



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE INFORMÁTICA - CIn

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

**H-M2MMAC: Uma Nova Abordagem  
Híbrida do Protocolo MAC Multicanal  
para Comunicação Muitos-para-Muitos**

Daniel Alexandro Rêgo Aduato

Trabalho de Graduação

Recife  
06 de Dezembro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE INFORMÁTICA - CIn

Daniel Alexandro Rêgo Aauto

**H-M2MMAC: Uma Nova Abordagem Híbrida do Protocolo  
MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos**

*Trabalho apresentado ao Programa de GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO do CENTRO DE IN-  
FORMÁTICA - CIn da UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
PERNAMBUCO como requisito parcial para obtenção do  
grau de Bacharel em ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO.*

Orientador: *Prof. Renato Mariz de Moraes, Ph.D.*

Recife  
06 de Dezembro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE INFORMÁTICA - CIn  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

Daniel Alexandro Rêgo Aauto

**H-M2MMAC: Uma Nova Abordagem Híbrida do Protocolo  
MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos**

*Trabalho apresentado ao Programa de GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO do CENTRO DE INFORMÁTICA - CIn da UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, defendido e aprovado em 06 de Dezembro de 2017.*

*BANCA EXAMINADORA:*

---

*Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes  
CIn - UFPE  
(Orientador)*

---

*Prof. Dr. Daniel Carvalho da Cunha  
CIn - UFPE  
(Avaliador)*

Recife  
06 de Dezembro de 2017

*Ao meu Deus, à minha família, aos professores e aos amigos por todo apoio e compreensão durante estes anos.*

# Agradecimentos

Ao meu Deus, autor da minha vida, minha fortaleza e socorro nos momentos mais difíceis. O melhor amigo que um homem poderia ter. A Ele toda honra, glória e majestade.

À minha família, em especial à minha mãe Márcia, à minha avó Estefânia e às minhas irmãs Thalyta e Ana. Elas foram meus ombros fortes que me sustentaram durante toda a minha vida.

À minha companheira Dalila, pela incrível paciência em suportar as minhas ausências e pelo amor que sempre soube me demonstrar.

À Igreja do SENHOR e a todo o ministério, que oraram por mim e me apoiaram para que eu pudesse conquistar os meus objetivos. *A oração feita por um justo pode muito em seus efeitos (Tiago 5.16).*

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Renato Mariz, pela sua incrível competência em orientar-me e ensinar-me durante todos estes meses.

Ao Pabblo Ghobad, por dispor um pouco do seu tempo dando-me suporte teórico, haja vista que este trabalho de graduação é uma extensão do seu trabalho de mestrado.

Aos companheiros, servidores, professores e alunos do Centro de Informática. O CIn foi a minha segunda casa e sempre estará em meu coração.

Aos meus amigos de graduação, que aqui cito em ordem alfabética: Danilo Dias, Diogo Maia, George Victor, Geraldo Junior, Gabriel Bezerra, Helder Lucas, Jairo Tiburtino, João Paulo, Jonatas Costa, José Antônio, José Renê, Kleyton Lourenço, Lygia Helena, Matheus de Farias, Paulo Renato, Pedro Martins, Raphael Tulyo, Rita de Cássia, Rodrigo Cavalcanti, Rubem Moura, Saulo Teixeira, Tasso Moraes, Thiago Soares, Vanessa Ogg e Wilton Santana. Vocês foram essenciais na minha história.

Aos amigos e colegas de trabalho do ISI-TICs: o Diretor e Prof. Sérgio Soares, Gerentes, Assistentes Administrativas, Auxiliares de Serviços Gerais, Desenvolvedores de Inovação e Estagiários. Trabalhar com vocês tem se tornado um *hobbie*. Agradeço por todo o apoio e ajuda durante o desenvolvimento deste Trabalho de Graduação.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram nesta jornada, minha eterna gratidão.

*O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um vasto oceano. O arranjo maravilhoso e a harmonia do universo não poderiam senão sair de um ser onisciente e onipotente.*

—ISAAC NEWTON

# Resumo

As redes sem fio são caracterizadas por não utilizarem guias, sendo o ar o meio normalmente utilizado para transmissão da informação por radiação eletromagnética. Esse cenário contrasta com o cenário das redes cabeadas, onde as informações são propagadas por fios de cobre, fibras ópticas ou similares. Sob a perspectiva de comunicações sem fio, surgem as redes *ad hoc*. Diferentemente das muitas redes convencionais que são estabelecidas sob uma infraestrutura e organização pré-definidas, as redes *ad hoc* são descentralizadas. Seus nós encaminham até o nó destino as informações provenientes dos nós vizinhos de forma comunitária. O presente trabalho concentra-se na Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC, do inglês *Medium Access Control*) das redes sem fio *ad hoc*, propondo uma abordagem híbrida e adaptativa do Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos (M2MMAC). Esta variante denomina-se H-M2MMAC. Assim como o M2MMAC, o H-M2MMAC é caracterizado por uma arquitetura *Split Phase*, ou seja, é baseado na especificação de duas fases de comunicação dentro de intervalos entre *beacons*. A variante tem como referência o processo híbrido do protocolo H-MMAC (do inglês *Hybrid Multi-Channel MAC*), proporcionando ao M2MMAC, quando a carga da rede estiver alta, a capacidade de transmitir dados durante o intervalo da Janela ATIM (do inglês *Announcement Traffic Indication Message Window*) nos canais que são exclusivos para troca de pacotes de dados. A este tipo de transmissão dá-se o nome de transmissão estendida. Para se avaliar o desempenho do protocolo, é apresentado um modelo matemático reformulado a partir do modelo do M2MMAC que tem como métrica a vazão agregada de saturação da rede. Tal modelo é avaliado numericamente no MATLAB. O resultado é comparado com os de outros protocolos multicanais como o MMAC (do inglês *Multi-Channel MAC*), TMMAC (do inglês *TDMA-based Multi-channel MAC*), H-MMAC e o M2MMAC. O desempenho dos protocolos é avaliado considerando a influência de fatores como o tamanho da Janela ATIM, o número de nós na rede e a quantidade de antenas e canais disponíveis. O H-M2MMAC apresenta desempenho superior aos demais protocolos.

**Palavras-chave:** Redes *Ad Hoc*, MAC, M2MMAC, H-MMAC, Janela ATIM, Multicanal, Muitos-para-Muitos.

# Abstract

Wireless networks are characterized by not using guides, being the air the medium usually used for the transmission of information by electromagnetic radiation. This scenario contrasts with the scenario of wired networks, where information is propagated by copper wires, optical fibers, or the like. From the perspective of wireless communications, the *ad hoc* networks arise. Unlike the many conventional networks that are established under a pre-defined infrastructure and organization, the *ad hoc* networks are decentralized. Its nodes forward to the destination node the information coming from neighboring nodes in a communitarian way. This work focuses on the Medium Access Control Layer (MAC) of the *ad hoc* wireless networks, proposing a specification of a hybrid and adaptive variant of the Multichannel MAC Protocol for Many-to-many Communication (M2MMAC). This variant is called H-M2MMAC. Like M2MMAC, H-M2MMAC is characterized by a split-phase architecture. The variant is based on the hybrid process of the H-MMAC (Hybrid Multi-Channel MAC) protocol, giving to the M2MMAC, when the network load is high, the ability to transmit data during the interval of the ATIM (Announcement Traffic Indication Message) window on channels that are unique to exchanging data packets. This type of transmission is called the extended transmission. In order to evaluate the performance of the protocol, it is presented a mathematical model reformulated from the M2MMAC model that has as metric the aggregate saturation flow of the network. This model is numerically simulated in MATLAB. The result is compared to other multi-channel protocols such as MMAC (Multi-Channel MAC), TMMAC (TDMA-based Multi-channel MAC), H-MMAC and M2MMAC. The performance of the protocols is evaluated considering the influence of factors such as the size of the ATIM window, the number of nodes in the network and the number of antennas and channels available. The H-M2MMAC is superior to other protocols.

**Keywords:** *Ad Hoc* Networks, MAC, M2MMAC, H-MMAC, ATIM Window, Multichannel, Many-to-Many.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura do Documento	3
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1	Introdução	4
2.2	Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes sem Fio	4
2.2.1	Comunicação Híbrida FDMA / CDMA-SIC	4
2.2.2	Comunicação Híbrida FDMA / MIMO	7
2.3	Padrões IEEE 802.11	8
2.3.1	IEEE 802.11 DCF	8
2.3.1.1	Análise de Desempenho do IEEE 802.11 DCF - Bianchi 2000	12
2.3.1.2	Refinamentos nas Abordagens de Modelamento do IEEE 802.11 DCF - Tinnirello <i>et al.</i> 2010	15
2.3.2	IEEE 802.11 <i>Power Saving Mode/Mechanism</i>	19
2.3.3	IEEE 802.11ac	20
2.4	Trabalhos Relacionados	21
2.4.1	Protocolo MAC Multicanal para Redes <i>Ad Hoc</i> - MMAC	22
2.4.2	Protocolo MAC Multicanal com Eficiência Energética para Redes <i>Ad Hoc</i> - TMMAC	24
2.4.3	Protocolo MAC Multicanal Híbrido - H-MMAC	26
2.4.4	Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos - M2MMAC	27
<b>3</b>	<b>H-M2MMAC: Um Protocolo MAC Híbrido Multicanal de Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes 802.11</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução	33
3.2	Modelos de Transmissão	34
3.3	Estruturas de Dados: NAV e NIL	37
3.3.1	NAV - <i>Network Allocation Vector</i>	37
3.3.2	NIL - <i>Neighbor Information List</i>	37
3.4	Pacotes de Controle	39
3.5	Modo de Operação do Protocolo H-M2MMAC	41
<b>4</b>	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>46</b>
4.1	Introdução	46
4.2	Vazão Agregada de Saturação	46
4.3	Modelos Analíticos - Padrão 802.11 e Protocolos Multicanais	47
4.3.1	Análise do Padrão IEEE 802.11	50
4.3.2	Análise do Protocolo MMAC	50

