



## PROTOCOLOS MULTIBANDA PARA DESCOBERTA DE VIZINHANÇA EM REDES AD HOC DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Davi da Silva Brilhante

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

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro  
Abril de 2018

PROTOCOLOS MULTIBANDA PARA DESCOBERTA DE VIZINHANÇA EM  
REDES AD HOC DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Davi da Silva Brilhante

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

Examinada por:

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Daniel Ratton Figueiredo, Ph.D.

---

Prof. Natalia Castro Fernandes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2018

Brilhante, Davi da Silva

Protocolos Multibanda para Descoberta de Vizinhança em Redes Ad Hoc de Ondas Milimétricas/Davi da Silva Brilhante. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 70 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 64 – 67.

1. Ondas Milimétricas. 2. Descoberta de Vizinhança. 3. Multibanda. I. Rezende, José Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

*Aos meus pais João e Maria  
Aparecida.*

# Agradecimentos

O primeiro agradecimento é dedicado a quem existe antes de tudo e todos, sem o qual, creio eu, não teria a capacidade de executar este trabalho e que toda boa obra feita por mãos humanas advém d'Ele.

Agradeço também à minha família, pelo apoio ao longo de toda a vida. Meus pais e irmãos resistiram às adversidades e construíram as condições necessárias para que eu chegasse até aqui. Sou grato também pela vida da Thayná Bitencourt, que esteve ao meu lado em todo o tempo.

Agradeço aos meus poucos e bons amigos, pois eles me ajudaram a manter a esperança que isso seria possível, graças às suas atitudes positivas e sábios conselhos. Em especial, agradeço a João Felipe, Luíza, Octávio e Pedro.

Agradeço ao meu orientador, José Ferreira de Rezende, que não apenas cumpriu com excelência o seu papel, mas foi muito além e contribuiu de maneira imensurável para a minha formação como profissional e indivíduo. Minha sincera gratidão a este grande professor.

Não poderia esquecer de agradecer aos meus companheiros do LAND que me motivaram e colaboraram direta e indiretamente com esse trabalho: Daniel Neto, Fábio David, Guilherme Iecker, Giulio Iacobelli, Jefferson Elbert e José Neves. Também agradeço à Carolina, pelos seus conselhos, apoio e prestatividade.

Por fim, deixo meus agradecimentos aos demais professores do LAND e a tantos outros que contribuíram de maneira especial para a minha formação.

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

## PROTOCOLOS MULTIBANDA PARA DESCOBERTA DE VIZINHANÇA EM REDES AD HOC DE ONDAS MILIMÉTRICAS

Davi da Silva Brilhante

Abril/2018

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

A propagação na banda de ondas milimétricas, ou seja, a partir de 30 GHz, é altamente suscetível à atenuação por perda de percurso. Esta acentuada atenuação é mitigada pelo uso de antenas altamente direcionais. Assim, o uso da banda de ondas milimétricas em redes ad hoc aumenta a complexidade na descoberta de vizinhos, pois se torna essencial obter a localização física dos vizinhos para proceder com a comunicação. Para lidar com esse desafio, protocolos multibanda foram propostos na literatura, os quais fazem uso de um canal de controle omnidirecional em uma banda diferente do canal de dados em ondas milimétricas. Devido às instabilidades deste último canal, o canal de controle é usado para transmissão das informações pertinentes à realização de busca dos vizinhos. Os dois protocolos propostos neste trabalho fazem uso dessa funcionalidade e visam construir o conhecimento do posicionamento de todos os nós da rede, assim como manter esta informação em caso de mudanças de posicionamento ou surgimento de obstáculos. Ambos os protocolos são comparados com um outro protocolo da literatura em termos da latência na descoberta de vizinhança.

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

MULTIBAND PROTOCOLS TO NEIGHBOR DISCOVERY AT AD HOC  
MILLIMETER WAVES NETWORKS

Davi da Silva Brilhante

April/2018

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Systems Engineering and Computer Science

Propagation at millimeter waves band, i.e. up from 30 GHz, is very susceptible to path loss attenuation, which can be mitigated using highly directional antennas. Hence, the usage of millimeter waves band in ad hoc networks increases the complexity of neighbor discovery since the knowledge of neighbors' physical location becomes essential to proceed with communication. To face these challenges, multi-band protocols have been proposed, which uses an omnidirectional control channel in a different band from millimeter waves data channel. Due to unstable characteristics of millimeter waves channel, the control channel is used to transmit information concerning neighbor discovery. The two protocols proposed in this work rely on this feature and aim to build a global knowledge about nodes' location as well as to maintain it in the case of nodes mobility or if some obstacle arises. Both protocols are compared with another protocol found in the literature in terms of delay on the neighbor discovery.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	4
1.3 Metodologia . . . . .	5
1.4 Organização . . . . .	6
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>7</b>
2.1 Ondas Milimétricas . . . . .	7
2.1.1 Propagação em Ondas Milimétricas . . . . .	8
2.1.2 Direcionalidade . . . . .	9
2.1.3 Bloqueio . . . . .	10
2.1.4 Aplicações de Ondas Milimétricas . . . . .	10
2.2 <i>Beamforming</i> . . . . .	12
2.3 Descoberta de Vizinhança . . . . .	14
<b>3 Protocolos Multibanda</b>	<b>19</b>
3.1 Protocolo MuNDi MaPP . . . . .	19
3.1.1 Formação do Mapa . . . . .	23
3.1.2 Mapeamento Feixe-Ângulo . . . . .	26
3.1.3 Probabilidade de Erro na Estimativa do Feixe . . . . .	27
3.2 Protocolo Go MuNDi . . . . .	33
3.3 Clusterização . . . . .	35
3.4 Manutenção da Rede . . . . .	39



<b>4</b>	<b>Simulações e Resultados</b>	<b>41</b>
4.1	Cenário de Simulação . . . . .	41
4.2	Simulador . . . . .	42
4.3	Métricas Avaliadas . . . . .	44
4.4	Descoberta de Vizinhança . . . . .	45
4.4.1	Taxa de Acertos Primários . . . . .	45
4.4.2	Tempo de Descoberta Total . . . . .	46
4.4.3	Tempo Médio de Descoberta por Par . . . . .	49
4.5	Clusterização . . . . .	51
4.6	Bloqueio . . . . .	53
4.6.1	Tempo Total de Transmissão . . . . .	54
4.6.2	Tempo de Interrupção da Rede . . . . .	54
4.6.3	Taxa de Quadros Transmitidos com Sucesso . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>61</b>
5.1	Conclusão . . . . .	61
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	63
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Análise do Tempo Médio de Transmissão das Mensagens de <i>Feed-back</i></b>	<b>68</b>

# Lista de Figuras

2.1	Absorção atmosférica e molecular das ondas eletromagnéticas [1] . . . . .	8
2.2	Exemplo de rede com reuso espacial . . . . .	9
2.3	Rede de ondas milimétricas usada no <i>backhaul</i> de rede de dados móveis	11
2.4	Padrão de radiação de uma antena direcional [2] . . . . .	13
2.5	Comparação entre redes Direcional-Omnidirecional (esquerda) e Direcional-Direcional (direita) . . . . .	15
2.6	Representação do cenário multibanda . . . . .	16
2.7	Fluxo de mensagens do esquema MDND . . . . .	17
3.1	Diagrama do tempo do Protocolo MuNDi MaPP . . . . .	22
3.2	Disposição dos nós $i$ e $j$ em relação ao líder . . . . .	24
3.3	Exemplo de mapeamento feixe-ângulo . . . . .	27
3.4	Erro na estimativa do ângulo causado por erros na medida da distância	28
3.5	Em azul, gráfico da equação (3.19) e em vermelho, histograma de 1000 amostras geradas a partir de duas distribuições uniformes definidas conforme a equação 3.15 e substituindo $Z$ em 3.16 . . . . .	30
3.6	$\beta_1$ e $\beta_2$ em relação a um nó . . . . .	31
3.7	Probabilidade de erro vs largura do feixe ( <i>beamwidth</i> )(a) e o erro considerado na medida da distância $\varepsilon$ (b), para o caso em que $d_i = 3m$ $d_j = 5m$ . . . . .	33
3.8	Nó enviando quadros em cada um dos feixes de sua antena para o líder, mas que são bisbilhotados por outros dois nós na vizinhança (a) e os <i>feedbacks</i> transmitidos na banda de controle ao nó bisbilhotado (b)	34
3.9	Diagrama do tempo do Protocolo Go MuNDi . . . . .	36
3.10	Esquema de distribuição de Canais definido pelo FCC . . . . .	37
3.11	(a) <i>Clusters</i> divididos e colíderes de cluster estabelecidos (círculos pretos); (b) Colíderes realizando <i>beamforming</i> segundo a ordem pre- determinada; (c) Colíderes de <i>cluster</i> realizando <i>beamforming</i> entre si e trocando os mapas de seus clusters; (d) colíderes transmitindo os mapas completos da rede no canal de controle atribuído ao seu <i>cluster</i>	38

3.12	Seleção de <i>relay</i> mal sucedida devida ao nó selecionado não cumprir o critério de ângulo (área em vermelho)(a) e seleção de <i>relay</i> bem sucedida, pois o nó selecionado está dentro do intervalo de ângulo desejado (área em verde)(b). . . . .	40
4.1	(a) Taxa de acertos primários quanto ao número de nós e (b) Taxa de acertos primários em relação ao número de feixes comparando acertos primários e acertos de até um feixe . . . . .	47
4.2	Tempo total de descoberta de vizinhança quanto ao número de nós considerando os protocolos propostos e o MDND. Número de feixes igual a 8. . . . .	48
4.3	Tempo total de descoberta de vizinhança quanto ao número de nós considerando os protocolos propostos e uma modificação, que leva em consideração os feixes adjacentes. Número de feixes igual a 8. . . . .	49
4.4	Tempo total de descoberta de vizinhança quanto ao número de feixes considerando os protocolos propostos e uma modificação, que leva em consideração os feixes adjacentes. Número de nós igual a 15. . . . .	50
4.5	Tempo médio de descoberta entre um par de nós <i>versus</i> número de nós. Número de feixes igual a 8. . . . .	51
4.6	Tempo médio de descoberta entre um par de nós <i>versus</i> número de feixes. Número de nós igual a 15. . . . .	51
4.7	Tempo total pelo número de nós comparando a proposta MuNDi MaPP com uma versão em <i>clusters</i> . Número de feixes igual a 8. . . . .	52
4.8	Tempo total pelo número de feixes comparando a proposta MuNDi MaPP com uma versão em <i>clusters</i> . Número de nós igual a 30. . . . .	52
4.9	Detalhe do <i>overhead</i> causado pelo MuNDi MaPP padrão e pela versão com <i>clusters</i> . . . . .	53
4.10	Taxa de acertos primários comparando a versão padrão do MuNDi MaPP com a versão com <i>clusters</i> . . . . .	53
4.11	Tempo total gasto nas transmissões pelo número de nós . . . . .	55
4.12	Tempo total gasto nas transmissões pelo número de obstáculos . . . . .	55
4.13	Tempo total gasto nas transmissões pela velocidade dos obstáculos . . . . .	56
4.14	Tempo total gasto nas transmissões pela taxa de chegada de pacotes . . . . .	56
4.15	Duração do bloqueio pelo número de obstáculos . . . . .	57
4.16	Duração do bloqueio pela velocidade dos obstáculos . . . . .	57
4.17	Amostra dos bloqueios durante as simulações, com <i>relay</i> (a) e sem <i>relay</i> (b) . . . . .	58
4.18	Amostra dos bloqueios durante as simulações, com <i>relay</i> (a) e sem <i>relay</i> (b) . . . . .	58

4.19	Amostra dos bloqueios durante as simulações, com <i>relay</i> (a) e sem <i>relay</i> (b).	58
4.20	Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs número de nós	59
4.21	Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs número de obstáculos	59
4.22	Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs velocidade dos obstáculos	59
4.23	Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs taxa de chegada de pacotes	60
A.1	(a) Comparação entre os resultados da simulação e do modelo proposto; (b) Porcentagem de pacotes entregues com Janela de Contenção igual a 1024	70

# Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros utilizados na simulação dos protocolos multibanda MuNDi MaPP, Go MuNDi e MDND . . . . .	43
A.1	Parâmetros utilizados na simulação da Transmissão das Mensagens de <i>Feedback</i> . . . . .	70

# Lista de Símbolos

$\alpha_{ij}$	Ângulo formado entre as retas que ligam o líder e os nós $i$ e $j$ , p. 24
$t_{mensagem}(i, j)$	Tempo de envio de uma mensagem do nó $i$ para o nó $j$ , p. 48
$BW$	<i>beamwidth</i> , ou abertura, da antena direcional, p. 30
$B_i$	Feixe que resultou em maior SNR durante um <i>beamforming</i> , p. 21
$C_i$	Número máximo de feixes das antenas dos nós rede, p. 21
$D_i$	Variável aleatória da medida da distância entre o líder e o nó $i$ , p. 28
$O(\cdot)$	Complexidade de um algoritmo no pior caso, p. 20
$P_e$	Probabilidade de erro na estimativa de um feixe, p. 31
$T$	Variável aleatória que expressa a cotangente do ângulo do ângulo $\theta_{ij}$ , p. 28
$W(i, j)$	Função que descreve o número de acertos primários, p. 46
$X(i, j)$	Função que descreve o número de acertos adjacentes, p. 46
$Z$	Variável aleatória quociente de duas variáveis aleatórias uniformes, p. 29
$\#$	Número de elementos de um conjunto, p. 46
$\hat{\alpha}_i$	Ângulo que resultou em maior SNR durante um <i>beamforming</i> , p. 21
$\beta_1$	Ângulo limitante inferior de um feixe, p. 27
$\beta_2$	Ângulo limitante superior de um feixe, p. 27

$\hat{\theta}_{ij}$	Ângulo de transmissão do nó $i$ para o nó $j$ corrigido para o norte de orientação do nó $i$ , p. 26
$\hat{d}$	Distância real entre o líder e o nó $i$ , p. 29
$\lambda$	Média de uma distribuição de Poisson, p. 43
$\mathcal{A}$ , $\mathcal{B}$ e $\mathcal{C}$	Constantes limites de integração da probabilidade de erro, p. 31
$\theta_{ij}$	Ângulo que o nó $i$ usa para transmitir ao nó $j$ , p. 24
$\theta_{il}$	Ângulo formado entre o eixo de orientação do nó $i$ e a reta formada com o líder, p. 24
$\varepsilon$	Erro percentual na medida da distância entre o nó $i$ e o líder, em torno de $\hat{d}$ , p. 29
$d_i$	Distância medida entre o nó líder e o nó $i$ , p. 24
$d_{ij}$	Distância entre os nós $i$ e $j$ , p. 24
$f_D(d)$	Função de Distribuição de Probabilidade da variável aleatória $D_i$ , p. 28
$gamma$	Ângulo que define o início do intervalo onde um nó pode ser candidato a <i>relay</i> , p. 40
$id_i$	Identificador único de um nó, p. 21
$n_{feixes}$	Número de feixes das antenas direcionais dos nós, p. 26
$s_i$	Senha que ordena os <i>beamformings</i> , p. 21
$t_{beamforming}$	Tempo para realização de um <i>beamforming</i> , p. 48
$t_{controle}(i, j)$	Tempo da etapa de controle do protocolo MDND, p. 48
$t_{elege-líder}$	Tempo para eleição de um líder na rede, p. 48
$t_{feedback}$	Tempo de envio de todas as mensagens de <i>feedback</i> do protocolo Go MuNDi, p. 48
$t_{tx-mapa}$	Tempo de transmissão do mapa da rede na banda de controle em <i>unicast</i> , p. 48
$t_{tx-senha}$	Tempo de transmissão das senhas de ordenação dos nós na banda de controle em <i>unicast</i> , p. 48

Ghz Giga Hertz, p. 1

K Conjunto de nós que compõem uma rede, p. 20



# Lista de Abreviaturas

ACK	<i>Acknowledgement</i> , p. 21
AP	<i>Access Point</i> , p. 16
BRP	<i>Beam Refinement Protocol</i> , p. 13
CSMA	<i>Carrier Sensing Multiple Access</i> , p. 3
CTS	<i>Clear to Send</i> , p. 16
D2D	<i>Device to Device</i> , p. 11
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> , p. 16
DD	Direcional-Direcional, p. 14
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i> , p. 43
DO	Direcional-Omnidirecional, p. 14
DTI	<i>Data Transfer Interval</i> , p. 3
ECMA	<i>European Computer Manufactures Association</i> , p. 12
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , p. 12
GPS	<i>Global Positioning System</i> , p. 20
Gbps	Giga <i>bits</i> por segundo, p. 19
Go MuNDi	<i>Gossip Multiband Neighbor Discovery</i> , p. 4
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 11
LoS	<i>Line of Sight</i> , p. 8
MDND	<i>Multiband Directional Neighbor Discovery</i> , p. 3
MuNDi MaPP	<i>Multiband Neighbor Discovery Map Propagation based Protocol</i> , p. 4

OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , p. 4
RSV REQ	<i>Reservation Request</i> , p. 22
RSV RSP	<i>Reservation Response</i> , p. 22
RTS	<i>Request to Send</i> , p. 16
RXSS	<i>Receive Sector Sweep</i> , p. 13
SBIFS	<i>Short Beamforming Interframe Space</i> , p. 43
SIFS	<i>Short Interframe Space</i> , p. 23
SLS	<i>Sector Level Sweeping</i> , p. 13
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i> , p. 12
SSW	<i>Sector Sweeping</i> , p. 13
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , p. 3
TXSS	<i>Transmit Sector Sweep</i> , p. 13
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , p. 8
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , p. 11
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , p. 12
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> , p. 20

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contexto

Os dispositivos móveis têm evoluído e se popularizado ao longo dos últimos anos. Isso fez aumentar a demanda por comunicação sem fio que atendesse aos requisitos das aplicações hoje disponíveis nos dispositivos móveis [3]. O efeito deste crescimento foi a superpopulação das faixas do espectro de frequências, principalmente as não licenciadas.

Com o objetivo de proporcionar um aumento nas taxas de transferência das comunicações sem fio, novas faixas de frequência, até então consideradas inacessíveis devido à dificuldade de propagação encontradas, começaram a ser estudadas. Foram escolhidas faixas do espectro menos utilizadas e com possibilidade de oferecer canais com maior largura de banda. Junto a isso, foram empregadas técnicas de modulação e codificação que proporcionassem maior eficiência espectral, ou seja, mais informação transmitida para a mesma banda de espectro disponível. As redes sem fio que unem essas características são capazes de alcançar taxas de transferência da ordem de Gigabit por segundo.

Uma das faixas de frequência utilizadas com o propósito de atingir taxas de transferências elevadas é a banda de *ondas milimétricas*. Essa faixa de frequências, que vai de 30 a 300 GHz, era originalmente utilizada por radares e comunicação satelital e hoje começa a ser utilizada como banda não licenciada e em comunicações móveis.

No entanto, a banda de ondas milimétricas apresenta algumas particularidades, não encontradas em bandas de frequência mais baixa. Sinais eletromagnéticos sofrem aumento na atenuação com o aumento na frequência do sinal transmitido. Este aumento é causado pelas partículas presentes na atmosfera [4] e torna a perda de percurso um fator extremamente limitante para o alcance dos sinais nessa faixa de frequências.

A perda de percurso de um enlace na faixa de ondas milimétricas precisa ser compensada de algum modo para que seja viável realizar uma transmissão. A maneira encontrada foi utilizar antenas direcionais de alto ganho. Essas antenas direcionais têm maior ganho quanto menor for a abertura do sinal transmitido. Ou seja, quanto mais direcional for a antena, maior ganho ela oferece.

Quando um nó utiliza uma antena omnidirecional, as mensagens são transmitidas em todas as direções, e todos os nós vizinhos ao alcance da antena recebem as mensagens transmitidas. Ao empregar antenas direcionais, como no caso de redes na banda de ondas milimétricas, ao transmitir uma mensagem, apenas os nós que estiverem dentro da abertura da antena irão recebê-las. A surdez é um efeito inerente ao emprego de antenas direcionais que inviabiliza a comunicação entre os dispositivos. Quando dois dispositivos irão formar um par para comunicação, se um dos dispositivos não está corretamente direcionado para o outro no momento da transmissão, diz-se que esse dispositivo está surdo para o outro [5]. Por isso, é preciso que haja na rede um mecanismo de *descoberta de vizinhança*, para que os nós encontrem a melhor direção para transmitir a cada vizinho.

A descoberta de vizinhança é um processo essencial em redes com antenas direcionais. Contudo, a descoberta de vizinhança pode ser realizada de forma ineficiente e tomar bastante tempo para ser realizada. Em uma abordagem ingênua, considere que cada nó transmite uma mensagem de descoberta de vizinhança em cada feixe de sua antena direcional e espera a resposta dos vizinhos localizados em cada feixe. Mesmo em um mecanismo síncrono e sem colisões, essa abordagem potencialmente leva ao envio de um número elevado de mensagens e longas esperas por respostas. Por isso, há a necessidade de mecanismos que tornem a descoberta de vizinhança mais eficiente.

As abordagens mais comuns para a descoberta de vizinhança quanto a direcionalidade são Direcional-Omnidirecional e Direcional-Direcional. Na primeira delas, o nó a procura de um vizinho permanece direcional, enquanto os demais nós permanecem omnidirecionais. A configuração Direcional-Omnidirecional simplifica o encontro entre transmissor e receptor, uma vez que o direcionamento só tem de ser feito em uma das partes, enquanto a outra parte permanece omnidirecional e não necessita configurar-se direcionalmente.

No modo Direcional-Direcional, todos os nós estão em modo direcional, ou seja, as antenas direcionais se configuram com ganho máximo. Tanto na transmissão quanto na recepção os nós chaveiam entre seus feixes, transmitindo mensagens em busca dos seus vizinhos ou buscando receber mensagens de um nó vizinho à sua procura. Todavia, o encontro entre um par de nós pode tornar-se bastante demorado, devido ao fato de os nós estarem constantemente chaveando entre seus feixes.

Portanto, a descoberta de vizinhança precisa de técnicas eficientes e estratégias

bem planejadas para que não consuma muito tempo, impactando o desempenho da rede como um todo. Duas estratégias são largamente utilizadas para aumentar a eficiência da descoberta de vizinhança em redes de ondas milimétricas. A primeira delas é a cooperação. A cooperação pode ocorrer, por exemplo, através de um terceiro nó que atuando como *relay* recupera um enlace intermediando a comunicação entre transmissor e receptor, [6] ou compartilhando com os outros nós da rede informações a respeito de nós já descobertos[7].

Outra estratégia adotada é bisbilhotar pacotes de maneira oportunística [8, 9]. Ao bisbilhotar mensagens os nós podem adquirir conhecimento sobre a localização dos seus vizinhos de forma mais rápida. Em geral, a informação adquirida através da bisbilhotagem é posteriormente validada.

Essas duas estratégias, contudo, podem ainda estar sujeitas a fatores como surdez ou a intermitência do canal. Por exemplo, o movimento de indivíduos e objetos pode causar bloqueio e interrupção total de um enlace em ondas milimétricas. O bloqueio pode inviabilizar o processo de descoberta de vizinhança ou ainda invalidar informações obtidas através do processo de descoberta. Por isso, o objetivo deste trabalho é definir protocolos que utilizam uma banda auxiliar à banda de ondas milimétricas. Os protocolos que operam em mais de uma banda são chamados de *multibanda*.

No contexto de ondas milimétricas, os protocolos multibanda recorrem ao uso de uma banda que opere com antenas omnidirecionais. Essa banda funciona como canal de controle, não submetendo informações críticas para a formação e recuperação da rede às variações repentinas do canal em ondas milimétricas. Por outro lado, uma vez que a viabilidade da transmissão foi garantida pela banda de controle e os mecanismos do protocolo, a transmissão de dados ocorre na banda de ondas milimétricas, com alta taxa de transferência que essa banda é capaz de proporcionar.

A abordagem multibanda foi explorada em [10] na proposta do protocolo de descoberta de vizinhança *Multiband Directional Neighbor Discovery*, MDND. Esse protocolo define procedimentos para que os nós consultem um Ponto de Acesso e adquiram informações preliminares sobre os seus vizinhos na banda de controle, empregando suas antenas omnidirecionais. Essas informações preliminares consistem em: quais nós possuem uma interface operando na banda de ondas milimétricas, qual período será alocado pelo ponto de acesso para realização da transmissão e o número de feixes das antenas direcionais. Quando o período de serviço<sup>1</sup> de uma transmissão se inicia, os nós que compõem essa transmissão passam a utilizar antenas direcionais

---

<sup>1</sup>período de serviço é o nome dado à janela de tempo alocada pelo ponto de acesso durante o Intervalo de Transmissão de Dados (*Data Transfer Interval*, DTI) para uma transmissão quando o Padrão IEEE 802.11 utiliza múltiplo acesso por divisão do tempo (*Time Division Multiple Access*, TDMA). O outro modo de acesso ao meio é o aleatório por sensoramento de portadora, o CSMA (*Carrier Sensing Multiple Access*).

na banda de ondas milimétricas encontrando os ângulos de transmissão e recepção para suas antenas e transmitindo dados em alta taxa de transferência de dados.

Os protocolos de descoberta de vizinhança em ondas milimétricas, por exemplo, o MDND, executam descobertas par a par, o que pode tomar muito tempo. No que tange à banda de controle, realizar sucessivos acessos pode exigir que um período de tempo longo seja empenhado. Esses fatores podem impactar o tempo para que a descoberta de vizinhança seja completada, por isso, nosso objetivo é projetar protocolos que construam o conhecimento de toda a rede e minimizem os acessos à banda de controle, resultando em descobertas de vizinhança que tomem menos tempo e que permitam a transmissão de um nó para qualquer outro.

