



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**FDT-MAC e FDMR-MAC: Protocolos de controle de
acesso ao meio projetados para explorar o potencial das
comunicações full-duplex**

Lucas de Melo Guimarães

Brasília
2020



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**FDT-MAC e FDMR-MAC: Protocolos de controle de
acesso ao meio projetados para explorar o potencial das
comunicações full-duplex**

Lucas de Melo Guimarães

Tese apresentada como requisito parcial
para conclusão do Doutorado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília
2020

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Doutorado em Informática

Coordenadora: Prof.^a Dr.^a Genaina Nunes Rodrigues

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim (Orientador) — CIC/UnB
Prof.^a Dr.^a Aletéia Patrícia Favacho de Araújo — CIC/UnB
Prof. Dr. Jó Ueyama — ICMC/USP
Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes — CIn/UFPE

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Guimarães, Lucas de Melo

FDT-MAC e FDMR-MAC: Protocolos de controle de acesso ao meio projetados para explorar o potencial das comunicações full-duplex / Lucas de Melo Guimarães. Brasília : UnB, 2020.

126 p. : il. ; 29,5 cm.

Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

1. Comunicações *Full-duplex*, 2. Reserva de Canal, 3. Protocolos MAC, 4. Sinais pulso e tom, 5. FDT-MAC, 6. FDMR-MAC.

CDU 004.7

Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília-DF — Brasil



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

FDT-MAC e FDMR-MAC: Protocolos de controle de acesso ao meio projetados para explorar o potencial das comunicações full-duplex

Lucas de Melo Guimarães

Tese apresentada como requisito parcial
para conclusão do Doutorado em Informática

Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim (Orientador)
CIC/UnB

Prof.^a Dr.^a Aletéia Patrícia Favacho de Araújo Prof. Dr. Jó Ueyama
CIC/UnB ICMC/USP

Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes
CIn/UFPE

Prof.^a Dr.^a Genaina Nunes Rodrigues
Coordenadora do Doutorado em Informática

Brasília, 02 de março de 2020

Dedicatória

A meus pais, José e Catarina, por seu incomparável amor e apoio.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me concedido saúde, fé, perseverança, amizade, conhecimento e tantas outras bençãos que me tornaram capaz de realizar este trabalho. Agradeço a meus pais, José e Catarina, pelo amor, carinho, incentivo e compreensão no período em que realizou-se este trabalho. Agradeço ainda a meus irmãos, Ígor, Hugo e Pedro, e a minha irmã Raquel pelo companheirismo e apoio. Estendo esse agradecimento às minhas cunhadas, Rinelle e Pamella, ao meu cunhado, Fabrício, aos meus sobrinhos, Miguel, Davi, Cecília e Gabriel, aos meus primos, tios e tias por sua compreensão nos momentos em que tive que me ausentar de suas companhias para me dedicar a este trabalho. Em especial, agradeço ao meu tio, Jorge Dantas, pelo seu apoio e por seu exemplo inspirador de dedicação ao ensino e à vida acadêmica.

Agradeço também imensamente ao meu orientador Jacir Luiz Bordim pela sua disponibilidade, amizade e auxílio em enfrentar dificuldades, contribuindo significativamente em todos os momentos deste trabalho. Agradeço ao professor Marcos Fagundes Caetano pela amizade, pelo suporte nas dificuldades, por me auxiliar com a base do cálculo do modelo de Bianchi e por seu incentivo constante ao longo deste trabalho. Agradeço aos amigos Daniel, Thiago, Pedro, Felipe Santos, Fernando, Juarez, Paulo, Bruno, Rafael, Nairon, Natan, Maxwell, Leonardo, Carlos, Erick, Ricardo, Robson, Eugênio, Mikhail, Bruno Freitas e às amigas Rachel, Renata, Rafaela Marques, Rafaela Porto, Andreia, Maria Cecília e Eloiza pelos momentos de lazer que podemos dividir nestes anos, além de poder contar com seu incentivo, preocupação, e com as orações de vários destes e de outros amigos e amigas.

Agradeço aos que foram meus chefes neste período, pela compreensão com os horários diferenciados que tive que fazer para conciliar o emprego com o curso. Em especial, agradeço a Leonardo Santana e Carlos Feijão pelo apoio e preocupação em me auxiliar a conciliar esses horários da melhor forma possível. Agradeço ao professor Bruno Luigi Macchiavello Espinoza e às professoras Célia Ghedini Ralha e Genaina Nunes Rodrigues pela prestatividade no período em que estiveram na coordenação do programa de pós-graduação. Agradeço ainda aos funcionários do departamento de Ciência da Computação. Em especial, agradeço a Maria Ximenis e Clebia Pinheiro por sua cordialidade e eficiência na Secretaria de Pós-Graduação. Agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), ao Decanato de Pós-Graduação (DGP) da Universidade de Brasília e ao Departamento de Ciência da Computação por auxiliarem no fomento de publicações, o que contribuiu significativamente para este trabalho.

Por fim, agradeço aos professores Renato Mariz de Moraes, Jó Ueyama e a professora Aletéia Patrícia Favacho de Araújo pelas participações nas banca de qualificação e de defesa desta tese. Certamente, seus comentários e sugestões em muito contribuíram na qualidade desta tese de doutorado.

Resumo

A crescente demanda de vazão em redes móveis cada vez mais densas impulsiona a pesquisa em tecnologias capaz de atendê-la. Dentre as redes sem fio, as comunicações *full-duplex* surgem como uma alternativa neste contexto. Para organizar as comunicações de maneira eficiente quando se utiliza *full-duplex*, há diversas opções de protocolos de controle de acesso ao meio. Entretanto, muitos destes protocolos se baseiam em premissas utilizadas pelo padrão IEEE 802.11, que fora projetado para comunicações *half-duplex*. Assim, estes protocolos acabam por não explorar de modo apropriado o potencial das comunicações *full-duplex*. Neste contexto, este trabalho propõe duas técnicas de controle de acesso ao meio que visam obter uma maior vazão do que a obtida com os protocolos existentes. Cada uma das técnicas utiliza uma abordagem diferente para obter esse aumento na vazão. A primeira técnica (FDT-MAC) visa reduzir o tempo despendido em uma comunicação, fazendo uso de sinais pulso e tom, ao invés de quadros, em sua reserva de canal. Para avaliar o FDT-MAC, foi realizada uma extensão de modelos matemáticos existentes para que eles contemplem as características das comunicações *full-duplex*, tais como os efeitos da auto-interferência. Assim, foi realizada a comparação do FDT-MAC com um protocolo do estado da arte de comunicações *full-duplex* (FD-MAC). O FDT-MAC obteve ganhos em termos de vazão de até 149% em redes saturadas, indicando sua relevância. Além disso, foi proposta uma política de alocação de tamanho de quadros de dados em comunicações *full-duplex*, visando reduzir a ociosidade da rede. Foram feitas avaliações relacionadas à vazão da política proposta. Quando a política é incorporada ao FDT-MAC, há ganho de até 63% em comparação com o FDT-MAC sem a política incorporada. A segunda contribuição deste trabalho foi a proposta do FDMR-MAC, o qual emprega uma técnica inovadora de reserva de canal aliada a escalonamento de quadros de dados com o objetivo de elevar a probabilidade p de serem estabelecidas comunicações em que os nós emissor e receptor possuam quadros de dados a serem transmitidos um ao outro. Dessa forma, o FDMR-MAC é capaz de aumentar a vazão em até 72% quando comparado com o FD-MAC. Os resultados obtidos nas avaliações realizadas ao longo deste trabalho indicam a relevância das suas contribuições (FDT-MAC e FDMR-MAC).

Palavras-chave: Comunicações *Full-duplex*, Reserva de Canal, Protocolos MAC, Sinais pulso e tom, FDT-MAC, FDMR-MAC.

Abstract

The growing demand for throughput in wireless mobile networks leveraged the research into technologies able to cope with it. Full-duplex communications arise as a viable alternative in this context. Several medium access control (MAC) protocols were proposed aiming to manage full-duplex communications properly. However, many of these MAC protocols are build upon the IEEE 802.11, which is designed to operate under half-duplex conditions. Therefore, these protocols may not be able to entirely exploit the full-duplex communications potential. In this context, this work proposes two MAC techniques with different approaches and a common goal: raise throughput when compared with existing MAC techniques designed for full-duplex communications. The first one (FDT-MAC) resorts to pulse and tone signals instead of frames to perform channel reservation. In order to evaluate FDT-MAC, it was necessary to extend existing mathematical models in such a way that they address full-duplex communications characteristics, as self-interference. Therefore, FDT-MAC was compared with a state of art MAC protocol (FD-MAC) designed for full-duplex communications. FDT-MAC improved throughput up to 149% under saturated network conditions. Also, it was proposed a data frame size allocation policy that aims to enhance channel usage for full-duplex communications. Evaluations of the proposed policy were performed in terms of throughput. When the proposed policy is coupled with FDT-MAC, a throughput improvement up to 63% is achieved comparing to FDT-MAC without the proposed policy. The second contribution of this work was the proposal of FDMR-MAC technique. The FDMR-MAC employs an innovative channel reservation scheme coupled with data frame scheduling to raise the probability of establishing communications in which sender and receiver nodes have data frames to send one to another. Hence, in the evaluated scenarios, FDMR-MAC was able to enhance throughput up to 72% when compared with FD-MAC. The results achieved throughout this work indicate the relevance of its main contributions (FDT-MAC and FDMR-MAC).

Keywords: Full-duplex Communications, Channel Reservation, MAC Protocols, Pulse and Tone Signals, FDT-MAC, FDMR-MAC.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura do Documento	4
2	Revisão e Fundamentação Teórica	6
2.1	Redes sem Fio	6
2.2	Protocolos de Controle de Acesso ao Meio	12
2.2.1	Protocolos de Divisão Estática de Canal	15
2.2.2	Protocolos de Revezamento	16
2.2.3	Protocolos Aleatórios	17
2.3	Padrão IEEE 802.11	20
2.3.1	Reserva de Canal	22
2.3.2	Detecção de Portadora Virtual	23
2.3.3	Algoritmo de <i>Backoff</i> Exponencial	24
2.4	Avaliação do Padrão IEEE 802.11	24
2.4.1	Modelo Estendido	26
2.4.2	Vazão Máxima Teórica	28
2.5	Discussão	29
3	Comunicações <i>Full-Duplex</i>	31
3.1	Tipos de Comunicação	31
3.2	Protocolos de Controle de Acesso ao Meio para Comunicações <i>Full-Duplex</i>	35
3.2.1	CSMA/CAD (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection</i>)	36
3.2.2	FuMAC	37
3.2.3	FD+	38
3.2.4	Janus	39
3.2.5	ContraFlow	40
3.2.6	Full-duplex MAC	41
3.2.7	Full-duplex MAC baseado em IEEE 802.11	42
3.2.8	MASTaR	42
3.2.9	FD-MMAC (<i>Full-Duplex Multi-Channel MAC</i>)	43
3.2.10	FD-MAC	44
3.2.11	<i>Energy-FDM</i>	46

3.2.12	S-CW FD (<i>Synchronized Contention Window Full Duplex</i>)	46
3.3	Discussão	47
4	FDT-MAC: Técnica de Reserva de Canal para Comunicações <i>Full-duplex</i>	51
4.1	Reserva de Canal Eficiente sem a Necessidade do Uso de Quadros	51
4.1.1	Codificando Informações de Cabeçalho	54
4.1.2	Análise de Probabilidade de Falha por Erro de Identificação	56
4.2	Resultados	59
4.2.1	Vazão Máxima Teórica	60
4.2.2	Vazão de Saturação	61
4.2.3	Impacto da Auto-interferência	65
4.2.4	Supressão de Tom	66
4.3	Discussão	69
5	Modo Uniforme do Tamanho dos Dados em Comunicações <i>Full-duplex</i>	72
5.1	Redução de Ociosidade do FDT-MAC	72
5.2	Análise de Resultados	74
5.3	Discussão	79
6	FDNR-MAC: Mecanismo para Maximizar a Utilização do Canal em Comunicações <i>Full-duplex</i>	81
6.1	Utilização Eficiente do Canal em Comunicações <i>Full-duplex</i>	81
6.1.1	Considerações sobre sinais pulso e tom	82
6.1.2	Exemplo de Funcionamento	84
6.1.3	Motivação	85
6.2	Resultados	87
6.2.1	Quantidade de Nós Candidatos a Destino	88
6.2.2	Vazão de Saturação	91
6.3	Discussão	94
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	95
	Referências	100

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de rede sem fio com infraestrutura.	7
2.2	Exemplo de rede sem fio <i>ad hoc</i>	8
2.3	Alcance e vazão de alguns padrões de redes sem fio, adaptado de [83].	9
2.4	Exemplo de rede de único salto.	9
2.5	Exemplo de rede de múltiplos saltos.	10
2.6	Exemplo de ocorrência do problema de terminal escondido.	10
2.7	Diagrama de camadas do modelo considerado.	11
2.8	Exemplos de padrões do IEEE para as camadas de enlace e física do modelo considerado.	12
2.9	Taxonomia de classificações de protocolos de controle de acesso ao meio.	13
2.10	Exemplo de protocolo de divisão estática por tempo.	16
2.11	Exemplo de protocolo de divisão estática por frequência.	16
2.12	Exemplo de protocolo de revezamento de permissão.	17
2.13	Comparação entre ALOHA e <i>Slotted</i> ALOHA.	20
2.14	Formatos dos quadros de controle RTS e CTS.	22
2.15	Exemplo de reserva de canal com quadros RTS e CTS.	23
3.1	Exemplo de comunicação do tipo <i>simplex</i>	31
3.2	Exemplo de comunicação do tipo <i>half-duplex</i>	32
3.3	Exemplo de comunicação do tipo <i>full-duplex</i>	32
3.4	Exemplo de redução do atraso fim a fim com a utilização de comunicações do tipo <i>full-duplex</i>	34
3.5	Exemplo de reserva de canal proposta pelo protocolo FD-MAC, adaptado de [172].	45
4.1	Exemplo de comunicações usando FDT-MAC.	52
4.2	Exemplo da supressão de tom no FDT-MAC.	54
4.3	Exemplo de áreas na qual a existência de mais de um nó causa erro na identificação da origem do sinal.	58
4.4	Vazão de saturação para as técnicas avaliadas.	63
4.5	Valores originais da vazão de saturação para FD-MAC e HD-MAC extraídos de [27].	64
4.6	Valores originais da vazão de saturação para o HD-MAC extraídos de [19].	65
4.7	Impacto da supressão de tom na vazão de saturação para IEEE 802.11a e taxa de transmissão igual a 54 Mbps.	70
4.8	Impacto da supressão de tom na vazão de saturação para IEEE 802.11b e taxa de transmissão igual a 11 Mbps.	70

5.1	Exemplo de comunicação que possui ociosidade devido à diferença no tamanho dos pacotes.	73
5.2	Exemplo do modo uniforme que não possui ociosidade na comunicação. . .	73
5.3	Comparação entre o modo uniforme e a abordagem tradicional para o FDT-MAC.	74
5.4	Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 512$.	77
5.5	Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 1024$.	77
5.6	Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 2048$.	78
6.1	Exemplo de operação do FDMR-MAC.	83
6.2	Valor ideal de ψ para taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps. . . .	88
6.3	Valor ideal de ψ para taxa de transmissão do canal igual a 54Mbps. . . .	89
6.4	Valores de η para diversas probabilidades de se estabelecer uma comunicação bidirecional com taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps.	92
6.5	Valores de η para diversas probabilidades de se estabelecer uma comunicação bidirecional com taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps.	93

Lista de Tabelas

2.1	Vazão máxima teórica para várias combinações de <i>payload</i> e taxa de transmissão.	29
2.2	Constantes para os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b.	29
3.1	Análise comparativa entre as características dos protocolos.	48
4.1	Notações usadas para análise de probabilidade de falha.	57
4.2	Parâmetros usados para o cálculo da probabilidade de falha.	58
4.3	Vazão máxima para diversos protocolos.	61
4.4	Parâmetros usados no cálculo para avaliação por vazão de saturação. . . .	63
4.5	Impacto da auto-interferência na vazão de saturação.	67
4.6	Resultados de vazão máxima com supressão de tom para o FDT-MAC. . . .	68
4.7	Comparação da vazão máxima obtida pelo FDT-MAC com supressão de tom e sem supressão de tom.	69
5.1	Comparação entre FDT-MAC com modo uniforme e FD-MAC.	75
5.2	Exemplo do impacto do modo uniforme no FDT-MAC.	76
7.1	Comparação das características dos protocolos, incluindo aqueles que foram contribuições deste trabalho de doutorado.	96

Lista de Acrônimos

ACK	<i>Acknowledgement</i>
AOA	<i>Angle of Arrival</i>
CSMA	<i>Carrier-Sense Multiple Access</i>
CSMA/CA	<i>Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CAD	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection</i>
CSMA/CD	<i>Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
CTS	<i>Clear to Send</i>
DBTMA	<i>Dual Busy Tone Multiple Access</i>
DCA	<i>Dynamic Channel Assignment</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DIFS	<i>DCF Interframe Space</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
DRR	<i>Deficit Round Robin</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ERTS	<i>Extended Request to Send</i>
FCTS	<i>Full-duplex Clear to Send</i>
FDMA-MAC	<i>Full-Duplex Dynamic Scheduling MAC</i>
FDMA	<i>Frequency-division Multiple Access</i>
FD-MAC	<i>Full-Duplex MAC</i>
FD-MMAC	<i>Full-Duplex Multi-channel MAC</i>
FDMR-MAC	<i>Full-Duplex Multiple Receiver MAC</i>
FDT-MAC	<i>Full-Duplex Tone Based MAC</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
HD-MAC	<i>Half-Duplex MAC</i>
HR-DSSS	<i>High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IEEE	<i>International Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MASTaR	<i>MAC protocol for Access point in Simultaneous Transmit and Receive mode</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MMAC	<i>Multichannel MAC</i>
NAV	<i>Network Allocation Vector</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
PCF	<i>Point Coordination Function</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RTS	<i>Request to Send</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
S-CW FD	<i>Synchronized Contention Window Full Duplex</i>
SDM	<i>Spatial-Division Multiplexing</i>
SIFS	<i>Short Interframe Space</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
SSCH	<i>Slotted Seeded Channel Hopping</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time-division Multiple Access</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VMT	<i>Vazão Máxima Teórica</i>

Capítulo 1

Introdução

Em redes móveis sem fio, os serviços existentes e os projetados para o futuro cada vez mais vêm aumentando seus requisitos no que tange a demandas de desempenho da rede. As referidas demandas são relativas a vários aspectos, tais como latência, vazão e densidade da rede [34]. Por exemplo, o trabalho disponível em [161] cita requisitos de RTT (*Round-trip time*) menor do que 10 ms e vazão maior do que 5 Gb/s, em uma rede com densidade que pode alcançar 900 Gb/s/km². Para atender esse tipo de demanda associada ao crescimento de serviços multimídia que utilizam muita largura de banda, há diversos estudos na literatura [66]. Vale ressaltar que demandas desta natureza inclusive foram fatores motivadores para o surgimento da quinta geração (5G) de redes móveis. Tais redes têm sido alvo de estudo de diversas pesquisas relacionadas a diferentes áreas como descrito em [148]. Como exemplo de serviços que podem se beneficiar do advento do 5G, é possível citar os seguintes: Internet das coisas (IoT – *Internet of Things*), redes veiculares, telefonia celular, computação em nuvem, *fog computing* e *edge computing* [44] [66] [161] [168] [171].

Além da quinta geração (5G) de redes móveis possuir potencial para prover diversas vantagens como as citadas anteriormente, ela também necessita tratar alguns desafios impostos pelas evoluções tecnológicas, tais como o aumento da quantidade de dispositivos, do volume dos dados trafegados e dos serviços que consistem na obtenção e na atualização de informações de tempo real [161]. Para enfrentar estes desafios, as redes 5G baseiam-se no desenvolvimento de novas técnicas que permitem o melhor aproveitamento do canal de comunicação, no caso, o espectro. Nesta conjuntura, várias técnicas de abordagens relevantes surgiram como o uso de *Massive MIMO* (*Massive Multiple-Input Multiple-Output*), um aprofundamento no uso de rádios cognitivos, operação na frequência de ondas milimétrica (*Milimeter Wave – mmWave*), uso de comunicação direta entre dispositivos (D2D – *Device-to-device*) e a utilização de antenas com possibilidade de operar em modo *full-duplex* [20] [130] [148] [163].

Vale ressaltar que é esperado que as comunicações em modo *full-duplex* possuam um papel importante na quinta geração (5G) de redes móveis [148] [172], uma vez que esse tipo de comunicação introduz diversas vantagens quando comparadas com aquelas realizadas em modo *half-duplex*. Em especial, pode-se destacar alguns benefícios decorrentes das comunicações em modo *full-duplex*, explicados no que se segue:

- A utilização de comunicações em modo *full-duplex* permite dobrar a vazão teórica em comparação com as realizadas em modo *half-duplex*, visto que em comunicações *full-duplex* assume-se que um nó tem a capacidade de transmitir e receber dados

simultaneamente [147]. Assim, um nó pode estabelecer simultaneamente até dois fluxos de dados sem colisão, enquanto que nas comunicações *half-duplex* apenas um fluxo pode ser estabelecido por nó;

- Com as comunicações *full-duplex*, é esperada redução significativa de latência e atraso fim a fim, visto que a capacidade de transmitir e receber dados simultaneamente permite que um nó possua mecanismos para ter um conhecimento mais geral do tráfego da rede, prevenindo colisões [116] [133] [175];
- Quando não tratado, o problema do terminal escondido [153] degrada bastante o desempenho da rede, gerando colisões e perda de dados, como descrito em [112]. Com a capacidade de transmitir e receber dados simultaneamente, os efeitos do problema do terminal escondido podem ser significativamente mitigados em comunicações *full-duplex* [29] [65];
- A utilização de comunicações *full-duplex* abre novas possibilidades na área de rádios cognitivos, na qual a detecção de tráfego do usuário primário é vital para uma operação eficiente [11] [91] [92]. Com o uso de comunicações *full-duplex*, o usuário secundário é capaz de escutar constantemente a frequência onde opera o usuário primário, identificando de modo mais eficiente eventuais oportunidades de acesso à frequência usada pelo usuário primário [175].
- Devido à capacidade de transmitir e receber dados simultaneamente, as comunicações *full-duplex* também possibilitam desenvolvimento de melhorias relacionadas à segurança, conforme descrito em [70] [94] [116].

Embora possua diversas vantagens, a utilização de comunicações *full-duplex* traz também alguns problemas e desafios a serem contornados. Em especial, destaca-se a denominada “auto-interferência”, isto é, a interferência percebida e gerada por um nó que está transmitindo e recebendo simultaneamente dados, quando o nó opera em modo *full-duplex* [18] [29] [116]. A auto-interferência pode atingir níveis altos gerando significativas perdas [18] [29] [77]. Portanto, várias técnicas de mitigação da auto-interferência foram propostas na literatura, de modo a tornar viável a utilização de comunicações *full-duplex* [26] [29] [41] [128] [175]. Isto acabou por fomentar a pesquisa em técnicas de controle de acesso ao meio projetadas para este tipo de comunicações.

1.1 Justificativa

Devido à diversidade de possibilidades abertas com comunicações *full-duplex*, faz-se necessário o desenvolvimento de novos protocolos de controle de acesso ao meio projetados para este tipo de comunicação, de maneira que estes sejam capazes de aproveitar plenamente suas vantagens. Isso ocorre por muitos dos protocolos serem projetados baseados em premissas existentes em comunicações *half-duplex* [172]. Portanto, estes protocolos poderiam ser aperfeiçoados visando sua evolução para melhor aproveitar os benefícios do uso de comunicações *full-duplex*.

Neste contexto, o trabalho de doutorado desenvolvido tem como foco a pesquisa em técnicas de controle de acesso ao meio projetadas para comunicações *full-duplex*. O presente trabalho investiga os mecanismos existentes, além de se propor a contribuir com

melhorias significativas em etapas que julga-se possível aperfeiçoar. Particularmente, tais aperfeiçoamentos são relacionados a melhorar a utilização do canal e a aumentar a vazão da rede. Estas melhorias serão detalhadas mais adiante, quando do levantamento do estado da arte relacionado a protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex*. A seguir, serão listados os objetivos deste trabalho de doutorado, ou seja, as contribuições que se pretende ter realizado com o referido trabalho.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho de doutorado é propor mecanismos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*, visando aumentar a vazão obtida em comparação com os mecanismos existentes. Em especial, duas estratégias podem ser utilizadas nos mecanismos propostos para elevar a vazão. Uma delas é tentar reduzir o tempo total de uma comunicação *full-duplex*, sem diminuir a quantidade de dados transmitidos. A outra abordagem é a de melhor utilizar o meio alocado para uma comunicação, minimizando a ociosidade de nós em uma comunicação *full-duplex*. Portanto, os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

1. Propor um modelo que permita avaliar os mecanismos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*. Existem vários modelos matemáticos para avaliação de mecanismos de controle de acesso ao meio. Entretanto, estes foram projetados no contexto de comunicações *half-duplex*. Assim, é necessário estender estes modelos, de modo a abranger as características das comunicações *full-duplex*;
2. Propor um mecanismo que reduza o tempo total despendido em uma comunicação *full-duplex*, aperfeiçoando alguma das etapas realizadas na comunicação. Com isso, espera-se obter um ganho relacionado à vazão;
3. Propor um mecanismo que possibilite algum aperfeiçoamento na utilização do canal em comunicações *full-duplex*. Isso pode ser realizado por meio de escalonamento de pacotes, aliado a algum tipo de mecanismo para reduzir a incidência de ociosidades evitáveis;

1.3 Metodologia

A metodologia do presente trabalho consiste em estudo, proposta e avaliação de técnicas projetadas para comunicações *full-duplex*. No que tange ao estudo, primeiramente é realizada uma pesquisa sobre os tipos de comunicações existentes e suas características. A partir do entendimento básico das características mais importantes das comunicações *full-duplex*, são estudadas as vantagens e os desafios decorrentes da adoção deste tipo de comunicação.

Em seguida, são levantados a partir da literatura diversos critérios de classificação de protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex*. Com base nestes critérios, é feita uma revisão do estado da arte de tais protocolos, permitindo encontrar alguns mecanismos ainda baseados em premissas mais condizentes com comunicações *half-duplex*. Neste contexto, pretende-se identificar a viabilidade e a necessidade

de novas soluções em comunicações *full-duplex*, realizando-se propostas de novas técnicas relacionadas ao controle de acesso ao meio.

Para avaliar tais técnicas, é necessário recorrer a alguns modelos de avaliação existentes e muito usados na literatura de comunicações *half-duplex*, tais como os modelos descritos nos trabalhos disponíveis em [19], [67] e [152]. Além disso, é necessário adaptá-los para o contexto de comunicações *full-duplex*, de modo a poder se ter uma avaliação mais precisa do impacto das soluções propostas. Com base nos resultados destas avaliações, as técnicas propostas são comparadas com as existentes na literatura e evoluídas gradativamente.

1.4 Estrutura do Documento

Esta seção tem por objetivo descrever a organização dos demais capítulos deste documento. Tais capítulos estão organizados da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão teórica de redes sem fio abordando seus principais aspectos. Além disso, explica-se no referido capítulo conceitos básicos relacionados a protocolos de controle de acesso ao meio e ao padrão IEEE 802.11. Tal capítulo expõe ainda diversos modelos matemáticos para avaliação de protocolos de controle de acesso ao meio que operam em redes sem fio;
- O Capítulo 3 introduz conceitos acerca dos tipos de comunicação existentes, além de mostrar uma taxonomia relacionada a protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex*. Ademais, o capítulo em questão apresenta um detalhado levantamento do estado da arte por meio da explanação acerca do funcionamento de diversos protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex*, classificando-os de acordo com os critérios presentes na taxonomia apresentada neste mesmo capítulo. Por fim, tal capítulo faz uma análise comparativa dos protocolos levantados à luz da taxonomia apresentada, indicando questões interessantes a serem tratadas neste trabalho;
- O Capítulo 4 descreve a proposta de um mecanismo que realiza a reserva de canal de um modo eficiente em comunicações *full-duplex*. O mecanismo em questão tem suas principais características debatidas. Inclusive, é realizada uma análise probabilística acerca da ocorrência de falhas deste devido a características particulares do referido mecanismo. Por fim, conclui-se que tal probabilidade é desprezível, além de se avaliar o mecanismo proposto, em comparação com técnicas do estado da arte, sob diversas formas de avaliação;
- O Capítulo 5 complementa o mecanismo proposto no Capítulo 4 avaliando o impacto dos fluxos da mesma comunicação com tamanhos de pacotes distintos. Assim sendo, é feita uma discussão em torno disso, propondo-se uma solução com uma abordagem diferente das existentes. Por fim, é realizada uma avaliação mostrando o impacto da referida solução;
- O Capítulo 6 introduz um mecanismo que visa aumentar a utilização do canal por meio do uso do escalonamento de pacotes. Tal mecanismo é discutido, tem sua motivação matemática apresentada, sendo finalmente avaliado em comparação com as soluções existentes;

- Por último, o Capítulo 7 expõe as considerações finais do trabalho realizado, ressaltando as contribuições feitas, bem como indicando possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão e Fundamentação Teórica

Este capítulo abordará temas importantes para o entendimento do contexto no qual se encaixa a proposta descrita neste trabalho. Para tanto, será realizada uma revisão teórica acerca de alguns conceitos. Primeiramente, será apresentada uma discussão sobre redes sem fio explicando suas características, vantagens e desafios relacionados ao seu uso. Após esta introdução sobre redes sem fio, serão mostradas técnicas para organizar as comunicações nestas redes otimizando sua utilização e provendo acesso aos usuários das comunicações em questão. Também serão apresentados métodos de avaliação de desempenho destas técnicas de organização das comunicações, de modo a possibilitar comparações entre elas. Por fim, será feita uma discussão abordando os aspectos mais importantes tratados neste capítulo, bem como introduzindo motivações para o próximo capítulo.

2.1 Redes sem Fio

O surgimento de redes sem fio possibilita uma série de novas oportunidades no que concerne a comunicações. Para melhor explicar as oportunidades e desafios decorrentes do uso de redes sem fio, é necessário antes revisar alguns conceitos relacionados ao tema. Redes sem fio são constituídas tipicamente pelos elementos explicados a seguir [83]:

- Hospedeiros sem fio: assim como ocorre para redes cabeadas, os hospedeiros são os equipamentos de sistemas finais onde aplicações são executadas. Como exemplos de hospedeiros sem fio, pode-se citar [147]: computador de mesa, computador portátil, celular, etc. Note que os hospedeiros podem ser móveis (celular) ou não (computador de mesa). É importante mencionar que este trabalho muitas vezes se referirá ao hospedeiro utilizando o termo “nó” da rede;
- Enlaces sem fio: denomina-se como enlace de comunicação sem fio, o meio pelo qual um hospedeiro sem fio se conecta a uma estação-base ou o meio em que um hospedeiro se conecta a outro hospedeiro [83]. Estas duas situações podem ser observadas nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente. Com relação ao alcance e vazão da transmissão em um enlace sem fio, isso varia de acordo com o protocolo e tecnologia utilizadas. Exemplos de alcances e vazões estão disponíveis na Figura 2.3;

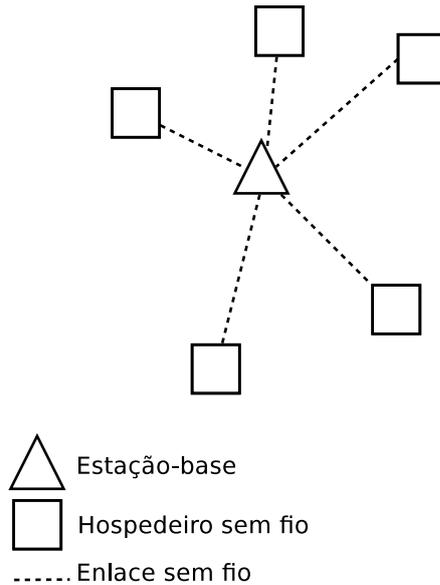


Figura 2.1: Exemplo de rede sem fio com infraestrutura.

- Estações-base: a estação-base possui um papel importante nas redes sem fio por coordenar a transmissão dos vários hospedeiros associados a ela. A estação-base é responsável por receber e enviar os pacotes de/para os hospedeiros a ela associados [112]. É importante mencionar que um hospedeiro está associado à uma estação-base quando o hospedeiro está no alcance da estação-base, e quando o hospedeiro se utiliza da estação-base como um *gateway* para as demais sub-redes, conforme acontece no exemplo ilustrado na Figura 2.1.

As redes sem fio podem ser ordenadas com ou sem infraestrutura [83] [112] [147]. Exemplos de redes sem fio e seus elementos se encontram disponíveis nas Figuras 2.1 e 2.2, onde a primeira mostra uma rede com infraestrutura enquanto a segunda mostra uma rede sem infraestrutura, isto é, uma rede *ad hoc*. Note que nesta última não há um elemento que faça especificamente o papel de estação-base. Assim os próprios hospedeiros se organizam sem este elemento centralizador assumindo este papel, e realizando por exemplo as funções de roteamento, atribuição de endereços, tradução de endereços como no DNS (*Domain Name Server*) quando necessário [112]. Este trabalho terá como foco as comunicações em redes *ad hoc*.

As redes sem fio *ad hoc* também podem ser classificadas com relação ao alcance de um nó em relação a todos os demais. Quando se considera que todos os nós podem se comunicar sem a necessidade de um nó intermediário repassar o pacote ao destinatário, esta rede pode ser classificada como de único salto (*single hop*) [8]. Já quando há a necessidade de haver o repasse do pacote por um nó intermediário, a rede é então classificada como de múltiplos saltos (*multi-hop*) [8]. As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram exemplos de redes de único salto e de múltiplos saltos, respectivamente.

Quando comparadas às redes cabeadas, as redes sem fio possuem algumas características bastante distintas e particulares devido à natureza do meio em que operam, isto é, o espectro. Dentre tais características, pode-se destacar algumas, conforme explicado a seguir:

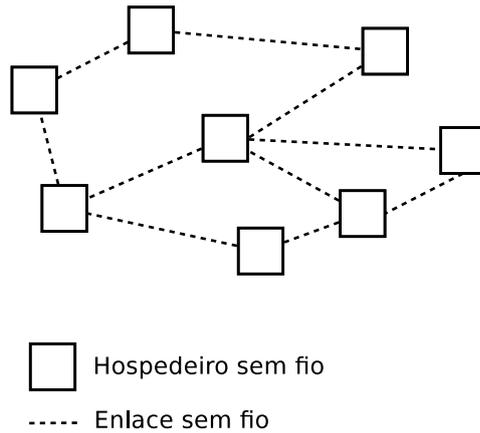


Figura 2.2: Exemplo de rede sem fio *ad hoc*.

- Redução da potência recebida do sinal: sinais eletromagnéticos são atenuados quando é necessário atravessar algum tipo de obstáculo como uma parede, por exemplo [93]. Mesmo na ausência de obstáculos, isto é, ao ar livre, o sinal terá sua potência reduzida quando chegar ao receptor [93]. A referida redução de potência cresce à medida que a distância entre emissor e receptor aumenta. Estimar a redução da potência recebida do sinal é uma tarefa não tão trivial, sendo alvo de diversos estudos científicos e modelos, tais como os apresentados em [93] [103] [146] [154] [162] [164];
- Interferência de outras fontes: quando várias fontes de rádio estão transmitindo simultaneamente na mesma banda de frequência, elas sofrerão interferência umas das outras [64]. Além da interferência por várias fontes tentando acessar simultaneamente o meio, o ruído eletromagnético do ambiente pode causar interferência [64] [83];
- Propagação multivias: a propagação multivias acontece em casos nos quais partes da onda eletromagnética enviadas do emissor ao receptor são refletidas em obstáculos e no solo assumindo caminhos de comprimento distintos [83] [127]. Esse comportamento causa embaralhamento no sinal captado pelo receptor. Obstáculos em movimento no meio do caminho entre o emissor e o receptor podem fazer com que a propagação multivias varie ao longo do tempo para este determinado caminho [127]. É importante mencionar que a literatura correlata muitas vezes utiliza o termo propagação multicaminhos para se referir exatamente ao que foi explicado para propagação multivias;
- *Handoff*: em redes sem fio com infraestrutura, quando um hospedeiro se desloca para fora do alcance da sua atual estação-base, ele troca de estação-base para não ficar desconectado da rede. Esse processo de transferência de estações-base para um hospedeiro é denominado *handoff* [127]. O *handoff* pode ser custoso para rede nos casos em que ocorre muita mobilidade. Além disso, em cenários deste tipo, é difícil precisar a exata localização do hospedeiro. Até mesmo o roteamento de pacotes ao hospedeiro pode ser afetado em cenários que ocorram constantes *handoffs* [83] [127].

Devido a estas características das redes sem fio, elas possuem algumas situações que necessitam de mais cuidado, pois não acontecem em redes cabeadas. Um importante

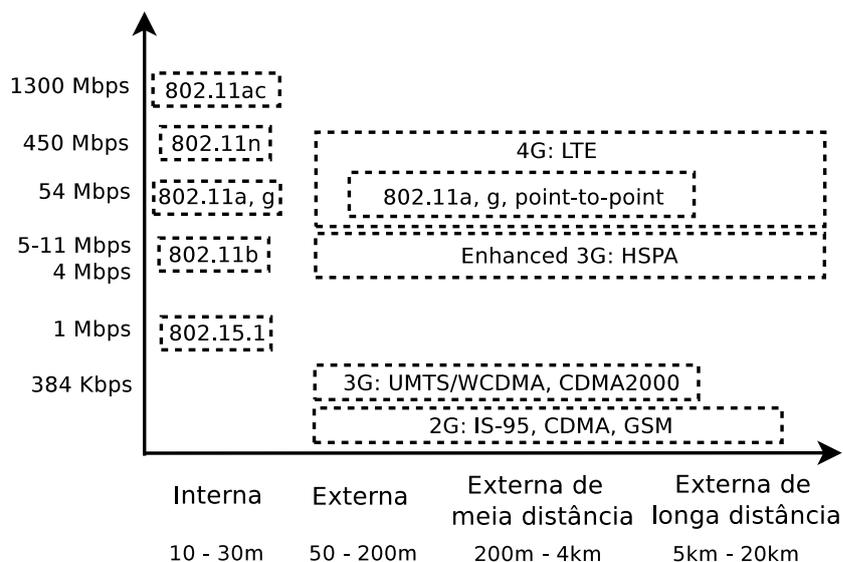


Figura 2.3: Alcance e vazão de alguns padrões de redes sem fio, adaptado de [83].

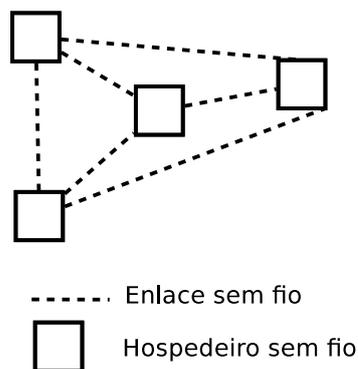


Figura 2.4: Exemplo de rede de único salto.

exemplo de uma situação crítica para uma rede sem fio diz respeito ao que é denominado de “problema do terminal escondido” [153]. Tal problema está relacionado ao fato de dois nós estarem fora do alcance um do outro e possuírem um vizinho em comum [153]. Caso esses dois nós tentem transmitir simultaneamente pacotes para este vizinho, haverá colisões e, portanto, perda de pacotes [112]. A situação descrita está exemplificada na Figura 2.6. No diagrama representado pela referida figura, há uma ocorrência de colisão, pois os nós *A* e *C* tentam simultaneamente enviar um pacote que será recebido por *B*. O problema possui este nome pois em uma situação como a ilustrada na Figura 2.6, o nó *A* está “escondido” do nó *C* e vice-versa. Vale ressaltar que a ocorrência não tratada de terminais escondidos pode degradar significativamente o desempenho de uma rede [112]. Isso faz com que seja primordial a utilização de mecanismos que possam mitigar o problema em questão. Formas de mitigar tal problema serão discutidas mais adiante neste capítulo.

O modelo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) é o modelo de rede utilizado na Internet [112]. O modelo possui esse nome devido ao nome de seus dois principais protocolos: TCP (*Transmission Control Protocol*) e IP (*Internet Protocol*). O modelo TCP/IP apresenta quatro camadas [112]. Entretanto, diversos autores da área o estenderam para cinco camadas, de modo a detalhar a camada mais baixa do modelo

datagrama. A camada de enlace pode possuir mecanismos de entrega confiável dos quadros a serem enviados. Como exemplo de protocolos da camada de enlace, pode-se citar o protocolo Ethernet [108], bastante utilizado em redes cabeadas [147]. No que tange a redes sem fio, os protocolos de controle de acesso ao meio se encontram nessa camada do modelo. Portanto, essa será a camada mais abordada e detalhada nas explicações posteriores deste capítulo. Neste trabalho, se denotará por pacote ou quadro as informações desta camada utilizadas nos protocolos de controle de acesso ao meio;

3. Rede: a camada de rede é responsável pelo roteamento e pelo endereçamento dos pacotes da rede. Com base nas informações recebidas das camadas mais altas, a camada de rede encapsula o pacote e passa para a camada de enlace seguir com o processo de transmissão [147];
4. Transporte: a camada de transporte recebe a mensagem da camada de aplicação e encapsula esta mensagem para passar para a camada de rede. Os protocolos da camada de transporte podem possuir mecanismos de controle de congestionamento e de retentativas de envio de mensagens em caso de falhas, como ocorre com o TCP (*Transmission Control Protocol*). Estes mecanismos de controle são opcionais, pois existem protocolos, tais como o UDP (*User Datagram Protocol*) que não os possuem [147];
5. Aplicação: a camada de aplicação é o nível mais alto de abstração do modelo considerado. Nesta camada, residem diversas aplicações e protocolos. Assim, pode-se citar diferentes protocolos com as mais diversas funções como transferência de arquivos (FTP – *File Transfer Protocol*), envio de correio eletrônico (SMTP – *Simple Mail Transfer Protocol*), resolução de nomes (DNS – *Domain Name System*) e requisição de páginas pela Internet (HTTP – *Hypertext Transfer Protocol*) [83].



Figura 2.7: Diagrama de camadas do modelo considerado.

Devido às características das redes sem fio, para se obter um bom aproveitamento do espectro eletromagnético, é necessária a existência de mecanismos que organizem o acesso dos nós ao espectro [81]. Essa coordenação do acesso ao meio ocorre de modo a evitar colisões e prover justiça no acesso ao canal, ou seja, que todos os nós possuam chance similar de acessar o canal em um dado momento [54] [81]. Os mecanismos que controlam o acesso ao espectro são denominados protocolos de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* – MAC), e operam na camada dois (camada de enlace) da pilha ilustrada

na Figura 2.7 e previamente explicada. É importante mencionar que as camadas física e de enlace são alvos de padronizações por parte do IEEE [43]. Em especial, destaca-se o grupo de trabalho IEEE 802 que padronizou diversos protocolos e técnicas relacionadas a estas duas camadas, conforme exemplos ilustrados na Figura 2.8.

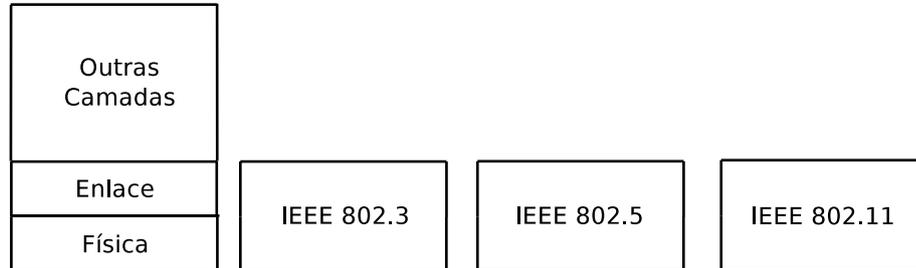


Figura 2.8: Exemplos de padrões do IEEE para as camadas de enlace e física do modelo considerado.