4.3.3	Análise do Protocolo TMMAC	50
4.3.4	Análise do Protocolo H-MMAC	51
4.3.5	Análise do Protocolo M2MMAC	52
4.4	Modelo Analítico do Novo Protocolo H-M2MMAC Proposto	55
<b>5</b>	<b>Avaliação de Desempenho</b>	<b>58</b>
5.1	Introdução	58
5.2	Metodologia	58
5.3	Resultados e Discussão	59
<b>6</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>65</b>
6.1	Trabalhos Futuros	65
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>67</b>

## Lista de Figuras

2.1	Configuração de uma rede FDMA com CDMA-SIC.	5
2.2	Canais de <i>uplink</i> e <i>downlink</i> de uma rede FDMA com CDMA-SIC.	6
2.3	Sessão de Comunicação do esquema de cooperação oportunista.	7
2.4	Configuração de uma rede FDMA com MIMO.	8
2.5	Funcionamento do Mecanismo de Acesso Básico.	9
2.6	Funcionamento do Mecanismo de Acesso RTS/CTS.	11
2.7	Cadeia de <i>Markov</i> bidimensional - Bianchi 2000.	13
2.8	Tempos $T_s$ e $T_c$ do Mecanismo RTS/CTS	15
2.9	Exemplificação de um <i>slot</i> anômalo. Neste caso, o <i>slot</i> anômalo é o imediatamente posterior à transmissão com sucesso.	16
2.10	Diagrama temporal da definição dos <i>slots</i> de resguardo.	16
2.11	Cadeia de <i>Markov</i> bidimensional - Tinnirello 2010.	18
2.12	Diagrama temporal do funcionamento do Padrão IEEE 802.11 PSM	20
2.13	Problema do terminal escondido em um ambiente multicanal.	23
2.14	Diagrama temporal do funcionamento do protocolo MMAC.	23
2.15	Arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC.	24
2.16	Exemplo de estrutura CUB.	25
2.17	Exemplo dos modos de transmissão do protocolo H-MMAC.	26
2.18	Nós S, D e E realizam transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes durante a Janela de Comunicação.	29
2.19	Negociações de fluxos de comunicação e transmissão de dados.	29
2.20	Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo transmissor durante um intervalo entre <i>beacons</i> .	30
2.21	Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo receptor durante um intervalo entre <i>beacons</i> .	31
3.1	Exemplo dos tipos de transmissão dos nós e dos seus respectivos fluxos no protocolo H-M2MMAC.	36
3.2	Sequência de transições de classificações para uma estação do tipo estendido.	38
3.3	Diagrama temporal da negociação de fluxos e posterior transmissão de dados do Protocolo H-M2MMAC.	38
3.4	Pacotes de Controle do Protocolo H-M2MMAC.	40
3.5	Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo transmissor durante um intervalo entre <i>beacons</i> do Protocolo H-M2MMAC.	44
3.6	Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo receptor durante um intervalo entre <i>beacons</i> do Protocolo H-M2MMAC.	45
4.1	Medição da vazão da rede 802.11 mediante o crescimento da carga oferecida linearmente com o tempo.	46
4.2	Modelo de Contenção para reserva de canal durante a janela ATIM.	48

- 5.1 Vazão agregada de saturação *versus* número de canais disponíveis ( $M$ ) para os protocolos correlatos ao H-M2MMAC. 60
- 5.2 Vazão agregada de saturação *versus* número de canais disponíveis ( $M$ ) para os protocolos M2MMAC e H-M2MMAC. 61
- 5.3 Influência da duração da Janela ATIM na vazão agregada de saturação para diferentes números de antenas de recepção e canais de transmissão disponíveis com  $C = 60$  estações. 62
- 5.4 Vazão agregada de saturação *versus* número de estações participantes ( $C$ ) da rede com uma quantidade fixa de canais disponíveis ( $M = 24$ ) para os protocolos correlatos ao H-M2MMAC. 63
- 5.5 Vazão agregada de saturação *versus* número de estações participantes ( $C$ ) da rede com uma quantidade fixa de canais disponíveis ( $M = 24$ ) para os protocolos M2MMAC e H-M2MMAC. 64

# Lista de Tabelas

5.1 Parâmetros e valores para as simulações numéricas

59

# Lista de Símbolos

Notação	Descrição	Unidade
$n$	Número de estações na rede	
$n^x$	Número de estações disponíveis no período de contenção	
$C$	Número de estações na rede	
$C^a$	Número de estações que estarão no canal padrão durante a Janela ATIM	
$C^d$	Número de estações que estarão nos canais de dados durante a Janela ATIM	
$P$	Número de estações participantes na fase de comunicação	
$M$	Número de canais	
$B$	Número de antenas de recepção	
$w$	Janela de resguardo	
$w_i$	Estágio atual da janela de resguardo	
$m$	Número máximo de estágios de resguardo	
$CW_{max}$	Janela de resguardo máxima	
$CW_{min}$	Janela de resguardo mínima	
$W$	Janela de resguardo mínima	
$E[P]$	Tamanho da carga útil média de cada pacote	[bits]
$E(P_d)$	Tamanho médio da carga útil do pacote de dados (TMMAC)	[bits]
$\overline{E[P]}$	Tamanho da carga útil média de cada pacote considerando-se transmissões sucessivas	[bits]
$H$	Tamanho do cabeçalho total do pacote de dados	[bits]
$H_P$	Tamanho do cabeçalho da camada física (PHY)	[bits]
$H_M$	Tamanho do cabeçalho da camada de enlace (MAC)	[bits]
$L_{data}$	Tamanho do pacote de dados	[bits]
$DATA$	Tamanho do pacote de dados	[bits]
$ACK$	Tamanho do pacote ACK	[bits]
$ATIM$	Tamanho do pacote ATIM	[bits]
$ATIMACK$	Tamanho do pacote ATIMACK	[bits]
$R$	Número máximo de tentativas de retransmissão	
$R$	Taxa de transmissão de dados	[bps]
$R_{basic}$	Taxa de transmissão básica	[bps]
$\delta$	Atraso de propagação	[s]
$\sigma$	Duração de um slot de tempo	[s]
$T$	Duração de um slot de tempo no período de descobrimento	[s]
$T_{idle}$	Time Slot	[s]
$T_{beacon}$	Duração de um intervalo entre beacons	[s]

<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$l_{beacon}$	<i>Duração de um intervalo entre beacons</i>	[s]
$T_{atim\_window}$	<i>Duração da Janela ATIM</i>	[s]
$l_{atim}$	<i>Duração da Janela ATIM</i>	[s]
$T_{data\_window}$	<i>Duração da Janela de Comunicação</i>	[s]
$l_{slot}$	<i>Duração de uma transmissão completa de um pacote de dados incluindo sua confirmação de recebimento</i>	[s]
$l_{slot}$	<i>Duração de um slot (TMMAC)</i>	[s]
$T_{atim}$	<i>Duração da transmissão de um pacote ATIM</i>	[s]
$T_{atim\_ack}$	<i>Duração da transmissão de um pacote ATIM-ACK</i>	[s]
$T_{atim\_res}$	<i>Duração da transmissão de um pacote ATIM-RES</i>	[s]
$T_{rts}$	<i>Duração da transmissão de um pacote RTS</i>	[s]
$T_{cts}$	<i>Duração da transmissão de um pacote CTS</i>	[s]
$T_{data}$	<i>Duração da transmissão de um pacote de dados</i>	[s]
$T_{ack}$	<i>Duração da transmissão de um pacote ACK</i>	[s]
$l_{ACK}$	<i>Duração da transmissão de um pacote ACK</i>	[s]
$T_{sifs}$	<i>Duração de um intervalo SIFS</i>	[s]
$SIFS$	<i>Duração do espaço curto entre quadros</i>	[s]
$T_{difs}$	<i>Duração de um intervalo DIFS</i>	[s]
$DIFS$	<i>Duração do intervalo entre quadros DCF</i>	[s]
$EIFS$	<i>Duração do espaço estendido entre quadros DCF</i>	[s]
$t_{disc}$	<i>Período de descobrimento dos vizinhos</i>	[s]
$t_{data}$	<i>Período para transmissão de dados</i>	[s]
$E[X^x]$	<i>Duração Média de uma transmissão bem sucedida</i>	[s]
$E[Z^x]$	<i>Duração Média entre dois Time Slots ociosos</i>	[s]
$T_s$	<i>Tempo médio durante o qual o canal é sensoreado como ocupado devido a uma transmissão bem sucedida</i>	[s]
$\overline{T_s}$	<i>Tempo médio durante o qual o canal é sensoreado como ocupado devido a uma transmissão bem sucedida considerando-se transmissões sucessivas</i>	[s]
$T_c$	<i>Tempo médio durante o qual o canal é sensoreado como ocupado devido a uma colisão</i>	[s]
$\overline{T_c}$	<i>Tempo médio durante o qual o canal é sensoreado como ocupado devido a uma colisão considerando-se colisões sucessivas</i>	[s]
$\tau^x$	<i>Probabilidade de transmissão</i>	
$P_{tr}$	<i>Probabilidade de transmissão</i>	
$p$	<i>Probabilidade de colisão</i>	
$p_{buzy}^x$	<i>Probabilidade do canal estar ocupado</i>	
$P_s$	<i>Probabilidade de transmissão bem sucedida condicional</i>	