## 1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é fazer uso da estratégia multibanda propondo protocolos de descoberta de vizinhança que estabeleçam o conhecimento da localização dos nós da rede. Uma vez que a descoberta de vizinhança é um dos elementos chaves para o funcionamento das redes em ondas milimétricas e as informações obtidas através da descoberta são essenciais para a formação e manutenção da rede, esses protocolos visam contornar as condições impostas pelo canal de ondas milimétricas à realização da descoberta de vizinhança ao trafegar as mensagens de controle por um canal onde se pode empregar antenas omnidirecionais.

Sendo assim, neste trabalho propomos dois protocolos multibanda diferentes. O primeiro protocolo a ser apresentado MuNDi MaPP (*Multiband Neighbor Discovery Map Propagation based Protocol*)[11], faz uso de um mapa de ângulos e distâncias construído e distribuído por um nó central, evitando que os demais nós ocupem o meio de transmissão e busquem por informações repetidas. O nó central, também chamado de líder, controla a rede através da banda de controle, utilizando transmissões omnidirecionais. O segundo protocolo Go MuNDi (*Gossip Muntiband Neighbor Discovery*)[11], parte da mesma premissa do anterior ao utilizar um nó líder, mas não monta ou divulga mapas, ao invés disso os nós oportunisticamente podem obter informações de ângulo e distância enquanto um nó troca essas informações com o líder.

Tendo em vista reduzir ainda mais o tempo levado para a descoberta total da rede propomos ainda um esquema para paralelizar o protocolo MuNDi MaPP. O paralelismo é feito dividindo *clusters* de nós entre os diferentes canais ortogonais<sup>2</sup> disponíveis, tanto na banda de controle quanto na banda de dados. Em canais

---

<sup>2</sup>Ortogonalidade em frequência é a propriedade que dois canais possuem de não interferirem entre si, ou seja, as frequências nas extremidades destes canais não se sobrepõem com potência relevante. Esse efeito pode ser especialmente observado em sinais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), por exemplo.

separados os nós em cada *cluster* podem efetuar as diversas operações que o protocolo define sem que haja interferência entre os *clusters*. Assim como o MuNDi MaPP, essa proposta depende da formação e divulgação de mapas, que inicialmente são formados localmente em cada *cluster* e posteriormente são expandidos para toda a rede.

A divulgação de mapas fornece aos nós o conhecimento total da rede e proporciona a descoberta de vizinhança inicial da rede. No entanto, em ambientes reais os enlaces são submetidos a condições de propagação severas e situações simples, como uma pessoa caminhando em uma sala ou a disposição dos objetos e paredes, podem afetar os enlaces em ondas milimétricas. Tendo em vista a fundamentação dos mecanismos de propagação de mapas em ondas milimétricas, propomos um mecanismo de múltiplos saltos para recuperação de enlaces. Nesse mecanismo, a partir do mapa da rede os nós escolhem um nó para redirecionar seus pacotes (*relay*) com objetivo de alcançar o receptor que está bloqueado para o transmissor.

### 1.3 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho foi comparar os protocolos propostos com outros existentes na literatura através de simulações. As simulações foram feitas na linguagem Python, simulando o comportamento de cada protocolo e as aleatoriedades presentes na rede, por exemplo, imprecisão nas medidas realizadas. As simulações foram repetidas exaustivamente e os resultados foram gerados utilizando intervalos de confiança de 95%.

As métricas comparadas foram o tempo médio de descoberta por par e tempo médio de descoberta total, além da taxa de acertos primários, que mede o quanto as informações de localização obtidas são precisas a ponto de não necessitarem de correções ao serem utilizadas para transmissões. As duas primeiras métricas mantêm compatibilidade com a literatura, permitindo a comparação com os trabalhos citados. Os protocolos aqui propostos diminuíram o tempo levado para a descoberta total da rede em cerca de 75% em uma rede com 25 nós.

Testamos ainda o desempenho dos protocolos quando estes estão sujeitos à mobilidade de objetos, que geram bloqueios nos enlaces. Os bloqueios causam total interrupção dos enlaces, resultando em transmissões intermitentes. Dois modos dos protocolos que propagam mapas são avaliados, um que estabelece comunicações em dois saltos quando bloqueios são detectados e outro que não utiliza nenhum mecanismo para evitar bloqueios. As avaliações são realizadas considerando o tempo até que determinada quantidade de pacotes seja transmitida, o tempo de interrupção da rede e a porcentagem de pacotes transmitidos com sucesso.

## 1.4 Organização

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 trataremos dos conceitos chaves para compreensão deste trabalho, abordando os principais aspectos sobre ondas milimétricas e descoberta de vizinhança e apresentando a literatura; no Capítulo 3 apresentamos os protocolos desenvolvidos e analisamos matematicamente alguns aspectos destes protocolos; As simulações e os resultados estão descritos no Capítulo 4, onde discutimos os resultados obtidos e comparamos os protocolos aqui propostos com outros presentes na literatura; As conclusões deste trabalho e os trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 5.



# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo, iremos tratar dos aspectos físicos em se utilizar a banda de ondas milimétricas, tais como as características de propagação dos sinais nessa faixa de frequências e a necessidade de utilizar antenas direcionais para compensar a perda que o sinal sofre. Nossa atenção está voltada para os sinais em torno de 60 GHz, faixa em que se concentram padrões de comunicação não licenciados. Também abordaremos nesse capítulo conceitos básicos a respeito do *beamforming*, uma técnica essencial para o funcionamento de vetores de antenas, e introduziremos o conceito de descoberta de vizinhança no âmbito de sinais na banda de ondas milimétricas e redes sem fio com antenas direcionais.

### 2.1 Ondas Milimétricas

A evolução dos dispositivos móveis, agora capazes de suportar diversos tipos de mídia, impulsionou a busca por meios de atender essas novas demandas. Junto a isso, a escassez de espectro e a super população das frequências, principalmente abaixo de 3 GHz, levou à exploração de novas bandas do espectro, como a banda de ondas milimétricas. Entre as motivações para se usar a banda de ondas milimétricas estão a disponibilidade de espectro livre, a interferência reduzida resultante do uso de antenas direcionais e a possibilidade de suportar altas taxas de transmissão, da ordem de Giga *bits* por segundo. No entanto, o uso da banda de ondas milimétricas, trouxe à tona os diversos desafios de propagação em altas frequências, como veremos adiante.

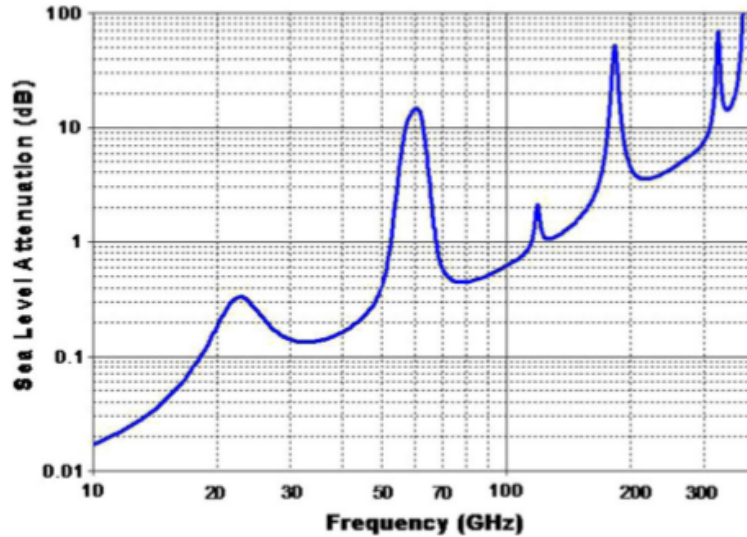


Figura 2.1: Absorção atmosférica e molecular das ondas eletromagnéticas [1]

### 2.1.1 Propagação em Ondas Milimétricas

As características eletromagnéticas de sinais na banda de ondas milimétricas diferem das encontradas em sinais com frequência na faixa UHF<sup>1</sup>, por exemplo. Assim, a principal dificuldade encontrada para propagar sinais na banda de ondas milimétricas é a alta perda de propagação. Essa perda é causada pela absorção do sinal por moléculas presentes na atmosfera [1]. A atenuação experimentada pelos sinais nessa faixa de frequências chega a ser 15 dB maior que a atenuação encontrada em sinais cujas portadoras estão em frequências mais baixas do espectro, como mostrado na Figura 2.1. A fim de comparação, no modelo de propagação de Espaço Livre [12], a perda aumenta com o quadrado do comprimento de onda, portanto, a atenuação por espaço livre na frequência de 5 GHz é 144 vezes menor que em 60 GHz.

O campo eletromagnético em frequências mais baixas, como 2.4 GHz, apresenta diversas componentes, fruto das múltiplas reflexões e difrações que o sinal sofre até chegar ao receptor. Na banda de ondas milimétricas, a atenuação severa que os sinais sofrem, em especial em torno de 60 GHz, torna o campo eletromagnético mais simples, composto apenas por algumas reflexões. Alguns trabalhos assumem que o sinal direto e as reflexões primárias<sup>2</sup> compõem a maior parte do sinal [13]. A maioria, no entanto, assume que a propagação de sinais em ondas milimétricas é apenas *Line of Sight*<sup>3</sup> (LoS). Ou seja, apenas o sinal que sai do transmissor com

<sup>1</sup>UHF é a faixa de frequências denominada *Ultra High Frequency*, que se estende de 300 MHz a 3 GHz.

<sup>2</sup>Compreende-se por reflexões primárias as componente de reflexão originadas do encontro da frente de onda do sinal original com uma superfície.

<sup>3</sup>Tipo de propagação em que o transmissor e o receptor estão em visada um do outro, sem que

visada direta para o receptor será recebido.

## 2.1.2 Direcionalidade

Como dito anteriormente, os sinais na banda de ondas milimétricas sofrem com alta perda de percurso. Essa perda significativa limita o alcance dos sinais transmitidos. Assim, para que o raio de transmissão dos sinais em ondas milimétricas atinja uma distância mínima, é necessária a utilização de antenas direcionais. As antenas direcionais proporcionam alto ganho em uma direção e dentro de uma abertura especificada, que chamaremos de *beamwidth*. Comparando novamente, ao aplicar as frequências de 60 e 5 GHz no modelo de ganho de antenas com relação a abertura [14], no qual o ganho da antena é inversamente proporcional ao quadrado comprimento de onda, temos que uma antena com a mesma abertura possui ganho em 60 GHz 144 vezes maior do que em 5 GHz.

O uso de antenas direcionais traz consigo outra vantagem. A correta utilização de antenas direcionais pode levar ao reuso espacial. O reuso espacial utiliza as diferentes localizações dos nós para que estes possam transmitir simultaneamente no mesmo canal, como exemplificado na Figura 2.2. A vantagem de aplicar o reuso espacial é aumentar o *goodput* da rede ao possibilitar transmissões simultâneas.

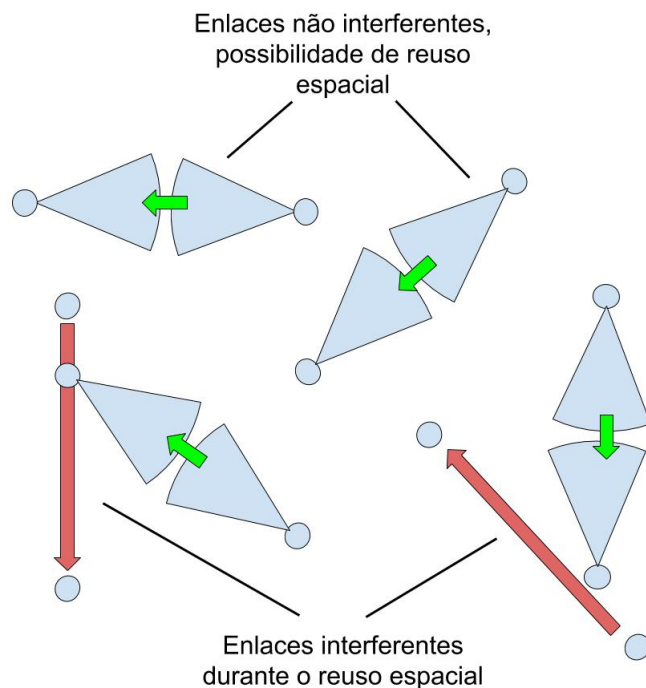


Figura 2.2: Exemplo de rede com reuso espacial

---

haja nenhum obstáculo entre eles.

### 2.1.3 Bloqueio

Apesar do ganho proporcionado pelas antenas direcionais, os sinais na banda de ondas milimétricas, em geral, não são capazes de atravessar ou contornar objetos. Quando um sinal encontra uma superfície perpendicularmente, cada ponto da frente de onda do sinal onde a superfície se localiza dá origem a uma nova fonte de sinal pontual. A soma dessas fontes pontuais forma uma nova frente de onda. Esse fenômeno é conhecido por difração [15]. Devido ao comprimento de onda da ordem de milímetros e a alta direcionalidade, poucas superfícies permitem que os sinais na banda de ondas milimétricas difratem [2].

Por isso, os enlaces em ondas milimétricas são frequentemente bloqueados por completo pelos obstáculos que se encontram na trajetória do sinal LoS. Alguns exemplos de valores de atenuação por bloqueio foram medidos, como o corpo humano, o qual pode causar até 40dB de atenuação [16], e colunas de tijolo chegando até 28dB [17]. Collogne et al. [18] avalia a influência da atividade humana em redes de ondas milimétricas em 60 GHz, concluindo que a duração do bloqueio causado por um corpo humano é muito longa se comparada ao período de duração de um símbolo em redes com altas taxas de dados.

A solução geralmente adotada na literatura para o bloqueio é o redirecionamento (*relay*), ou seja, transmitir em múltiplos saltos [19]. Na técnica de redirecionamento, ao detectar um bloqueio, o transmissor seleciona um nó dentre os vizinhos para retransmitir seus dados ao receptor. É importante que esse nó selecionado para retransmitir também não esteja sofrendo bloqueio.

O bloqueio é em geral detectado pela ausência de resposta do nó bloqueado à um quadro enviado. Outra técnica de detecção de bloqueio foi aplicada em [20], empregando um processo de detecção nas bandas de 2.4 ou 5 GHz. A partir dessa técnica foi possível determinar se uma direção está bloqueada ou não com até 97,8% acurácia, em média.

### 2.1.4 Aplicações de Ondas Milimétricas

Com espectro abundante, a banda de ondas milimétricas tem sua aplicação cogitada em diversas tecnologias onde há grande demanda por banda. Alguns estudos [1, 21, 22] apontam a banda de ondas milimétricas como principal viabilizadora da tecnologia 5G, que traz requisitos estritos de retardo, banda e número de usuários por estação base.

Uma das aplicações é utilizar enlaces em ondas milimétricas no *backhaul*<sup>4</sup> e na comunicação entre estações base de redes de telefonia móvel. Com canais largos e custos de implantação mais baixos em relação aos enlaces de fibras ópticas, a

---

<sup>4</sup>Nome dado às redes que interconectam as estações base aos seus respectivos controladores.

banda de ondas milimétricas torna-se uma opção viável ao *backhaul* em fibra óptica, formando um *backhaul* sem fio (Figura 2.3).

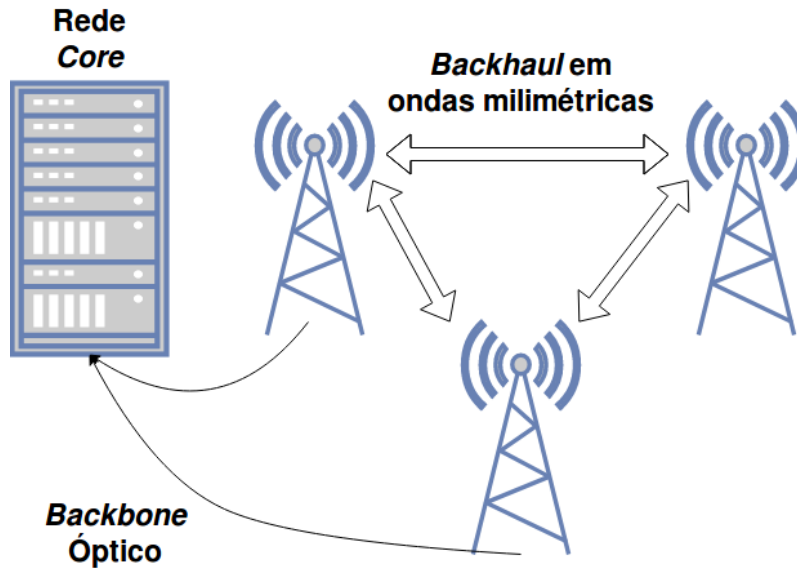


Figura 2.3: Rede de ondas milimétricas usada no *backhaul* de rede de dados móveis

Na perspectiva do usuário, o foco da utilização de ondas milimétricas está voltado para *small cells*. Operando principalmente nas frequências de 28, 38, 71-76 e 81-86 GHz, essas bandas são capazes de fornecer até 100 Mbps na borda das células e retardo abaixo de 1.0ms [23]. Como mostrado na Figura 2.1, as faixas de frequências citadas estão fora do pico de atenuação. Pretende-se alocar nessas bandas serviços licenciados, principalmente comunicação celular. Ao realizar experimentos nessas bandas, em ambientes externos, [22] e [24] mostram que é possível que micro células e pico células cubram um raio entre 100 e 200 m em ambientes urbanos.

Uma aplicação já implementada por alguns fabricantes é o uso da banda de ondas milimétricas em comunicações *Device to Device* (D2D). Transmissões de áudio e vídeo sem compressão para dispositivos multimídia como televisores e *Home Theaters* substituem os inúmeros cabos atualmente utilizados. Somado a isso, *dock stations* têm sido produzidas para dar suporte a essas e outras aplicações em *laptops*.

O IEEE padronizou um protocolo nessa banda, chamado de 802.11ad. Esse protocolo foi desenhado sobre os protocolos existentes de *Wireless Local Area Network* (WLAN), estendendo os padrões já consolidados para a banda de ondas milimétricas. A portadora deste padrão está localizada em torno de 60 GHz, mas ainda é compatível com os padrões anteriores, cujas portadoras são 2.4 ou 5 GHz [25]. Essa compatibilidade permite a existência de um mecanismo de transferência no IEEE 802.11ad, da banda de ondas milimétricas para as bandas de 2.4 ou 5 GHz.

Outros padrões também foram abertos na banda de ondas milimétricas. O IEEE

802.15.3c [26], um padrão voltado para *Wireless Personal Area Network* (WPAN), operando em um raio de até 10m [27] e com taxas de transmissão que vão até 3 Gbps [28]. Outro padrão, o *European Computer Manufactures Association 387* (ECMA-387)[29], publicado pelo *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*, também voltado para WPAN, mas com camada de controle separada, em 2.4GHz [27].

Diferentes das bandas previstas para comunicações licenciadas, os três últimos padrões listados ocuparão a faixa do espectro que vai de 57 a 66 GHz. Essa faixa de frequências sofre maior atenuação, como visto na Figura 2.1. Por isso, esses padrões foram concebidos para ambientes internos e aplicações de curta distância, como monitor sem fio, distribuição de vídeo e enlace de *download* e *upload* rápido para servidores de arquivo [30].

## 2.2 *Beamforming*

O *beamforming* é o método aplicado às antenas direcionais para adquirir informações a respeito da direção de transmissão ou recepção, para que futuramente as antenas possam ser configuradas corretamente e estar direcionadas ao outro nó participante do enlace. O direcionamento ocorre através de variações de fase e amplitude do sinal que são aplicadas aos diferentes elementos que formam uma antena direcional, em função da geometria da antena.

De forma simples, iremos definir o *beamforming* como o procedimento realizado por um dispositivo para obter a informação de como deve configurar sua antena direcional para se comunicar com outro dispositivo segundo algum critério, como a SNR do enlace. A configuração da antena refere-se ao ângulo ou feixe que a antena deve assumir.

As antenas direcionais aplicadas aos sistemas modernos de comunicações móveis são sistemas de antenas em vetor. Esses sistemas são formados por vetores ou matrizes de elementos de antenas dispostos espacialmente de acordo com a configuração desejada. A potência de saída de uma antena deste tipo pode ser expressa pelo padrão de radiação da antena. Temos como exemplo de padrão de radiação a Figura 2.4.

O padrão de radiação é resultado da contribuição de cada elemento individual da antena. Os elementos irão contribuir de forma diferente para o sinal, pois cada um pode emitir um sinal com fase e amplitude diferentes. Ao interferirem construtivamente ou destrutivamente os sinais emitidos pelos elementos da antena culminam no padrão de radiação da antena.

Os padrões de radiação podem ser baseados em *codebooks*. Um *codebook* contém um conjunto predefinido de configurações de vetores de antenas, que definem padrões

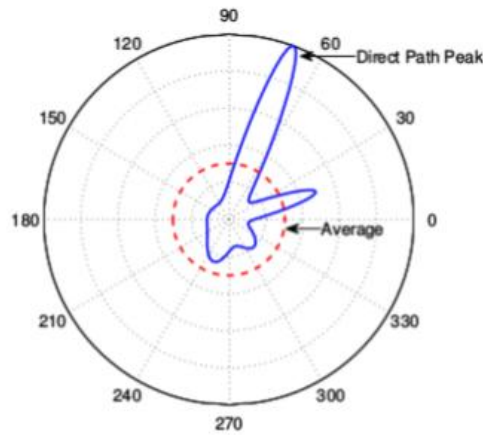


Figura 2.4: Padrão de radiação de uma antena direcional [2]

de radiação fixos. Cada coluna de um *codebook* contém os pesos de ajuste de fase e amplitude das antenas para um determinado padrão de radiação. Por fim, esses arranjos de fase e frequência determinam a direção e a abertura que a antena estará configurada para um enlace.

O padrão IEEE 802.11ad, por exemplo, realiza *beamforming* em duas etapas, *Sector-Level Sweeping* (SLS) e *Beam Refinement Protocol* (BRP). A fase de SLS resulta em uma configuração inicial da antena, ainda grosseira, mas que reduz o tempo de busca da fase seguinte [31]. A fase que se segue é de refinamento, o BRP. Esta fase tem como resultado o ajuste mais preciso das antenas, selecionando os melhores feixes de transmissão e recepção.

Durante o SLS, um dos nós permanece omnidirecional e outro direcional. O nó que estiver com sua antena configurada em modo direcional transmite um quadro de *Sector Sweeping* (SSW) em cada feixe de sua antena. A este nó, chamaremos de iniciador. Em modo omnidirecional, o nó que chamaremos de respondedor, recebe esses quadros e faz medições da SNR para cada quadro recebido. Esse processo recebe o nome de *Transmit Sector Sweep* (TXSS). Ao concluir esta fase, inicia o *Receive Sector Sweep* (RXSS). No RXSS, o respondedor transmite um quadro para cada feixe do iniciador, que ao receber o quadro muda para o próximo feixe. Esses quadros enviados pelo respondedor informam ao iniciador qual feixe resultou em maior SNR durante o TXSS [20].

Devido à configuração do respondedor em modo omnidirecional, o resultado da fase SLS é impreciso e não oferece a configuração ótima para as antenas dos nós. O *Beam Refinement Protocol* testa um conjunto de padrões de configuração da antena direcional armazenados nos *codebooks* dos nós. O BRP leva os dois nós a se configurarem em modo direcional, proporcionando ganho no *throughput* do enlace em relação ao SLS.

## 2.3 Descoberta de Vizinhança

A descoberta de vizinhança em redes com antenas omnidirecionais é um elemento da camada 3, explorada por protocolos de roteamento. Esses protocolos utilizam inundação de pacotes para descobrir a identidade e o valor da métrica de roteamento do enlace para os vizinhos. De acordo com o resultado da descoberta, a vizinhança é classificada e distribuída em uma tabela de roteamento. Podemos dizer que a descoberta de vizinhança neste caso ocorre apenas em um nível lógico, ou seja, não está relacionada à localização física do nó.

Em redes com antenas direcionais, a descoberta de vizinhança precisa ocorrer em nível físico, pois os nós precisam estar direcionados um para o outro antes de iniciarem uma transmissão. A obtenção da informação de localização dos nós é essencial para uma rede que opera com antenas direcionais. O *beamforming* determina, para cada par de nós, o ângulo que a antena direcional deve estar configurada para que a comunicação entre esses nós seja possível. O mecanismo de descoberta de vizinhança coordena a realização dos *beamformings* para diminuir o tempo que os nós levam até que estejam configurados para transmitir.

No caso das redes direcionais, podemos classificar a descoberta de duas formas, quanto à configuração das antenas dos nós e quanto ao mecanismo de resposta. Os nós podem se configurar de modo Direcional-Omnidirecional (DO) ou Direcional-Direcional (DD), mostrados na Figura 2.5.

No caso Direcional-Omnidirecional, um dos nós transmite quadros em cada um dos seus setores enquanto o outro nó recebe esses quadros em modo omnidirecional. O receptor em modo omnidirecional facilita o encontro, diminuindo o número de mensagens a se transmitir até que os nós se descubram. Por outro lado, nessa configuração há uma assimetria de ganho devido à diminuição do raio de alcance das antenas na recepção. Essa assimetria tem origem na diminuição do ganho da antena por assumir configuração omnidirecional. O efeito da assimetria de ganho é omitir enlaces que seriam viáveis caso a configuração utilizada fosse Direcional-Direcional, devido a distância entre eles ser maior do que o alcance das antenas uma em configuração direcional e outra em configuração omnidirecional.

Na configuração Direcional-Direcional, os dois nós estão em modo direcional, tanto na transmissão quanto na recepção, extraindo das antenas direcionais o máximo de ganho para o enlace. Contudo, os dois nós estarem em modo direcional pode elevar o número de mensagens necessário para que a descoberta se concretize.