2.2 Protocolos de Controle de Acesso ao Meio

Os protocolos de controle de acesso ao meio são fundamentais para a operação de redes sem fio por organizarem o acesso dos nós ao meio de modo eficiente e justo [54] [81]. A eficiência de um protocolo de controle de acesso ao meio é proporcional à quantidade de transmissões realizadas com sucesso por nós da rede em um determinado intervalo de tempo [124]. Dada sua importância, os protocolos de controle de acesso ao meio são objetos de diversos estudos na literatura relacionada a redes sem fio [56] [74] [112]. Seja R a capacidade de transmissão em bits por segundo de um enlace, um protocolo de controle de acesso ao meio eficiente possui as seguintes metas [54] [81]:

1. Caso apenas um nó possua dados para enviar num instante de tempo, que esse nó possua uma vazão de R bits por segundo;
2. Quando n nós possuem dados para enviar, que cada um desses nós possua vazão média igual, isto é, vazão média igual a R/n bits por segundo. Esta meta visa levar em consideração a justiça na distribuição dos recursos da rede entre os nós;
3. Protocolo preferencialmente descentralizado para minimizar gargalos e pontos de falha que possam comprometer a rede como um todo;
4. Protocolo simples do ponto de vista de implementação para minimização de custos.

Existem diversas maneiras de categorizar e classificar os muitos protocolos de controle de acesso ao meio existentes na literatura, conforme exposto na Figura 2.9. Tal figura ilustra diversas das classificações existentes e que serão abordadas neste trabalho. Assim, serão apresentadas algumas das mais relevantes classificações relacionadas a protocolos de controle de acesso ao meio expostas em diversos artigos da área, tais como os disponíveis em [76] [88] [100] [109] [120] [121].

Uma importante classificação de protocolos de controle de acesso ao meio está relacionada à quantidade considerada de canais alocados pelo protocolo. Os protocolos podem

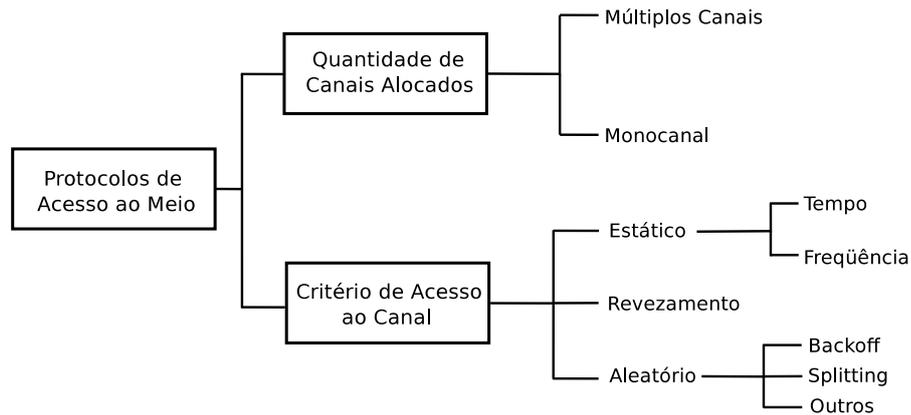


Figura 2.9: Taxonomia de classificações de protocolos de controle de acesso ao meio.

considerar o uso de apenas um canal ou de múltiplos canais [76] [88] [100] [109] [120] [121]. Vale ressaltar que cada canal representa a alocação de uma diferente porção de frequência do espectro eletromagnético. Em um contexto no qual os custos relacionados a *hardware* vêm diminuindo, espera-se um aumento na quantidade de dispositivos ligados a redes sem fio [121]. Desse aumento, decorre também uma maior demanda por largura de banda em redes cada vez mais densas, em especial no contexto de redes de sensores [121].

A adoção de múltiplos canais traz vantagens claras no sentido de aumento de vazão, bem como no que diz respeito à redução de interferência entre comunicações, visto que estas podem ser distribuídas em mais de um canal [100] [121]. Assim, a utilização de diversos canais deve auxiliar a atender os crescentes requisitos de largura de banda em redes mais densas [121]. Entretanto, há diversos desafios que decorrem da utilização de múltiplos canais para permitir um bom aproveitamento destes recursos. Neste sentido, a coordenação das comunicações se torna significativamente mais complexa do que quando se considera a utilização de apenas um canal [100].

De modo geral, os protocolos que consideram a utilização de múltiplos canais abordam a alocação de canais baseada em duas abordagens distintas. A abordagem estática é bastante relacionada a técnicas de controle de topologia e teoria de grafos. Nesta abordagem, considera-se o uso de modelos de tráfego e modelos de interferência transformando o problema de alocação de canais basicamente em um problema de otimização. Diversos trabalhos na literatura empregam essa abordagem, tais como [2] [7] [80] [125] [126]. Por sua vez, a abordagem dinâmica baseia-se na capacidade do rádio trocar o canal alocado em um tempo quase desprezível. Tipicamente, esta abordagem pode trazer significativos ganhos quando comparada a uma abordagem puramente estática. Esse ganho potencial decorre da reatividade dinâmica ao tráfego e a interferência [100]. Como exemplo de protocolos deste tipo, pode-se citar o MMAC (*Multichannel MAC*) [144], o SSCH (*Slotted Seeded Channel Hopping*) [12] e o DCA (*Dynamic Channel Assignment*) [165].

Protocolos com essa abordagem dinâmica necessitam desenvolver mecanismos para troca de informações acerca do tráfego para possibilitar o melhor aproveitamento dos canais evitando colisões e subutilização de recursos [88]. Esse conhecimento pode ser adquirido por meio de um canal comum ou pode existir um sincronismo periódico que permita a obtenção dessas informações [109]. Para tal fim, os protocolos de controle de acesso ao meio dinâmicos para múltiplos canais usam as abordagens apresentadas a seguir:

Uso de canal de controle: tal abordagem consiste na troca de quadros de controle em um canal específico, denominado canal de controle [88] [109] [120]. A partir da troca bem sucedida destes quadros de controle, é possível que os nós de origem e destino dos dados concordem em qual dos canais será realizada a comunicação dos dados. Além disso, qualquer outro nó que esteja escutando o canal de controle, consegue obter informações sobre as comunicações em andamento o que potencialmente ajuda a evitar colisões nos canais de dados. Dentro da abordagem do uso de canal de controle, há a possibilidade de se utilizar mais de um rádio em cada nó. Isso ocorre de modo que um destes rádios esteja sempre escutando o canal de controle, para se ter um maior conhecimento das comunicações em andamento. Essa abordagem é utilizada no protocolo proposto em [165], entretanto impacta significativamente no custo operacional do protocolo [57]. Portanto, existem várias outras soluções que utilizam apenas um rádio, tais como [57] e [139]. Alguns protocolos conseguem utilizar para transmissão dos dados todos os canais, até mesmo o de controle. Isso é feito dividindo o tempo em fases. Inicialmente, ocorre uma fase de controle onde se define as comunicações que irão ocorrer e em quais canais. Isto é feito com o auxílio dos quadros de controle trocados no canal de controle. Finalizada esta fase, se inicia a fase de transmissão em todos os canais. Após a fase de transmissão, inicia-se nova rodada de fase de controle. Essa abordagem de divisão em fases combinada ao uso de canal de controle está presente nos protocolos propostos em [24] [25] [144]. Apesar de sua simplicidade e fácil implementação, o uso de apenas um canal para controle das comunicações de todos os nós limita o gerenciamento dos recursos da rede [21]. Portanto, diferentes abordagens para gerenciamento de comunicações em múltiplos canais surgiram;

Paralelismo via pontos de encontro: esta abordagem preconiza que qualquer canal pode ser de controle. Além disso, o canal de controle de uma dada comunicação também será utilizado para transmissão dos quadros de dados nessa comunicação. Para obter tal comportamento, assume-se que os nós vão mudando de canal seguindo um determinado padrão. Assim, espera-se que dois nós se encontrem no mesmo canal em algum instante de tempo para que estabeleçam comunicação [88] [109] [120]. Essa situação é denominada de ponto de encontro [150]. Há protocolos que utilizam pontos de encontro únicos, enquanto outros utilizam múltiplos pontos de encontro [88] [109] [120]. Nos protocolos de pontos de encontro único, todos os nós possuem um mesmo padrão na troca de canais. Além disso, todos os nós ociosos estão no mesmo canal em que os quadros de controle são transmitidos. Assim, todos os nós ociosos tomam conhecimento das comunicações em andamento o que auxilia a evitar colisões. Quando finalizada a comunicação, os nós envolvidos nela conseguem calcular qual canal devem sensorar seguindo o padrão pré-definido de ordem dos canais. Como exemplo de protocolo de ponto de encontro único, pode-se citar os protocolos descritos em [21] [57] [101] [158] [157].

Por sua vez, os protocolos de múltiplos pontos de encontro permitem que vários canais de controle sejam simultaneamente alocados em comunicações distintas, paralelizando ainda mais as comunicações. Para tanto, cada nó segue um padrão de troca de canais segundo uma função pseudoaleatória [12] [13] [143]. A cada canal visitado, troca-se informações para aprender o padrão dos demais nós. Assim, quando se quer iniciar uma comunicação com um nó, procura-se este com base no padrão aprendido. Pode-se citar como exemplo de protocolos que utilizam múltiplos pontos de encontro os estudos descritos em [12] [13] [143].

A abordagem de pontos de encontro (únicos ou múltiplos) permite descongestionar o canal de controle e potencialmente aumentar o paralelismo das comunicações [109]. Os pontos de encontro são objeto de diversos estudos em várias áreas distintas de redes sem fio [13] [21] [57] e até mesmo em rádios cognitivos [120] [150]. A eficiência do aprendizado do padrão de troca de canais dos nós sem dúvida é um fator crítico para a abordagem de pontos de encontro. Isso ocorre, pois o tempo de troca de canal pode ser significativamente custoso [109] [170]. Portanto, o tempo despendido em troca de canais e aprendizado de padrões até que se chegue a um ponto de encontro pode ser um fator limitante na abordagem de pontos de encontro.

Os protocolos de controle de acesso ao meio podem preconizar a utilização de um ou mais rádios por nó [9] [33] [60] [61] [165]. Como exemplo de protocolos de controle de acesso ao meio que demandam mais de um rádio, pode-se mencionar os protocolos descritos nos estudos disponíveis em [9] [33] [61]. De modo geral, quando se utiliza mais de um rádio, um destes fica monitorando a atividade no canal de controle para assim evitar colisões [9]. Note que a utilização de dois rádios dessa maneira seria equivalente à utilização de apenas um rádio que consiga transmitir dados e sensorar, simultaneamente. O rádio com essa capacidade é denominado *full-duplex* [147] e uma revisão acerca deste tipo de rádio e dos protocolos de controle de acesso ao meio a ele relacionados será apresentada no Capítulo 3.

Por sua vez, nas abordagens que preconizam apenas um rádio, é necessário desenvolver mecanismos mais complexos para evitar a ocorrência de colisões [21] [76]. No contexto de múltiplos canais, o emprego de mais de um rádio visa maximizar o aproveitamento dos recursos da rede [9] [33] [61]. Entretanto, a abordagem de apenas um rádio é mais barata do ponto de vista operacional, dado o custo significativo do(s) rádio(s) extra(s) para cada nó [57]. Além disso, esta abordagem pode ser particularmente interessante em contextos onde o consumo de energia seja um fator limitante, tal como ocorre em redes de sensores [82] [113] [121].

Dentre a grande quantidade de protocolos de controle de acesso ao meio existentes na literatura, tradicionalmente, eles podem ser divididos em três categorias. Estas categorias basicamente diferem na abordagem utilizada para garantir o acesso ao meio aos nós da rede em operação [83] [147]. As três categorias de protocolo de controle de acesso ao meio são: protocolos de divisão estática de canal, protocolos de revezamento e protocolos aleatórios [83]. Nas subseções seguintes, cada uma dessas abordagens será explicada juntamente com exemplos de protocolos destas categorias.

2.2.1 Protocolos de Divisão Estática de Canal

Os protocolos de divisão estática de canal conseguem ser justos no sentido de prover a todos os nós a mesma probabilidade de acesso ao canal ao longo do tempo. Os protocolos em questão consistem em dividir igualmente o canal dentre todos os nós que desejam acessá-lo [112]. Neste caso, pode-se evitar as colisões fazendo com que cada nó utilize a porção do canal a ele alocada na divisão. Como exemplo de protocolos dessa natureza, pode-se citar o TDMA (*Time-Division Multiple Access*) e o FDMA (*Frequency-Division Multiple Access*) [83] [147].

O TDMA consiste em distribuir uma fatia de tempo para cada nó da rede acessar o canal, conforme ilustrado na Figura 2.10. Cada nó apenas realiza transmissões na fatia de tempo assinalada a ele. Assim, garante-se que não ocorrerão colisões no TDMA. Além

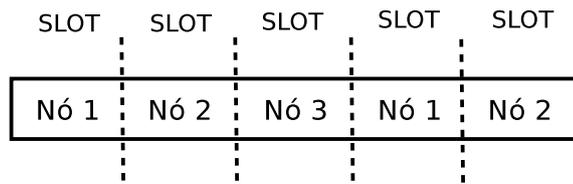


Figura 2.10: Exemplo de protocolo de divisão estática por tempo.

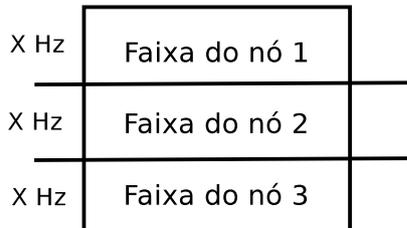


Figura 2.11: Exemplo de protocolo de divisão estática por frequência.

disso, devido à distribuição igualitária de fatias entre os nós da rede, assegura-se também que todos os nós terão a mesma probabilidade de acessar o canal [112]. Entretanto, ainda que apenas um nó queira realizar a transmissão, ele precisa ficar ocioso até que chegue a fatia de tempo assinalada a ele, o que ocasiona uma espera desnecessária.

O protocolo FDMA por sua vez faz a divisão estática em termos de frequência ao invés de tempo. A Figura 2.11 ilustra essa situação na qual uma subfrequência de X Hz é reservada a cada um de três nós. Cada um dos nós da rede pode realizar transmissões a qualquer momento, mas apenas na subfrequência a ele assinalada [147]. Sendo assim, assegura-se que não ocorrerão colisões para o FDMA. O FDMA também garante que todos os nós possuem a mesma probabilidade de acessarem ao meio, visto que todos possuem uma subfrequência reservada [112]. Além disso, caso apenas um nó queira transmitir, não haverá a necessidade deste nó ficar ocioso esperando até sua vez chegar, diferentemente de como ocorria no TDMA. Entretanto, a desvantagem do FDMA é que não se utiliza a frequência inteira nas transmissões [83].

2.2.2 Protocolos de Revezamento

Os protocolos de revezamento de um modo geral têm por objetivo que todos os nós possuam a mesma probabilidade de obter acesso ao canal para realizar suas transmissões [112]. Sendo assim, protocolos deste tipo possuem mecanismos para que um nó saiba se ele possui “permissão” para tentar realizar sua transmissão em um dado momento. De modo geral, essa “permissão” faz com que colisões sejam evitadas, visto que os nós sem ela ficarão apenas escutando o canal [147]. Como exemplo de protocolo de revezamento, pode-se citar dois protocolos [83]: protocolo de escolha e protocolo de revezamento de permissão.

O protocolo de escolha consiste basicamente na premissa de que um dos nós da rede é inicialmente escolhido como mestre. O nó mestre será então o responsável por gerenciar a permissão de transmitir no canal para todos os demais nós. Isso ocorre quando o nó mestre envia uma mensagem a um nó i alertando-o de que é a sua vez de acessar o canal. Caso i possua pacote para ser transmitido, i inicia a transmissão. Caso contrário, i permanece

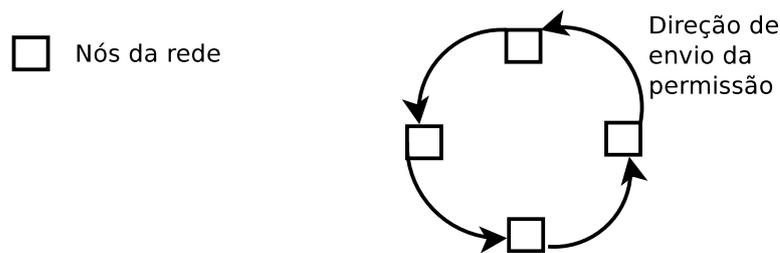


Figura 2.12: Exemplo de protocolo de revezamento de permissão.

ocioso até que o nó mestre envie a mensagem com a permissão para o próximo nó da rede. O protocolo de escolha consegue eliminar colisões com esse mecanismo. Entretanto, a eficiência deste protocolo é afetada pelo fato de um nó com pacotes para transmitir ter que ficar esperando sua vez de receber a “permissão” do mestre ainda que seja o único a possuir pacotes para transmitir. Além disso, como se trata de um protocolo centralizado no nó mestre, há limitações no que diz respeito à tolerância a falhas. Caso ocorra algum problema com o nó mestre, o protocolo falhará até que um novo mestre seja escolhido.

Outra abordagem de protocolos de revezamento é o chamado protocolo de revezamento de permissão. Neste caso, há um pequeno pacote que indica a permissão de transmitir. Caso o nó esteja com o pacote de permissão, ele pode realizar a transmissão. Após a transmissão ou caso não haja nada a ser transmitido, o nó simplesmente passa a um dos seus vizinhos o pacote de permissão [147]. Esse pacote de permissão é passado entre os nós em um esquema de vetor circular, conforme ilustrado na Figura 2.12. Esta topologia virtual para passagem do pacote de permissão faz com que todos os nós possuam a mesma probabilidade de conseguirem acesso ao meio [112]. Além disso, este protocolo é livre de colisões, visto que apenas um nó possuirá “permissão” para estar transmitindo em um dado instante de tempo [147]. Embora seja um protocolo distribuído, a queda de um dos nós pode ocasionar falhas, pois o pacote de “permissão” poderia ser perdido. Como exemplo de protocolo de revezamento de permissão, pode-se citar o protocolo IEEE 802.5 [62].

2.2.3 Protocolos Aleatórios

Os protocolos aleatórios possuem uma estratégia de alocação de acesso ao meio um pouco distinta das apresentadas pelos protocolos de divisão estática de canal e de revezamento. A diferença é que não há pré-divisão do canal em função de tempo ou frequência. Qualquer nó pode acessar o canal a qualquer instante. Isso faz com que um nó seja capaz de utilizar toda a capacidade do canal [83]. Além disso, caso ele seja o único a tentar acessar o canal em um dado momento, sua espera de acesso será menor do que se estivesse sendo utilizado um protocolo de divisão estática de canal. Entretanto, para que isso seja eficiente, evitando colisões, é necessário se introduzir probabilidades no acesso ao canal. Uma taxonomia elencando algumas das diferentes estratégias para tal pode ser derivada da Figura 2.9. Nesta figura, se pode destacar as estratégias de *splitting* e de utilização de mecanismos de *backoff* no que concerne a protocolos aleatórios. Portanto, esta seção apresentará protocolos de ambas as estratégias.

A estratégia de divisão (*splitting*) para garantia de acesso ao meio é bastante simples e intuitiva. A política de *splitting* em algoritmos de acesso ao meio foi inspirada na solução de um problema de realização de teste em grande escala de reagentes na Segunda

Guerra Mundial [35]. Neste problema, ao invés de se testar separadamente cada indivíduo, misturava-se o sangue de vários indivíduos no mesmo recipiente e realizava-se o teste deste conjunto. Caso o resultado fosse negativo, inferia-se que todos os indivíduos do grupo não apresentavam reação. Caso contrário, o grupo era subdividido em grupos menores e o processo era repetido até que os indivíduos que possuíam reação fossem separados e identificados [35] [68]. Esta técnica foi adaptada para o contexto de comunicações primeiramente por [58]. Em [58], introduziu-se a utilização do envio de *probe* para eleição dos nós que acessarão o canal em um dado momento. De modo análogo ao exame dos reagentes, um grupo de nós era avaliado para verificar se algum deles queria acessar o canal em um dado momento. Caso fosse verificado que houve mais de um sinal de *probe* naquele grupo, tal grupo era subdividido e o processo repetido até que se identificasse os nós que desejavam acessar o canal em um dado momento. Assim, surgiu a ideia de transpor essa abordagem para o contexto de protocolos de controle de acesso ao meio. Em geral, os algoritmos de divisão (*splitting*) para protocolos de controle de acesso ao meio partem das seguintes premissas [68]:

- (I) O tempo é dividido em unidades de tempo (fatias), e esta unidade equivale ao tempo gasto para transmitir exatamente um pacote. Todos os nós estão sincronizados e somente podem iniciar suas transmissões ao início de cada unidade de tempo;
- (II) Em um grupo de nós, a partir da escuta do canal, é possível distinguir as seguintes situações em um dado momento: nenhum nó está transmitindo; apenas um nó está transmitindo; mais de um nó está transmitindo.

Os primeiros protocolos de controle de acesso ao meio baseados neste princípio de divisão (*splitting*) foram os propostos em [22] [23] [155]. Estes propuseram na mesma época a utilização do algoritmo básico de árvore binária para resolução de colisões e garantia de acesso ao meio [68]. O objetivo destes protocolos é identificar quais nós querem acessar o canal em um determinado instante de tempo, e assim reger essa comunicação evitando colisões [22] [23] [68] [155]. No início de cada unidade de tempo, os nós que querem realizar a transmissão devem enviar uma sinalização. Com base nos sinais recebidos, parte-se da premissa (II), identificando no grupo de nós analisado se há 0, 1 ou mais de 1 nós que enviaram sinal. Caso seja 0, sabe-se que ninguém quer transmitir naquele grupo e não há nenhuma ação a ser tomada para evitar colisões. O mesmo ocorre quando apenas 1 nó deseja acessar o canal. Entretanto, quando há mais de 1, o grupo é então dividido em 2 subgrupos de maneira semelhante ao que ocorre em uma busca binária. Então, esses 2 subgrupos passam por uma nova rodada de sinalização e verificação. Este processo é repetido até que os subgrupos cheguem na situação sem colisão, isto é, onde apenas 0 nós ou 1 nó queiram acessar o canal. De posse de todos os nós que desejam acessar o canal, o algoritmo faz uma ordenação deles coordenando o acesso e evitando colisões [68].

Os algoritmos de *splitting* baseados em árvore binária claramente montam sua lista com os nós que desejam transmitir em $O(\log_2 n)$, onde n é a quantidade total de nós. Diversas outras análises acerca da eficiência dos algoritmos de divisão estão disponíveis na literatura correlata, tais como os trabalhos disponíveis em [107] [111] [131]. Há inclusive propostas que preconizam otimizações no processamento das árvores de subgrupos, conforme relatado por [132] [156]. Por não serem o escopo central da proposta de trabalho descrita no presente documento, apenas os artigos clássicos relacionados a protocolos de

divisão (*splitting*) foram apresentados. Há diversos estudos que fazem uma análise mais extensa do assunto, tais como os disponíveis em [17] [111] [131].

Dado o custo do envio e escuta de sinais apenas para detecção e prevenção de colisões, surgiu uma abordagem diferente para tentar mitigar as colisões sem onerar muito a rede. Essa abordagem reduz a probabilidade de colisões introduzindo um tempo aleatório de espera antes do envio de um pacote [68]. Este tempo aleatório é denominado *backoff* e sua duração varia de acordo com as condições da rede [68]. Com relação a esta abordagem que diz respeito à introdução de mecanismo de *backoff*, diversos protocolos de acesso aleatório foram propostos na literatura, mas este trabalho se aterá a explicar em linhas gerais os protocolos clássicos da literatura correlata. Serão explicados os seguintes protocolos aleatórios: ALOHA [1], *Slotted ALOHA* [129] e o CSMA (*Carrier-Sense Multiple Access*) [79].

O protocolo ALOHA surgiu com um mecanismo distribuído básico de acesso ao meio aleatório. Neste protocolo, ao receber um quadro para transmissão, todo nó envia esse quadro em *broadcast*. Além disso, utiliza-se como unidade de tempo para transmissão, a fatia de quadro, isto é, o tempo gasto para se transmitir um quadro. Por exemplo, supondo um quadro de P bits a ser transmitido em um canal com capacidade de R bps, tem-se que a duração da fatia de quadro é igual a P/R segundos. Após o protocolo ALOHA tentar realizar uma transmissão normalmente, podem ocorrer colisões. Caso a transmissão sofra colisão, na próxima fatia de quadro, tenta-se com probabilidade p ($0 \leq p \leq 1$) realizar novamente a transmissão [1]. Essas tentativas com probabilidade p nas próximas fatias de tempo perduram até que se obtenha sucesso no acesso ao canal [1]. É importante mencionar que no protocolo ALOHA as fatias de quadro não são sincronizadas entre os nós. Logo, um nó pode estar no meio da sua fatia de quadro, enquanto outro nó que acessa o canal está no início da sua fatia de quadro.

O protocolo *Slotted ALOHA* [129] é bastante semelhante ao protocolo ALOHA. A principal diferença com relação ao protocolo ALOHA, consiste no fato de os tempos de fatia de quadro serem previamente sincronizados entre os nós. Logo, caso um nó esteja no começo de sua fatia de quadro, todos os outros também estarão, visto que houve a sincronização prévia [129]. Isso é feito para diminuir a janela de “vulnerabilidade” do protocolo, ou seja, o período em que será gerada uma colisão se um outro nó transmitir. Para facilitar o entendimento desta questão, a Figura 2.13 ilustra essa diferença da janela de “vulnerabilidade” entre os protocolos *Slotted ALOHA* e ALOHA. Essa sincronização de fatias de quadro permite um significativo aumento no desempenho do *Slotted ALOHA*. Alguns estudos chegam a falar em um aumento de 100% na eficiência máxima quando comparado com o ALOHA [112].

Com relação ao CSMA, este apresenta algumas importantes diferenças quando comparado aos protocolos ALOHA e *Slotted ALOHA*. Basicamente, essas diferenças residem em dois princípios que podem ser aplicados a depender da versão do CSMA utilizada. Os princípios em questão serão explicados a seguir:

- Detecção de portadora: a detecção de portadora consiste no sensoriamento do meio para verificar se está ocorrendo alguma transmissão naquele momento. Portanto, no CSMA, antes de iniciar uma transmissão, o nó verifica se o meio está livre realizando o referido sensoriamento. Se o meio estiver livre, o nó realiza sua transmissão. Caso contrário, a transmissão a ser iniciada é adiada por um período aleatório de tempo para evitar colisões [79]. Como exemplo de uso de tal mecanismo, é importante

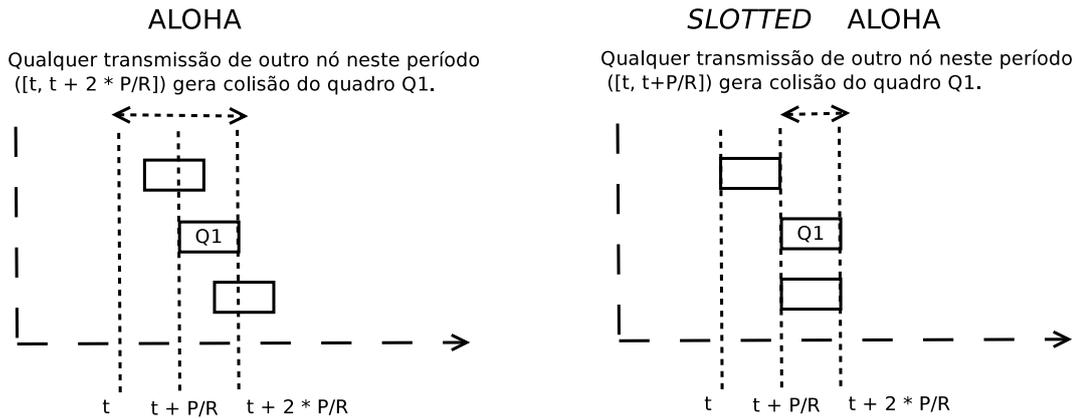


Figura 2.13: Comparação entre ALOHA e *Slotted* ALOHA.

mencionar que o protocolo CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) faz uso da detecção de portadora;

- Detecção de colisão: um nó que está realizando sua transmissão sensoreia o canal. Caso este nó verifique que há algum outro fluxo de quadros na rede que possa gerar colisão, ele interrompe sua transmissão e espera por um período aleatório até tentar transmitir novamente [84]. Este princípio de detecção de colisão é utilizado no protocolo CSMA/CD (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection*) [84] e também no protocolo Ethernet [108] para redes cabeadas.

O CSMA possui diversas variações propostas. O trabalho proposto no presente documento é relacionado a redes sem fio. Portanto, dentre as variações de CSMA, se dará um foco especial no CSMA/CA, dada sua importância no contexto deste trabalho. O CSMA/CA é fundamental para redes sem fio pelo fato de um dos principais padrões de comunicação de redes sem fio preconizar o uso na camada de enlace do CSMA/CA com algumas adaptações. O padrão em questão, bem como estas adaptações para o CSMA/CA serão explicadas na seção seguinte.

2.3 Padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 [63] é alvo de muitos estudos a respeito de seu desempenho, dada sua importância para redes sem fio [149]. O referido padrão faz parte da família de padrões IEEE 802 que tem por objetivo apresentar diversas especificações e arquiteturas ligadas a redes locais [43]. As especificações da família IEEE 802 são destinadas especialmente às camadas de enlace e física, conforme discutido anteriormente e ilustrado na Figura 2.8. Com relação à camada de enlace, estabelecem-se regras de acesso ao canal para envio de dados, enquanto os detalhes relativos à transmissão dos dados ficam nas descrições relacionadas à camada física [43].

Originalmente, o IEEE 802.11 continha a descrição de um protocolo de controle de acesso ao meio e de duas técnicas de transmissão na camada física lançada em 1997 [74]. Entretanto, ao longo dos anos, o padrão vem sendo desenvolvido e ganhando novas extensões com melhorias seja na parte de acesso ao meio, seja em evoluções nas técnicas

de transmissão de dados na camada física [43] [74]. Em 1999, foram abertos dois grupos de trabalho que deram origem aos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. Tais padrões operavam em bandas diferentes e conseguiam obter vazão de até 54 Mbps e 11 Mbps, respectivamente. Em 2002, houve uma unificação criando o IEEE 802.11g que opera na banda do IEEE 802.11b e utiliza os mecanismos MAC e da camada física do IEEE 802.11a, também alcançando 54 Mbps. Com o aumento da demanda por dados, o IEEE 802.11n foi lançado em 2009 chegando a obter 600 Mbps. Nesta versão do padrão, houve a introdução do uso das técnicas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) e SDM (*Spatial-Division Multiplexing*) [86] com até 4 fluxos, além de política que permite agregar quadros na camada de controle de acesso ao meio [56] [74] [117]. Mais recentemente, ainda surgiu o IEEE 802.11ac que faz uso da técnica MU-MIMO (*Multi-user Multiple-Input Multiple-Output*), permitindo a utilização de até 160 MHz de banda com até 8 fluxos simultâneos. Isso faz com que o IEEE 802.11ac consiga obter vazão superior a 1 Gbps [74]. Por sua vez, o padrão IEEE 802.11ax faz uso da técnica MU-MIMO tanto nas transmissões *uplink* e *downlink*, além de introduzir conceitos de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) acoplados ao MU-MIMO [71]. Por ser projetado para suportar redes de alta densidade, o IEEE 802.11ax apresenta mecanismos de atenuação de interferência em redes sobrepostas e técnicas eficientes no contexto de consumo de energia [115]. Assim, o padrão em questão consegue prover qualidade de serviço em redes densas, atingindo uma vazão teórica de até 9,6 Gbps [71], [123].

O padrão IEEE 802.11 pode operar tanto em redes com infraestrutura quanto em redes sem infraestrutura. Conforme explicado na Seção 2.1, no primeiro caso, há uma estação-base coordenando o acesso. Neste caso, o padrão IEEE 802.11 opera no modo PCF (*Point Coordination Function*) que preconiza a existência deste ponto central de controle [147]. Com relação as redes sem infraestrutura, o padrão IEEE 802.11 opera nelas utilizando o modo DCF (*Distributed Coordination Function*), em que cada estação age de modo independente sem a figura de um controle centralizado [147]. Como também citado na Seção 2.1, este trabalho tem como foco as comunicações em redes sem infraestrutura (*ad hoc*). Sendo assim, quando houver referência ao padrão IEEE 802.11, na verdade, está se referindo sempre ao padrão IEEE 802.11 operando no modo DCF.

Como mencionado, o padrão IEEE 802.11 possui diversos mecanismos e técnicas para prover a coordenação eficiente do acesso ao meio em redes sem fio. Neste trabalho, serão destacados alguns destes mecanismos mais intrinsecamente ligados às técnicas propostas. Os referidos mecanismos são os seguintes:

1. Reserva de Canal;
2. Detecção de Portadora Virtual;
3. Algoritmo de *Backoff*.

Os referidos mecanismos servem de suporte ao CSMA/CA utilizado pelo padrão IEEE 802.11, sendo portanto parte fundamental para a correta operação do padrão IEEE 802.11 em redes sem fio. Uma explicação mais detalhada acerca de cada um destes mecanismos está disponível nas próximas subseções deste texto.

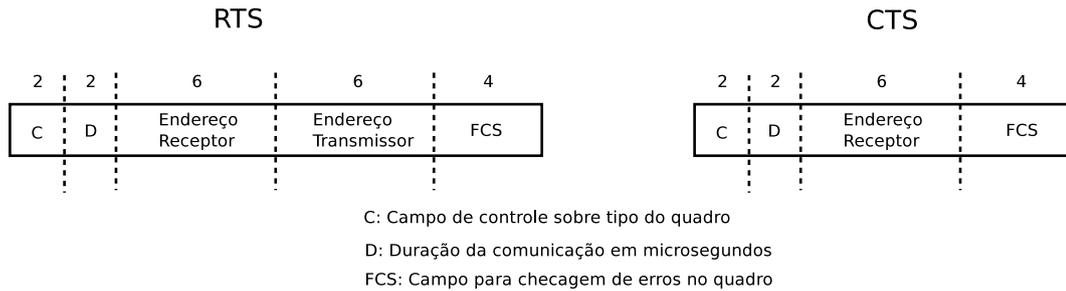


Figura 2.14: Formatos dos quadros de controle RTS e CTS.

2.3.1 Reserva de Canal

O padrão IEEE 802.11 possui um esquema de reserva de canal que visa evitar colisões mesmo em casos onde há a presença de terminais escondidos. Tal problema foi previamente explicado neste capítulo e possui um exemplo ilustrado na Figura 2.6. Tal figura mostra que os terminais *A* e *C* estão “escondidos” um do outro, embora ambos estejam conectados ao terminal *B*. Conforme ilustrado na Figura 2.6, caso os nós *A* e *C* decidam acessar o canal simultaneamente para enviar dados, isso gerará colisão no nó *B*. Para evitar perdas ocasionadas por situações deste tipo, o padrão IEEE 802.11 possibilita a opção de se utilizar um mecanismo de reserva de canal. Tal mecanismo é baseado na troca de quadros de controle antes da troca dos quadros de dados e ACK (*acknowledgement*). Os quadros de controle utilizados na reserva de canal são os quadros RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) e seus formatos estão ilustrados na Figura 2.14.

Um exemplo da utilização dos quadros de controle será explicado a seguir com o auxílio da Figura 2.15. Nesta situação, o nó *A* quer enviar dados ao nó *B*. Primeiramente, o nó *A* envia o quadro de controle RTS para o nó *B*, de modo que todos os vizinhos do nó *A* (como o nó *D*) fiquem cientes de que ocorrerá uma comunicação. Neste caso, o nó *D* usará a informação de duração presente no RTS para saber em quanto tempo o canal ficará livre novamente. É importante mencionar que tal informação está armazenada em um campo do cabeçalho do quadro de controle RTS, conforme ilustrado na Figura 2.14. Após receber o quadro RTS, o nó *B* então verifica que é o destinatário do RTS com o auxílio do campo “destino” do cabeçalho do RTS. Então, o nó *B* responde ao nó *A* com um quadro de controle CTS. De maneira análoga ao que ocorre com o RTS, todos os nós vizinhos ao nó *B* (como o nó *C*) ficam cientes da comunicação que se iniciará e de sua duração. Assim, o nó *C* adiará sua tentativa de acessar o canal pelo tempo de duração da comunicação. Após o nó *A* receber o CTS, os dados serão enviados ao nó *B* que responde com um ACK.

Assim, a reserva de canal é um mecanismo capaz de atenuar consideravelmente as perdas por colisão no IEEE 802.11, visto que reduz os efeitos do problema do terminal escondido. Além disso, como o quadros de controle RTS e CTS tipicamente são significativamente menores que o de dados, o tempo despendido com uma colisão de RTS ou CTS é menor que o despendido com uma colisão de dados [140]. Embora possua diversas vantagens, a utilização dos quadros de controle introduz significativo aumento do tempo total gasto com a comunicação. Para quadros de dados com *payload* de 128 bytes sendo transmitidos em um canal com capacidade de 1 Mbps, o tempo despendido com a reserva de canal chega a representar 21% do tempo total de transmissão [52] [67]. Por isso, no

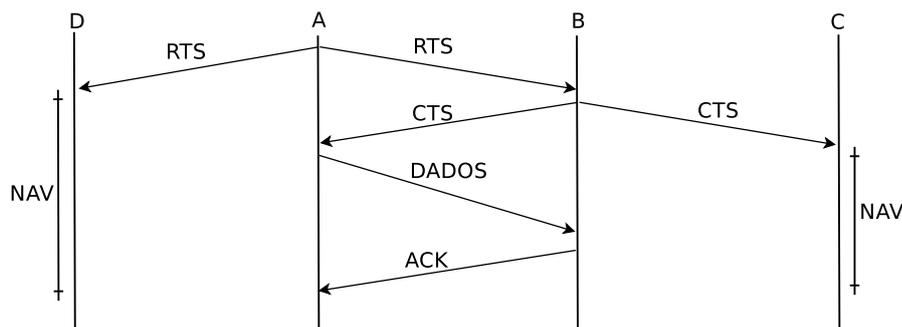


Figura 2.15: Exemplo de reserva de canal com quadros RTS e CTS.

padrão IEEE 802.11, a utilização da reserva de canal é opcional, visto que para pacotes de dados pequenos o custo introduzido com a reserva de canal pode não valer a pena. Dada estas características da reserva de canal com quadros de controle, surgiram alguns estudos para reduzir o tempo gasto com a reserva de canal. Como exemplo, pode-se citar uma abordagem que utiliza sinais da camada física para atenuar a probabilidade de colisão entre RTS e CTS [97] [140]. Outras abordagens voltadas para antenas direcionais que não são o escopo deste trabalho, utilizam estes mesmos sinais da camada física para realizar a reserva de canal de modo mais rápido que utilizando os quadros de controle [53] [52]. Tendo sido explicado o mecanismo de reserva de canal, será agora apresentada a detecção de portadora virtual que atua em conjunto com a reserva de canal para mitigar colisões nas redes que utilizam o padrão IEEE 802.11.

2.3.2 Detecção de Portadora Virtual

Conforme já explicado na Subseção 2.2.3, o CSMA tem como premissa a verificação do meio antes de iniciar a transmissão de um quadro. Entretanto, devido a características inerentes ao espectro eletromagnético, tais como o desvanecimento de sinal, essa verificação do meio se torna bem mais custosa, complexa e imprecisa do que nos meios cabeados [43] [147]. Além disso, a possibilidade de haverem terminais escondidos complica ainda mais a verificação do meio [43] [147]. Portanto, o padrão IEEE 802.11 introduz a possibilidade de realizar essa verificação do meio com o auxílio dos quadros de controle da reserva de canal. Essa verificação é denominada detecção de portadora virtual [43] [83] [147]. Para realizar a detecção de portadora virtual, cada nó da rede possui um contador de tempo denominado NAV (*Network Allocation Vector*). Este contador indica o tempo (em μs) em que o meio está reservado para outra comunicação em andamento. Quando o contador atinge o valor igual a zero, o nó em questão vai tentar acessar o meio para enviar seus quadros.

O contador NAV é preenchido a partir do valor do campo “duração” presente no cabeçalho dos quadros de controle RTS e CTS. O cabeçalho destes quadros está ilustrado na Figura 2.14. Como exemplo do preenchimento do NAV, pode-se considerar o fluxo de quadros descrito no diagrama da Figura 2.15. No diagrama em questão, o nó *A* deseja transmitir dados ao nó *B*. Primeiramente, o nó *A* verifica que seu NAV está igual a zero e envia o quadro RTS para *B*. Note que todos os vizinhos do nó *A* recebem também este alerta sobre a necessidade do nó *A* reservar o meio para se comunicar com o nó *B*. Como

o nó D é vizinho do nó A , ele também recebe essa notificação e utiliza o campo “duração” do quadro RTS para estabelecer o seu valor de NAV.

É importante mencionar que processo análogo ocorre com o nó C ao receber o quadro CTS enviado pelo nó B . Assim, o nó C também estabelece seu contador NAV de acordo com o valor do campo “duração” do quadro CTS. Dessa forma, ao atualizarem seus contadores NAV, todos os vizinhos dos nós A e B , tais como os nós C e D , não irão tentar acessar o meio até que a comunicação entre os nós A e B termine. Logo, evita-se possíveis colisões sem a necessidade explícita de ficar monitorando o meio com operações de camada física dificultadas pelas características do meio eletromagnético. Encerrada a explicação sobre a detecção de portadora virtual, será apresentado o mecanismo de *backoff* presente no padrão IEEE 802.11.

2.3.3 Algoritmo de *Backoff* Exponencial

Como apresentado na Subseção 2.2.3, os protocolos de acesso aleatório possuem um mecanismo de probabilidade para regular seu acesso ao meio. A cada colisão, a próxima tentativa de transmissão é feita com base em uma probabilidade p na próxima fatia de tempo. Em conformidade com esta abordagem, o padrão IEEE 802.11 faz uso do algoritmo de *backoff* exponencial para controlar o acesso ao meio.

O algoritmo de *backoff* exponencial funciona da seguinte forma. Após realizar a detecção de portadora virtual para assegurar que o meio está livre, o nó que deseja transmitir sorteia um número no intervalo $(0, CW - 1)$, onde CW é o tamanho da janela de *backoff*. É importante mencionar que $CW > 0$ e que CW varia de acordo com a quantidade de retransmissões por colisão daquele quadro. A cada colisão, a janela de *backoff* (CW) é multiplicada por dois até chegar a um tamanho máximo especificado. Tipicamente, os valores da janela de *backoff* são potências de 2 [43]. Por exemplo, para o IEEE 802.11b, o valor mínimo da janela de *backoff* é igual a 32 (2^5) e o valor máximo é igual a 1024 (2^{10}) [43] [63]. Portanto, quanto maior for a janela de *backoff* (CW), menor será a probabilidade de se acessar o meio na próxima fatia de tempo, visto que esta probabilidade p é expressa por $p = 1/CW$.

Quando a janela de *backoff* atinge seu tamanho máximo previsto, ainda que ocorram mais retransmissões por colisão, seu valor permanece estável até ser reiniciado para o valor mínimo. Esse comportamento mantém o protocolo MAC estável ainda que sob uma intensa carga de quadros a serem transmitidos [43]. O valor da janela de *backoff* pode ser reiniciado para o valor mínimo em duas situações: Caso ocorra sucesso na transmissão do quadro ou caso o número máximo de tentativas definido no padrão IEEE 802.11 seja atingido. Neste último caso, o quadro é então descartado [43]. Finalizada a explicação acerca dos mecanismos do padrão IEEE 802.11 mais relacionados com o presente trabalho, serão expostas maneiras de avaliar o padrão IEEE 802.11 como protocolo de controle de acesso ao meio do ponto de vista de desempenho da rede.