Notação	Descrição	Unidade
$P_{suc}^x$	Probabilidade de uma transmissão com sucesso	
$P_{succ}$	Probabilidade de uma transmissão bem sucedida de um pacote de controle dado que houve transmissão ( $P_s P_{tr}$ )	
$P_{idle}^x$	Probabilidade do canal estar ocioso	
$P_{idle}$	Probabilidade de se verificar um slot de tempo vazio ( $1 - P_{tr}$ )	
$P_{col}^x$	Probabilidade de colisão	
$P_{coll}$	Probabilidade de colisão de um pacote de controle dado que houve transmissão ( $P_{tr}(1 - P_s)$ )	
$n_{suc}$	Número de negociações com sucesso durante a Janela ATIM	
$n_{schedule}$	Número de pacotes que podem ser agendados durante a Janela ATIM (TMMAC)	
$n_{accommodate}$	Número máximo de pacotes que podem ser acomodados durante a Janela de Comunicação (TMMAC)	
$n_{actual}$	Número de pacotes de dados efetivamente agendados para transmissão (TMMAC)	
$n_{max}$	Número máximo de transmissões de pacotes de dados acomodáveis em uma Janela de Comunicação	
$n_{max}^{BEACON}$	Número máximo de transmissões de pacotes de dados acomodáveis em um intervalo entre beacons	
$n_{sched}$	Número médio de fluxos de transmissão negociáveis em uma única Janela ATIM	
$N_{data}^{HMMAC}$	Número médio de pacotes de dados enviados em $M$ canais em um único intervalo entre beacons (H-MMAC)	
$N_{data}^{MMAC}$	Número médio de pacotes de dados enviados em $M$ canais em uma única Janela de Comunicação (MMAC)	
$\eta$	Número de pacotes de dados agendados por negociação bem sucedida	
$N_s$	Número de fluxos de transmissão negociáveis na Janela ATIM	
$N_s$	Número de negociações com sucesso por unidade de tempo (TMMAC)	
$S$	Vazão de saturação	
$\bar{S}$	Vazão de saturação normalizada	

---

(<sup>x</sup>) indica (<sup>a</sup>) para Janela ATIM e (<sup>d</sup>) para Janela de Comunicação.

# Indrodução

## 1.1 Motivação

As redes sem fio (ou redes *wireless*) são caracterizadas por estabelecerem enlaces de comunicação sem a necessidade de meios físicos como fios de cobre, fibras ópticas ou semelhantes. As informações são transmitidas por ondas eletromagnéticas em canais de frequência pré-definidos na rede. As redes *wireless* possuem vantagens importantes sobre as redes cabeadas por serem uma opção prática e de baixo custo, além de fornecerem maior mobilidade e flexibilidade para os seus usuários. Contudo, fatores como segurança, cobertura do sinal e velocidade da transmissão de dados podem tornar estas redes menos atrativas. Além disso, os sinais eletromagnéticos que são propagados pelo ar podem sofrer inúmeras anomalias, dificultando a decodificação livre de erros por parte do dispositivo receptor. São exemplos de anomalias: perda por propagação, interferências, desvanecimento, ruído térmico e múltiplos percursos [1]. Qualquer rede sem fio deve ser projetada para superar estes desafios, caso contrário, a utilização deste tipo de rede se tornará impraticável.

Sob a perspectiva de comunicações sem fio, surgem as Redes *Ad Hoc*. Diferentemente das muitas redes convencionais que são estabelecidas sob uma infraestrutura organizacional pré-definida e são de propósitos gerais, as redes *ad hoc* são descentralizadas e possuem propósitos específicos. Uma Rede *Ad Hoc* sem fio é formada por um conjunto de nós com interfaces *wireless* que se organizam de forma dinâmica dentro de uma topologia temporária e arbitrária, sem a necessidade de um *gateway* ou ponto de acesso central (do inglês *access points* ou *hotspots*) [2]. Elas podem ter ou não acesso à internet. Seus nós encaminham as informações até o nó destino de forma comunitária e eficiente, onde cada nó atua como um roteador. Via de regra, tais informações são obtidas através de transdutores que convertem um fenômeno físico em sinais elétricos, e que posteriormente são processadas coletivamente, e não individualmente. Os nós equipados com transdutores são chamados de nós sensores, e compõem as redes de sensores sem fio ou *Wireless Sensor Networks* (WSN) [3, 4, 5, 6, 7, 8].

Vale salientar que as redes *ad hoc* também ganharam destaque por possuírem um vasto conjunto de possíveis aplicações em diversos cenários dos quais a infraestrutura está ausente e a comunicação costuma ser mais escassa. Esse conjunto se estende às operações militares, atividades médicas, monitoramento ambiental, aplicações em geral acerca de Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things*) e Cidades Inteligentes (do inglês *Smart Cities*), como por exemplo as operações de resgate em prédios inteligentes (do inglês *Smart Buildings*), inteligência doméstica (do inglês *Home Intelligence*) e controle de processos industriais, aplicações de redes com mobilidade, como por exemplo as VANETS (do inglês *Vehicular Ad Hoc Networks*) e SPANS (do inglês *Smart Phone Ad Hoc Networks*), segurança e vigilância, agricultura de precisão e entre outros [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. As redes *ad hoc* podem se mostrar incrivelmente úteis às autoridades competentes no que diz respeito a situações de desastres naturais e antropogênicos.

Além das anomalias citadas anteriormente para redes *wireless* em geral, os nós das redes *ad hoc* sofrem limitações em termos de memória, vida útil das baterias e poder de processamento. Concomitantemente, os nós devem ser capazes de lidar com outras funcionalidades da rede

como o controle de acesso ao meio, roteamento e sinalização. É necessário que os nós aproveitem de forma eficiente o canal de comunicação, tendo em vista que os enlaces de comunicação podem se mostrar instáveis. Por estes e outros motivos, as redes *ad hoc* sem fio têm sido um tema emergente de pesquisa no meio acadêmico e profissional.

Com o estabelecimento da família de padrões IEEE 802.11, que é conhecida comercialmente como *Wi-Fi*, faz-se necessário que os equipamentos do mercado sejam fabricados com interfaces que sigam suas regras de comunicação sem fio. Tais regras podem ser aprimoradas, mantendo-se compatíveis com os critérios da família IEEE 802.11. Sob esta perspectiva de aprimoramento, surge como tópico de investigação os protocolos MAC (do inglês *Medium Access Control*) de múltiplos canais. No padrão IEEE 802.11 são especificados pelo menos três canais não sobrepostos [9, 10, 11]. Entretanto, esses canais são subutilizados por muitos protocolos atuais da camada MAC. Proporcionar à uma rede *ad hoc* a possibilidade de transmitir em mais de um canal fornece vantagens como a redução de colisões de pacotes e aumento da vazão.

Com o objetivo de proporcionar a utilização de dois ou mais canais não sobrepostos simultaneamente, oferecendo uma comunicação mais eficiente em redes *ad hoc*, várias propostas têm sido apresentadas como protocolos MAC multicanais. Algumas delas seguem a abordagem *Split Phase* [12] e o Padrão IEEE 802.11 PSM (do inglês *Power Saving Mode/Mechanism*) [9, 13, 14, 15, 16]. Estas abordagens estabelecem soluções para a redução do consumo de energia em estações de rede sem fio, onde a comunicação é dividida em intervalos de *beacon* com duas fases. A primeira fase é denominada fase de negociação ou Janela ATIM (do inglês *ATIM Window*), onde os nós negociam entre si, em um canal de controle previamente estabelecido, para escolherem os canais a serem utilizados na fase seguinte. A segunda fase chama-se Janela de Comunicação (do inglês *Communication-Window*), que é onde a transmissão dos dados efetivamente ocorre conforme negociações estabelecidas na fase anterior. As estações que não tenham pacotes a serem transmitidos ou recebidos entrarão em *DOZE mode* durante a Janela de Comunicação.

Outro tópico de investigação particularmente fervoroso que vem sendo estudado na literatura acadêmica é a possibilidade do aumento da capacidade de transmissão de dados e da diminuição do atraso fim a fim através da comunicação muitos-para-muitos (M2M, do inglês *Many-to-Many*) [17, 18]. Por meio de técnicas como MIMO (do inglês *Multiple Inputs Multiple Outputs*) e FDMA (do inglês *Frequency Division Multiple Access*), é possível proporcionar a comunicação entre diversos nós compartilhando o mesmo canal de comunicação de forma simultânea. Adicionalmente, são investigadas as possibilidades de tornar as tecnologias baseadas no padrão IEEE 802.11 adequadas à transmissão e recepção simultânea de múltiplos pacotes (MPTR, do inglês *MultiPacket Transmission and Reception*), além de se aproveitarem técnicas como a de Detecção de Múltiplos Usuários para viabilizar a recepção simultânea de pacotes.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor um novo protocolo *Split Phase* MAC multicanal para comunicação muitos-para-muitos que possibilite a uma parcela dos nós da rede realizar transmissão de dados durante a fase de negociação, enquanto a outra parcela dos nós realiza

*Two-Way Handshake* no canal de controle durante o intervalo da Janela ATIM. A este modo de transmissão dá-se o nome de transmissão estendida e só deverá ser realizada em condições de alto tráfego da rede, o que irá caracterizá-lo como protocolo híbrido. Desta maneira, o protocolo será capaz de utilizar os recursos multicanais de maneira mais eficiente. Como objetivos específicos para este trabalho, consideram-se as seguintes etapas:

1. Revisão do estado da arte em termos de protocolos de comunicação multicanal de camada MAC sem fio do tipo *Split Phase* e de outros trabalhos relacionados como a comunicação muitos-para-muitos e alguns dos padrões IEEE 802.11;
2. Desenvolvimento de um modelo analítico para avaliar a vazão (*throughput*) agregada de saturação do protocolo proposto;
3. Realização de simulações numéricas através do MATLAB para avaliação de desempenho do protocolo proposto;
4. Comparação e avaliação, no que diz respeito à eficiência do protocolo proposto, com outros protocolos multicanais em termos da vazão agregada de saturação.

As comparações foram realizadas face ao número de estações na rede, ao número de canais de frequência não sobrepostos, ao número de antenas de recepção disponíveis e ajuste do intervalo da Janela ATIM.