Usaremos a busca exaustiva para exemplificar o modo Direcional-Direcional. Considere que as antenas que equipam os nós de uma rede têm  $n$  feixes e que os nós estão devidamente sincronizados e trocam o feixe que transmitem ou recebem a cada intervalo de tempo  $t$ . Um nó a procura de seu vizinho escolhe ao acaso um feixe e





Figura 2.5: Comparação entre redes Direcional-Omnidirecional (esquerda) e Direcional-Direcional (direita)

transmite  $n$  mensagens nesse feixe. As  $n$  mensagens transmitidas são uma tentativa de cobrir todos os setores do nó que também está chaveando entre seus feixes na recepção. Ao final da descoberta, no pior caso, a complexidade de mensagens desse método é  $O(n^2)$ .

Quanto a segunda forma de classificar os mecanismos de descoberta, existem duas formas: *One-way* e *Handshake based*. Os mecanismos *One-way* e *Handshake based* se diferenciam na forma que o nó descoberto age após a descoberta. Nos mecanismos ditos *Handshake based*, uma vez descoberto, o nó transmite uma mensagem de volta para o nó que estava executando a descoberta. Essa mensagem enviada em resposta à descoberta pode auxiliar o nó que executa a descoberta complementando o seu conhecimento a respeito do outro nó. Informações sobre o nó descoberto podem ser inseridas por este nó na mensagem de *handshake* que é enviada em resposta à descoberta. Por exemplo, um pedido de refinamento do *beamforming* ou uma tabela de nós descobertos podem ser enviados no quadro de *handshake*. Do contrário, nos mecanismos *One-way* os nós descobertos não enviam mensagens quando encontrados.

Cada um dos tipos de classificação dos mecanismos de descoberta de vizinhança anteriormente citados são estudados em [9]. Esse trabalho mostra a eficiência destes mecanismos através de análises matemáticas e simulações. Demonstrou-se que em cenários com dois dispositivos o método *Handshake based* oferece melhor desempenho, enquanto em cenários com múltiplos nós, o método *One-way* mostra-se mais eficiente. Em geral, pode-se afirmar também que a configuração Direcional-Omnidirecional apresenta taxa de descoberta maior do que a configuração Direcional-Direcional.

Os autores em [8] desenvolveram modelos analíticos para dois mecanismos diferentes: Descoberta Direta e Descoberta *Gossip-based*. Os métodos *Gossip-based* têm a propriedade de serem mais robustos ao aumento do número de nós e são capazes

de descobrir uma fração maior da rede para o mesmo intervalo de tempo do que os métodos diretos. As abordagens direta e *Gossip-based* também foram estudadas em [13], agora voltadas para ondas milimétricas e considerando em seus modelos analíticos o efeito das reflexões de primeira ordem. Nos diversos cenários testados, incluindo ambientes com possibilidade de bloqueio, o método de descoberta *Gossip-based* foi capaz de descobrir uma fração maior de vizinhos para o mesmo intervalo de tempo

Além das classificações citadas, existe uma classe de trabalhos em ondas milimétricas que são aqueles que aplicam uma abordagem multibanda. Nessa abordagem, um canal auxiliar é utilizado para trafegar informações de controle, como mostrado na Figura 2.6. A escolha desse canal está relacionada a possibilidade de usar antenas omnidirecionais, ao invés das antenas direcionais da banda de ondas milimétricas e assim evitar efeitos como a surdez e o bloqueio. A abordagem multibanda pode ser vista em [32], que aplica o protocolo RTS-CTS para mitigar a surdez em redes de ondas milimétricas. A transmissão omnidirecional dos quadros de RTS e CTS notifica os receptores e os demais a respeito das futuras transmissões, sinalizando ao receptor que ele deve se direcionar ao transmissor e aos outros nós para que não realizem transmissões dentro do período reservado pelo transmissor no RTS.

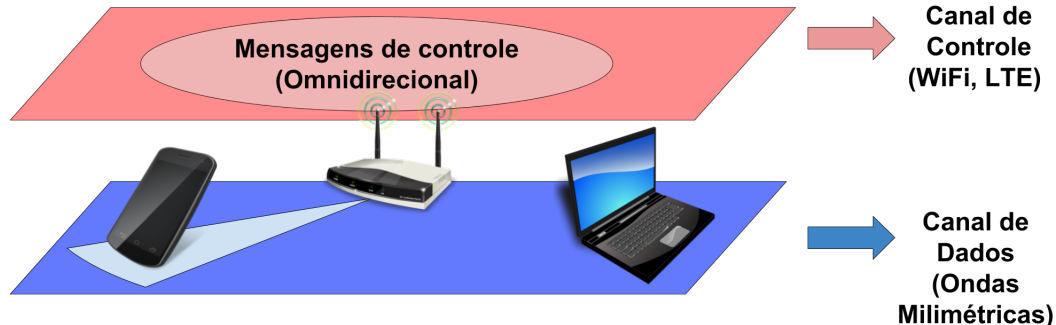


Figura 2.6: Representação do cenário multibanda

Em [10], a descoberta de vizinhança em ondas milimétricas é explorada em um contexto multibanda propondo um esquema de descoberta de vizinhança chamado *Multiband Directional Neighbor Discovery* (MDND), baseado no padrão IEEE 802.11ad. No mecanismo MDND, há uma etapa assistida por um AP realizada na banda de controle para troca de quadros de controle e sinalização. Uma vez que todas as transações da etapa assistida foram concluídas, os nós realizam beamforming e transmitem seus dados na banda de ondas milimétricas. A camada de acesso ao meio utilizada na banda de controle é mesma encontrada nos padrões IEEE 802.11, ou seja, o acesso segue o método DCF (*Distributed Coordination Function*).

Inicialmente, os nós que desejam transmitir devem consultar o AP para obter

uma lista dos nós associados a eles e suas respectivas capacidades. Uma vez que essa lista de dispositivos foi adquirida, incluindo o dispositivo para o qual se deseja transmitir, é necessário realizar a reserva do período de serviço que será alocado para a transmissão. Para isso, deve ser informado ao AP o tamanho nominal do quadro, a taxa média de transmissão e outros dados, para que durante o período de serviço nenhum outro nó da rede transmita ocasionando colisões. Em seguida, o AP consulta transmissor e receptor a respeito de suas capacidades para formar um enlace direcional, como valor de modulação, número de feixes e alcance máximo das antenas. Por fim, os nós são notificados para trocarem o banda de operação para a banda de ondas milimétricas.

Na banda de ondas milimétricas, o *beamforming* é realizado nos dois sentidos, do transmissor para o receptor e vice-versa. O *beamforming* segue o padrão da fase de *Sector Level Sweeping* do padrão IEEE 802.11ad, conforme apresentado na Seção 2.2. Após o *beamforming* há garantia de que os nós irão configurar-se corretamente para transmitir e receber, portanto a transmissão dos dados é realizada logo em sequência. A Figura 2.7 mostra os períodos assistido e de *beamforming*, ilustrando a troca das mensagens de controle desde a associação à notificação da troca de canal.

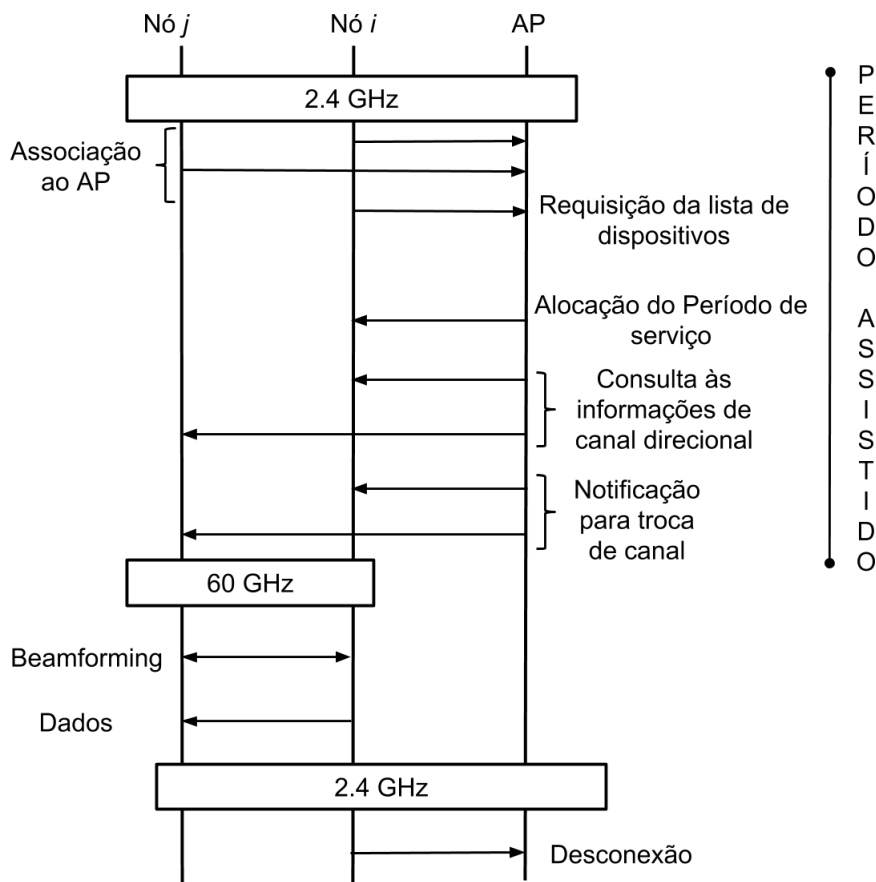


Figura 2.7: Fluxo de mensagens do esquema MDND

Os autores conduzem análises matemáticas do tempo médio de descoberta e con-

sumo médio de energia dos nós, além de simulações. O MDND é comparado com mecanismos que não são multibanda, a saber, Direcional-Omnidirecional e Direcional-Direcional, ambos *Handshake-based*. O MDND supera esses outros dois mecanismos em tempo de descoberta, consumo de energia e ainda causa menos *overhead*. Neste trabalho, o MDND será avaliado em termos de tempo total de descoberta e tempo médio de descoberta. Por tempo total entende-se o tempo levado para que todos os nós que compõem a rede sejam descobertos e uma transmissão seja realizada, enquanto o tempo médio é o tempo levado para que um par de nós descubra um ao outro e concretize uma transmissão.

# Capítulo 3

## Protocolos Multibanda

Neste capítulo, iremos definir dois protocolos o *Multiband Neighbor Discovery Map Propagation based Protocol* (MuNDi MaPP) e o *Gossip Multiband Neighbor Discovery* (Go MuNDi)[11]. O MuNDi MaPP é um protocolo que usa duas bandas, uma banda de controle, em que os nós realizarão acesso através de antenas omnidirecionais, e outra de dados, sendo adotada a banda de ondas milimétricas que oferece taxas de transferência de até 7 Gbps. O Go MuNDi, além de ser multibanda, emprega a estratégia de bisbilhotagem de quadros de *beamforming*. A aplicação dessa estratégia visa a aquisição de informação a respeito dos nós vizinhos de maneira oportunista, enquanto estes nós realizam o *beamforming*. Ainda nesse capítulo, conduzimos uma análise matemática da probabilidade de erro da informação de ângulo obtida pelo MuNDi MaPP. Também expandimos o protocolo MuNDi MaPP para um modo paralelizado, usando os canais que não interferem entre si, disponíveis nas bandas de controle e de dados. Ao final do capítulo, discorreremos sobre o efeito da mobilidade de objetos nos protocolos baseados em propagação de mapa.

### 3.1 Protocolo MuNDi MaPP

O protocolo MuNDi MaPP foi concebido com o objetivo de diminuir o tempo levado para que os nós realizem a descoberta da vizinhança e as informações de localização são obtidas por um único nó e posteriormente são distribuídas. A manutenção das informações de localização incorretas é feita através de correções locais dos erros detectados. Essa estratégia pode diminuir o tempo de ocupação das bandas de controle e da banda de ondas milimétricas.

Neste trabalho, iremos considerar como descoberta de vizinhança o meio pelo qual um nó passa a conhecer todos os nós ao seu alcance e torna viável a formação de enlaces entre esse nó e os demais nós ao seu alcance. Todos os nós ao alcance de um certo nó serão chamados vizinhos. O *beamforming*, no cenário da descoberta de vizinhança em redes com antenas direcionais, será o processo executado pelos

nós para descobrir a localização de um único vizinho. O *beamforming* é realizado por um par de nós e o seu resultado é o conhecimento da melhor configuração das antenas direcionais para que esse par de nós se comunique. A forma como as antenas direcionais se configuram pode ser interpretada como um ângulo que os nós devem apontar os feixes das suas antenas para transmitir e receber.

Realizar o *beamforming* par a par em uma rede com muitos nós pode ser ineficiente, devido ao tempo levado para que cada *beamforming* seja finalizado. Então, assumiremos que a descoberta de vizinhança é o arranjo de *beamformings* entre os nós que, segundo uma estratégia previamente determinada, visa diminuir o tempo para que os nós da rede passem a conhecer os seus vizinhos e a comunicar-se com eles. O conhecimento não se limita apenas à identidade dos vizinhos, mas através do *beamforming* sabe-se também em que feixe da antena direcional é possível transmitir a esse vizinho. Em última análise, o *beamforming* fornece o ângulo em que o vizinho se localiza em relação à antena do nó em questão.

Considere uma rede sem fio composta por  $K$  nós equipados com interfaces operando em duas bandas, uma em ondas milimétricas e outra em uma banda de controle. No presente trabalho, iremos adotar como banda de controle a banda WiFi não licenciada em 2.4 GHz, conforme o padrão definido pelo IEEE 802.11. A utilização de uma banda de controle separada, onde é possível utilizar antenas omnidirecionais, minimiza os efeitos de perda das informações de controle ou que estas mensagens sofram com problemas comuns da banda de ondas milimétricas, como surdez ou bloqueio.

Por se tratar de um ambiente *indoor*, os nós não possuem GPS ou qualquer outro dispositivo que auxilie na localização. Consideramos também que os nós formam uma rede completa, ou seja, todos os nós são alcançáveis com apenas um salto, em ambas as bandas de operação da rede. Esse cenário de um salto se aplica, por exemplo, a *dock stations* conectadas a um computador pessoal ou televisões se comunicando com dispositivos reprodutores de mídia para transmissão de vídeo em alta definição.

Dentre os  $K$  nós, um deles será eleito para atuar como *líder* da rede e desempenhará funções de controle e gerenciamento. O líder é estabelecido de acordo com o algoritmo de eleição assíncrona em redes completas, *A-Elect-Leader-C*, descrito em [33]. O algoritmo *A-Elect-Leader-C* tem complexidade  $O(n)$  e transmite  $n \log n$  mensagens, onde  $n$  representa o número de nós envolvidos na eleição. A eleição ocorre na banda de controle, mantendo as interfaces de ondas milimétricas de todos os nós inativas até que um líder seja eleito.

Após a eleição, os demais  $K - 1$  nós, denominados aqui de nós *regulares*, irão se associar ao nó líder. Uma vez que os nós estão associados, é realizado o *beamforming* do líder para os nós regulares. Os nós regulares permanecem com suas antenas

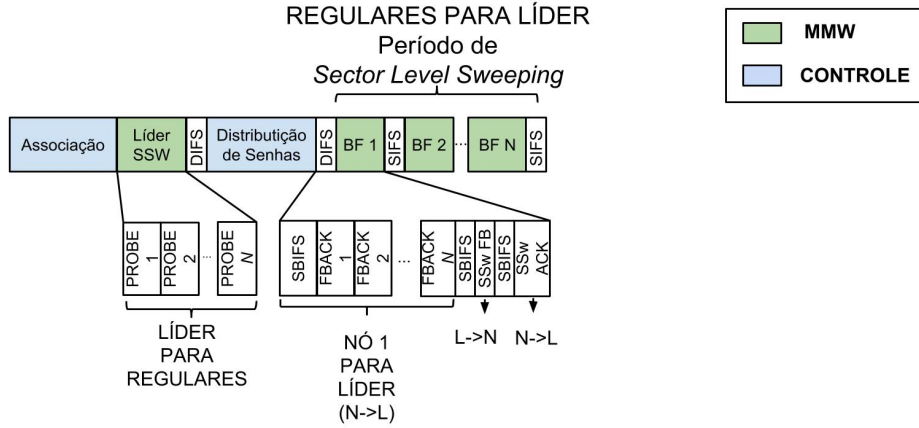
configuradas em modo quasi omnidirecional na banda de ondas milimétricas durante esta etapa. O líder inicia o *beamforming*, enviando sondas em cada feixe de sua antena direcional. Cada sonda enviada identifica o feixe pelo qual ela foi transmitida e os nós regulares registram a SNR de cada sonda recebida. Com o registro da SNR, os nós regulares podem indicar ao líder o melhor feixe de transmissão.

Após o líder terminar o seu *beamforming*, há uma etapa de ordenação dos nós através da distribuição de senhas. As senhas contabilizam os nós da rede de 1 a  $K-1$ . O líder distribui as senhas no seguinte formato  $[(id_1, s_1), (id_2, s_2), \dots, (id_{k-1}, s_{k-1})]$ , onde  $id_i$  é um identificador único de um nó e  $s_i$  a senha de ordenação que o nó recebeu. A função das senhas é escalonar o processo de *beamforming* dos nós regulares com o líder, que terá uma duração fixa. Cada nó ocupará uma *janela de beamforming*, segundo a senha recebida. Os nós que não estão realizando *beamforming* permanecem em estado ocioso.

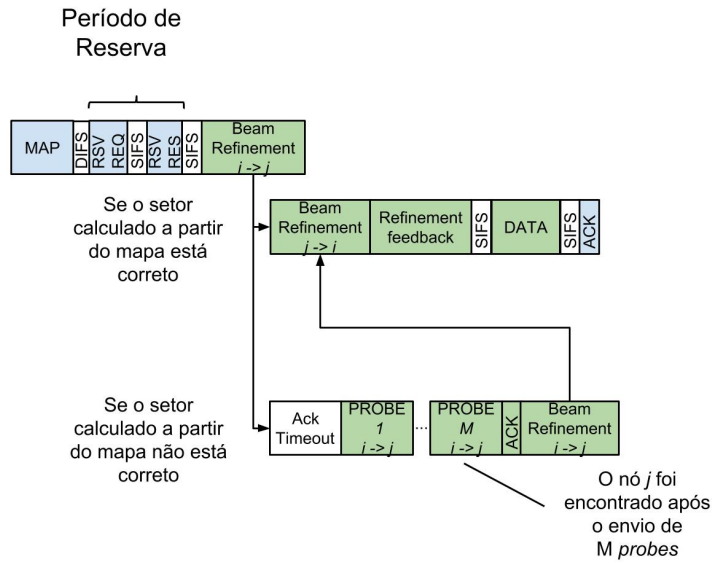
Nas respectivas janelas de *beamforming*, os nós regulares assumem configuração direcional e o líder configuração quasi omnidirecional. O nó regular a fazer o *beamforming* transmite quadros sonda identificando o feixe de sua antena pelo qual a sonda está sendo transmitida para o líder. As sondas transmitidas pelos nós regulares além do *beamforming*, também têm a função de dar ao líder *feedback* do *beamforming* realizado pelo líder anteriormente. O *feedback* informa ao líder qual feixe, enquanto ele transmitia suas sondas, resultou em maior SNR. Depois de transmitir sondas em todos os feixes, o nó regular recebe um *feedback* das sondas que foram enviadas ao líder. Tendo recebido o quadro de *feedback* com sucesso o nó regular envia o reconhecimento (*ACK*) ao líder e encerra o *beamforming*. As janelas de *beamforming* se sucedem até que todos os nós tenham realizado *beamforming* com o líder.

Ao completar o *beamforming* com todos os nós regulares, o líder criará uma tabela contendo os ângulos ou feixes usados para se comunicar com os nós regulares, a largura de feixe utilizada no *beamforming* e as distâncias estimadas para alcançá-los. A estimativa da distância é um processo factível em ondas milimétricas devido ao comportamento quase óptico das ondas eletromagnéticas nessa faixa de frequências. Em [34] e [35], são testados algoritmos para estimar a distância relativa entre nós e o mapeamento de ambientes utilizando ondas milimétricas. Os resultados obtidos alcançam até 50 cm de precisão em mais de 80% dos casos.

As entradas na tabela armazenada pelo líder seguem o seguinte formato  $[\alpha_i, d_i, C_i]$ , onde  $i = 1, 2, \dots, K-1$ .  $\alpha_i$  representa o ângulo encontrado pelo líder ao realizar *beamforming* com o  $i$ -ésimo nó. Caso o ângulo encontrado não seja preciso o suficiente, o líder armazenará o setor  $B_i$ , ao invés do ângulo  $\alpha_i$ . A distância estimada pelo líder através do processo de *beamforming* é representada por  $d_i$ .  $C_i$  representa a capacidade dos nós, expressa na quantidade máxima de feixes que o nó  $i$  pode configurar sua antena. Detalhes do protocolo são mostrados na Figura 3.1.



(a) Etapa de associação dos nós ao líder, distribuição de senhas e *beamforming*. Continua na Figura 3.1b



(b) Após as fases mostradas na Figura 3.1a, há distribuição do mapa, o período de reserva do canal de dados e transmissão de  $i$  para  $j$  com refinamento

Figura 3.1: Diagrama do tempo do Protocolo MuNDi MaPP

O mapa da rede é transmitido pelo líder em *unicast* para cada nó regular, na banda de controle. Este mapa consiste em uma tupla  $[\alpha_i, d_i, C_i]$  contendo o ângulo, a distância estimada e a capacidade para cada nó, relativos ao líder. A partir dessas informações, qualquer nó pode calcular o ângulo de transmissão ou recepção para qualquer outro nó, conforme será demonstrado na Seção 3.1.1.

Ao concluir a fase de divulgação do mapa, os nós ficam livres para realizar transmissões. As transmissões ocorrem apenas sob reserva do canal de ondas milimétricas. Um nó que pretende transmitir envia na banda de controle a mensagem *RSV REQ*, (*Reservation Request*). A transmissão será iniciada somente quando o nó receptor responder à mensagem de *RSV REQ*, com uma mensagem do tipo *RSV RSP* (*Reservation Response*).



A troca de mensagens *RSV REQ* e *RSV RSP* garante que o meio de transmissão na banda de ondas milimétricas esteja livre para troca de mensagens. O nó líder também utiliza essas mensagens para certificar-se que o meio está livre e assim realizar manutenção das informações de ângulo e distância. Uma consulta aos nós, na banda de ondas milimétricas, pode verificar se o ângulo que o líder guarda em sua tabela ainda é válido ou não. Caso o ângulo não seja válido, realiza-se *beamforming* com o nó em questão.

Por fim, já na banda de ondas milimétricas, os nós realizam o refinamento do *beamforming*, testando os *codebooks* de suas antenas para encontrar o padrão de radiação com o *beamwidth* tão preciso quanto possível. O refinamento proporciona maior vazão em relação às técnicas que utilizam apenas troca de quadros, pois os nós estarão com as antenas configuradas para possibilitar máximo ganho no enlace. Caso o pacote de refinamento seja perdido por causa de eventuais imprecisões no cálculo do ângulo, o nó transmissor inicia uma busca ao receptor de forma localizada. Essa busca prioriza os setores adjacentes ao setor obtido nos cálculos, uma vez que a maioria dos erros é por apenas um setor, como será descrito na Subseção 4.4.1.

A Figura 3.1a mostra a associação dos nós ao líder e em seguida o líder realizando a primeira etapa do *beamforming*, transmitindo direcionalmente seus quadros, enquanto os nós regulares recebem em modo quase omnidirecional. Ao término desta etapa, o líder divulga na banda de controle as senhas que ordenam as janelas de *beamforming*, que iniciam logo em sequência. Cada janela de *beamforming* é espaçada de um intervalo SIFS e dentro de cada janela os nós transmitem direcionalmente e o líder permanece em configuração quase omnidirecional. Durante cada janela é transmitido, além dos quadros de *beamforming*, um quadro de *feedback* do líder para o nó regular e um ACK. A segunda etapa do protocolo MuNDi MaPP está representada na Figura 3.1b. Nesta fase, o líder divulga o mapa que acabara de formar após ter realizado *beamforming* com todos os nós. O mapa é transmitido em *unicast* para cada nó, na banda de controle. De posse dos mapas, os nós estão livres para realizar reserva do canal e transmitir na banda de ondas milimétricas.

### 3.1.1 Formação do Mapa

Na seção anterior, definimos o funcionamento do protocolo MuNDi MaPP com respeito às suas rotinas e mensagens. Nesta seção, iremos descrever o método pelo qual a partir dos ângulos divulgados pelo líder, os nós regulares podem obter o ângulo para se comunicar com qualquer outro nó da rede.

O método proposto não restringe o sistema à existência de um norte comum para os nós, ou seja, uma direção para a qual todos os nós estão orientados. Primeiro, demonstraremos como calcular o ângulo para se comunicar com um vizinho

considerando que existe um norte na rede, com o qual todos os nós estão alinhados.