2.4 Avaliação do Padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 é utilizado em larga escala, sendo alvo de diversos estudos no que diz respeito à sua capacidade máxima de transmissão para as suas diferentes versões propostas ao longo dos anos [16] [72] [117] [160]. Conforme explicado previamente, o

padrão em questão utiliza-se do algoritmo de *backoff* exponencial em conjunto com uma política semelhante ao do CSMA/CA para minimizar colisões [63]. Ao se aumentar a carga de tráfego sobre uma rede operando de acordo com o padrão IEEE 802.11, espera-se que a vazão vá aumentando até um determinado ponto. A partir deste ponto, as retransmissões passam a ocorrer com grande frequência de modo que a vazão se estabilize em um limite, conforme mencionado em estudos da literatura correlata [28]. Com o intuito de possibilitar o cálculo deste limite de vazão do padrão IEEE 802.11, Bianchi [19] propôs um modelo matemático que descreve o comportamento do padrão em termos de vazão. Tal modelo denota a capacidade máxima do padrão IEEE 802.11 como vazão de saturação. O trabalho de Bianchi [19] se baseia nas seguintes premissas para seu modelo:

- Todos os nós sempre possuem pacotes em sua fila de transmissão. Assim, emula-se o “piores caso”, ou seja, o caso no qual vai se atingir o limite da vazão [19];
- Assume-se que a probabilidade de colisão entre pacotes transmitidos por cada estação independe do número de retransmissões já realizadas. Em avaliações realizadas com o auxílio de simulações, essa premissa mostra resultados bastante precisos, especialmente, quando o número de nós da rede aumenta [19].

No caso do artigo de Bianchi [19], a modelagem é realizada em dois passos. Primeiramente, emprega-se cadeias de Markov [104] para simular o comportamento do algoritmo de *backoff* exponencial, utilizando-se a quantidade de nós e os tamanhos mínimo e máximo da janela de *backoff* como parâmetros. A partir da cadeia de Markov obtida, é possível modelar a probabilidade estacionária (τ) de uma estação transmitir um pacote em uma fatia de tempo aleatória. É importante mencionar que τ independe do fato do IEEE 802.11 no seu modo DCF estar usando ou não técnicas de reserva de canal (RTS/CTS), visto que o τ depende exclusivamente do número de nós concorrendo pelo canal e de parâmetros relacionados aos tamanhos mínimo e máximo da janela usada no algoritmo de *backoff* exponencial. A probabilidade estacionária τ possui a seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{2 \cdot (1 - 2 \cdot p) \cdot (1 - p)}{(1 - 2 \cdot p) \cdot (W + 1) + p \cdot W \cdot (1 - (2 \cdot p)^m)}, \quad (2.1)$$

em que p denota a probabilidade de haver colisão, W denota o tamanho mínimo da janela de *backoff* e m denota a posição na janela de *backoff*, ou seja, $W_{max} = 2^m \cdot W$ considerando que W_{max} é o o tamanho máximo da janela de *backoff*.

O segundo passo da abordagem apresentada por Bianchi [19] consiste em modelar a vazão de saturação a partir da probabilidade expressa por τ . Para tanto, é necessário definir as seguintes probabilidades:

p_{tr} : Probabilidade de pelo menos uma transmissão ocorrer durante uma dada fatia de tempo;

p_s : Probabilidade que uma transmissão ocorra com sucesso (sem colisões) durante uma dada fatia de tempo dado que ao menos um nó transmitiu naquela fatia de tempo.

Seja n a quantidade de nós disputando o canal, sabe-se que $(1 - \tau)^n$ expressa a probabilidade de nenhum nó transmitir em uma dada fatia de tempo. Sendo assim, é trivial que p_{tr} é o oposto disso, isto é:

$$p_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n. \quad (2.2)$$

p_s pode ser facilmente derivado de p_{tr} com o auxílio do teorema de Bayes [15] expresso a seguir:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}. \quad (2.3)$$

Considerando que p_s é condicionado a p_{tr} por definição, com o auxílio da Eq. (2.3), pode-se afirmar que:

$$p_s = \frac{1 \cdot n \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-1}}{p_{tr}}. \quad (2.4)$$

A partir dessas probabilidades, é possível estimar a vazão de saturação como sendo o quociente entre o tamanho esperado do *payload* transmitido e o tamanho esperado da fatia de tempo. Portanto, o modelo de Bianchi define a vazão de saturação da seguinte forma [19]:

$$S = \frac{(p_s \cdot p_{tr} \cdot P_{sz})}{\bar{T}_{slot}}, \quad (2.5)$$

considerando

$$\bar{T}_{slot} = T_{slot} \cdot (1 - p_{tr}) + p_{tr} \cdot p_s \cdot T_s + p_{tr} \cdot (1 - p_s) \cdot T_c, \quad (2.6)$$

onde T_s denota o tempo total de transmissão gasto em caso de sucesso, T_c denota o tempo total gasto com uma colisão, T_{slot} denota a duração de uma fatia de tempo e P_{sz} corresponde ao tamanho do *payload* do pacote. É importante mencionar que o cálculo de p_{tr} e p_s é diretamente relacionado à probabilidade τ mencionada anteriormente. Por sua vez, T_s e T_c são diretamente afetados pela decisão da operação com ou sem a utilização da reserva de canal e conseqüentemente dos pacotes RTS/CTS, visto que eles modificam o tempo total de transmissão, bem como o tempo gasto com uma colisão.

O modelo de Bianchi foi comparado com diversas simulações a respeito do padrão IEEE 802.11 exibindo resultados muito precisos [19]. Sendo assim, o modelo em questão se tornou referência na avaliação de vazão de saturação de protocolos MAC que operam em condições semelhantes ao padrão IEEE 802.11. Este modelo foi alvo de diversos estudos e uma extensão do mesmo foi proposto por Tinnirello e Bianchi [152]. As particularidades desse novo modelo serão explicadas na seção subsequente.

2.4.1 Modelo Estendido

O modelo de Bianchi se tornou referência e foi alvo de diversas críticas e extensões para determinadas particularidades de protocolos MAC, conforme apresentado nos artigos [40] e [176]. Tinnirello e Bianchi [152] apresentaram um artigo no qual propõem alguns ajustes no modelo original proposto em [19]. Tais ajustes se fazem necessários porque há dois comportamentos específicos do padrão IEEE 802.11 que estavam sendo considerados de maneira diferente àquela descrita no padrão.

O primeiro comportamento diz respeito ao momento em que se deve decrementar o contador de *backoff*. O padrão fala que isso deve ser realizado apenas ao final da fatia de tempo, enquanto que o modelo original considerava que esse decremento era feito ao início de cada fatia de tempo, conforme discutido nos artigos [39] [40] [138] [169].

O segundo ponto a ser ajustado diz respeito ao fato de haverem fatias de tempo com probabilidade de transmissão e colisão distintas das demais. Tais fatias são denominadas “anômalas” no contexto do estudo realizado em [152]. As fatias de tempo “anômalas” são aquelas que sucedem uma transmissão bem sucedida ou uma colisão. A partir das regras de decremento do contador de *backoff* descritas no padrão IEEE 802.11 [63], é possível depreender que após uma transmissão bem sucedida apenas o nó que realizou a transmissão pode acessar o meio na fatia de tempo seguinte caso seu contador *backoff* seja sorteado com valor igual a 0. Note que isso ocorre com uma probabilidade igual a $1/W$, sendo W o tamanho mínimo da janela de *backoff* [152]. Com relação a ocorrência de uma colisão, a fatia de tempo seguinte não será acessada por nenhum nó. Isto ocorre devido a configurações relacionadas ao tempo de expiração do pacote ACK (*acknowledgement*) preconizadas pelo padrão IEEE 802.11 [63] detalhadas em [152].

Devido às duas questões explanadas, a hipótese de não correlação de probabilidade entre fatias de tempo consecutivas não é sempre verdadeira. Portanto, faz-se necessário alguns ajustes no modelo original apresentado em [19] para acomodar estas particularidades do padrão.

O modelo com as adaptações utiliza abordagem semelhante ao modelo original sendo também dividido em duas etapas. Primeiramente, obtém-se a probabilidade estacionária (τ) de uma estação transmitir um pacote em uma fatia de tempo aleatória. Novamente, é elaborada uma cadeia de Markov em torno dos parâmetros relacionados ao algoritmo de *backoff*. Obtém-se então a seguinte fórmula para a probabilidade estacionária (τ):

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1-p}{2 \cdot (1-p^{R+1})} \cdot [\sum_{j=0}^R p^j \cdot (2^j \cdot W - 1) - (1 - p^{R+1})]}, \quad (2.7)$$

em que p denota a probabilidade de haver colisão, W denota o tamanho mínimo da janela de *backoff* e R denota o contador máximo de tentativas de retransmissão até que o pacote seja descartado e a janela de *backoff* retorne ao tamanho mínimo.

A segunda etapa é semelhante a do modelo original e consiste em modelar as probabilidades do canal estar sendo utilizado (p_b) e de uma transmissão ocorrer com sucesso (p_s). A partir dessas probabilidades, obtém-se a fórmula da vazão de saturação [152]:

$$S = \frac{p_s \cdot \overline{E[P]}}{(1 - p_b) \cdot T_{slot} + p_s \cdot \overline{T_s} + [p_b - p_s] \cdot \overline{T_c}} \quad (2.8)$$

considerando

$$p_b = 1 - (1 - \tau)^n, \quad (2.9)$$

$$p_s = n \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-1}, \quad (2.10)$$

$$\overline{T_s} = T_s \cdot \frac{W}{W - 1} + T_{slot}, \quad (2.11)$$

$$\overline{E[P]} = P_{sz} \cdot \frac{W}{W - 1}, \quad (2.12)$$

onde n corresponde ao número de estações, P_{sz} corresponde ao tamanho do *payload* do pacote e T_{slot} representa o tamanho da fatia de tempo vazia.

Assim, o modelo de Tinnirello [152] constitui uma boa alternativa para avaliação da vazão de saturação de protocolos MAC similares ao padrão IEEE 802.11, conforme validado em simulações do próprio artigo [152]. Tendo explicado os modelos de estimativa de vazão de saturação, será apresentado um modelo de cálculo de vazão com abordagem distinta.

2.4.2 Vazão Máxima Teórica

O modelo de cálculo da vazão máxima teórica (VMT) considera a rede livre de colisões para tentar capturar o “melhor caso”. O VMT é considerado por alguns trabalhos como forma de avaliar o potencial de desempenho de um protocolo de controle de acesso ao meio, conforme realizado nos estudos apresentados em [95] [135] [159]. Ademais, alguns trabalhos usam o VMT para comparar a vazão de diferentes versões do protocolo IEEE 802.11 como apresentado nos estudos [67] e [118]. A utilização dessa métrica em conjunto com os cálculos da vazão de saturação constitui uma importante ferramenta de avaliação e comparação de protocolos de controle de acesso ao meio. O cálculo da vazão máxima teórica (S_{max}) está disponível no artigo [67] para as versões IEEE 802.11b e IEEE 802.11a do padrão IEEE 802.11. Esse cálculo baseia-se na seguinte equação [67]:

$$S_{max} = \frac{8 \cdot P_{sz}}{T_t}, \quad (2.13)$$

onde P_{sz} denota o tamanho do *payload* do pacote (em bytes) e T_t denota o tempo total de transmissão gasto para transmissão do pacote. O tempo total de transmissão possui a seguinte definição (T_t):

$$T_t = T_{RT} + T_{CT} + T_{DADOS} + T_{ACK} + T_B + T_{DF} + 3 \cdot T_{SF}, \quad (2.14)$$

onde T_{RT} denota o tempo de transmissão do RTS, T_{CT} denota o tempo de transmissão do CTS, T_{DADOS} denota o tempo de transmissão do *payload*, T_{ACK} denota o tempo de transmissão do ACK, T_B denota o tempo gasto esperando o contador de *backoff* atingir zero, T_{DF} e T_{SF} denotam os tempo de DIFS (*DCF Interframe Space*) e SIFS (*Short Interframe Space*), respectivamente. Com base na Eq. (2.13), S_{max} pode ser calculado para diferentes versões do protocolo IEEE 802.11. Este cálculo é feito para diferentes técnicas de espalhamento espectral, tais como DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), HR-DSSS (*High-Rate Direct Sequence Spread Spectrum*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Considera-se a utilização das duas primeiras técnicas no padrão IEEE 802.11b e a última no padrão IEEE 802.11a. A Tabela 2.1 apresenta um exemplo com resultados de vazão máxima (S_{max}) calculados para diversos valores de tamanho do *payload* e taxa de transmissão do canal com base nos parâmetros dos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. Os valores das constantes relativas a estes protocolos estão disponíveis na Tabela 2.2, onde T_{slot} representa o tamanho da fatia de tempo e CW_{min} representa o valor do tamanho mínimo da janela de *backoff*. Como o cálculo proposto em [67] se restringe às técnicas de espalhamento espectral contidas nos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b, a Tabela 2.2 não descreve os valores das constantes para as demais versões do padrão IEEE 802.11. É importante mencionar que o cálculo da vazão

Tabela 2.1: Vazão máxima teórica para várias combinações de *payload* e taxa de transmissão.

Técnica	R_c (Mbps)	P_{sz} (bytes)	S_{max} (Mbps)
DSSS	1	256	0,53
		512	0,69
		1024	0,82
	2	256	0,82
		512	1,16
		1024	1,47
HR-DSSS	11	256	1,46
		512	2,58
		1024	4,18
OFDM	6	256	2,92
		512	3,93
		1024	4,75
	12	256	4,40
		512	6,43
		1024	8,38
	54	256	7,17
		512	12,58
		1024	20,40

Tabela 2.2: Constantes para os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b.

Constante	802.11a	802.11b
SIFS (T_{SF})	$16\mu s$	$10\mu s$
DIFS (T_{DF})	$34\mu s$	$50\mu s$
CW_{min}	$16\mu s$	$32\mu s$
T_{slot}	$9\mu s$	$20\mu s$
$T_B = (CW_{min} - 1) \cdot T_{slot}/2$	$67,5\mu s$	$310\mu s$

máxima teórica pode ser adaptado para outros protocolos MAC que usem mecanismo semelhante ao do padrão IEEE 802.11. Assim, a vazão máxima teórica representa uma importante indicador para avaliação de desempenho de protocolos MAC.

2.5 Discussão

Neste capítulo, foram abordados alguns princípios fundamentais relacionados a redes sem fio. Para isso, apresentou-se os diversos elementos e tipos de redes sem fio, abordando alguns dos principais problemas enfrentados neste contexto. Em especial, discorreu-se

acerca de técnicas relacionadas a controle de acesso ao meio. Além disso, foram apresentadas as diferentes classificações de protocolos de controle de acesso ao meio, segundo sua política de tentativa de acesso ao meio. Após estas explicações preliminares, foram apresentados aspectos importantes relacionados ao padrão IEEE 802.11 [63]. Alguns dos mais importantes mecanismos do padrão foram apresentados para permitir uma visão mais aprofundada de alguns detalhes que serão relevantes no desenvolvimento desta proposta de trabalho.

Também foram expostos ainda alguns modelos matemáticos que permitem uma avaliação do padrão IEEE 802.11, levando em conta suas particularidades. Tais modelos podem inclusive ser estendidos a outros contextos, com algumas pequenas adaptações, como será feito mais adiante neste trabalho. Encerrada esta revisão preliminar sobre redes sem fio, será abordada no próximo capítulo a utilização de antenas com capacidade para operar de uma maneira diferente (*full-duplex*), bem como os protocolos de controle de acesso ao meio projetados para este tipo de operação.

Capítulo 3

Comunicações *Full-Duplex*

Neste capítulo, serão abordadas características relacionadas a diferentes tipos de comunicação. Em especial, será dada maior ênfase às comunicações do tipo *full-duplex*, uma vez que estas constituem o escopo deste trabalho. Inicialmente, serão apresentados os diferentes tipos de comunicação mencionando suas características, vantagens e desvantagens. Em seguida, serão expostos aspectos acerca das adaptações aos protocolos de controle de acesso ao meio para operarem em comunicações do tipo *full-duplex*, citando diversos protocolos da literatura já projetados prevendo este tipo de comunicação. Por fim, será realizada uma discussão comparando estes diversos protocolos a luz de aspectos comumente avaliados na literatura.

3.1 Tipos de Comunicação

Há diferentes tipos de comunicação no que diz respeito à possibilidade de utilização do enlace que une dois nós. Tipicamente, as comunicações podem ser classificadas como sendo do tipo *simplex* ou do tipo *duplex* [116] [147]. Comunicações do tipo *simplex* são aquelas em que um nó é exclusivamente um receptor ou exclusivamente um emissor [11] [116] [147]. Um exemplo deste comportamento está ilustrado na Figura 3.1. Neste caso, o nó *A* sempre será um emissor, enquanto o nó *B* sempre será um receptor. Por sua vez, as comunicações do tipo *duplex* permitem que os nós possam ser emissores ou receptores [116] [147]. Nas comunicações *duplex*, pode-se limitar os nós para que não sejam emissores e receptores, simultaneamente. Nesse caso, a comunicação é denominada *half-duplex* [116]. Um exemplo de comunicação *half-duplex* está disponível na Figura 3.2. Quando é permitido que os nós sejam utilizados simultaneamente como emissores e receptores, denomina-se a comunicação de *full-duplex* [116]. Este tipo de comunicação possui um exemplo ilustrado na Figura 3.3.

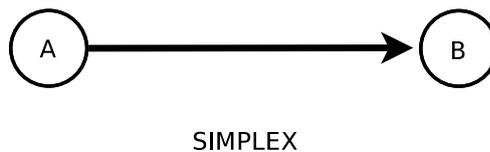


Figura 3.1: Exemplo de comunicação do tipo *simplex*.

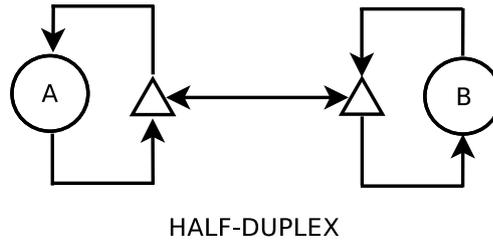


Figura 3.2: Exemplo de comunicação do tipo *half-duplex*.



Figura 3.3: Exemplo de comunicação do tipo *full-duplex*.

Dependendo do aparelho envolvido na comunicação, este pode operar alternadamente em modo *half-duplex* e em modo *full-duplex*, de acordo com a faixa de frequência em que se está operando [116]. O modo mais convencional é a utilização da operação em modo *half-duplex*, separando a transmissão e a recepção de sinais no domínio de tempo ou em frequências distintas [30] [116] [133].

Embora o mais comum ainda seja a operação em modo *half-duplex*, o modo *full-duplex* vem sendo alvo de diversos estudos que têm mostrado sua viabilidade em testes realizados em várias frequências [18] [175], tais como as do padrão IEEE 802.11 [63]. A operação em modo *full-duplex* traz uma série de vantagens e benefícios a serem explorados no contexto de comunicações sem fio [18] [116] [174] [175]. Entre estes benefícios, pode-se destacar alguns, listados a seguir:

- A operação em modo *full-duplex* em ambiente ideal (sem interferência) pode dobrar teoricamente a capacidade do enlace [174], visto que se pode transmitir e receber quadros simultaneamente no modo *full-duplex*. Para exemplificar tal afirmação, considere a Figura 3.3. Em tal figura, os nós A e B podem possuir dados a serem enviados de tamanho igual a P bits. Note que isto pode ocorrer em ambos os sentidos simultaneamente, ou seja, haver um fluxo de P bits no sentido $A \rightarrow B$ e outro no sentido $B \rightarrow A$. Supondo que ambos iniciem a transmissão no mesmo instante de tempo e demorem T segundos até finalizar a transmissão, tem-se que houve uma vazão de $(2 \cdot P)/T$ bits por segundo. Considerando a mesma situação em uma operação realizada no modo *half-duplex*, tem-se que leva T segundos para realizar a transmissão para o sentido $A \rightarrow B$ e que se decorre mais T segundos para realizar a transmissão para o sentido $B \rightarrow A$, totalizando $2 \cdot T$ segundos. Assim, neste caso, a vazão seria igual a $(2 \cdot P)/(2 \cdot T) = P/T$ bits por segundo. Note que este valor é exatamente a metade do obtido com a utilização de comunicações *full-duplex*;
- Utilizando comunicações *full-duplex* é possível atenuar as ocorrências do problema do terminal escondido. Tal problema decorre da situação em que um nó não está ciente da comunicação em andamento entre outros dois nós [153]. Entretanto, em

comunicações *full-duplex*, um nó pode escutar o meio a qualquer instante sem bloquear sua transmissão [116]. Assim, os nós podem adquirir conhecimento do canal e reduzir quase que totalmente os efeitos decorrentes do problema do terminal escondido [29] [65]. Além disso, por meio desse mecanismo que permite um maior conhecimento do estado da rede, as comunicações *full-duplex* potencialmente melhoram a justiça no que diz respeito à transmissão dos fluxos de dados [29] [65];

- Espera-se obter redução significativa do atraso fim a fim e da latência quando se opera em modo *full-duplex* [116] [133]. As razões para essa potencial redução são várias e serão brevemente explanadas. Com os nós operando em modo *full-duplex* é possível que um nó fique sensoreando a rede enquanto transmite dados, de modo a possuir um maior conhecimento sobre outras comunicações em andamento [29] [65]. Assim, pode-se utilizar um esquema de retransmissão menos oneroso em termos de latência e atraso do que a utilização de *backoff* [116]; Muitos protocolos se baseiam em informações da rede que são trocadas entre os nós. Com comunicações *full-duplex*, isso pode ser feito simultaneamente a uma outra transmissão de modo que o *overhead* destes protocolos seja reduzido melhorando sua vazão [133]. Como exemplo do tamanho do *overhead* existente nos protocolos, o padrão IEEE 802.11n chega a gastar mais de 50% do tempo total de uma transmissão com *overhead* [99]. Outra situação em que se espera redução de atraso é no contexto de encaminhamento de quadros em redes com múltiplos saltos [133] [175]. Para ilustrar esta vantagem, considere o exemplo disponível na Figura 3.4. Em tal exemplo, o nó *A* deseja enviar vários quadros ao nó *B*. Entretanto, o nó *B* está a mais de um salto do nó *A* e os quadros deverão passar pelo nó *R* para serem então encaminhados ao nó *B*. Considera-se na situação ilustrada que o nó *R* já recebeu ao menos um quadro do nó *A* e, portanto, já possui dados para repassar ao nó *B*, enquanto recebe os demais quadros do nó *A*. Note na referida figura que o encaminhamento é instantâneo quando se utiliza comunicações *full-duplex*. Entretanto, para as comunicações *half-duplex*, o envio de dados de *R* para *B* só poderia ser iniciado após o término do envio de todos os quadros de *A* para *R*;
- A utilização de comunicações *full-duplex* abre uma série de oportunidades no contexto de rádios cognitivos [11]. Um dos grandes problemas neste contexto é justamente a identificação de atividade do usuário primário [175]. Esta identificação é vital para que o usuário secundário não gere interferência no usuário primário. Com a adoção de comunicações *full-duplex*, o usuário secundário passa a ter a capacidade de escutar constantemente a frequência onde opera o usuário primário, atenuando assim essa possível interferência [175]. Outra questão relacionada aos protocolos de controle de acesso ao meio projetados para rádios cognitivos operando com comunicações *half-duplex* é que tais protocolos utilizam em geral uma abordagem de duas etapas [11]. A primeira etapa consiste no usuário secundário realizar a escuta do canal por um certo tempo para tentar identificar interferência. Caso o meio esteja livre, a transmissão é então realizada [11] [91]. Note que essa escuta anterior à transmissão introduz latência à comunicação e pode ser suprimida caso se considere a utilização de comunicações *full-duplex*. Isso ocorre pois pode-se adquirir informações do meio previamente, devido às características da operação em modo *full-duplex* [11] [91]. Assim, para comunicações *full-duplex*, é possível obter signifi-

cativos ganhos relacionados a aumento de vazão e redução de latência no contexto de rádios cognitivos [11] [91] [92];

- Há diversas discussões relacionadas a segurança das comunicações para redes *ad hoc* sem fio, sendo este um tema relevante para tais comunicações [14] [46] [94]. Entretanto, a maior parte dos trabalhos existentes foca no contexto de comunicações *half-duplex* [94]. A adoção de comunicações *full-duplex* aliada à utilização de múltiplas antenas como no esquema MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) traz diversas vantagens do ponto de vista de segurança [70] [94] [116]. A capacidade de haver mais de uma antena transmitindo simultaneamente permite que a relação sinal ruído seja aumentada na direção do destinatário, dificultando a decodificação da mensagem por um nó que não seja o destinatário da mesma [70].

Portanto, a operação em modo *full-duplex* traz melhorias às redes *ad hoc* sem fio, permitindo a introdução de mecanismos novos e mais flexíveis no sentido de prover um acesso ao canal mais eficiente [116] [133]. Assim, espera-se inclusive que as comunicações *full-duplex* possuam um importante papel no que concerne à quinta geração de redes móveis (5G) [148] [174].

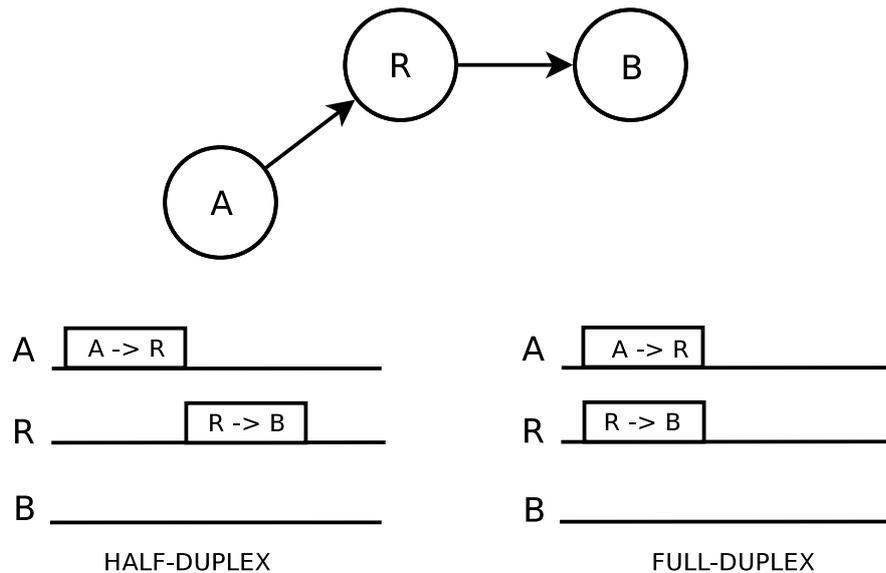


Figura 3.4: Exemplo de redução do atraso fim a fim com a utilização de comunicações do tipo *full-duplex*.

As técnicas para realizarem comunicações *full-duplex* já existem desde os anos 40 [133]. Inclusive, comunicações *full-duplex* são utilizadas em redes cabeadas há muitos anos, visto que em redes cabeadas é mais simples de se atenuar as interferências geradas pelo uso de comunicações *full-duplex* [59] [85]. No entanto, em comunicações sem fio, o problema em se operar no modo *full-duplex* reside nos efeitos decorrentes da denominada auto-interferência [18] [29]. A auto-interferência consiste na interferência percebida e gerada por um nó que está transmitindo e recebendo simultaneamente um quadro utilizando o modo *full-duplex* [116]. A auto-interferência pode gerar uma série de perdas relevantes se não for tratada adequadamente [18] [29] [77]. Portanto, técnicas para mitigação de auto-

interferência têm sido amplamente estudadas na literatura como nos trabalhos disponíveis em [26] [29] [41] [128] [175].

As técnicas de mitigação de auto-interferência já atingiram um nível de eficiência que torna viável a realização de comunicações *full-duplex*, conforme as diversas avaliações que constam na literatura correlata [26] [29] [41] [128] [175]. As técnicas de mitigação da auto-interferência são eficientes, inclusive nos cenários onde se faz a utilização de MIMO e outras tecnologias de antenas preconizadas pelo 5G [37] [65] [116] [175]. Em geral, as técnicas de mitigação da auto-interferência estão relacionadas à camada física ou a características específicas relacionadas a antenas, conforme é possível depreender de vários estudos, tais como os disponíveis em [26] [29] [41] [128] [175]. Como o presente trabalho tem por escopo principal as técnicas de controle de acesso ao meio em comunicações *full-duplex*, não será apresentado de modo detalhado o funcionamento das diversas técnicas de mitigação de auto-interferência. Como referência para o aprofundamento em tais técnicas, pode-se destacar os estudos apresentados em [85], [116] e [175], além das referências inclusas nestes trabalhos.

Outra importante observação a ser feita no que tange a comunicações *full-duplex* está relacionada aos protocolos de controle de acesso ao meio. Em geral, a maioria destes protocolos foi projetada baseado na utilização de comunicações *half-duplex*. Entretanto, para melhor aproveitar as potenciais vantagens das comunicações *full-duplex*, é necessário que sejam adotados protocolos específicos para estas comunicações [29] [134] [175]. Portanto, diversos protocolos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* foram propostos na literatura e serão discutidos na seção que se segue.

3.2 Protocolos de Controle de Acesso ao Meio para Comunicações *Full-Duplex*

Para melhor contextualizar a revisão do estado da arte que será apresentada nesta seção, é necessário definir alguns termos que serão adotados. Os protocolos serão classificados segundo alguns critérios relevantes no que tange a protocolos de controle de acesso ao meio. Tais critérios são comumente utilizados por artigos que têm por objetivo realizar revisão de estado da arte de protocolos para comunicações *full-duplex*. Como exemplo destes artigos de revisão, pode-se citar os estudos apresentados em [77] e [151], que apresentam quadros comparativos entre protocolos. Seguindo uma linha semelhante, os protocolos serão classificados segundo alguns dos critérios utilizados pelos estudos disponíveis em [34], [77] e [151]. Os referidos critérios estão explicados a seguir:

- Arquitetura da rede: indica se um protocolo é centralizado ou distribuído. Protocolos centralizados têm por vantagem o fato de possuírem mais informações sobre o estado geral da rede, porém são menos tolerantes a falhas devido a dependerem de um elemento centralizador. Em redes *ad hoc*, como não há o papel de uma estação-base fixa, muitas vezes se opta por protocolos distribuídos;
- Troca de informações de controle: descreve o mecanismo de troca de dados (quadros, sinais ou pacotes) utilizado para servir de insumo no controle do acesso ao meio;
- Mecanismo de controle de acesso ao meio: está relacionado a como é atribuído o acesso ao canal em cada protocolo. Pode haver algum tipo de disputa de acesso

pelo canal ou algum tipo de sincronização por fatia de tempo para cada nó acessar o canal em um determinado instante de tempo. Pode ainda existir algum esquema híbrido;

- Topologias atendidas: indica quais as formas de topologia de comunicações *full-duplex* que o protocolo atende. De modo geral, duas topologias são consideradas como as decorrentes do uso de comunicações *full-duplex*, como descrito em diversos estudos como [75] e [172]. São elas as topologias bidirecional e de encaminhamento, ilustradas nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente. Este critério descreve ainda se um protocolo que aceita as duas topologias privilegia uma em detrimento da outra;
- Quantidade de canais: basicamente, é verificado se o protocolo considera a operação com apenas um canal ou com múltiplos canais;
- Sincronismo: indica se o protocolo é síncrono ou assíncrono, podendo haver algum protocolo híbrido;
- Forma de realização da avaliação de desempenho: denota como foi feita a avaliação do protocolo no artigo que o propôs. Tipicamente, as avaliações são realizadas com o auxílio de simulações ou de modo analítico envolvendo modelos matemáticos que descrevem métricas de avaliação. Há ainda artigos que implementam seus protocolos e fazem experimentos reais;
- Métricas utilizadas para avaliação: descreve as métricas utilizadas nas avaliações realizadas pelo artigo que propõe o protocolo. Como exemplo, pode-se citar vazão, atraso, consumo de energia e justiça entre os nós no acesso ao meio.

Encerradas as definições relacionadas a protocolos de controle de acesso ao meio *full-duplex*, será apresentada uma breve explicação acerca das características, motivações, vantagens e desvantagens de diversos protocolos existentes na literatura. Os referidos protocolos de controle de acesso ao meio são apresentados nas subseções subsequentes.

3.2.1 CSMA/CAD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection*)

O protocolo *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection* (CSMA/CAD) [42] faz uso de comunicações *full-duplex* para propor uma melhoria ao protocolo CSMA/CA, que foi descrito na Seção 2.3. A melhoria em questão diz respeito a tentar detectar possíveis colisões no processo de reserva de canal. Isso é possível utilizando antenas *full-duplex* se todo nó ficar sempre monitorando o meio durante seu período de *backoff*. Ou seja, um quadro de reserva de canal só será enviado caso se saiba que o meio está efetivamente livre. Assim, consegue-se praticamente eliminar os efeitos do problema do terminal escondido. Neste caso, utilizando o CSMA/CAD, há a possibilidade de colisão na reserva de canal apenas se dois nós efetivamente forem iniciar a transmissão do RTS no mesmo instante de tempo. Dessa forma, o CSMA/CAD representa uma importante melhoria ao protocolo CSMA/CA, visto que o tempo gasto com retransmissões por colisão degrada significativamente o desempenho da rede.

Diante do exposto, está disponível em [42] uma avaliação comparando o CSMA/CAD com outros protocolos em termos de um cálculo analítico de vazão com base nos modelos de tráfego utilizados originalmente por [79]. Nos resultados desta avaliação, o CSMA/CAD provê significativos ganhos sobre os outros protocolos avaliados (DBTMA [55], CSMA [79] e CSMA/CA).

Assim, embora o CSMA/CAD possua ganhos em relação aos outros protocolos, tais protocolos foram todos projetados para operarem em comunicações *half-duplex*. Logo, nenhum daqueles protocolos de fato aproveita a vantagem da utilização das comunicações operando em modo *full-duplex*. Portanto, muito embora o artigo apresentado em [42] aponte uma importante direção de estudo com relação às comunicações *full-duplex*, ele não chega a prever a utilização de comunicações paralelas devido à operação das antenas em modo *full-duplex*. Os ganhos do CSMA/CAD são relacionados a diminuição da latência das comunicações pela diminuição das perdas.

Na taxonomia utilizada no presente trabalho, e explicada anteriormente, o CSMA/CAD pode ser classificado como sendo um protocolo distribuído por não haver elemento centralizador necessário para o seu funcionamento. O protocolo em questão se utiliza do mecanismo de RTS/CTS para troca de informações sobre os canais e preconiza a disputa do canal entre os nós. Com relação às topologias beneficiadas por este tipo de transmissão, não há nenhuma claramente especificada no artigo, mas se trata de um protocolo genérico que poderia atender a qualquer topologia atendida por antenas operando em modo *half-duplex*, embora com a ressalva de que apenas a latência é reduzida, não havendo nenhum outro tipo de paralelismo como ocorrerá com outros protocolos apresentados. Com relação ao sincronismo, o CSMA/CAD pode ser classificado como assíncrono. No que concerne à quantidade de canais, o CSMA/CAD é um protocolo que faz uso de apenas um canal. As avaliações apresentadas no artigo são analíticas e utilizam a vazão como métrica.

3.2.2 FuMAC

O protocolo FuMAC [167] tem por objetivo explorar melhor o potencial de uso do canal decorrente da utilização das comunicações *full-duplex*. O protocolo em questão se apresenta como sendo semi-síncrono, por visar a sincronização das comunicações bidirecionais em conjunto com o mecanismo assíncrono de *backoff* preconizado no CSMA. O protocolo FuMAC se baseia em uma análise matemática que mostra que em uma rede em condições saturadas é mais interessante priorizar comunicações bidirecionais (Figura 3.3) do que as de encaminhamento (Figura 3.4), do ponto de vista de vazão. Isso ocorre pois na topologia bidirecional se aproveita totalmente o potencial de vazão das comunicações *full-duplex* para aqueles nós caso eles possuam fluxo de dados um para o outro, enquanto que na de encaminhamento, apenas o nó responsável por encaminhar os dados efetivamente faz uso de seu potencial de receber e transmitir dados simultaneamente.

Para tentar atingir os objetivos citados, o FuMAC propõe a utilização de alguns mecanismos explicados a seguir. Primeiramente, o FuMAC utiliza a mesma abordagem do CSMA para controle de acesso do canal. Entretanto, a comunicação só é iniciada, caso o nó receptor não seja o transmissor de uma outra comunicação vigente. Assim, evita-se a formação de topologias como a de encaminhamento, privilegiando as bidirecionais. Caso o nó receptor não esteja envolvido em nenhuma comunicação no momento, há duas situações possíveis. Caso não possua dados a serem enviados para o transmissor, o nó

receptor enviará um sinal de tom durante a comunicação para seus vizinhos saberem que ele está envolvido em uma comunicação. Caso ele possua dados a serem enviados para o transmissor, uma comunicação bidirecional é estabelecida, maximizando o uso do canal no que concerne à vazão global da rede [167]. Outro mecanismo preconizado pelo FuMAC está relacionado a adicionar informações no preâmbulo dos pacotes para que a detecção da colisão seja feita antes da troca de quadros descrita anteriormente [167].

Uma outra contribuição do FuMAC diz respeito ao algoritmo de *backoff*. Devido ao mecanismo de *backoff* tradicional poder levar a espera indefinida e degradar a justiça no acesso ao canal [167], o FuMAC utiliza um esquema diferenciado de *backoff*. Este contador é então determinado também por fatores como a quantidade de colisões percebidas em um intervalo de tempo, combinado ao tamanho da fila de pacotes a serem enviados, de modo a visar prover melhorias da métrica de justiça em redes saturadas [167]. O artigo disponível em [167] apresenta comparações em termos de vazão total da rede e justiça com outros protocolos em redes saturadas.

O FuMAC pode ser classificado como um protocolo distribuído, visto que não há necessariamente um elemento que coordene as comunicações. O FuMAC é semi-síncrono por sua natureza híbrida já explicada e faz uso de apenas um canal. Com relação ao controle de acesso ao canal, este é viabilizado por um processo de disputa e se utiliza CSMA puro sem quadros tipo RTS/CTS nesta disputa de acesso ao canal, mas eventualmente pode se utilizar um sinal de tom para facilitar a identificação do canal como ocupado. No que concerne a topologias, o FuMAC é voltado para a topologia bidirecional em desfavor da de encaminhamento. O FuMAC é avaliado de forma simulada em função das variáveis vazão global e justiça no acesso ao canal.

3.2.3 FD+

Conforme explicado na Seção 3.1, e ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.4, há várias topologias que podem ser beneficiadas com a adoção de comunicações em modo *full-duplex*. Para efeitos de se obter um maior número de comunicações simultâneas, é mais interessante que se tenham várias comunicações em topologia do tipo bidirecional (Figura 3.3) do que na topologia de encaminhamento (Figura 3.4) [90]. Com isto, é esperado também que a vazão total da rede seja maior privilegiando a formação de topologia do tipo bidirecional. Com base nesta argumentação, o protocolo FD+ [90] foi proposto visando aumentar a ocorrência de comunicações em topologia do tipo bidirecional [90]. Para tal, o protocolo FD+ inclui um campo extra no cabeçalho de seus quadros de controle (RTS/CTS). Tal campo possui um número aleatório que permite o estabelecimento de uma política de priorização dos quadros do receptor que porventura formem uma topologia do tipo bidirecional [90].

Com o objetivo de avaliar o protocolo FD+, é proposta em [90] uma adaptação do modelo de Bianchi [19] para comunicações *full-duplex*. Isto é feito para possibilitar o cálculo da vazão total da rede considerando que esta se encontra saturada. De fato, neste cenário, o FD+ é capaz de prover ganhos de vazão quando comparado a outros protocolos projetados para comunicações em modo *full-duplex* [90].

Pela sua coordenação de prioridade entre os quadros de controle não ser centralizada, o FD+ pode ser classificado como um protocolo distribuído. O FD+ utiliza apenas um canal e é assíncrono devido a se basear no mecanismo de *backoff*. No que tange ao controle

de acesso ao canal, a decisão de acesso é feita por um processo de disputa baseado nas informações obtidas de quadros de controle (RTS/CTS) modificados. O FD+ pode operar em quaisquer das topologias clássicas listadas para o modo *full-duplex* (bidirecional e encaminhamento), mas prioriza a formação de topologias bidirecionais para obter melhor uso do espectro e maior vazão [90]. As avaliações apresentadas em [90] são analíticas e utilizam a vazão em ambiente saturado como métrica.

3.2.4 Janus

O Janus [73] é um protocolo projetado para comunicações em modo *full-duplex*, levando em conta a utilização de um elemento centralizador tal como uma estação-base. O protocolo em questão tem por objetivo proporcionar uma maior vazão e também uma justiça maior no que concerne ao uso da rede. Ao contrário dos demais protocolos, o Janus é capaz de adaptar a taxa de transmissão de acordo com o nível de interferência do meio, de modo a possibilitar a coexistência de mais comunicações simultâneas [73]. Para tanto, o protocolo visa realizar o agendamento das comunicações *full-duplex* adaptando sua taxa de transmissão da melhor maneira possível. Entretanto, o problema de realizar o agendamento das comunicações e da taxa de transmissão é NP-completo [73]. A prova da NP completude consiste em mostrar uma redução em tempo polinomial do problema da verificação da existência de circuitos hamiltonianos para o problema do agendamento. Mais detalhes da demonstração formal encontram-se disponíveis em [73]. Dado que o problema de agendamento é NP-completo, é necessário o uso de uma heurística eficiente para auxiliar o agendamento das comunicações [73].

O funcionamento do protocolo Janus se dá em rodadas. A cada rodada, a estação-base obtém informações sobre as comunicações de cada nó da rede, com o auxílio de mensagens de *probe*. Então, a estação-base faz o cálculo do melhor agendamento das transmissões e taxas de transmissão. Com base nestas informações, as comunicações são então realizadas. Devido ao fato da estação-base possuir o total conhecimento das comunicações, o protocolo Janus não levará a colisões [73]. Portanto, devido a esta característica, o protocolo em questão suprime o *backoff*. Assim, apenas ao final de todas as transmissões, são trocados os pacotes de ACK (*acknowledgement*). Este envio dos pacotes de ACK apenas ao final de todas as transmissões é realizado para evitar que estes pacotes de ACK interfiram em comunicações em andamento o que poderia reduzir a quantidade de comunicações simultâneas realizadas com sucesso [73].

O protocolo Janus também tem por objetivo prover justiça no tempo de acesso ao canal entre os nós. Tenta-se realizar isso com a utilização do algoritmo *Deficit Round Robin* (DRR) [141] para a distribuição dos fluxos. O DRR é uma versão mais simples do algoritmo *Fair Queuing* [32]. No *Fair Queuing*, dentre as várias filas que disputam qual será a acessada em um dado instante, calcula-se o tempo total de transmissão gasto para cada um dos pacotes no topo das filas e se escolhe o menor. Neste caso, obtém-se um alto índice de justiça, porém o custo computacional aumenta [73]. O DRR por sua vez utiliza um esquema de revezamento entre as filas atendidas e atribui um deficit a cada fila ao final de um revezamento, de modo a prover justiça sem ter um custo alto [73].

Por sua característica de concentração de informações em uma estação-base, o Janus pode ser classificado como um protocolo centralizado. Note que para utilizá-lo em redes *ad hoc* seria necessário eleger um dos nós para fazer o papel de estação-base ou fazer

algum tipo de revezamento entre os nós para definir qual seria a estação-base. O Janus utiliza apenas um canal e é um protocolo síncrono por não possuir *backoff* e se basear em sincronização por fatias de tempo. O controle de acesso ao canal se dá sem a necessidade de mensagens de controle ou algum tipo de disputa, mas sim pela atuação do algoritmo heurístico de agendamento. Embora fundamentado na existência de estações-base, o protocolo Janus não cita em sua proposição original privilegiar nenhum tipo específico de topologia, sendo genérico neste sentido. O protocolo foi avaliado experimentalmente em placas WARP [73] em termos de vazão, justiça e *overhead*. A comparação foi feita com relação ao CSMA/CA em modo *half-duplex* e foram mostrados ganhos significativos de vazão e justiça. Com relação ao *overhead*, o do protocolo Janus é significativamente maior. Porém, este custo acaba sendo diluído pelo fato da quantidade de comunicações simultâneas permitidas pelo protocolo Janus ser muito maior do que o permitido pelo CSMA/CA em modo *half-duplex* [73].