### **1.3 Estrutura do Documento**

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 contém uma revisão do estado da arte sobre a comunicação muitos-para-muitos, os padrões IEEE 802.11 mais relevantes para este trabalho, e os protocolos MAC multicanais de camada de enlace. O Capítulo 3 apresenta o novo protocolo híbrido de comunicação muitos-para-muitos com tecnologias atuais de rede sem fio, o H-M2MMAC. O Capítulo 4 apresenta os modelos analíticos do protocolo proposto e dos demais protocolos multicanais utilizados para a avaliação da vazão agregada de saturação. O Capítulo 5 apresenta a avaliação de desempenho, tendo por objetivo a exposição dos métodos propostos para as simulações realizadas, os resultados e discussão, sendo disponibilizada uma avaliação de desempenho do protocolo em termos de vazão agregada de saturação em comparação com outros protocolos atuais relacionados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e indica trabalhos futuros.

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Introdução

Este capítulo apresenta conceitos importantes para o discernimento deste trabalho. Revisa-se sobre a comunicação muitos-para-muitos em redes *ad hoc* sem fio. São retratados trabalhos que combinam soluções como Múltiplo Acesso por Divisão de Frequência (FDMA, do inglês *Frequency Division Multiple Access*), Múltiplo Acesso por Divisão de Código com Cancelamento Sucessivo de Interferências (CDMA-SIC, do inglês *Code Division Multiple Access - Successive Interference Cancellation*), e MIMO (do inglês *Multiple Input Multiple Output*).

Em seguida, são apontados alguns dos padrões da família IEEE 802.11. Revisa-se sobre o funcionamento de uma rede em modo distribuído, denominado Função de Coordenação Distribuída (DCF, do inglês *Distributed Coordination Function*) e seus modelos de avaliação de desempenho. Além disso, são revisados o protocolo IEEE 802.11 *Power Saving Mode/Mechanism* e o padrão de comunicação WLAN IEEE 802.11ac. O primeiro por ser um dos fundamentos principais do novo protocolo híbrido multicanal de camada de enlace proposto neste trabalho, e o segundo por inserir nos mais recentes dispositivos sem fio a Detecção de Múltiplos Usuários MIMO (do inglês *MIMO Multiuser Detection*).

A última seção apresenta os protocolos *Split Phase* multicanais que são semelhantes ao protocolo proposto neste trabalho. Tais protocolos são baseados no padrão IEEE 802.11 PSM e serão utilizados para fins de comparação de desempenho em termos de vazão agregada de saturação.

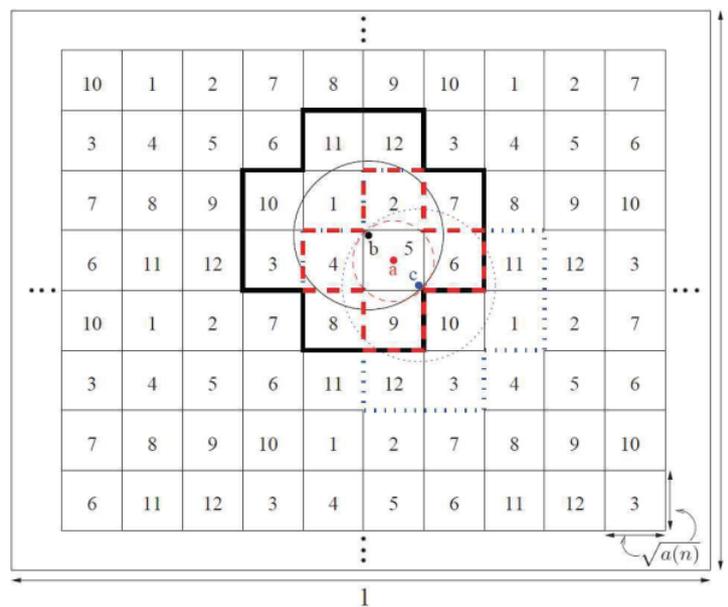
### 2.2 Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes sem Fio

Em redes de comunicações muitos-para-muitos, um nó pode enviar e receber múltiplos pacotes de dados simultaneamente. Em [17, 18], foram propostos dois esquemas de cooperação oportunista para redes *ad hoc* sem fio, onde o primeiro utiliza uma combinação de FDMA com CDMA-SIC, e o segundo uma combinação de FDMA com MIMO. Quando dois nós estão próximos o suficiente, eles podem transmitir informações entre si sem qualquer atraso. Em um esquema de cooperação oportunista, as informações são transmitidas e recebidas concorrentemente com muitos outros nós que estão próximos, sendo estas informações decodificadas. Observa-se ainda que o esquema de cooperação oportunista inibe os efeitos destrutivos da interferência, além de elevar a capacidade das redes *ad hoc* com a ampliação da potência de transmissão até um determinado limite, tornando-o um esquema promissor e desafiador.

#### 2.2.1 Comunicação Híbrida FDMA / CDMA-SIC

Nesta subseção, é apresentado o esquema de cooperação oportunista muitos-para-muitos com CDMA-SIC, com o objetivo de avaliar a capacidade de *Shannon* dos canais. Os autores de [17, 18] afirmam que este modelo é capaz de melhorar o desempenho da rede com a redução

de atrasos e o aumento da vazão fim-a-fim. A rede é dividida em células quadradas numeradas de 1 a 12, onde cada uma possui um conjunto diferente de frequências não sobrepostas e um número de nós limitado. Cada nó abrange toda a área de sua respectiva célula para a efetiva comunicação de informações com os seus vizinhos. Conseqüentemente, os nós podem sofrer interferências de células adjacentes. O conjunto de células alcançadas pelo raio de recepção de um determinado nó é chamado de *cluster*, e estas células devem ser distribuídas de forma que as células que utilizem o mesmo canal de controle estejam separadas por uma zona de guarda mínima, assegurando a comunicação local e o reaproveitamento de frequências. Cada *cluster* possui no máximo 12 células. Analogamente, ficam disponíveis 12 conjuntos distintos de códigos de espalhamento pseudo-aleatórios para a realização do CDMA, sendo estes conjuntos repartidos conforme a numeração das células. Na Figura 2.1 é apresentado este modelo.

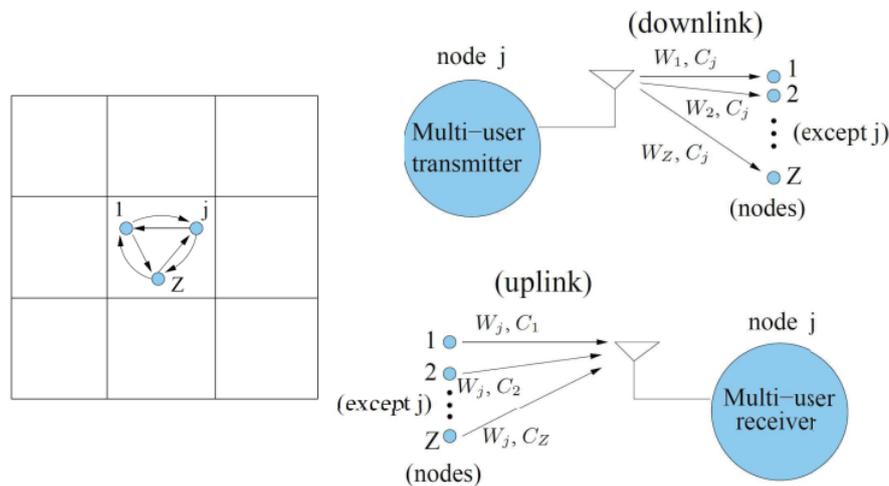


**Figura 2.1** Configuração de uma rede FDMA com CDMA-SIC. Fonte: [17, 18]

Considerando o esquema de cooperação oportunista da comunicação agregada FDMA / CDMA-SIC, o canal de frequência é considerado como sendo *half-duplex*. Sendo assim, cada nó transmite e recebe em frequências distintas. O FDMA é utilizado para estabelecer comunicações concorrentes entre os nós. Complementarmente, o CDMA-SIC é utilizado pelo nó receptor para decodificar pacotes enviados por vários nós transmissores de forma simultânea, e em uma mesma frequência de recepção. A Figura 2.2 apresenta um cenário que elucida os canais de *uplink* e de *downlink*, onde  $W_i$  representa a frequência de transmissão do nó  $i$ , e  $C_i$  representa o código pseudo-aleatório para o nó  $i$ .

Para que se efetue uma troca de dados entre os nós, uma Sessão de Comunicação deve ser estabelecida. Em uma comunicação muitos-para-muitos, a Sessão de Comunicação é dividida em duas etapas: Fase de Descobrimto dos Vizinhos e Fase de Transmissão dos Dados. Na primeira fase, que ocorre no canal de controle via difusão (*broadcast*), os nós alocam canais de comunicação de dados específicos, sendo definidas frequências de recepção para cada

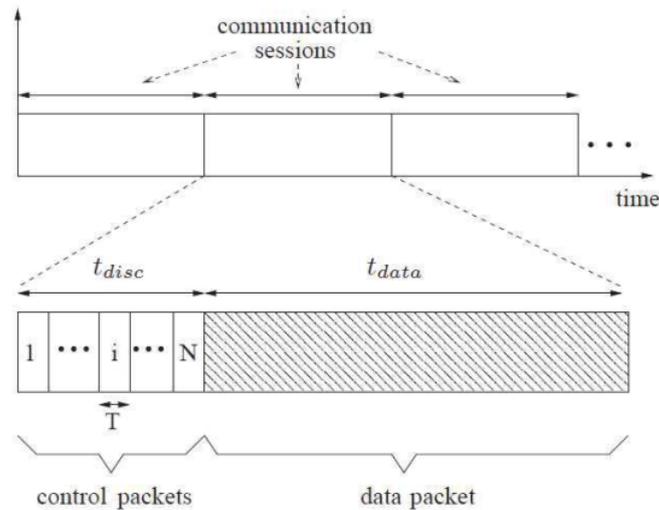
nó e um conjunto de sequências códigos de espalhamento pseudo-aleatórios para cada célula, perfazendo um total de 12 conjuntos reutilizáveis. O acesso ao meio é realizado através de sinalizações que ocorrem no canal de controle, e da posterior comunicação efetiva que ocorre nos canais de dados. As sinalizações proveem a cada nó da célula o conhecimento de quais são os outros nós que estão na mesma célula. A partir deste ponto, é escolhido o canal de dados a ser utilizado para a recepção dos dados. São utilizados 12 canais de controle com faixas de frequência não sobrepostas, havendo uma correspondência biunívoca entre cada uma das faixas de frequência para com cada célula que tenha sido identificada com um mesmo número (*ID*) em comum. Isso possibilita a reutilização dos canais sem haver interferência, já que o raio de alcance dos receptores limita-se a 12 células, no máximo. A Fase de Descobrimto é dividida em múltiplos *slots* de tempo em uma quantidade proporcional ao número de nós na célula, fazendo com que a probabilidade de colisão nesta fase seja pequena.