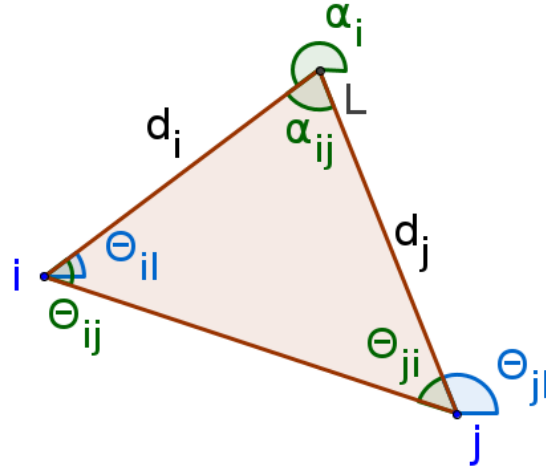


Figura 3.2: Disposição dos nós  $i$  e  $j$  em relação ao líder

Para exemplificar o método utilizado pelos nós para estabelecer os ângulos a partir do mapa propagado pelo líder, iremos tomar dois nós  $i$  e  $j$  posicionados em relação ao líder como na Figura 3.2. Considere o nó  $i$  transmissor e o nó  $j$  receptor, estes nós formam um ângulo  $\alpha_{ij}$  com o líder. Os nós  $i$  e  $j$  estão a uma distância  $d_i$  e  $d_j$  do líder, respectivamente. Esses nós formam ângulos  $\theta_{il}$  e  $\theta_{jl}$  com o líder. Para realizarem uma transmissão bem sucedida de  $i$  para  $j$ , é necessário que  $i$  esteja com suas antenas configuradas para cobrir o ângulo  $\theta_{ij}$  e para receber,  $j$  deve configurar-se em  $\theta_{ji}$ .

Cada nó regular recebeu essas informações de ângulo e distância ( $d_i$ ,  $d_j$ ,  $\alpha_i$  e  $\alpha_j$ ) na tupla enviada pelo líder. O ângulo formado pelo vértice onde está localizado o líder é dado por  $\alpha_{ij} = \alpha_i - \alpha_j$ , que por sua vez é o ângulo diferença entre  $i$  e  $j$ . A Lei dos senos para o triângulo da Figura 3.2, é dada por:

$$\frac{d_j}{\text{sen}(\theta_{ij})} = \frac{d_{ij}}{\text{sen}(\alpha_{ij})} \quad (3.1)$$

Onde  $\theta_{ij}$  é o ângulo de  $j$  relativo a  $i$ ,  $d_j$  é a distância entre o nó  $j$  e o líder  $l$  e  $d_{ij}$  é a distância entre os nós  $i$  e  $j$ . Como dissemos o ângulo  $\alpha_{ij}$  é a diferença dos ângulos de  $i$  e  $j$  em relação ao líder, que assim como  $d_i$  e  $d_j$ , pode ser encontrada no mapa transmitido pelo líder. No entanto, devemos encontrar  $\theta_{ij}$  e  $d_{ij}$ . Podemos aplicar a lei dos cossenos e encontrar  $d_{ij}$ :

$$d_{ij}^2 = d_i^2 + d_j^2 - 2d_id_j \cos(\alpha_{ij}) \quad (3.2)$$

$$d_j^2 = d_{ij}^2 + d_i^2 + 2d_{ij}d_i\cos(\theta_{ij}) \quad (3.3)$$

Manipulando a Equação 3.3 para ficar no formato

$$d_{ij}\cos(\theta_{ij}) = \frac{d_j^2 - d_{ij}^2 - d_i^2}{-2d_i} \quad (3.4)$$

E substituindo  $d_{ij}^2$  da Equação 3.2 na Equação 3.4, temos

$$d_{ij}\cos(\theta_{ij}) = d_i - d_j\cos(\alpha_{ij}) \quad (3.5)$$

Substituindo o valor de  $d_{ij}$  encontrado na Equação 3.5 em 3.1

$$\frac{d_j}{\sen(\theta_{ij})} = \frac{\frac{d_i - d_j\cos(\alpha_{ij})}{\cos(\theta_{ij})}}{\sen(\alpha_{ij})} \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 está em função apenas de elementos conhecidos e do ângulo que estamos calculando, a saber  $\theta_{ij}$ . Modificando os termos da Equação 3.6

$$\tan(\theta_{ij}) = \frac{d_j\sen(\alpha_{ij})}{d_i - d_j\cos(\alpha_{ij})} \quad (3.7)$$

Efetuada a operação  $\arctan(\cdot)$  nos dois lados, temos o ângulo  $\theta_{ij}$  necessário para  $i$  comunicar-se com  $j$  é dado pela Equação 3.8

$$\theta_{ij} = \arctan\left(\frac{d_j\sen(\alpha_{ij})}{d_i - d_j\cos(\alpha_{ij})}\right) \quad (3.8)$$

No entanto, esse ângulo é relativo ao líder e não ao norte do nó  $i$ , seja este norte comum a todos os nós ou não. Cada nó regular, estabelecerá um ângulo relativo ao líder,  $\theta_{il}$  para corrigir o ângulo  $\theta_{ij}$  obtido. Havendo um norte comum, o ângulo que corrige  $\theta_{ij}$  e o torna relativo ao nó e não ao líder, pode ser calculado através da Expressão 3.9

$$\theta_{il} = \begin{cases} \alpha_i - \pi, & \text{se } \theta_i > \pi \\ \alpha_i + \pi, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.9)$$

Não havendo um norte em comum entre os nós, o ângulo  $\theta_{il}$  será estabelecido através do processo de *beamforming* do nó  $i$  para o nó líder. Assim, na ausência de um norte comum entre os nós, o *beamforming* deverá ser realizado nas duas direções, do nó líder para o nó  $i$  e vice-versa. Os protocolos apresentados nas seções 3.1 e 3.3 já realizam *beamforming* nas duas direções (do líder para o nó regular e do nó regular para o líder), para contemplar o cenário onde não há um norte comum.

Então o ângulo  $\theta_{ij}$ , obtido na Equação 3.8, pode ser corrigido pela Equação 3.10

$$\hat{\theta}_{ij} = \begin{cases} \arctan\left(\frac{d_j \sin(\alpha_{ij})}{d_i - d_j \cos(\alpha_{ij})}\right) + \theta_{il}, & \text{se } \alpha_i > \alpha_j \\ \theta_{il} - \arctan\left(\frac{d_j \sin(\alpha_{ij})}{d_i - d_j \cos(\alpha_{ij})}\right), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.10)$$

Obtemos, portanto, o ângulo  $\hat{\theta}_{ij}$  necessário a transmissão do nó  $i$  para o nó  $j$ , já relativo ao eixo que orienta o  $0^\circ$  do nó  $i$ . Sempre que um nó deseja transmitir a um vizinho, deve consultar o mapa e calcular o ângulo de transmissão a partir da Equação 3.10.

### 3.1.2 Mapeamento Feixe-Ângulo

Na Seção 3.1.1, definimos como extrair informações do mapa da rede divulgado pelo líder. Essas informações, a saber, são ângulo e distância, adquiridas durante o *beamforming*. No entanto, quando as antenas direcionais não oferecem precisão suficiente no levantamento dos ângulos, essa informação é substituída pela identificação do feixe que proporcionou melhor resultado durante o *beamforming*. Então, é preciso que haja um mapeamento de feixe para ângulo e a Equação 3.10 possa ser utilizada com sucesso.

O primeiro passo para esse mapeamento é estabelecer os limites do feixe recebido, em ângulo. Considere que os nós se comunicam utilizando  $n_{feixes}$  feixes, cuja largura é igual para todos os feixes. Na comunicação entre dois nós, o feixe melhor avaliado e escolhido foi o feixe  $F$ . Os limites do feixe podem ser determinados pelas Equações 3.11 e 3.12.

$$\beta_1 = F \frac{2\pi}{n_{feixes}} \quad (3.11)$$

$$\beta_2 = (F + 1) \frac{2\pi}{n_{feixes}} \quad (3.12)$$

Uma vez estabelecidos os limites superior e inferior, iremos considerar que o nó está localizado no centro do feixe que foi encontrado. Assim, os nós serão posicionados no meio do intervalo  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , como na Equação 3.13.

$$\alpha_{ij} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} \quad (3.13)$$

Na Figura 3.3 temos um exemplo de mapeamento. O nó  $B$  foi achado no feixe 11 pelo nó  $A$ , que desempenha o papel de líder. A largura dos feixes utilizada é  $22,5^\circ$  ou  $\pi/8$ , portanto, esse feixe está limitado pelo intervalo  $225^\circ$  e  $247,5^\circ$ . O centro desse feixe se encontra aproximadamente no ângulo  $236^\circ$ , armazenado na tabela do nó  $A$ , junto com o feixe e a identidade do nó. No entanto, o ângulo que melhor descreve a posição do nó  $B$  em relação ao nó  $A$  é  $226^\circ$  e não  $236^\circ$ , como armazenado na tabela. Esse erro na descrição do ângulo do nó  $B$  pode afetar os resultados que ele obtém ao tentar estimar o ângulo que um vizinho se encontra a partir do mapa divulgado pelo nó  $A$ , ou o contrário,  $B$  ter seu posicionamento calculado errado por um nó vizinho que deseja transmitir para ele.

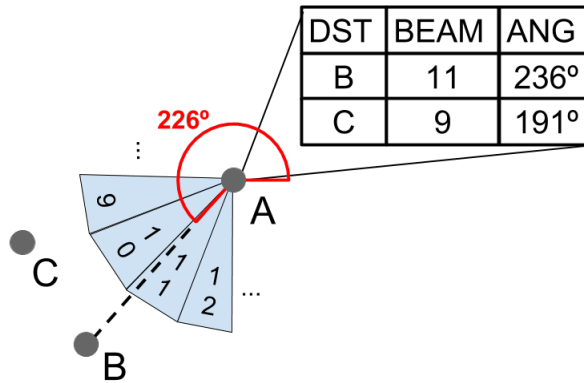


Figura 3.3: Exemplo de mapeamento feixe-ângulo

### 3.1.3 Probabilidade de Erro na Estimativa do Feixe

Nesta subseção, iremos derivar a probabilidade de erro na estimativa do setor que foi descrita na Subseção 3.1.1. A acurácia da informação do mapa está sujeita a fatores como a distância entre os nós e o ângulo que os nós formam com o líder. Por isso, conduzimos essa análise modelando o erro na medida de distância por uma variável aleatória com distribuição uniforme. Uma vez determinada a função de densidade de probabilidade do cálculo do ângulo a partir do mapa, chegaremos a probabilidade do erro na estimativa do setor.

Apesar de a estimativa do feixe estar diretamente ligada a um erro em ângulos, o

erro na distância também afeta essa estimativa. A Figura 3.4 mostra um exemplo de ocorrência do erro na estimativa do ângulo quando há erro na medida da distância que o nó líder realiza. Assumimos que a fonte de erros é a medida da distância devido a maior imprecisão na inferência da distância entre dois nós do que os erros na medida de ângulos. A outra motivação para essa escolha, foi a facilidade para análise que as variáveis envolvendo a distância proporcionam.

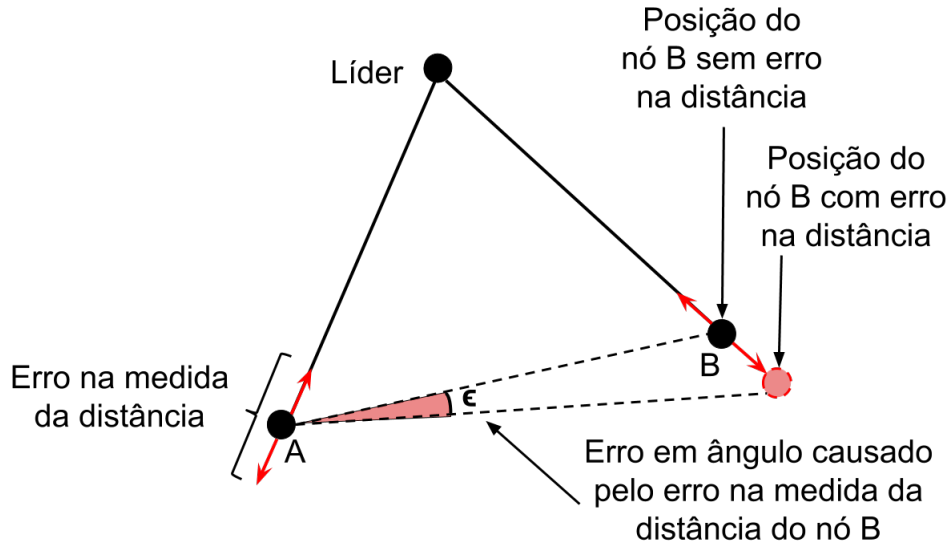


Figura 3.4: Erro na estimativa do ângulo causado por erros na medida da distância

A formação do mapa é dependente da medida do ângulo e da distância. No entanto, os nós não são capazes de realizar a aquisição dessas informações sem que haja um erro associado. Em um cenário ideal, a Equação 3.8 modela o sistema de forma determinística. Considerando a condição de erro nas medições, iremos modelar o sistema através de uma variável aleatória contínua  $D_i$ , cujo evento aleatório é a medida da distância do líder para o nó  $i$ . Assim, a Equação 3.8 que determina o ângulo de transmissão do nó  $i$  para o nó  $j$  pode ser escrita por:

$$\frac{1}{T} = \frac{D_j \text{sen}(\alpha_{ij})}{D_i - D_j \text{cos}(\alpha_{ij})}$$

$$T = \frac{\frac{D_i}{D_j}}{\text{sen}(\alpha_{ij})} - \text{cotan}(\alpha_{ij}) \quad (3.14)$$

$T$  é uma variável aleatória contínua cuja distribuição de probabilidade ainda é desconhecida. Esta variável aleatória  $T$  expressa o valor da cotangente do ângulo  $\theta_{ij}$ , isto é, o ângulo que o nó  $i$  deve utilizar ao transmitir para  $j$ . Assumindo que  $D_i$  e  $D_j$  são variáveis aleatórias com função de densidade de probabilidade  $f_D(d)$  conforme a seguinte distribuição uniforme:

$$f_D(d) = \begin{cases} \frac{1}{2\varepsilon} & , \text{ se } \hat{d} - \varepsilon\hat{d} \leq d \leq \hat{d} + \varepsilon\hat{d} \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.15)$$

Onde,  $\hat{d}$  é a medida de distância real e sem erro entre o líder e um nó. A constante  $\varepsilon$  representa o erro presente na medida da distância realizada pelo líder durante o *beamforming*. Para facilitar a notação e melhorar a compreensão, iremos denotar a Equação 3.14 da seguinte maneira:

$$T = \frac{Z}{\text{sen}(\alpha_{ij})} - \text{cotan}(\alpha_{ij}) \quad (3.16)$$

Onde  $Z$  é o quociente das variáveis aleatórias  $D_i$  e  $D_j$ , independentes. Devido a  $\text{sen}(\alpha_{ij})$  e  $\text{cotan}(\alpha_{ij})$  serem constantes, se tratando de uma mudança de escala e uma translação, respectivamente, e sendo ambas operações lineares, podemos tratar de forma matematicamente simples a transformação da variável aleatória  $Z$  na variável aleatória  $T$ .

As funções de distribuição de probabilidade e de distribuição cumulativa do quociente de duas variáveis aleatórias com distribuição uniforme foram demonstradas em [36]. Portanto, a variável aleatória  $Z$  possui a seguinte distribuição:

$$f_Z(z) = \begin{cases} 0 & \text{se } z \leq \frac{\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i}{\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j} \\ \frac{1}{8\hat{d}_j \hat{d}_i \varepsilon_1 \varepsilon_2} \left[ (\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j)^2 - \frac{(\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i)^2}{z^2} \right] & \text{se } \frac{\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i}{\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j} \leq z \leq \frac{\hat{d}_i}{\hat{d}_j} \\ \frac{1}{8\hat{d}_j \hat{d}_i \varepsilon_1 \varepsilon_2} \left[ \frac{(\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i)^2}{z^2} - (\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j)^2 \right] & \text{se } \frac{\hat{d}_i}{\hat{d}_j} \leq z \leq \frac{\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i}{\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j} \\ 0 & \text{se } z \geq \frac{\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i}{\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j} \end{cases} \quad (3.17)$$

Como dito anteriormente, por se tratar de uma transformação linear, a transformação da variável  $Z$  em  $T$  se dará da seguinte forma:

$$f_T(t) = f_Z(z) \left| \frac{dz}{dt} \right| \quad (3.18)$$

então,  $f_T(t)$  é dada por:

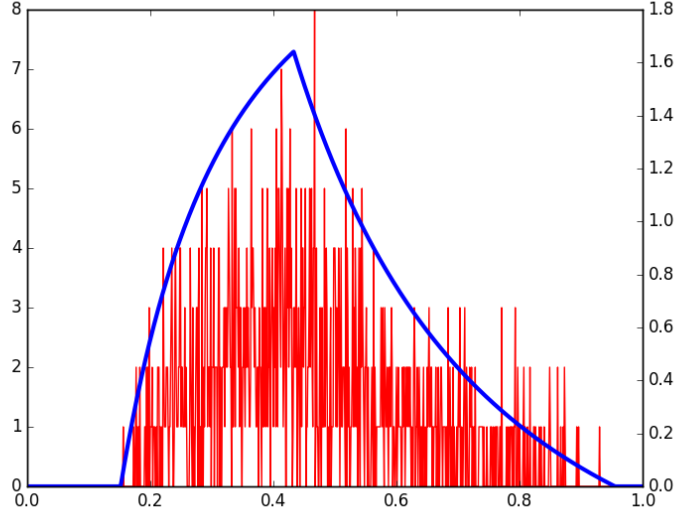


Figura 3.5: Em azul, gráfico da equação (3.19) e em vermelho, histograma de 1000 amostras geradas a partir de duas distribuições uniformes definidas conforme a equação 3.15 e substituindo  $Z$  em 3.16

$$f_T(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } t \leq \frac{\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2 \\ \frac{C_1}{8 \hat{d}_i \hat{d}_j \varepsilon_1 \varepsilon_2} \left[ (\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j)^2 - \frac{(\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i)^2}{(t + C_2)^2 C_1^2} \right] & \text{se } \frac{\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2 \leq t \leq \frac{\hat{d}_i}{\hat{d}_j C_1} - C_2 \\ \frac{C_1}{8 \hat{d}_i \hat{d}_j \varepsilon_1 \varepsilon_2} \left[ \frac{(\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i)^2}{(t + C_2)^2 C_1^2} - (\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j)^2 \right] & \text{se } \frac{\hat{d}_i}{\hat{d}_j C_1} - C_2 \leq t \leq \frac{\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2 \\ 0 & \text{se } t \leq \frac{\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2 \end{cases} \quad (3.19)$$

Onde,

$$\begin{aligned} C_1 &= \text{sen}(\alpha_{ij}) \\ C_2 &= \text{cotan}(\alpha_{ij}) \end{aligned}$$

Na Figura 3.5, a função de densidade definida na Equação (3.19) é comparada a amostras do quociente de duas distribuições uniformes, definidas da mesma forma que no modo analítico.

A partir da função de densidade de probabilidade 3.19, definiremos a probabilidade de erro. A partir de dois ângulos  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , que delimitam o feixe de um nó, e  $BW$  representa o *beamwidth*, ou abertura, da antena direcional. Então:



$$\begin{aligned}\beta_1, \beta_2 &\in (0, \pi) \\ \beta_1 + \beta_2 &= BW \\ \beta_1 &< \beta_2 \\ \cotan(\beta_1) &> \cotan(\beta_2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{C} &= \frac{\hat{d}_i - \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j + \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2 \\ \mathcal{B} &= \frac{\hat{d}_i}{\hat{d}_j C_1} - C_2 \\ \mathcal{A} &= \frac{\hat{d}_i + \varepsilon_1 \hat{d}_i}{(\hat{d}_j - \varepsilon_2 \hat{d}_j) C_1} - C_2\end{aligned}$$

Um erro ocorre quando ângulo resultante dos cálculos feitos a partir do mapa é menor do que o limite inferior do feixe, nesse caso  $\beta_1$ , ou maior do que o limite superior,  $\beta_2$ . A Figura 3.6 exemplifica os ângulos  $\beta_1$  e  $\beta_2$  que delimitam o feixe de um nó. Portanto a probabilidade de erro é dada por  $P_e[\theta < \beta_1 \text{ ou } \theta > \beta_2]$ , que pode ser reescrita da forma  $P_e[t < \cotan(\beta_2) \text{ ou } t > \cotan(\beta_1)]$ . Derivando a probabilidade de erro da função de densidade 3.19:

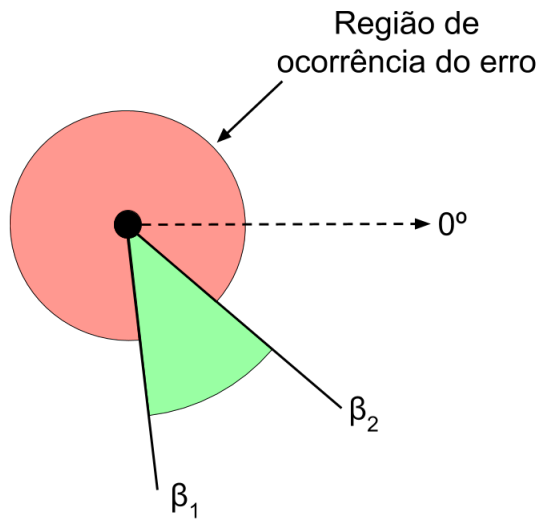


Figura 3.6:  $\beta_1$  e  $\beta_2$  em relação a um nó

$$P_e = \begin{cases} 1 & \text{se } \cotan(\beta_2) < \cotan(\beta_1) < \mathcal{C} \\ 1 - \int_{\mathcal{C}}^{\cotan(\beta_1)} f_T(t) dt & \text{se } \cotan(\beta_2) < \mathcal{C} < \cotan(\beta_1) < \mathcal{B} \\ \frac{1}{2} - \int_{\mathcal{B}}^{\cotan(\beta_1)} f_T(t) dt & \text{se } \cotan(\beta_2) < \mathcal{C} < \mathcal{B} < \cotan(\beta_1) < \mathcal{A} \\ \int_{\mathcal{C}}^{\cotan(\beta_2)} f_T(t) dt + 1 - \int_{\mathcal{C}}^{\cotan(\beta_1)} f_T(t) dt & \text{se } \mathcal{C} < \cotan(\beta_2) < \cotan(\beta_1) < \mathcal{B} \\ \int_{\mathcal{C}}^{\cotan(\beta_2)} f_T(t) dt + \frac{1}{2} - \int_{\mathcal{B}}^{\cotan(\beta_1)} f_T(t) dt & \text{se } \mathcal{C} < \cotan(\beta_2) < \mathcal{B} < \cotan(\beta_1) < \mathcal{A} \\ \int_{\mathcal{C}}^{\cotan(\beta_2)} f_T(t) dt & \text{se } \cotan(\beta_2) < \mathcal{C} < \mathcal{B} < \mathcal{A} < \cotan(\beta_1) \\ 1 + \int_{\mathcal{B}}^{\cotan(\beta_2)} f_T(t) dt - \int_{\mathcal{B}}^{\cotan(\beta_1)} f_T(t) dt & \text{se } \mathcal{B} < \cotan(\beta_2) < \cotan(\beta_1) < \mathcal{A} \\ \frac{1}{2} - \int_{\mathcal{B}}^{\cotan(\beta_2)} f_T(t) dt & \text{se } \mathcal{B} < \cotan(\beta_2) < \mathcal{A} < \cotan(\beta_1) \\ 1 & \text{se } \mathcal{A} < \cotan(\beta_2) < \cotan(\beta_1) \\ 0 & \text{se } \cotan(\beta_2) < \mathcal{C} < \mathcal{B} < \mathcal{A} < \cotan(\beta_1) \end{cases} \quad (3.20)$$

A probabilidade de erro 3.20 é definida em várias partes e depende de muitos parâmetros. Para obter valores a partir desta probabilidade de erro, deve-se conhecer os valores das distâncias  $d_i$  e  $d_j$ , do ângulo  $\alpha_{ij}$  além de ajustar os valores do erro  $\varepsilon$  e da largura do feixe  $BW$ . Fixando alguns desses parâmetros, extraímos gráficos dessa probabilidade de erro que nos permitem inferir sobre o comportamento do erro.

Primeiramente, mantivemos fixos os valores de  $d_i$  e  $d_j$ , de modo que  $d_i > d_j$ . Na Figura 3.7a variando a largura do feixe, ou seja, o intervalo  $[\beta_1, \beta_2]$ , observamos a diminuição da probabilidade de erro com o aumento da largura do feixe. O efeito observado está provavelmente ligado ao aumento da área que um feixe ocupa quando sua largura aumenta, o que leva ao aumento da probabilidade de o nó se encontrar nesse feixe. Na Figura 3.6, podemos observar que o aumento da área entre  $\beta_1$  e  $\beta_2$  diminui a região de ocorrência do erro. Assim, a tendência é que a probabilidade de erro diminua com o aumento da largura dos feixes. Também podemos observar isso na Figura 3.7b, pois a curva quando a largura do feixe é igual a  $15^\circ$  está consideravelmente elevada em relação às demais.

Há um achatamento da probabilidade de erro após determinado valor para a largura do feixe. Isso se deve ao fato de os feixes serem estáticos, ou seja, a antena troca os feixes para girar em torno do seu próprio eixo, mas os feixes permanecem estáticos. Após a largura do feixe atingir um valor, para a configuração  $i$  e  $j$  consideradas, não há alteração na área coberta pelo feixe que resulte em alteração da probabilidade de erro.