3.2.5 ContraFlow

O ContraFlow [142] é um protocolo distribuído projetado para comunicações *full-duplex* que visa resolver o problema do terminal escondido, além de realizar o processo de escalonamento de comunicações provendo uma maior justiça na distribuição dos fluxos de dados [142]. De modo geral, assim como diversos protocolos, o ContraFlow se baseia na política de controle de acesso ao meio preconizada pelo CSMA. Além disso, o ContraFlow incorpora alguns mecanismos relacionados a controle de acesso ao meio.

Um destes mecanismos tem por objetivo eliminar o problema do terminal escondido. Tal mecanismo consiste basicamente em fazer com que o nó receptor (B) da comunicação esteja sempre transmitindo algo de modo que seus vizinhos não gerem colisão nele. Caso o nó receptor (B) possua pacotes para o emissor (A), ou para um terceiro nó (C), este pacote deve ser enviado normalmente. Note que isto já é suficiente para alertar os vizinhos do nó receptor (B). Entretanto, caso o nó receptor (B) não possua pacotes para enviar, o ContraFlow propõe que seja enviado um sinal de tom sinalizando que o meio está ocupado enquanto perdurar a comunicação entre emissor (A) e receptor (B). Assim, é possível evitar todas as colisões decorrentes do problema de terminal escondido no ContraFlow de modo eficiente [142].

Outro mecanismo do ContraFlow está relacionado a redução na probabilidade de colisões para comunicações oportunistas em modo *full-duplex*. Tal mecanismo será apresentado com o auxílio de um exemplo. Suponha que o nó A inicie uma comunicação com B . Conforme explicado anteriormente, no ContraFlow, o nó receptor (B) deve aproveitar a oportunidade e enviar o próximo pacote de dados endereçado a um de seus vizinhos ou gerar um sinal de tom para indicar aos seus vizinhos que há uma comunicação em curso [142]. Suponhamos que o nó B possua pacotes a serem enviados aos seus vizinhos C e D . O ContraFlow neste caso propõe que o nó B consulte seu histórico de comunicações com seus vizinhos C e D , optando pelo pacote direcionado ao nó em que houve mais tentativas bem sucedidas no histórico [142], por exemplo D . Assim, espera-se que a comunicação entre B e D tenha maior chance de sucesso do que uma eventual entre B e C . Logo, haveria uma probabilidade maior de obter mais comunicações simultâneas, aumentando a vazão total da rede [142].

Na proposta do ContraFlow, é utilizado um mecanismo probabilístico com o objetivo de chegar a um bom termo entre eficiência e justiça na distribuição dos fluxos [142]. Esse meio termo é denominado justiça proporcional e possui sua fundamentação matemática explicada com maiores detalhes em [69]. Para obter este ganho de justiça, a escolha da próxima transmissão a ser realizada é feita visando atender o fluxo que possui mais pacotes perdidos no seu histórico de transmissões [142]. Com isso, espera-se equilibrar a divisão dos fluxos. Note que esse mecanismo é aplicado em conjunto com o CSMA no início da comunicação, logo após o contador de *backoff* do nó transmissor alcançar o valor zero. Embora não esteja discutido em [142], é importante mencionar que a questão do histórico seria prejudicada caso a mobilidade fosse considerada, visto que haveria necessidade de popular novamente o histórico e de saber quando se deve descartar as informações desatualizadas.

O ContraFlow pode ser classificado como um protocolo distribuído que faz uso apenas de um canal. Embora possua o controle de acesso ao meio inspirado nos mecanismos preconizados pelo CSMA, o ContraFlow não utiliza quadros RTS/CTS para controle de acesso ao meio, sendo assíncrono. O ContraFlow não privilegia ou limita algum tipo específico de topologia, de modo a ser considerado genérico neste aspecto. A avaliação do ContraFlow com relação ao seu desempenho é feita por meio de simulação comparando-o com o CSMA em termos de vazão e justiça na distribuição dos fluxos. É importante mencionar que o cálculo da justiça na avaliação é realizada com base no conceito de justiça proporcional descrito em [69].

3.2.6 Full-duplex MAC

Sahai et al. [134] propuseram um protocolo para comunicações *full-duplex* baseado em algumas melhorias focadas para redes com infraestrutura, ou seja, assumindo a existência de uma estação-base. Como cada nó possui apenas as informações de tráfego dos pacotes de sua fila de pacotes, é necessário trocar informações com os demais nós para maximizar as oportunidades de comunicação *full-duplex* [134]. Os pacotes utilizados em [134] seguem o mesmo formato dos pacotes do IEEE 802.11, com a adição de campos extra para acomodar estas informações utilizadas para identificação de oportunidades de comunicações *full-duplex*.

O primeiro dos mecanismos propostos por [134] é relacionado ao contador de *backoff*. Quando dois nós descobrem que possuem muitos pacotes endereçados um ao outro, eles compartilham um contador de *backoff* utilizando um daqueles campos extras do cabeçalho dos pacotes [134]. Isso é feito de modo a sincronizar esse par de nós, maximizando a vazão na comunicação entre eles. Note que esta abordagem maximiza a vazão sem no entanto reduzir a chance de acesso ao canal dos demais nós, visto que o mecanismo de *backoff* compartilhado é apenas utilizado se o canal não foi alocado. Esta característica de não prejudicar os demais nós é fundamental visando justiça na distribuição dos fluxos [134].

O segundo mecanismo tem a ver com o fato dos nós estarem sempre escutando os pacotes e decodificando seus cabeçalhos, ainda que o nó esteja em tempo de espera devido ao NAV estar maior do que zero. Essa escuta faz com que os nós consigam ter mais informações sobre as comunicações em andamento evitando colisões por terminal escondido, por exemplo [134].

O terceiro mecanismo é relacionado ao controle de acesso ao canal. É proposto por [134] nem sempre enviar o próximo pacote da fila da camada MAC, mas verificar se há algum outro na fila que proveja mais vantagem no sentido de maximizar comunicações *full-duplex*. Esse mecanismo é opcional, podendo ser desabilitado [134].

O full-duplex MAC pode ser considerado um protocolo distribuído e assíncrono que utiliza apenas um canal. O controle de acesso ao canal é inspirado no mecanismo de disputa do IEEE 802.11, podendo habilitar ou não o uso de quadros RTS/CTS [134]. O full-duplex MAC não privilegia nenhuma topologia em detrimento de outra, entretanto ressalva-se que tal protocolo assume a existência da estação-base. O protocolo em questão é avaliado de modo simulado e experimental em termos de vazão, sendo comparado ao padrão IEEE 802.11 operando em modo *half-duplex*.

3.2.7 Full-duplex MAC baseado em IEEE 802.11

Duarte et al. [38] propuseram um protocolo de controle de acesso ao meio projetado para comunicações *full-duplex* que permite uma integração simples com o protocolo IEEE 802.11 operando em modo *half-duplex*. Por isso, o protocolo proposto em [38] é baseado no IEEE 802.11 em sua versão com os quadros de controle RTS/CTS.

Há a introdução de basicamente três particularidades. Primeiramente, ao receber um quadro RTS destinado a ele proveniente de A , um nó verifica em toda sua fila se possui algum pacote destinado a A . Caso possua, aproveita esta comunicação para este pacote enquanto recebe os dados de A , estabelecendo uma comunicação *full-duplex*. Além disso, para evitar que os ACKs possam levar a colisões com outros dados sendo transmitidos devido ao *full-duplex*, faz-se com que eles sejam enviados apenas ao final de todas as comunicações, de modo análogo ao praticado no Janus [73]. Entretanto, isso faz com que os nós não envolvidos na comunicação possuam mais chance de se colidir com estes ACKs devido a coexistência considerada entre elementos operando em modos *half-duplex* e *full-duplex* [38]. Isso faz com que os nós não envolvidos na comunicação possuam uma menor probabilidade de acesso ao canal. Assim, para não gerar uma situação falha na distribuição dos fluxos, o protocolo proposto em [38] prevê que todos os nós devem aguardar um pouco mais antes de tentar acessar o canal, de modo que este tempo a mais é suficiente para que os ACKs sejam transmitidos [38].

O protocolo apresentado em [38] utiliza um único canal e pode ser considerado assíncrono e distribuído. O seu mecanismo de controle de acesso ao canal é bastante semelhante ao previsto no padrão IEEE 802.11 com a utilização de quadros RTS/CTS. As comunicações *full-duplex* são limitadas àquelas onde apenas dois nós estão envolvidos, ou seja, uma clássica topologia bidirecional (Figura 3.3). O protocolo foi comparado com o padrão IEEE 802.11 em modo *half-duplex* em termos de vazão com o auxílio do simulador OPNET [38].

3.2.8 MASTaR

O protocolo MASTaR [75] (*MAC protocol for Access point in Simultaneous Transmit and Receive mode*) é um protocolo projetado para viabilizar de modo eficiente comunicações em modo *full-duplex*. Em especial, o MASTaR é projetado para topologias do tipo de encaminhamento (Figura 3.4) de modo bastante compatível com o padrão IEEE 802.11

visando interoperabilidade com elementos que operem em modo *half-duplex*. O diferencial do MASTaR para buscar a eficiência consiste em alguns mecanismos incorporados do padrão IEEE 802.11 [75].

O primeiro mecanismo é a utilização de ACK em bloco, ao invés de enviar um ACK para cada quadro de dados. Assim, o ACK em bloco confirma vários quadros de uma vez e permite um melhor uso do espectro aumentando a oportunidade de ocorrências de comunicação em modo *full-duplex* [75]. Vale ressaltar que tal mecanismo de ACK em bloco já foi proposto anteriormente no IEEE 802.11e, conforme detalhadamente descrito por [75].

O MASTaR introduz sempre um quadro auxiliar que é enviado para efeitos de sincronismo. Note que na topologia de encaminhamento (Figura 3.4) há duas transmissões simultâneas em andamento e não necessariamente os pacotes das duas possuem a mesma quantidade de dados. Para fazer com que os demais nós não interfiram nessa comunicação, o quadro auxiliar é enviado no fluxo que está enviando o menor pacote, de modo que ambas as transmissões terminem ao mesmo tempo [75]. Esse mecanismo de quadro auxiliar ajuda a prevenir problemas decorrentes do terminal escondido, bem como problemas de justiça devido a colisões inesperadas [75].

Em um cenário de encaminhamento (Figura 3.4), é desejável minimizar ao extremo a interferência entre nós para possibilitar um melhor aproveitamento do espectro. Dessa forma, se os nós envolvidos na transmissão fossem capazes de ajustar a potência do seu sinal enviado de modo a não interferir no nó que não é o destino da comunicação, esse objetivo seria cumprido. O MASTaR se utiliza de um mecanismo capaz de fazer esse ajuste fino na potência do sinal usado na comunicação [75]. Tal mecanismo na verdade é inspirado no mecanismo existente no IEEE 802.11h para controle de potência [75].

O MASTaR é um protocolo assíncrono que usa apenas um canal, além de ser distribuído e baseado no IEEE 802.11 no que diz respeito à disputa de canal e utilização de quadros de reserva de canal como RTS/CTS. O MASTaR tem por foco a topologia de encaminhamento, embora isso não o impossibilite de operar em topologias bidirecionais. As avaliações disponíveis em [75] comparam o MASTaR com o IEEE 802.11 operando em modo *half-duplex*, bem como compara o MASTaR com outros protocolos projetados para *full-duplex*. Os resultados que servem como base para estas comparações são fruto de simulações realizadas em termos de vazão e justiça.

3.2.9 FD-MMAC (*Full-Duplex Multi-Channel MAC*)

O protocolo *Full-Duplex Multi-Channel MAC* (FD-MMAC) [173] é um protocolo projetado para aproveitar de forma eficiente a utilização de múltiplos canais em comunicações operando em modo *full-duplex*. Como diversos protocolos da área, o FD-MMAC também possui alguns mecanismos inspirados em técnicas inicialmente preconizadas pelo CSMA e pelo padrão IEEE 802.11 [173]. No entanto, diferentemente do padrão IEEE 802.11, o FD-MMAC jamais utiliza quadros RTS e CTS para reserva de canal. A detecção de portadora virtual é realizada no FD-MMAC de um modo que não utilize quadros de reserva de canal para tentar melhorar a vazão da rede sem o custo da reserva de canal [173]. Após o contador de *backoff* chegar a zero, o nó transmissor escolhe o canal que esteja a mais tempo ocioso para tentar realizar a comunicação [173]. A escolha com base neste critério faz com que o FD-MMAC possa distribuir os fluxos de dados de modo mais justo,

além de gerar ganhos em vazão [173]. Essa informação relativa a ociosidade dos canais é obtida escutando os canais usando uma estrutura semelhante ao NAV, mas estendida para múltiplos canais. Quando se escuta um *beacon* que não está endereçado ao nó que está escutando o canal, sabe-se que este canal estará ocupado por um período de tempo que está codificado neste *beacon*. O mesmo vale para quando se escuta o pacote de dados que possui a informação de duração da comunicação em seu cabeçalho. Assim, o NAV para múltiplos canais é populado no FD-MMAC [173].

Além de realizar a atualização do NAV, uma das principais funções dos quadros RTS e CTS é atenuar a ocorrência de colisão de pacotes de dados. Assim, para manter este comportamento de descoberta rápida de possíveis colisões de dados, o FD-MMAC faz uso de *beacons* para confirmar o recebimento do pacote periodicamente [173]. Caso o nó transmissor não receba um *beacon* de confirmação, considera-se que houve colisão e se entra novamente em *backoff* de modo semelhante ao que ocorre quando não se recebe um CTS no IEEE 802.11. No entanto, é importante ressaltar que estes *beacons* não substituem o ACK. O ACK por sua vez é enviado após o final dos dados no FD-MMAC. O FD-MMAC faz ainda uso de técnicas da camada física relacionadas a correlação de sinais que permitem que o quadro ACK e o *beacon* não colidam [173].

Conforme explicado no Capítulo 2, os protocolos de múltiplos canais podem utilizar diversas abordagens, tais como o uso de canal de controle ou pontos de encontro. O FD-MMAC utiliza pontos de encontro argumentando que isso aumenta também a segurança contra ataques de negação de serviço ao canal de controle, de modo a tornar o FD-MMAC mais flexível e menos vulnerável [173]. Além de ser classificado como protocolo de múltiplos canais, o FD-MMAC é um protocolo assíncrono, distribuído que realiza disputa de acesso ao meio sem uso de quadros RTS/CTS. Como o receptor está sempre enviando *beacons* periódicos ao transmissor, não se formam nem topologias bidirecionais, nem de encaminhamento no FD-MMAC.

O principal objetivo deste em operar no modo *full-duplex* é conseguir aumentar o número de comunicações simultâneas em cada um dos múltiplos canais, dado que se é possível obter mais informações sobre o tráfego dos vizinhos quando se opera no modo *full-duplex*. A avaliação do FD-MMAC é analítica em termos de vazão, pois é proposto um modelo matemático para o cálculo da vazão [173]. Tal modelo é validado com simulações obtidas através do simulador OPNET [122]. Além disso, há avaliações de simulação relacionadas à justiça, comparando o FD-MMAC com outros trabalhos do estado da arte de múltiplos canais como os disponíveis em [144] e [166].

3.2.10 FD-MAC

O protocolo FD-MAC [172] foi proposto visando propiciar um eficiente controle de acesso ao meio para as comunicações quando se opera utilizando o modo *full-duplex*. É importante mencionar que o FD-MAC não tem nenhuma relação com o protocolo explicado na Subseção 3.2.6, embora eles sejam homônimos. O FD-MAC foi projetado visando compatibilidade com o padrão IEEE 802.11 e baseia seu mecanismo de reserva de canal no do padrão. Assim, o FD-MAC utiliza o algoritmo de *backoff* exponencial do padrão, além de se inspirar no mecanismo de reserva de canal através de quadros semelhantes aos quadros RTS/CTS [172]. Embora alguns outros estudos argumentem que a reserva de canal deve ser desabilitada devido ao fato de introduzir latência à rede, são

apresentadas situações que mostram que o uso da reserva de canal reduz significativamente as perdas decorrentes de situações em que ocorre o problema do terminal escondido [172]. Por essa razão, o protocolo FD-MAC adapta seu mecanismo de reserva de canal utilizando ideia semelhante à proposta pelo padrão IEEE 802.11.

A reserva de canal no protocolo FD-MAC é realizada de modo a permitir comunicações simultâneas tanto nas topologias bidirecional (Figura 3.3) quanto na de encaminhamento (Figura 3.4). Além disso, o FD-MAC é capaz de lidar com pacotes de tamanhos diferentes em cada um dos dois fluxos de dados simultâneos. Para comportar tal funcionalidade, o FD-MAC incorpora dois novos campos ao cabeçalho do CTS, formando o quadro denominado *full-duplex clear to send* (FCTS) [172]. Estes dois novos campos contém o destino e a duração (baseada no tamanho do pacote) da comunicação secundária a ser estabelecida. Para melhor ilustrar o funcionamento do FD-MAC, a Figura 3.5 apresenta um diagrama de quadros trocados entre os nós, tanto na topologia de encaminhamento (Figura 3.5a) quanto na bidirecional (Figura 3.5b). No exemplo da Figura 3.5a, o FCTS enviado pelo nó R contém os campos destino secundário e duração secundária populadas de acordo com aquilo que é necessário para que R se comunique com B de modo apropriado. Assim, é possível manter o sincronismo com relação aos quadros ACK mesmo com tamanhos de pacotes diferentes, além de atenuar a ocorrência de situações decorrentes do problema do terminal escondido [172].

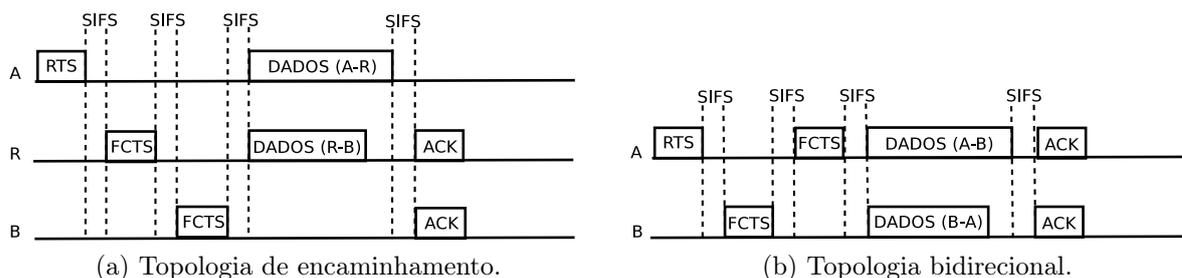


Figura 3.5: Exemplo de reserva de canal proposta pelo protocolo FD-MAC, adaptado de [172].

O protocolo FD-MAC é uma importante referência na literatura do estado da arte de protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex* por sua simplicidade e compatibilidade com comunicações *half-duplex* e com o padrão IEEE 802.11. Isso torna o FD-MAC alvo de comparação de outros estudos recentes, como o disponível em [89]. Além disso, o FD-MAC serviu ainda de inspiração para evoluções e surgimento de novos protocolos, como por exemplo o proposto em [5].

Com relação à taxonomia adotada neste capítulo, o protocolo FD-MAC é distribuído, assíncrono e utiliza apenas um canal. O controle de acesso ao canal é feito por meio de uma disputa regida por quadros com uma pequena modificação em relação ao tradicional mecanismo de RTS/CTS para melhor acomodar comunicações *full-duplex*. Trata-se de um protocolo genérico no que concerne a topologias, ou seja, é capaz de operar nas topologias bidirecionais e nas de encaminhamento. O protocolo possui uma avaliação analítica a partir de um modelo matemático proposto em [27] que é baseado no modelo

de Bianchi [19]. A avaliação é em termos de vazão e compara o FD-MAC com o padrão IEEE 802.11 operando em modo *half-duplex*.

3.2.11 *Energy-FDM*

O protocolo *Energy-FDM* [5] foi projetado baseado no protocolo FD-MAC [172] (explicado na Subseção 3.2.10) com melhorias no que concerne ao consumo de energia. Da mesma forma que o FD-MAC, o *Energy-FDM* baseia-se na reserva de canal em três passos (Figura 3.5). Entretanto, a grande diferença ocorre na forma que se realiza o envio dos dados e do ACK. Estes pacotes são enviados a uma potência mínima tal que seus receptores consigam decodificá-los com sucesso. Dessa forma, reduzindo a potência gasta enviando os pacotes de dados e ACK, é possível obter significativos ganhos de economia de energia [5]. Periodicamente, é necessário no entanto mandar estes pacotes com a potência normal. Isso é necessário para que os nós vizinhos tanto do transmissor quanto do receptor possam atualizar seu NAV. É importante mencionar que a atualização do NAV de modo apropriado é crucial para atenuar situações de terminal escondido [5]. Este período de tempo com potência máxima é relativamente curto se levarmos em consideração todo o tempo despendido com a transmissão dos pacotes de dados e ACK [5].

Assim como o FD-MAC, o protocolo *Energy-FDM* usa apenas um canal sendo ainda assíncrono e distribuído. O *Energy-FDM* utiliza disputa de canal baseada no CSMA/CA e com uso de quadros análogos ao RTS/CTS para reserva de canal. O *Energy-FDM* não privilegia nem as topologias bidirecionais nem as de encaminhamento, podendo operar com ambas e também possui compatibilidade com nós operando em modo *half-duplex* usando o padrão IEEE 802.11. O *Energy-FDM* é avaliado de modo analítico em termos de gasto de energia e vazão, sendo comparado ao FD-MAC [172] e ao padrão IEEE 802.11 em modo *half-duplex*.

3.2.12 S-CW FD (*Synchronized Contention Window Full Duplex*)

O protocolo *Synchronized Contention Window Full Duplex* (S-CW FD) [105] [106] foi proposto visando propiciar ganhos de eficiência no uso do espectro em comunicações *full-duplex*. Com isso, espera-se um aumento significativo de vazão. Além disso, o protocolo S-CW FD é compatível com comunicações operando em modo *half-duplex* o que facilita sua integração com o IEEE 802.11 [106]. Isso é possível, uma vez que o S-CW FD é semelhante ao IEEE 802.11 com algumas modificações explicadas a seguir.

O S-CW FD é baseado no CSMA para controle de acesso ao canal e não utiliza quadros RTS/CTS para ajudar a orquestrar este controle. Com relação ao *backoff*, o S-CW FD faz com que nós que possuam pacotes um para o outro tentem sincronizar seus contadores de *backoff*. Assim, estabelece-se algo semelhante a um “ponto de encontro” onde aqueles nós terão alta probabilidade de conseguir estabelecer uma comunicação bidirecional. Este “ponto de encontro” leva a ganhos de vazão sem a necessidade de se introduzir a latência decorrente da reserva de canal por quadros RTS/CTS [106]. Entretanto, essa sincronização de contadores de *backoff* introduz 10 bits ao cabeçalho do pacote de dados, para que os nós possam trocar informações sobre seu próximo contador de *backoff* e informações sobre em que modo se está operando (*half-duplex* ou *full-duplex*).

Além disso, assume-se que o sincronismo inicial só é alcançado após uma comunicação em modo *half-duplex*. Após uma colisão, assume-se também a necessidade de uma comunicação em modo *half-duplex* para que o sincronismo dos contadores de *backoff* seja novamente alcançado. Assim, o S-CW FD tem seu desempenho degradado para condições muito rigorosas de tráfego quando comparado a outros protocolos [106]. O S-CW FD permite a operação e sincronização eficiente de contadores de *backoff* tanto na topologia bidirecional quanto na de encaminhamento. Quando um nó possui mais de um vizinho para tentar estabelecer uma comunicação, ele tenta se sincronizar com aquele que possui menor tempo restante até o “ponto de encontro”. Caso um nó não seja escolhido, seu contador de *backoff* fica congelado aguardando o fim da outra comunicação para tentar concorrer ao acesso ao meio no instante marcado em seu “ponto de encontro”. O S-CW FD é capaz também de lidar com comunicações de tamanhos de pacotes diferentes. Para efeitos de sincronismo, o ACK só é enviado ao final da transmissão do maior dos pacotes [106]. Na topologia de encaminhamento, o nó que possui o menor pacote envia um sinal de tom até o final da transmissão do maior pacote para notificar os nós vizinhos da comunicação em andamento. Isso é feito com o objetivo de evitar colisões decorrentes de situações de terminal escondido [106].

O protocolo S-CW FD pode ser classificado como um protocolo distribuído, assíncrono e que faz uso de apenas um canal. Além disso, tal protocolo tem seu mecanismo de controle de acesso ao canal baseado em disputa sem fazer uso de quadros RTS/CTS. O protocolo é genérico no sentido de não privilegiar nenhuma topologia em detrimento de outra, sendo aplicável tanto na bidirecional quanto na de encaminhamento. Com relação aos resultados, o artigo disponível em [106] faz uma avaliação analítica comparando sua vazão de saturação com a do padrão IEEE 802.11. Além disso, o referido artigo apresenta resultados em termos de vazão relativos a simulações obtidas via OPNET [122]. Estas simulações comparam o protocolo S-CW FD com o padrão IEEE 802.11 e outros protocolos projetados para *full-duplex* que também não utilizam reserva de canal. Encerrada a apresentação de alguns dos principais protocolos de controle de acesso ao meio existentes projetados para comunicações *full-duplex*, será realizada uma discussão referente aos relevantes temas apresentados neste capítulo.

3.3 Discussão

Neste capítulo, diversos aspectos relacionados a comunicações *full-duplex* foram abordados. Primeiramente, discorreu-se acerca dos tipos de comunicações existentes, dando ênfase às características, às vantagens e às desvantagens de cada um destes. Como o foco deste trabalho está nas comunicações *full-duplex*, apresentou-se uma taxonomia, com alguns critérios, para classificação dos protocolos de controle de acesso ao meio projetados para este tipo de comunicação. Em seguida, foram discutidas características de diferentes protocolos, fazendo a classificação de cada um destes conforme a taxonomia apresentada neste capítulo. Isto permite que se faça uma breve análise comparativa destes protocolos. A Tabela 3.1 ilustra a classificação de cada um dos protocolos discutidos neste capítulo, conforme a taxonomia descrita na Subseção 3.2.

Nota-se que a grande maioria dos protocolos é distribuída, exceção feita ao protocolo Janus [73]. Como o foco da presente proposta de trabalho está em redes *ad hoc*, a característica de ser um protocolo distribuído se torna fundamental, conferindo uma maior

Tabela 3.1: Análise comparativa entre as características dos protocolos.

Protocolo	Arquitetura	Controle	Acesso	Topologia	Canais	Sincronismo	Avaliação	Métrica
CSMA/CAD	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	–	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
FuMAC	Distribuído	Tom	Disputa	Bidirecional	Único	Semi-Síncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD+	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Bidirecional	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
Janus	Centralizado	–	Fatia de tempo	Genérico	Único	Síncrono	Experimental	Vazão e Justiça
ContraFlow	Distribuído	Tom	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD-MAC [134]	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada e Experimental	Vazão
FD-MAC [38]	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Bidirecional	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão
MASTaR	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Encaminhamento	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD-MMAC	Distribuído	<i>Beacon</i>	Disputa	–	Múltiplos	Assíncrono	Simulada e Analítica	Vazão e Justiça
FD-MAC [172]	Distribuído	RTS/FCTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
<i>Energy-FDM</i>	Distribuído	RTS/FCTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão e Energia
S-CW FD	Distribuído	Tom	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada e Analítica	Vazão

flexibilidade à operação do protocolo. Com relação ao processo de controle de alocação de canal e os meios utilizados para tal, nota-se uma certa variedade. Há desde a utilização de *beacons*, até mecanismos elaborados de pontos de encontro ou ainda a utilização de algo semelhante ao RTS/CTS. Essas técnicas são importantes para definir se o protocolo será síncrono ou assíncrono, além também de definir se há disputa no processo de controle de acesso ao canal ou algum tipo de agendamento por fatia de tempo.

Na revisão do estado da arte apresentada, predominam protocolos que utilizam apenas um canal para comunicação, embora existam outros protocolos com técnicas projetadas para múltiplos canais como o FD-MMAC [173]. A manutenção da compatibilidade com comunicações *half-duplex* e com o padrão IEEE 802.11 é citada por muitos dos protocolos analisados. Entretanto, isso acaba limitando um pouco o projeto destes protocolos para se manterem mais próximos do padrão que faz uso de apenas um canal.

Outro ponto que chama atenção é que quase todos os protocolos introduzem algum tipo de mecanismo para aumentar a oportunidade de se estabelecerem comunicações simultâneas, de modo a obter um aumento da vazão total da rede. Assim, a vazão é uma métrica que todos os protocolos levantados incluem em suas avaliações. Alguns o fazem usando simuladores (predominantemente o OPNET [122]), ou via modelos analíticos tipicamente adaptados do modelo de Bianchi [19]. Há ainda alguns que complementam suas análises com resultados obtidos em experimentos reais. Quase todos os protocolos utilizam o padrão IEEE 802.11 em modo *half-duplex*, como base de comparação para verificar se o ganho teórico de ao menos 100% de vazão é obtido. Alguns outros protocolos levantam ainda a necessidade de se avaliar a justiça no acesso ao meio, bem como métricas relacionadas ao consumo de energia.

Muito embora alguns protocolos não explicitem essa métrica relacionada à energia, essa avaliação é implicitamente realizada por diversos estudos. Isto ocorre pelo fato de que uma maior vazão denota uma maior eficiência energética, quando se opera sob o

mesmo tipo de equipamento. Assim, se um protocolo de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* possui uma maior vazão que um outro protocolo que usa o mesmo equipamento, certamente, o primeiro será mais eficiente do ponto de vista de gerenciamento de energia. Isto ocorre por uma maior vazão implicar na transmissão de uma maior quantidade de dados em um determinado intervalo de tempo. Assim, permite-se que os nós voltem mais rapidamente ao estado ocioso, no qual se espera que o gasto de energia seja menor. Note que o argumento acima não se aplica quando se considera ambientes saturados. Em ambientes saturados, para qualquer protocolo, nunca se entrará em estado ocioso por falta de dados a serem transmitidos.

Com relação às topologias, a maioria dos protocolos é genérico, aceitando tanto a formação de comunicações bidirecionais quanto de encaminhamento. No entanto, os protocolos FuMAC e FD+ privilegiam a topologia bidirecional, enquanto o protocolo MASTaR privilegia a de encaminhamento. O protocolo proposto em [38] limita as comunicações *full-duplex* a formar apenas topologia do tipo bidirecional. Os protocolos CSMA/CAD e FD-MMAC utilizam sua capacidade de escutar e transmitir sinais simultaneamente para otimizar transmissões *half-duplex* evitando ao máximo as colisões. Portanto, estes protocolos não se aplicam às topologias bidirecional e de encaminhamento.

Como o foco do presente trabalho é em redes *ad hoc*, pode-se destacar o protocolo FD-MAC [172] por sua compatibilidade com o padrão IEEE 802.11 e por suas características favoráveis a este tipo de rede. Tal protocolo é inclusive usado como comparativo entre outros protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex*, como apresentado no estudo disponível em [89]. Entretanto, embora possua bons resultados e características desejáveis para a operação em redes *ad hoc*, o protocolo FD-MAC pode onerar a rede com sua reserva de canal. É importante lembrar que o FD-MAC faz uso de uma reserva de canal mais estendida se comparada à proposta pelo padrão IEEE 802.11, conforme explicado na Subseção 3.2.10. Neste sentido, o presente trabalho apresentará uma proposta de uma série de melhorias neste mecanismo, a serem detalhadas nos capítulos seguintes.

Vale ressaltar que o levantamento do estado da arte realizado neste capítulo está restrito aos protocolos mais referenciados na literatura correlata. Todavia, há diversos estudos recentes e promissores que não foram abordados no levantamento de estado da arte, por ainda não serem muito referenciados. No entanto, vários desses trabalhos possuem características e abordagens similares às dos trabalhos descritos neste capítulo. Por exemplo, há artigos recentes que seguem a linha de priorização de topologias, em conjunto com melhorias no processo de *backoff*, como os disponíveis em [3] [4] [36]. Por sua vez, há protocolos que preconizam reserva de canal com quadros RTS/CTS modificados, como o apresentado em [145]. Outros protocolos se utilizam de sinais tom, tais como os descritos em [36] e [78].

A partir do levantamento do estado da arte apresentado neste capítulo, foram encontradas algumas lacunas na literatura que este trabalho tem por objetivo suprimir ou ao menos atenuar. Neste sentido, como destacado na Tabela 3.1, a maioria dos protocolos utiliza quadros RTS/CTS para realizar seu processo de reserva de canal evitando colisões. Entretanto, a reserva de canal via quadros acaba por introduzir tempo significativo ao tempo total de uma comunicação, o que pode prejudicar a vazão da rede. Algumas outras abordagens não usam RTS/CTS. Porém, estas acabam por não aproveitar completamente as vantagens teóricas das comunicações *full-duplex*, pois precisam ficar enviando algum

sinal tom para que os vizinhos saibam que há uma comunicação em andamento. Essa abordagem de envio do sinal tom até o final da comunicação para detecção de tráfego é também utilizada quando se forma uma comunicação com dois fluxos com tamanhos de pacotes distintos. Em geral, para efeitos de sincronismo, quando o nó acaba de transmitir o fluxo do menor pacote, os protocolos preconizam que ele fique ocioso ou envie um sinal tom para notificar tráfego a seus vizinhos, até que o fluxo de dados que possui pacote de tamanho maior termine. Isso pode gerar grande ociosidade em casos em que os tamanhos de pacotes por fluxo sejam muito distintos.

Outro ponto que motiva melhorias é relacionado a quando se vai privilegiar algum tipo de topologia. Alguns protocolos argumentam que a topologia bidirecional de fato pode ser a mais interessante para aumentar a quantidade de comunicações simultâneas em uma rede [38] [90] [167]. Todavia, os mecanismos para atingir este fim ainda são um pouco onerosos ou limitantes. As abordagens levantadas no estado da arte tratam tal tipo de topologia como sendo a única possível [38], ou então usam de informações extra, em cabeçalhos ou preâmbulos de pacotes [90] [167], para tentar obter tal comportamento. Assim como na reserva de canal usando quadros RTS/CTS, essas soluções podem se tornar bastante custosas. Além disso, acredita-se que pode haver meios mais eficientes de realizar esta priorização.

Portanto, no contexto de comunicações *full-duplex*, este trabalho investigará e proporá mecanismos que visem uma melhor utilização do canal, e um consequente aumento de vazão. Estes mecanismos têm como motivação as questões descritas no parágrafo anterior, pois entende-se que os protocolos existentes na literatura ainda deixam alguns desafios a serem sobrepostos. Neste sentido, os capítulos que se seguem apresentam propostas de uma série de melhorias relacionadas a utilização do canal em comunicações *full-duplex*.

Capítulo 4

FDT-MAC: Técnica de Reserva de Canal para Comunicações *Full-duplex*

Este capítulo detalha um dos resultados preliminares dos estudos relacionados a melhorias no controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*. Primeiramente, é apresentada uma nova técnica de reserva de canal para comunicações *full-duplex*. Tal técnica é denominada *Full-Duplex Tone Based MAC* (FDT-MAC) e será avaliada de diversas maneiras. As referidas avaliações serão também mostradas neste capítulo tornando possível verificar o impacto positivo da técnica proposta. Por fim, este capítulo contém uma discussão abordando as vantagens, as desvantagens e as possíveis melhorias relacionadas à técnica proposta.

4.1 Reserva de Canal Eficiente sem a Necessidade do Uso de Quadros

Esta seção introduz a técnica de controle de acesso ao meio denominada FDT-MAC. O FDT-MAC é um mecanismo de controle de acesso ao meio projetado levando em consideração a utilização de comunicações *full-duplex*. O FDT-MAC se baseia no emprego de sinais pulso e tom para auxiliar o processo de reserva de canal. Assume-se a existência dos mesmos mecanismos de camada física, necessários para o cancelamento da auto-interferência, que os descritos pelos artigos que propuseram o FD-MAC [27] [172]. Pelo fato da reserva de canal do FDT-MAC ser constituída por troca de sinais da camada física ao invés de quadros da camada de controle de acesso ao meio (RTS, CTS, FCTS), espera-se que o FDT-MAC realize a reserva de canal de modo mais rápido. Note que com isso almeja-se obter um impacto positivo na vazão da rede. Para atingir estes ganhos de desempenho, existem dois princípios do FDT-MAC que diferem do FD-MAC, bem como das demais técnicas existentes. Os referidos princípios são os seguintes:

- Os quadros de controle (RTS, FCTS e ACK) são substituídos por sinais pulso e tom;
- Em uma comunicação bidirecional, o nó *A* envia o tom ao nó *B*, se e somente se, isso é necessário para a atualização do NAV. Quando este tom não é enviado por não ser necessário, denomina-se este comportamento de **supressão de tom**.

Estes princípios têm por principal objetivo reduzir a vazão total da rede ao diminuir o tempo despendido com a reserva de canal em comunicações *full-duplex*. O primeiro princípio efetivamente reduz este tempo, visto que os sinais pulso e tom são transmitidos em menos tempo que os quadros (RTS, FCTS e ACK). Este comportamento será melhor detalhado na Seção 4.2. Pulso e tom são senoides que não carregam nenhum tipo de informação. O tempo gasto para que uma antena perceba um sinal pulso/tom é de não mais que $5\mu s$ [140]. Geralmente, estes sinais são utilizados com algum outro tipo de mecanismo para apontar alguma condição particular da rede [52]. No entanto, diferentemente do que ocorre com os quadros RTS, FCTS e ACK, os sinais pulso e tom não possuem cabeçalho com informações da camada de controle de acesso ao meio (MAC – *Medium Access Control*). Logo, faz-se necessário desenvolver uma forma de codificar nos sinais pulso e tom as principais informações contidas naquele cabeçalho MAC. Tais informações estão relacionadas aos campos do cabeçalho que indicam os identificadores de origem e destino do sinal enviado. Além disso, outra importante informação para atualização do NAV é a duração da comunicação que também é indicada no cabeçalho suprimido pelos sinais. Essa codificação de origem, destino e duração é fundamental para a operação do FDT-MAC e será posteriormente detalhada (Subseção 4.1.1). Exemplos de comunicação com o FDT-MAC tanto para topologias bidirecionais quanto para de encaminhamento estão disponíveis na Figura 4.1.

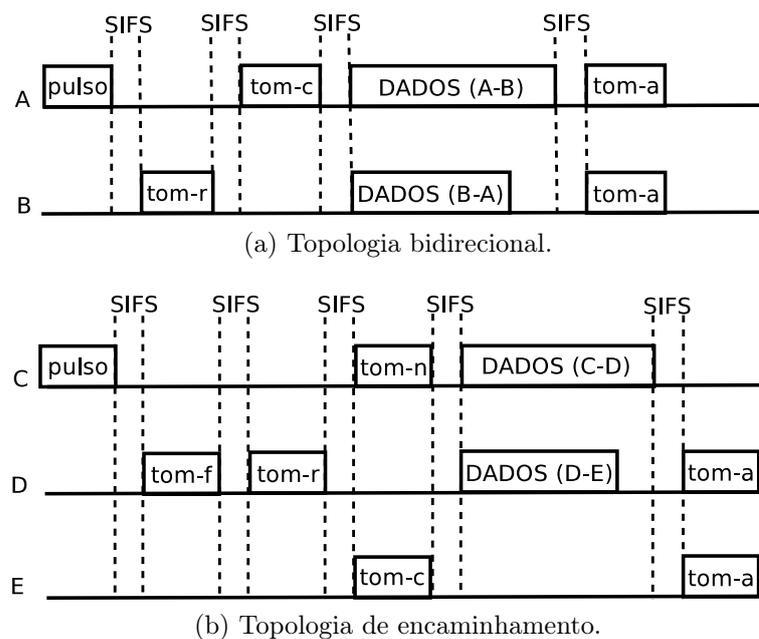


Figura 4.1: Exemplo de comunicações usando FDT-MAC.

A Figura 4.1a mostra um exemplo de comunicação com FDT-MAC em uma topologia bidirecional. Neste caso, considera-se que o nó *A* possui pacotes de dados para enviar ao nó *B*. Por sua vez, o nó *B* possui pacotes a serem enviados ao nó *A*. Assim, primeiramente, o nó *A* espera até que seu contador de *backoff* esteja com valor igual a zero, de modo similar ao preconizado pelo padrão IEEE 802.11. Então, o nó *A* transmite um sinal “pulso” ao nó *B*. O nó *B* ao receber o pulso “percebe” que o sinal é direcionado a ele e que é proveniente do nó *A*. Em seguida, o nó *B* responde com um sinal “tom resposta” (tom-r)

ao nó A . O “campo duração” do sinal tom-r é definido como sendo igual ao máximo valor dentre o recebido no pulso ($T_{DADOS(A,B)}$) e o calculado a partir do pacote de dados que o nó B tem para enviar ao nó A ($T_{DADOS(B,A)}$). Assim, a duração é definida como $\max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)})$, de maneira semelhante à proposta no FD-MAC [172]. De modo análogo, o nó A “confirma” que o sinal tom-r recebido é destinado a ele. Além disso, o nó A “confirma” que o sinal é proveniente de B . Logo, o nó A responde ao nó B um “tom de confirmação” (tom-c) com o “campo” duração sendo o valor máximo entre o recebido no tom-r ($T_{DADOS(B,A)}$) e o contido no pulso anteriormente enviado ($T_{DADOS(A,B)}$). Os nós vizinhos que escutarem os sinais pulso, tom-r e tom-c estarão cientes da comunicação em curso entre os nós A e B , sendo capazes de estabelecer seu NAV apropriadamente para prevenir colisões. Tendo sido concluída a reserva do canal, os nós A e B começarão a trocar pacotes de dados e sinais de “tom ACK” (tom-a), ao invés do pacote ACK tradicional.

A Figura 4.1b apresenta um exemplo de comunicação em uma topologia de encaminhamento. Neste exemplo, o nó C possui pacote de dados para enviar ao nó D . Por sua vez, o nó D possui pacotes de dados para o nó E . Inicialmente, o nó C envia um pulso para D . Neste momento, o nó D precisa responder ao nó C confirmando o recebimento do pulso. Além disso, o nó D deve também iniciar uma comunicação com E . Todavia, um sinal tom não pode ser “percebido” como sendo simultaneamente destinado aos nós C e E . Isso força o nó D a enviar primeiro um sinal “tom de encaminhamento” (tom-f) ao nó C e depois enviar um sinal tom-r ao nó E , conforme ilustrado na Figura 4.1b. O tom-f serve para avisar ao nó C que se trata de uma topologia de encaminhamento para que ele possa esperar até o momento apropriado para iniciar o envio do quadro de dados. O nó C então recebe o tom-f e espera até que o nó D estabeleça a comunicação com o nó E , enquanto o nó E responde ao nó D com um sinal tom-c. Neste momento, o nó C envia um “tom NAV” (tom-n) para que seus vizinhos se sincronizem sabendo que se trata de uma topologia de encaminhamento, adaptando assim seus contadores de NAV de acordo com a duração da comunicação.

Finalmente, os nós C , D e E trocam pacotes de dados e sinais tom-a prosseguindo normalmente sua comunicação. Para a topologia de encaminhamento, o “campo duração” dos sinais pulso, tom-f, tom-n, tom-r e tom-c é preenchido da mesma forma que fora explicado para a topologia bidirecional. Novamente, o NAV é corretamente estabelecido pelos nós vizinhos aos envolvidos na comunicação (C , D e E), de modo a prevenir colisões. Isso ocorre, pois aqueles nós escutam e decodificam os referidos sinais utilizando o processo que será descrito na Subseção 4.1.1. Embora sejam simultaneamente enviados (Figura 4.1b), os sinais tom-n e tom-c podem ser decodificados corretamente sem a percepção de colisão por qualquer nó que escute os dois simultaneamente. Para que isso aconteça, assume-se que os sinais tom-c e tom-n são enviados em diferentes canais não adjacentes da banda (*subcarriers*).