**Figura 2.2** Canais de *uplink* e *downlink* de uma rede FDMA com CDMA-SIC para comunicação muitos-para-muitos. Fonte: [17, 18]

Na segunda fase, a transmissão de dados ocorre efetivamente. Todo nó que necessite transmitir dados nesta fase, deve primeiramente requisitar esta transmissão enviando um pacote de controle na fase de descobrimto. Tal pacote possui informações capazes de identificar o transmissor e o receptor, devendo ser enviado em um *slot* aleatório na fase de descobrimto. Se o pacote de controle for enviado sem se envolver em colisões, então o nó transmissor enviará os dados de acordo com o seu código pseudo-aleatório nos canais de frequência específicos de cada receptor desejado, assim como receberá pacotes dos outros nós da célula através da sua frequência de recepção, sendo cada pacote recebido com um código de espalhamento diferente. Desta forma, cada nó na célula é capaz de transmitir e receber pacotes de forma simultânea. Na Figura 2.3 está ilustrada a Sessão de Comunicação, onde  $t_{disc}$  representa o período de descobrimto dos vizinhos,  $t_{data}$  o período de transmissão de dados, e  $T$  a duração de um *slot* de tempo no período de descobrimto.

Se caso algum canal de dados não for utilizado na fase de transmissão, ele ficará ocioso até a próxima sessão de comunicação. Os canais de dados e de controle operam de forma indepen-



**Figura 2.3** Sessão de Comunicação do esquema de cooperação oportunista. Fonte: [17]

dente uns dos outros, e cada nó armazena um mapa das células da rede com suas frequências de controle e códigos de espalhamento de dados específicos.

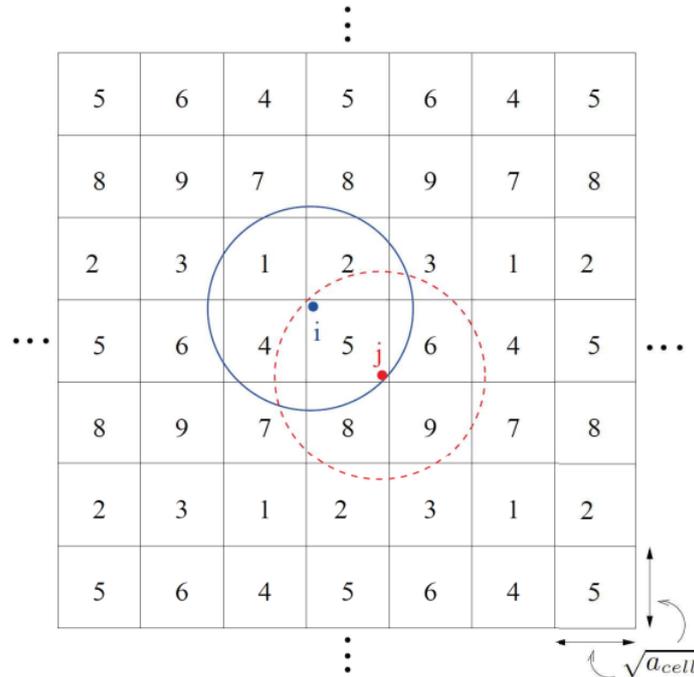
### 2.2.2 Comunicação Híbrida FDMA / MIMO

Nesta subseção, é apresentado o esquema de cooperação oportunista muitos-para-muitos com nós MIMO proposto em [17]. Esse modelo foi utilizado como um dos pilares do protocolo M2MMAC [19, 20], que será apresentado posteriormente, e também será utilizado neste trabalho.

Similarmente ao caso da subseção anterior, a rede é dividida em células quadradas e em Sessões de Comunicação. Todavia, as células são numeradas de 1 a 9. Essa redução é possível tendo em vista que não é mais necessário assegurar que os nós não tenham em seu raio de recepção células que reutilizem os mesmos códigos de espalhamento reivindicados pelo esquema com CSMA-SIC. O número de nós em cada célula continua limitado para possibilitar o funcionamento adequado da Fase de Descobrimto dos Vizinhos. A organização da rede deve ser realizada de maneira que seja possível uma comunicação bem sucedida entre os nós, e que a interferência proveniente de células com frequências em comum seja mínima. Os canais de controle são utilizados pelos nós para a obtenção de informações como as fontes com forte interferência, o conhecimento do estado do canal (do inglês *Channel State Information*) e os pacotes de dados esperados pelos nós receptores. A Figura 2.4 ilustra o esquema proposto.

A técnica MIMO utiliza múltiplas antenas de transmissão e recepção para explorar a propagação de múltiplos caminhos (do inglês *multipath*). Seu esquema de decodificação utiliza um filtro passa-faixa centrado na banda correspondente ao receptor, possibilitando a obtenção do sub-espectro que contenha a informação útil exclusiva a ele. O sub-espectro é demodulado para a banda base e inserido em um detector MIMO como, por exemplo, o V-BLAST (do inglês *Vertical - Bell Laboratories Layered Space-Time*) [21].

Os nós da rede de comunicação híbrida FDMA / MIMO possuem um mesmo número de antenas, onde uma delas é utilizada para transmitir os dados, e as restantes são utilizadas para recepção. Sendo assim, esse sistema MIMO possui vários nós transmissores atuando como um conjunto exclusivo de múltiplas antenas e um receptor exclusivo com múltiplas antenas.



**Figura 2.4** Configuração de uma rede FDMA com MIMO empregando a comunicação muitos-para-muitos. Fonte: [17]

## 2.3 Padrões IEEE 802.11

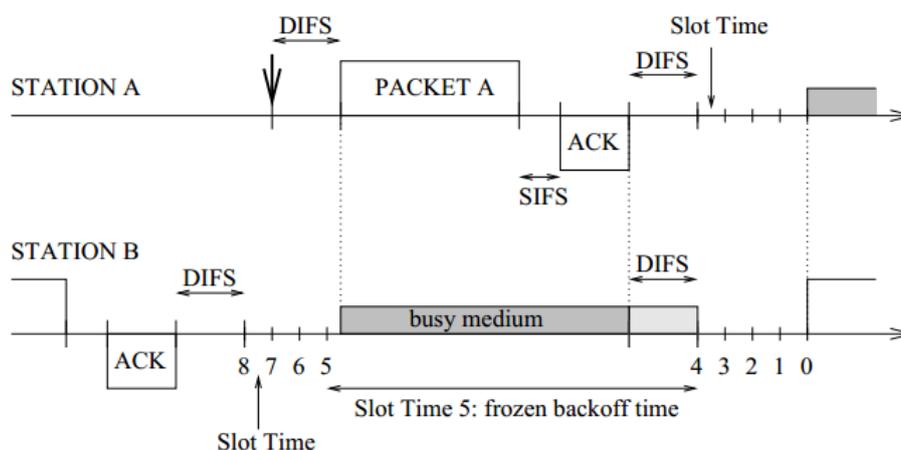
A família de padrões IEEE 802.11, comumente conhecida por *Wi-Fi*, revolucionou a história das redes locais de comunicação. Ela possui como principal característica a transmissão de sinais sem fio através de ondas eletromagnéticas. Seu sucesso é refletido pelo crescente número de dispositivos sem fio encontrados hoje no mercado, como por exemplo os *access points*, *smartphones*, *laptops*, *tablets*, entre outros [1]. Atualmente, muitos estabelecimentos comerciais têm oferecido acesso à Internet como cortesia aos seus clientes, integrando ainda mais a sociedade às redes móveis. A este tipo de serviço dá-se o nome de *hotspot*. Esta seção apresenta os padrões da família IEEE 802.11 a serem tomados como base para este trabalho.

### 2.3.1 IEEE 802.11 DCF

O IEEE 802.11 concentra-se especificamente nas camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC). A Função de Coordenação Distribuída (DCF, do inglês *Distributed*

*Coordination Function*) [9] direciona as regras do padrão 802.11 para as redes descentralizadas ou IBSS (do inglês *Independent Basic Service Set*), onde estão incluídas as redes *ad hoc*. Seu funcionamento é baseado em prevenção de colisões através do CSMA/CA. Como as transmissões de dados em redes sem fio são realizadas através do ar, o transmissor não pode utilizar técnicas como o CSMA/CD (do inglês *CSMA Collision Detection*) para detectar de forma imediata a ocorrência de colisões nas estações destinatárias, e para confirmar de forma autônoma uma transmissão bem sucedida.

Para que uma estação possa transmitir dados a um destinatário, ela deve inicialmente sensorear a portadora pela qual a informação será transmitida. Se caso o canal encontrar-se livre por um período de tempo igual a DIFS (do inglês *Distributed InterFrame Space*), a estação estará apta a transmitir. Caso contrário, a estação continuará monitorando o canal até que ele esteja livre por um período DIFS. Para minimizar a probabilidade de colisão entre pacotes que estão sendo transmitidos por outras estações, a estação fonte gerará um intervalo de resguardo (do inglês *backoff*) aleatório a ser armazenado em um contador. Esse intervalo é então dividido em *slots* fixos de tempo, fazendo com que o contador seja decrementado à medida que cada um dos *slots* transcorram. No momento que o contador for zerado, a estação estará autorizada a transmitir o pacote. O contador de tempo de resguardo é paralisado quando uma outra transmissão é detectada, e é reativado quando o canal indica estar livre novamente por mais de um intervalo de tempo DIFS. Dá-se o nome de *Slot Time* para cada *slot* produzido pelo intervalo de resguardo em escala de tempo discreta após um período DIFS.