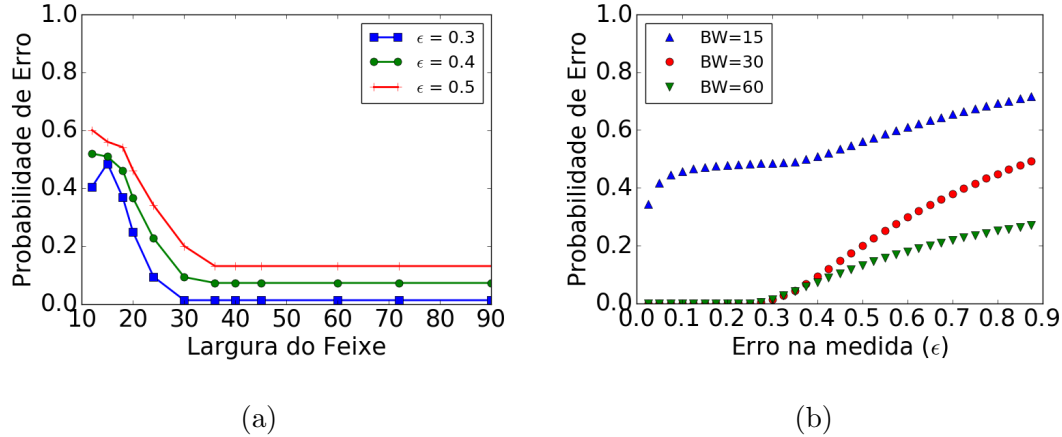


Figura 3.7: Probabilidade de erro vs largura do feixe (*beamwidth*)(a) e o erro considerado na medida da distância  $\epsilon$  (b), para o caso em que  $d_i = 3m$   $d_j = 5m$

## 3.2 Protocolo Go MuNDi

O protocolo Go MuNDi (*Gossip Multiband Neighbor Discovery*) aplica o mesmo princípio de utilizar uma banda omnidirecional para transmissão das mensagens de controle. No entanto, na etapa de realização de *beamforming*, os nós permanecem ativos como receptores na banda de ondas milimétricas mesmo fora da janela reservada para si. Assim, esses nós ‘ouvem’ as mensagens trocadas entre os nós que estão realizando *beamforming* e o líder.

Para executar a escuta oportunística das mensagens durante o *Sector Sweeping* os nós devem seguir o funcionamento do líder. Ao adotar a mesma configuração do líder, que é o participante original do *beamforming*, os demais nós se configuram da forma correta para receber as mensagens de *beamforming*. O modo de funcionamento do líder é divulgado nas suas mensagens de *beamforming* ou nos *beacons* transmitidos na banda de controle.

Se o líder continuar no modo direcional, os nós regulares devem permanecer com as antenas no modo direcional também, a fim de descobrir qual setor na recepção resultou em um sinal com maior potência. Do contrário, permanecendo o líder em modo quasi omnidirecional, os nós encontrarão qual setor do vizinho a realizar *beamforming* gera maior potência ao transmitir.

Considere uma rede com  $K$  nós em que um nó é eleito líder da rede. Este líder divulga mensagens de *HELLO*, para que os nós se associem a ele. Uma vez associados, o líder ordena esses nós regulares atribuindo a cada um uma senha. As senhas são transmitidas e serão usadas para ordenar o *beamforming* a ser realizado em seguida. De modo análogo ao MuNDi MaPP, o *beamforming* ocorre em janelas com duração fixa.

Contudo, no protocolo Go MuNDi os nós permanecem em modo omnidirecional

durante a janela de *beamforming* dos vizinhos. A configuração omnidirecional é a configuração de antena adotada pelo líder durante as janelas de *beamforming* dos nós regulares. Desta maneira, apesar de não estarem participando ativamente do *beamforming*, os nós poderão receber oportunisticamente, os quadros transmitidos pelo nó que detém a atual janela de *beamforming* e assim realizar uma espécie de *beamforming* oportunístico. Os quadros que os nós recebem oportunisticamente, são transmitidos em modo direcional e identificam os feixes pelos quais foram transmitidos. O nós oportunistas podem decidir qual feixe dentre os que foram recebidos resultam em maior SNR.

A busca oportunista favorece o Go MuNDi pois os nós encontram individualmente o ângulo de transmissão necessário para transmitir a cada vizinho bisbilhotando as sondas que eles transmitem. Em relação ao MuNDi MaPP, a estratégia de bisbilhotagem apresenta a vantagem de não incorrer nos erros que ocorrem quando é utilizado o mapa, como visto nas Subseções 3.1.2 e 3.1.3.

Finalizada a etapa de *beamforming*, os nós divulgam mensagens de *feedback* a respeito dos *beamformings* que puderam ser ouvidos. Essa etapa ocorre na banda de controle, em modo omnidirecional. Os *feedbacks* são transmitidos utilizando DCF e CSMA. Tomemos dois nós  $i$  e  $j$  como exemplo. Considere que  $i$  capturou os pacotes de *beamforming* transmitidos por  $j$  e o contrário também é verdadeiro. O *feedback* transmitido por  $i$  reporta qual setor de  $j$  ao transmitir durante o *beamforming* resulta em maior potência recebida por  $i$ . O nó  $j$  age de modo análogo, reportando a  $i$ , qual setor gerou a maior potência recebida. Considerando que o canal é recíproco,  $i$  e  $j$  terão conhecimento dos setores para transmitir e receber em ambas as direções. A Figura 3.8 mostra as etapas de bisbilhotagem do *beamforming* e de transmissão dos *feedbacks*.

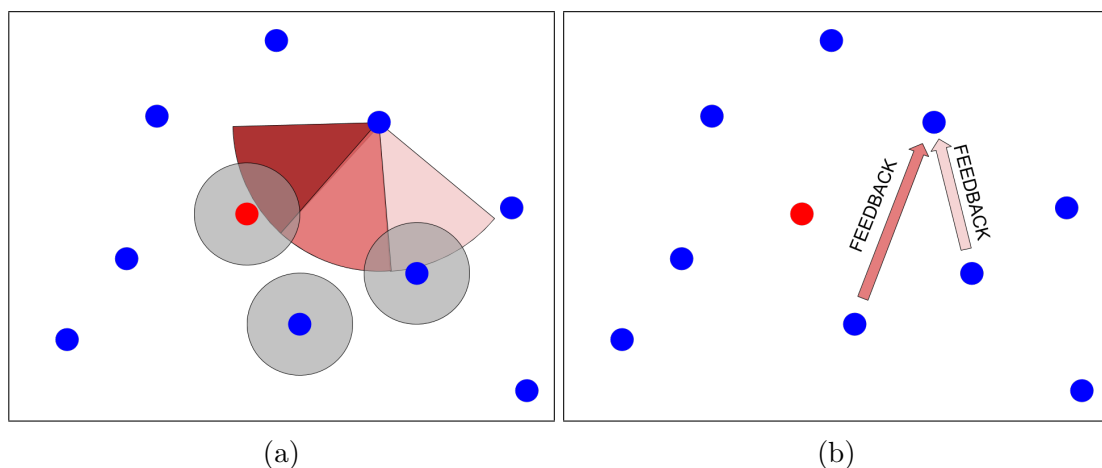


Figura 3.8: Nó enviando quadros em cada um dos feixes de sua antena para o líder, mas que são bisbilhotados por outros dois nós na vizinhança (a) e os *feedbacks* transmitidos na banda de controle ao nó bisbilhotado (b)

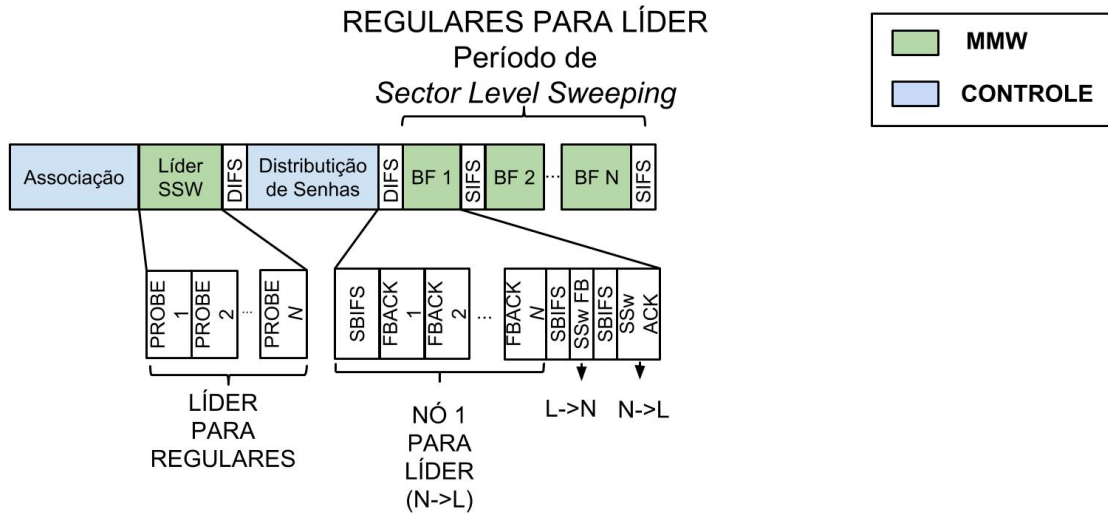
Portanto, considerando uma rede com  $K$  nós, excetuando o líder, no caso em que todos os nós da rede escutam todos os seus vizinhos realizando *beamforming* com o líder, cada nó transmitirá  $K - 2$  mensagens. Ou seja, será transmitido um total de  $(K - 1) * (K - 2)$  quadros de *feedback* em um cenário favorável a todos os nós escutarem as transmissões dos seus vizinhos. Para aumentar as probabilidades de os nós serem ouvidos de forma oportunística por seus vizinhos durante o *beamforming*, a recepção será realizada sempre em modo quasi omnidirecional. No entanto, ao permanecer em modo quasi omnidirecional, o ganho da antena diminui em relação ao modo direcional. É feita uma análise matemática do tempo de transmissão das mensagens de *feedback* no Apêndice A

Após a etapa de *feedbacks*, dá-se início ao período de transmissões. Assim como a proposta do MuNDi MaPP, as transmissões ocorrem mediante a reserva prévia do canal, com troca de mensagens entre o transmissor e o receptor. Para alcançar maiores taxas de transmissão, há também a oportunidade de os nós realizarem refinamento do *beamforming* antes de transmitirem os dados. O diagrama de tempo do protocolo é mostrado na Figura 3.9. Na Figura 3.9a, podemos ver a primeira etapa do protocolo Go MuNDi, semelhante a mesma etapa do MuNDi MaPP. A diferença entre os dois protocolos durante a etapa inicial é a configuração assumida pelos nós que estão em modo quasi omnidirecional para receber oportunisticamente algum quadro de *beamforming* dos seus vizinhos. A segunda fase, representada na Figura 3.9b, difere do MuNDi MaPP devido ao período alocado para os nós transmitirem os *feedbacks* dos quadros recebidos oportunisticamente. Quando o período de *feedback* é concluído, os nós estão livres para transmitir, realizando a reserva do canal de dados através das mensagens RSV REQ e RSV RSP, transmitidas na banda de controle.

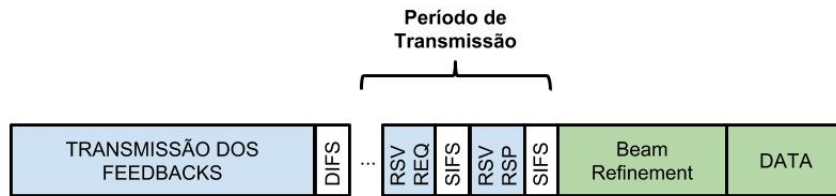
### 3.3 Clusterização

As bandas reservadas para uso não licenciado são divididas em canais. Em geral, esses canais se sobrepõem e preferencialmente faz-se uso dos canais ortogonais, de forma que evite interferência de canal adjacente. No padrão IEEE 802.11b/g/n, três canais não se sobrepõem, a saber 1, 6 e 11. Na banda de ondas milimétricas, existem até 4 canais não sobrepostos, cuja largura de banda é de 2 GHz, segundo definido pelo padrão IEEE 802.11ad e mostrado na Figura 3.10.

Nesta seção, iremos apresentar uma modificação no protocolos MuNDi MaPP. O objetivo é dividir a rede em conjuntos de nós e alocá-los em canais diferente. Em cada canal, os nós executarão o protocolo paralelamente, sem interferir entre si e em um número reduzido de nós. Iremos usar os 3 canais não interferentes entre si disponíveis na banda de controle e outros 3 na banda de ondas milimétricas.



(a) Etapa de associação dos nós ao líder, distribuição de senhas e *beamforming*. Enquanto um nó regular está realizando *sector level sweeping* os seus vizinhos permanecem em modo omnidirecional bisbilhotando os quadros. Continua na Figura 3.9b



(b) Etapa de transmissão dos *feedbacks* dos quadros bisbilhotados anteriormente e de transmissão dos dados

Figura 3.9: Diagrama do tempo do Protocolo Go MuNDi

Daqui em diante iremos nos referir aos grupos de nós alocados em cada canal como *cluster*. Cada *cluster* terá um líder próprio. O líder de um *cluster* será referido como co-líder. Sempre que possível, os *clusters* terão a mesma quantidade de nós. Por exemplo, uma rede com  $K$  nós terá em cada *cluster*  $K/3$  nós. Dividindo os nós de modo igual entre os canais garante que as fases do protocolos serão concluídas aproximadamente no mesmo intervalo e o tempo que os nós de um *cluster* passarão esperando outro *cluster* concluir suas operações será mínimo.

Os *clusters* são formados pelo líder, eleito de acordo com a Seção 3.1. Baseado na sua observação e nos dados que este coleta enquanto os nós se associam e iniciam os serviços da rede, o líder distribui os nós nos *clusters* e elege os co-líderes. O líder da rede divulga a formação dos *clusters* na distribuição de senhas, conforme exposto na Seção 3.1. Foge do escopo deste trabalho a avaliação ou análise de algoritmos de clusterização. Para fins de simulação, os *clusters* foram formados considerando a distância entre os nós, ou seja, quanto mais próximo um nó está de outro, maior a probabilidade de serem designados para o mesmo *cluster*. O co-líder é responsável

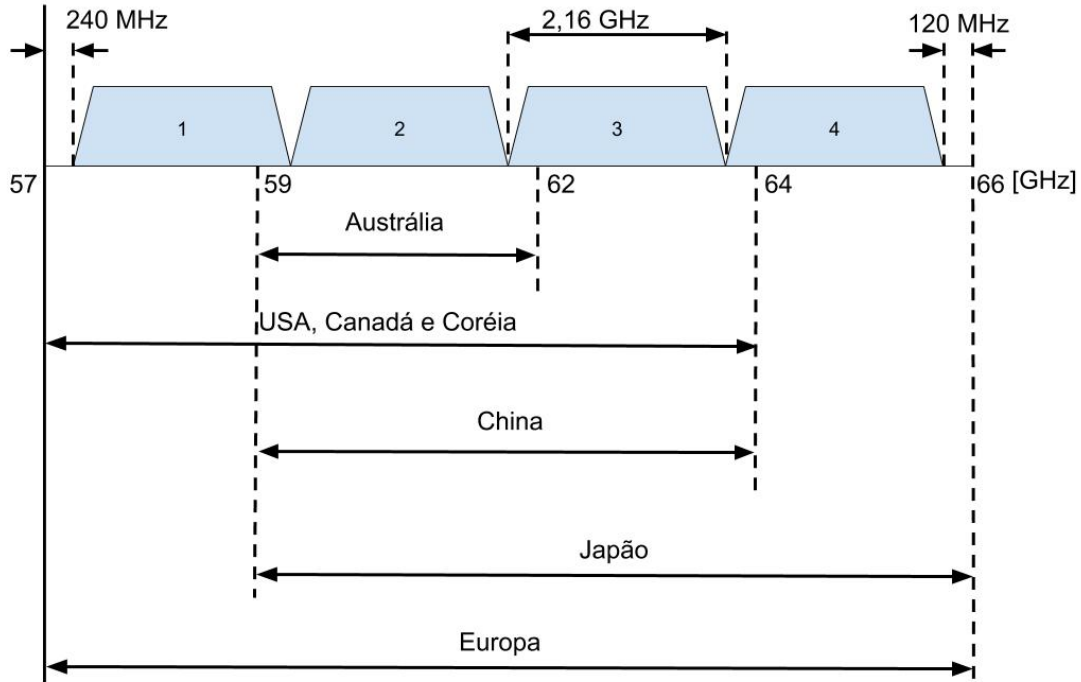


Figura 3.10: Esquema de distribuição de Canais definido pelo FCC

por transmitir as mensagens de controle e coordenar as etapas do protocolo no seu *cluster*. A Figura 3.11a mostra os nós de uma rede divididos em seus *clusters*.

Após receberem suas senhas, o líder sinaliza a mudança para os canais dos respectivos *clusters*, onde ocorrerá o *beamforming* com os colíderes. A ordem de realização dos *beamformings* também foi divulgada na distribuição de senhas ocorrida anteriormente. Cada colíder em seu *cluster* fará  $K/3 - 1$  *beamformings*. Essa etapa está representada na Figura 3.11b.

Com os *beamformings* realizados em cada *cluster* e os mapas formados, os colíderes realizarão *beamforming* entre si e trocarão os mapas formados dentro de seus *clusters*. Os mapas serão divulgados *piggybacked* nas mensagens enviadas durante o *beamforming*. Ao final desta etapa, os colíderes terão conhecimento global da rede, a partir da Equação 3.10. O *beamforming* entre os colíderes é mostrado na Figura 3.11c.

Construído o mapa da rede em relação a cada colíder, este mapa deve ser enviado aos nós pertencentes ao respectivo *cluster*. Os mapas são transmitidos simultaneamente por cada colíder, em diferentes canais de controle, análogo ao feito para o *beamforming*. A distribuição do mapa completo aos nós do *cluster* é mostrado na Figura 3.11d. Assim, todos os nós terão o conhecimento do posicionamento não somente dos seus vizinhos de *cluster*, mas de todos os nós da rede.

O mapa que os colíderes trocam entre si, é composto dos ângulos dos nós dos *clusters* respectivos a cada colíder e relativos ao posicionamento desses colíderes.

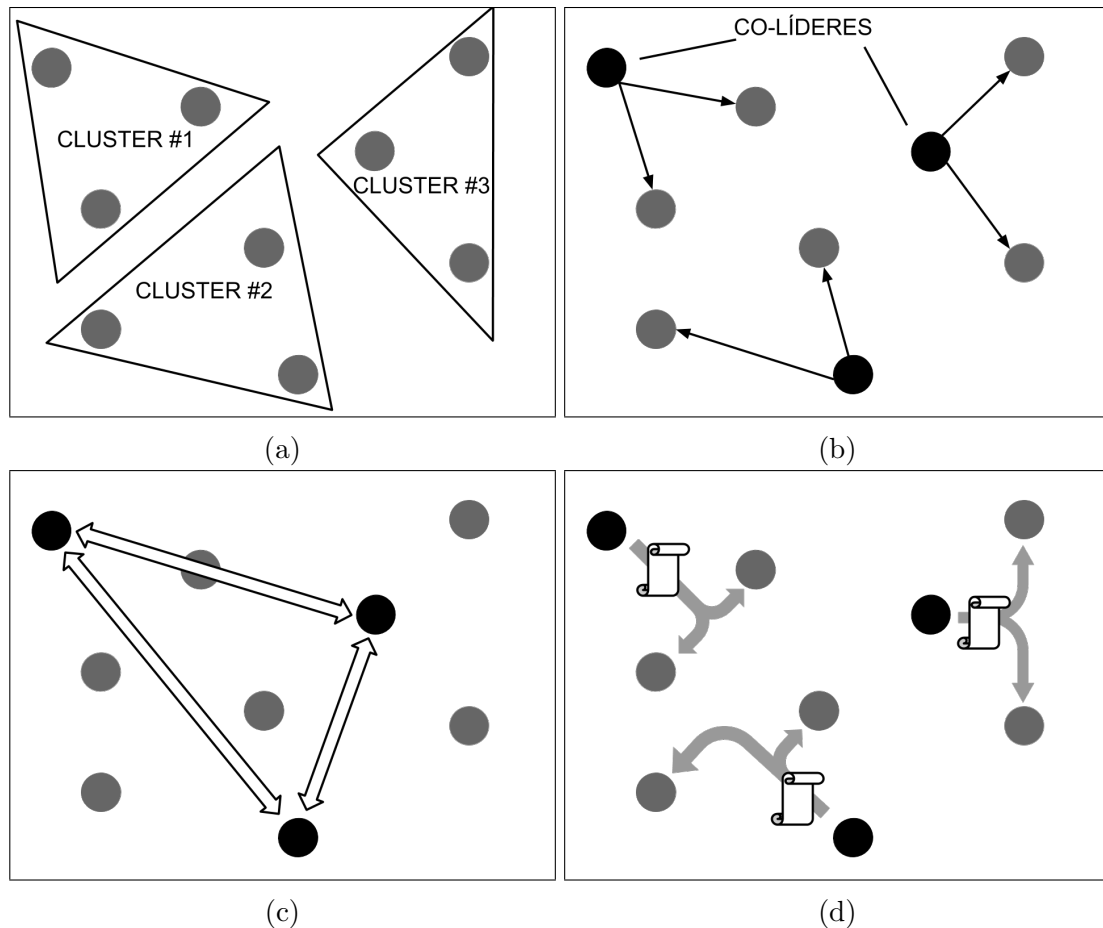


Figura 3.11: (a) *Clusters* divididos e colíderes de cluster estabelecidos (círculos pretos); (b) Colíderes realizando *beamforming* segundo a ordem predeterminada; (c) Colíderes de *cluster* realizando *beamforming* entre si e trocando os mapas de seus clusters; (d) colíderes transmitindo os mapas completos da rede no canal de controle atribuído ao seu *cluster*

Quando um colíder recebe o mapa de outro *cluster* através do colíder, ele deve recalculá-lo, como descrito na Seção 3.1.1. Ao recalculá-lo, o colíder adapta para o nó do seu *cluster* as informações que vieram de outro colíder. Ao receber um mapa completo do colíder, basta que o nó tenha o conhecimento do ângulo formado com o seu respectivo colíder para que o mapa seja recalculado e este nó passe a ter o conhecimento de toda a rede.

Comparado ao MuNDi MaPP, descrito na Seção 3.1, a proposta de clusterização diminui o número de *beamformings* e de mensagens enviadas na banda de controle. Em uma rede com  $K$  nós, o protocolo MuNDi MaPP realiza  $K$  *beamformings*, um do líder para todos os nós regulares e  $K - 1$  dos nós regulares individualmente com o líder. Com a clusterização, são realizados  $K/3$  *beamformings* dentro de um *cluster* e 3 *beamformings* entre os colíderes. Quanto às mensagens enviadas na banda de controle, ambos enviam  $K - 1$  mensagens contendo as senhas que ordenarão os *beamformings* e no caso da clusterização a alocação dos nós em seus devidos *clusters*.



Os mapas são enviados  $K - 1$  vezes no MuNDi MaPP, enquanto na clusterização esse número cai para  $K/3 - 1$ . Para exemplificar, uma rede com 15 nós, no protocolo MuNDi MaPP, precisaria de 15 *beamformings* e 28 mensagens transmitidas na banda de controle. Com a clusterização, esse número cai para 8 *beamforming* e 18 mensagens transmitidas na banda de controle.

Por outro lado, como primeiramente o colíder deve recalculá-lo o mapa que recebe dos demais colíderes e depois o próprio nó ao transmitir precisa recalculá-lo mais uma vez, o processo de clusterização potencialmente insere mais erros na descoberta de vizinhança. Na Seção 3.1.2 foi apresentada um possível fonte de erros, proveniente da conversão de feixe para ângulo, que no contexto da clusterização aconteceria duas vezes. A correção dos erros exige que os protocolos consumam mais tempo, uma vez que os nós precisam buscar pelos vizinhos que tiveram sua posição calculada com erro retransmitindo em outros feixes de sua antena direcional, até que o vizinho em questão seja encontrado. Análise do desempenho da clusterização e mais discussões serão feitas na Seção 4.5.

### 3.4 Manutenção da Rede

Nesta subseção propomos um mecanismo para contornar o problema do bloqueio. Esse cenário de mobilidade visa a validação da aplicação das técnicas de mapas em redes de ondas milimétricas abordadas até aqui, não somente para providenciar informações suficientes para o *bootstrap* da rede, mas também para o decorrer do seu funcionamento. O método empregado no contorno do bloqueio é o redirecionamento dos quadros através de um nó, que age como intermediário entre transmissor e receptor.

Na Seção 2.1.3, discutimos brevemente acerca do bloqueio causado por superfícies aos sinais em ondas milimétricas, devido à baixa capacidade de difratar que os sinais em ondas milimétricas possuem. O bloqueio causado por superfícies comuns, como o corpo humano e peças de mobília, facilmente geram interrupção total de um enlace [2]. Assim, qualquer cenário que se proponha a aproximar-se da realidade deve considerar o bloqueio causado por móveis em um ambiente onde os nós que operam na banda de ondas milimétricas estão.

Um método efetivo para lidar com os bloqueios é o uso de um nó de redirecionamento (do inglês, *relay*). O nó de *relay* é inserido entre transmissor e receptor, fazendo uma comunicação em dois saltos. A escolha do nó de *relay* deve ser feita de modo que este também não esteja com bloqueio para o receptor.

O mapa que cada nó regular recebe do nó líder contém a posição de cada nó da rede, expressa em ângulo e distância com relação ao líder. Como podemos verificar na Seção 3.1.1, a partir dessas informações podemos determinar o ângulo e a

distância a partir do nó de observação para qualquer outro nó da rede. Com esse conhecimento, podemos escolher os nós de *relay* para toda a rede.

Como critério para escolha do nó de *relay* iremos utilizar o ângulo e a distância. Iremos chamar de transmissor o nó que inicia a comunicação e detecta o bloqueio e de receptor o nó alvo dessa comunicação. O nó chamado *relay* é aquele escolhido pelo transmissor, baseado nos critérios já mencionados, para retransmitir os quadros ao receptor. Consideramos redirecionamentos com apenas um nó de *relay*, ou seja, o nó de *relay* não realiza um novo redirecionamento caso também esteja bloqueado para o receptor. O reconhecimento da entrega é realizado de modo fim-a-fim.

