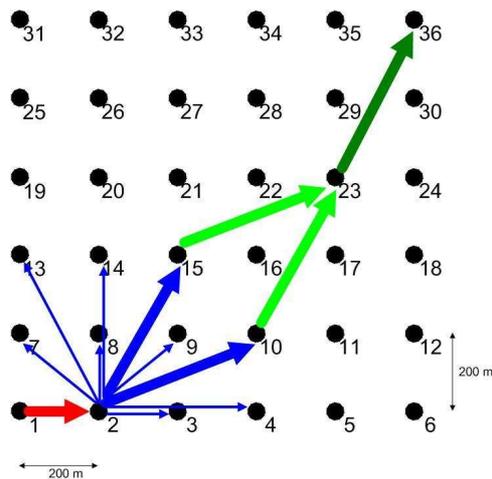


Figura 4.4: Exemplo de critério de desempate entre duas rotas durante a formação de rota disjunta por nó.

conforme ilustrado na Figura 4.5.

## 4.2 Algoritmos de rotas disjuntas por zona

O algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) são baseados, respectivamente, no algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de an-

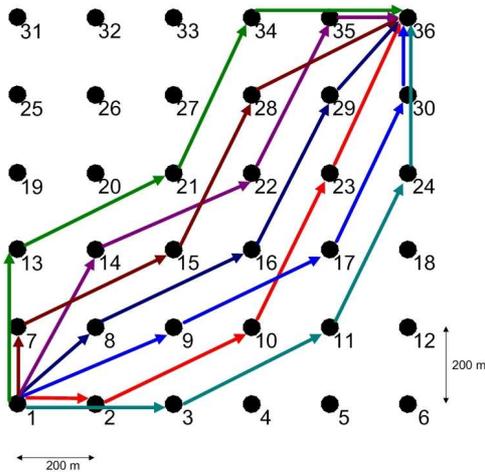


Figura 4.5: Exemplo de rotas disjuntas por nó.

tenas direcionais (NDD) e no algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO). Por meio do algoritmo NDD ou NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  são inicialmente obtidas e armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Dentre essas rotas  $r_{nd}$ , são selecionadas as múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$ . Para a implementação dos algoritmos ZDD e ZDO é definida a seguinte notação:

$n_o$ : nó origem.

$n_d$ : nó destino.

$n_{in}$ : nós intermediários.

$r$ : rota com o caminho mais curto entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$ .

$r_{nd}$ : rotas disjuntas por nó.

$r_{zd}$ : rotas disjuntas por zona.

$l_{nd}$ : lista de rotas disjuntas por nó. Armazena as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  que podem ter custo não obrigatoriamente igual.

$l_{zd}$ : lista de rotas disjuntas por zona. Armazena as rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  que podem ter custo não obrigatoriamente igual.

NDD: algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais.

NDO: algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais.

O pseudocódigo Algoritmo 3 ilustra o funcionamento do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) e do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) para o cálculo das múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$ , considerando o cálculo realizado pelo nó origem  $n_o$ .

---



---

**Algoritmo 3** ALGORITMO DE DESCOBERTA DE MÚLTIPLAS ROTAS DISJUNTAS POR ZONA EXECUTADO PELO NÓ  $n_o$  (ZDD OU ZDO).

---



---

NDD ou NDO();

enquanto (existir rota  $r$  na  $l_{nd}$ ) então

$r$  é uma rota disjunta por zona;

armazena na  $l_{zd}(r$  de menor custo e de menor identificador dos nós na rota);

exclui da  $l_{nd}(r$  de menor custo e de menor identificador dos nós na rota);

exclui da  $l_{nd}(r_{nd}$  cujos  $n_{in}$  são iluminados por feixe de transmissão em uso de nós das  $r_{zd}$ );

fim do enquanto

---

Por hipótese, cada nó possui o mapa completo da topologia da rede e tem condições de calcular as múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$ , executando o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) ou o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO), conforme o tipo de sistema de antenas utilizado. Inicialmente, inicialize a lista de rotas disjuntas por zona  $l_{zd}$ , tornando-a vazia. Depois, inicialize as condições iniciais do algoritmo NDD ou do algoritmo NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 2. Execute o algoritmo NDD ou o algoritmo NDO, conforme o tipo de sistema de antenas utilizado, seguindo o descrito no pseudocódigo Algoritmo 2, até que as múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  sejam obtidas e armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$  e não haja mais rota  $r$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ . Enquanto houver rota  $r$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$  na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , essa rota será uma rota disjunta por zona de menor custo e de menor identificador dos nós na rota. Armazene essa rota disjunta por zona na lista de rotas disjuntas por zona  $l_{zd}$ . Exclua essa rota disjunta por zona da

lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Verifique quais nós intermediários  $n_{in}$  de outras rotas são iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  de rotas disjuntas por zona. Exclua as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  que têm nós intermediários  $n_{in}$  iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  de rotas disjuntas por zona da lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Execute o laço (*loop*) enquanto houver rota  $r$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$  na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Quando o algoritmo ZDO ou ZDD é concluído, são obtidas as múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  entre o nó origem  $n_o$  e o nó destino  $n_d$ . Essas múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  estarão armazenadas na lista de rotas disjuntas por zona  $l_{zd}$ , ordenadas em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace que é a menor quantidade de saltos. Caso haja rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  de mesmo custo, elas serão ordenadas em ordem crescente de numeração dos nós na rota.

Cabe salientar que as rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  obtidas entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$  não têm nós intermediários  $n_{in}$  em comum e os nós  $n_{in}$  das rotas disjuntas por zona obtidas não são iluminados por feixes em uso de nós intermediários  $n_{in}$  de outras rotas disjuntas por zona. Logo, a comunicação de dados de uma rota não interfere na comunicação de dados de outra rota disjunta por zona.

Convém salientar que, na execução do algoritmo SPF modificado, o critério de desempate utilizado durante a formação de rota disjunta por nó é o número mais baixo do identificador do nó e que o critério utilizado à seleção de rota disjunta por zona, dentre as rotas disjuntas por nó armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , é a rota de menor custo e de menor identificador dos nós na rota.

A complexidade computacional do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) e do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) é  $O(m^2 \log m)$ , onde  $m$  é o número de enlaces da rede. A execução do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) e do algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO) consiste na seleção de rotas disjunta por zona, dentre as rotas disjuntas por nó armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Essa seleção, incluindo a verificação de quais rotas disjuntas por zona obtidas não são iluminadas por

feixes em uso de nós intermediários  $n_{in}$  de outras rotas disjuntas por zona, pode ser realizada por meio de processamento fora de linha (*offline*). Logo, a complexidade computacional dessa implementação do algoritmo ZDD e do algoritmo ZDO será igual a complexidade computacional do algoritmo NDD e do algoritmo NDO que é  $O(m^2 \log m)$ , onde  $m$  é o número de enlaces da rede. Entretanto, o tempo total de processamento dos algoritmos ZDD e ZDO é maior que esse mesmo tempo para os algoritmos NDD e NDO devido a necessidade de realizar o processamento fora de linha acima citado.

Na seção 4.1, foi apresentado um cenário em grade, com 36 nós igualmente espaçados em uma área de 1000 quilômetros quadrados, onde as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  foram obtidas entre o nó origem  $n_o$ , nó 1, e o nó destino  $n_d$ , nó 36 e todos os nós utilizavam um sistema de antenas direcionais de feixe comutado (SB) com 16 feixes. As 7 rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  obtidas e armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$  foram ordenadas em ordem crescente de custo, onde o custo do enlace é igual à métrica do enlace que é a menor quantidade de saltos, e em ordem crescente de numeração dos nós na rota. Conforme apresentado na Figura 4.5, essas 7 rotas  $r_{nd}$  têm o mesmo custo. Assim, as rotas 1 – 2 – 10 – 23 – 36, 1 – 3 – 11 – 24 – 36, 1 – 7 – 15 – 28 – 36, 1 – 8 – 16 – 29 – 36, 1 – 9 – 17 – 30 – 36, 1 – 13 – 21 – 34 – 36 e 1 – 14 – 22 – 35 – 36 são as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$  nessa ordem crescente de numeração dos nós na rota.

No exemplo apresentado na Figura 4.5 é desejado descobrir as múltiplas rotas disjuntas por zona entre o nó origem  $n_o$ , nó 1, e o nó destino  $n_d$ , nó 36, considerando que todos os nós utilizam um sistema SB com 16 feixes. Nessas condições, a rota disjunta por zona de menor custo e de menor identificador dos nós na rota, selecionada dentre as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , será a rota 1 – 2 – 10 – 23 – 36. Essa rota disjunta por zona será armazenada na lista de rotas disjuntas por zona  $l_{zd}$  e excluída da lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Nesse cenário em grade descrito, as rotas 1 – 3 – 11 – 24 – 36, 1 – 8 – 16 – 29 – 36 e 1 – 9 – 17 – 30 – 36 têm nós intermediários  $n_{in}$  iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  da rota 1 – 2 – 10 – 23 – 36, logo essas rotas não são disjuntas por zona e são excluídas da lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Dentre as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  que permanecem armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , a rota 1 – 7 – 15 – 28 – 36 será selecionada por não tem nós

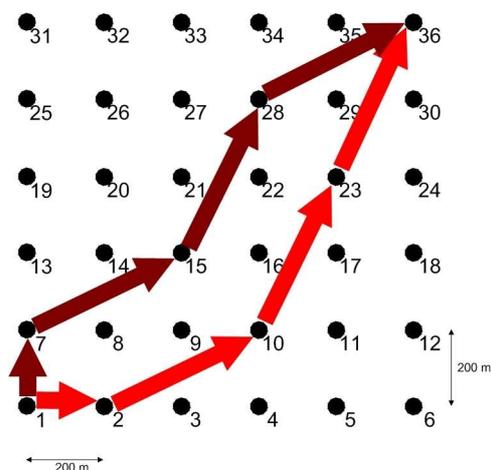


Figura 4.6: Exemplo de rotas disjuntas por zona em um cenário em grade.

intermediários  $n_{in}$  iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  da rota 1 – 2 – 10 – 23 – 36, ter o mesmo custo que as demais rotas restantes e ter o menor identificador dos nós na rota. Essa rota 1 – 7 – 15 – 28 – 36 é uma rota disjunta por zona e será armazenada na lista de rotas disjuntas por zona  $l_{zd}$  e excluída da lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Nessas condições atualizadas, as rotas 1 – 13 – 21 – 34 – 36 e 1 – 14 – 22 – 35 – 36 têm nós intermediários  $n_{in}$  iluminados por feixes em uso de nós  $n_{in}$  da rota 1 – 7 – 15 – 28 – 36, logo essas rotas não são disjuntas por zona e são excluídas da lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Como não há mais rotas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ , o algoritmo ZDD é concluído. A Figura 4.6 ilustra as rotas disjuntas por zona obtidas no cenário utilizado.

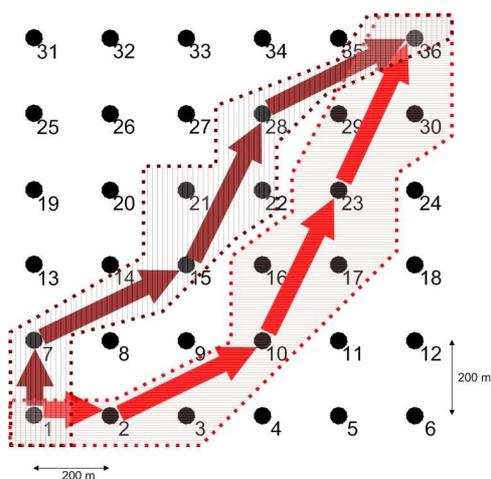


Figura 4.7: Exemplo de área iluminada por rotas disjuntas por zona em um cenário em grade.

Convém observar na Figura 4.7 as áreas iluminadas pelas duas rotas disjuntas por zona. Pode ser observado que os nós 4 a 6, 8, 9, 11 a 14, 18 a 20, 24 a 27 e 31 a 35 não são interferidos pelas rotas disjuntas por zona existentes, logo permanecem livres para novas comunicações.

Nesse capítulo foram apresentados o módulo do simulador implementado que analisa algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e o módulo do simulador implementado que analisa algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, ambos empregando antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais.

O próximo capítulo apresentará a análise dos resultados de simulações.

# Capítulo 5

## Simulações

VÁRIOS parâmetros influenciam o desempenho da distribuição do tráfego entre os nós da rede. Essa distribuição do tráfego pode ser analisada por meio de uma métrica denominada utilização dos nós intermediários. Neste trabalho essa análise é realizada utilizando algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, ambos empregando antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais. Essas análises são realizadas em cenário em grade e em cenário com distribuição aleatória dos nós.