Diversos trabalhos relacionados a técnicas de controle de acesso ao meio projetadas para comunicações *full-duplex* recorrem a uma abordagem de disputa de acesso ao meio baseada na divisão de frequência, tais como os trabalhos apresentados em [3] [6] [96] [98]. Para tanto, os referidos trabalhos assumem que um nó que opera uma comunicação *full-duplex* é capaz de escutar e identificar sinais enviados simultaneamente em subfrequências distintas, sem a ocorrência de colisão e sem a necessidade de algum *hardware* adicional.

De modo mais preciso, conforme descrito por [137], sendo θ a quantidade total de canais, um sinal pulso e tom pode ser decodificado corretamente se um canal F_i ($0 \leq$

$i \leq \theta$) está tendo um sinal transmitido e seus canais adjacentes (F_{i-1} e F_{i+1}) estão livres. Considera-se então esta mesma premissa usada na literatura [3] [96] [98] [137] para acomodar os sinais tom-c e tom-n de modo apropriado. Como o padrão IEEE 802.11 possui $\theta = 48$ canais a serem usados para transmissão de dados em sua versão IEEE 802.11a/g [136], pode-se alocar os sinais tom-f, tom-r, tom-c, tom-a em um canal (e.g. F_7), enquanto o tom-n pode ser enviado em um canal não adjacente ao anterior (e.g. F_{18}). Assim, há correta decodificação dos sinais tom-c e tom-n enviados simultaneamente e o NAV é estabelecido corretamente.

É importante mencionar que o protocolo FD-MAC [172] não realiza essa confirmação para os vizinhos de C em topologias de encaminhamento, não estabelecendo completamente o NAV deles. Isso poderia ocasionar no FD-MAC uma colisão caso um dos vizinhos de C tentasse iniciar uma comunicação no momento em que o nó D envia o ACK para C . Essa possível colisão não é evitada pelo FD-MAC, conforme pode ser inferido da Figura 3.5a. Por sua vez, o FDT-MAC estabelece o NAV corretamente com o auxílio do sinal tom-n, evitando colisões na situação descrita.

Com relação ao segundo dos princípios do FDT-MAC, este tem por objetivo evitar o envio desnecessário de um sinal tom. Considere que $T_{DADOS(i,j)}$ denota o tempo a ser anunciado como duração da transmissão do pacote de i para j para efeitos de atualização de NAV. Se $T_{DADOS(A,B)} \geq T_{DADOS(B,A)}$, note que o tom-c enviado de A para B (ver Figura 4.1a) confirmando o “campo duração” como sendo $\max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)})$ é desnecessário, uma vez que nesse caso o valor do “campo” não será modificado, visto que $\max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)}) = T_{DADOS(A,B)}$. Ou seja, os vizinhos do nó A já conheciam esse valor de “campo duração” e tinham-no usado para atualizar seu NAV corretamente ao terem escutado o sinal pulso proveniente de A no início da comunicação. Logo, neste caso, o tom-c enviado de A para B pode ser suprimido sem prejuízos. Portanto, nestes casos, ao invés de transmitir tom-c, o nó A inicia o envio dos quadros de dados. Um exemplo da supressão de tom no FDT-MAC está ilustrado na Figura 4.2.

É importante mencionar que a supressão de tom economiza ainda um período de SIFS do tempo total da comunicação, melhorando assim a vazão total da rede como será discutido na Seção 4.2. Terminada a explicação dos princípios básicos do FDT-MAC, será apresentada a técnica de codificação de informações dos sinais para possibilitar a não utilização do cabeçalho MAC na reserva de canal.

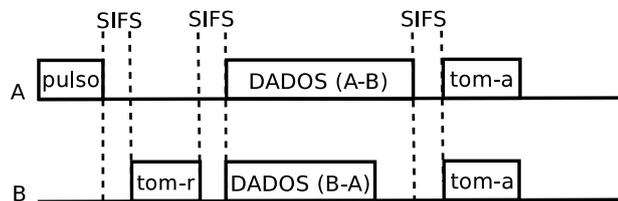


Figura 4.2: Exemplo da supressão de tom no FDT-MAC.

4.1.1 Codificando Informações de Cabeçalho

A codificação das principais informações contidas no cabeçalho da camada MAC nos sinais pulso e tom possui um papel primordial no funcionamento do FDT-MAC. Como já

destacado anteriormente, há três principais informações a serem codificadas: origem do sinal, destino do sinal e duração da comunicação. A duração da comunicação é codificada na duração do tempo de transmissão dos sinais pulso e tom. Esse tempo será denotado por T_p . Então, para o FDT-MAC:

$$T_p = 2 \cdot T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil, \quad (4.1)$$

onde P_{sz} representa o tamanho do pacote de dados em bytes e T_{sync} denota o tempo necessário de sincronização. Os sinais de pulso e tom podem ser percebidos em até $5\mu s$, conforme descrito em [140]. Portanto, considera-se que T_{sync} é igual a $5\mu s$. O fator multiplicador 2 para o T_{sync} na Eq. (4.1) se deve ao fato de que os sinais (pulso, tom-r, tom-c, tom-f e tom-n) são enviados com a potência máxima por $T_{sync} + \lceil \log_2 P_{sz} \rceil$ para atualização de NAV. Nos últimos T_{sync} , a potência é reduzida para o estritamente necessário para alcançar o destinatário, para possibilitar a detecção do destino do sinal, conforme será posteriormente explicado. Para o tom-a, considera-se que $T_p = T_{sync}$, pois é possível realizar o papel de confirmação de recebimento dos dados (ACK) com apenas um sinal, sem outras informações adicionais. Note que a informação de duração codificada em T_p é a mesma para os sinais pulso, tom-r, tom-c, tom-f e tom-n. Os sinais usados pelo FDT-MAC (pulso, tom-r, tom-c, tom-f, tom-n e tom-a) podem ser diferenciados entre eles por frequência, fase ou amplitude [93]. Logo, ao receber um sinal com duração T_p , um nó é capaz de prever a duração da comunicação que é análoga ao “campo duração” existente na camada MAC nos quadros de controle (RTS, CTS e FCTS).

Por sua vez, a origem e o destino do sinal são identificados com base em uma tabela que armazena a combinação da potência do sinal recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*) e do ângulo de chegada (AOA – *Angle of Arrival*). Como uma antena é capaz de ajustar a potência de transmissão de acordo com a distância do nó de destino, um nó percebe que um sinal não é direcionado a ele quando o RSSI é maior do que um limiar esperado [103]. Com relação à referida tabela, esta pode ser montada a partir das mensagens de difusão usadas pelos protocolos de roteamento e controle de acesso ao meio. É importante mencionar que estas mensagens são utilizadas periodicamente em comunicações sem fio com diversos fins [110]. Estas mensagens de difusão identificam os nós origem e destino explicitamente nos cabeçalhos da camada MAC e possibilitam que cada nó armazene informações relativas à combinação potência do sinal recebido e ângulo de chegada de cada vizinho. Isso torna viável a montagem apropriada da tabela previamente mencionada.

Vale ainda ressaltar que no FDT-MAC não se considera mobilidade dos nós. A mobilidade dos nós não será avaliada, da mesma forma que o FD-MAC [172] também não avalia, nem considera este fator. Como o FDT-MAC necessita da tabela com valores de AOA e RSSI de seus vizinhos, a mobilidade poderia fazer com que os valores desta tabela se tornassem inconsistentes. Essas inconsistências poderiam ser evitadas, caso se levasse em conta a operação do FDT-MAC em conjunto com um mecanismo de descoberta de vizinhança. Os mecanismos de descoberta de vizinhança podem tratar a mobilidade trocando informações periódicas com os demais nós [31] [119]. A partir de um mecanismo de descoberta de vizinhança, é possível manter uma tabela de AOA e RSSI consistente mesmo em cenários de mobilidade. Portanto, o FDT-MAC não se torna inviável com mobilidade, porém a avaliação do seu impacto na montagem da tabela de AOA e RSSI não será avaliada neste trabalho, podendo ser alvo de trabalhos futuros. No presente tra-

balho, assume-se que uma tabela de AOA e RSSI consistente fora previamente montada com base nas informações trocadas pelos protocolos de roteamento, uma vez que estes periodicamente usam mensagens de difusão para diversos fins [110].

É importante mencionar que o custo da montagem da tabela com os valores de AOA e RSSI não é levado em consideração nas análises de desempenho relacionadas ao FDT-MAC, uma vez que os mecanismos de roteamento e descoberta de vizinhança que poderiam prover as informações de AOA e RSSI não necessitam enviar nenhuma mensagem adicional para fornecer os insumos necessários para montagem da tabela em questão. Por sua vez, o custo de memória desta tabela é relativamente baixo, sendo $O(n)$, onde n denota o número de nós da rede.

Para que o FDT-MAC seja viável, é necessário que a identificação de origem e destino de sinal não leve comumente a erros de identificação, pois isso acarretaria diversos problemas. Com relação a isto é necessário uma melhor explicação do cenário nos quais as premissas descritas ocorrem. A precisão das estimativas de AOA e RSSI varia conforme o ambiente considerado, isto é, ambientes fechados (*indoor*) e abertos (*outdoor*) possuem diferentes precisões de estimativa de AOA e RSSI [31] [102]. Por exemplo, o estudo disponível em [102] realiza experimentos relativos à precisão de AOA nos dois ambientes, considerando a ausência de obstáculos. Obtém-se erro médio de estimativa de AOA menor do que 4° e 6° para ambientes externos e internos, respectivamente. Portanto, é necessário especificar qual o ambiente é considerado para operação do FDT-MAC nas avaliações apresentadas. No presente trabalho, considera-se que o FDT-MAC opera em ambientes internos sem obstáculos, de modo análogo ao assumido em experimentos descritos em [10] e [102]. Assim sendo, para atestar a viabilidade do FDT-MAC, será apresentada a seguir uma análise relacionada à probabilidade de falha do mecanismo de identificação de origem e destino do sinal, com base nas premissas discutidas.

4.1.2 Análise de Probabilidade de Falha por Erro de Identificação

Será realizada uma análise probabilística relacionada ao mecanismo proposto para identificação de origem e destino de sinais, com base na combinação entre potência e ângulo de chegada do sinal recebido. Para a análise em questão, considera-se as notações expressas na Tabela 4.1. Além disso, considera-se que o nó x possua ao menos dois vizinhos, denotados por y e z . A identificação de origem/destino do sinal presente no FDT-MAC falha se as seguintes inequações forem simultaneamente válidas:

$$|R(x,z) - R(x,y)| < \tau; \quad (4.2)$$

$$|A(x,y) - A(x,z)| < \epsilon. \quad (4.3)$$

Então, considerando que se tratam de eventos independentes no que tange à probabilidade, a análise consiste no cálculo da seguinte equação:

$$P_f = P(|R(x,z) - R(x,y)| < \tau) \cdot P(|A(x,y) - A(x,z)| < \epsilon). \quad (4.4)$$

Um exemplo do que foi explicado acerca das condições para falha do mecanismo será discutido com o auxílio da Figura 4.3. A figura em questão ilustra três diferentes áreas (A_1 , A_2 , A_3) da antena do nó x . De acordo com as expressões acima, a falha do mecanismo

Tabela 4.1: Notações usadas para análise de probabilidade de falha.

Símbolo	Significado
$\Delta(G)$	Grau máximo do grafo G que representa a topologia da rede.
ϵ	Precisão da medida de ângulo de chegada do sinal ($^\circ$).
τ	Precisão da medida de potência do sinal recebido (dB).
$A(a,b)$	Ângulo de chegada medido pelo nó a do sinal proveniente do nó b .
$g(x)$	Ganho de antena do nó x .
$h(x)$	Altura da antena do nó x .
$lo(x)$	Perda de sistema do nó x .
P_f	Probabilidade de falha no mecanismo de identificação da origem do sinal.
$pow(x)$	Potência de transmissão do nó x .
R_{Max}	Máxima potência do sinal (dB).
R_{Min}	Magnitude mínima de sinal detectável pela antena (dB).
$R(a,b)$	Potência de sinal recebida medida pelo nó a do sinal proveniente do nó b .
sh_{med}	<i>Shadowing</i> médio do meio de propagação.
w	Razão entre a velocidade de propagação do meio e a velocidade da luz.

ocorre quando mais de um nó (y e z) está em uma mesma área. Ou seja, neste caso, o nó x não seria capaz de distinguir corretamente se um sinal chegou do nó y ou do z . Isso ocorre pois as áreas (A_1, A_2, A_3) estão em setores circulares de até ϵ graus, além de neste caso valer que $|R(x,z) - R(x,y)| < \tau$. Assim, na situação citada, haveria problema nas comunicações entre x e y .

As probabilidades representadas pelas inequações presentes na Eq. (4.4) podem ser calculadas usando uma analogia com uma situação conhecida na literatura correlata à probabilidade como problema do aniversário [114]. O problema do aniversário consiste em calcular a probabilidade de pelo menos duas pessoas fazerem aniversário no mesmo dia do ano. Assim sendo, será explicada a analogia feita com tal problema. Se o número possível da quantidade de medidas de potência do sinal recebido (RSSI) fosse determinado em função de τ , este número poderia ser interpretado como a quantidade de dias do ano. Por sua vez, τ representaria um dia do ano em analogia com o problema do aniversário. Nota-se que de fato o número possível da quantidade de medidas de RSSI é uma função de τ , sendo igual a $\frac{R_{max}-R_{min}}{\tau}$. Um argumento similar pode ser aplicado ao ângulo de chegada do sinal. Todavia, espera-se que o ângulo de chegada do sinal possua uma distribuição uniforme, enquanto o mesmo não se aplica ao RSSI, conforme detalhado em [52]. Em [114], são apresentadas equações que permitem calcular a probabilidade de ocorrência do problema do aniversário nos casos de distribuição de probabilidade uniforme e não uniforme.

Para concluir a análise do mecanismo de identificação de origem e destino de sinal do FDT-MAC, foi feito o cálculo de P_f com base em valores presentes na literatura no que diz respeito à precisão das medidas de potência do sinal recebido e ângulo de chegada. No que concerne ao parâmetro ϵ , há estudos que alcançam a precisão de 6° para o ângulo de chegada em antenas omnidirecionais [102]. Com relação à medida da potência do sinal recebido, estudos indicam que foi alcançada precisão de até 0,1dB [10]. Assim,

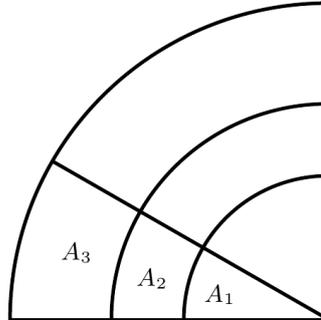


Figura 4.3: Exemplo de áreas na qual a existência de mais de um nó causa erro na identificação da origem do sinal.

Tabela 4.2: Parâmetros usados para o cálculo da probabilidade de falha.

Parâmetro	Transmissor	Receptor	Meio	Rede
pow	15 dBm	N/A	N/A	N/A
g	0 dB	0 dB	N/A	N/A
lo	1,4691 dB	1,4691 dB	N/A	N/A
h	1,5 m	1,5 m	N/A	N/A
R_{min}	-94 dBm	-94 dBm	N/A	N/A
R_{max}	0 dBm	0 dBm	N/A	N/A
sh_{med}	N/A	N/A	4 dB	N/A
w	N/A	N/A	0,125	N/A
$\Delta(G)$	N/A	N/A	N/A	5

assumindo estes valores ($\epsilon = 6$, $\tau = 0,1$), e que as características do meio e das antenas são aquelas descritas na Tabela 4.2, P_f possui valor menor do que $3 \cdot 10^{-3}$. Além disso, se for considerado que o FDT-MAC pode operar sobre um *array* de antenas direcionais operando em modo omnidirecional, a precisão da medida do ângulo de chegada alcança 1° [45] [87]. Neste caso ($\epsilon = 1$, $\tau = 0,1$), o valor de P_f é menor que $5 \cdot 10^{-4}$. Portanto, os resultados dos cálculos de probabilidade evidenciam que o mecanismo de identificação da origem e destino dos sinais no FDT-MAC possui uma probabilidade desprezível de erro. Isso torna então o FDT-MAC uma alternativa viável no contexto de comunicações *full-duplex* nos cenários em que suas premissas de operação são válidas, conforme discutido anteriormente. O impacto do FDT-MAC no referido contexto será avaliado na seção que se segue.

4.2 Resultados

Esta seção apresenta as avaliações realizadas sobre o impacto do FDT-MAC proposto na Seção 4.1. Estas avaliações mostram o impacto positivo da adoção do FDT-MAC. Para realizá-las, foram empregadas métricas e modelos comumente usados na literatura. Primeiramente, será apresentada uma estimativa de cota superior da vazão. Isto é feito considerando um cenário ideal, ou seja, um cenário sem colisões de modo a se obter a vazão máxima. Esta maneira de calcular a vazão, bem como sua relevância já foram anteriormente discutidas na Subseção 2.4.2.

Entretanto, a vazão máxima não oferece uma avaliação que leve em consideração o crescimento da janela de *backoff* por considerar um cenário sem colisões. Para obter uma estimativa da vazão em condições mais saturadas de tráfego, avaliou-se o FDT-MAC de acordo com a vazão de saturação. É importante mencionar que tal métrica foi explicada na Seção 2.4. Entretanto, o modelo apresentado na referida seção foi projetado para avaliar protocolos que façam uso apenas de comunicações *half-duplex*. Portanto, algumas pequenas modificações foram realizadas no modelo para estendê-lo ao cenário de comunicações *full-duplex*, conforme será detalhado na Subseção 4.2.2.

Portanto, o FDT-MAC foi avaliado segundo as duas métricas explicadas de modo a englobar cenários variados no que diz respeito ao tráfego de dados. Além disso, avaliou-se o impacto da auto-interferência em protocolos que utilizam comunicações *full-duplex*, mostrando que o FDT-MAC consegue lidar melhor com a auto-interferência do que um protocolo do estado da arte relacionado a comunicações *full-duplex*. Avaliou-se ainda o impacto da supressão de tom no FDT-MAC. Para as análises apresentadas a seguir, a supressão de tom só é considerada quando explicitamente mencionada. Considerou-se também o atraso de propagação como desprezível nos cenários avaliados. As avaliações foram feitas para o FDT-MAC, para o FD-MAC e também para o protocolo IEEE 802.11 operando em modo *half-duplex*. Este último será denominado HD-MAC na apresentação dos resultados. Com relação ao HD-MAC, é importante mencionar que considerou-se os valores de parâmetros para camada física definidos nos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. Esses valores foram os considerados por serem os utilizados nos modelos de avaliação disponíveis em [19] e [67], além de serem os usados como base de comparação por vários artigos da área, tais como os disponíveis em [27] e [172].

Por fim, é importante mencionar que todas as avaliações presentes neste trabalho consideram que todos os enlaces das topologias bidirecionais e de encaminhamento possuem

a taxa de transmissão indicada na avaliação. Por exemplo, em uma topologia bidirecional entre dois nós A e B , quando se considera que a taxa de transmissão é igual a 11 Mbps, este valor vale tanto para os quadros enviados de A para B , quanto para os enviados de B para A .

4.2.1 Vazão Máxima Teórica

A seguir, será apresentado o cálculo da vazão máxima teórica (S_{max}). A notação usada para este cálculo é a mesma definida na explicação do modelo, disponível na Subseção 2.4.2. Este cálculo é baseado no que foi explicado na referida subseção e também na definição original [67]:

$$S_{max} = \frac{8 \cdot P_{sz}}{T_t}, \quad (4.5)$$

onde P_{sz} denota o tamanho do pacote de dados e T_t denota o tempo total de transmissão. Neste cálculo, como o FDT-MAC e o FD-MAC operam em modo *full-duplex*, considera-se para eles o P_{sz} como sendo o dobro do considerado para o HD-MAC. Além disso, T_t possui diferentes definições para HD-MAC, FD-MAC e FDT-MAC:

$$T_t = \begin{cases} L, & \text{para HD-MAC,} \\ L + T_{CT} + T_{SF}, & \text{para FD-MAC,} \\ L_{tom}, & \text{para FDT-MAC,} \end{cases} \quad (4.6)$$

onde

$$L = T_{RT} + T_{CT} + T_{DADOS} + T_{ACK} + T_B + T_{DF} + 3 \cdot T_{SF}, \quad (4.7)$$

$$L_{tom} = 9/2 \cdot T_p + T_{DADOS} + T_B + T_{DF} + 9/2 \cdot T_{SF}. \quad (4.8)$$

É importante mencionar que as equações acima já foram utilizadas para o HD-MAC, conforme apresentado na Subseção 2.4.2. Na referida subseção, são apresentados os valores de constantes relacionadas aos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b, conforme Tabela 2.2. Estas constantes foram utilizadas nas avaliações, de modo que de acordo com a técnica de espalhamento espectral, se utilize o padrão correspondente. Para OFDM, considera-se os parâmetros do padrão IEEE 802.11a, enquanto que para as demais (DSSS e HR-DSSS), considera-se os parâmetros do padrão IEEE 802.11b. O tamanho de pacote e a taxa de transmissão do canal também foram variados. As diversas combinações destes parâmetros estão disponíveis na Tabela 4.3.

Com relação à Eq. (4.8), o fator $9/2$ que multiplica T_p e T_{SIFS} refere-se à quantidade média de sinais que serão enviados em uma comunicação. Neste cálculo, foi considerado que as topologias bidirecionais e de encaminhamento são equiprováveis, o que influencia o valor de T_t . Nas topologias bidirecionais, há 4 sinais sendo enviados, enquanto que nas de encaminhamento há 5, conforme pode-se observar na Figura 4.1. Portanto, neste caso, o valor médio de sinais pulso enviados é de $9/2$. Também foi considerado que todas as comunicações possuem o mesmo tamanho de pacote de dados.

O resultado do cálculo comparando as técnicas de controle de acesso ao meio se encontra disponível na Tabela 4.3. Observando a Tabela 4.3, nota-se que o FDT-MAC pode

prover significativa melhoria de vazão. A referida melhoria alcançou até 217,81% e até 82,68% em relação ao HD-MAC e ao FD-MAC, respectivamente. Verifica-se ainda que o FDT-MAC obteve melhor resultado que o FD-MAC em todos os cenários avaliados, uma vez que $L_{tom} \leq L + T_{CT} + T_{SF}$ vale para todos os casos avaliados. O ganho do FDT-MAC é maior quando a reserva de canal constitui uma maior porção do tempo total de transmissão, pois T_{DADOS} não difere entre FD-MAC e FDT-MAC. É também notável que o FDT-MAC supera o HD-MAC em mais de 100% na maioria dos casos. Isso significa que o FDT-MAC consegue explorar a vantagem teórica do uso de comunicações *full-duplex*, visto que espera-se que comunicações deste tipo provenham vazão duas vezes maior do que quando utiliza-se comunicações *half-duplex*. Entretanto, conforme explicado anteriormente, a métrica da vazão máxima não leva em consideração as perdas decorrentes de colisões. Portanto, a seguir será apresentada uma avaliação que considere as referidas perdas.

Tabela 4.3: Vazão máxima para diversos protocolos.

Técnica	R_c (Mbps)	P_{sz} (bytes)	FDT-MAC	HD-MAC	Ganho (%)	FD-MAC	Ganho (%)
			S_{max} (Mbps)	S_{max} (Mbps)		S_{max} (Mbps)	
DSSS	1	256	1,37	0,53	158,49	0,98	39,80
		512	1,63	0,69	136,23	1,32	23,49
		1024	1,79	0,82	118,29	1,59	12,58
	2	256	2,24	0,82	173,17	1,48	51,35
		512	2,87	1,16	147,41	2,16	32,87
		1024	3,34	1,47	127,21	2,81	18,86
HR-DSSS	11	256	4,64	1,46	217,81	2,54	82,68
		512	7,67	2,58	197,29	4,55	68,57
		1024	11,37	4,18	172,01	7,54	50,80
OFDM	6	256	6,27	2,92	114,73	5,38	16,54
		512	8,25	3,93	109,92	7,44	10,89
		1024	9,77	4,75	105,68	9,18	6,43
	12	256	8,89	4,40	102,05	7,98	11,40
		512	12,94	6,43	101,24	11,95	8,28
		1024	16,84	8,38	100,95	15,98	5,38
	54	256	13,11	7,17	82,85	12,58	4,21
		512	23,24	12,58	84,74	22,41	3,70
		1024	38,24	20,40	87,45	37,11	3,05

4.2.2 Vazão de Saturação

Para avaliar o impacto do crescimento do *backoff* decorrente de colisões na vazão do FDT-MAC, FD-MAC e HD-MAC, será utilizado o modelo da literatura proposto por Bianchi [19]. Explicado em detalhes na Seção 2.4, o modelo em questão calcula a vazão de saturação para comunicações *half-duplex*. Entretanto, este modelo também é apropriado para técnicas MAC que se baseiam em comunicações *full-duplex*, pois o modelo se baseia no fato de que uma transmissão tem sucesso se somente um dos contadores de *backoff* dos

nós atingir zero em um dado instante de tempo. Como esta condição é também válida para comunicações *full-duplex* usando FD-MAC ou FDT-MAC, o modelo em questão é viável para avaliar técnicas MAC que operam com comunicações dos dois tipos, conforme é feito nos trabalhos [27] [172]. Conforme explicado em detalhes na Seção 2.4, segundo o modelo de Bianchi [19], a definição matemática da vazão de saturação (S) é tal que

$$S = (p_s \cdot p_{tr} \cdot P_{sz}) / T_{slotavg}, \quad (4.9)$$

onde

$$T_{slotavg} = T_{slot} \cdot (1 - p_{tr}) + p_{tr} \cdot p_s \cdot T_s + p_{tr} \cdot (1 - p_s) \cdot T_c, \quad (4.10)$$

$$T_s = T_t - T_B, \quad (4.11)$$

$$T_c = T_{RT} + T_{DF}, \quad (4.12)$$

T_t está definido na Eq. (4.6), T_B denota o tempo de *backoff* além de se considerar a mesma notação descrita na Seção 2.4. É importante lembrar que o FDT-MAC usa sinais pulso e tom, ao invés de quadros (RTS, CTS ou FCTS). Portanto, para o FDT-MAC, o tempo gasto com colisão (T_c) é diferente. No FDT-MAC, $T_c = T_p + T_{DF}$, onde T_p é o tempo gasto com a transmissão de um sinal pulso.

Apenas mais uma mudança na Eq. (4.9) é necessária para englobar também o caso em que ocorrem comunicações *full-duplex*. Quando uma comunicação tem sucesso, o tamanho total de dados transmitidos (P_{sz}) deve ser a soma do tamanho dos pacotes das duas comunicações em andamento. Essa mudança se deve ao fato de que podem haver dados sendo transmitidos de A para B e de B para C ao se iniciar uma mesma comunicação. É importante mencionar que em topologias bidirecionais o nó C será o nó A enquanto que na de encaminhamento de fato o nó C será um nó diferente de A . Portanto, para todos os resultados apresentados neste trabalho, a vazão de saturação é definida da seguinte forma:

$$S = (p_s \cdot p_{tr} \cdot P_{szexp}) / T_{slotavg}, \quad (4.13)$$

$$P_{szexp} = P_{sz}^{ab} + P_{sz}^{bc}, \quad (4.14)$$

onde P_{sz}^{ij} denota o tamanho do pacote de dados proveniente do nó i para o nó j .

A partir das Eqs. (4.13) e (4.14), calculou-se a vazão de saturação para diversas quantidades de nós utilizando as técnicas HD-MAC, FD-MAC e FDT-MAC. Para este cálculo, os parâmetros utilizados foram os disponíveis na Tabela 4.4, uma vez que são os mesmos parâmetros usados em [27] [172]. O tamanho dos cabeçalhos das camadas MAC e física bem como os parâmetros da janela de *backoff* são os mesmos definidos no padrão IEEE 802.11b. A comparação do FDT-MAC com o FD-MAC e HD-MAC se encontra ilustrada na Figura 4.4.

Observa-se que o FDT-MAC supera o FD-MAC e o HD-MAC em até 149% e 397%, respectivamente, em termos de vazão de saturação. Tais ganhos são obtidos quando a quantidade de nós é igual a mil. Note que o ganho do FDT-MAC aumenta à medida que o número de nós aumenta, pois o FDT-MAC possui uma reserva de canal que consome menos tempo. Isso acaba se tornando crítico em ambientes mais saturados, fazendo com que o FDT-MAC seja capaz de lidar melhor com isso que o FD-MAC e o HD-MAC.

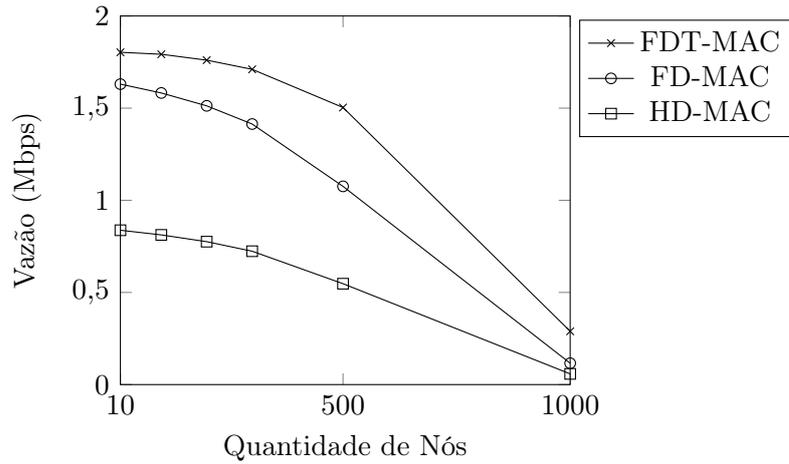


Figura 4.4: Vazão de saturação para as técnicas avaliadas.

Tabela 4.4: Parâmetros usados no cálculo para avaliação por vazão de saturação.

Parâmetro	Valor
R_c (para todas transmissões)	1 Mbps
P_{sz}^{ij} ($\forall i, j$)	8184 bits
T_{DF}	128 μs
T_{SF}	28 μs

Relembre ainda que T_c para o FDT-MAC é menor do que para os outros dois protocolos, visto que $T_p < T_{RT}$. Isso ocorre já que se leva menos tempo para transmitir um sinal pulso do que o quadro de RTS, pois o último possui cabeçalho. Nota-se ainda que o FDT-MAC aproveita a vantagem teórica do uso de antenas *full-duplex*, visto que supera o HD-MAC em mais de 100% em todos os casos avaliados. É importante mencionar que nesta avaliação se considerou que $P_{sz} = 8184$ bits e $R_c = 1$ Mbps, ou seja, o tempo gasto efetivamente transmitindo o pacote de dados (T_{DADOS}) constitui grande parte do tempo total de transmissão. Se um tamanho de pacote menor e/ou uma taxa de transmissão maior fossem considerados, o ganho proporcional do FDT-MAC seria ainda maior, pois neste caso o tempo gasto com a reserva de canal teria um impacto ainda maior sobre a vazão.

Nota-se ainda que para quantidade de nós igual a dez, a vazão de saturação alcança valores próximos daqueles da vazão máxima apresentados na Tabela 4.3. Além disso, quando o número de nós aumenta, a vazão de saturação cai drasticamente para as três técnicas avaliadas (FDT-MAC, FD-MAC e HD-MAC). Isso é explicado pelo fato de que quando se aumenta a quantidade de nós, espera-se que ocorram mais colisões, e que o tempo médio de *backoff* cresça. Logo, a vazão acaba sendo impactada por este crescimento do tempo médio despendido com *backoff*.

Além disso, comparou-se ainda a vazão de saturação calculada para o HD-MAC e o FD-MAC com os valores originais contidos no artigos que propõem o modelo de Bianchi [19] e o protocolo FD-MAC [27]. Essa comparação é realizada para mostrar a consistência dos

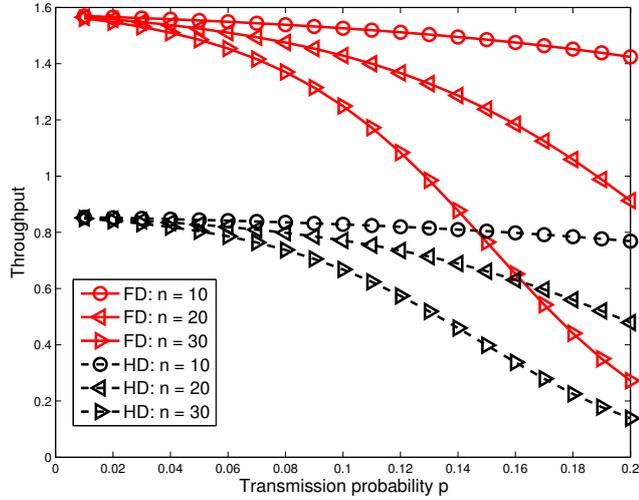


Figura 4.5: Valores originais da vazão de saturação para FD-MAC e HD-MAC extraídos de [27].

cálculos apresentados no presente trabalho, visto que será mostrado que os cálculos deste trabalho são bastante próximos aos originais contidos em [19] e em [27]. Essa validação é fundamental para atestar que de fato o FDT-MAC possui ganhos em relação aos demais esquemas em termos de vazão de saturação, visto que os resultados apresentados são sólidos e consistentes como será mostrado a seguir.

A Figura 4.5 ilustra os valores originais de vazão de saturação calculados para o FD-MAC e para o HD-MAC, conforme extraído de [27]. Note que estes valores são bastante semelhantes aos calculados nesta seção (Figura 4.4). Entretanto, nos resultados originais, o gráfico é vazão versus probabilidade p , ao invés de ser versus número de nós. O valor n ilustrado na Figura 4.5 denota o número de nós e a probabilidade p tem o mesmo significado que $\sigma = 1 - \sqrt[n]{1 - p_{tr}}$, onde p_{tr} é o usado na Eq. (4.9). Um exemplo mais claro da comparação é apresentado a seguir. Nos cálculos do presente trabalho, para $n = 10$, p_{tr} é igual a 0,32 e $\sigma = 0,038$. Nota-se que os valores da vazão de saturação para $p = 0,038$ na Figura 4.5 são muito próximos aos apresentados na Figura 4.4 para $n = 10$. Em ambas as figuras, observa-se que a vazão de saturação para o HD-MAC é ligeiramente superior a 0,8 Mbps, enquanto para o FD-MAC a vazão de saturação quase alcança 1,6 Mbps. Assim, validou-se os cálculos realizados nesta seção com os apresentados em [27].

Ademais, será comparado ainda o valor de vazão de saturação calculado no presente trabalho com o originalmente calculado por Bianchi em [19]. O resultado dos cálculos originais estão ilustrados na Figura 4.6. Todavia, o gráfico da vazão de saturação está em função de τ ao invés de estar em função do número de nós. É importante mencionar que a definição matemática de τ é equivalente a $\tau = 1 - \sqrt[n]{1 - p_{tr}}$, conforme explicado em [19]. Para realizar a comparação, lembra-se que para $n = 10$, $\tau = 0,038$. Além disso, observa-se que o valor da vazão de saturação para $\tau = 0,038$ (curva $n = 10$) na Figura 4.6 é ligeiramente superior a 0,8 o que é bastante próximo do apresentado na Figura 4.4,

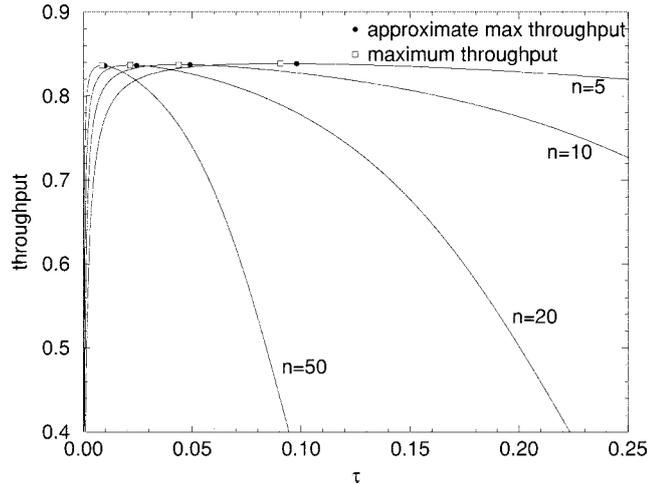


Figura 4.6: Valores originais da vazão de saturação para o HD-MAC extraídos de [19].

onde a vazão de saturação é igual a 0,83 Mbps. Assim, mostrou-se novamente a solidez dos cálculos apresentados neste trabalho relacionados à vazão de saturação, uma vez que validou-se o modelo com os trabalhos originais disponíveis em [19] e [27]. A seguir, será apresentada uma avaliação do impacto da auto-interferência na vazão de saturação com base no modelo discutido e validado nesta subseção.

4.2.3 Impacto da Auto-interferência

Conforme mencionado na Seção 3.1, a auto-interferência pode reduzir drasticamente o desempenho de uma rede que utilize comunicações *full-duplex*. Com o objetivo de avaliar este impacto, foram feitas avaliações com FD-MAC e FDT-MAC, para verificar como estes se comportam sob diferentes níveis de auto-interferência. Esta análise não abrange o HD-MAC, pois ele não sofre auto-interferência por se basear em comunicações *half-duplex* como explicado na Seção 3.1. A avaliação corrente denota por K ($0 \leq K \leq 1$) o fator de atenuação da auto-interferência. Tal fator denota a probabilidade de que uma comunicação não sofra os efeitos da auto-interferência em cenários onde ocorre transmissão e recepção simultânea de sinais [172]. A análise apresentada considera apenas cenários saturados onde é possível avaliar o impacto do crescimento da janela de *backoff* devido a colisões e perdas por auto-interferência.

Para conduzir a avaliação em termos de vazão de saturação, foi necessário novamente fazer uma pequena adaptação à Eq. (4.14), para considerar o impacto de K no modelo de Bianchi [19]. Portanto, para a análise do impacto da auto-interferência, a Eq. (4.14) é substituída pela seguinte:

$$P_{szeap} = 2 \cdot (\beta \cdot K \cdot (P_{sz}^{ab} + P_{sz}^{bc}) + (1 - \beta) \cdot K^2 \cdot (P_{sz}^{ab} + P_{sz}^{ba})), \quad (4.15)$$

onde β ($0 \leq \beta \leq 1$) denota a proporção de ocorrências de topologias de encaminhamento nas comunicações *full-duplex* estabelecidas. É importante mencionar que a topologia bidirecional é mais impactada pela auto-interferência por possuir dois nós afetados pela auto-interferência, enquanto a de encaminhamento possui apenas um nó afetado pela

auto-interferência [172]. Por isso, na Eq. (4.15), a quantidade de dados trocados em uma comunicação com topologia bidirecional é multiplicada por um fator K^2 , uma vez que há a perda da auto-interferência nos dois nós envolvidos na comunicação. Por sua vez, em uma topologia de encaminhamento, a quantidade de dados trocados em topologias de encaminhamento é multiplicada por K , pois apenas um dos nós é afetado pela auto-interferência, neste caso. Dessa forma, é realizada uma média ponderada entre os dois tipos de comunicação, de acordo com o valor de β . Para tal, considerou-se nesta avaliação que as topologias bidirecional e de encaminhamento são equiprováveis, ou seja, $\beta = 0,5$. Os demais parâmetros utilizados nesta avaliação são os mesmos apresentados na Tabela 4.4.

Assim, foi possível obter resultados que permitam mensurar o impacto de K para o FDT-MAC e para o FD-MAC. Estes resultados estão disponíveis na Tabela 4.5. Os resultados mostram que quando K diminui, a vazão de saturação do FDT-MAC e do FD-MAC diminuem drasticamente. Além disso, os resultados indicam que o FDT-MAC possui maior vazão de saturação que o FD-MAC em todas as situações avaliadas, chegando a um ganho de até 216% (cenário com 1000 nós e $K = 0,75$). É importante mencionar que quanto maior o número de nós, maior é o ganho percentual do FDT-MAC sobre o FD-MAC. O referido ganho também aumenta quando K diminui. Estes comportamentos ocorrem por mais colisões serem esperadas nestas circunstâncias (K menor e/ou aumento na quantidade de nós). Neste caso, fica evidente que um processo eficiente e rápido de reserva de canal se torna ainda mais crítico, confirmando o impacto positivo do FDT-MAC. Encerrada a avaliação do impacto da auto-interferência, será apresentada a avaliação dos efeitos da supressão de tom no FDT-MAC.

4.2.4 Supressão de Tom

Conforme explicado na Seção 4.1, o FDT-MAC realiza a supressão do tom em algumas situações em que este tom extra é desnecessário. A seguir, será avaliado o impacto da supressão deste tom em termos de vazão. É importante lembrar que P_{sz}^{ij} denota o tamanho do pacote de dados proveniente do nó i para o nó j . Para avaliar o impacto da supressão de tom, os seguintes cenários são considerados:

- I) $P_{sz}^{AB} = P_{sz}^{BA} = 256$ bytes;
- II) $P_{sz}^{AB} = 512$ bytes, $P_{sz}^{BA} = 256$ bytes;
- III) $P_{sz}^{AB} = 1024$ bytes, $P_{sz}^{BA} = 512$ bytes.

Estes cenários foram avaliados em termos da vazão máxima (S_{max}) e da vazão de saturação (S). Assim, os resultados englobam desde situações sem colisão até situações com tráfego intenso de dados. Além disso, considerou-se que todas as topologias formadas são bidirecionais ($\beta = 0$). Devido a este comportamento e ao fato de se assumir que para todas as comunicações nos cenários listados ocorre a supressão de tom, a equação que define o tempo total de uma transmissão usando FDT-MAC (L_{tom}) pode ser modificada. Como o sinal tom-c enviado pelo nó A é suprimido (Figura 4.2), L_{tom} é definido como:

$$L_{tom} = 3 \cdot T_p + T_{DADOS} + T_B + T_{DF} + 3 \cdot T_{SF}. \quad (4.16)$$

Tabela 4.5: Impacto da auto-interferência na vazão de saturação.

K	Número de Nós	FDT-MAC	FD-MAC	Ganho (%)
		S_{max} (Mbps)	S_{max} (Mbps)	
1	10	1,80	1,63	10,43
	100	1,79	1,58	13,29
	200	1,76	1,51	16,56
	300	1,71	1,41	21,28
	500	1,50	1,08	38,89
	1000	0,29	0,12	141,67
0,95	10	1,67	1,51	10,60
	100	1,66	1,46	13,70
	200	1,63	1,39	17,27
	300	1,58	1,30	21,54
	500	1,39	0,98	41,84
	1000	0,27	0,10	170,00
0,9	10	1,54	1,38	11,59
	100	1,53	1,34	14,18
	200	1,51	1,27	18,90
	300	1,46	1,18	23,73
	500	1,29	0,88	46,59
	1000	0,25	0,09	177,78
0,85	10	1,42	1,27	11,81
	100	1,41	1,22	15,57
	200	1,38	1,16	18,97
	300	1,34	1,08	24,07
	500	1,18	0,79	49,37
	1000	0,23	0,08	187,50
0,8	10	1,30	1,16	12,07
	100	1,29	1,11	16,22
	200	1,27	1,05	20,95
	300	1,23	0,97	26,80
	500	1,08	0,71	52,11
	1000	0,21	0,07	200,00
0,75	10	1,18	1,05	12,38
	100	1,18	1,01	16,83
	200	1,16	0,95	22,11
	300	1,12	0,87	28,74
	500	0,99	0,63	57,14
	1000	0,19	0,06	216,67

Tabela 4.6: Resultados de vazão máxima com supressão de tom para o FDT-MAC.