O ângulo necessário para que um nó seja eleito *relay* precisa estar dentro do intervalo  $\pm[\gamma, \pi/2]$ , considerando o eixo formado pelo par transmissor-receptor e  $\gamma > 0$ . A finalidade do intervalo de ângulos é selecionar para nó de *relay* um nó que esteja fora da linha de bloqueio. A distância entre o transmissor e o nó de *relay* deve ser menor ou igual a distância entre o transmissor e o receptor. A Figura 3.12 ilustra como a escolha do relay é realizada.

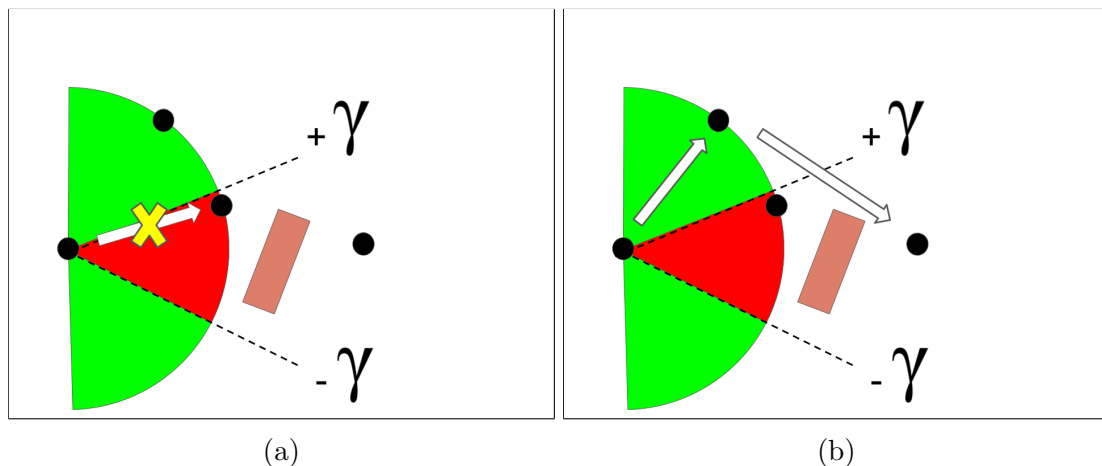


Figura 3.12: Seleção de *relay* mal sucedida devida ao nó selecionado não cumprir o critério de ângulo (área em vermelho)(a) e seleção de *relay* bem sucedida, pois o nó selecionado está dentro do intervalo de ângulo desejado (área em verde)(b).

Uma vez eleito o nó de *relay*, sempre que um bloqueio é detectado o quadro é transmitido para o nó de *relay*. Os bloqueios são detectados pelo esgotamento do tempo de espera do reconhecimento (*ACK timeout*). Ao receber um quadro com marcação de redirecionamento o nó de *relay* tenta transmiti-lo ao receptor. Caso não haja sucesso na transmissão, o nó de *relay* tentará retransmiti-lo até o número de tentativas seja esgotado. Caso ocorra o esgotamento, o nó de *relay* notifica o transmissor, que pode fazer retransmissões ou descartar o quadro, dependendo do número de tentativas realizadas pelo nó de *relay*. Na Seção 4.6 analisamos o desempenho do modo de redirecionamento em simulações considerando o bloqueio gerados por objetos móveis.

# Capítulo 4

## Simulações e Resultados

Neste capítulo, expomos os resultados obtidos através de simulações. Os protocolos propostos foram submetidos a dois cenários distintos. O primeiro cenário a ser apresentado é completamente estático e avalia a eficiência dos mecanismos de descoberta. Em separado, mas ainda sob as mesmas condições, analisamos os resultados da clusterização. No segundo cenário, há objetos móveis que geram bloqueios aos enlaces e assim verificamos a capacidade do mecanismo de mapas em habilitar os nós para efetuar o contorno de obstáculos.

### 4.1 Cenário de Simulação

Nesta seção, descreveremos os cenários das simulações utilizadas para analisar o desempenho dos protocolos de descoberta de vizinhança propostos neste trabalho. Ao avaliar a eficiência dos mecanismos de descoberta, incluímos nos experimentos outro protocolo já existente na literatura, o MDND [10]. O cenário reproduz uma sala com 10 m de largura e profundidade. Os nós são espalhados nesta sala seguindo uma distribuição uniforme. Dado o tamanho da ambiente e as aplicações que pretende-se simular, consideramos que a rede é completa e os nós são alcançáveis com um único salto, na banda de controle e na banda de ondas milimétricas.

Cada nó possui uma interface capaz de operar na banda de controle omnidirecional e outra que opera na banda de ondas milimétricas. Na banda de ondas milimétricas, as antenas direcionais são comutadas eletronicamente e o modelo de antena adotado foi o *Idealized Flat-Top Antenna System*, que é amplamente explorado na literatura [8, 9]. Esse modelo de antenas adotado é um modelo de antenas direcionais simplificado, pois o ganho da antena é igual em toda abertura do feixe, mas o ganho aumenta com a diminuição da largura do feixe. O número de feixes adotados para as antenas direcionais segue uma configuração típica para dispositivos comerciais, como *tablets*, televisores, AP's e etc [20].

A fim de avaliar o desempenho dos protocolos quanto a bloqueios, submetemos os

protocolos a um cenário com a presença de obstáculos móveis. Os sinais em ondas milimétricas são muito suscetíveis ao bloqueio total dos enlaces por serem altamente direcionais e apresentarem baixa difração nos obstáculos. Em [2], obstáculos dinâmicos se movem segundo o modelo *Random Waypoint* e geram bloqueios aos enlaces ativos.

No que concerne ao cenário de mobilidade, observamos o mecanismo de descobertas a partir de mapas e não um protocolo especificamente. Por isso, as simulações mensuram a eficácia da existência ou não de um método para contornar bloqueios. O modelo de mobilidade aplicado nas simulações que utilizam obstáculos se movendo considera objetos cilíndricos com raio de 30 cm, com o objetivo de simular a circulação de pessoas em uma sala. Esses objetos se movem com velocidade constante e a trajetória tem direção aleatória, seguindo uma distribuição uniforme. Contudo, o sentido da trajetória pode ser modificado com 20% de probabilidade. Diferente do modelo *Random Waypoint*, não há paradas aleatórias dos obstáculos. Variamos o número de obstáculos presentes no ambiente simulado e a velocidade que eles se movem.

Os bloqueios são considerados caso o objeto esteja posicionado sobre os feixes de transmissão ou recepção, configurando bloqueio total do sinal. Os parâmetros da mobilidade dos objetos foram ajustados com o intuito de simular a atividade humana em um ambiente, tendo em vista a atenuação severa causada pelo corpo humano a sinais na faixa de 60 GHz. O tráfego que os nós são submetidos segue uma distribuição de Poisson cuja taxa média de chegada é variada para observarmos o comportamento da rede ao aumento da intensidade do tráfego ao qual é submetida em conjunto com os bloqueios gerados.

As simulações foram realizadas usando bibliotecas matemáticas da linguagem Python em cerca de 10000 simulações, variando os parâmetros listados na Tabela 4.1. Ao considerar o número de feixes como variável, adotamos redes com 15 nós, quando o número de nós está variando, os nós permanecem com a configuração de 8 feixes. As curvas de todos os gráficos foram traçadas com intervalos de confiança de 95%. No cenário de mobilidade as simulações tem duração fixa de 200 segundos.

## 4.2 Simulador

O simulador utilizado para extrair os resultados apresentados nesse capítulo foi escrito na linguagem Python. O simulador computa os tempos de cada operação realizada e mede na saída os tempos desejados. Os parâmetros de entrada do simulador são: o número de nós, o número de feixes das antenas direcionais dos nós e a semente do gerador de números pseudoaleatório. O gerador de números pseudoaleatório do simulador é alimentado diferentes sementes que geram diferentes

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados na simulação dos protocolos multibanda MuNDi MaPP, Go MuNDi e MDND

Parâmetros da Simulação dos Protocolos Multibanda	
Cabeçalho da Camada Física	16 Bytes
Cabeçalho da Camada Mac	34 Bytes
Ack	31 Bytes
Sector Sweep	26 Bytes
Sector Sweep Feedback	31 Bytes
Comprimento do quadro de Senhas	(7*Número de Nós) Bytes
Comprimento do quadro Mapa	(10*Número de Nós) Bytes
Comprimento do quadro de Dados	1024 Bytes
Comprimento de quadro de Refinamento	1024 Bytes
RSV_REQ	20 Bytes
RSV_RES	14 Bytes
SIFS	10 $\mu$ S
Slot	9 $\mu$ S
DIFS	28 $\mu$ S
SIFS (Ondas Milimétricas)	3 $\mu$ S
SBIFS	1 $\mu$ S
Ack Timeout (Banda de Controle)	100 $\mu$ S
Ack Timeout (Ondas Milimétricas)	300 $\mu$ S
Taxa de Transferência (Banda de Controle)	6 Mbps
Taxa de Transferência ( <i>Beamforming</i> )	28,5 Mbps
Taxa de Transferência (Ondas Milimétricas)	1 Gbps
Número de Nós	[5, 10, 15, 20, 25]
Número de Setores	[4, 8, 16, 32]
Número de Objetos	[5, 6, 7, 8, 9, 10]
Velocidade dos Objetos (m/s)	[0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5]
Taxa de Chegada de Pacotes ( $1/\lambda$ )	[0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5]

posicionamentos dos nós na área de 10 x 10 m. Apesar da condição de aleatoriedade, repetindo uma semente e os parâmetros da rede o resultado será o mesmo, garantindo a repetibilidade do experimento.

A primeira parte do simulador posiciona os nós e elege o nó líder, quando é necessário. O tempo levado para eleição de um líder é fixo para um número de nós. O tempo de transmissão de uma mensagem na banda de controle é calculado a partir do tempo médio de transmissão de uma mensagem em uma rede utilizando DCF (*Distributed Coordination Function*), conforme descrito no Apêndice A. Então, a complexidade de mensagem do pior caso do algoritmo *A-Elect-Líder-C*, que é  $O(n \log n)$ , determina o número de mensagens considerado para eleição do líder. A complexidade de mensagem do algoritmo multiplicada pelo tempo médio de envio de uma mensagem, obtido na análise já mencionada do Apêndice A, resulta no tempo considerado para eleição do líder da rede.

O *beamforming* é simulado medindo a distância e o ângulo entre dois nós. Essas

medidas são acrescidas de erro, que tem distribuição aleatória normal com média e desvio padrão diferentes para distância e ângulo. A média do erro na distância é de 0,2m e o desvio padrão é de 1,2m, enquanto para o ângulo a média é  $0^\circ$  e o desvio padrão é  $10^\circ$ . Com a inserção desses erros, pretende-se simular as características transitórias do canal e que podem afetar o *beamforming* realizado entre dois nós. A duração do *beamforming* é dada pela soma do tempo para enviar uma mensagem de *Sector Sweep* (Tabela 4.1) em cada feixe da antena direcional mais os tempos de envio do *Sector Sweep Feedback* e do *ACK*.

O tempo de transmissão das mensagens de controle é dado pela razão entre o comprimento em *bits* da mensagem pela taxa de transferência da banda de controle. No entanto, por utilizar DCF e CSMA/CA na banda de controle, há um tempo até que o nó possa acessar a banda de controle e transmitir sem colisões a sua mensagem. O tempo de acesso também é calculado a partir do tempo médio de transmissão calculado no Apêndice A. Quando há um nó líder na rede, apenas ele transmite na banda de controle. Quando não há líder, apenas os nós que compõem a rede contendem pelo meio. Ou seja, não há tráfego na banda de controle coexistindo com os protocolos a serem testados.

Para validar a descoberta de vizinhança, cada par de nós deve trocar ao menos um quadro de dados com sucesso. Se a descoberta de vizinhança não foi realizada de forma correta, o quadro de dados não será transmitido com sucesso e deverá ser retransmitido. As retransmissões têm o seu tempo computado, até que uma transmissão seja feita com sucesso ou se esgote o número de retransmissões permitidas. Quando ao transmitir um nó erra a localização de um vizinho, as retransmissões são feitas primeiro nos feixes da antena direcional adjacentes ao feixe da tentativa original. Diferente da forma sequencial de retransmitir, pois assim os feixes próximos ao feixe originalmente calculado pelo nó transmissor, onde é mais provável que o nó receptor seja encontrado, como veremos na Seção 4.4.1.

### 4.3 Métricas Avaliadas

As métricas utilizadas para avaliar os protocolos em termos de eficiência da descoberta de vizinhança foram a taxa de acertos primários, o tempo levado para a descoberta total da rede para cada protocolo e o tempo médio aplicado a uma transmissão. A taxa de acertos primários é a medida do número de sucessos que um nó obteve ao transmitir a partir das informações providas pelo nó líder no mapa. Essa métrica revela o quão precisa é a informação de localização dos nós obtida. Isto é, a taxa de acertos primários é diretamente proporcional a acurácia das informações obtidas através do mapa.

O tempo total é medido considerando toda a etapa de controle que os protocolos

realizam, somada ao intervalo de transmissão de um quadro para cada par de nós. A transmissão com sucesso de um quadro certifica que a informação de descoberta está correta ou que, nos casos de erro, os nós a corrigiram e o tempo de correção também foi computado. O tempo médio de descoberta aproxima o tempo levado até que um nó conclua uma transmissão. A aproximação é realizada através da soma do tempo levado para a descoberta com a média do tempo gasto com as transmissões. Essa métrica nos permite observar o impacto do *overhead* causado pelos mecanismos de descoberta às transmissões.

No cenário que tem por finalidade verificar a robustez da rede aos bloqueios, as métricas aplicadas aos protocolos são diferentes. Avaliamos a capacidade da rede de a partir do mapa contornar obstáculos medindo o tempo total levado para que todos os pacotes fossem transmitidos e a porcentagem desses pacotes que foram entregues com sucesso. O tempo que a rede passa sobre bloqueio, ou seja, sem que nenhuma informação seja efetivamente transmitida, foi medido com a finalidade de determinar o retardo causado pela mobilidade e pelo bloqueio nos fluxos de dados. Outra métrica analisada é a taxa de quadros transmitidos com sucesso, que nos permite observar o impacto do bloqueio na rede.

## 4.4 Descoberta de Vizinhança

Esta seção tem por objetivo analisar o desempenho dos protocolos propostos quanto a eficiência e acurácia da descoberta de vizinhança que cada protocolo executou.

### 4.4.1 Taxa de Acertos Primários

Há um erro intrínseco à medida do ângulo causado pelo *beamforming*. Análogo à quantização, o processo de *beamforming* perde parte da informação do ângulo, posicionando um nó de forma relativa ao setor encontrado durante o processo. Essa perda de informação insere erro nos cálculos, diminuindo o número de acertos primários. A Figura 4.1 mostra a taxa de acertos primários do protocolo MuNDi MaPP. Os demais protocolos não dependem da divulgação de mapas, portanto essa métrica não se aplica a esses casos.

Em um conjunto  $K$  de nós, os acertos primários podem ser definida como razão de transmissões bem sucedidas com apenas uma tentativa pelo número total de transmissões realizadas, definida pela Equação 4.3. Se um nó não adquiriu corretamente a informação de localização do nó para o qual está transmitindo e a primeira tentativa de transmissão não for bem sucedida, a mensagem precisa ser retransmitida. As retransmissões ocorrerão até que o nó receptor seja encontrado e a mensagem entregue com sucesso ou o número máximo de retransmissões esgo-

tado. Com transmissões sendo realizadas entre todos os pares de nós possíveis, são realizadas  $\#K \times (\#K - 1)$  transmissões.

$$taxa\ de\ acertos = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} W(i, j)}{\#K \times (\#K - 1)} \quad (4.1)$$

Onde,

$$W(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ recebeu com sucesso a mensagem na primeira tentativa de } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.2)$$

Os acertos adjacentes consideram as retransmissões que são feitas através dos feixes adjacentes ao feixe em que foi realizada a primeira tentativa. Ou seja, as duas primeiras retransmissões são contabilizadas. A taxa de acertos, considerando os acertos nos feixes adjacentes pode ser reescrita da seguinte forma:

$$taxa\ de\ acertos = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} X(i, j)}{\#K \times (\#K - 1)} \quad (4.3)$$

Onde,

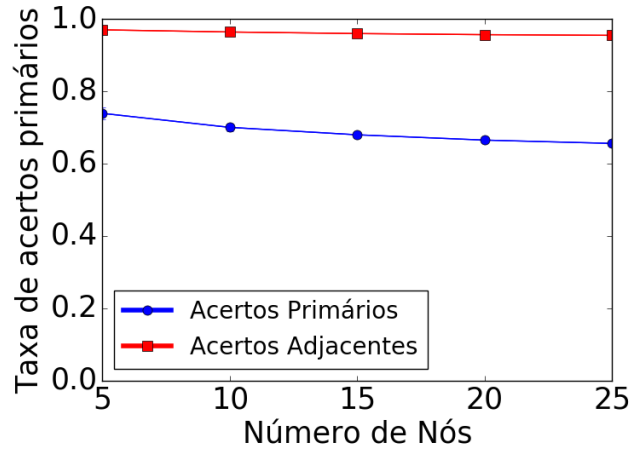
$$X(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ recebeu com sucesso a mensagem de } i \text{ com até 2 retransmissões} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.4)$$

A Figura 4.1 mostra que há uma diferença em média de cerca de 20% no número de acertos entre o considerar apenas o feixe de transmissão primário e considerar também os feixes adjacentes ao feixe primário. Assim, iniciar as buscas por um vizinho não encontrado pelos feixes adjacentes pode diminuir o tempo em relação a uma busca sequencial.

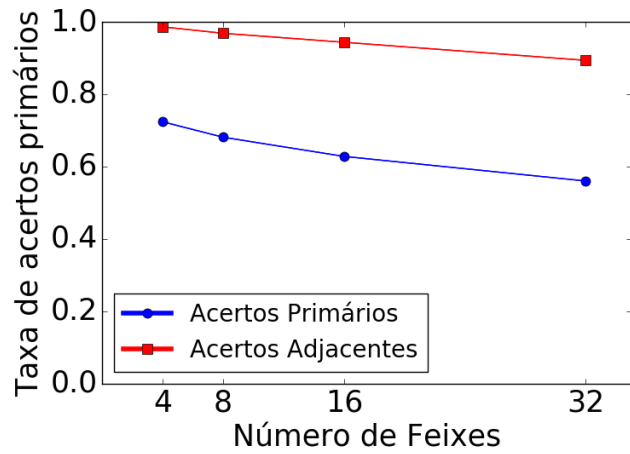
#### 4.4.2 Tempo de Descoberta Total

Para avaliar a eficiência dos mecanismos de descoberta, medimos também o tempo levado para que toda a rede seja descoberta, incluindo a troca de pacotes entre todos os nós da rede. Ao avaliar o protocolo MDND, consideramos que só é necessário realizar *beamforming* uma vez, para cada par de nós. Também consideramos que os





(a) Número de feixes igual a 8



(b) Número de nós igual a 15

Figura 4.1: (a) Taxa de acertos primários quanto ao número de nós e (b) Taxa de acertos primários em relação ao número de feixes comparando acertos primários e acertos de até um feixe

nós só consultam o AP acerca de informações das capacidades da rede uma vez. Em uma rede com  $K$  nós, os tempos totais dos protocolos MuNDi MaPP, Go MuNDi e MDND são dados pelas Equações 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente:

$$\begin{aligned}
T_{MuNDiMaPP} &= t_{elege-l\u00edder} + (K \times t_{beamforming}) + t_{tx-mapa} \\
&+ t_{tx-senha} + \sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{mensagem}(i, j) \quad (4.5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{GoMuNDi} &= t_{elege-l\u00edder} + (K \times t_{beamforming}) + t_{tx-senha} \\
&+ t_{feedback} + \sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{mensagem}(i, j) \quad (4.6)
\end{aligned}$$

$$T_{MDND} = \sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{controle}(i, j) + t_{beamforming} + t_{mensagem}(i, j) \quad (4.7)$$

Onde,  $t_{elege-l\u00edder}$  \u00e9 o tempo necess\u00e1rio para que o l\u00edder da rede seja eleito e  $t_{beamforming}$  o tempo para que um *beamforming* seja realizado na rede, considerando o n\u00famero de feixes adotado para os n\u00f3s. Os tempos  $t_{tx-mapa}$  e  $t_{tx-senha}$  s\u00e3o os tempo de transmiss\u00e3o dos mapas e das senhas, enviados na banda de controle em *unicast* para cada n\u00f3 regular. O protocolo Go MuNDi, definido na Se\u00e7\u00e3o 3.2, envia *feedbacks* das mensagens bisbilhotadas na banda de controle. O tempo de envio de todas as mensagens de *feedback* do protocolo Go MuNDi \u00e9 dado por  $t_{feedback}$ . O tempo de envio de uma mensagem, do n\u00f3  $i$  para o n\u00f3  $j$ , \u00e9  $t_{mensagem}(i, j)$ . A etapa de controle do protocolo MDND, descrita em [10], \u00e9 dada por  $t_{controle}(i, j)$ .

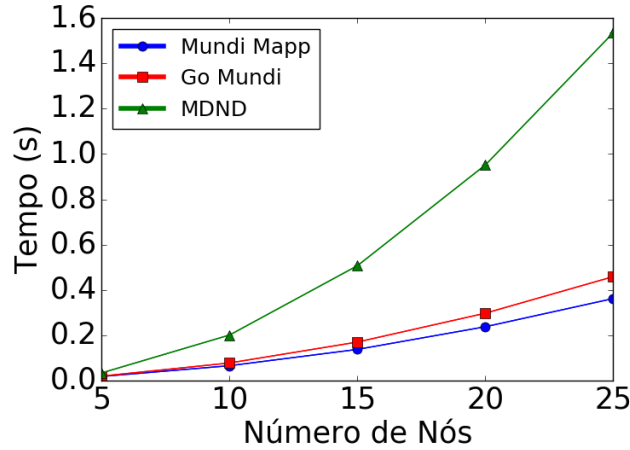


Figura 4.2: Tempo total de descoberta de vizinhan\u00e7a quanto ao n\u00famero de n\u00f3s considerando os protocolos propostos e o MDND. N\u00famero de feixes igual a 8.

Com base no resultado exposto na Figura 4.2 podemos concluir que o protocolo MDND leva mais tempo para descoberta total da rede do que os demais. Isso se deve ao fato de este protocolo realizar mais acessos ao canal de controle em rela\u00e7\u00e3o aos demais, o que em uma rede densa resulta em uma descoberta que leva mais tempo. A utiliza\u00e7\u00e3o mais frequente do canal de controle, que possui taxa de transmiss\u00e3o menor e ainda a disputa pelo meio, ocasionou ao MDND em um cen\u00e1rio mais denso

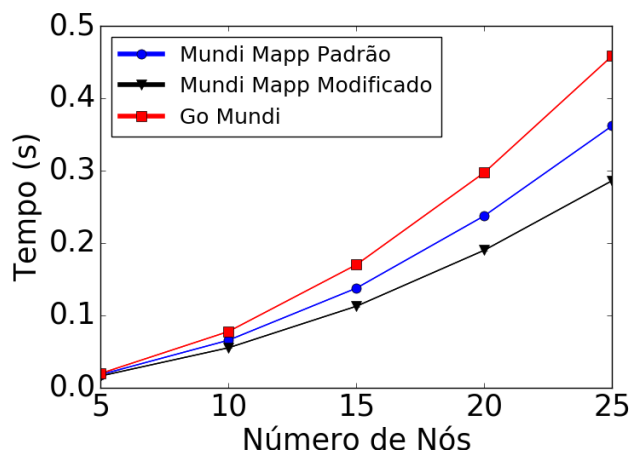


Figura 4.3: Tempo total de descoberta de vizinhança quanto ao número de nós considerando os protocolos propostos e uma modificação, que leva em consideração os feixes adjacentes. Número de feixes igual a 8.

e que considera a descoberta de toda rede o uso de um intervalo maior para as suas descobertas. A Figura 4.3 também mostra que o protocolo Go MuNDi precisa de 20% mais tempo que o protocolo MuNDi MaPP, devido às mensagens de *feedback* que ocasionam sucessivas disputas pelo meio quando há aumento no número de nós.

Para fins de comparação, uma versão do MuNDi MaPP modificada foi também testada em nossos experimentos. O MuNDi MaPP Modificado considera como acertos também os feixes adjacentes ao feixe onde o receptor está localizado. Essa modificação melhorou o desempenho do MuNDi MaPP diminuindo o tempo para que toda a rede seja descoberta, como mostrado nas Figuras 4.3 e 4.4. Esse resultado está de acordo com o discutido na Subseção 4.4.1, ou seja, ao considerar os setores adjacentes ao setor de recepção ou transmissão pode melhorar o desempenho dos protocolos, no que tange ao período até que a primeira transmissão de um enlace possa ser realizada. Por outro lado, isto resulta em um enlace de qualidade menor, o que leva a taxas de transferência menores.