O simulador implementado calcula múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  independentemente do tipo de cenário onde os nós estão distribuídos. Em cada simulação o tipo de antena utilizada por todos os nós é o mesmo. Todos os nós da rede devem utilizar antenas omnidirecionais ou sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes. A orientação dos feixes é mantida durante todo o tempo da simulação como ocorre em Amorim e Rezende [80], Nasipuri *et al.* [76], Gossain *et al.* [31], Ramella e Rezende [73], Cordeiro *et al.* [19], Choudhury e Vaidya [36], Huang e Shen [33] e Kolar [51].

É importante ressaltar que o tempo de simulação para obtenção das múltiplas rotas  $r_{nd}$  e das múltiplas rotas  $r_{zd}$  utilizando os algoritmos implementados baseados no algoritmo primeiro caminho mais curto (SPF) foi muito menor que o tempo de simulação para o cálculo dessas mesmas múltiplas rotas disjuntas utilizando o algoritmo força bruta. Tendo

sido realizada a obtenção de múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e de múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  entre um nó origem  $n_o$  e um nó destino  $n_d$  em um cenário em grade, contendo 100 nós, conforme ilustrado na Figura 5.1, foi observado que o tempo para a conclusão da simulação utilizando os algoritmos implementados baseados no algoritmo SPF foi da ordem de minutos e que o tempo para a conclusão da simulação utilizando algoritmos baseados no algoritmo força bruta foi da ordem de dias.

Nesse capítulo, são analisados os resultados das simulações que utilizam o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD), o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas omnidirecionais (ZDO), o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas omnidirecionais (NDO) implementados no cenário com distribuição aleatória dos nós e no cenário em grade. São analisados também os resultados de simulações desses diferentes algoritmos de roteamento, obtidos em uma versão otimizada do simulador. Em primeiro lugar, são apresentados os resultados desses algoritmos de roteamento no cenário em grade.

## 5.1 Resultados

Os diferentes tipos de algoritmos de roteamento implementados (NDD, NDO, ZDD e ZDO) foram avaliados por meio da métrica utilização dos nós intermediários. O objetivo desta medida foi analisar o emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona (ZD) em comparação ao emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó (ND). Os resultados apresentados nas Subseções 5.1.1 e 5.1.2 foram obtidos utilizando o simulador descrito no Capítulo 4. Os resultados apresentados na Subseção 5.1.3 utilizam uma versão otimizada do simulador descrito no Capítulo 4.

A métrica utilização dos nós intermediários é definida como razão entre a quantidade de vezes que um nó é utilizado como nó intermediário em rotas e a quantidade de rotas avaliadas. Essa métrica mede a probabilidade de uso de um nó da rede e fornece uma

medida de como o tráfego está distribuído na rede. Foi realizada a medida da utilização dos nós intermediários de múltiplas rotas disjuntas  $r_d$ , sendo desconsideradas as rotas diretas entre um nó origem e um nó destino, onde não havia nós intermediários. Com o balanceamento da utilização dos nós da rede, o desempenho da rede será melhorado em termos de melhor reuso espacial, mais comunicações simultâneas, aumento da vazão agregada e gasto de energia balanceado entre os nós, por isso a importância desta métrica.

Nos resultados, a quantidade de nós da rede é variada para redes com 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144 ou 169 nós, posicionados em uma área de 1.000 metros por 1.000 metros.

Os sistemas de antenas direcionais utilizados nas simulações eram compostos de 2, 4, 8 ou 16 feixes fixos por sistema. Essas quantidades de feixes podem ser obtidas em produtos existentes [20, 89, 97]. Em cada simulação todos os nós da rede utilizaram antenas omnidirecionais ou todos os nós da rede utilizaram sistemas de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes. O alcance de recepção para cada quantidade de feixes fixos por sistema utilizado na simulação é apresentado na Tabela 4.1.

Foram considerados dois cenários para posicionamento dos nós: um cenário em grade e um cenário com distribuição aleatória.

Para cada quantidade de nós na rede, cenário de rede e tipo de antena ou tipo de sistema de antenas direcionais foram realizadas 1.000 execuções de simulações. A utilização de cada um dos nós da rede como nó intermediário de múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e de múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  foi calculada com intervalo de confiança de 95%, representado nos gráficos por barras de erro verticais. Os valores de  $ng$ , quantidade de nós em cada linha e em cada coluna no cenário em grade, e de  $np$ , quantidade de pares de nós origem e destino para cada rota, foram atribuídos como iguais à raiz quadrada da quantidade de nós da rede. Os nós origem e destino dos  $np$  pares de nós origem e destino foram aleatoriamente escolhidos em cada uma das simulações.

Didaticamente, neste trabalho, os sistemas de antenas direcionais do tipo feixe comutado com 2 e 4 feixes são classificados como de feixe largo, pois a largura do feixe é respectivamente 90 e 180 graus. Esses sistemas de antenas direcionais com 8 e 16 feixes

são classificados como de feixe estreito, pois a largura do feixe é respectivamente 45 e 22,5 graus.

As redes com densidade de 36 nós por quilômetro quadrado, 81 nós por quilômetro quadrado e 169 nós por quilômetro quadrado são consideradas neste trabalho respectivamente como redes de baixa densidade de nós, de média densidade de nós e de alta densidade de nós.

### 5.1.1 Análise para um cenário em grade

No cenário em grade, os nós foram posicionados em uma grade com  $n_g$  nós em cada coluna por  $n_g$  nós em cada linha. Os nós foram igualmente e lateralmente espaçados em cada coluna e em cada linha, conforme ilustrado na Figura 5.1 para uma grade com 100 nós. A posição dos nós e seus identificadores foi mantida fixa em todas as rodadas.

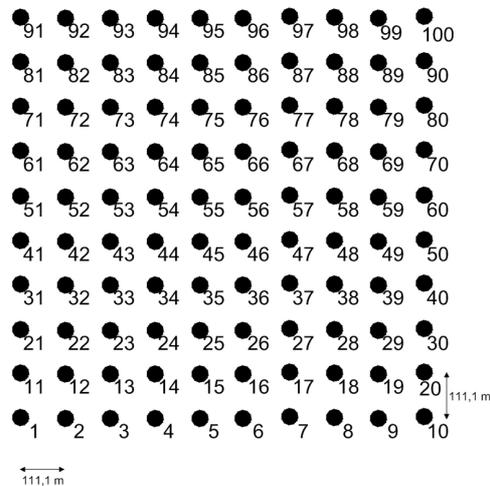
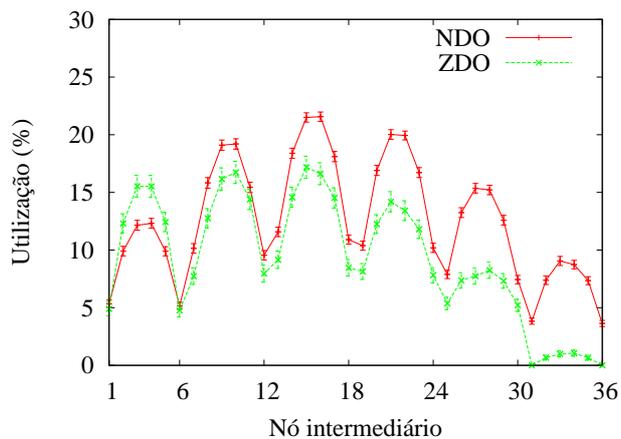
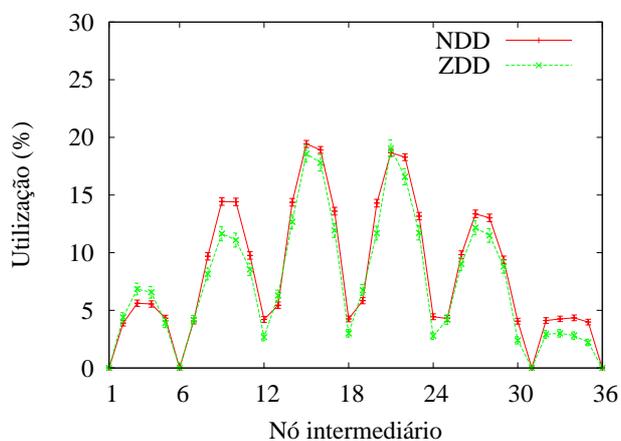


Figura 5.1: Exemplo de cenário em grade com 10 nós por linha e 10 nós por coluna.

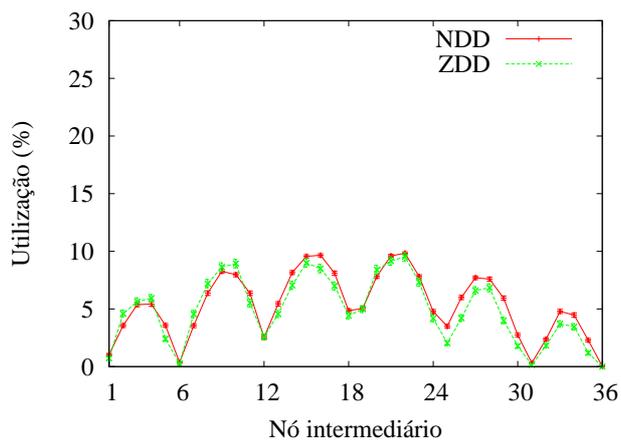
A Figura 5.2 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas  $r_{nd}$  e múltiplas  $r_{zd}$  em um cenário em grade para uma rede com baixa densidade de distribuição de nós. Nessa densidade de nós, cada nó está separado lateralmente do seu primeiro vizinho por 200 metros e separado por 282,84 metros do seu primeiro vizinho na diagonal. Pode-se notar nas Figuras 5.2(b) e 5.2(c) que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando um sistema de antenas direcionais com maior quantidade de feixes é utilizado.



(a) Antena Omnidirecional.



(b) Sistema com 4 feixes direcionais.

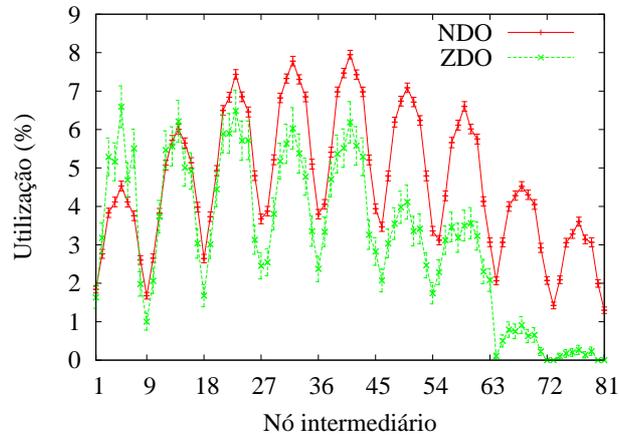


(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

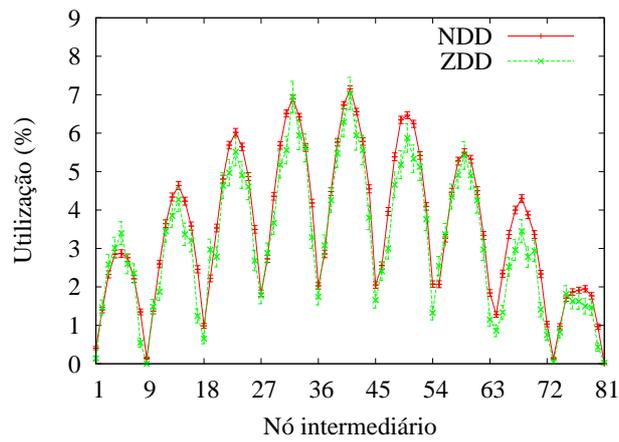
Figura 5.2: Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 36 nós.

A Figura 5.3 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  em

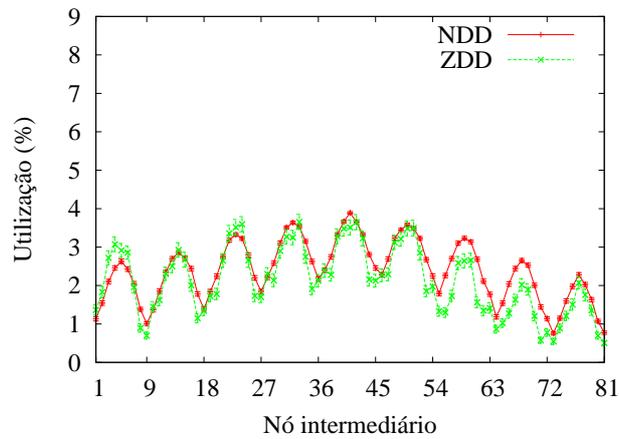
um cenário em grade para uma rede com média densidade de nós. Nessa densidade de



(a) Antena Omnidirecional.