**Figura 2.5** Funcionamento do Mecanismo de Acesso Básico. Fonte: [22]

O DCF emprega um mecanismo de funcionamento baseado em resguardos binários exponenciais e em intervalos de tempo fixos entre cada transmissão. O número de *slots* produzidos durante o período de resguardo é aleatoriamente sorteado pela estação em um intervalo de 0 a  $(w - 1)$ , onde  $w$  representa a Janela de Contenção (do inglês *Contention Window*) que depende do número de retransmissões do pacote. Na primeira tentativa de transmissão,  $w$  é igual a um valor  $CW_{min}$  denominado Janela Mínima de Contenção. A cada transmissão mal sucedida, o valor de  $w$  é dobrado até que se alcance um valor máximo  $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ .

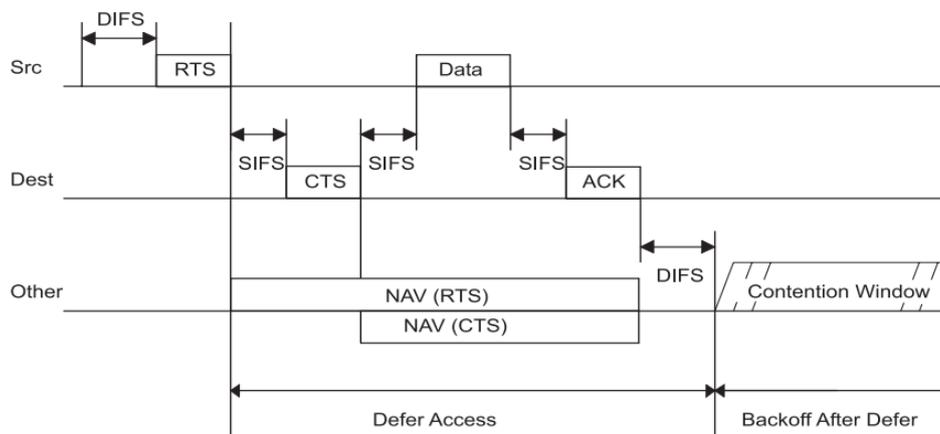
A transmissão de um pacote ocorre somente no início de um *Slot Time*. O tamanho de um *Slot Time*,  $\sigma$ , é equivalente ao tempo necessário para qualquer estação detectar uma transmissão de pacote enviada por qualquer outra estação da rede. Esse tempo depende da camada física e corresponde ao maior atraso de propagação entre duas estações no meio de transmissão. Se caso uma estação queira transmitir um novo pacote logo após uma transmissão bem sucedida, ela deve iniciar o procedimento de resguardo aleatório, mesmo que o canal permaneça livre após um período DIFS. Com isso, as estações que estiverem realizando transmissões bem sucedidas e detiverem uma grande fila de pacotes a transmitir serão coibidas de tentar monopolizar o canal por um tempo excessivo.

Um pacote de reconhecimento positivo (ACK, do inglês *positive acknowledgement*) deve ser enviado pelo destinatário para indicar a recepção bem sucedida do pacote de dados transmitido. Esse procedimento é necessário haja vista que as estações transmissoras das redes sem fio não podem utilizar técnicas imediatas de detecção de colisão. O pacote ACK é transmitido ao fim da recepção do pacote de dados, após um período de tempo denominado SIFS (do inglês *Short InterFrame Space*). O SIFS deve ser menor que o período DIFS para que nenhuma outra estação da rede seja capaz de detectar o canal livre e assim iniciar uma outra transmissão antes que o pacote ACK seja transmitido. Se a estação fonte não receber o pacote ACK dentro de um tempo limite denominado  $ACK_{Timeout}$ , ou detectar uma outra transmissão diferente em curso no canal, sua transmissão de dados será mal sucedida. A janela de contenção é dobrada e o pacote deverá ser retransmitido de acordo com as regras de resguardo aleatório. Se o número de retransmissões atingir um valor máximo, o pacote é descartado.

A operação descrita acima denomina-se Mecanismo de Acesso Básico (do inglês *Basic Access Mechanism*) e viabiliza negociações de duas vias (do inglês *Two-Way Handshaking*). A Figura 2.5 ilustra esse mecanismo. Duas estações *A* e *B* compartilham o mesmo canal. Após a transmissão de um pacote, a estação *B* aguarda por um intervalo DIFS para escolher um intervalo de resguardo aleatório igual a 8 *slots* antes de transmitir o próximo pacote. A estação *A*, recém-chegada à rede, espera somente por um intervalo DIFS para transmitir seus primeiros dados. Essa transmissão ocorre no tempo indicado na figura por uma seta. É perceptível que esta transmissão ocorre no quinto *Slot Time* do intervalo de resguardo da estação *B*. Como consequência, a estação *B* detecta que o canal está ocupado e congela o seu contador de resguardo no quinto *slot* de tempo. O contador é reativado quando o canal estiver livre por mais de um intervalo DIFS.

Outro mecanismo de acesso, que pode ser utilizado como uma opção de transmissão de dados aprimorada, viabiliza negociações de quatro vias (do inglês *Four-Way Handshaking*). A este mecanismo, ilustrado na Figura 2.6, dá-se o nome de mecanismo RTS/CTS. As estações que desejam transmitir seguem as mesmas regras de resguardo aleatório citadas no mecanismo de acesso básico. Porém, antes de enviarem os dados, um pequeno quadro (*frame*) especial denominado RTS (do inglês *Request to Send*) é preliminarmente transmitido. Quando o destinatário detecta um RTS, ele responde com um quadro CTS (do inglês *Clear to Send*) após um intervalo SIFS. A estação transmissora é autorizada a transmitir os dados se, e somente se, o quadro CTS for recebido com sucesso. Os quadros RTS/CTS possuem tamanho reduzido, sendo responsáveis por criarem uma reserva virtual do canal para a posterior transmissão de dados pela estação fonte. Por serem menores que os pacotes de dados habituais, a dura-

ção de uma eventual colisão também deverá ser menor, colaborando para um maior tempo de ocupação útil do canal. Além disso, esses quadros de controle carregam informações sobre o comprimento dos pacotes de dados. Estas informações podem ser lidas por qualquer estação da rede, possibilitando a atualização de uma estrutura de dados denominada NAV (do inglês *Network Allocation Vector*) que conterà o tempo total necessário para a efetuação da transmissão de dados, a confirmação de recebimento (*acknowledgement*) por parte do destinatário, e os atrasos de propagação envolvidos. Conseqüentemente, as estações se absterão de transmitir durante todo este tempo, evitando o risco de inviabilizar ou prejudicar a comunicação em curso. À esta característica singular do modelo RTS/CTS dá-se o nome de Detecção Virtual de Portadora (VCS, do inglês *Virtual Carrier Sense*).



**Figura 2.6** Funcionamento do Mecanismo de Acesso RTS/CTS. Fonte: [9]

O Mecanismo de Acesso RTS/CTS também mitiga o problema do terminal escondido. As estações que estão no raio de alcance de transmissão do destinatário mas que estão fora do alcance da estação transmissora também se absterão de transmitir graças ao quadro CTS. Desafortunadamente, o problema do terminal exposto persiste. Essa situação ocorre quando uma estação está próxima o suficiente de uma fonte de transmissão, porém não possui o destinatário em seu raio de alcance, ocasionando a abstenção desnecessária de transmissão e considerando que tal transmissão não necessariamente prejudicaria a outra comunicação em curso.

Em caso de colisão de quadros RTS/CTS, existem dois procedimentos possíveis. O primeiro procedimento depende de uma primitiva denominada *PHY-RXEND.indication* que deve estar implementada na camada física das estações envolvidas e deve ser gerada no momento da colisão com o objetivo de sinalizar aos demais participantes da rede sobre a colisão. Nesse caso, os nós deverão se abster de transmitir por um período de tempo igual a EIFS (do inglês *Extended Interframe Space*). Esse período deve ter um tempo de duração superior a DIFS, e é função do tempo restante estimado para uma transmissão considerando os atrasos de propagação [9]. Se caso a primitiva não esteja implementada na camada física, então o período de resguardo será mensurado por DIFS, assim como ocorre na detecção do canal quando ocupado.

O protocolo proposto neste trabalho baseia-se no Padrão 802.11 DCF. Alguns modelos encontrados na literatura visam avaliar o desempenho do DCF [22, 23, 24, 25, 26]. Todos os

modelos fundamentam-se em cadeias de *Markov* bidimensionais e em argumentos análogos, mesmo que seus resultados se mostrem díspares. A seguir serão apresentados os modelos propostos por Bianchi em [23, 22] e por Tinnirello *et al.* em [26]. O primeiro por ser um dos precursores em quesitos de análise de desempenho do IEEE 802.11 DCF, e por servir como referência de muitos trabalhos publicados posteriormente. E o segundo por apresentar refinamentos importantes do trabalho de Bianchi, e por ser o modelo mais coerente, servindo como base para o desenvolvimento deste trabalho.