#### 4.4.3 Tempo Médio de Descoberta por Par

O tempo médio de descoberta tem por objetivo aproximar o tempo que levaria a descoberta entre um par de nós. O protocolo MDND realiza descobertas individuais, ou seja, a cada nova transmissão, os nós executam um *beamforming*, seguido da transmissão da mensagem de dados. Assim, toda etapa de controle é repetida para cada par de nós  $(i, j)$ . Os demais protocolos realizam descobertas totais, ou seja, toda rede é descoberta até que uma mensagem possa ser transmitida. Então, para ocorrer uma transmissão inicial o protocolo deve executar todas as etapas de controle. As Equações 4.8, 4.9 e 4.10 descrevem os tempos médios de descoberta

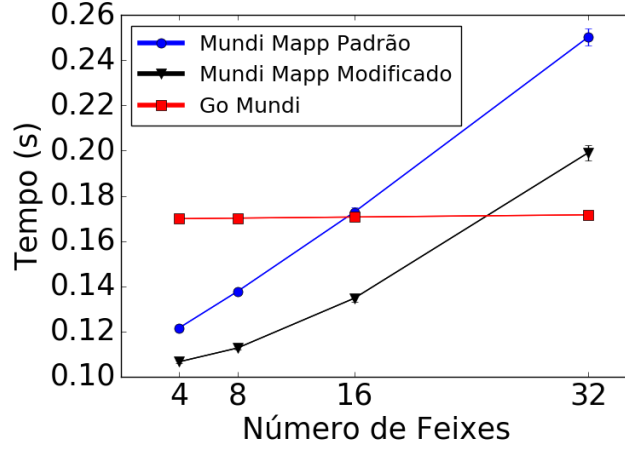


Figura 4.4: Tempo total de descoberta de vizinhança quanto ao número de feixes considerando os protocolos propostos e uma modificação, que leva em consideração os feixes adjacentes. Número de nós igual a 15.

dos protocolos MuNDi MaPP, Go MuNDi e MDND, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 Avg_{MuNDiMaPP} = t_{elege-l\underline{ider}} + (K \times t_{beamforming}) + t_{tx-mapa} \\
 + t_{tx-senha} + \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{mensagem}(i, j)}{\#K \times (\#K - 1)} \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Avg_{GoMuNDi} = t_{elege-l\underline{ider}} + (K \times t_{beamforming}) + t_{tx-senha} \\
 + t_{feedback} + \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{mensagem}(i, j)}{\#K \times (\#K - 1)} \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

$$Avg_{MDND} = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K \setminus i} t_{controle}(i, j) + t_{beamforming} + t_{mensagem}(i, j)}{\#K \times (\#K - 1)} \quad (4.10)$$

Como podemos ver nas Figuras 4.5 e 4.6, os muitos acessos realizados pelo Go MuNDi à banda de controle para transmissão dos quadros de *feedback* afetam significativamente seu desempenho. Na Subseção 4.4.2, vimos que o MDND tomava mais tempo em relação aos demais para realizar a descoberta de toda a rede. No entanto, como no MDND os *beamformings* são realizados a cada transmissão, o tempo médio de descoberta é menor em relação ao tempo total, pois o período de descoberta é relativo a apenas um par de nós e não toda a rede.

Mais uma vez, destacamos a sensibilidade do MuNDi MaPP ao aumento do número de feixes, que está diretamente ligado ao erro causado pela diminuição da área do feixe. Assim, quanto maior o número de feixes, menor será a probabilidade de o ângulo calculado através do mapa estar correto. Para suceder com a transmissão, na ocorrência de um erro, o nó transmissor precisa corrigir o ângulo de transmissão fazendo uma busca pelo receptor, que se inicia nos setores adjacentes ao calculado

e segue até ter tentado transmitir em todos os feixes. A busca pelo receptor não é sequencial pois, como vimos na Subseção 4.4.1, a maioria dos erros ocorre nos setores adjacentes ao calculado a partir do mapa.

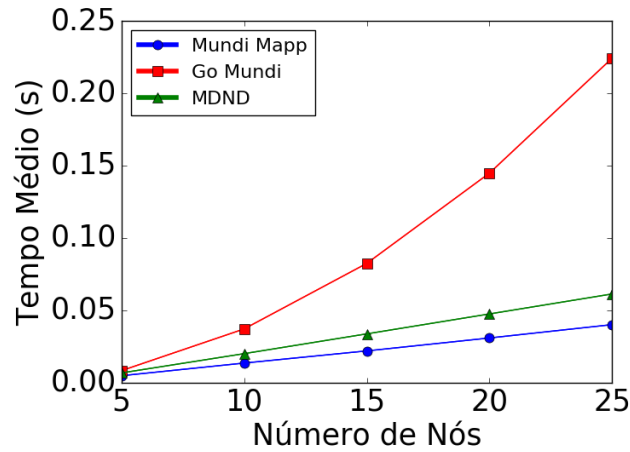


Figura 4.5: Tempo médio de descoberta entre um par de nós *versus* número de nós. Número de feixes igual a 8.

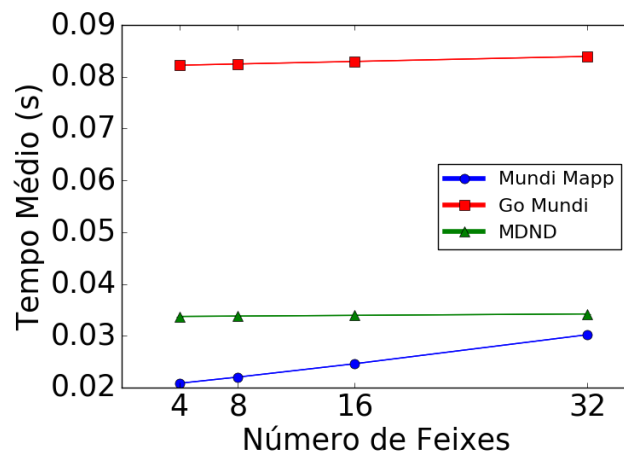


Figura 4.6: Tempo médio de descoberta entre um par de nós *versus* número de feixes. Número de nós igual a 15.

## 4.5 Clusterização

A clusterização foi proposta no contexto dos protocolos multibanda com o objetivo de diminuir o tempo aplicado para realizar os *beamformings* utilizando os canais disponíveis para paralelizar esta etapa dos protocolos. Consideramos que 3 canais estão disponíveis na banda de ondas milimétricas e os 3 canais ortogonais presentes

no padrão IEEE 802.11 na banda de 2.4 GHz. Assim, as redes se dividem em 3 *clusters* e por isso alteramos o número de nós utilizados nas simulações para múltiplos de 3. As métricas utilizadas para avaliação é o tempo médio de descoberta.

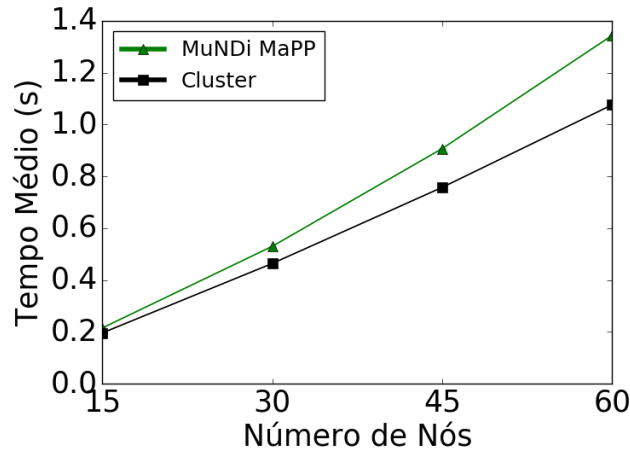


Figura 4.7: Tempo total pelo número de nós comparando a proposta MuNDi MaPP com uma versão em *clusters*. Número de feixes igual a 8.

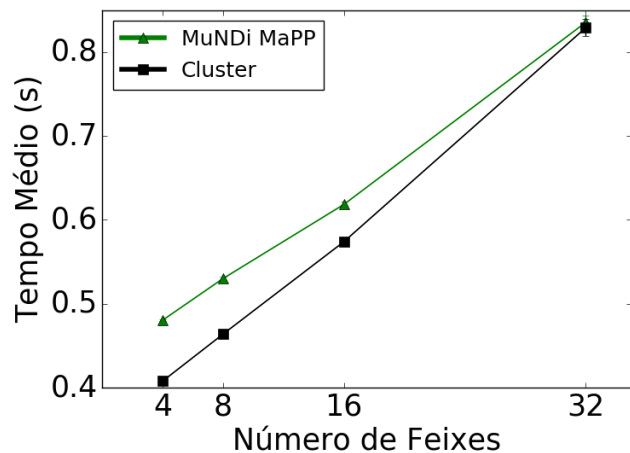


Figura 4.8: Tempo total pelo número de feixes comparando a proposta MuNDi MaPP com uma versão em *clusters*. Número de nós igual a 30.

A partir das Figuras 4.7 e 4.8, nota-se que a utilização de *clusters* diminui o tempo médio de transmissão em relação ao protocolo tradicional, mesmo que sua descoberta seja até 6% menos precisa que a versão não padrão do MuNDi MaPP, como podemos observar na Figura 4.10. Em virtude da paralelização, tanto no *beamforming* quanto na transmissão das mensagens de controle, o retardo experimentado pelos nós até que eles estejam aptos a transmitir é menor. É mostrado na Figura 4.9 que a soma das componentes do *overhead* ao utilizar *clusters* é menor que

as resultantes do MuNDi MaPP padrão. Essa diminuição no tempo de descoberta compensa o tempo levado corrigindo os erros nos ângulos obtidos.

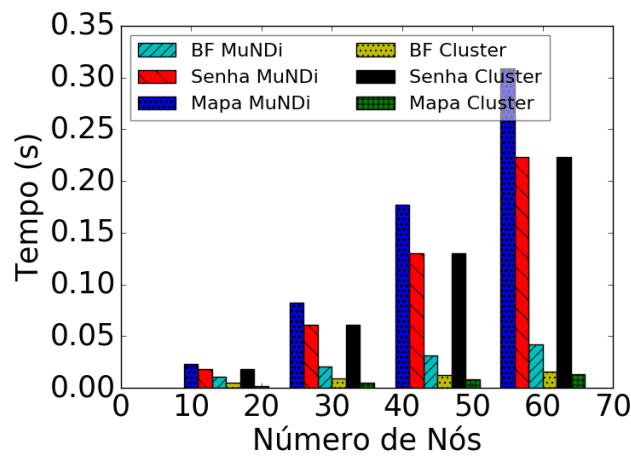


Figura 4.9: Detalhe do *overhead* causado pelo MuNDi MaPP padrão e pela versão com *clusters*

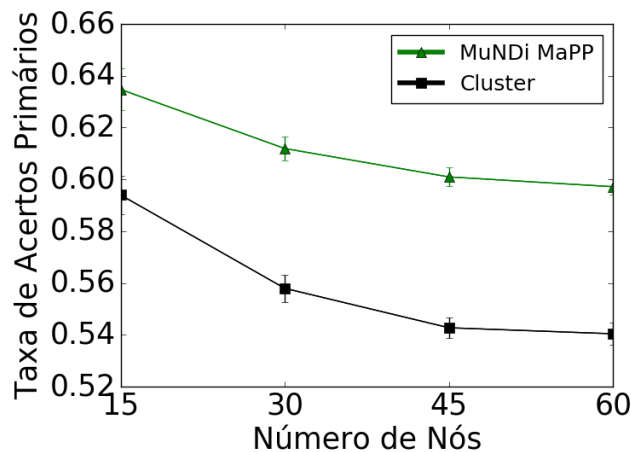


Figura 4.10: Taxa de acertos primários comparando a versão padrão do MuNDi MaPP com a versão com *clusters*

## 4.6 Bloqueio

Nesta seção, comparamos o protocolo MuNDi MaPP com uma versão modificada que é capaz de fazer transmissões em dois saltos (*Relay*) em um cenário onde há presença de obstáculos móveis. O método de transmissão via *relays* está especificado na Seção 3.4. Os nós que serão retransmissores são selecionados a partir do mapa, baseado no conhecimento que este oferece a respeito disposição dos nós, por isso

essa subseção põe à prova a capacidade de o mapa ser utilizado além do *bootstrap* da rede, quando é necessária a manutenção da rede.

Ao analisar os efeitos de obstáculos móveis provocando bloqueios tomamos como métrica o tempo que as redes passam bloqueadas, comparando o protocolo MuNDi MaPP com a adição de um método de recuperar os enlaces bloqueados, especificado na Seção 3.4, e sua versão padrão, sem esse método. Também iremos considerar o porcentagem de pacotes que foram entregues com sucesso, para avaliar o efeito do bloqueio sobre as sucessivas retransmissões a ponto de gerarem descarte de quadros.

### 4.6.1 Tempo Total de Transmissão

A métrica do tempo total de transmissão mede o tempo despendido pelos nós executando as etapas do protocolo, transmissões e retransmissões. Essa métrica não leva em conta os períodos em que os nós estão ociosos aguardando a chegada de um pacote. Portanto, medimos a duração do intervalo desde a chegada dos pacotes, a realização da reserva do canal, transmissão do pacote e recebimento do *ACK*.

Com base nos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12, podemos notar a influência dos retransmissores, diminuindo em até 15% o tempo levado para completar as transmissões. O aumento do número de obstáculos leva ao aumento do tempo para completar as transmissões, pois há maior probabilidade de um enlace estar bloqueado e haver impedimento de entregar os pacotes. A velocidade dos obstáculos gera o comportamento inverso, seu aumento implica em diminuição do tempo que um obstáculo passa interrompendo um enlace como podemos ver na Figura 4.13.

A Figura 4.11 nos permite assumir que a utilização de *relays* pode se beneficiar do aumento no número de nós. Deduzimos que o aumento no número de nós aumenta também a possibilidade de contornar um obstáculo ou a gama de escolhas de nós para atuarem como *relay*.

### 4.6.2 Tempo de Interrupção da Rede

Com o movimento dos obstáculos a rede passa por períodos de bloqueio que interrompem completamente o fluxo de dados. Esses períodos são dependentes do número de obstáculos e da velocidade com que eles se movem. Os resultados das simulações mostram que a versão do protocolo que utiliza *Relay* apresenta intervalos de bloqueio menores pela sua capacidade de contornar os obstáculos utilizando um terceiro nó. Podemos observar também que o aumento da velocidade dos obstáculos mostra novamente a diminuição o tempo de bloqueio, conforme as Figuras 4.15 e 4.16. Para exemplificar, considere que em um instante de observação da rede um obstáculo está bloqueando um enlace, quanto maior a velocidade que esse obstáculo



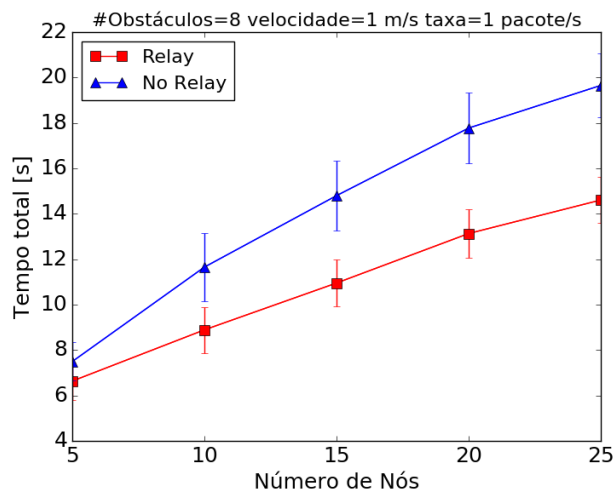


Figura 4.11: Tempo total gasto nas transmissões pelo número de nós

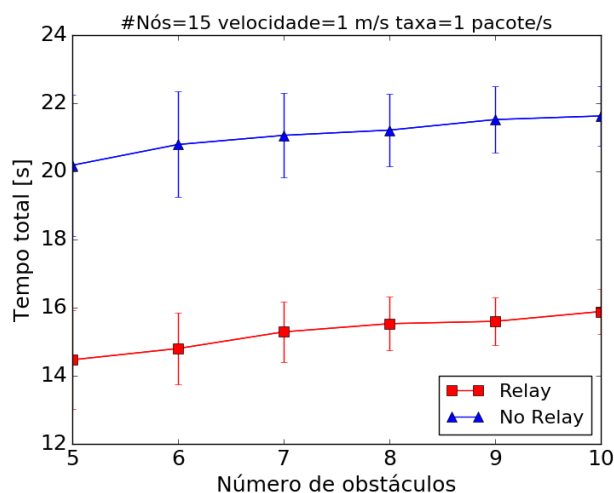


Figura 4.12: Tempo total gasto nas transmissões pelo número de obstáculos

se move, mais rápido ele se moverá para fora da região do feixe, ou seja, menor será o tempo que o obstáculo permanecerá na posição de bloqueio.

### Amostras de Rede sob Bloqueio

Os gráficos mostrados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 são amostras do comportamento de algumas redes. O objetivo desses gráficos é mostrar a quantidade maior de ocorrências de bloqueio em uma rede sem *relay* e a duração maior dos bloqueios. Em certos momentos, podemos notar que os bloqueios ocorrem no mesmo instante, tanto quando consideramos *relay* como quando não consideramos. Nas situações em que coincidem, podemos observar que o bloqueio se estende muito mais quando não há *relays* na rede .

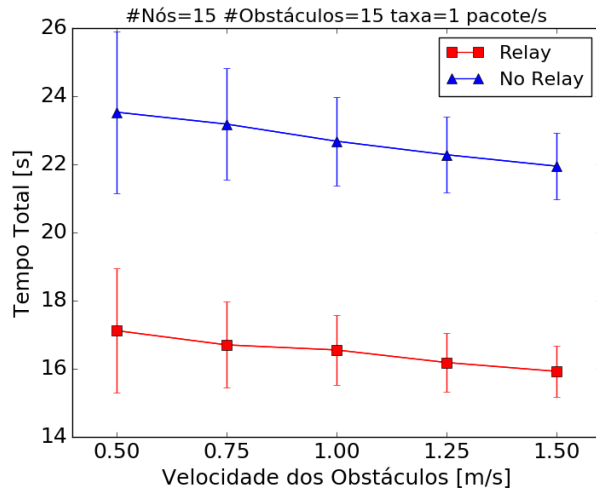


Figura 4.13: Tempo total gasto nas transmissões pela velocidade dos obstáculos

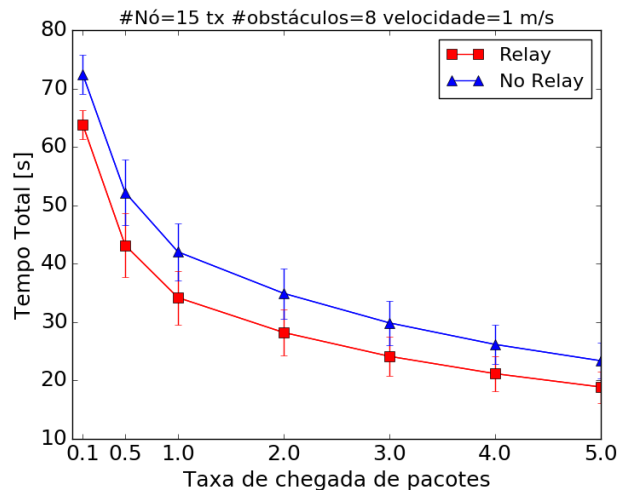


Figura 4.14: Tempo total gasto nas transmissões pela taxa de chegada de pacotes

### 4.6.3 Taxa de Quadros Transmitidos com Sucesso

O bloqueio de um enlace provoca sucessivas retransmissões, mesmo no caso em que um nó *relay* é utilizado. Essas retransmissões podem se repetir até que o número máximo de tentativas seja alcançado. Caso isso ocorra, o pacote é descartado. Então, o bloqueio interfere diretamente na taxa de quadros que foram transmitidos com sucesso.

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 podemos perceber que o fato de poder transmitir em 2 saltos leva a uma diminuição do número de quadros descartados. Além disso, a rede tornou-se mais robusta ao aumento da taxa de chegada de pacotes na rede e ao aumento do número de nós. A variação em pacotes entregues é 25% nas redes sem *relay* ao comparar redes com 5 e 25 nós, enquanto com *relays* essa diminuição é cerca de 10%, como exposto na Figura 4.20. Ao observar a taxa de chegada de pacotes na rede, representada na Figura 4.23, o número de pacotes entregues varia

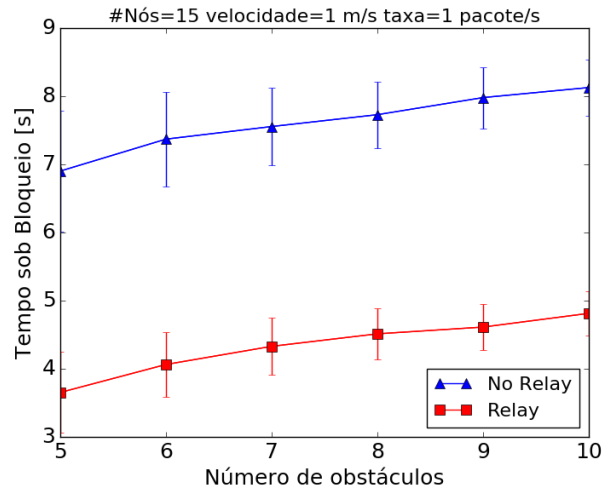


Figura 4.15: Duração do bloqueio pelo número de obstáculos

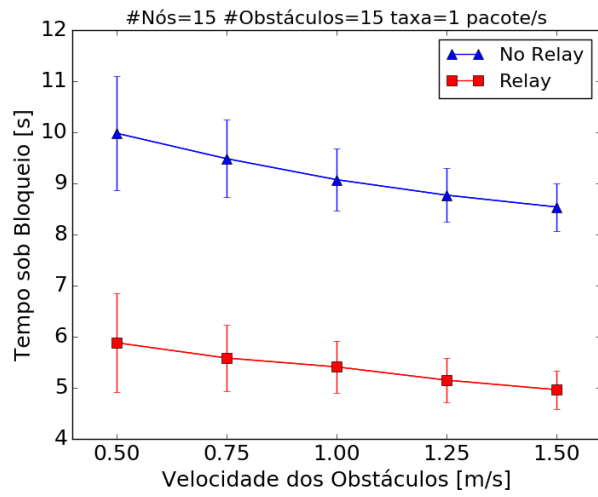
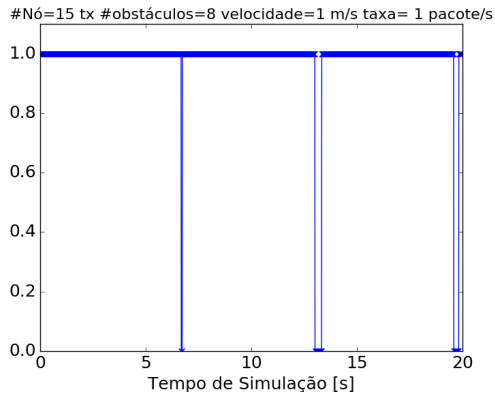
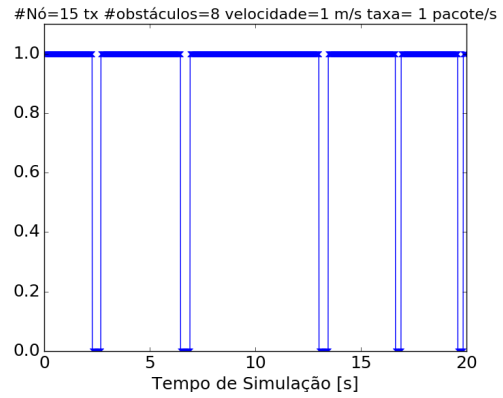


Figura 4.16: Duração do bloqueio pela velocidade dos obstáculos

em torno de 30% quando não são utilizados *relays* e pouco mais de 15% quando são utilizados *relays*.

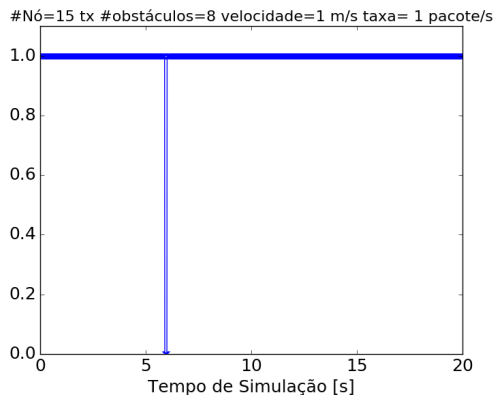


(a)

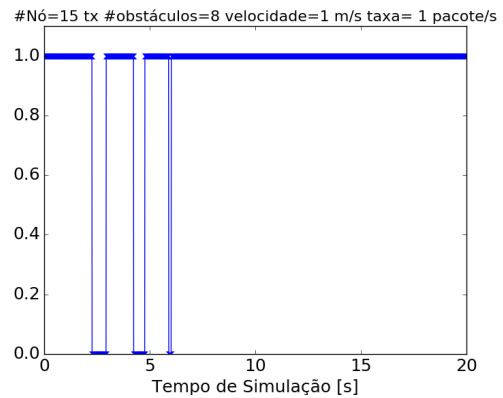


(b)

Figura 4.17: Amostra dos bloqueios durante as simulações, com *relay* (a) e sem *relay* (b)

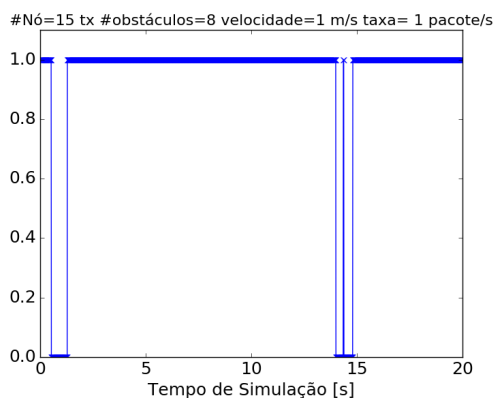


(a)

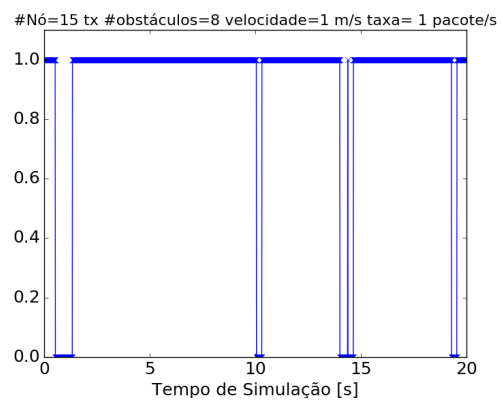


(b)

Figura 4.18: Amostra dos bloqueios durante as simulações, com *relay* (a) e sem *relay* (b)



(a)



(b)

Figura 4.19: Amostra dos bloqueios durante as simulações, com *relay* (a) e sem *relay* (b).