(b) Sistema com 4 feixes direcionais.

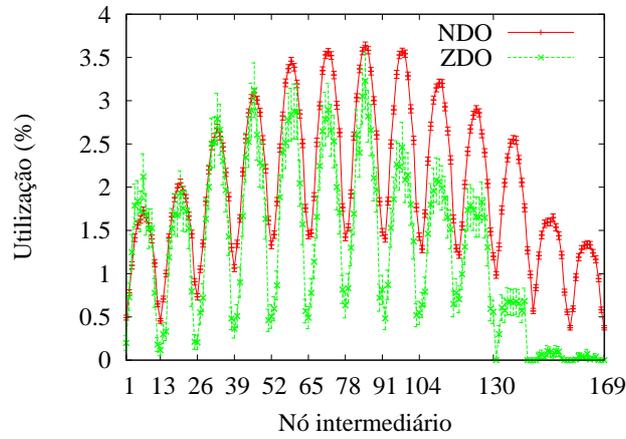


(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

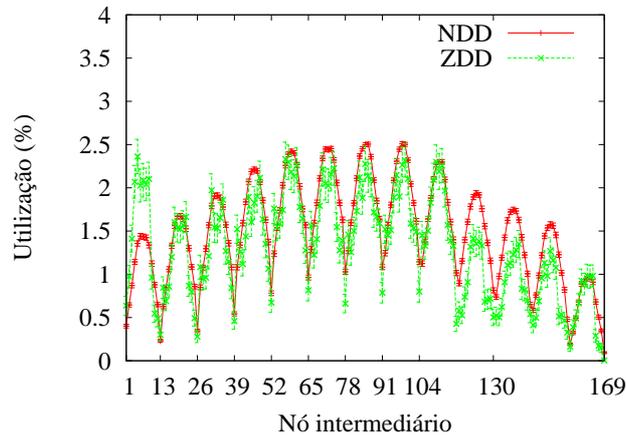
Figura 5.3: Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 81 nós.

nós, cada nó está separado lateralmente do seu primeiro vizinho por 125 metros e separado

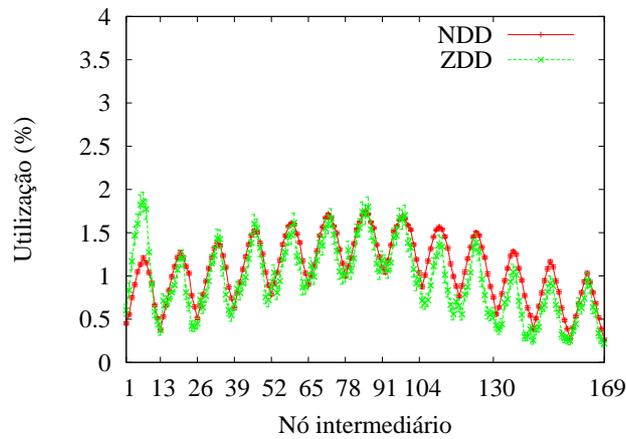
por 176,78 metros do seu primeiro vizinho na diagonal. Pode-se notar nas Figuras 5.3(b)



(a) Antena Omnidirecional.



(b) Sistema com 4 feixes direcionais.



(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

Figura 5.4: Utilização como nó intermediário no cenário em grade com 169 nós.

e 5.3(c) que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando um

sistema de antenas direcionais com maior quantidade de feixes é utilizado. Comparando-se as Figuras 5.2 e 5.3, pode-se observar que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando os sistemas de antenas direcionais são utilizados em cenários com maior quantidade de nós.

A Figura 5.4 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  em um cenário em grade para uma rede com alta densidade de nós. Nessa densidade de nós, cada nó está separado lateralmente do seu primeiro vizinho por 83,33 metros e separado por 117,85 metros do seu primeiro vizinho na diagonal. Pode-se notar nas Figuras 5.4(b)

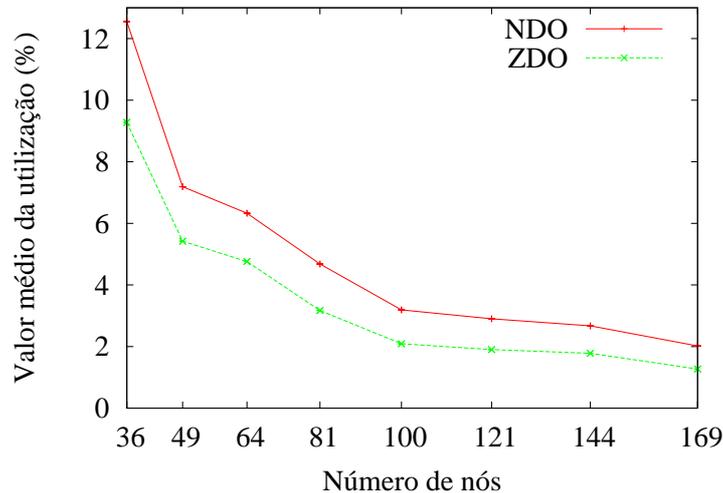


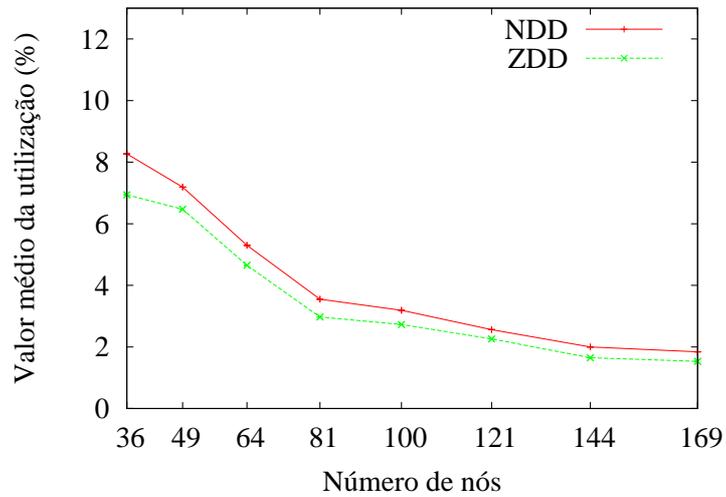
Figura 5.5: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando antenas omnidirecionais.

e 5.4(c) que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando um sistema de antenas direcionais com maior quantidade de feixes é utilizado.

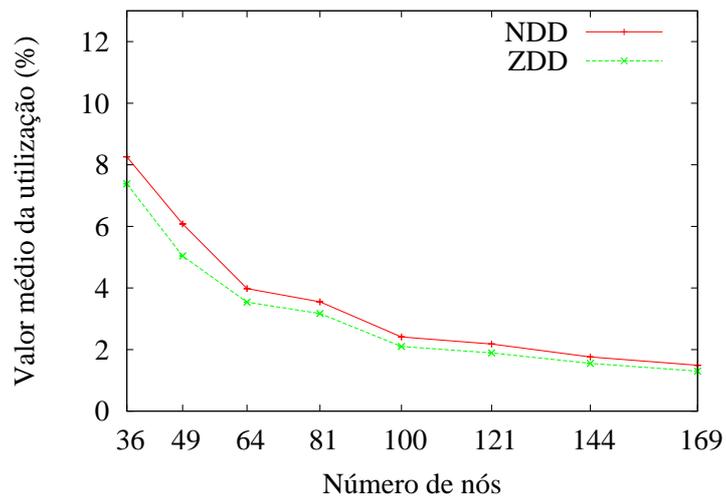
Comparando-se as Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se observar que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando os sistemas de antenas direcionais são utilizados em cenários com maior quantidade de nós.

É observado também nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 que a utilização de cada nó diminui com o aumento da quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 demonstram a vantagem do emprego de algoritmo de rotea-



(a) Sistema com 2 feixes direcionais.

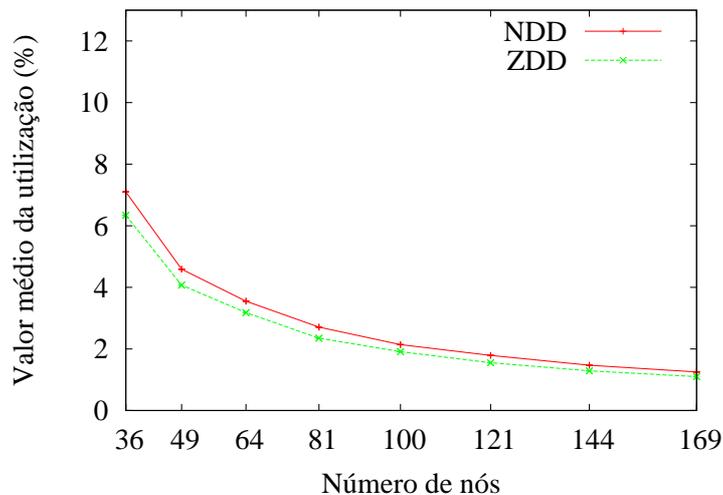


(b) Sistema com 4 feixes direcionais.

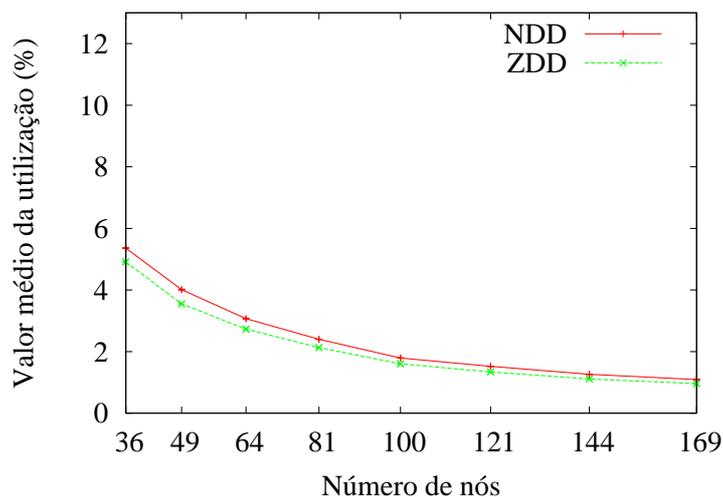
Figura 5.6: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo.

mento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) em comparação com o emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) no cenário em grade. Variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, observa-se que o valor médio da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede em ZDD é menor que esse valor médio em NDD.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 ainda demonstram que nesse cenário a utilização de sis-



(a) Sistema com 8 feixes direcionais.



(b) Sistema com 16 feixes direcionais.

Figura 5.7: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe estreito.

temas de antenas direcionais melhora o desempenho da rede em comparação aos mesmos algoritmos de roteamento utilizando antenas omnidirecionais. Observa-se que variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, que os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando sistemas de antenas direcionais são menores que utilizando antena omnidirecional.

As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 demonstram ainda que o aumento da quantidade de feixes

por sistemas de antenas direcionais melhora o balanceamento da utilização dos nós da rede. É observado que, variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede diminuem ao serem utilizados sistemas com maior quantidade de feixes por sistema.

### 5.1.2 Análise para um cenário com distribuição aleatória dos nós

No cenário com distribuição aleatória dos nós, os nós foram posicionados aleatoriamente na área quadrada, conforme ilustrado na Figura 5.8 para uma rede com 36 nós. A posição dos nós variou aleatoriamente em cada rodada.