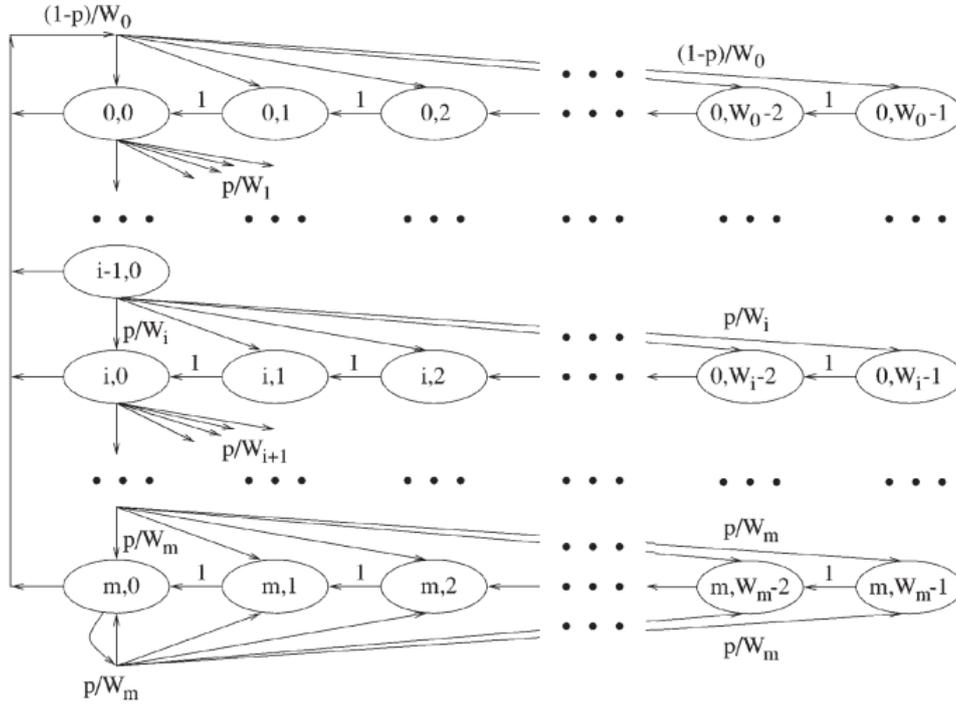
### 2.3.1.1 Análise de Desempenho do IEEE 802.11 DCF - Bianchi 2000 [22]

Este modelo se propõe a avaliar o desempenho do Padrão IEEE 802.11 DCF utilizando a vazão de saturação como métrica principal [22]. A vazão de saturação é uma característica de desempenho fundamental que representa a carga máxima que o sistema pode suportar em condições estáveis. Para a execução da avaliação, primeiramente deve-se averiguar o comportamento de uma única estação, obtendo-se por meio de uma cadeia de *Markov* bidimensional a probabilidade  $\tau$  desta estação transmitir em um *slot* de tempo específico do intervalo de resguardo aleatório. Em segundo lugar, obtém-se a vazão de saturação pela análise do comportamento da rede em um *slot*, considerando como fator crucial a probabilidade de transmissão obtida anteriormente.

O autor considera uma rede com  $n$  nós, onde o processo estocástico que representa o contador de resguardo de uma determinada estação é definido por  $b(t)$ . O início de dois *Time Slots* sequenciais são representados por  $t$  e  $(t - 1)$ . Os contadores de cada estação deverão ser decrementados no instante inicial de cada *Time Slot*. Como a probabilidade de transmissão de cada estação é afetada pelo histórico de colisões, e sendo o histórico de colisões um critério influenciador no valor do contador de resguardo, o processo estocástico  $b(t)$  é dito não *Markoviano*.

O estágio atual da janela de contenção é representado pela notação  $w_i = 2^i W$ , onde  $i \in [0, m]$  e  $W = CW_{min}$ ; e o processo estocástico que representa o estágio de resguardo referente ao número de transmissões mal sucedidas de um pacote no tempo  $t$  (pacote HOL, do inglês *Head-of-line*) é definido por  $s(t)$ , sendo  $m$  o estágio de resguardo máximo representado por  $CW_{max} = 2^m W$ . Conforme ilustrado na Figura 2.7, o processo estocástico bidimensional  $\{s(t), b(t)\}$  é modelado por meio de uma cadeia de *Markov* de tempo discreto, onde a probabilidade de colisão de um determinado pacote em uma tentativa de transmissão é constante e igual a  $p$ . As transições verticais representam a alternância dos estágios de resguardo sejam em casos onde a última transmissão foi bem sucedida (transições *bottom-up*) ou mal sucedida (transições *top-down*); e as transições horizontais, por sua vez, representam um decréscimo do contador no início de um *Time Slot*. As possíveis probabilidades de transições não nulas da cadeia de *Markov* são

$$\left\{ \begin{array}{lll} P\{i, k | i, k + 1\} = 1 & k \in (0, W_i - 2) & i \in (0, m) \\ P\{0, k | i, 0\} = (1 - p)/W_0 & k \in (0, W_0 - 1) & i \in (0, m) \\ P\{i, k | i - 1, 0\} = p/W_i & k \in (0, W_i - 1) & i \in (1, m) \\ P\{m, k | m, 0\} = p/W_m & k \in (0, W_m - 1). & \end{array} \right. \quad (2.1)$$



**Figura 2.7** Cadeia de *Markov* bidimensional - Bianchi 2000. Fonte: [22]

A primeira equação indica um decréscimo do contador de resguardo no início de um *Slot Time*; a segunda indica uma nova atribuição ao contador que deverá ser sorteada com probabilidade uniforme da janela mínima  $(0, CW_{min} - 1)$  para o caso da última transmissão ser bem sucedida; a terceira indica que a última transmissão foi mal sucedida e que deve-se avançar para o próximo estágio de resguardo, atribuindo um novo valor ao intervalo de resguardo aleatório; e a quarta, por sua vez, também indica uma transmissão mal sucedida sem avanços do estágio de resguardo, tendo em vista que este é o último estágio possível. É importante destacar que este modelo não considera o descarte de pacotes após um determinado número de tentativas de retransmissão.

A transmissão de um pacote por uma determinada estação deve acontecer quando o contador de resguardo da estação estiver zerado. A distribuição de probabilidades estacionárias da cadeia de *Markov* pode ser definida pela notação  $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{s(t) = i, b(t) = k\}$ ,  $i \in (0, m)$ ,  $k \in (0, W_i - 1)$ . Sendo assim, a probabilidade  $\tau$  de que uma determinada estação transmita em um *slot* de tempo aleatório será calculada como [22]

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(W+1) + pW(1-(2p)^m)} \quad (2.2)$$

onde  $b_{i,0}$  representa os estados da cadeia de *Markov* onde o contador de resguardo é igual a zero. Considerando que uma das estações irá transmitir, a probabilidade  $p$  de colisão é determinada

pela probabilidade de pelo menos uma das  $n - 1$  estações restantes transmita no mesmo *Time Slot*. Sendo assim

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (2.3)$$

As equações (2.2) e (2.3) compõem um sistema de equações não linear que pode ser resolvido através de ferramentas de solução numérica de equações, tendo o sistema uma solução única.

Para se avaliar a vazão de saturação normalizada da rede, definida por  $\bar{S}$ , é necessário se conhecer os prováveis eventos da rede. Inicialmente, o autor define a probabilidade de que ocorra transmissão ( $P_{tr}$ ) como sendo a probabilidade em que pelo menos uma estação da rede transmita dados em um determinado *slot*, assim

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n. \quad (2.4)$$

Posteriormente é definida a probabilidade de uma transmissão bem sucedida condicionada ao fato de haver pelo menos uma estação transmissora, então

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_{tr}}. \quad (2.5)$$

Sendo assim,  $\bar{S}$  pode ser calculada por

$$\bar{S} = \frac{E[\text{informação útil transmitida com sucesso em um slot de tempo}]}{E[\text{duração de um slot de tempo}]}, \quad (2.6)$$

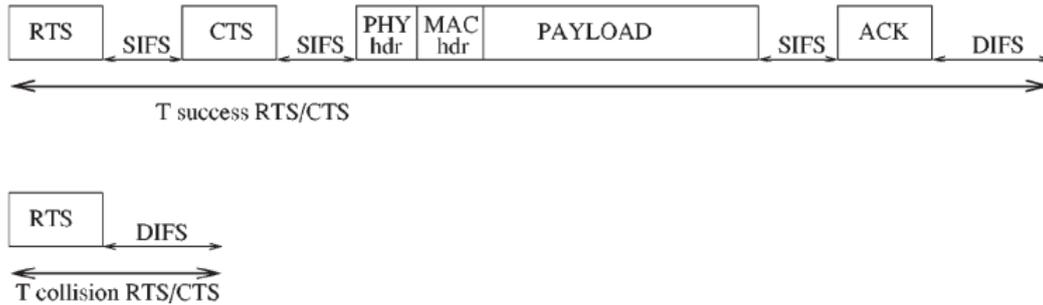
onde  $E[\cdot]$  é empregado para o valor médio.

Considera-se que uma transmissão com sucesso ocorre em um *slot* de tempo com probabilidade  $P_{tr}P_s$ . O termo apresentado no numerador da equação (2.6), que representa a quantidade média de informação útil transmitida com sucesso em um *slot* de tempo, é definido por  $P_{tr}P_sE[P]$ , sendo  $E[P]$  o tamanho da carga útil média de cada pacote. A duração média de um *slot* de tempo, representado pelo termo do denominador da equação 2.6, pode ser calculada considerando-se as seguintes probabilidades: (1)  $1 - P_{tr}$ , representando a probabilidade do *slot* ser vazio; (2)  $P_{tr}P_s$ , representando a probabilidade de uma transmissão bem sucedida; (3)  $P_{tr}(1 - P_s)$ , representando a probabilidade de uma transmissão com colisão. Desta forma tem-se que

$$\bar{S} = \frac{P_{tr}P_sE[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c} \quad (2.7)$$

onde  $\sigma$  é a duração de um *slot* de tempo vazio,  $T_s$  é o tempo médio de uma transmissão bem sucedida, e  $T_c$  é o tempo médio de uma transmissão com colisão. Neste caso,  $E[P]$  deve ser expresso na mesma unidade que  $\sigma$ ,  $T_s$  e  $T_c$ .