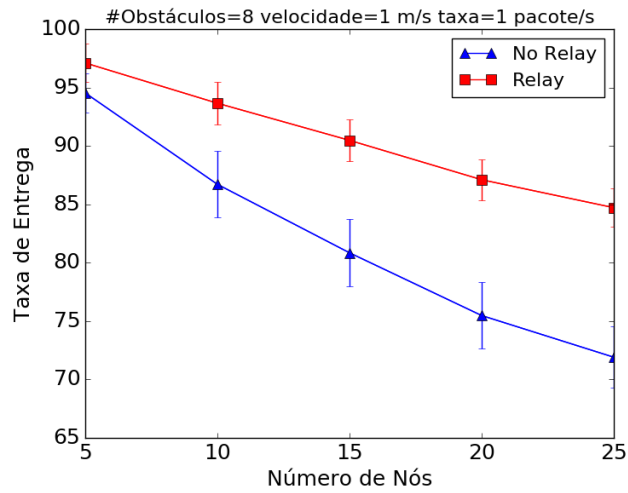


Figura 4.20: Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs número de nós

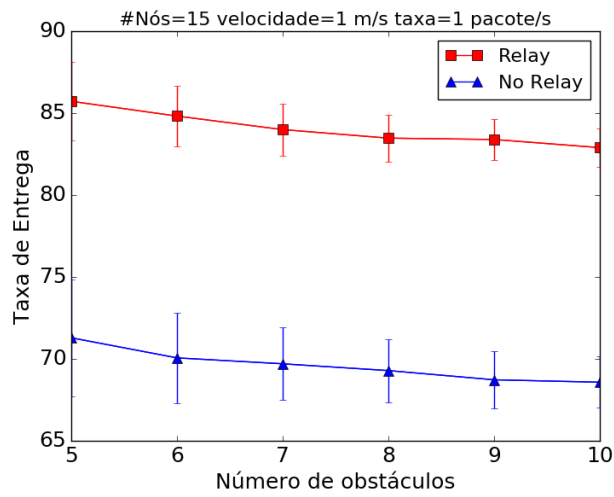


Figura 4.21: Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs número de obstáculos

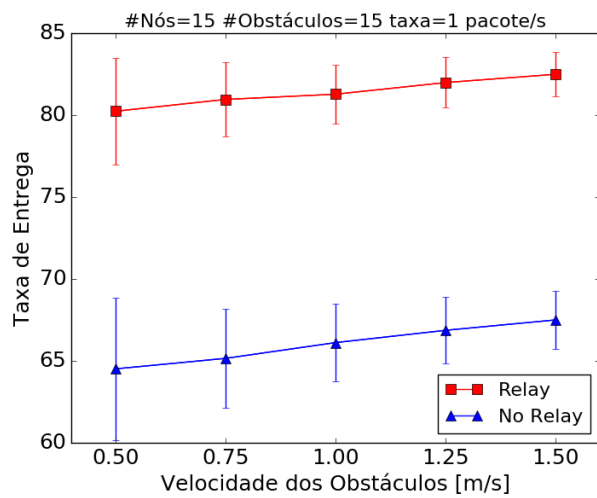


Figura 4.22: Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs velocidade dos obstáculos

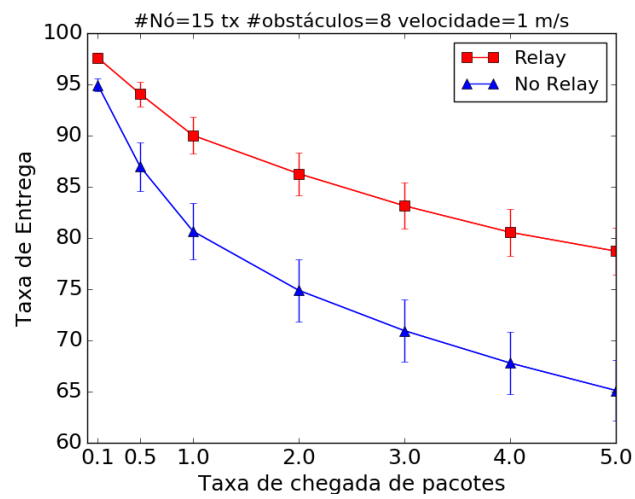


Figura 4.23: Taxa de entregas bem-sucedidas de quadros vs taxa de chegada de pacotes

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo iremos fazer as considerações finais sobre este trabalho, colocando as conclusões feitas a partir dos resultados obtidos nas diversas simulações e nas análises realizadas ao longo do trabalho. Por fim, discutiremos as perspectivas futuras para continuidade das propostas.

### 5.1 Conclusão

A utilização de bandas do espectro de frequências menos ocupadas por usuários e com maior largura de banda vem mostrando ser uma estratégia bem sucedida para conseguir cumprir com as demandas de qualidade de serviço cada vez mais exigentes dos usuários de redes sem fio. Dentre essas bandas, no presente trabalho, nós abordamos a banda de ondas milimétricas, especificamente a faixa não licenciada entre 57 e 66 GHz.

No contexto de ondas milimétricas, destacamos algumas de suas características, como a direcionalidade causada pela alta frequência e a necessidade de múltiplas antenas direcionais e de alto ganho para compensarem a perda de percurso sofrida, também devido a frequência. A direcionalidade resulta na necessidade do alinhamento preciso dos nós para que uma transmissão ocorra. Por sua vez, o alinhamento só o possível mediante o conhecimento do *Angle of Arrival*, *AoA*, que traduz fisicamente a posição dos dispositivos relativa aos mesmos. Para que os dispositivos tenham conhecimento da posição dos dispositivos vizinhos é necessário um mecanismo de descoberta de vizinhança.

Neste trabalho, descrevemos dois protocolos para realizar descoberta de vizinhança. A estratégia que nós utilizamos para que a descoberta seja realizada de forma eficiente foi utilizar uma banda de controle auxiliar que não está sujeita à direcionalidade ou intermitência do canal de ondas milimétricas. A banda de ondas milimétricas é utilizada para todo o tráfego de dados, oferecendo alta capacidade para essas transmissões.

O primeiro protocolo, MuNDi MaPP, monta um mapa das posições dos nós da rede a partir da perspectiva de um nó central, chamado de líder. O nó líder divulga a todos os demais nós o mapa que ele montou após realizar *beamforming* com cada um dos nós. Com as informações contidas no mapa e com o conhecimento da localização do nó líder, que foi obtida enquanto faziam *beamforming*, pode-se obter a posição relativa de qualquer outro nó. Esse mecanismo se baseia em ocupar apenas um nó com a obtenção das posições e depois fornecê-la aos demais nós, diminuindo assim o tempo necessário para a descoberta da rede.

Ainda propusemos outro protocolo, baseado na bisbilhotagem do *beamforming* para adquirir de forma mais rápido o conhecimento a respeito da posição dos vizinhos. Esse protocolo, chamado Go MuNDi, permite que os nós que não estão participando do *beamforming* possam permanecer em modo omnidirecional e assim capturem um dos quadros que os nós realizando *beamforming* transmitem ao passar por cada um dos seus setores. Depois que os nós realizam *beamforming*, em um cenário propício, todos os demais nós iriam ter ouvido oportunisticamente seus vizinhos, resultando no conhecimento total da rede.

Ao protocolo MuNDi MaPP foi adicionada a possibilidade de funcionar de modo paralelo. O paralelismo advém de *clusters* que operam em canais distintos, permitindo o *beamforming* e a transmissão das mensagens de controle de modo simultâneo. Nesse caso, cada *cluster* terá um colíder, responsável por realizar *beamforming* com os outros elementos do *cluster*, formando um mapa parcial da rede. Os colíderes realizam *beamforming* entre si e trocam os mapas que obtiveram dentro de seus *clusters*. Com a informação a respeito dos demais colíderes e os elementos de seus respectivos *clusters*, cada líder monta um mapa completo da rede que será propagado dentro de seu *cluster*.

Os protocolos foram analisados e comparados com outro presente na literatura, o MDND [10]. As análises foram feitas sob resultados de simulações realizadas utilizando a linguagem Python, reproduzindo cenários simulação de redes de ondas milimétricas locais encontrados vastamente na literatura, como em [2] e [13]. Avaliamos os protocolos entre si e também o MuNDi MaPP comparado a sua versão com *Clusters* e com múltiplos saltos, esta última em um cenário com possibilidade de bloqueio gerado por obstáculos móveis.

Nos resultados obtidos, os protocolos MuNDi MaPP e Go MuNDi, apresentaram desempenho em um contexto de descoberta total da rede, até 75% mais eficientes que o protocolo MDND, que realiza diversas etapas de controle sendo afetado pelo retardo causado pelo acesso ao meio na banda de controle. Também verificamos que o MuNDi MaPP é menos robusto ao aumento do número de setores da antena.

Quanto à clusterização, verificamos a diminuição do tempo empregado para realização das etapas de controle. A métrica usada foi o tempo médio de transmissão,



ou seja, quando utilizada, a clusterização proporciona a um dispositivo um tempo menor para que possa realizar uma retransmissão.

Ao inserir obstáculos gerando bloqueio no cenário, destacamos a necessidade de um esquema de contorno do bloqueio, que trouxe robustez à variação de algumas condições do cenário e melhoria no desempenho do protocolo. A utilização de transmissões de dois saltos, quando ocorre uma situação de bloqueio, diminuiu o percentual de pacotes descartados em até 15%, diminuiu o tempo de bloqueio da rede em torno de 40% e diminuiu o tempo total de transmissão em 15%.

## 5.2 Trabalhos Futuros

A propagação em ondas milimétricas é extremamente desafiadora e promissora. Sendo considerada uma das tecnologias capazes de satisfazer os requisitos da quinta geração de telefonia móvel, ondas milimétricas tem se tornado um tema bastante abordado em diversas áreas, como o estudo de antenas e propagação, processamento de sinais e redes móveis.

Futuramente, pretendemos estender o protocolo MuNDi MaPP para permitir o reuso espacial. Com o reuso espacial podemos aumentar ainda mais a capacidade da rede, permitindo transmissões simultâneas. As diferentes localizações dos nós e as antenas direcionais minimizam a interferência gerada entre os enlaces ativos, possibilitando a ativação de múltiplos enlaces simultaneamente. As mensagens de reserva de canal, *Reservation Request* (RSV REQ) e *Reservation Request* (RSV RES), em conjunto com o mapa, podem ser usados para analisar a viabilizar as transmissões não interferentes sem que o protocolo MuNDi MaPP seja modificado e dependendo apenas dos próprios nós.

Ainda em versão preliminar, também temos como objetivo refinar o mecanismo de retransmissão. Com apenas dois saltos, o contorno do obstáculo torna-se limitado e por vezes, mesmo com a possibilidade de contorno, ainda houveram ocasiões de descarte de muitos quadros. Expandindo o mecanismo de retransmissão para mais de 2 saltos, presumimos que os obstáculos serão contornados em mais cenários onde houve descarte mesmo com retransmissão.

Tendo em vista o aprimoramento e a validação das propostas expostas neste trabalho, deseja-se implementar os protocolos propostos em simuladores de pacotes, como o NS-3. Com o surgimento e a disseminação de *testbeds*, pretende-se explorar a experimentação real oferecida em uma rede com dispositivos que atuem na banda de ondas milimétricas. A realização de experimentos reais nos dará a dimensão da capacidade dos nossos protocolos frente padrões já existentes e implementados em dispositivos, como o IEEE 802.11ad e IEEE 802.15.3c.

# Referências Bibliográficas

- [1] NIU, Y., LI, Y., JIN, D., et al. “A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges”, *Wireless Networks*, v. 21, n. 8, pp. 2657–2676, 2015.
- [2] SINGH, S., ZILIOOTTO, F., MADHOW, U., et al. “Blockage and directivity in 60 GHz wireless personal area networks: From cross-layer model to multihop MAC design”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 27, n. 8, 2009.
- [3] MOBILE, C. V. “Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper”. Abril 2018. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>.
- [4] MACCARTNEY, G. R., ZHANG, J., NIE, S., et al. “Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells”. In: *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pp. 3948–3953. IEEE, 2013.
- [5] GOSSAIN, H., CORDEIRO, C., CAVALCANTI, D., et al. “The deafness problems and solutions in wireless ad hoc networks using directional antennas”. In: *Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. GlobeCom Workshops 2004. IEEE*, pp. 108–113. IEEE, 2004.
- [6] CHEN, Q., TANG, J., WONG, D. T. C., et al. “Directional cooperative MAC protocol design and performance analysis for IEEE 802.11 ad WLANs”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 6, pp. 2667–2677, 2013.
- [7] WANG, P., PETROVA, M., MÄHÖNEN, P. “Coop-DMAC: A Cooperative Directional MAC protocol for wireless networks”. In: *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2015 IEEE 16th International Symposium on a*, pp. 1–9. IEEE, 2015.

- [8] VASUDEVAN, S., KUROSE, J., TOWSLEY, D. “On Neighbor Discovery in Wireless Networks With Directional Antennas”, 08 2004.
- [9] AN, X., PRASAD, R. V., NIEMEGEREERS, I. “Impact of antenna pattern and link model on directional neighbor discovery in 60 GHz networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 10, n. 5, pp. 1435–1447, 2011.
- [10] PARK, H., KIM, Y., SONG, T., et al. “Multiband directional neighbor discovery in self-organized mmWave ad hoc networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 64, n. 3, pp. 1143–1155, 2015.
- [11] BRILHANTE, D. S., REZENDE, J. F. “Protocolos Multibanda para Descoberta de Vizinhança em Redes Ad Hoc de Ondas Milimétricas”, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, v. 36, 2018. Disponível em: <<http://portaldeconteudo.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/2437>>.
- [12] RAPPAPORT, T. S., OTHERS. *Wireless communications: principles and practice*, v. 2. prentice hall PTR New Jersey, 1996.
- [13] NING, J., KIM, T.-S., KRISHNAMURTHY, S. V., et al. “Directional neighbor discovery in 60 GHz indoor wireless networks”, *Performance Evaluation*, v. 68, n. 9, pp. 897–915, 2011.
- [14] WIKIPEDIA. “Antenna Aperture”. Abril 2018. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_aperture](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_aperture)>.
- [15] SINGH, S., ZILIOOTTO, F., MADHOW, U., et al. “Millimeter wave WPAN: cross-layer modeling and multi-hop architecture”. In: *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, pp. 2336–2340. IEEE, 2007.
- [16] RAPPAPORT, T. S., MACCARTNEY, G. R., SUN, S., et al. “Small-scale, local area, and transitional millimeter wave propagation for 5g communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 65, n. 12, pp. 6474–6490, 2017.
- [17] RAPPAPORT, T. S., SUN, S., MAYZUS, R., et al. “Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!” *IEEE access*, v. 1, pp. 335–349, 2013.
- [18] COLLONGE, S., ZAHARIA, G., ZEIN, G. E. “Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 GHz indoor radio channel”, *IEEE*

*Transactions on Wireless Communications*, v. 3, n. 6, pp. 2396–2406, 2004.

- [19] LAN, Z., SUM, C.-S., WANG, J., et al. “Relay with deflection routing for effective throughput improvement in Gbps millimeter-wave WPAN systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 27, n. 8, 2009.
- [20] NITSCHKE, T., CORDEIRO, C., FLORES, A. B., et al. “IEEE 802.11 ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi”, *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 12, pp. 132–141, 2014.
- [21] AGIWAL, M., ROY, A., SAXENA, N. “Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 18, n. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [22] RANGAN, S., RAPPAPORT, T. S., ERKIP, E. “Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges”, *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, pp. 366–385, 2014.
- [23] GHOSH, A., THOMAS, T. A., CUDAK, M. C., et al. “Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 32, n. 6, pp. 1152–1163, 2014.
- [24] RAPPAPORT, T. S., GUTIERREZ, F., BEN-DOR, E., et al. “Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications”, *IEEE transactions on antennas and propagation*, v. 61, n. 4, pp. 1850–1859, 2013.
- [25] ZHU, X., DOUFEXI, A., KOCAK, T. “Throughput and coverage performance for IEEE 802.11 ad millimeter-wave WPANs”. In: *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pp. 1–5. IEEE, 2011.
- [26] 802.15.3C TASK GROUP, I. “IEEE 802.15 WPAN Millimeter Wave Alternative PHY Task Group 3c (TG3c)”. 2009. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>>.
- [27] BHUSAL, R., MOH, S. “Qualitative and quantitative comparison of IEEE 802.15.3c and IEEE 802.11 ad for multi-gbps local communications”, *Wireless personal communications*, v. 75, n. 4, pp. 2135–2149, 2014.
- [28] CHANDRA, K., DOFF, A., CAO, Z., et al. “60 GHz MAC standardization: Progress and way forward”. In: *Consumer Communications and Network*

- king Conference (CCNC), 2015 12th Annual IEEE, pp. 182–187. IEEE, 2015.
- [29] ECMA. “Standard ECMA-387 High Rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PALs”. 2009. Disponível em: <<https://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-387.htm>>.
- [30] PARK, M., CORDEIRO, C., PERAHIA, E., et al. “Millimeter-wave multi-Gigabit WLAN: Challenges and feasibility”. In: *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pp. 1–5. IEEE, 2008.
- [31] KUTTY, S., SEN, D. “Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 18, n. 2, pp. 949–973, 2016.
- [32] SIM, G. H., NITSCHKE, T., WIDMER, J. C. “Addressing MAC layer inefficiency and deafness of IEEE 802.11ad millimeter wave networks using a multi-band approach”. In: *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on*, pp. 1–6. IEEE, 2016.
- [33] BARBOSA, V. C. *An introduction to distributed algorithms*. Mit Press, 1996.
- [34] PALACIOS, J., CASARI, P., WIDMER, J. “JADE: Zero-knowledge device localization and environment mapping for millimeter wave systems”. In: *INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications, IEEE*, pp. 1–9. IEEE, 2017.
- [35] OLIVIER, A., BIELSA, G., TEJADO, I., et al. “Lightweight indoor localization for 60-GHz millimeter wave systems”. In: *Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2016 13th Annual IEEE International Conference on*, pp. 1–9. IEEE, 2016.
- [36] SAKAMOTO, H. “On the distributions of the product and the quotient of the independent and uniformly distributed random variables”, *Tohoku Mathematical Journal, First Series*, v. 49, pp. 243–260, 1943.
- [37] CARDOSO, K. V., DE REZENDE, J. F. “Increasing throughput in dense 802.11 networks by automatic rate adaptation improvement”, *Wireless Networks*, v. 18, n. 1, pp. 95–112, 2012.

# Apêndice A

## Análise do Tempo Médio de Transmissão das Mensagens de *Feedback*

O objetivo desta análise é estabelecer o tempo esperado para os  $K$  nós da rede transmitirem suas mensagens *feedback*. Como a etapa de *feedback* é realizada na banda de controle, que opera com CSMA/CA, o período de uma transmissão é não determinístico. O tempo esperado para que um dispositivo STA realize uma transmissão bem sucedida no padrão IEEE 802.11 foi estudado analiticamente em diversos trabalhos. No entanto, optamos por utilizar o modelo descrito pela Equação. A.1 [37]. Este modelo permite a inclusão do *backoff exponencial* no cálculo do tempo médio esperado.

$$TX_{time} = DIFS + \sum_{i=0}^r backoff(i) + (r + 1) \times (SIFS + ACK + header + (n * 8/b)) \quad (A.1)$$

$$backoff(i) = \frac{1}{2^i CW_{min}} \quad (A.2)$$

Onde  $b$  é a taxa de bits da camada física,  $r$  é o número de tentativas que um nó realiza até que conclua uma transmissão e  $n$  é o tamanho do *payload*.  $backoff(i)$  assume o valor do tempo médio de *backoff* para a  $i$  –ésima tentativa de transmitir e  $CW_{min}$  é o tamanho inicial da janela de contenção.  $DIFS$ ,  $SIFS$  e  $ACK$  são, respectivamente, os tempos de DIFS, SIFS e da transmissão de um ACK no padrão utilizado. O termo *header* representa o tempo para transmissão dos cabeçalhos.

O número de tentativas de transmissões  $r$ , deve ser estabelecido de tal forma a transmitir  $K * K - 1$  mensagens de *feedback*, como o cenário descrito na seção 3.2. Este cenário possui aspecto transitório, uma vez que um nó transmitiu os  $K - 1$

quadros de *feedback*, este nó cessa a disputa pelo canal, diminuindo o número de nós disputando o meio. Isto irá se repetir até que não haja mais nenhum nó a transmitir.

A probabilidade de que um nó inserido em uma rede com  $k$  nós transmita é dada por:

$$P_{tx} = \frac{k\tau(1-\tau)^{k-1}}{1-(1-\tau)^k} \quad (\text{A.3})$$

Onde  $\tau$  é a duração média do período de *backoff* [9]. Podemos então definir o operador  $\tau^x$ , onde  $x$  é o número tentativas de transmissão sem sucesso, ou seja, o número de vezes que a janela de contenção sofreu aumento.

$$\tau^x = \frac{2}{2^x w + 1} \quad (\text{A.4})$$

Onde  $w$  é o tamanho mínimo da janela de contenção. A probabilidade de ocorrerem  $s$  transmissões até que haja uma transmissão bem sucedida pode ser definida por:

$$P_s = \left[ 1 - \frac{n\tau^1(1-\tau^1)^{k-1}}{1-(1-\tau^1)^k} \right] \left[ 1 - \frac{n\tau^2(1-\tau^2)^{k-1}}{1-(1-\tau^2)^k} \right] \dots \left[ 1 - \frac{n\tau^{s-1}(1-\tau^{s-1})^{k-1}}{1-(1-\tau^{s-1})^k} \right] \left[ \frac{n\tau^s(1-\tau^s)^{k-1}}{1-(1-\tau^s)^k} \right] \quad (\text{A.5})$$

Podemos então definir o número esperado de retransmissões  $E[r]$  somando as probabilidades de transmitir até que as  $m$  retransmissões permitidas pela rede sejam alcançadas.

$$E[r] = \sum_{s=1}^m \left[ \prod_{k=1}^{s-1} 1 - \frac{n\tau^k(1-\tau^k)^{n-1}}{1-(1-\tau^k)^n} \right] \left[ n \frac{\tau^s(1-\tau^s)^{n-1}}{1-(1-\tau^s)^n} \right] s \quad (\text{A.6})$$

O valor de  $r$  para ser substituído na Equação A.1 pode ser obtido através de

$$r = \lceil E[r] \rceil \quad (\text{A.7})$$

Onde  $\lceil \cdot \rceil$  representa o arredondamento, para o inteiro maior mais próximo (*ceiling*). Os resultados obtidos através da Equação A.1 foram comparados com simulações realizadas no software de simulação *NS-3*. O resultado obtido pode ser visto na Figura A.1 e os parâmetros da simulação estão descritos na Tabela ??.

Com base na Figura A.1(a) podemos adotar o modelo analítico proposto como

Parâmetros da Simulação das Mensagens de *Feedback*

Cabeçalho da Camada Física	16 Bytes
Cabeçalho da Camada Mac	34 Bytes
Ack	31 Bytes
Comprimento das Mensagens de <i>Feedback</i>	60 Bytes
SIFS	10 $\mu$ S
Slot	9 $\mu$ S
DIFS	28 $\mu$ S
Ack Timeout	100 $\mu$ S
Taxa de Transferência	6 Mbps
Número de Nós	[5, 10, 15, 20, 25]

Tabela A.1: Parâmetros utilizados na simulação da Transmissão das Mensagens de *Feedback*

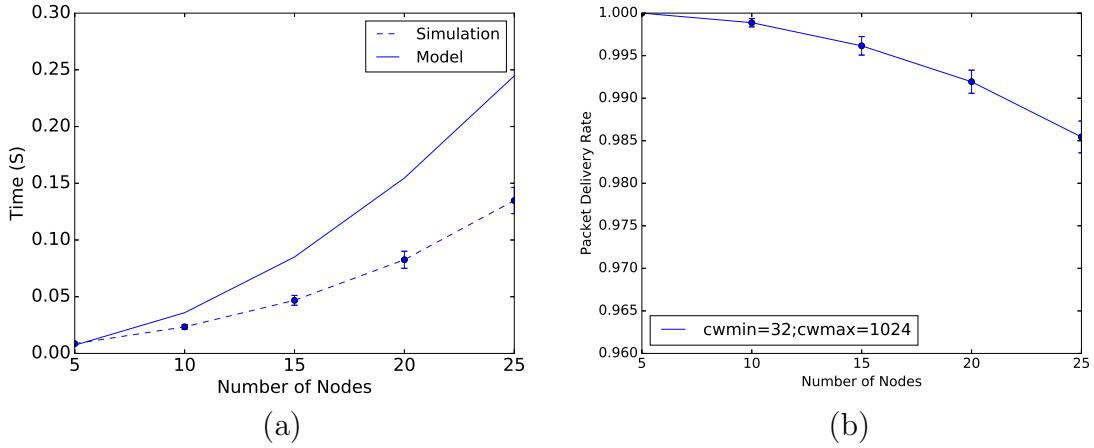


Figura A.1: (a) Comparação entre os resultados da simulação e do modelo proposto; (b) Porcentagem de pacotes entregues com Janela de Contenção igual a 1024

limite superior do tempo esperado para a conclusão das transmissões na banda de controle. Devido ao fato de não considerar perdas, a curva do modelo se distancia suavemente da curva da simulação, quando o número de nós aumenta e começa a ocorrer descarte de pacotes na rede por esgotamento do número de tentativas (*Station Long Retry Count*). A quantidade percentual de pacotes entregues é demonstrada na Figura A.1(b).