Técnica	R_c (Mbps)	Cenário	FDT-MAC	FD-MAC	Ganho (%)
			S_{max} (Mbps)	S_{max} (Mbps)	
DSSS	1	I	1,39	0,98	41,84
		II	1,23	0,99	24,24
		III	1,35	1,19	13,44
	2	I	2,30	1,48	55,41
		II	2,19	1,62	35,19
		III	2,53	2,10	20,48
HR-DSSS	11	I	4,90	2,54	92,91
		II	6,01	3,41	76,25
		III	8,81	5,66	55,65
OFDM	6	I	6,80	5,38	26,39
		II	6,52	5,58	16,84
		III	7,55	6,88	9,73
	12	I	10,05	7,98	25,93
		II	10,60	8,96	18,30
		III	13,36	11,98	11,52
	54	I	15,91	12,58	26,47
		II	20,65	16,81	22,84
		III	32,90	27,83	18,22

Então, S_{max} foi calculado com o auxílio das Eqs. (4.5) e (4.16). Os resultados destes cálculos estão exibidos na Tabela 4.6. Os resultados apontam uma vazão maior para o FDT-MAC em todos os casos. O ganho de vazão é de pelo menos 9% chegando a ser de até 92% nos cenários avaliados. Note que os resultados do FDT-MAC para o cenário I ($P_{sz}^{AB} = P_{sz}^{BA} = 256$ bytes) podem ser comparados ao S_{max} calculado para o FDT-MAC sem considerar a supressão de tom (Tabela 4.3). Esta comparação é apresentada na Tabela 4.7 comparando o FDT-MAC com supressão de tom com o FDT-MAC sem ela. Observando a Tabela 4.7, infere-se que a utilização da supressão de tom no FDT-MAC aumenta sua vazão em até 21%. Além disso, é notável que para OFDM (usada pelo padrão IEEE 802.11a) o impacto da supressão de tom é significativamente maior. Portanto, conclui-se que a supressão de tom possui um papel importante no FDT-MAC, uma vez que esta permite uma reserva de canal mais rápida em algumas situações, conforme descrito na Seção 4.1.

Além disso, a supressão de tom foi também avaliada em termos da vazão de saturação definida por Bianchi [19]. Com o auxílio das Eqs. (4.13) e (4.16), calculou-se a vazão de saturação (S) para diferentes quantidades de nós (10, 20, 30, 40, 50) considerando o uso das técnicas FD-MAC e FDT-MAC. Esta comparação foi realizada usando os valores de parâmetros para a camada física definidos nos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. O tamanho dos cabeçalhos e os parâmetros relacionados a *backoff* são os mesmos definidos nos referidos padrões. Alguns destes parâmetros estão inclusive descritos na Tabela 2.2. Maiores detalhes e explicações sobre estes parâmetros estão disponíveis nos padrões [63]. Com relação à análise que considera o esquema de camada física do IEEE 802.11b, utilizou-se a taxa de transmissão do canal igual a 11 Mbps. Por sua vez, quando a avaliação é relacionada ao esquema de camada física do IEEE 802.11a, considerou-se

Tabela 4.7: Comparação da vazão máxima obtida pelo FDT-MAC com supressão de tom e sem supressão de tom.

	R_c (Mbps)	Supressão de Tom		Ganho (%)
		Sim	Não	
Técnica		S_{max} (Mbps)	S_{max} (Mbps)	
DSSS	1	1,39	1,37	1,45
	2	2,30	2,24	2,68
HR-DSSS	11	4,90	4,64	5,60
OFDM	6	6,80	6,27	8,45
	12	10,05	8,89	13,05
	54	15,91	13,11	21,36

a taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps. Os valores de taxa de transmissão de canal assumidos são os maiores obtidos com os padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b, como explicado na Seção 2.3. Os tamanhos dos dados foram os descritos nos cenários (I, II, III) previamente mencionados.

Os resultados considerando os parâmetros de camada física do IEEE 802.11a e do IEEE 802.11b estão apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente. Os três cenários de variação de pacote de dados estão contidos em cada uma destas figuras. Os identificadores dos cenários estão contidos nas legendas das figuras logo após o nome da técnica de controle de acesso ao meio considerada. Em todos os três cenários, nota-se que o FDT-MAC obteve vazão de saturação significativamente superior ao FD-MAC. O ganho variou de 19% até 33% quando considerou-se os parâmetros de camada física do IEEE 802.11a. Quando se considerou os do IEEE 802.11b, o ganho do FDT-MAC variou de 40% a 78%. Um mecanismo rápido de reserva de canal é altamente desejável, em especial em ambientes de tráfego saturado como o considerado na análise apresentada. De fato, as análises descritas indicam que o FDT-MAC combinado com a supressão de tom é capaz de reservar o canal dependendo significativamente menos tempo que o FD-MAC. Conseqüentemente, o FDT-MAC combinado com a supressão de tom leva a melhorias em termos de vazão máxima e vazão de saturação, conforme apontado na Tabela 4.6 e nas Figuras 4.7 e 4.8.

4.3 Discussão

Este capítulo apresentou uma proposta de técnica que possibilita melhoria no processo de reserva de canal quando se opera utilizando comunicações *full-duplex*. Tal técnica é denominada FDT-MAC. Primeiramente, na Seção 4.1, a técnica em questão foi apresentada em detalhes e seus princípios básicos foram explicados. Foi ainda exposta uma análise acerca da probabilidade de falha introduzida pela utilização dos sinais da camada física para identificação de informações contidas em campos do cabeçalho da camada de controle de acesso ao meio. A análise realizada permite concluir que a probabilidade de falha é quase desprezível. É importante mencionar que a análise foi feita levando em conta condições razoáveis de precisão de medidas de potência do sinal recebido e ângulo de chegada do sinal, conforme as descritas na literatura [10] [45] [87] [102].

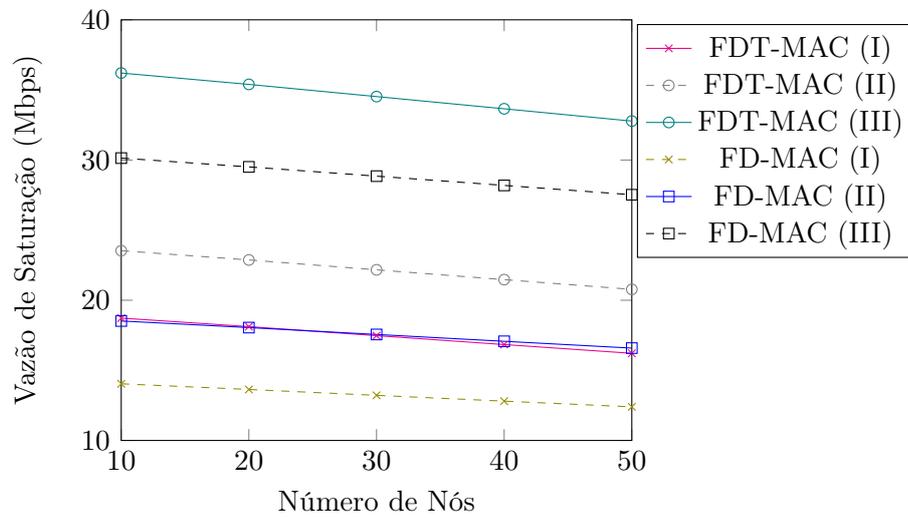


Figura 4.7: Impacto da supressão de tom na vazão de saturação para IEEE 802.11a e taxa de transmissão igual a 54 Mbps.

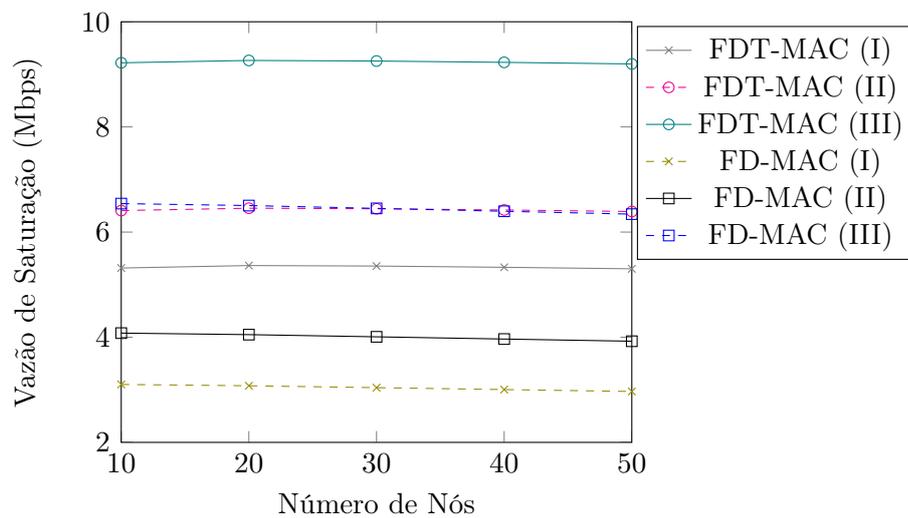


Figura 4.8: Impacto da supressão de tom na vazão de saturação para IEEE 802.11b e taxa de transmissão igual a 11 Mbps.

O FDT-MAC foi avaliado usando como base o protocolo FD-MAC que é bastante considerado na literatura correlata a técnicas de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*, conforme explicado no Capítulo 3. Além disso, utiliza-se o padrão IEEE 802.11 como base de comparação para verificar se o potencial de dobrar a vazão em comunicações *full-duplex* está sendo explorado apropriadamente pelo FDT-MAC. As avaliações sob diversos aspectos e métricas indicaram resultados promissores que conferem um potencial e relevância interessantes ao FDT-MAC. A proposta e avaliação do FDT-MAC descritas neste capítulo resultaram na publicação de dois artigos de conferência indicados em [48] (Qualis – B1) e [51] (Qualis – B2).

Contudo, seria interessante avaliar uma definição mais flexível do tempo de duração da transmissão dos dados (T_{DADOS}), ao invés de sempre considerar a definição original, ou seja, $T_{DADOS} = \max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)})$. Em situações em que um dos dois tempos envolvidos no cálculo seja muito maior que o outro, pode haver grande ociosidade. É importante mencionar que este problema não é introduzido pelo FDT-MAC, mas já existe no FD-MAC e em diversos outros protocolos mencionados na revisão do estado da arte no Capítulo 3. Em situações deste tipo, pode ser interessante a divisão deste tempo maior em mais de uma comunicação para evitar uma longa espera do nó que possui o menor tempo. Nesses casos, utilizando uma política apropriada de agendamento de comunicações, espera-se conseguir uma melhoria na vazão total da rede, uma vez que as comunicações melhor organizadas evitariam longos ciclos ociosos nos nós da rede. Assim sendo, uma proposta neste contexto será exposta no capítulo que se segue.

Capítulo 5

Modo Uniforme do Tamanho dos Dados em Comunicações *Full-duplex*

Este capítulo dá continuidade à apresentação de resultados relacionados a melhorias no controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*, iniciada no Capítulo 4. Em especial, será analisado o impacto do tamanho dos pacotes em comunicações *full-duplex*, por meio da proposta de um mecanismo que tem por objetivo reduzir a ociosidade do canal. Com isso, espera-se a obtenção de melhorias no que tange à vazão, bem como à utilização do espectro. Primeiramente, tal mecanismo será apresentado mostrando sua motivação, vantagens e desvantagens. Em seguida, será feita uma análise do impacto de tal mecanismo, acoplando-o ao FDT-MAC já explicado no Capítulo 4. Por fim, será realizada uma discussão abrangendo o que de mais relevante será visto ao longo deste capítulo. Tal discussão apontará também direções para trabalhos futuros.

5.1 Redução de Ociosidade do FDT-MAC

Conforme explicado no Capítulo 4, algumas técnicas de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* dão suporte à utilização de dois fluxos simultâneos com tamanhos de pacotes de dados distintos. Por exemplo, dois nós A e B podem estabelecer uma topologia bidirecional, onde o nó A possui pacote de 512 bytes para o nó B . Por sua vez, o nó B possui pacotes de 256 bytes para o nó A . Utilizando uma técnica de controle de acesso ao meio como o FD-MAC [172] ou o FDT-MAC, para efeitos de sincronismo, determina-se que o tempo gasto transmitindo dados será definido pelo tempo gasto para transmitir o maior dos pacotes. Ou seja, tem-se que:

$$T_{DADOS} = \max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)}), A, B \in G, \quad (5.1)$$

onde T_{DADOS} é o tempo gasto com transmissão dos pacotes, G denota o grafo que representa a topologia da rede e $T_{DADOS(X,Y)}$ representa o tempo gasto transmitindo o pacote proveniente do nó X para o nó Y , $\forall X, Y \in G$. Assim, no exemplo citado, $T_{DADOS} = \max(T_{512}, T_{256}) = T_{512}$. Logo, o T_{DADOS} definido seria o necessário para transmitir o pacote de 512 bytes. A Figura 5.1 ilustra um diagrama de quadros/pacotes na comunicação entre os nós A e B durante a comunicação citada como exemplo.

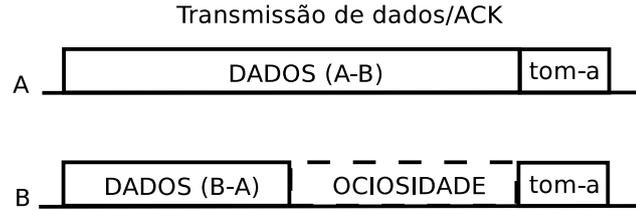


Figura 5.1: Exemplo de comunicação que possui ociosidade devido à diferença no tamanho dos pacotes.



Figura 5.2: Exemplo do modo uniforme que não possui ociosidade na comunicação.

Para facilitar questões relacionadas ao sincronismo dos nós, essa definição de utilização do tempo máximo é comumente adotada na literatura correlata a protocolos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*. Como exemplos de técnicas de controle de acesso ao meio que usam essa definição pode-se citar as seguintes: ContraFlow [142], FuMAC [167], MASTaR [75], S-CW FD [105], FD-MAC [172] e o FDT-MAC [48]. O problema dessa definição pelo tamanho máximo é que pode haver uma grande ociosidade no nó com menor tamanho de pacote, conforme ilustrado na Figura 5.1. Nesta figura, nota-se que o nó B ficará ocioso por um longo período de tempo que ele poderia estar utilizando para realizar alguma outra comunicação pendente, considerando um tráfego intenso que sature a rede.

Este capítulo tem por objetivo propor um mecanismo que visa reduzir a referida ociosidade. Isso se dá por meio de uma modificação na definição de T_{DADOS} . Ao invés de ser igual ao máximo entre os dois tempos, T_{DADOS} será o mínimo entre eles. Portanto, neste novo mecanismo, tem-se que:

$$T_{DADOS} = \min(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)}), A, B \in G. \quad (5.2)$$

Este novo mecanismo é denominado modo uniforme de dados, visto que suprime essa ociosidade por sincronismo como pode-se observar na Figura 5.2. Tal figura ilustra a mesma comunicação exemplificada entre A e B , porém usando o modo uniforme. No mecanismo em questão, o que sobrou do maior pacote que não foi transmitido na comunicação, fica agendado para uma outra comunicação. Então, um pacote de tamanho $\max(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)}) - \min(T_{DADOS(A,B)}, T_{DADOS(B,A)})$ será recolocado na fila de pacotes a serem enviados. Esse comportamento acaba por aumentar a quantidade de pacotes na fila e gerar possível fragmentação de pacotes, mas libera os dois nós envolvidos na comunicação para buscarem novas transmissões a serem feitas. Portanto, dependendo do modelo de tráfego da rede, o modo uniforme de dados pode possuir um impacto positivo

significativo na vazão da rede e no uso do canal.

Isso será mostrado em um exemplo a seguir que descreve um cenário que se beneficia deste comportamento. Tal exemplo possui seu diagrama de quadros ilustrado na Figura 5.3. Neste cenário, há três pacotes a serem transmitidos na topologia bidirecional formada pelos nós A e B . Há dois pacotes de 512 bytes do nó A para o nó B , e um de 1024 bytes do nó B para o nó A . Quando o modo uniforme de dados é habilitado, T_{DADOS} é escolhido de acordo com a Eq. (5.2) e os nós não ficam ociosos na primeira comunicação, conforme ilustrado na Figura 5.3a. Na segunda comunicação, o restante do pacote de B para A é transmitido de maneira simultânea ao segundo pacote de A para B . Assim, neste caso, se provê um melhor uso do espectro, além de uma maior vazão do que a obtida na abordagem tradicional, ilustrada na Figura 5.3b. É importante mencionar que o modo uniforme de dados pode ser acoplado ao FDT-MAC. Uma análise mais aprofundada do impacto do modo uniforme no FDT-MAC será apresentada na seção a seguir.

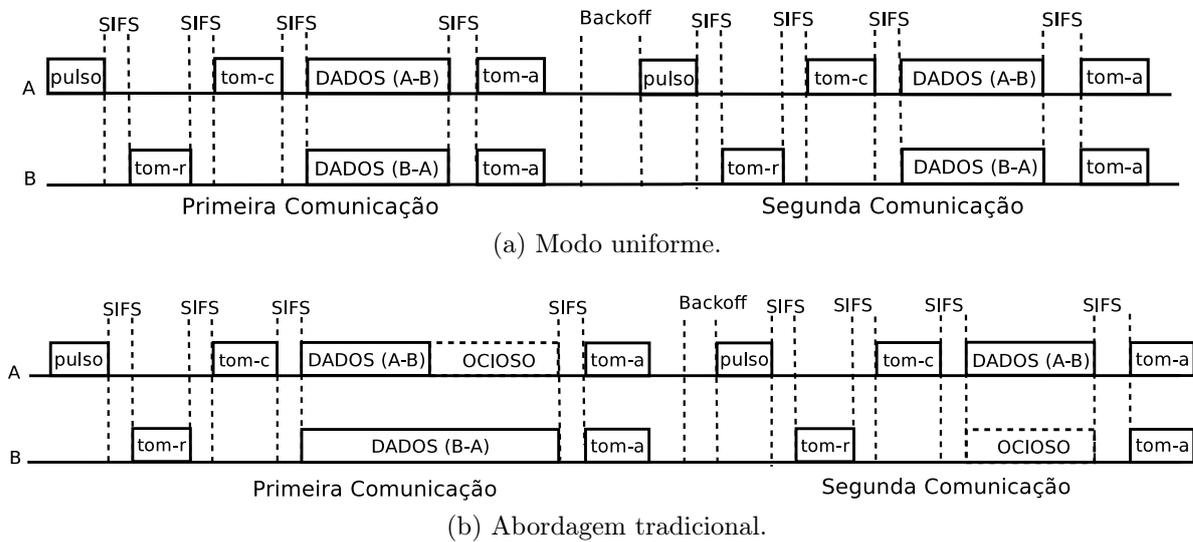


Figura 5.3: Comparação entre o modo uniforme e a abordagem tradicional para o FDT-MAC.

5.2 Análise de Resultados

Esta seção apresenta as avaliações realizadas acerca do impacto do modo uniforme de dados. O modo em questão foi explicado em detalhes na seção anterior e tem por objetivo melhorar a vazão e o uso do canal. O impacto do modo uniforme de dados na vazão será avaliado de duas maneiras distintas:

1. Cálculo da vazão em um cenário simples utilizado para exemplificar a relevância do uso do modo uniforme;
2. Cálculo da vazão de saturação para um cenário com muitos nós e rede saturada devido à ocorrência de tráfego intenso.

Tabela 5.1: Comparação entre FDT-MAC com modo uniforme e FD-MAC.

Técnica	R_c (Mbps)	FDT-MAC com modo uniforme				FD-MAC				Ganho (%)
		$T_t(1)$ (μs)	$T_t(2)$ (μs)	T_t (μs)	S_{max} (Mbps)	$T_t(1)$ (μs)	$T_t(2)$ (μs)	T_t (μs)	S_{max} (Mbps)	
DSSS	1	4989	4989	9978	1,64	10320	6224	16544	0,99	65,66
OFDM	6	940,5	940,5	1881	8,71	1785,5	1101,5	2887	5,68	53,34

A primeira avaliação é baseada em um cenário simples de dois nós A e B descrito a seguir. O nó A possui dois pacotes de 512 bytes cada para transmitir ao nó B . Além disso, o nó B tem um pacote de 1024 bytes para transmitir ao nó A . Ambos os nós (A e B), possuem a capacidade de realizar comunicações *full-duplex*. A avaliação compara as seguintes técnicas de controle de acesso ao meio: FD-MAC [172], FDT-MAC e FDT-MAC com modo uniforme habilitado. Como todas estas técnicas necessitam realizar duas comunicações para entregar com sucesso os pacotes, $T_t(1)$ denota o tempo despendido com a primeira das comunicações, enquanto $T_t(2)$ denota o tempo gasto na segunda. O tempo total de transmissão é denotado por T_t e é basicamente a soma dos tempos de transmissão das duas comunicações ($T_t = T_t(1) + T_t(2)$). Com relação aos parâmetros da camada física, variou-se tais parâmetros entre os valores descritos no padrão IEEE 802.11b e no IEEE 802.11a. Quando se utilizou os do IEEE 802.11b, considerou-se ainda a taxa de transmissão do canal igual a 1 Mbps. Por sua vez, quando considerou-se os parâmetros do IEEE 802.11a, a taxa de transmissão do canal foi assumida como sendo igual a 6 Mbps.

Como não há colisões nesse cenário, utilizou-se a métrica de vazão máxima explicada na Subseção 2.4.2, e utilizada para avaliação na Subseção 4.2.1. Portanto, a vazão máxima foi calculada com base nos parâmetros supracitados por meio da Eq. (4.5). Os resultados dessa comparação estão disponíveis nas Tabelas 5.1 e 5.2. A Tabela 5.1 expõe a comparação entre o FDT-MAC com modo uniforme habilitado e o FD-MAC. Por sua vez, a Tabela 5.2 compara o FDT-MAC com modo uniforme habilitado e o FDT-MAC com modo uniforme desabilitado. Como se pode observar na Tabela 5.1, tem-se um ganho de 65,66% para o IEEE 802.11b e 53,34% para o IEEE 802.11a em relação ao FD-MAC. Quando a comparação é com o FDT-MAC sem habilitar o modo uniforme de dados, o aumento é de 41,38% para o IEEE 802.11b e de 36,31% para o IEEE 802.11a, conforme a Tabela 5.2. É importante mencionar que neste cenário a avaliação do impacto da melhoria proposta foi bastante positiva. Entretanto, é necessário analisar também o modo uniforme de dados sob condições mais gerais, de modo a permitir uma melhor avaliação acerca do impacto do uso do modo uniforme de dados.

O modo uniforme acoplado ao FDT-MAC foi também avaliado com o auxílio do modelo de Bianchi [19], para considerar um cenário mais geral e mais crítico no que concerne a tráfego, visto que em tal modelo considera-se a rede sempre saturada. Vale ressaltar que o modelo de Bianchi [19] considerado é o original detalhado na Seção 2.4 contendo as modificações explicadas na Subseção 4.2.2 e expressas na Eq. (4.13).

Nesta análise, serão comparados o FDT-MAC com modo uniforme habilitado e o FDT-MAC sem o referido modo, em termos de vazão de saturação. A avaliação foi realizada assumindo os parâmetros de camada física descritos pelos padrões IEEE 802.11b e IEEE

Tabela 5.2: Exemplo do impacto do modo uniforme no FDT-MAC.

Técnica	R_c (Mbps)	Modo Uniforme				Sem Modo Uniforme				Ganho (%)
		$T_t(1)$ (μs)	$T_t(2)$ (μs)	T_t (μs)	S_{max} (Mbps)	$T_t(1)$ (μs)	$T_t(2)$ (μs)	T_t (μs)	S_{max} (Mbps)	
DSSS	1	4989	4989	9978	1,64	9085	4989	14074	1,16	41,38
OFDM	6	940,5	940,5	1881	8,71	1624,5	940,5	2565	6,39	36,31

802.11a com taxas de transmissão do canal iguais a 1 Mbps e 6 Mbps para os respectivos padrões. O número de nós foi variado entre os seguintes valores: 10, 50, 100, 150, 200, 250. Além disso, considerou-se sempre a existência de dois fluxos correntes. $P_{sz}(1)$ e $P_{sz}(2)$ denotam o tamanho do pacote de dados de cada um destes dois fluxos em bytes. Nesta análise, assumiu-se que os tamanhos dos pacotes de dados destes fluxos são diferentes ($P_{sz}(1) < P_{sz}(2)$). Os valores de $P_{sz}(1)$ e $P_{sz}(2)$ foram variados de acordo com as seguintes combinações:

1. $P_{sz}(1) = 512, P_{sz}(2) = 1024$;
2. $P_{sz}(1) = 512, P_{sz}(2) = 2048$;
3. $P_{sz}(1) = 512, P_{sz}(2) = 4096$;
4. $P_{sz}(1) = 512, P_{sz}(2) = 8184$;
5. $P_{sz}(1) = 1024, P_{sz}(2) = 2048$;
6. $P_{sz}(1) = 1024, P_{sz}(2) = 4096$;
7. $P_{sz}(1) = 1024, P_{sz}(2) = 8184$;
8. $P_{sz}(1) = 2048, P_{sz}(2) = 4096$;
9. $P_{sz}(1) = 2048, P_{sz}(2) = 8184$.

Os resultados dos cenários em que $P_{sz}(1) = 512$ estão disponíveis na Figura 5.4. Para diferentes quantidades de nós, a Figura 5.4 apresenta a razão entre a vazão de saturação obtida com o modo uniforme habilitado (S') e a vazão de saturação obtida sem o modo uniforme (S). O quociente ($\eta = S'/S$) revela o impacto relativo em vazão de saturação decorrente da utilização do modo uniforme em condições de saturação da rede. Caso $\eta > 1$, então há ganho na vazão de saturação devido à utilização do modo uniforme. Por sua vez, se $\eta < 1$, há perda na vazão de saturação decorrente do modo uniforme. As linhas do gráfico na Figura 5.4 que terminam com “a” na legenda foram calculadas com base nos parâmetros de camada física descritos no padrão IEEE 802.11a. Nestas linhas, η chega a alcançar até 1,39. Quando a quantidade de nós é menor do que 200, $\eta > 1$, ou seja, há ganho. Já as linhas da legenda que terminam com “b” indicam a consideração dos parâmetros descritos no padrão IEEE 802.11b. Nestas linhas, o modo uniforme também foi eficiente se comparado com o FDT-MAC sem o modo, visto que se obteve $\eta > 1$ em

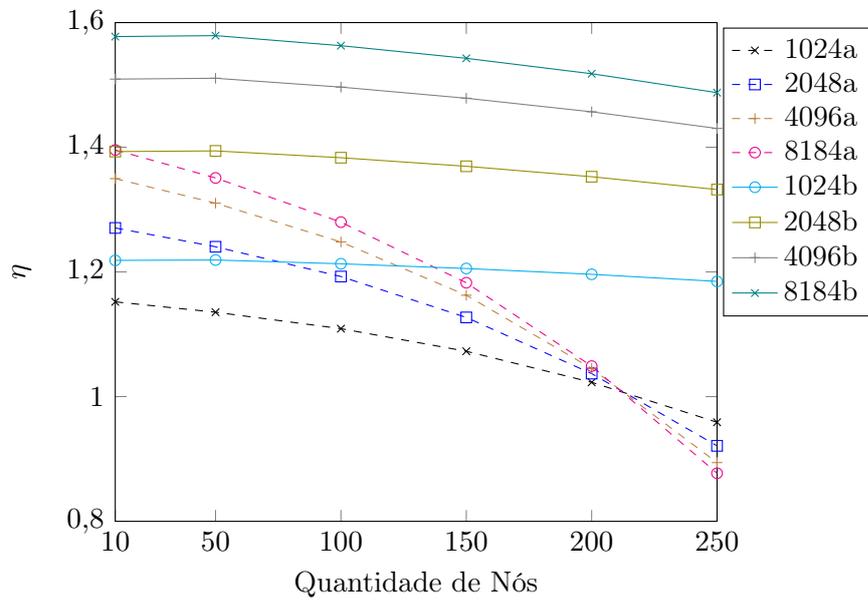


Figura 5.4: Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 512$.

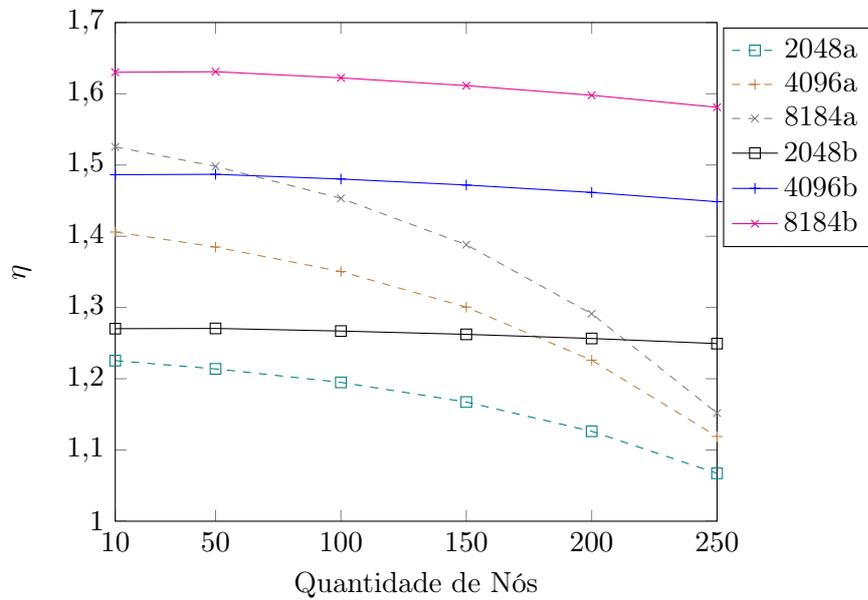


Figura 5.5: Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 1024$.

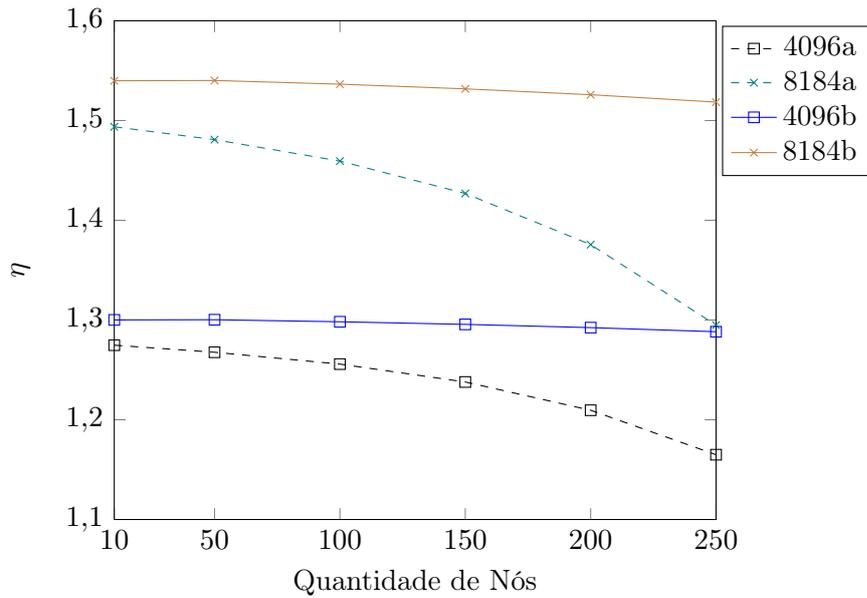


Figura 5.6: Comparação da vazão de saturação para o modo uniforme com $P_{sz}(1) = 2048$.

todos os casos avaliados, independente da quantidade de nós. Nestas linhas, η chegou a alcançar até 1,57.

De modo similar à Figura 5.4, a Figura 5.5 apresenta os resultados em que $P_{sz}(1) = 1024$. Neste caso, considerando os parâmetros de camada física do IEEE 802.11a, há ganho em todos os casos investigados, isto é, obteve-se $\eta > 1$ em todos os casos investigados. O maior valor obtido de η neste cenário foi de 1,49, quando o número de nós é igual a 10. Considerando os parâmetros de camada física do IEEE 802.11b, η alcança até 1,63. Vale ressaltar que $\eta > 1$ em todos os casos avaliados para o IEEE 802.11b.

A Figura 5.6 apresenta os resultados para os cenários em que $P_{sz}(1) = 2048$. Nestes cenários, todos os resultados tanto com os parâmetros IEEE 802.11a quanto com os parâmetros IEEE 802.11b são tais que $\eta > 1$. Logo, neste cenário, há ganhos em todos os casos investigados. O valor de η chega a alcançar 1,49 e 1,53 para os parâmetros do IEEE 802.11a e para os parâmetros do IEEE 802.11b, respectivamente. Além disso, o mínimo valor de η foi de 1,16 e 1,28 considerando os parâmetros do IEEE 802.11a e do IEEE 802.11b, respectivamente. Portanto, a presente avaliação mostra que o modo uniforme de dados pode melhorar significativamente a vazão de saturação da rede. Entretanto, é importante descobrir em que situações o seu uso pode levar a benefícios ou perdas. Nos resultados ilustrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, algumas características comuns são dignas de notas. Estas tendências que se manifestaram nos resultados apresentados são as seguintes:

1. Quando a quantidade de nós aumenta, há perdas para o modo uniforme de dados, ou seja η diminui;
2. De modo geral, os maiores valores de η obtidos foram com os maiores pacotes de dados, uma vez que os resultados obtidos para $P_{sz}(1) = 1024$ foram bem mais favoráveis ao modo uniforme do que os obtidos com $P_{sz}(1) = 512$.

A primeira tendência ocorre por ser mais difícil de se obter uma transmissão bem sucedida quando se tem um maior número de nós. Essa relação de inversa proporcionalidade entre sucesso na transmissão e nós é decorrente da disputa de acesso ao canal pelos nós. Como o modo uniforme por definição acaba por fragmentar um pacote de dados em mais de um, o FDT-MAC precisa disputar o canal por mais de uma vez para poder transmitir estes dados. É importante mencionar que isso não é necessário quando o FDT-MAC não usa o modo uniforme de dados. Então, explicou-se o porquê da primeira tendência ocorrer.

No que diz respeito à segunda tendência, a explicação se encontra a seguir. Assume-se que \bar{T}'_{slot} denota a duração média da fatia de tempo e P'_{sz} denota o tamanho do pacote de dados. As definições de \bar{T}'_{slot} e P'_{sz} consideram o FDT-MAC com o modo uniforme habilitado. \bar{T}_{slot} denota a duração média da fatia de tempo e P_{sz} denota o tamanho do pacote de dados para o FDT-MAC sem o modo uniforme habilitado. Então, a partir da definição de η e a partir da Eq. (4.13), pode-se inferir que:

$$\eta = \frac{S'}{S} = \frac{(p_s \cdot p_{tr} \cdot P'_{sz})}{\bar{T}'_{slot}} = \frac{P'_{sz}}{P_{sz}} \cdot \frac{\bar{T}_{slot}}{\bar{T}'_{slot}} = \frac{2 \cdot \min(P_{sz}(1), P_{sz}(2))}{(P_{sz}(1) + P_{sz}(2))} \cdot \frac{\bar{T}_{slot}}{\bar{T}'_{slot}}. \quad (5.3)$$

A Eq. (5.3) ajuda a explicar a segunda tendência. À medida que $P_{sz}(1)$ cresce, $2 \cdot (\min P_{sz}(1), P_{sz}(2))$ cresce mais rápido do que $(P_{sz}(1) + P_{sz}(2))$, uma vez que $P_{sz}(1) < P_{sz}(2)$ vale para todos os cenários avaliados. Portanto, $P_{sz}(1)$ é diretamente proporcional a η , o que explica a segunda tendência. Esta avaliação acerca do modo uniforme de dados acoplado ao FDT-MAC em termos de vazão de saturação encerra a análise de resultados realizada neste capítulo. A seguir, será apresentada uma discussão abordando os principais aspectos levantados ao longo deste capítulo.

5.3 Discussão

Este capítulo se iniciou com a proposta de um novo mecanismo para auxiliar o controle de acesso ao meio em comunicações *full-duplex*. O mecanismo em questão está relacionado ao tamanho do pacote de dados escolhido em comunicações *full-duplex*. O mecanismo denominado modo uniforme de dados tem por objetivo evitar que algum dos nós envolvidos na comunicação fique ocioso mesmo possuindo pacotes em sua fila. Desta forma, o mecanismo proposto visa reduzir ociosidade dos nós, conseqüentemente provendo um melhor uso do canal e um aumento na vazão da rede. O mecanismo do modo uniforme de dados foi incorporado ao FDT-MAC que fora explicado no Capítulo 4.

Avaliou-se o mecanismo uniforme de dados em conjunto com o FDT-MAC sob diferentes cenários e métricas, conforme explicado na Seção 5.2. A referida avaliação mostrou que o modo uniforme de dados impactou positivamente na vazão da rede. Nas análises realizadas, considerou-se cenários livres de colisão e cenários de rede saturada. Portanto, recorreu-se às métricas de vazão máxima e vazão de saturação nas avaliações realizadas. Tal abordagem de avaliação foi semelhante à utilizada no Capítulo 4. Os resultados indicam que o FDT-MAC com a opção de habilitar o modo uniforme de dados pode ser uma importante alternativa para suplantiar as limitações relativas ao uso de recursos de modo eficiente nas comunicações *full-duplex*. A incorporação do modo uniforme de dados ao FDT-MAC resultou na publicação de um artigo de revista [47] (Qualis – A2).

Por fim, seria interessante estabelecer algum tipo de limiar para ativação ou não do modo uniforme, pois seu uso nem sempre traz ganhos, conforme observado nas avaliações disponíveis na Seção 5.2. Seguindo a linha de propor melhorias relacionados ao uso do canal e, conseqüentemente, da vazão, o próximo capítulo introduz uma nova técnica inspirada nos mecanismos básicos do FDT-MAC.

Capítulo 6

FDMR-MAC: Mecanismo para Maximizar a Utilização do Canal em Comunicações *Full-duplex*

Este capítulo expõe mais um mecanismo proposto com o objetivo de maximizar a utilização do canal em comunicações *full-duplex*. O mecanismo em questão visa aumentar a quantidade de comunicações simultâneas, por meio de escalonamento de pacotes. Espera-se obter ganhos de vazão com a melhor utilização do canal, sem no entanto desfavorecer a justiça na distribuição dos fluxos de dados entre os nós. A motivação teórica por trás da proposta do mecanismo será explicada, justificando o ganho esperado com tal mecanismo. Após esta etapa de apresentação da proposta, serão realizadas avaliações diversas do mecanismo proposto. Por fim, será exposta uma discussão levantando os principais aspectos positivos e negativos do mecanismo proposto, indicando sugestões de melhorias futuras.

6.1 Utilização Eficiente do Canal em Comunicações *Full-duplex*

Esta seção apresenta uma proposta de mecanismo de controle de acesso ao meio proposta neste trabalho no contexto de comunicações *full-duplex*. A referida técnica é denominada *Full-Duplex Multiple Receiver MAC* (FDMR-MAC). O principal objetivo do FDMR-MAC é maximizar a utilização do canal e a vazão em comunicações *full-duplex*. Para tanto, o FDMR-MAC recorre a um mecanismo inovador de reserva de canal que permite que um nó que vai iniciar uma comunicação (emissor) possa consultar alguns de seus vizinhos de modo a selecionar o nó destino que mais favoreça a utilização do canal. É importante mencionar que uma política adequada de escalonamento pode aumentar o uso do canal, incrementando a probabilidade de ocorrerem comunicações onde os nós emissor e receptor possuem pacotes a serem transmitidos um ao outro. Como o FDMR-MAC é proposto no contexto *full-duplex*, os referidos pacotes poderiam ser enviados em paralelo. Assim, espera-se que o FDMR-MAC melhore o uso do canal e a vazão em comunicações *full-duplex*.

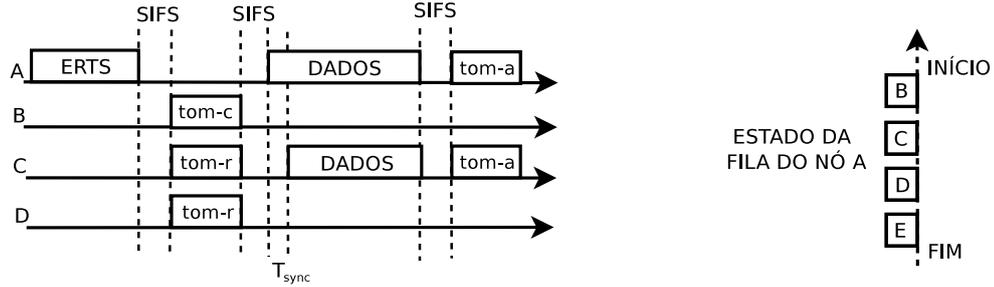
Conforme explicado no Capítulo 3, vale ressaltar que a adoção de escalonamento de pacotes a fim de maximizar a formação de topologias bidirecionais em comunicações *full-duplex* é utilizada em outros protocolos para comunicações *full-duplex*, tais como os explicados em [38] e [90]. O protocolo descrito em [38] faz um escalonamento bem simples, já após ter tido seu destinatário escolhido. O FD+ [90] introduz um campo extra no cabeçalho dos campos RTS/CTS para facilitar um escalonamento apropriado. Por sua vez, o FDNR-MAC proposto se utiliza de uma abordagem diferente da destes protocolos.

A seleção do nó destino é realizada no FDNR-MAC de um modo eficiente para não aumentar muito o tempo total gasto em uma comunicação, como explicado mais adiante. Por isso, o FDNR-MAC utiliza sinais pulso e tom para verificar informações dos nós vizinhos de modo a descobrir qual deles possui um pacote pendente de envio ao emissor. Com base nestas informações, o FDNR-MAC escolhe então o vizinho que maximiza a utilização do canal para comunicações *full-duplex*. Considere que S seja o nó emissor e que $\mathcal{X} = \{B, C, D, E\}$ denota o conjunto de nós candidatos a serem escolhidos como destino de S , ou seja, o conjunto de nós que S possui quadros de dados para enviar. Claramente, se $|\mathcal{X}| = 1$, o nó S possui quadros de dados para apenas um destino e a escolha do nó destino se torna trivial neste caso. Assim, supondo que $|\mathcal{X}| > 1$, S pode escolher o nó destino R ($R \in \mathcal{X}$), de tal modo que R maximize o uso do canal. Para este fim, considera-se que um escalonamento de quadros de dados na fila do nó S pode ser realizada com uma abordagem similar às descritas em diversos trabalhos [38] [90], em que se pode lidar com múltiplos quadros na camada de controle de acesso ao meio. É importante mencionar que o referido escalonamento não causa espera indefinida, uma vez que todos os nós disputam através do seus tempos de *backoff* o acesso ao canal para serem o nó emissor, de um modo semelhante ao descrito pelo padrão IEEE 802.11 [63].

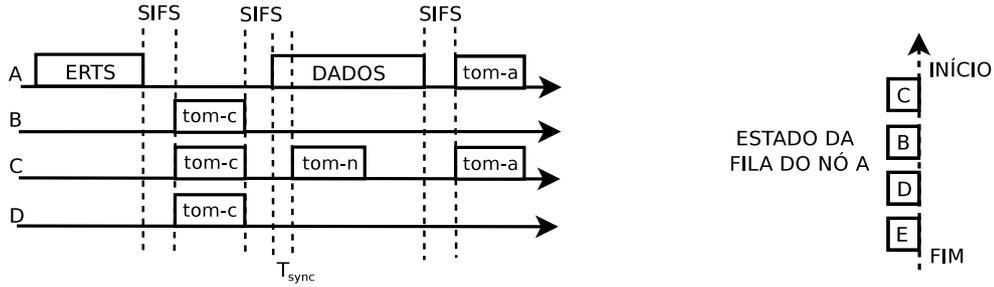
Outro aspecto notável do FDNR-MAC está no fato de se recorrer ao uso de sinais pulso e tom para realizar a reserva de canal e a confirmação do recebimento dos quadros de dados (*acknowledgment*) de maneira eficiente. Os sinais pulso e tom auxiliam no processo de escolha do nó destino que maximiza a vazão da rede e o uso do canal. Os sinais pulso e tom podem ser transmitidos em menos tempo que os quadros (RTS/FCTS, ACK) [140]. Isso faz com que o uso destes sinais se torne vantajoso do ponto de vista de vazão, uma vez que ao reduzir o tempo total da comunicação, aumenta-se a vazão. Esta característica de ser menos oneroso que os quadros em termos de tempo de transmissão, é exatamente o porquê do FDNR-MAC propor o uso de sinais pulso e tom em sua reserva de canal e no seu processo de escolha do nó destino. Como os referidos sinais são parte fundamental do FDNR-MAC, é necessário apresentar algumas considerações sobre estes.