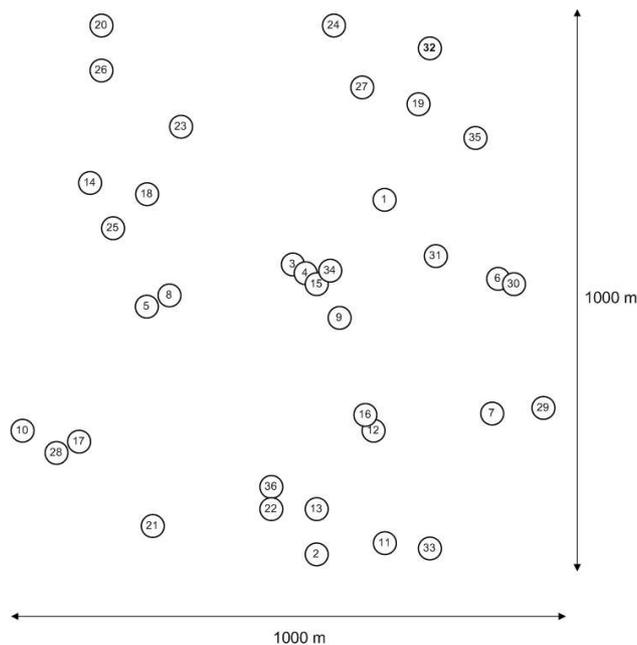
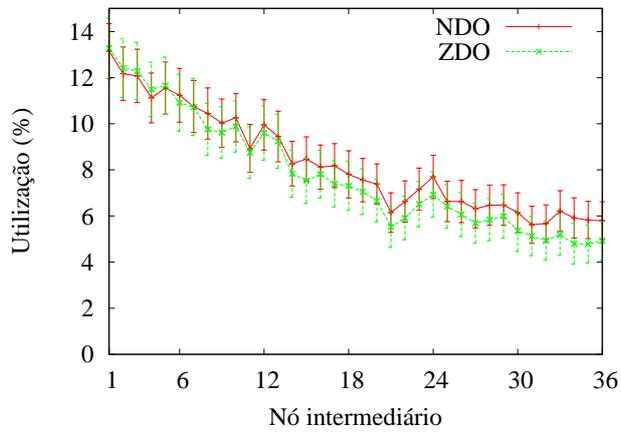
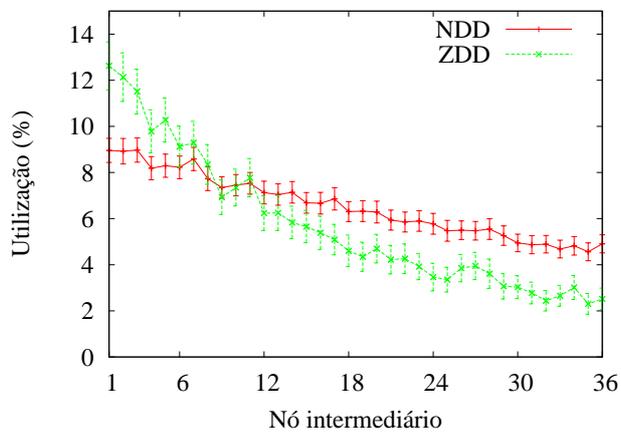


Figura 5.8: Exemplo de cenário com distribuição aleatória com 36 nós.

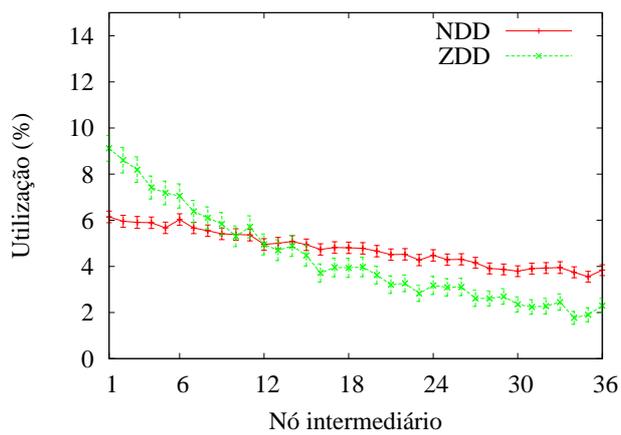
A Figura 5.9 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  em um cenário com distribuição aleatória dos nós para uma rede com baixa densidade de distribuição de nós. Pode-se notar nas Figuras 5.9(b) e 5.9(c) que a maioria dos nós tem maior utilização como nó intermediário quando um sistema de antenas direcionais com menor quantidade de feixes é utilizado.



(a) Antena Omnidirecional.



(b) Sistema com 4 feixes direcionais.



(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

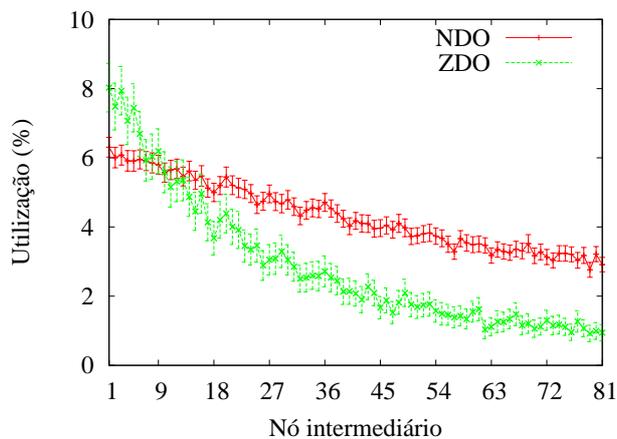
Figura 5.9: Utilização em cenário com distribuição aleatória com 36 nós.

A Figura 5.10 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  em

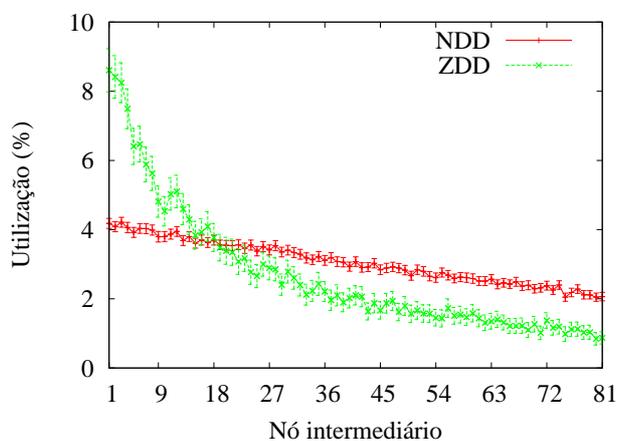
um cenário com distribuição aleatória dos nós para uma rede com média densidade de distribuição de nós. Pode-se notar nas Figuras 5.10(b) e 5.10(c) que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando um sistema de antenas direcionais com maior quantidade de feixes é utilizado. Comparando-se as Figuras 5.9 e 5.10, pode-se observar que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando os sistemas de antenas direcionais são utilizados em cenários com maior quantidade de nós.

A Figura 5.11 mostra a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando múltiplas rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  e múltiplas rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  em um cenário com distribuição aleatória dos nós para uma rede com alta densidade de distribuição de nós. Pode-se notar nas Figuras 5.11(b) e 5.11(c) que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando um sistema de antenas direcionais com maior quantidade de feixes é utilizado. Comparando-se as Figuras 5.9, 5.10 e 5.10, pode-se observar que a maioria dos nós tem menor utilização como nó intermediário quando os sistemas de antenas direcionais são utilizados em cenários com maior quantidade de nós.

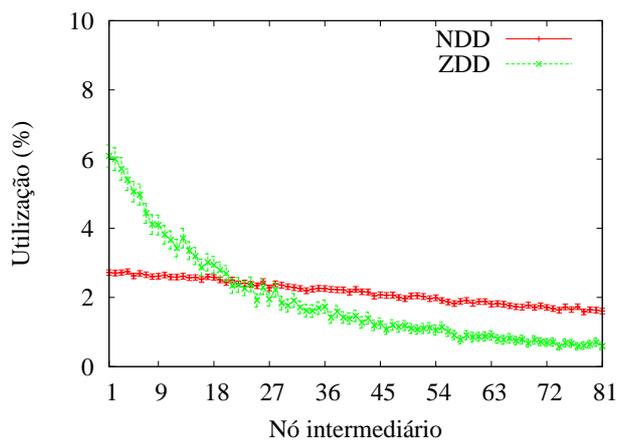
Observa-se nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 uma tendência para que todos os nós sejam utilizados como nós intermediários  $n_{in}$  de múltiplas rotas disjuntas na mesma proporção. Esta tendência é facilmente visualizada para as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$ , cuja curva é linear, embora a curva seja decrescente com os nós de menor número identificador sendo um pouco mais utilizados. Nas Figuras 5.9(c), 5.10(c) e 5.11(c) esta tendência é mais facilmente visualizada, devido a estas curvas serem quase retas de valor constante. Para as  $r_{zd}$ , a curva não é linear, embora também seja uma curva decrescente com os nós de menor numeração sendo bem mais utilizados que os nós de maior número identificador. Essa tendência de comportamento linear ocorre porque, diferente do cenário em grade, o posicionamento dos nós não é fixo em todas as execuções do simulador. Portanto, em uma rodada um determinado nó pode ficar posicionado no centro da área simulada, e em uma outra rodada ficar posicionado em uma extremidade. O fato de nós serem mais utilizados como nós intermediários  $n_{in}$  em rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  do que em rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  ocorre porque durante o cálculo das  $r_{nd}$ , o critério de desempate escolhido para a formação de rota do algoritmo de primeiro caminho mais curto (SPF) foi o nó de menor



(a) Antena Omnidirecional.



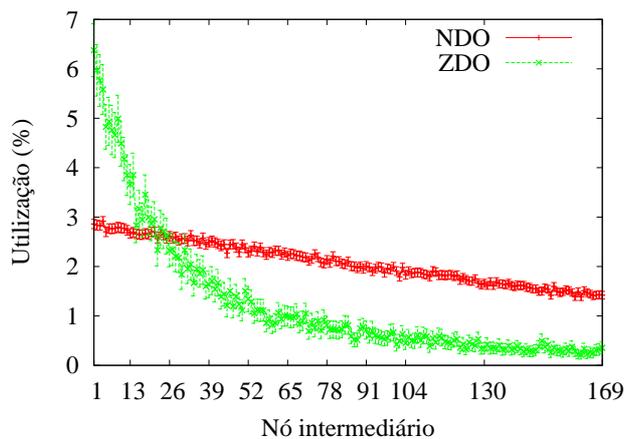
(b) Sistema com 4 feixes direcionais.



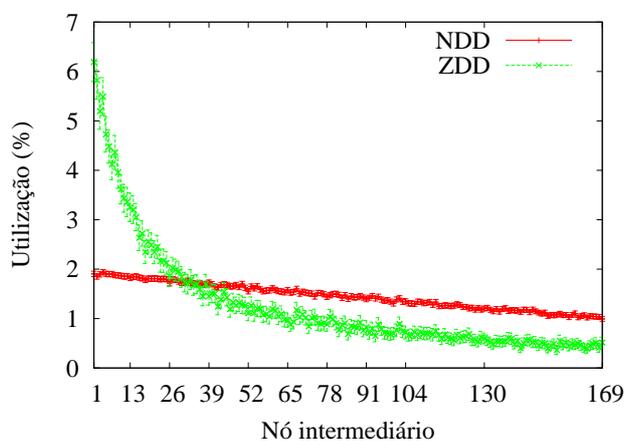
(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

Figura 5.10: Utilização em cenário com distribuição aleatória com 81 nós.

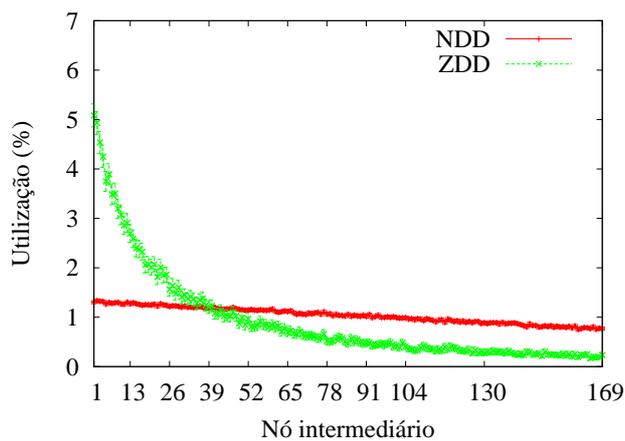
identificador e ao fato de que as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  serem armazenadas na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$  também pelo critério de ordem crescente de identificador dos



(a) Antena Omnidirecional.



(b) Sistema com 4 feixes direcionais.



(c) Sistema com 16 feixes direcionais.

Figura 5.11: Utilização em cenário com distribuição aleatória com 169 nós.

nós na rota. Esse fato seria minimizado caso fosse utilizada aleatoriedade no desempate para a formação de rota do algoritmo SPF e fosse utilizada aleatoriedade na escolha da

rota disjunta por zona dentre as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  de mesmo custo existentes na lista de rotas disjuntas por nó  $l_{nd}$ . Porém, critérios de desempate como o utilizado são comumente empregados em protocolos de roteamento de Internet.

Em transmissões direcionais, quando os nós são colocados em uma mesma direção, ocorre uma interferência direcional maior em uma direção particular, reduzindo assim o reuso espacial [8, 34, 70, 72]. Essa característica prejudica o desempenho de protocolos MAC em cenários com nós em linha e em grade. Um cenário com distribuição aleatória dos nós pode ser caracterizado por menor grau de alinhamento, permitindo maior reuso espacial [70] e obtendo assim melhor desempenho, conforme demonstrado nos resultados desta dissertação.

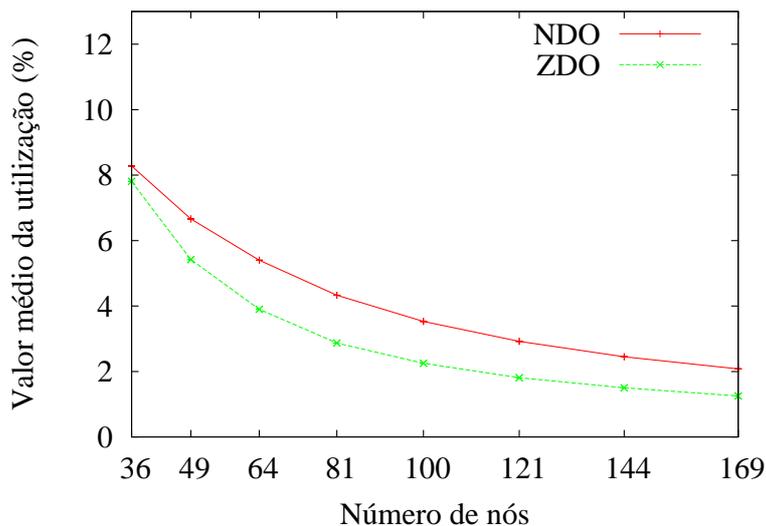
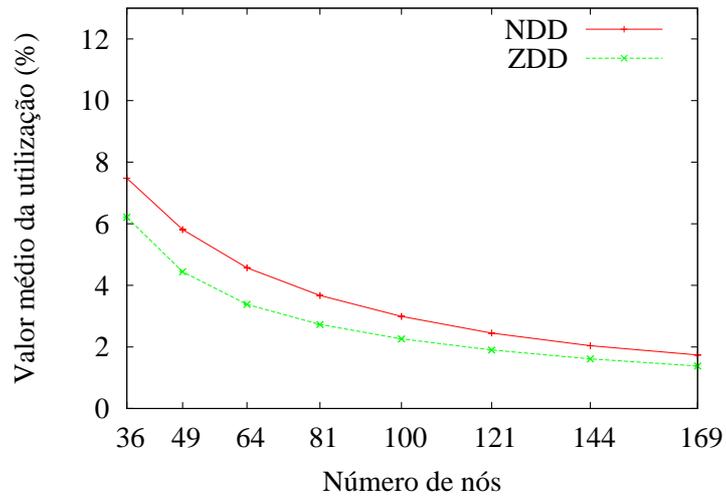
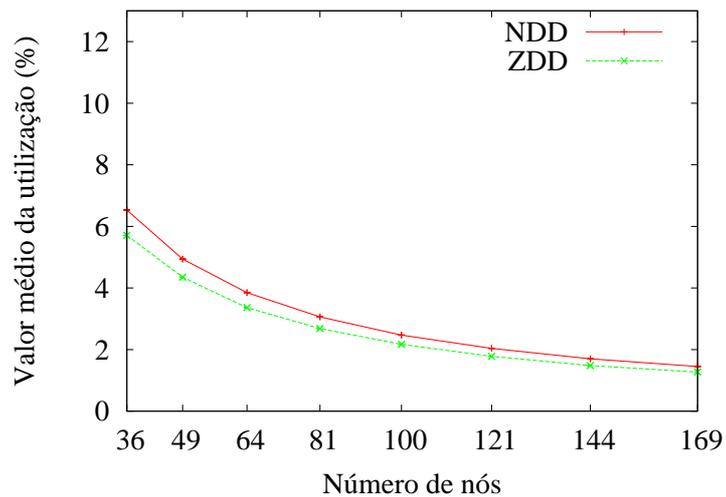


Figura 5.12: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando antena omnidirecional.

Para o cenário em grade e para o cenário com distribuição aleatória dos nós, as rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  tendem a utilizar menos nós intermediários  $n_{in}$  do que as rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  a partir de certo identificador de nó. No cenário com distribuição aleatória dos nós, com rede com baixa densidade de distribuição de nós, os nós anteriores ao nós número 5 para antena omnidirecional, número 11 para sistema de antena direcional com 4 feixes e número 12 para sistema de antena direcional com 16 feixes são mais utilizados como  $n_{in}$  em  $r_{zd}$  do que em  $r_{nd}$ . Nesse cenário, com rede com média densidade de distribuição de nós, os nós anteriores aos nós número 10, 18 e 24, são mais utilizados



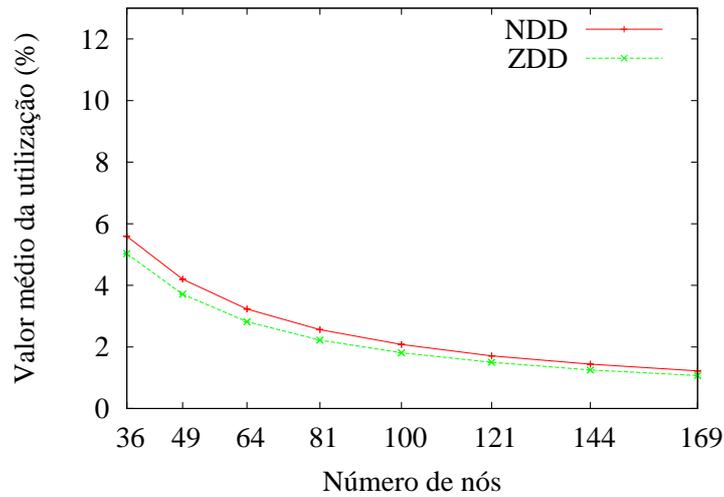
(a) Sistema com 2 feixes direcionais.



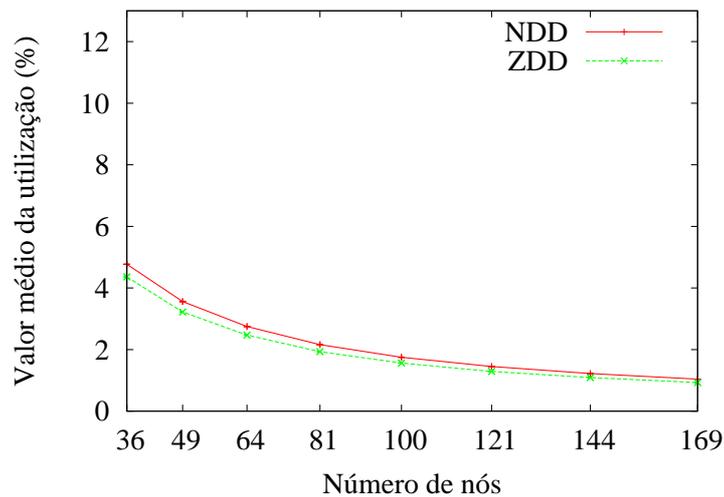
(b) Sistema com 4 feixes direcionais.

Figura 5.13: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo.

como nós intermediários  $n_{in}$  em rotas disjuntas por zona  $r_{zd}$  do que em rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  quando são utilizados respectivamente antena omnidirecional, sistema de antena direcional com 4 feixes ou sistema de antena direcional com 16 feixes. Para o mesmo cenário, com rede com alta densidade de distribuição de nós, os nós anteriores aos nós número 25, 38 e 39, são mais utilizados como  $n_{in}$  em  $r_{zd}$  do que em  $r_{nd}$  quando são utilizados respectivamente antena omnidirecional, sistema de antena direcional com 4 feixes ou sistema de antena direcional com 16 feixes. Conforme anteriormente explicado, esse fato de alguns nós serem mais utilizados como nós intermediários  $n_{in}$  em rotas disjun-



(a) Sistema com 8 feixes direcionais.



(b) Sistema com 16 feixes direcionais.

Figura 5.14: Valor médio da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe estreito.

tas por zona  $r_{zd}$  do que em rotas disjuntas por nó  $r_{nd}$  decorre do critério de desempate escolhido.

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 demonstram a vantagem do emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) em comparação com o emprego de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) no cenários com distribuição aleatória dos nós. Variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade

de feixes por sistema de antenas direcionais, observa-se que o valor médio da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede em ZDD é menor que esse valor médio em NDD. As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 ainda demonstram que nesse cenário a utilização de sistemas de antenas direcionais melhora o desempenho da rede em comparação aos mesmos algoritmos de roteamento utilizando antenas omnidirecionais. Observa-se que variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, que os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede utilizando sistemas de antenas direcionais são menores que utilizando antena omnidirecional. As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 demonstram ainda que o aumento da quantidade de feixes por sistemas de antenas direcionais melhora o balanceamento da utilização dos nós da rede. É observado que, variando a quantidade de nós da rede e variando a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais, os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede diminuem ao serem utilizados sistemas com maior quantidade de feixes por sistema. As Figuras 5.5, 5.6 e 5.7 e as Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 também demonstram que o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e sistemas de antenas direcionais (ZDD) e o algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e sistemas de antenas direcionais (NDD) têm melhor desempenho no cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade. Observa-se que os valores médios da utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede no cenário com distribuição aleatória de nós são menores que no cenário em grade, quando se varia a quantidade de nós da rede e a quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais.

### **5.1.3 Uma otimização**

Todas as simulações realizadas, inclusive aquelas onde não havia rota entre o nó origem e o nó destino, foram consideradas nos resultados apresentados nas Subseções 5.1.1 e 5.1.2.

No cenário em grade, em todas as simulações foram obtidas rotas entre o nó origem e o nó destino, independentemente do uso de antena omnidirecional ou de sistema de antena direcional. Todavia, foram obtidas rotas inalcançáveis, em algumas simulações

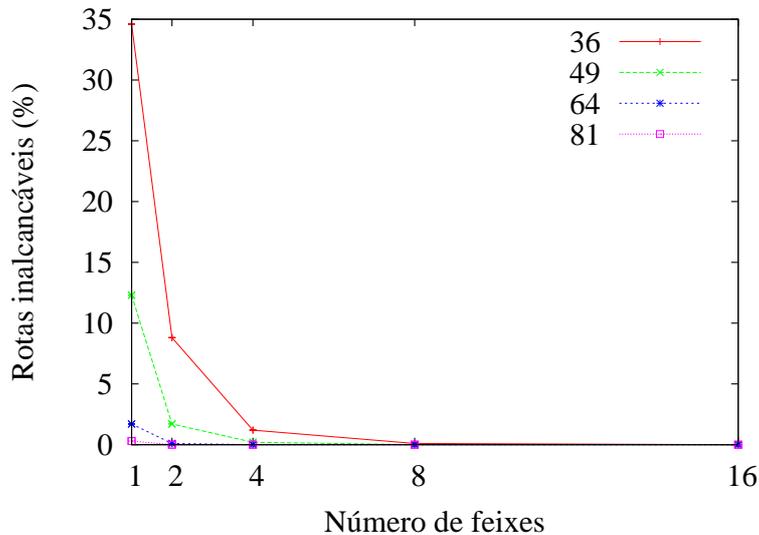


Figura 5.15: Rotas inalcançáveis em cenário com distribuição aleatória dos nós.

no cenário com distribuição aleatória dos nós, conforme apresentado na Figura 5.15. Observa-se nessa figura que a quantidade de rotas inalcançáveis diminui com o aumento da quantidade de feixes por sistemas de antenas direcionais, não havendo nenhuma rota inalcançável quando é utilizado o sistema de antenas direcionais com 16 feixes. Essas rotas inalcançáveis ocorrem porque o alcance dos nós utilizando antena omnidirecional e utilizando sistema de antena direcional com 2 feixes é menor que a distância entre os nós que poderiam fazer parte da rota em uma rede com baixa densidade de nós.

Foi implementado um filtro para excluir do cálculo da utilização as simulações onde ocorrem rotas inalcançáveis. Os resultados obtidos para o valor médio da utilização como nó intermediário no cenário em grade foram iguais aos apresentados na Subseção 5.1.1. Os resultados para esse valor médio no cenário distribuição aleatória dos nós também foram iguais aos apresentados na Subseção 5.1.2, excetuando-se os resultados apresentados nas Figuras 5.16 e 5.17.