6.1.1 Considerações sobre sinais pulso e tom

O tempo gasto para decodificar um sinal pulso/tom é definido por T_{sync} e é considerado como sendo igual a $5\mu s$, conforme já explicado no Capítulo 4. Considera-se a utilização do mesmo mecanismo de identificação de origem, destino e duração do sinal proposto no FDT-MAC, descrito em maiores detalhes na Subseção 4.1.1. Assim como fora explicado na Seção 4.1 e assumido por diversos trabalhos da literatura de técnicas de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*, como os apresentados em [3] [6] [96] [98], considera-se que sinais pulso e tom podem ser sobrepostos sem causarem colisão um ao outro, caso eles sejam transmitidos em diferentes subcanais não adjacentes da banda, sem



(a) Mais de um vizinho possui dados para o nó emissor.



(b) Nenhum vizinho possui dados para o nó emissor.

Figura 6.1: Exemplo de operação do FDMA-MAC.

a necessidade de *hardware* adicional para escutar as transmissões simultâneas sem colisão. Conforme mencionado na Seção 4.1, o padrão IEEE 802.11 possui $\theta = 48$ subcanais a serem usados para transmissão de dados em sua versão IEEE 802.11a/g [137] [136]. O FDMA-MAC fará uso de ψ ($0 < \psi < 10$) deles simultaneamente. Assim, o FDMA-MAC pode tirar proveito do OFDMA (*Orthogonal frequency-division multiple access*) adotando uma política apropriada de alocação de subcanais para cada uma das ψ transmissões, garantindo um espaçamento entre elas, de modo a possibilitar transmissões simultâneas, livres de interferência. Logo, o FDMA-MAC escolhe o subcanal para o j -ésimo nó destino (F_j , $0 \leq j \leq \psi$) tal que:

$$F_j = j \cdot \left\lceil \frac{\theta}{\psi + 1} \right\rceil. \quad (6.1)$$

Dessa forma, o FDMA-MAC evita a interferência de subcanais por vizinhança e torna possível o uso de até ψ sinais pulso/tom simultâneos no canal sem ocorrência de colisão. Considera-se ainda que os nós são capazes de ajustar a potência de transmissão de acordo com o nó vizinho, de modo que a potência recebida pelo nó destino seja próxima a um limiar. Isso permite que um nó identifique que um sinal ou quadro não é direcionado a ele quando a potência do sinal recebido (RSSI) for maior do que o limiar esperado [103]. Finalizada esta discussão sobre as características dos sinais pulso e tom, será apresentado um exemplo de comunicação utilizando FDMA-MAC de modo a prover uma explicação mais detalhada sobre a operação do FDMA-MAC.

6.1.2 Exemplo de Funcionamento

Um exemplo do estabelecimento de uma comunicação *full-duplex* utilizando o FDNR-MAC está ilustrado na Figura 6.1a. No início, o nó A possui quadros para enviar aos nós B , C , D e E ordenados na fila do nó A , como ilustrado na Figura 6.1a. O nó A envia um quadro ERTS (*Extended Request to Send*) para ψ ($1 \leq \psi \leq |\mathcal{X}|$) nós. No exemplo em questão, considere que $\psi = 3$, de modo que o nó A envia o quadro ERTS aos nós B , C e D . O quadro ERTS possui os mesmos campos contidos no cabeçalho do RTS (*Request to Send*). No entanto, no quadro ERTS, há a adição de mais $\psi - 1$ campos de destino para poder comportar o envio a mais de um destinatário. Ao escutar o quadro ERTS, os nós vizinhos do nó A e que não estão contidos em nenhum dos ψ campos de destino atualizam seu NAV (*Network Allocation Vector*). O mecanismo NAV é usado para evitar colisões e considera-se o emprego do mesmo mecanismo descrito no padrão IEEE 802.11 [63]. Quando os nós B , C e D recebem o quadro ERTS, cada um deles responde ao nó A com um sinal “tom resposta” (tom-r), se possuírem quadros de dados destinados de volta ao nó A . Caso não possuam, eles deverão responder com um sinal “tom confirmação” (tom-c) que será posteriormente útil na atualização do NAV.

É importante mencionar que os sinais tom-r e tom-c são enviados de acordo com a política de alocação de subcanais descrita na Eq. (6.1). Isso ocorre para tornar possível a decodificação dos sinais tom-r e tom-c enviados simultaneamente, sem que sejam percebidas colisões. Portanto, em consonância com a Eq. (6.1), os nós B , C e D irão enviar os sinais tom-r e tom-c para o nó A utilizando os subcanais $F_0 = 0$, $F_1 = 12$ e $F_2 = 24$, respectivamente. Assim, após receber simultâneas respostas de sinais tom-r/tom-c, o nó A pode escolher como destino o nó que respondeu com um tom-r e que está mais bem colocado em sua fila. Caso nenhum nó responda um sinal tom-r (Figura 6.1b), ou seja, todos os nós respondam um sinal tom-c, o nó A escolhe como destinatário da comunicação o primeiro nó da sua fila. Como ilustrado na Figura 6.1a, os nós C e D responderam com um tom-r para o nó A . O nó C foi então escolhido como destinatário por estar mais bem posicionado na fila do nó A , como se pode observar na Figura 6.1a. Ao escutar os sinais tom-r/tom-c não direcionados a eles, os nós vizinhos dos nós B , C e D estabelecem o NAV. O NAV em questão pode ser cancelado caso em $T_{SIFS} + T_{sync}$ não se escute um quadro de dados ou um sinal tom-n (“tom NAV”), onde T_{SIFS} denota o tempo de SIFS (*Short Interframe Space*) descrito no padrão IEEE 802.11 [63]. A ausência de dados e tom-n no período em questão indica que o nó que enviou o tom-r/tom-c para estabelecimento do NAV não foi escolhido como destino e, portanto, seus vizinhos estão aptos a disputar pelo canal.

Após o par de nós emissor(A)/destino(C) ser definido, o nó A envia dados ao nó C . Ao escutar este quadro de dados por pelo menos T_{sync} , os nós B , C e D conseguem verificar se o quadro é destinado a eles com base na potência do sinal recebido (RSSI), de modo similar ao FDT-MAC, descrito no Capítulo 4. Ao identificar que não foram os escolhidos como destino, os nós B e D estabelecem seu NAV. Por sua vez, o nó C verifica que o quadro de dados é direcionado a ele e começa a mandar seus quadros de dados para o nó A , estabelecendo uma comunicação bidirecional. Os vizinhos do nó C escutam estes quadros de dados e mantêm seu NAV para evitar colisões. Caso o nó destino escolhido (C) não possua quadros de volta para o emissor (A), o nó destino envia um tom-n por pelo menos T_{sync} para que seus vizinhos possam atualizar seu NAV corretamente. Um exemplo deste cenário em que ocorre o envio de tom-n está ilustrado na Figura 6.1b. Em ambos

cenários da Figura 6.1, após receberem os quadros de dados, os nós A e C trocam sinais tom-a (“tom ACK”) para confirmar o recebimento dos dados. Assim como no FDT-MAC, descrito no Capítulo 4, o tom-a possui duração igual a T_{sync} , uma vez que um simples sinal é suficiente para realizar o papel de confirmação de recebimento dos dados (ACK).

Vale ressaltar que o FDMR-MAC é capaz de identificar se um sinal é tom-a, tom-c, tom-n ou tom-r, uma vez que estes sinais podem ser diferenciados seja por fase, amplitude ou frequência, conforme descrito por [93]. Para o FDMR-MAC, $P_{sz}^{SR} \geq P_{sz}^{RS}$ sempre vale, onde P_{sz}^{IJ} denota o tamanho do quadro de dados transmitido do nó I para o nó J . Dessa forma, o FDMR-MAC necessita que o quadro enviado de R para S seja no máximo do tamanho daquele enviado de S para R , onde S é o nó emissor que inicia a comunicação enviando o ERTS. Esta restrição ocorre para facilitar questões de sincronismo entre os tamanhos de pacotes que podem impactar significativamente no desempenho da rede, conforme foi visto no Capítulo 5. Além disso, essa restrição possibilita ao FDMR-MAC ter algo semelhante à supressão de tom do FDT-MAC explicada na Seção 4.1.

Portanto, espera-se que o FDMR-MAC seja um mecanismo eficiente no que concerne à vazão, uma vez que se recorre à utilização de sinais pulso e tom em diversas fases da comunicação (reserva de canal e confirmação de recebimento de quadros de dados), reduzindo assim o tempo total de transmissão gasto em uma comunicação. Além disso, o FDMR-MAC aumenta a probabilidade de estabelecer uma comunicação onde os nós emissor e destino possuam quadros de dados para transmitir um ao outro, aumentando assim a vazão e o uso do canal. A seguir, serão apresentadas as motivações da proposta do FDMR-MAC, comparando em linhas gerais seu desempenho com um protocolo do estado da arte de comunicações *full-duplex*, no caso, o FD-MAC [172].

6.1.3 Motivação

A motivação matemática do FDMR-MAC será apresentada à luz da vazão de saturação definida no modelo de Tinnirello [152]. É importante mencionar que o modelo de Tinnirello foi detalhado na Seção 2.4. Considera-se também as modificações explicadas na Subseção 4.2.2 para incluir um tratamento apropriado para as comunicações *full-duplex*. Essas modificações relacionadas à vazão de saturação (S) estão expressas nas equações a seguir:

$$S = \frac{p_s \cdot \overline{E(P)}}{(1 - p_b) \cdot T_{slot} + p_s \cdot \overline{T_s} + [p_b - p_s] \cdot \overline{T_c}}, \quad (6.2)$$

$$p_b = 1 - (1 - \tau)^n, \quad (6.3)$$

$$p_s = n \cdot \tau \cdot (1 - \tau)^{n-1}, \quad (6.4)$$

$$\overline{T_s} = T_s \cdot \frac{W}{W - 1} + T_{slot}, \quad (6.5)$$

$$\overline{E(P)} = P_{sz} \cdot \frac{W}{W - 1}, P_{sz} = P_{sz}^{AB} + P_{sz}^{BC}, \quad (6.6)$$

onde P_{sz}^{IJ} denota o tamanho do pacote de dados proveniente do nó I para o nó J , W denota o tamanho mínimo da janela de *backoff*, T_{slot} denota a duração média da fatia de tempo, T_s denota o tempo de uma comunicação sem colisão, $\overline{T_c}$ denota a duração de uma comunicação com colisão, n corresponde ao número de estações, p_s , p_b e τ denotam

probabilidades explicadas na Seção 2.4 e no trabalho original de Tinnirello [152]. Portanto, fica evidente que a vazão é diretamente proporcional à quantidade de dados transmitidos em um dado intervalo de tempo. Assim, a análise da motivação do FDMR-MAC será em torno de P_{sz} .

Para a análise teórica do FDMR-MAC, será considerado que se está em uma topologia bidirecional entre A e B , onde ambos estabelecem uma comunicação *full-duplex*. Como explicado na Subseção 4.2.2, na Eq. (4.14), quando se trata de topologias bidirecionais, tem-se que:

$$P_{sz} = P_{sz}^{AB} + P_{sz}^{BA}. \quad (6.7)$$

Como se está utilizando o modelo de Tinnirello [152] em que redes são tidas como saturadas, assume-se que o nó A sempre possui dados para enviar ao nó B , uma vez que o nó A é aquele que inicia a comunicação. Por sua vez, será considerado que o nó B possui dados para enviar ao nó A com probabilidade p . É importante mencionar que assume-se que p independe dos nós, ou seja, tal probabilidade será igual para qualquer par de nós A e B . Ademais, considera-se que o tamanho do pacote de dados é igual para ambos os sentidos de uma comunicação bidirecional, ou seja, $P_{sz}^{AB} = P_{sz}^{BA}$. Assim, para os mecanismos tradicionais de comunicações *full-duplex*, tem-se que:

$$P_{sz} = P_{sz}^{AB} + p \cdot P_{sz}^{BA} = (1 + p) \cdot P_{sz}^{AB}. \quad (6.8)$$

Entretanto, o FDMR-MAC tem um valor diferente de P_{sz} , uma vez que ele tenta estabelecer uma comunicação bidirecional com um dentre os ψ nós destinatários do quadro ERTS. Conforme explicado na Subseção 6.1.2, no FDMR-MAC, o nó destino precisa de um tempo ($T_{sync} = 5\mu s$) para confirmar se ele foi realmente o destinatário escolhido antes de começar a enviar dados de volta ao nó emissor. Logo, sejam os nós A e B o emissor e o destinatário, respectivamente, tem-se que $P_{sz}^{BA} = P_{sz}^{AB} - k$, $k = (T_{sync} \cdot R_c/8)$ pois esta é a quantidade em bytes de dados que podem ser enviados no tempo T_{sync} no canal com taxa de transmissão igual a R_c . Portanto, para o FDMR-MAC, tem-se que:

$$P_{sz} = P_{sz}^{AB} + (1 - (1 - p)^\psi) \cdot (P_{sz}^{AB} - k), \quad (6.9)$$

onde $(1 - (1 - p)^\psi)$ representa a probabilidade de ao menos um dos ψ nós candidatos a destinatário possuir dados para o nó emissor. Caso os ψ nós candidatos a destinatário fossem vizinhos entre si, note que o valor de k seria igual a zero, pois os nós escutariam as respostas dos demais candidatos ao nó emissor. Dessa forma, os nós poderiam descobrir o escolhido sem a necessidade de aguardar o primeiro quadro de dados proveniente do nó emissor. Para simplificar esta análise, considera-se esta condição ($k = 0$), fazendo com que a seguinte equação valha para o FDMR-MAC:

$$P_{sz} = P_{sz}^{AB} + (1 - (1 - p)^\psi) \cdot P_{sz}^{BA} = (2 - (1 - p)^\psi) \cdot P_{sz}^{AB}. \quad (6.10)$$

Sabendo que a vazão de saturação (S) é diretamente proporcional a P_{sz} , deve-se comparar as Eqs. (6.8) e (6.10) para diversos valores de p . Considera-se $\psi = 3$ nesta análise, ou seja que o ERTS foi enviado a três nós candidatos a destino. Neste caso, almeja-se

descobrir para qual conjunto de valores de p vale as seguintes fórmulas:

$$(2 - (1 - p)^3) \cdot P_{sz}^{AB} \geq (1 + p) \cdot P_{sz}^{AB}, \quad (6.11)$$

$$(2 - (1 - p)^3) - (1 + p) \geq 0, \quad (6.12)$$

$$p^3 - 3 \cdot p^2 + 2 \cdot p \geq 0, \quad (6.13)$$

$$f(p) = p^3 - 3 \cdot p^2 + 2 = 0. \quad (6.14)$$

Para isso, calculou-se as raízes do polinômio de terceiro grau descrito na Eq. (6.14). As raízes possuem valores iguais a 0, 1 e 2. Como a probabilidade p está limitada ao domínio $0 \leq p \leq 1$, analisou-se a segunda derivada do polinômio para p pertencente a este intervalo. É possível verificar que a Inequação (6.13) é válida para todo valor de p , tal que $0 \leq p \leq 1$. Embora com algumas limitações, esta breve análise serve de motivação para possíveis ganhos decorrentes do uso do FDMR-MAC quando comparado com as técnicas tradicionais projetadas para comunicações *full-duplex*, como a descrita em [172].

É importante mencionar que o valor de p que maximiza a função descrita pela Eq. (6.14) (p_{max}) foi calculado com o auxílio da derivada. Obteve-se que $p_{max} \approx 0,42$. Esse comportamento acerca do valor de p que maximiza o ganho de vazão ser um valor intermediário é de alguma forma esperado. No caso em que p é muito próximo a 1, o custo decorrente do aumento do quadro ERTS se torna injustificável perante o RTS tradicional. Para um valor alto de p , uma comunicação bidirecional terá alta probabilidade de ser estabelecida mesmo usando o RTS tradicional. Vale ressaltar que argumento similar vale para p próximo de zero, ou seja, uma comunicação bidirecional dificilmente seria estabelecida mesmo usando o FDMR-MAC. No caso em que p é próximo a zero, o tempo despendido pelo FDMR-MAC seria maior do que usando o RTS tradicional. Além disso, nesse caso, o ganho em termos de estabelecimento de comunicação bidirecional seria bastante limitado. Portanto, de certa forma, é esperado que o valor de p que maximiza os ganhos do FDMR-MAC seja intermediário. Encerrada a explicação da proposta e da motivação do FDMR-MAC, serão apresentadas avaliações a respeito do seu uso.

6.2 Resultados

Esta seção descreve as avaliações realizadas neste capítulo no que tange ao mecanismo FDMR-MAC proposto. Estas avaliações têm por objetivo expor o impacto positivo do FDMR-MAC sobre o desempenho da rede no que concerne a comunicações *full-duplex*. Para este fim, o FDMR-MAC foi avaliado em termos de vazão de saturação. É importante lembrar que a vazão de saturação pode ser calculada com o modelo de Tinnirello [152]. Tal modelo é amplamente utilizado na literatura correlata quando técnicas de controle de acesso ao meio estão sendo avaliadas em termos de vazão em redes saturadas, conforme discutido na Seção 2.4. A avaliação realizada compara o FDMR-MAC com um protocolo do estado da arte (FD-MAC [172]) em termos de vazão de saturação. Para tanto, faz-se uso do quociente da vazão de saturação obtida com o FDMR-MAC e com o FD-MAC. Tal quociente é denominado η . Caso $\eta > 1$, indica-se que o uso do FDMR-MAC é vantajoso. Considera-se que o tamanho do pacote de dados (P_{sz}) assume os seguintes valores: 256, 512 e 1024 bytes. Além disso, o número de nós vizinhos foi variado de acordo com os seguintes valores: 10, 50 e 100. A probabilidade p é variada tal que $p = 0,1 \cdot x$, $1 \leq x \leq 9$. De maneira

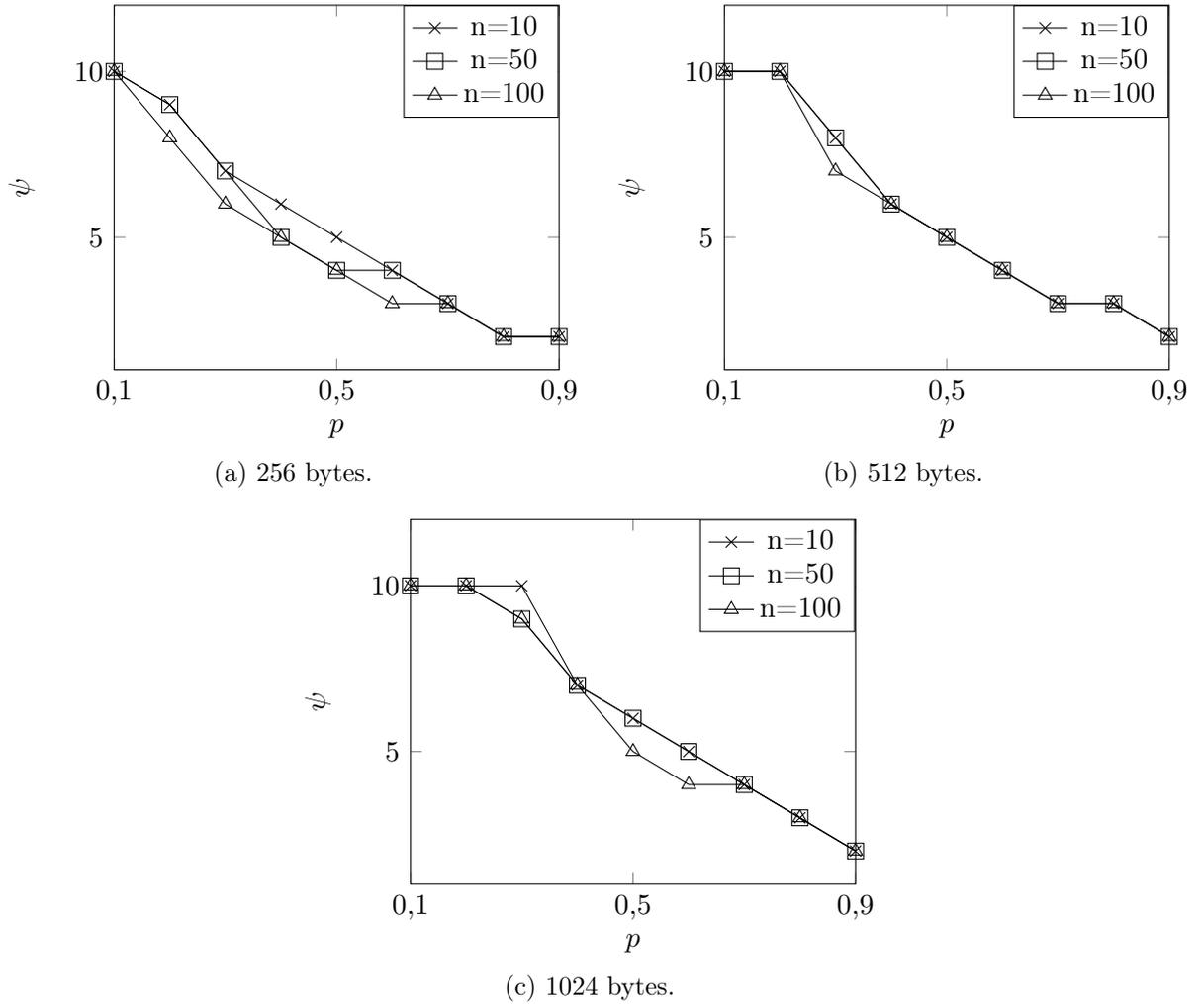
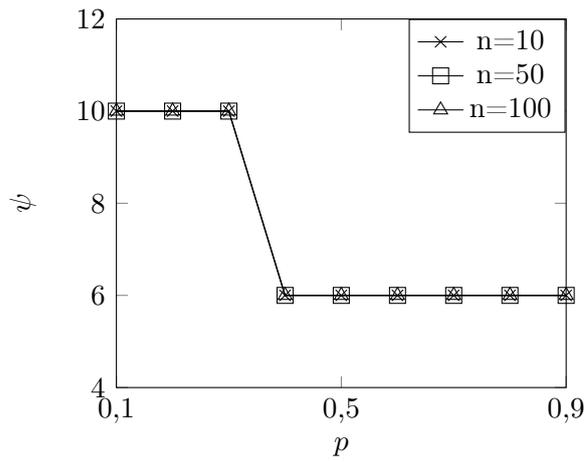


Figura 6.2: Valor ideal de ψ para taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps.

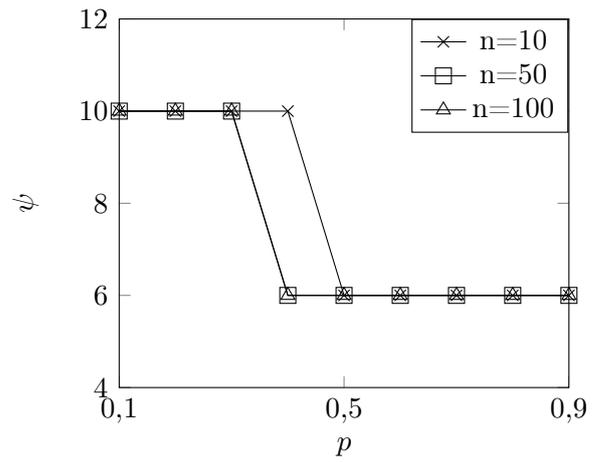
similar a outros trabalhos relacionados a comunicações *full-duplex*, tais como o disponível em [172], os parâmetros das camadas física e de controle de acesso ao meio usados nesta avaliação são aqueles descritos no padrão IEEE 802.11 [63]. Mais precisamente, os valores considerados são os descritos no padrão IEEE 802.11a [63], além de se considerar nas avaliações a taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps ou 54 Mbps. Tanto para o FDMR-MAC quanto para o FD-MAC, a vazão de saturação será calculada de acordo com a Eq. (6.2).

6.2.1 Quantidade de Nós Candidatos a Destino

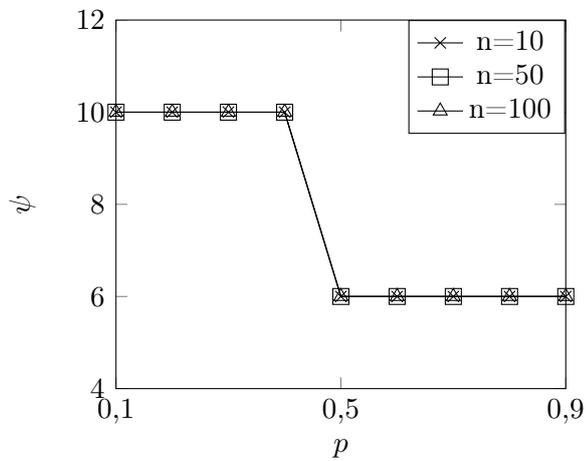
Vale ressaltar que um valor alto da quantidade de nós destino no FDMR-MAC (ψ) introduz uma relevante sobrecarga de tempo na seleção do nó destino, visto que o tamanho do pacote ERTS é proporcional a ψ . Por outro lado, um valor baixo de ψ pode não trazer aumento significativo na probabilidade de estabelecer uma comunicação bidirecional. Portanto, uma análise acerca de um valor ideal para ψ é fundamental no contexto do FDMR-MAC. Por isso, uma avaliação empírica foi feita e será apresentada a seguir.



(a) 256 bytes.



(b) 512 bytes.



(c) 1024 bytes

Figura 6.3: Valor ideal de ψ para taxa de transmissão do canal igual a 54Mbps.

Na referida avaliação, η é calculado para diversos valores de ψ ($2 < \psi < 10$), n (quantidade de nós da rede) e p (probabilidade de estabelecer comunicação bidirecional). O valor de ψ que gerou o maior η para uma determinada combinação dos parâmetros n e p é selecionado como o valor ideal de ψ para aquela combinação. Os valores ideais de ψ para taxa de transmissão de canal igual a 6 Mbps e 54 Mbps estão disponíveis nas Figuras 6.2 e 6.3, respectivamente. Como pode se observar nas Figuras 6.2a, 6.2b e 6.2c, o valor ideal de ψ para taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps não varia significativamente em função do tamanho do pacote de dados. Além disso, nota-se que o valor ideal de ψ aumenta à medida que p diminui. Comportamento semelhante ocorre quando a taxa de transmissão do canal é igual a 54 Mbps, conforme ilustrado nas Figuras 6.3a, 6.3b e 6.3c. A análise do valor ideal de ψ para a taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps focará em valores intermediários de p . Neste caso, $\psi = 3$ será escolhido como o valor a ser considerado nas demais avaliações deste capítulo quando a taxa de transmissão do canal for igual a 6 Mbps. No caso em que a taxa de transmissão do canal é igual a 54 Mbps, nota-se que o valor ideal de ψ teve apenas dois valores selecionados: $\psi = 6$ para quando p assume valores mais altos; $\psi = 10$ para quando p assume valores mais baixos. Tal comportamento pode ser observado nas Figuras 6.3a, 6.3b e 6.3c. Este comportamento será explicado a seguir.

É importante lembrar que o crescimento de ψ aumenta por consequência o tamanho do quadro ERTS, elevando o tempo gasto para transmiti-lo. Como descrito no padrão IEEE 802.11a [63], considerando a taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps, o tempo gasto para se transmitir um quadro RTS (T_{RTS}) é definido da seguinte forma:

$$T_{RTS} = 20 + 4 \cdot \lceil (16 + 6 + 8 \cdot H_{sz}) / (4 \cdot 54) \rceil, \quad (6.15)$$

onde H_{sz} denota o tamanho do cabeçalho do RTS em bytes. Tipicamente, $H_{sz} = 20$ para um quadro RTS. Para o quadro ERTS, H_{sz} pode incluir até $\psi - 1$ outros campos de destino. É importante mencionar que cada campo de destino possui 6 bytes. Logo, o tempo gasto para transmitir um quadro ERTS é definido da seguinte forma:

$$T_{ERTS} = 20 + 4 \cdot \lceil (16 + 6 + 8 \cdot (20 + 6 \cdot (\psi - 1))) / (4 \cdot 54) \rceil. \quad (6.16)$$

Nota-se que para $\psi \in [2,6]$, T_{ERTS} é igual a $28\mu s$, devido ao arredondamento para cima presente na Eq. (6.16). Portanto, para uma taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps, o tempo gasto com o ERTS com dois ou seis campos de destino será o mesmo. Assim, o valor de ψ que maximiza η será igual a seis nesse caso, uma vez que a probabilidade de estabelecer uma comunicação bidirecional é maior à medida que ψ aumenta. Um argumento similar vale para $\psi \in [7,10]$, uma vez que neste caso T_{ERTS} é igual a $32\mu s$, o que faz com que o ψ selecionado seja dez nas probabilidades mais baixas da Figura 6.3. De modo similar ao que ocorre quando a taxa de transmissão do canal é igual a 6 Mbps, a análise do valor ideal de ψ focará na faixa de valores intermediários da probabilidade p . Assim, para taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps, será considerado que $\psi = 6$ para o FDMMR-MAC. Finalizada a discussão acerca dos valores de ψ usados na análise do FDMMR-MAC, a próxima subseção apresentará uma comparação entre o FDMMR-MAC e o FD-MAC em termos de vazão de saturação.

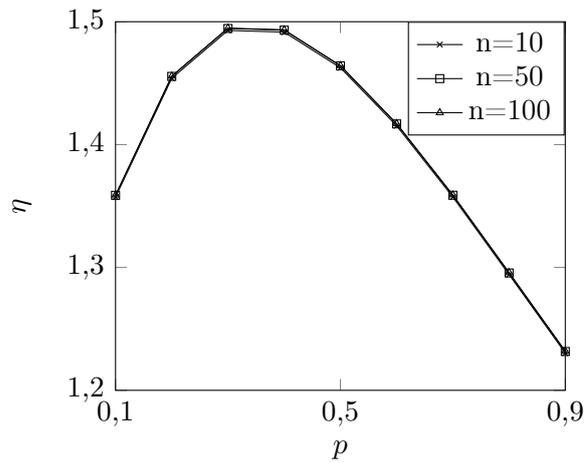
6.2.2 Vazão de Saturação

O FDMR-MAC e o FD-MAC foram comparados em função da vazão de saturação, com o auxílio da Eq. (6.2). O resultado da comparação entre o FDMR-MAC e o FD-MAC por meio de η para taxa de transmissão igual a 6 Mbps e tamanhos de pacote de dados iguais a 256, 512 e 1024 bytes se encontra disponível na Figura 6.4. Para o tamanho de pacote de dados (P_{sz}) igual a 256 bytes, o FDMR-MAC trouxe melhoria na vazão de saturação de até 49% sobre o FD-MAC, ou seja, η alcançou até 1,49 para $p = 0,3$ e $n = 100$, conforme ilustrado na Figura 6.4a. Neste caso ($P_{sz} = 256$), η foi em média igual a 1,39. É notável que o FDMR-MAC obteve maior vazão de saturação que o FD-MAC em todos os casos analisados e que o ganho foi sempre superior a 23%.

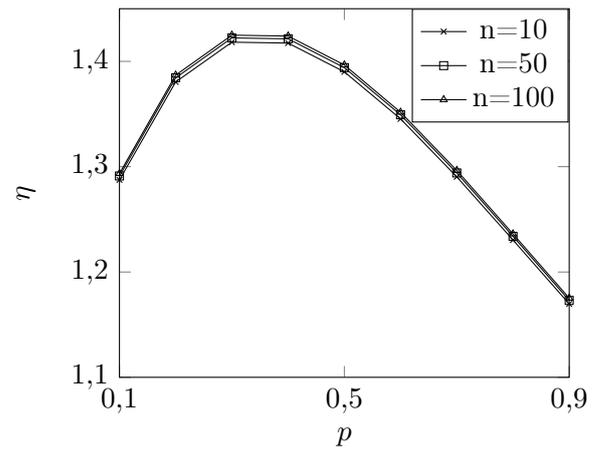
Comportamento similar é observado quando $P_{sz} = 512$, conforme ilustrado na Figura 6.4b. Neste caso, η alcançou até 1,42 ($p = 0,3$, $n = 100$) e teve média igual a 1,32. Novamente, o FDMR-MAC obteve maior vazão de saturação que o FD-MAC em todos os casos investigados, com ganhos sempre superiores a 16%. Quando $P_{sz} = 1024$, a mesma tendência de comportamento pode ser percebida, conforme ilustrado na Figura 6.4c. Mais uma vez, $\eta > 1$ independente do valor de p , ou seja, FDMR-MAC obteve maior vazão de saturação que o FD-MAC em todos os casos analisados. Desta vez, o ganho foi sempre superior a 12%. Nesta situação, η foi de até 1,36 ($p = 0,3$, $n = 100$) e teve média de 1,27.

Alguns fatos ocorreram para os três cenários. Como pode ser observado na Figura 6.4, η sofre poucas variações no que diz respeito ao crescimento de n . Isso indica que o FDMR-MAC consegue ser eficiente no seu tempo de colisão, uma vez que à medida que n cresce, são esperadas mais colisões. O FDMR-MAC gasta mais tempo com o ERTS do que o FD-MAC com um RTS tradicional, pois o ERTS possui $\psi - 1$ campos de destino no cabeçalho a mais que o RTS. Entretanto, o FDMR-MAC possui um mecanismo de ACK mais eficiente que o do FD-MAC, devido ao primeiro usar sinal ao invés de quadro. Como o modelo de Tinnirello leva esses fatores (RTS e ACK) em conta no cálculo do tempo de colisão [152], o ganho do FDMR-MAC sobre o FD-MAC (η) não sofre grandes variações para diferentes valores de n . Ademais, é notável que η obteve seu maior valor em todos os cenários avaliados quando $p = 0,3$. Quando $p = 0,3$, o valor médio de η é igual a 1,426. Este resultado é consistente com o comportamento levantado na análise matemática acerca da motivação por trás do FDMR-MAC. No modelo simplificado descrito na Subseção 6.1.3, obteve-se $p_{max} \approx 0,42$. É importante mencionar que os resultados de η para $p = 0,4$ são bem próximos dos máximos, que foram obtidos com $p = 0,3$. Quando $p = 0,4$, o valor médio de η é igual a 1,425.

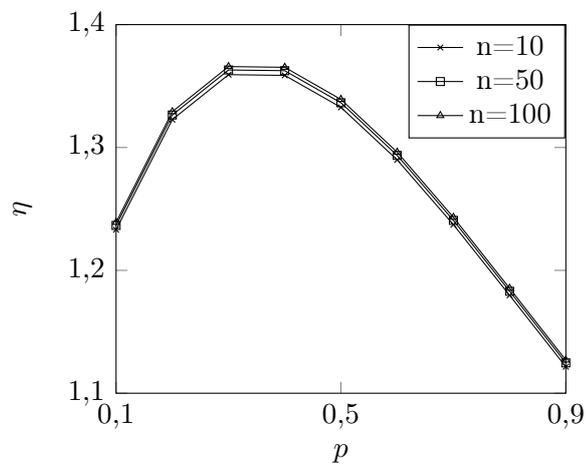
Com o objetivo de investigar cenários diferentes daquele em que a taxa de transmissão do canal (R_c) é igual a 6 Mbps, a mesma avaliação foi feita considerando essa taxa igual a 54 Mbps. Como mencionado anteriormente, para $R_c = 54$ Mbps, $\psi = 6$ para o FDMR-MAC. Os resultados de η para $R_c = 54$ Mbps e tamanhos de pacote de dados iguais a 256, 512 e 1024 bytes estão disponíveis na Figura 6.5. Para $P_{sz} = 256$, η alcançou até 1,72 (Figura 6.5a, $p = 0,2$, $n = 10$) e teve média de 1,51. Quando $P_{sz} = 512$, η alcançou até 1,72 (Figura 6.5b, $p = 0,2$, $n = 10$) e teve média de 1,51. Para $P_{sz} = 1024$, comportamento similar pode ser observado. Neste caso, η foi de até 1,67 (Figura 6.5c, $p = 0,2$, $n = 100$) e teve média de 1,48. É importante destacar que o FDMR-MAC teve melhor vazão de saturação que o FD-MAC em todos os casos avaliados. Uma análise similar àquela apresentada na Subseção 6.1.3 não foi realizada para $\psi = 6$ e $R_c = 54$



(a) $P_{sz} = 256$ bytes

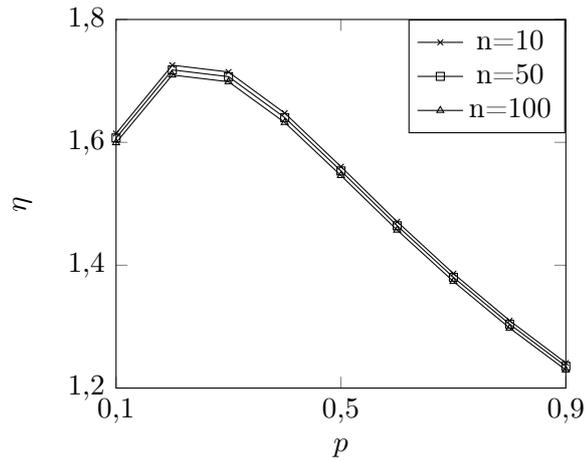


(b) $P_{sz} = 512$ bytes

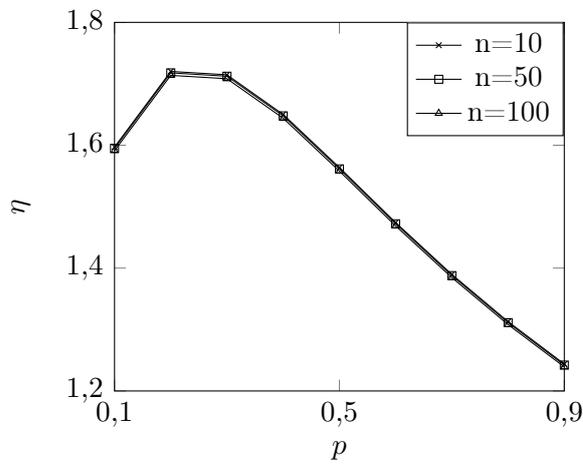


(c) $P_{sz} = 1024$ bytes

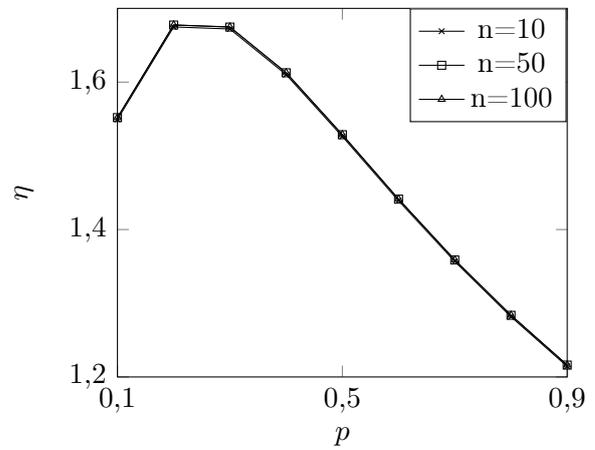
Figura 6.4: Valores de η para diversas probabilidades de se estabelecer uma comunicação bidirecional com taxa de transmissão do canal igual a 6 Mbps.



(a) $P_{sz} = 256$ bytes



(b) $P_{sz} = 512$ bytes



(c) $P_{sz} = 1024$ bytes

Figura 6.5: Valores de η para diversas probabilidades de se estabelecer uma comunicação bidirecional com taxa de transmissão do canal igual a 54 Mbps.

Mbps. À medida que ψ aumenta, a complexidade da análise também cresce. Isso ocorre pelo fato do grau do polinômio presente na Eq. (6.14) aumentar quando ψ cresce.

É notável que o FDMR-MAC tem uma melhoria de vazão de saturação maior para $R_c = 54$ Mbps do que para $R_c = 6$ Mbps. Isso ocorre devido à adição de $\psi - 1$ campos destino no cabeçalho ser menos onerosa para $R_c = 54$ Mbps do que para $R_c = 6$ Mbps. O crescimento de ψ favorece um aumento de vazão de saturação para o FDMR-MAC. Isso pode ser inferido a partir da Eq. (6.10) que evidencia que o crescimento de ψ implica no aumento de P_{sz} . Por sua vez, a vazão de saturação (S) é diretamente proporcional a P_{sz} , como já discutido na Subseção 6.1.3 e expresso na Eq. (6.2).

A avaliação de resultados apresentada reforça a expectativa da relevância do FDMR-MAC em comunicações *full-duplex*, uma vez que o FDMR-MAC foi capaz de melhorar a vazão de saturação em até 72% quando comparado com o FD-MAC. Encerrada a análise de resultados acerca do FDMR-MAC, será discutido o que de mais importante foi abordado neste capítulo.

6.3 Discussão

O presente capítulo discorreu sobre uma proposta de mecanismo que visa possibilitar uma melhor utilização do canal em comunicações *full-duplex*. A proposta em questão é denominada FDMR-MAC e tem como fundamento tentar aumentar a probabilidade de se estabelecer uma comunicação bidirecional. Assim, espera-se aumentar a vazão da rede, bem como a utilização do canal.

O FDMR-MAC baseia-se em pulso e tom para escolher o destino de uma comunicação dentre ψ candidatos. A partir de uma escolha apropriada do destino, um escalonamento de pacotes é feito de modo a maximizar a probabilidade de estabelecer uma comunicação bidirecional. As principais características, vantagens e premissas relacionadas ao FDMR-MAC foram explicadas em detalhes neste capítulo. Além disso, foi introduzida uma motivação matemática mostrando a relação entre o aumento da probabilidade de se estabelecer uma comunicação bidirecional e o crescimento da quantidade de dados transmitidos por comunicação.

Analisou-se o valor de ψ ideal para determinados conjuntos de parâmetros, permitindo inferir algumas tendências acerca do FDMR-MAC. Ademais, foi feita uma comparação do FDMR-MAC com o FD-MAC em termos de vazão de saturação. A comparação realizada mostrou ganhos significativos de vazão de saturação decorrentes do uso do FDMR-MAC, evidenciando sua relevância e seu potencial. É importante mencionar que o FDMR-MAC é fruto de uma evolução de uma proposta inicial com mesmo objetivo, denominada FDDS-MAC (*Full-Duplex Dynamic Scheduling MAC*) [49]. Embora tenha sido desenvolvida no âmbito deste trabalho de doutorado, a técnica FDDS-MAC não será detalhada por ser uma proposta preliminar ao FDMR-MAC. A proposta do FDDS-MAC culminou na publicação de um artigo de conferência [49] (Qualis – A2). Por sua vez, foi elaborado um artigo explicando em detalhes o FDMR-MAC, e o mesmo foi aceito, mas ainda não publicado. Finalizada a apresentação das propostas e resultados desta tese, serão expostas as considerações finais deste trabalho no capítulo que se segue.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este capítulo tem por objetivo realizar uma conclusão do presente trabalho. Tal conclusão consiste da realização de uma breve revisão do que mais relevante foi apresentado ao longo deste trabalho. Além disso, serão descritas as principais contribuições deste trabalho. Por fim, será apresentada uma discussão a respeito de possíveis trabalhos futuros a serem realizados.

Neste trabalho, foi feito um estudo no que concerne a redes sem fio e comunicações *full-duplex*. Primeiramente, no Capítulo 1, foram apresentados os objetivos, a justificativa e a metodologia empregada neste trabalho. O estudo em si sobre redes sem fio é iniciado no Capítulo 2, em que é exposto um levantamento sobre os tipos de protocolos de controle de acesso ao meio em redes sem fio. Entre estes protocolos, destaca-se o padrão IEEE 802.11 [63] que é utilizado em larga escala em redes sem fio, sendo usado como base por vários outros protocolos. O Capítulo 2 descreve ainda vários modelos matemáticos existentes na literatura para avaliar os protocolos de controle de acesso ao meio sob variadas condições. O referido capítulo trata essencialmente de aspectos relacionados a comunicações *half-duplex*. Por sua vez, o Capítulo 3 introduz uma discussão sobre os tipos de comunicações existentes, explicando as vantagens e desafios impostos pela utilização de comunicações *full-duplex*. No referido capítulo, é apresentada ainda uma taxonomia de protocolos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*. É realizado ainda um levantamento do estado da arte, detalhando vários protocolos deste tipo, classificando-os segundo os critérios disponíveis na taxonomia apresentada. Com base na comparação entre estes protocolos, disponível na Tabela 3.1, foram identificadas algumas possíveis melhorias no que concerne à redução do tempo da comunicação e ao melhor aproveitamento do meio alocado durante uma comunicação *full-duplex*.

A partir do estudo comparativo entre protocolos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*, o Capítulo 4 propõe a técnica de controle de acesso ao meio, denominada FDT-MAC. O FDT-MAC baseia-se no emprego de sinais pulso e tom em lugar de quadros para tornar mais eficiente o processo de reserva de canal. Para poder avaliar o impacto do FDT-MAC, são propostos modelos matemáticos para o cálculo da vazão, sendo extensões dos modelos descritos no Capítulo 2. Por sua vez, os modelos propostos no Capítulo 4 levam em consideração características das comunicações *full-duplex*, tais como a auto-interferência e o fato de mais de um quadro de dados poder ser enviado simultaneamente em uma comunicação entre dois nós. Assim, o FDT-MAC foi avaliado sob diversas condições: sem colisões, em redes saturadas e também considerando o im-

Tabela 7.1: Comparação das características dos protocolos, incluindo aqueles que foram contribuições deste trabalho de doutorado.

Protocolo	Arquitetura	Controle	Acesso	Topologia	Canais	Sincronismo	Avaliação	Métrica
CSMA/CAD	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	–	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
FuMAC	Distribuído	Tom	Disputa	Bidirecional	Único	Semi-Síncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD+	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Bidirecional	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
Janus	Centralizado	–	Fatia de tempo	Genérico	Único	Síncrono	Experimental	Vazão e Justiça
ContraFlow	Distribuído	Tom	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD-MAC [134]	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada e Experimental	Vazão
FD-MAC [38]	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Bidirecional	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão
MASTaR	Distribuído	RTS/CTS	Disputa	Encaminhamento	Único	Assíncrono	Simulada	Vazão e Justiça
FD-MMAC	Distribuído	<i>Beacon</i>	Disputa	–	Múltiplos	Assíncrono	Simulada e Analítica	Vazão e Justiça
FD-MAC [172]	Distribuído	RTS/FCTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
<i>Energy-FDM</i>	Distribuído	RTS/FCTS	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão e Energia
S-CW FD	Distribuído	Tom	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Simulada e Analítica	Vazão
FDT-MAC	Distribuído	Tom	Disputa	Genérico	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão
FDMR-MAC	Distribuído	ERTS/Tom	Disputa	Bidirecional	Único	Assíncrono	Analítica	Vazão

pacto da auto-interferência. Nas várias avaliações disponíveis na Seção 4.2, o FDT-MAC apresenta ganhos de vazão consideráveis quando comparado com o FD-MAC [172]. Os referidos ganhos em termos de vazão alcançam até 82,68%, 149% e 216% nos cenários sem colisão, em redes saturadas e com auto-interferência, respectivamente. Além disso, o FDT-MAC foi comparado com a versão do padrão IEEE 802.11 projetado para comunicações *half-duplex* (HD-MAC). O FDT-MAC apresentou ganhos maiores que 100%, neste caso. Isso mostra que o FDT-MAC consegue aproveitar o potencial das comunicações *full-duplex*, uma vez que com estas comunicações espera-se obter uma vazão ao menos duas vezes maior que com as *half-duplex*, conforme descrito no Capítulo 3.

O Capítulo 5 analisa o impacto do tamanho dos quadros em comunicações *full-duplex*, e propõe uma política de alocação de tamanho de quadros que reduz a ociosidade do meio. A referida política é acoplada ao FDT-MAC e avaliada com o auxílio dos modelos propostos no Capítulo 4. Nas avaliações realizadas no Capítulo 5, obtém-se melhorias significativas no que tange à vazão. O FDT-MAC acoplado à política de alocação de tamanho de quadros proposta no Capítulo 5 atinge ganho de até 63% em termos de vazão quando comparado com o FDT-MAC original.

Este trabalho de doutorado propõe ainda mais um mecanismo de controle de acesso ao meio, com o objetivo de melhorar utilização do canal em comunicações *full-duplex*. O Capítulo 6 descreve a proposta do FDMR-MAC e sua motivação. O FDMR-MAC emprega uma técnica inovadora de reserva de canal aliada a escalonamento de quadros de dados com o objetivo de elevar a probabilidade p de ocorrerem comunicações em que os nós emissor e receptor possuem quadros de dados a serem transmitidos um ao outro. Assim, é possível melhorar a utilização do canal em comunicações *full-duplex*, impactando

na vazão. No Capítulo 6, o FDMR-MAC é comparado com o FD-MAC, em termos de vazão. Nos cenários investigados, o FDMR-MAC atinge ganho de até 72%, indicando sua relevância em comunicações *full-duplex*. Por fim, pode-se citar as seguintes contribuições deste trabalho de doutorado:

1. Extensão de modelos matemáticos de comunicações *half-duplex* para que também possam ser usados de modo apropriado em comunicações *full-duplex*. Vale ressaltar que isso foi feito levando em conta as características das comunicações *full-duplex*, tais como o nível de auto-interferência enfrentado, além do fato de se poder enviar mais de um quadro de dados simultaneamente em uma comunicação entre dois nós;
2. Mecanismo FDT-MAC de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* que reduz o tempo despendido em uma comunicação, por meio de uma reserva de canal eficiente. Assim, o FDT-MAC é capaz de elevar significativamente a vazão da rede, conforme exposto em detalhes nos Capítulo 4 e 5;
3. Técnica FDMR-MAC de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex* que aumenta a probabilidade p de ocorrerem comunicações em que os nós emissor e receptor possuam quadros de dados a serem transmitidos um ao outro. Desta forma, o FDMR-MAC pode aproveitar melhor o recurso alocado para uma comunicação, impactando no crescimento da vazão, conforme discutido no Capítulo 6.

As contribuições do trabalho relacionadas a protocolos de controle de acesso ao meio projetados para comunicações *full-duplex* foram adicionadas à Tabela 3.1, gerando a Tabela 7.1. Esta tabela descreve as características principais das contribuições deste trabalho, FDT-MAC e FDMR-MAC. Assim, é possível se ter um panorama geral da comparação das características dos protocolos de controle de acesso ao meio para comunicações *full-duplex*. É importante mencionar que o trabalho corrente culminou em publicações e há artigos em processo de revisão. Uma listagem da situação das publicações relacionadas a este trabalho é apresentada a seguir.

Artigos Publicados:

1. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. An efficient MAC scheme for full-duplex communications on wireless networks. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
2. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. FDT-MAC: Reduzindo a latência das comunicações full-duplex em redes móveis sem fio. In *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 211–224. SBC, 2018.
3. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. A Full-Duplex MAC Tailored for 5G Wireless Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018(1):944–961, 2018.
4. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. FDDS-MAC: Enhancing spectrum usage on full-duplex communications in 5G mobile wireless networks. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 268–273. IEEE, 2018.

5. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. FDT-MAC: Reduzindo a latência das comunicações full-duplex em redes móveis sem fio/FDT-MAC: Reducing the Delay of Full-Duplex Communications on Mobile Wireless Networks. *Brazilian Journal of Development*, 5(11):23288–23306, 2019.

Artigos Aceitos para Publicação:

1. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. Improving spectrum usage on full-duplex communications with an innovative channel reservation. In *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2020 The 34th International Conference on*. Springer, 2020.
2. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. Uso eficiente do canal em comunicações full-duplex através de uma reserva de canal inovadora. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. SBC, 2020.

Artigo em Processo de Revisão:

1. Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. A full-duplex MAC technique to improve spectrum-efficiency on 5G mobile wireless networks. *Computer Communications*, 2020.

No que concerne a trabalhos futuros, seria relevante parametrizar um limiar para o modo uniforme de dados do FDT-MAC, com base no tráfego da rede. Dessa forma, seria possível decidir qual a melhor política de alocação de tamanho do quadro de dados dinamicamente.

Está em curso um estudo no FDMR-MAC para eliminar o tempo de espera ($T_{sync} = 5\mu s$) que o nó destino necessita para ter a confirmação de que ele foi realmente o selecionado. Uma possível forma é organizar as comunicações tal que os ψ destinatários sejam vizinhos entre si, de modo que eles conheçam as ψ respostas enviada ao nó emissor. Assim, todos os ψ nós já saberiam qual seria o destino selecionado, evitando esse tempo de espera. Com esta melhoria, espera-se tornar o FDMR-MAC ainda mais eficiente, pois isso faria com que o k apresentado na Eq. (6.9) fosse igual a zero.

Outro aspecto interessante que pode ser melhorado no FDMR-MAC é o de prever ou obter dinamicamente as seguintes informações: tamanho do quadro de dados (P_{sz}); quantidade de nós vizinhos (n); probabilidade de se estabelecer uma comunicação bidirecional (p). Se estes valores fossem conhecidos previamente com uma precisão alta, um nó poderia decidir de modo adequado se vale a pena utilizar o FDMR-MAC e qual o valor ideal de ψ a ser utilizado. Caso o ψ ideal seja igual a um, vale mais a pena a utilização do FDT-MAC ao invés do FDMR-MAC, uma vez que o primeiro não usa um quadro como o ERTS na reserva de canal. Estes valores (P_{sz} , p e n) poderiam ser estimados com base no tráfego da rede ou por meio de um mecanismo *cross-layer*. Por exemplo, tal mecanismo *cross-layer* poderia se valer de informações relacionadas ao roteamento.

O FDT-MAC e o FDMR-MAC visam melhorar a vazão obtida e possuem ganhos significativos em comparação com o FD-MAC [172]. Entretanto, de acordo com as condições do tráfego da rede, pode ser mais interessante o uso de um ou de outro. Dessa forma, uma parametrização no sentido de auxiliar a decidir quando é mais vantajoso o uso do

FDT-MAC ou do FDMR-MAC seria uma relevante contribuição ao que fora apresentado neste trabalho de doutorado. Avaliações das técnicas propostas no que tange a outras métricas, tais como consumo de energia em experimentos, simulações ou modelos matemáticos também são considerados possíveis trabalhos futuros. Por fim, é importante mencionar que os *scripts* desenvolvidos para obtenção dos resultados descritos ao longo deste trabalho estão disponíveis no endereço indicado em [50].

Referências

- [1] Norman Abramson. THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications. In *Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference*, pages 281–285. ACM, 1970.
- [2] Atul Adya, Paramvir Bahl, Jitendra Padhye, Alec Wolman, and Lidong Zhou. A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks. In *First international conference on broadband networks*, pages 344–354. IEEE, 2004.
- [3] Ahn, Hyeongtae and Lee, Jiseon and Kim, Cheeha and Suh, Young-Joo. Frequency domain coordination MAC protocol for full-duplex wireless networks. *IEEE Communications Letters*, 23(3):518–521, 2019.
- [4] Ahn, Hyeongtae and Park, Young Deok and Kim, Dongwan and Suh, Young-Joo. A Full-Duplex MAC Protocol Based on Buffer Status Report for Successive Full-Duplex Link Setup. *IEEE Communications Letters*, 23(9):1506–1509, 2019.
- [5] Al-Kadri, M Omar and Aijaz, Adnan and Nallanathan, Arumugam. An energy-efficient full-duplex MAC protocol for distributed wireless networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(1):44–47, 2016.
- [6] Al-Mefleh, Haithem and Al-Kofahi, Osameh. Frequency-domain contention and polling MAC protocols in IEEE 802.11 wireless networks: A survey. *Computer Communications*, 129:1–18, 2018.
- [7] Mansoor Alicherry, Randeep Bhatia, and Li Erran Li. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 58–72. ACM, 2005.
- [8] Farshid Alizadeh-Shabdiz and Suresh Subramaniam. Analytical models for single-hop and multi-hop ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 11(1):75–90, 2006.
- [9] Khaled Hatem Almotairi and Xuemin Shen. Mmac-hr: Multi-channel medium access control with hopping reservation for multi-hop wireless networks. In *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [10] A. Amiri Sani, L. Zhong, and A. Sabharwal. Directional antenna diversity for mobile devices: characterizations and solutions. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 221–232. ACM, 2010.

- [11] Amjad, Muhammad and Akhtar, Fayaz and Rehmani, Mubashir Husain and Reisslein, Martin and Umer, Tariq. Full-duplex communication in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4):2158–2191, 2017.
- [12] Paramvir Bahl, Ranveer Chandra, and John Dunagan. SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks. In *Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 216–230. ACM, 2004.
- [13] Nicola Baldo, Alfred Asterjadhi, and Michele Zorzi. Multi-channel medium access using a virtual network coded control channel. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, pages 1000–1005. ACM, 2009.
- [14] Raef Bassily and Sennur Ulukus. Secure communication in multiple relay networks through decode-and-forward strategies. *Journal of Communications and Networks*, 14(4):352–363, 2012.
- [15] Thomas Bayes. LII. An essay towards solving a problem in the doctrine of chances. By the late Rev. Mr. Bayes, FRS communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, AMFR S. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 53:370–418, 1763.
- [16] Boris Bellalta, Jaume Barcelo, Dirk Staehle, Alexey Vinel, and Miquel Oliver. On the performance of packet aggregation in IEEE 802.11 ac MU-MIMO WLANs. *IEEE Communications Letters*, 16(10):1588–1591, 2012.
- [17] Dimitri P Bertsekas, Robert G Gallager, and Pierre Humblet. *Data networks*, volume 2. Prentice-Hall International New Jersey, 1992.
- [18] Dinesh Bharadia, Emily McMilin, and Sachin Katti. Full duplex radios. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 43(4):375–386, 2013.
- [19] Giuseppe Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 18(3):535–547, 2000.
- [20] Boccardi, Federico and Heath, Robert W and Lozano, Angel and Marzetta, Thomas L and Popovski, Petar. Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):74–80, 2014.
- [21] Marcos F Caetano, Bruno F Lourenco, and Jacir L Bordim. On the performance of the IEEE 802.11 in a multi-channel environment. In *2013 22nd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, pages 1–7. IEEE, 2013.
- [22] John Capetanakis. Generalized TDMA: The multi-accessing tree protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 27(10):1476–1484, 1979.
- [23] John I Capetanakis. Tree algorithms for packet broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 25:505–515, 1979.

- [24] Jenhui Chen, Shiann-Tsong Sheu, and Chin-An Yang. A new multichannel access protocol for IEEE 802.11 ad hoc wireless LANs. In *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003.*, volume 3, pages 2291–2296. IEEE, 2003.
- [25] Wen-Tsuen Chen, Jen-Chu Liu, Ting-Kai Huang, and Yu-Chu Chang. TAMMAC: An adaptive multi-channel MAC protocol for MANETs. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(11):4541–4545, 2008.
- [26] Wenchi Cheng, Xi Zhang, and Hailin Zhang. Full/half duplex based resource allocations for statistical quality of service provisioning in wireless relay networks. In *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, pages 864–872. IEEE, 2012.
- [27] Wenchi Cheng, Xi Zhang, and Hailin Zhang. RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks. In *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 5017–5022. IEEE, 2013.
- [28] Harshal S Chhaya and Sanjay Gupta. Performance modeling of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless networks*, 3(3):217–234, 1997.
- [29] Jung Il Choi, Mayank Jain, Kannan Srinivasan, Phil Levis, and Sachin Katti. Achieving single channel, full duplex wireless communication. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 1–12. ACM, 2010.
- [30] Yang-Seok Choi and Hooman Shirani-Mehr. Simultaneous transmission and reception: Algorithm, design and system level performance. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(12):5992–6010, 2013.
- [31] Davi da Silva Brilhante and José Ferreira de Rezende. Protocolos Multibanda para Descoberta de Vizinhança em Redes Ad Hoc de Ondas Milimétricas. In *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 491–504. SBC, 2018.
- [32] Alan Demers, Srinivasan Keshav, and Scott Shenker. Analysis and simulation of a fair queueing algorithm. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 19(4):1–12, 1989.
- [33] Marco Di Felice, Guomei Zhu, and Luciano Bononi. Future channel reservation medium access control (FCR-MAC) protocol for multi-radio multi-channel wireless mesh networks. In *Proceedings of the 5th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pages 71–79. ACM, 2008.
- [34] Dibaei, Mahdi and Ghaffari, Ali. Full-duplex medium access control protocols in wireless networks: a survey. *Wireless Networks*, 26:1–19, 2020.
- [35] Robert Dorfman. The detection of defective members of large populations. *The Annals of Mathematical Statistics*, 14(4):436–440, 1943.

- [36] Duan, Rongchang and Zhao, Qinglin and Zhang, Hanwen and Zhang, Yujun and Li, Zhongcheng. PQ-MAC: Exploiting Bidirectional Transmission Opportunities via Leveraging Peers' Queuing Information for Full-Duplex WLAN. In *2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [37] Melissa Duarte and Ashutosh Sabharwal. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results. In *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, pages 1558–1562. IEEE, 2010.
- [38] Melissa Duarte, Ashutosh Sabharwal, Vaneet Aggarwal, Rittwik Jana, KK Ramakrishnan, Christopher W Rice, and NK Shankaranarayanan. Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for WiFi networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(3):1160–1177, 2013.
- [39] Paal E Engelstad and Olav N Osterbo. Analysis of the total delay of ieee 802.11 e edca and 802.11 dcf. In *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 552–559. IEEE, 2006.
- [40] Mustafa Ergen and Pravin Varaiya. Throughput analysis and admission control for IEEE 802.11a. *Mobile networks and Applications*, 10(5):705–716, 2005.
- [41] Evan Everett, Melissa Duarte, Chris Dick, and Ashutosh Sabharwal. Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity. In *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pages 2002–2006. IEEE, 2011.
- [42] Garcia-Luna-Aceves, JJ. Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance and Detection. In *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 53–61. ACM, 2017.
- [43] M. Gast. *802.11 wireless networks: the definitive guide*. O'Reilly Media, 2002.
- [44] Xiaohu Ge, Song Tu, Guoqiang Mao, Cheng-Xiang Wang, and Tao Han. 5G ultra-dense cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 23(1):72–79, 2016.
- [45] G. Giorgetti, S. Maddio, A. Cidronali, SKS Gupta, and G. Manes. Switched beam antenna design principles for angle of arrival estimation. In *Wireless Technology Conference, 2009. EuWIT 2009. European*, pages 5–8. IEEE, 2009.
- [46] Kiran T Gowda, Tony QS Quek, and Hyundong Shin. Secure diversity-multiplexing tradeoffs in MIMO relay channels. In *2009 IEEE International Symposium on Information Theory*, pages 1433–1437. IEEE, 2009.
- [47] Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. A Full-Duplex MAC Tailored for 5G Wireless Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018(1):944–961, 2018.

- [48] Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. An efficient MAC scheme for full-duplex communications on wireless networks. In *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [49] Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. FDDS-MAC: Enhancing spectrum usage on full-duplex communications in 5G mobile wireless networks. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 268–273. IEEE, 2018.
- [50] Lucas de M Guimarães. <https://github.com/lucasmgcic/scripts>. Acesso em: 29 de março de 2020.
- [51] Lucas de M Guimarães and Jacir L Bordim. FDT-MAC: Reduzindo a latência das comunicações full-duplex em redes móveis sem fio. In *Anais do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 211–224. SBC, 2018.
- [52] Lucas de M Guimarães, Jacir L Bordim, and Koji Nakano. Using pulse/tone signals as an alternative to boost channel reservation on directional communications. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 98(8):1647–1656, 2015.
- [53] Lucas de M Guimarães and Jacir Luiz Bordim. Directional pulse/tone based channel reservation. In *Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2013 IEEE 27th International Conference on*, pages 276–283. IEEE, 2013.
- [54] Ajay Chandra V Gummalla and John O Limb. Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 3(2):2–15, 2000.
- [55] Zygmunt J Haas and Jing Deng. Dual busy tone multiple access (DBTMA)-a multiple access control scheme for ad hoc networks. *IEEE transactions on communications*, 50(6):975–985, 2002.
- [56] Nasreddine Hajlaoui, Issam Jabri, and Maher Ben Jemaa. An accurate two dimensional Markov chain model for IEEE 802.11n DCF. *Wireless Networks*, 24(4):1019–1031, 2018.
- [57] Chong Han, Mehrdad Dianati, Rahim Tafazolli, and Ralf Kernchen. Asynchronous multi-channel MAC for vehicular ad hoc networks. In *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pages 109–115. IEEE, 2011.
- [58] Ji Hayes. An adaptive technique for local distribution. *IEEE Transactions on Communications*, 26(8):1178–1186, 1978.
- [59] Minnie Ho, John M Cioffi, and John AC Bingham. Discrete multitone echo cancellation. *IEEE Transactions on Communications*, 44(7):817–825, 1996.
- [60] Alex Chia-Chun Hsu, David SL Wei, and C-C Jay Kuo. Dynamic spectrum access mac for multi-channel ad-hoc networks. In *2011 IFIP Wireless Days (WD)*, pages 1–6. IEEE, 2011.

- [61] Wing-Chung Hung, KL Eddie Law, and A Leon-Garcia. A dynamic multi-channel MAC for ad hoc LAN. In *Proc. 21st Biennial symposium on communications*, pages 31–35, 2002.
- [62] IEEE. Token Ring Access Method and Physical Layer Specification. IEEE Standard 802.5, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Dezembro 1989.
- [63] IEEE. IEEE Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks - specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Standard 802.11, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Dezembro 2007.
- [64] Kamal Jain, Jitendra Padhye, Venkata N Padmanabhan, and Lili Qiu. Impact of interference on multi-hop wireless network performance. *Wireless networks*, 11(4):471–487, 2005.
- [65] Mayank Jain, Jung Il Choi, Taemin Kim, Dinesh Bharadia, Siddharth Seth, Kannan Srinivasan, Philip Levis, Sachin Katti, and Prasun Sinha. Practical, real-time, full duplex wireless. In *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 301–312. ACM, 2011.
- [66] Hyungju Ji, Sunho Park, Jeongho Yeo, Younsun Kim, Juho Lee, and Byonghyo Shim. Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects. *IEEE Wireless Communications*, 25(3):124–130, 2018.
- [67] J. Jun, P. Peddabachagari, and M. Sichitiu. Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications. In *Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, 2003. (NCA 2003)*, pages 249–256. IEEE, 2003.
- [68] Elli Kartsakli, J Alonso-Zarate, Alex Cateura, C Verikoukis, and Luis Alonso. *Contention-Based Collision-Resolution Medium Access Control Algorithms*. Nova Science Pub Inc, 2009.
- [69] Frank P Kelly, Aman K Maulloo, and David KH Tan. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research society*, 49(3):237–252, 1998.
- [70] Amir K Khandani. Two-way (true full-duplex) wireless. In *2013 13th Canadian Workshop on Information Theory*, pages 33–38. IEEE, 2013.
- [71] Evgeny Khorov, Anton Kiryanov, Andrey Lyakhov, and Giuseppe Bianchi. A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1):197–216, 2018.
- [72] Byung Soo Kim, Ho Young Hwang, and Dan Keun Sung. Effect of frame aggregation on the throughput performance of IEEE 802.11n. In *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1740–1744. IEEE, 2008.

- [73] Jae Young Kim, Omid Mashayekhi, Hang Qu, Maria Kazandjieva, and Philip Levis. Janus: A novel MAC protocol for full duplex radio. Technical report, Stanford University, 2013.
- [74] Joonsuk Kim and Inkyu Lee. 802.11 WLAN: history and new enabling MIMO techniques for next generation standards. *IEEE Communications Magazine*, 53(3):134–140, 2015.
- [75] Seongwon Kim, Min Soo Sim, Chan-Byoung Chae, and Sunghyun Choi. Asymmetric simultaneous transmit and receive in WiFi networks. *IEEE Access*, 5:14079–14094, 2017.
- [76] Taewoon Kim, Jaeseon Hwang, and Hyuk Lim. Distributed semi-synchronous channel coordination for multi-channel wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 11(1):368–382, 2013.
- [77] Kim, Dongkyu and Lee, Haesoon and Hong, Daesik. A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of PHY and MAC layers. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2017–2046, 2015.
- [78] Kiran, Rama and Mehta, Neelesh B and Thomas, Jestin. Design and Network Topology-Specific Renewal-Theoretic Analysis of a MAC Protocol for Asymmetric Full-Duplex WLANs. *IEEE Transactions on Communications*, 67(12):8532–8544, 2019.
- [79] L. Kleinrock and F. Tobagi. Packet switching in radio channels: Part I—carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE transactions on Communications*, 23(12):1400–1416, 1975.
- [80] Murali Kodialam and Thyaga Nandagopal. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. In *Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 73–87. ACM, 2005.
- [81] S. Kumar, V.S. Raghavan, and J. Deng. Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 4(3):326–358, 2006.
- [82] Tung-Wei Kuo, Kate Ching-Ju Lin, and Ming-Jer Tsai. On the construction of data aggregation tree with minimum energy cost in wireless sensor networks: NP-completeness and approximation algorithms. *IEEE Transactions on Computers*, 65(10):3109–3121, 2016.
- [83] James F Kurose and Keith W Ross. *Computer networking: a top-down approach: international edition*. Pearson Higher Ed, 2013.
- [84] Simon S Lam. A carrier sense multiple access protocol for local networks. *Computer Networks*, 4(1):21–32, 1980.
- [85] Tho Le-Ngoc and Ahmed Masmoudi. *Self-interference Cancellation for Full-duplex Wireless Communication Systems*. Springer, 2017.

- [86] Henuchul Lee, Byeongsi Lee, and Inkyu Lee. Iterative detection and decoding with an improved V-BLAST for MIMO-OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 24(3):504–513, 2006.
- [87] J. Lee, D. Kim, C. K. Toh, T. Kwon, and Y. Choi. A Table-driven AOA Estimation Algorithm for Switched-beam Antennas in Wireless Networks. In *11th European Wireless Conference 2005-Next Generation Wireless and Mobile Communications and Services (European Wireless)*, pages 1–6. VDE, 2005.
- [88] Jiwoong Lee, Jeonghoon Mo, Tran Minh Trung, Jean Walrand, and Hoi-Sheung Wilson So. Design and analysis of a cooperative multichannel MAC protocol for heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(7):3536–3548, 2010.
- [89] Kyu-Haeng Lee and Joon Yoo. Performance of the full-duplex MAC protocol in non-saturated conditions. *IEEE Communications Letters*, 21(8):1827–1830, 2017.
- [90] Ruizhi Liao, Boris Bellalta, and Miquel Oliver. Modelling and enhancing full-duplex mac for single-hop 802.11 wireless networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(4):349–352, 2015.
- [91] Yun Liao, Lingyang Song, and Zhu Han. *Listen and talk: full-duplex cognitive radio networks*. Springer, 2016.
- [92] Yun Liao, Tianyu Wang, Lingyang Song, and Zhu Han. Listen-and-talk: Full-duplex cognitive radio networks. In *2014 IEEE Global Communications Conference*, pages 3068–3073. IEEE, 2014.
- [93] J.C. Liberti and T.S. Rappaport. *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [94] Gang Liu, F Richard Yu, Hong Ji, Victor CM Leung, and Xi Li. In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2):500–524, 2015.
- [95] Wei Liu, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Yoshitaka Shimizu, and Tomoaki Kumagai. A novel gateway selection method to maximize the system throughput of wireless mesh network deployed in disaster areas. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, pages 771–776. IEEE, 2012.
- [96] Luvisotto, Michele and Sadeghi, Alireza and Lahouti, Farshad and Vitturi, Stefano and Zorzi, Michele. RCFD: A frequency-based channel access scheme for full-duplex wireless networks. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [97] J. Ma, H. Sekiya, A. Nagasaki, N. Komuro, and S. Sakata. MAC Protocol for Ad Hoc Networks Using Smart Antennas for Mitigating Hidden and Deafness Problems. *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, E95-B(11):3545–3555, 2012.

- [98] Ma, Zhijie and Zhao, Qinglin and Zhang, Huan. Providing Differentiated Services for Full-Duplex Wireless LANs. In *International Conference on Mobile and Wireless Technology*, pages 65–74. Springer, 2017.
- [99] Eugenio Magistretti, Krishna Kant Chintalapudi, Bozidar Radunovic, and Ramachandran Ramjee. WiFi-Nano: reclaiming WiFi efficiency through 800 ns slots. In *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 37–48. ACM, 2011.
- [100] Ritesh Maheshwari, Himansho Gupta, and Samir R Das. Multichannel MAC protocols for wireless networks. In *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, volume 2, pages 393–401. IEEE, 2006.
- [101] Megha Maiya and Bechir Hamdaoui. An improved IEEE 802.11 MAC protocol for wireless ad-hoc networks with multi-channel access capabilities. In *2011 International Conference on High Performance Computing & Simulation*, pages 162–168. IEEE, 2011.
- [102] Marko Malajner, Peter Planinsic, and Dušan Gleich. Angle of arrival estimation using rssi and omnidirectional rotatable antennas. *IEEE Sensors Journal*, 12(6):1950–1957, 2012.
- [103] Guoqiang Mao, Brian DO Anderson, and Barış Fidan. Path loss exponent estimation for wireless sensor network localization. *Computer Networks*, 51(10):2467–2483, 2007.
- [104] Andrei Andreevich Markov. Rasprostranenie zakona bol’shih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga. *Izvestiya Fiziko-matematicheskogo obschestva pri Kazanskom universitete*, 15(135-156):18, 1906.
- [105] Marlalı, Deniz and Gürbüz, Özgür. S-CW FD: A MAC protocol for full-duplex in wireless local area networks. In *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [106] Marlalı, Deniz and Gurbuz, Ozgur. Design and performance analysis of a full-duplex MAC protocol for wireless local area networks. *Ad Hoc Networks*, 67:53–67, 2017.
- [107] James L Massey. Collision-resolution algorithms and random-access communications. In *Multi-user communication systems*, pages 73–137. Springer, 1981.
- [108] Robert M Metcalfe and David R Boggs. Ethernet: Distributed packet switching for local computer networks. *Communications of the ACM*, 19(7):395–404, 1976.
- [109] Jeonghoon Mo, Hoi-Sheung Wilson So, and Jean Walrand. Comparison of multichannel MAC protocols. *IEEE Transactions on mobile computing*, 7(1):50–65, 2008.
- [110] P. Mohapatra and S. Krishnamurthy. *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*. Springer, 2005.

- [111] Mart L Molle and George C Polyzos. Conflict resolution algorithms and their performance analysis. *University of Toronto, CS93-300, Tech. Rep*, 1993.
- [112] Murthy, C Siva Ram and Manoj, BS. *Ad hoc wireless networkd: Architestures and protocols*. Pearson Education India, 2004.
- [113] Ngoc-Tu Nguyen, Bing-Hong Liu, Shao-I Chu, and Hao-Zhe Weng. Challenges, Designs, and Performances of a Distributed Algorithm for Minimum-Latency of Data-Aggregation in Multi-Channel WSNs. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 16(1):192–205, 2019.
- [114] T.S. Nunnikhoven. A birthday problem solution for nonuniform birth frequencies. *The American Statistician*, 46(4):270–274, 1992.
- [115] Maddalena Nurchis and Boris Bellalta. Target Wake Time: Scheduled access in IEEE 802.11ax WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 26(2):142–150, 2019.
- [116] Chinaemerem David Nwankwo, Lei Zhang, Atta Quddus, Muhammad Ali Imran, and Rahim Tafazolli. A survey of self-interference management techniques for single frequency full duplex systems. *IEEE Access*, 6:30242–30268, 2018.
- [117] Eng Hwee Ong, Jarkko Knecht, Olli Alanen, Zheng Chang, Toni Huovinen, and Timo Nihtilä. IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs. In *Personal indoor and mobile radio communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd international symposium on*, pages 849–853. IEEE, 2011.
- [118] Eng Hwee Ong, Jarkko Knecht, Olli Alanen, Zheng Chang, Toni Huovinen, and Timo Nihtilä. IEEE 802.11 ac: Enhancements for very high throughput WLANs. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pages 849–853. IEEE, 2011.
- [119] Hyunhee Park, Yongsun Kim, Taewon Song, and Sangheon Pack. Multiband directional neighbor discovery in self-organized mmwave ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(3):1143–1155, 2014.
- [120] Przemyslaw Pawelczak, Sofie Pollin, Hoi-Sheung Wilson So, Ali Motamedi, Ahmad Bahai, R Venkatesha Prasad, and Ramin Hekmat. State of the art in opportunistic spectrum access medium access control design. In *2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [121] Kieu-Ha Phung, Bart Lemmens, Marnix Goossens, Ann Nowe, Lan Tran, and Kris Steenhaut. Schedule-based multi-channel communication in wireless sensor networks: A complete design and performance evaluation. *Ad Hoc Networks*, 26:88–102, 2015.
- [122] Jarmo Prokkola. Opnet-network simulator. URL http://www.telecomlab.oulu.fi/kurssit/521365A_tietoliikennetekniikan_simuloinnit_ja_tyokalut/Opnet_esittely, 7, 2006.

- [123] Qiao Qu, Bo Li, Mao Yang, Zhongjiang Yan, Annan Yang, Der-Jiunn Deng, and Kwang-Cheng Chen. Survey and performance evaluation of the Upcoming Next Generation WLAN Standard - IEEE 802.11ax. *Mobile Networks and Applications*, 24(5):1461–1474, 2019.
- [124] R. Ramanathan. Antenna Beamforming and Power Control for Ad Hoc Networks. In *Mobile ad hoc networking*, volume 1, chapter 5, pages 139–173. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [125] Ashish Raniwala and Tzi-cker Chiueh. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. In *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, volume 3, pages 2223–2234. IEEE, 2005.
- [126] Ashish Raniwala, Kartik Gopalan, and Tzi-cker Chiueh. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 8(2):50–65, 2004.
- [127] Theodore S Rappaport. *Wireless communications: Principles and Practice*, volume 2. Prentice Hall, 2002.
- [128] Taneli Riihonen, Stefan Werner, and Risto Wichman. Comparison of full-duplex and half-duplex modes with a fixed amplify-and-forward relay. In *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [129] Lawrence G Roberts. ALOHA packet system with and without slots and capture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 5(2):28–42, 1975.
- [130] Wonil Roh, Ji-Yun Seol, Jeongho Park, Byunghwan Lee, Jaekon Lee, Yungsoo Kim, Jaeweon Cho, Kyungwhoon Cheun, and Farshid Aryanfar. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):106–113, 2014.
- [131] Raphael Rom and Moshe Sidi. *Multiple access protocols: performance and analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [132] Gabriel Ruget. Some tools for the study of channel-sharing algorithms. In *Multi-user communication systems*, pages 201–231. Springer, 1981.
- [133] Ashutosh Sabharwal, Philip Schniter, Dongning Guo, Daniel W Bliss, Sampath Rangarajan, and Risto Wichman. In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 32(9):1637–1652, 2014.
- [134] Sahai, Achaleshwar and Patel, Gaurav and Sabharwal, Ashutosh. Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation. Technical Report TRE1104, Rice University, 2011.

- [135] Toshikazu Sakano, Zubair Md Fadlullah, Thuan Ngo, Hiroki Nishiyama, Masataka Nakazawa, Fumiyuki Adachi, Nei Kato, Atsushi Takahara, Tomoaki Kumagai, Hiro-michi Kasahara, et al. Disaster-resilient networking: a new vision based on movable and deployable resource units. *IEEE Network*, 27(4):40–46, 2013.
- [136] Sen, Souvik and Choudhury, Romit Roy and Nelakuditi, Srihari. Listen (on the frequency domain) before you talk. In *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, pages 1–6. ACM, 2010.
- [137] Sen, Souvik and Roy Choudhury, Romit and Nelakuditi, Srihari. No time to count-down: Migrating backoff to the frequency domain. In *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 241–252. ACM, 2011.
- [138] Gaurav Sharma, Ayalvadi Ganesh, and Peter Key. Performance analysis of contention based medium access control protocols. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(4):1665–1682, 2009.
- [139] Jingpu Shi, Theodoros Salonidis, and Edward W Knightly. Starvation mitigation through multi-channel coordination in CSMA multi-hop wireless networks. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 214–225. ACM, 2006.
- [140] K.P. Shih, W.H. Liao, H.C. Chen, and C.M. Chou. On avoiding RTS collisions for IEEE 802.11-based wireless ad hoc networks. *Computer Communications*, 32(1):69–77, 2009.
- [141] Madhavapeddi Shreedhar and George Varghese. Efficient fair queueing using deficit round robin. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 25(4):231–242, 1995.
- [142] Nikhil Singh, Dinan Gunawardena, Alexandre Proutiere, Božidar Radunovi, Horia Vlad Balan, and Peter Key. Efficient and fair mac for wireless networks with self-interference cancellation. In *2011 International Symposium of Modeling and Optimization of Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks*, pages 94–101. IEEE, 2011.
- [143] H Wilson So, Jean Walrand, and Jeonghoon Mo. McMAC: A multi-channel MAC proposal for ad-hoc wireless networks. In *Proc. of IEEE WCNC*, pages 334–339, 2007.
- [144] Jungmin So and Nitin H Vaidya. Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 222–233. ACM, 2004.
- [145] Song, Yu and Qi, Wangdong and Cheng, Wenchi. Adaptive range-based collision avoidance MAC protocol in wireless full-duplex ad hoc networks. *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, 13(6):3000–3022, 2019.

- [146] Jukka Talvitie, Markku Renfors, and Elena Simona Lohan. Distance-based interpolation and extrapolation methods for RSS-based localization with indoor wireless signals. *IEEE transactions on vehicular technology*, 64(4):1340–1353, 2015.
- [147] Andrew S Tanenbaum, David Wetherall, et al. *Computer networks*. Harlow, Essex: Pearson,, 2014.
- [148] Rui Tang, Jihong Zhao, Hua Qu, and Zhenwei Zhang. Energy-efficient resource allocation for 5G full-duplex enabled device-to-device communication. In *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2016.
- [149] YC Tay and Kee Chaing Chua. A capacity analysis for the IEEE 802.11 MAC protocol. *Wireless networks*, 7(2):159–171, 2001.
- [150] Nick C Theis, Ryan W Thomas, and Luiz A DaSilva. Rendezvous for cognitive radios. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 10(2):216–227, 2011.
- [151] Thilina, Karaputugala Madushan and Tabassum, Hina and Hossain, Ekram and Kim, Dong In. Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches. *IEEE Communications Magazine*, 53(5):112–120, 2015.
- [152] Ilenia Tinnirello, Giuseppe Bianchi, and Yang Xiao. Refinements on IEEE 802.11 distributed coordination function modeling approaches. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(3):1055–1067, 2010.
- [153] Fouad Tobagi and Leonard Kleinrock. Packet switching in radio channels: Part II-The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution. *IEEE Transactions on communications*, 23(12):1417–1433, 1975.
- [154] Slavisa Tomic, Marko Beko, and Rui Dinis. Distributed RSS-AoA based localization with unknown transmit powers. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(4):392–395, 2016.
- [155] Boris Solomonovich Tsybakov and Viktor Alexandrovich Mikhailov. Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback. *Problemy Peredachi Informatsii*, 14(4):32–59, 1978.
- [156] Boris Solomonovich Tsybakov and Viktor Alexandrovich Mikhailov. Random multiple packet access: part-and-try algorithm. *Problemy Peredachi Informatsii*, 16(4):65–79, 1980.
- [157] Asimakis Tzamaloukas and JJ Garcia-Luna-Aceves. Channel-hopping multiple access. In *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record*, volume 1, pages 415–419. IEEE, 2000.
- [158] Asimakis Tzamaloukas and JJ Garcia-Luna-Aceves. Channel hopping multiple access with packet trains for ad hoc networks. In *In In Proc. IEEE Mobile Multimedia Communications (MoMuC '00)*. Citeseer, 2000.

- [159] Sana Ullah, Min Chen, and Kyung Sup Kwak. Throughput and delay analysis of IEEE 802.15. 6-based CSMA/CA protocol. *Journal of medical systems*, 36(6):3875–3891, 2012.
- [160] Chih-Yu Wang and Hung-Yu Wei. IEEE 802.11n MAC enhancement and performance evaluation. *Mobile Networks and Applications*, 14(6):760–771, 2009.
- [161] Hucheng Wang, Shanzhi Chen, Hui Xu, Ming Ai, and Yan Shi. Softnet: A software defined decentralized mobile network architecture toward 5g. *IEEE Network*, 29(2):16–22, 2015.
- [162] Zengfeng Wang, Hao Zhang, Tingting Lu, and T Aaron Gulliver. Cooperative RSS-based localization in wireless sensor networks using relative error estimation and semidefinite programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(1):483–497, 2019.
- [163] Wang, Cheng-Xiang and Haider, Fourat and Gao, Xiqi and You, Xiao-Hu and Yang, Yang and Yuan, Dongfeng and Aggoune, Hadi and Haas, Harald and Fletcher, Simon and Hepsaydir, Erol. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):122–130, 2014.
- [164] Janis Werner, Jun Wang, Aki Hakkarainen, Danijela Cabric, and Mikko Valkama. Performance and Cramer–Rao bounds for DoA/RSS estimation and transmitter localization using sectorized antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(5):3255–3270, 2016.
- [165] Shih-Lin Wu, Chih-Yu Lin, Yu-Chee Tseng, and Jang-Laing Sheu. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks. In *Proceedings International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. I-SPAN 2000*, pages 232–237. IEEE, 2000.
- [166] Shih-Lin Wu and Jhen-Yu Yang. A novel channel assignment scheme for improving channel reuse efficiency in multi-channel ad hoc wireless networks. *Computer Communications*, 30(17):3416–3424, 2007.
- [167] Xiufeng Xie and Xinyu Zhang. Semi-synchronous channel access for full-duplex wireless networks. In *2014 IEEE 22nd International Conference on Network Protocols*, pages 209–214. IEEE, 2014.
- [168] Xu, Xiaohua and Chen, Yuanfang and Zhao, Yanxiao and He, Shuibing and Song, Houbing. Delay Efficient D2D Communications over 5G Edge-Computing Mobile Networks. In *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019)*, pages 1249–1260. Springer, 2020.
- [169] Duck-Yong Yang, Tae-Jin Lee, Kyunghun Jang, Jin-Bong Chang, and Sunghyun Choi. Performance enhancement of multirate ieee 802.11 wlans with geographically scattered stations. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(7):906–919, 2006.
- [170] Markus Zannoth, Thomas Ruhlicke, and B-U Klepser. A highly integrated dual-band multimode wireless lan transceiver. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 39(7):1191–1195, 2004.

- [171] Zhai, Yanlong and Bao, Tianhong and Zhu, Liehuang and Shen, Meng and Du, Xiaojiang and Guizani, Mohsen. Toward Reinforcement-Learning-Based Service Deployment of 5G Mobile Edge Computing with Request-Aware Scheduling. *IEEE Wireless Communications*, 27(1):84–91, 2020.
- [172] Xi Zhang, Wenchi Cheng, and Hailin Zhang. Full-duplex transmission in PHY and MAC layers for 5G mobile wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 22(5):112–121, 2015.
- [173] Yan Zhang, Loukas Lazos, Kai Chen, Bocan Hu, and Swetha Shivaramaiah. Multi-channel medium access without control channels: A full duplex MAC design. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 16(4):1032–1046, 2016.
- [174] Zhongshan Zhang, Xiaomeng Chai, Keping Long, Athanasios V Vasilakos, and Lajos Hanzo. Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection. *IEEE Communications Magazine*, 53(5):128–137, 2015.
- [175] Zhongshan Zhang, Keping Long, Athanasios V Vasilakos, and Lajos Hanzo. Full-duplex wireless communications: challenges, solutions, and future research directions. *Proceedings of the IEEE*, 104(7):1369–1409, 2016.
- [176] Eustathia Ziouva and Theodore Antonakopoulos. CSMA/CA performance under high traffic conditions: throughput and delay analysis. *Computer communications*, 25(3):313–321, 2002.