Observa-se nas Figuras 5.12, 5.13(a), 5.16 e 5.17 que os valores médios otimizados da utilização como nó intermediário no cenário distribuição aleatória dos nós, utilizando antenas omnidirecionais e utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo com 2 feixes, foram maiores que os obtidos para as mesmas condições sem a otimização para rede com 36 nós. Entretanto, esses valores permanecem sendo menores que os obtidos no

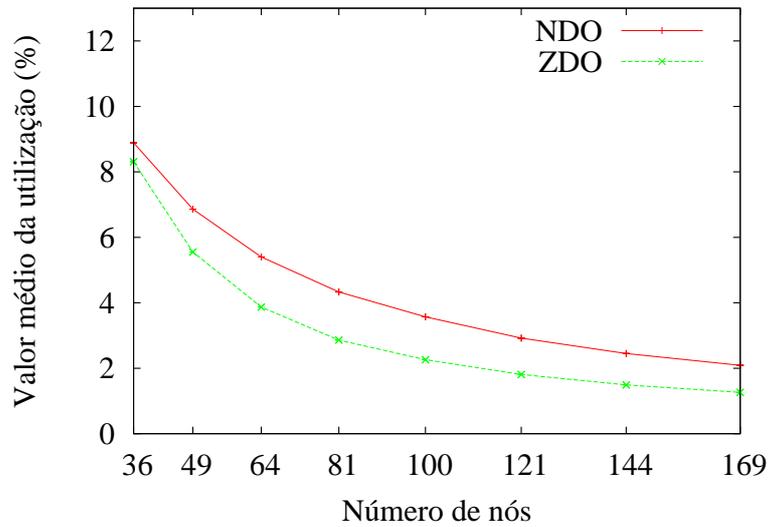


Figura 5.16: Valor médio otimizado da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando antenas omnidirecionais.

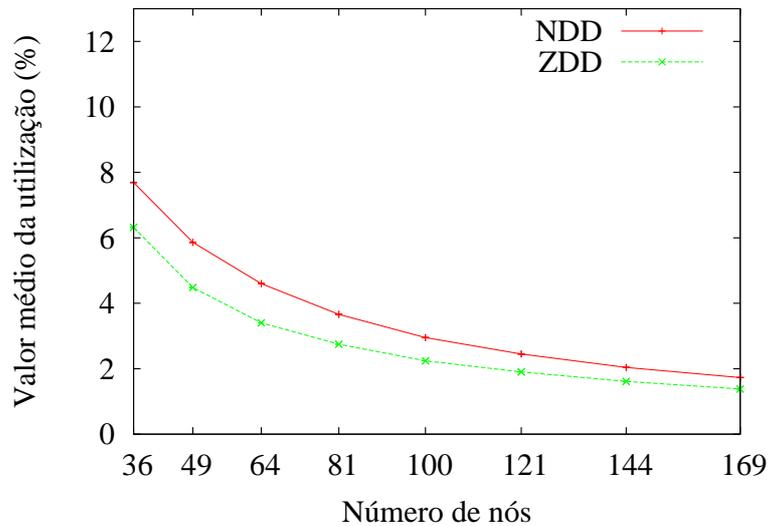


Figura 5.17: Valor médio otimizado da utilização como nó intermediário no cenário com distribuição aleatória dos nós utilizando sistemas de antenas direcionais de feixe largo com 2 feixes.

cenário em grade.

Os melhores resultados na melhoria da distribuição do tráfego em redes *ad hoc* foram obtidos com a utilização de algoritmo de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona e utilizando 16 feixes por sistema de antenas direcionais no cenário com

distribuição aleatória dos nós.

Com o aumento da quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado, o feixe de transmissão de cada antena direcional é reduzido. Entretanto, o alcance de transmissão aumenta. Logo, as rotas têm menos saltos, tornando-se mais curtas e diminuindo-se a quantidade de nós utilizados em cada rota. Desse modo a utilização como nó intermediário de cada um dos nós da rede diminui ao serem utilizados sistemas com maior quantidade de feixes por sistema de antenas direcionais.

Nesse capítulo foram analisados algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por nó e algoritmos de roteamento usando múltiplos caminhos disjuntos por zona, ambos empregando antenas omnidirecionais ou sistemas de antenas direcionais.

As conclusões sobre este trabalho e a direção dos trabalhos futuros serão apresentadas no próximo capítulo.

# Capítulo 6

## Conclusões

**A**S aplicações de redes *ad hoc* sem fio devem continuar crescendo, inclusive em ambiente militar, devido às vantagens de rapidez na implementação e reconfiguração, robustez e baixo custo em cenários inóspitos e hostis que essas redes possuem. No entanto, é necessário melhorar o reaproveitamento espacial visando aumentar o desempenho dessas redes com um melhor uso da banda passante e do espectro de frequências.

A utilização de sistemas de antenas direcionais permite um melhor reuso espacial devido ao feixe de transmissão ser mais estreito e à concentração de energia na direção da transmissão, reduzindo também a interferência. Com o uso de roteamento que utiliza múltiplos caminhos entre um nó origem e um nó destino o reaproveitamento espacial é melhorado devido ao balanceamento de tráfego entre os vários caminhos escolhidos. Entretanto, não basta utilizar somente múltiplos caminhos, é desejado que os múltiplos caminhos compartilhem o mínimo de nós e de enlaces para aproveitar essas vantagens. Logo, faz-se necessário utilizar algoritmos que construam múltiplos caminhos específicos para antenas direcionais.

Nesta dissertação foram apresentadas características físicas de antenas omnidirecionais e de sistemas de antenas direcionais, bem como apresentados protocolos da camada de controle de acesso ao meio e da camada de roteamento que utilizam esses tipos de antenas. Foi mostrado que embora haja desafios a vencer, o uso de sistemas de antenas direcionais em redes *ad hoc* é vantajoso e existem produtos para uso comercial e para

plataformas de testes.

Foram caracterizados os principais algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos que têm por propósito melhorar o balanceamento da utilização dos nós de redes *ad hoc* utilizando sistemas de antenas direcionais. Foi mostrado que, dependendo da geometria do cenário, poderá haver interferência no emprego de protocolos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó e antenas direcionais. Foi mostrado que múltiplos caminhos parcialmente disjuntos por zona que utilizam sistemas de antenas direcionais também podem introduzir interferências. Foi mostrado que algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona e antenas direcionais, não permitem interferência entre caminhos disjuntos e aproveitam melhor as vantagens dos sistemas de antenas direcionais e de múltiplos caminhos, embora nesses algoritmos o tempo total de processamento seja maior devido à necessidade de calcular se os feixes de transmissão de outras rotas disjuntas por zona interferem na comunicação de dados de uma outra rota disjunta por zona.

Devido à necessidade de realizar uma análise exclusiva dos dois principais tipos de algoritmos de múltiplos caminhos disjuntos utilizando sistemas de antenas direcionais, com a necessária independência das camadas física e MAC, um simulador baseado no algoritmo de Dijkstra de primeiro caminho mais curto (SPF) foi implementado. A tentativa inicial de implementar o simulador utilizando o algoritmo de força bruta foi descartada devido à complexidade computacional desse algoritmo e após se obter tempos de simulação demasiadamente grandes em programa desenvolvido na linguagem C++.

Foi realizada em redes *ad hoc*, onde o tipo de antena utilizada por todos os nós era o mesmo, uma análise do emprego de algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona, comparando-a com uma análise do emprego de algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó no mesmo contexto. Nessa análise, esses dois principais tipos de algoritmos de múltiplos caminhos disjuntos foram comparados em diferentes cenários e diferentes configurações de feixes de antenas. Nessa análise, todos os nós utilizaram antenas omnidirecionais ou sistema de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes e foi utilizada a métrica utilização dos nós intermediários para fornecer uma medida de como o tráfego está dis-

tribuído na rede.

Os resultados obtidos demonstram que a distribuição de tráfego em redes *ad hoc* é melhor com a utilização de sistemas de antenas direcionais do tipo feixe comutado com uma mesma quantidade de feixes do que com a utilização de antenas omnidirecionais, tanto ao empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona, quanto com o que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó. Os resultados demonstram também que quanto mais feixes forem utilizados por sistema de antenas direcionais, melhor será o balanceamento da utilização dos nós da rede. Foi observado também que é melhor empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona do que empregar o algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por nó, quando ambos os algoritmos utilizam sistemas de antenas direcionais. A distribuição de tráfego nessas redes será melhor se os sistemas de antenas direcionais forem utilizados no cenário com distribuição aleatória de nós do que no cenário em grade. Os melhores resultados na melhoria da distribuição do tráfego em redes *ad hoc* sem fio foram obtidos com a utilização do algoritmo de roteamento que usa múltiplos caminhos disjuntos por zona utilizando 16 antenas por sistema de antenas direcionais no cenário com distribuição aleatória dos nós [30].

Uma contribuição dessa dissertação foi a implementação do simulador para a análise exclusiva de algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos e empregam sistemas de antenas direcionais em diferentes cenários e em diferentes configurações de feixes de antenas. Outra contribuição dessa dissertação foi a análise em diferentes cenários e em diferentes configurações de feixes de antenas dos algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por nó e empregam antenas direcionais e dos algoritmos de roteamento que usam múltiplos caminhos disjuntos por zona e empregam antenas direcionais.

Futuramente, pretende-se implementar no simulador aleatoriedade no desempate para a formação de rota do algoritmo de Dijkstra de primeiro caminho mais curto (SPF) e aleatoriedade na escolha da rota disjunta por zona dentre as rotas disjuntas por nó de mesmo custo existentes na lista de rotas disjuntas por nó. Com esta implementação reduziremos o efeito de nós de menor numeração serem mais utilizados como nós inter-

mediários em rotas disjuntas por zona do que em rotas disjunta por nó. Pretende-se também implementar mobilidade aos nós. Pretende-se ainda implementar esses algoritmos em um protocolo de roteamento, com vistas à realização de uma prova de conceito em protótipo de redes *ad hoc*.

## Referências Bibliográficas

- [1] CAMPISTA, M. E. M., ESPOSITO, P. M., MORAES, I. M., COSTA, L. H. M. K., DUARTE, O. C. M. B., PASSOS, D. G., DE ALBUQUERQUE, C. V. N., SAADE, D. C. M., E RUBINSTEIN, M. G. Routing Metrics and Protocols for Wireless Mesh Networks. *IEEE Network* 22 (janeiro de 2008), 6–12.
- [2] AKYILDIZ, I., E WANG, X. A Survey on Wireless Mesh Networks. *IEEE Communications Magazine* 43, 9 (setembro de 2005), S23–S30.
- [3] RAMAN, B., E CHEBROLU, K. Design and Evaluation of a New MAC Protocol for Long-Distance 802.11 Mesh Networks. Em *11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom)* (agosto de 2005), pp. 156–169.
- [4] MANIEZZO, D., VILLA, G., E GERLA, M. A Smart MAC-Routing Protocol for WLAN Mesh Networks. Em *Technical Report UCLA-CSD 040032* (outubro de 2004), University of California, pp. 1–20.
- [5] NANDAN, A., DAS, S., PAU, G., GERLA, M., E SANADIDI, M. Y. Co-operative Downloading in Vehicular Ad-hoc Wireless Networks. Em *Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (IEEE WONS)* (janeiro de 2005), pp. 32–41.
- [6] CHENNIKARA-VARGHESE, J., CHEN, W., ALTINTAS, O., E CAI, S. Survey of Routing Protocols for Inter-Vehicle Communications. Em *Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems* (julho de 2006), pp. 1–5.

- [7] RUBINSTEIN, M. G., MORAES, I. M., CAMPISTA, M. E. M., COSTA, L. H. M. K., E DUARTE, O. C. M. B. A Survey on Wireless Ad Hoc Networks. Em *Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN)* (agosto de 2006), vol. 211, pp. 1–33.
- [8] ROCHA, R. R. Um Mecanismo Para Evitar a Surdez Intrínseca em Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos utilizando Antenas Direcionais. Tese de Mestrado, PEE/COPPE/UFRJ, março de 2006.
- [9] ZHOU, H. The Improvements in Ad Hoc Routing and Network Performance with Directional Antenna. Tese de Mestrado, Helsinki University of Technology, agosto de 2006.
- [10] SUNDARESAN, K. Medium Access Control for Ad Hoc Networks with Switched Beam Antennas. Tese de Mestrado, Georgia Institute of Technology, maio de 2003.
- [11] KUROSE, J. F., E ROSS, K. W. *Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down*, 3a ed. Pearson Addison Wesley, São Paulo, São Paulo, 2006.
- [12] DA S MATTOS, L. Quality of Services Schemes for Mobile Ad Hoc Networks. Tese de Mestrado, Naval PostGraduate School, março de 2001.
- [13] MILLER, C. R. R. Statistical Analysis of Wireless Networking: Predicting Performance in Multiple Environments. Tese de Mestrado, Naval PostGraduate School, junho de 2006.
- [14] JR., R. L. L. Optimum Antenna Configuration for Maximizing Access Point Range of an IEEE 802.11 Wireless Mesh Network in Support of Multimission Operations Relative to Hastily Formed Scalable Deployments. Tese de Mestrado, Naval PostGraduate School, setembro de 2007.
- [15] CHAN, H. W. R. Performance Analysis of IEEE 802.11a Signals Under Different Operational Environments. Tese de Mestrado, Naval PostGraduate School, setembro de 2004.

- [16] ROBERTS, D. K. Performance Analysis and Comparison of Multiple Routing Protocols in a Large-Area High-Speed Mobile Node Ad Hoc Network. Tese de Mestrado, Air Force Institute of Technology, junho de 2007.
- [17] IEEE. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. Standard 802.11, 1999.
- [18] SUNDARESAN, K. *Network Protocols for Multi-Hop Wireless Networks with Smart Antennas*. Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology, julho de 2006.
- [19] CORDEIRO, C., GOSSAIN, H., E AGRAWAL, D. P. A Directional Antenna Medium Access Control Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. *Journal of the Brazilian Telecommunications Society* (2005).
- [20] RAMANATHAN, R., REDY, J., SANTIVANEZ, C., WIGGINS, D., E POLIT, S. Ad Hoc Networking with Directional Antennas: A Complete System Solution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23 (março de 2005), 496–506.
- [21] RAMANATHAN, R. On the Performance of Ad Hoc Networks with Beamforming Antennas. Em *2nd ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)* (outubro de 2001), pp. 95–105.
- [22] CAIN, J. B., BILLHARTZ, T., FOORE, L., ALTHOUSE, E., E SCHLORFF, J. A Link Scheduling and Ad Hoc Networking Approach Using Directional Antennas. Em *Military Communications Conference (IEEE MILCOM)* (outubro de 2003), vol. 1, pp. 643–648.
- [23] ZHANG, Z., RYU, B., NALLAMOTHU, G., E HUANG, Z. Performance of All-Directional Transmission and Reception Algorithms in Wireless Ad Hoc Networks with Directional Antennas. Em *Military Communications Conference (IEEE MILCOM)* (outubro de 2005), vol. 1, pp. 225–230.
- [24] SAHA, A. K., E JOHNSON, D. B. Routing Improvement Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. Em *Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)* (novembro de 2004), vol. 5, pp. 2902–2908.

- [25] WINTERS, J. H. Smart Antenna Techniques and Their Application to Wireless Ad Hoc Networks. *IEEE Wireless Communications* 13 (agosto de 2006), 77–83.
- [26] BANDYOPADHYAY, S., ROY, S., UEDA, T., E HASUIKE, K. Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna. Em *IFIP TC6/WG6.8 Working Conference on Personal Wireless Communications (PWC)* (outubro de 2002), vol. 234, pp. 45–52.
- [27] ROY, S., BANDYOPADHYAY, S., UEDA, T., E HASUIKE, K. Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Omni Directional and Directional Antenna: A Comparative Study. Em *4th International Workshop on Distributed Computing, Mobile and Wireless Computing (ACM IWDC)* (dezembro de 2002), vol. 2571, pp. 184–191.
- [28] ABBAS, A. M., E JAIN, B. N. Mitigating Overheads and Path Correlation in Node-Disjoint Multipath Routing for Mobile Ad hoc Networks. Em *First International Conference on Communication Systems Software and Middleware (IEEE Comsware)* (janeiro de 2006), pp. 1–7.
- [29] UEDA, T., TANAKA, S., KOMIYAMA, B., ROY, S., SAHA, D., E BANDYOPADHYAY, S. ACR: An Adaptive Communication-Aware Routing through Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna. Em *Wireless Communications & Mobile Computing (ACM WCMC)* (março de 2006), vol. 6, pp. 191–199.
- [30] DE FREITAS, N. D., CAMPISTA, M. E. M., E COSTA, L. H. M. K. Uma Análise da Utilização de Antenas Direcionais e Múltiplos Caminhos em Redes Ad Hoc Sem Fio. Em *XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (maio de 2008).
- [31] GOSSAIN, H., JOSHI, T., CORDEIRO, C., E AGRAWAL, D. P. DRP: An Efficient Directional Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 17, 12 (dezembro de 2006), 1438–1541.

- [32] CHOUDHURY, R. R., YANG, X., RAMANATHAN, R., E VAIDYA, N. H. On Designing MAC Protocols for Wireless Networks Using Directional Antennas. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5, 5 (maio de 2006), 477–491.
- [33] HUANG, Z., E SHEN, C.-C. A Comparison Study of Omnidirectional and Directional MAC Protocols for Ad Hoc Networks. Em *Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)* (novembro de 2002), vol. 1, pp. 57–61.
- [34] KORAKIS, T., JAKLLARI, G., E TASSIULAS, L. A MAC Protocol for Full Exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks. Em *4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)* (junho de 2003), pp. 98–107.
- [35] KO, Y.-B., SHANKARKUMAR, V., E VAIDYA, N. H. Medium Access Control Protocols Using Directional Antennas in Ad Hoc Networks. Em *19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM)* (março de 2000), vol. 1, pp. 13–21.
- [36] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Performance of Ad Hoc Routing Using Directional Antennas. *Ad Hoc Networks* 3, 2 (março de 2005), 157–173.
- [37] IEEE ANTENNAS AND PROPAGATION SOCIETY. *IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*. Standard 145-1993, 1993.
- [38] SMIT, J. *Ondas e Antenas*, 2a ed. Érica, São Paulo, São Paulo, 1988.
- [39] SMIT, J. *Rádio Propagação*, 1a ed. Érica, São Paulo, São Paulo, 1987.
- [40] DAI, H., NG, K., E WU, M. An Overview of MAC Protocols with Directional Antennas in Wireless Ad Hoc Networks. Em *International Conference on Wireless and Mobile Communications (IEEE ICWMC)* (julho de 2006), pp. 84–91.
- [41] BALLANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis & Design*, 2a ed. John Wiley & Sons, New York, New York, 1997.
- [42] KRAUS, J. D. *Antenas*, 1a ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

- [43] COLLIN, R. E. *Antennas and Radiowave Propagation*, 1a ed. McGraw-Hill, Singapore, 1985.
- [44] GODARA, L. C. *Smart Antennas*, 1a ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004.
- [45] MILLIGAN, T. A. *Modern Antenna Design*, 1a ed. McGraw-Hill, New York, New York, 1985.
- [46] WHEELER, H. A. The Radiansphere Around a Small Antenna. Em *IRE* (agosto de 1959), vol. 47, pp. 1325–1331.
- [47] HILL, J. E. Gain of Directional Antennas. Em *Watkins-Johnson Tech-notes* (julho de 1976), vol. 3, pp. 1–14.
- [48] LIBERTI JR., J. C., E RAPPAPORT, T. S. *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, 2a ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [49] FIDELITY COMTECH. Acessada em <http://www.fidelity-comtech.com>, fevereiro de 2008.
- [50] CISCO SYSTEMS. Acessada em <http://www.cisco.com>, janeiro de 2008.
- [51] KOLAR, V. Challenges in Directional Antennas. Tese de Mestrado, State University of New York, agosto de 2004.
- [52] KARN, P. MACA - A New Channel Access Method for Packet Radio. Em *ARRLCRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference* (setembro de 1990), pp. 134–140.
- [53] BHARGHAVAN, V., DEMERS, A., SHENKER, S., E ZHANG, L. MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LANs. Em *Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (ACM SIGCOMM)* (agosto de 1994), pp. 212–225.
- [54] FULLMER, C. L., E GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for Packet-Radio Networks. Em *Conference on Applications*,

*Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (ACM SIGCOMM)* (agosto de 1995), pp. 262–273.

- [55] WU, C., E LI, V. Receiver-Initiated Busy-Tone Multiple Access in Packet Radio Networks. Em *SIGCOMM Computer Communication Review (ACM SIGCOMM)* (outubro de 1987), vol. 17, pp. 336–342.
- [56] TANG, Z., E GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Hop Reservation Multiple Access (HRMA) for Multichannel Packet Radio Networks. Em *7th International Conference on Computer Communications and Networks (IEEE ICCCN)* (outubro de 1998), pp. 388–395.
- [57] NASIPURI, A., J., J. Z., E DAS, S. R. A Multichannel CSMA MAC Protocol for Multihop Wireless Networks. Em *Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)* (setembro de 1999), vol. 3, pp. 1402–1406.
- [58] HAAS, Z. J., E DENG, J. Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA)- A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Communications* 50, 6 (junho de 2002), 975–985.
- [59] PERKINS, C. E., E BHAGWAT, P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing DSDV for Mobile Computers. Em *SIGCOMM Computer Communication Review (ACM SIGCOMM)* (outubro de 1994), vol. 24, pp. 234–244.
- [60] CLAUSEN, T. H., HANSEN, G., CHRISTENSEN, L., E BEHRMANN, G. The Optimized Link State Routing Protocol, Evaluation through Experiments and Simulation. Em *IEEE Symposium on Wireless Personal Mobile Communications* (setembro de 2001).
- [61] CLAUSEN, T. H., E JACQUET, P. *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*. IEEE, Request for Comments 3626, 2003.
- [62] JOHNSON, D. B., MALTZ, D. A., E BROCH, J. DSR: The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networking* (2001), 139–172.

- [63] C. PERKINS AND E. BELDING-ROYER AND S. DAS. *Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing*. IETF, Request for Comments 3561, 2003.
- [64] MUELLER, S., TSANG, R. P., E GHOSAL, D. *Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks: Issues and Challenges*, vol. 2965 of *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*. Springer, abril de 2004, pp. 209–234.
- [65] TRENDNET. Acessada em <http://www.trendnet.com>, março de 2008.
- [66] LINKSYS. Acessada em <http://www.linksys.com>, janeiro de 2008.
- [67] WIESELTHIER, J. E., NGUYEN, G. D., E EPHREMIDES, A. Energy-Limited Wireless Networking with Directional Antennas: The Case of Session-Based Multicasting. Em *21th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE INFOCOM)* (junho de 2002), vol. 1, pp. 190–199.
- [68] KANG, I., POOVENDRAN, R., E LADNER, R. Power-Efficient Broadcast Routing in Adhoc Networks Using Directional Antennas: Technology Dependence and Convergence Issues. Em *Technical Report UWEETR-2003-0015* (julho de 2003), University of Washington, pp. 1–12.
- [69] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Ad Hoc Routing Using Directional Antennas. Em *Technical Report UIUC* (agosto de 2002), University of Illinois at Urbana Champaign, pp. 1–20.
- [70] CHOUDHURY, R. R., YANG, X., RAMANATHAN, R., E VAIDYA, N. H. Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks. Em *8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom)* (setembro de 2002), pp. 59–70.
- [71] YI, S., PEI, Y., E KALYANARAMAN, S. On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas. Em *4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)* (junho de 2003), pp. 108–116.

- [72] CHOUDHURY, R. R., E VAIDYA, N. H. Impact of Directional Antennas on Ad Hoc Routing. Em *IFIP 8th Conference on Personal and Wireless Communication (PWC)* (setembro de 2003).
- [73] RAMELLA, I., E DE REZENDE, J. F. Minimizando a Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)* (setembro de 2005), pp. 1111–1116.
- [74] TAKAI, M., MARTIN, J., REN, A., E BAGRODIA, R. Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. Em *3th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)* (junho de 2002), pp. 183–193.
- [75] ZANDER, J. Slotted ALOHA Multihop Packet Radio Networks with Directional Antennas. Em *Electronics Letters* (dezembro de 1990), vol. 26, pp. 2098–2100.
- [76] NASIPURI, A., YE, S., YOU, J., E HIROMOTO, R. A MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Using Directional Antennas. Em *Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)* (setembro de 2000), vol. 3, pp. 1214–1219.
- [77] NASIPURI, A., MANDAVA, J., MANCHALA, H., E HIROMOTO, R. On-Demand Routing Using Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. Em *Ninth International Conference on Computer Communications and Networks (IEEE ICCCN)* (outubro de 2000), pp. 535–541.
- [78] HUANG, Z., SHEN, C.-C., SRISATHAPORNPHAT, C., E JAIKAE0, C. A Busy-Tone Based Directional MAC Protocol for Ad Hoc Networks. Em *Military Communications Conference (IEEE MILCOM)* (outubro de 2002), vol. 2, pp. 1233–1238.
- [79] CARVALHO, M. M., E GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Modeling Wireless Ad Hoc Networks with Directional Antennas. Em *25th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (IEEE INFOCOM)* (abril de 2006), vol. 1, pp. 1–12.

- [80] AMORIM, G. F., E DE REZENDE, J. F. Avaliação de Desempenho da Técnica de Varredura em Roteamento Ad Hoc com Antenas Direcionais. Em *XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)* (maio de 2006), pp. 36–47.
- [81] FLEMING, W. J., E GALVÃO, B. S. M. C. *Projetos de Alta Frequência e Antenas Auxiliados por Microcomputadores*, 1a ed. McGraw-Hill, São Paulo, São Paulo, 1987.
- [82] RAMELLA, I. A Interferência em Redes Ad Hoc com Antenas Direcionais. Tese de Mestrado, PEE/COPPE/UFRJ, abril de 2006.
- [83] IEC. Smart Antenna Systems. International Engineering Consortium, On-Line Education, Acessada em [http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/smart\\_ant.pdf](http://www.iec.org/online/tutorials/acrobat/smart_ant.pdf), janeiro de 2008.
- [84] KOLAR, V., ROGERS, P., E ABU-GHAZALEH, N. B. Route Compaction for Directional Route Discovery in MANETs. Em *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob)* (agosto de 2005), vol. 3, pp. 101–108.
- [85] COOPER, M., E GOLDBURG, M. Intelligent Antennas: Spatial Division Multiple Access. Em *Annual Review of Communications* (1996), pp. 999–1002.
- [86] DAI, F., E WU, J. Efficient Broadcasting in Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 17, 4 (abril de 2006), 335–347.
- [87] GOSSAIN, H., CORDEIRO, C., E AGRAWAL, D. P. MDA: An Efficient Directional MAC Scheme for Wireless Ad Hoc Networks. Em *Global Telecommunications Conference (IEEE GLOBECOM)* (novembro de 2005), vol. 6, pp. 3633–3637.
- [88] ROCHA, R. R., COSTA, L. H. M. K., E DE REZENDE, J. F. Uma Análise de Desempenho de Redes Ad Hoc de Múltiplos Saltos Utilizando Antenas Direcionais. Em *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBT)* (setembro de 2004).
- [89] CHOUDHURY, R. R. *Utilizing Beamforming Antennas for Wireless Multihop Networks*. Tese de Doutorado, UIUC, julho de 2006.

- [90] GOSSAIN, H., JOSHI, T., CORDEIRO, C., E AGRAWAL, D. P. A Cross-Layer Approach for Designing Directional Routing Protocol in MANETs. Em *Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC)* (março de 2005), vol. 4, pp. 1976–1981.
- [91] FENG, K.-T., E LU, C.-T. A Location and Mobility Aware Medium Access Control Protocol for Directional Antenna-Based Mobile Ad Hoc Networks. Em *63th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC)* (setembro de 2006), vol. 1, pp. 299–303.
- [92] LI, Y., E SAFWAT, A. M. DMAC-DACA: Enabling Efficient Medium Access for Wireless Ad Hoc Networks with Directional Antennas. Em *1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing* (janeiro de 2006).
- [93] SANTIVÁÑEZ, C. A., RAMANATHAN, R., E STAVRAKAKIS, I. Making Link-State Routing Scale for Ad Hoc Networks. Em *2th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (ACM MobiHoc)* (outubro de 2001), pp. 22–32.
- [94] SANTIVÁÑEZ, C. A., E RAMANATHAN, R. Hazy Sighted Link State (HSLs) Routing: A Scalable Link State Algorithm. Em *BBN Technical Memorandum BBN-TM-1301* (agosto de 2001), pp. 1–47.
- [95] PEI, G., GERLA, M., E CHEN, T.-W. Fisheye State Routing: A Routing Scheme for Ad Hoc Wireless Networks. Em *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC)* (junho de 2000), vol. 1, pp. 70–74.
- [96] BBN TECHNOLOGIES. Acessada em <http://www.bbn.com>, fevereiro de 2008.
- [97] TIMM-GIEL, A., DHANASEKARAN, A. P. S. K., NAVDA, V., E DAS, S. R. Directional Antennas for Vehicular Communication - Experimental Results. Em *65th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC)* (abril de 2007), pp. 357–361.
- [98] ADVANCED TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE INTERNATIONAL. Acessada em <http://www.atr.jp>, fevereiro de 2008.

- [99] SADEGHI, B., KANODIA, V., SABHARWAL, A., E KNIGHTLY, E. Opportunistic Media Access for Multirate Ad Hoc Networks. Em *8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom)* (setembro de 2002), pp. 24–35.
- [100] HUITEMA, C. *Routing in the Internet*, 2a ed. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [101] SZWARCFITER, J. L., E MARKENZON, L. *Estruturas de Dados e seus Algoritmos*, 2a ed. LTC, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

# Apêndice A

## Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade

No cenário em grade os nós foram igualmente e lateralmente espaçados em cada coluna e em cada linha, conforme apresentado na Subseção 5.1.1.

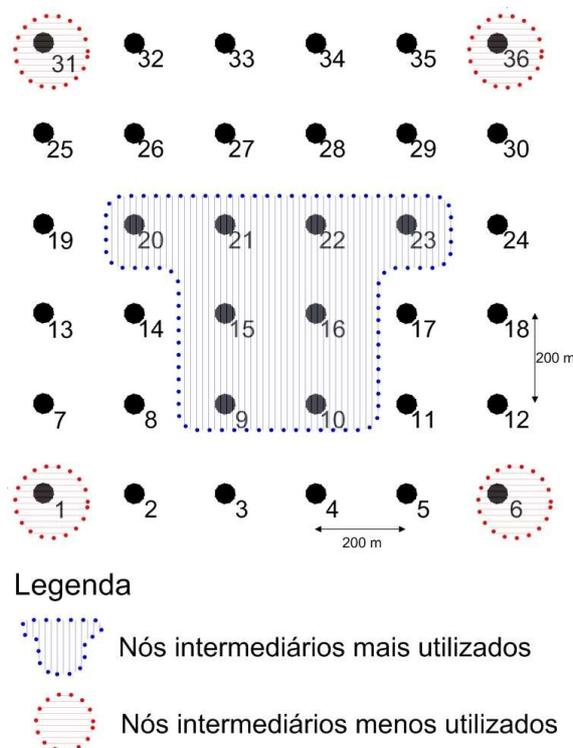


Figura A.1: Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 36 nós.

Foi observado nas simulações realizadas nesse cenário que os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados estão localizados no centro da grade e os  $n_{in}$  menos utilizados estão localizados nas extremidades. A tendência de uso maior dos nós centrais ocorre porque as distâncias mais curtas utilizam as diagonais no cenário em grade.

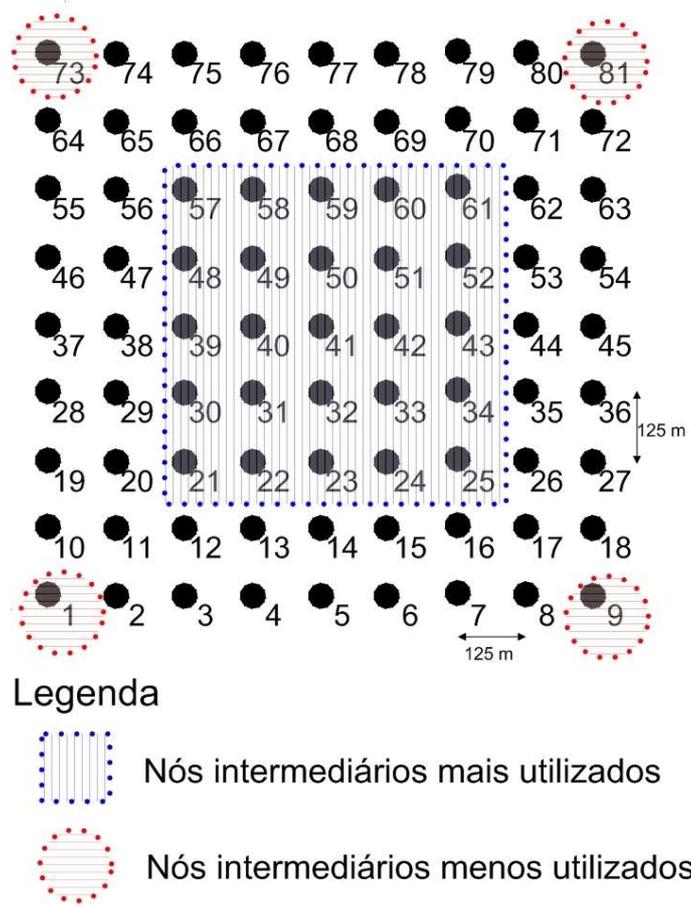


Figura A.2: Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 81 nós.

Para um cenário em grade, com 36 nós, foi observado que os nós 9, 10, 15, 16 e 20 a 23 foram os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados e os nós 1, 6, 31 e 36 foram os menos utilizados, seja utilizando antena omnidirecional, conforme apresentado na Figura 5.2(a), seja utilizando sistemas de antenas direcionais com 4 ou 16 feixes, conforme apresentado nas Figuras 5.2(b) e 5.2(c), respectivamente. Pode-se notar na Figura A.1 que os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados estão localizados no centro da grade e os  $n_{in}$  menos utilizados estão localizados nas extremidades.

Para um cenário em grade, com 81 nós, foi observado que os nós 21 a 25, 30 a 34, 39 a 43, 48 a 52 e 57 a 61 foram os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados e os nós 1, 9,

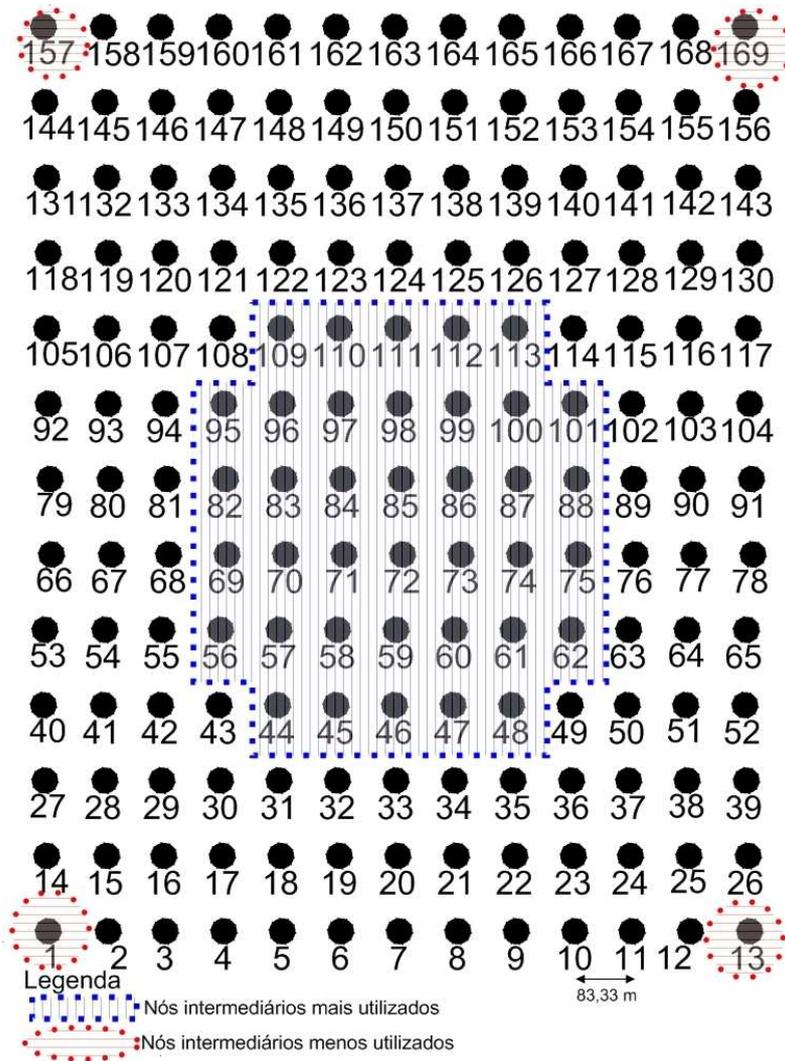


Figura A.3: Nós intermediários mais e menos utilizados no cenário em grade com 169 nós.

73 e 81 foram os menos utilizados, independentemente da utilização de antena omnidirecional, conforme apresentado na Figura 5.3(a), ou da utilização de sistemas de antenas direcionais com 4 ou 16 feixes, conforme apresentado nas Figuras 5.3(b) e 5.3(c), respectivamente. Pode-se notar na Figura A.2 que os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados estão localizados no centro da grade e os  $n_{in}$  menos utilizados estão localizados nas extremidades.

Para um cenário em grade, com 169 nós, foi observado que os nós 44 a 48, 56 a 62, 69 a 75, 82 a 88, 95 a 101 e 109 a 113 foram os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados e os nós 1, 13, 157 e 169 foram os menos utilizados nessa densidade de distribuição

de nós, independentemente da utilização de antena omnidirecional, conforme apresentado na Figura 5.4(a), ou da utilização de sistemas de antenas direcionais com 4 ou 16 feixes, conforme apresentado respectivamente nas Figuras 5.4(b) e 5.4(c). Pode-se notar na Figura A.3 que os nós intermediários  $n_{in}$  mais utilizados estão localizados no centro da grade e os  $n_{in}$  menos utilizados estão localizados nas extremidades.