A Figura 2.8 ilustra a sequência temporal de transmissões bem sucedidas e com colisão para o Mecanismo de Acesso ao meio RTS/CTS, sendo as equações dos tempos gastos para cada caso apresentadas da seguinte forma



**Figura 2.8** Tempos  $T_s$  e  $T_c$  do Mecanismo RTS/CTS. Fonte: [22]

$$T_s = \frac{RTS}{R} + SIFS + \delta + \frac{CTS}{R} + SIFS + \delta + \frac{H + E[P]}{R} + SIFS + \delta + \frac{ACK}{R} + DIFS + \delta \quad (2.8)$$

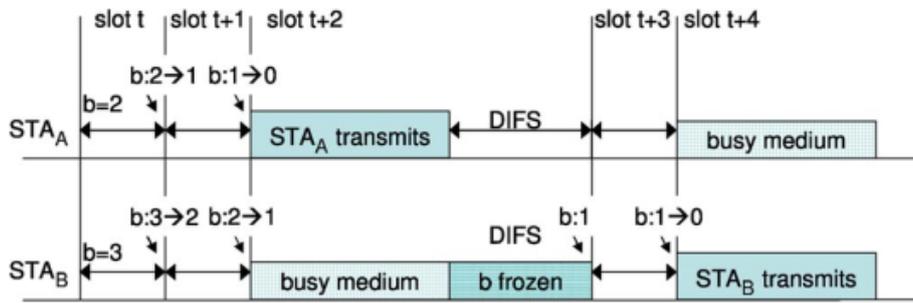
$$T_c = \frac{RTS}{R} + DIFS + \delta \quad (2.9)$$

onde  $RTS$ ,  $CTS$  e  $ACK$  são os tamanhos em bits dos pacotes correspondentes,  $SIFS$  e  $DIFS$  são as durações dos intervalos entre quadros,  $H$  e  $E[P]$  são, respectivamente, os tamanhos do cabeçalho e da carga (*payload*) do pacote de dados,  $\delta$  é o atraso de propagação no canal, e  $R$  é a taxa de transmissão em bits por segundo.

### 2.3.1.2 Refinamentos nas Abordagens de Modelamento do IEEE 802.11 DCF - Tinnirello *et al.* 2010 [26]

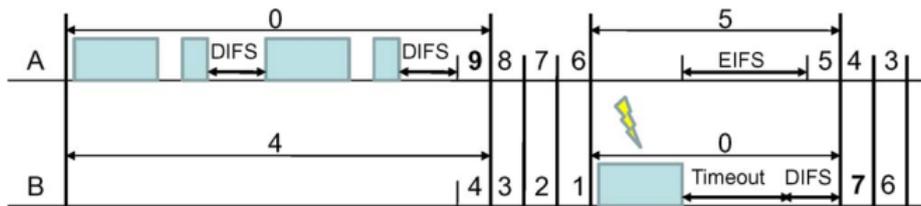
Através de um diagrama temporal apresentado na Figura 2.9, os autores de [26] destacam a existência dos chamados *slots* anômalos, que foram ignorados em trabalhos anteriores [22, 23, 24, 25], ocasionando um distanciamento entre estes modelos precedentes e o caso real coalescente ao padrão IEEE 802.11 DCF. Estes *slots* surgem imediatamente após uma transmissão, seja ela bem sucedida ou acometida por uma colisão. Nestes casos, a probabilidade de o *slot* estar ocupado é significativamente menor do que em outros *slots*.

Consequentemente, um outro fator substancialmente crítico em [22, 23] que se distancia do padrão DCF é o método equivocado de se decrementar o contador de resguardo no início de cada *slot*, em vez de no final. Adicionalmente, é descartada a característica peculiar, que é prevista no padrão, do congelamento do contador quando a estação detecta que o canal está ocupado. Os modelos [24, 25] tentam corrigir este problema, mas pecam em suas premissas ao considerarem que a probabilidade de transmissão em *slots* anômalos é equivalente à probabilidade de transmissão em outros *slots*, oferecendo modelos menos precisos que o apresentado em [22, 23].



**Figura 2.9** Exemplificação de um *slot* anômalo. Neste caso, o *slot* anômalo é o imediatamente posterior à transmissão com sucesso. Fonte: [26]

Como afirmado anteriormente, os *slots* anômalos surgem imediatamente após uma transmissão, seja ela bem sucedida ou acometida por uma colisão. No primeiro caso, só terá direito de transmitir no *slot* anômalo a estação que participou da transmissão precedente. Isso só ocorrerá se caso a estação sortear 0 como valor aleatório do seu contador de resguardo. Considerando que neste momento a janela de contenção será igual a  $CW_{min}$ , haja vista que a estação acabou de participar de uma transmissão bem sucedida, a probabilidade de se sortear 0 aleatoriamente será igual a  $1/(CW_{min})$ . No segundo caso, as estações envolvidas na colisão deverão se abster em transmitir por um período mínimo igual a  $ACK_{timeout} + DIFS$ , devendo posteriormente extrair um novo intervalo de resguardo. Além disso, as demais estações que não foram envolvidas na colisão poderão reativar seus contadores de resguardo assim que transcorrerem um intervalo *EIFS* e o *slot* anômalo posterior à colisão. Nos dois tipos de transmissão, as demais estações não participes da última comunicação não transmitirão no *slot* anômalo pois seus contadores de resguardo ainda estarão com um valor maior que zero. A Figura 2.10 ilustra a definição dos *slots* para os dois casos de transmissão.



**Figura 2.10** Diagrama temporal da definição dos *slots* de resguardo. Fonte: [26]

Com o objetivo de se propor um modelo de maior concordância com o Padrão DCF, os autores visam corrigir os problemas identificados nos trabalhos predecessores. A cadeia de *Markov* bidimensional de dois processos estocásticos apresentada em [22] é adaptada para modelar o congelamento de resguardo e os comportamentos anômalos dos *slots* imediatamente após o período em que o canal esteve ocupado (*vide* Figura 2.11). Uma metodologia mais precisa foi adotada com relação ao estágio zero do resguardo. Esse estágio poderá ser atingido após uma transmissão bem sucedida ou quando o número máximo de tentativas de retransmissão ( $R$ )

for alcançado, ocasionando no descarte do pacote HOL (do inglês *head-of-line*). Essas duas possibilidades são representadas pelos estados cujos estágios de resguardo são  $0^+$  e  $0^-$ , respectivamente. Vale salientar que o modelo de Tinnirello *et al.* é o único modelo apresentado que considera um número máximo de tentativas de retransmissão antes do descarte do pacote HOL, conforme prevê o Padrão IEEE 802.11 DCF [9]. As possíveis probabilidades de transições não nulas da cadeia de *Markov* adaptada são

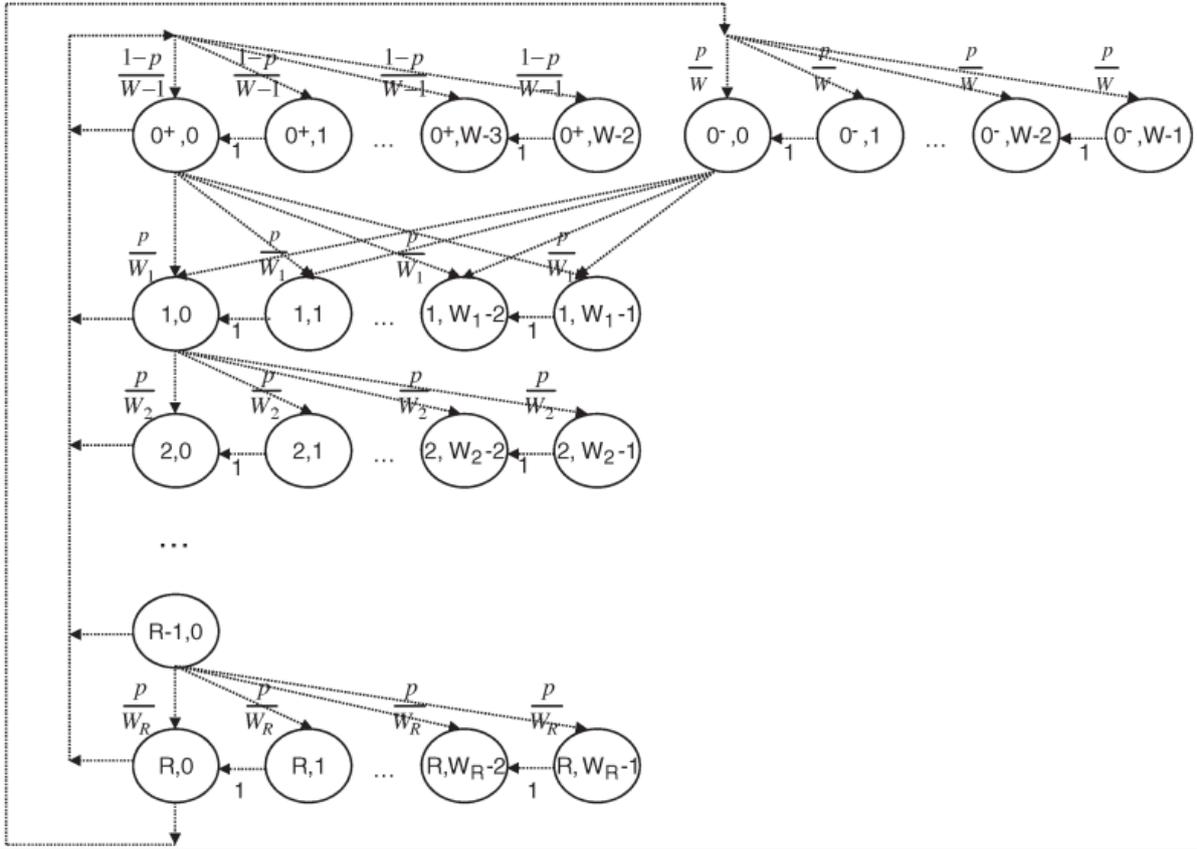
$$\left\{ \begin{array}{lll} P\{i, k | i, k+1\} = 1 & k \in [0, W_i - 2] & i \in [1, R] \\ P\{0^-, k | 0^-, k+1\} = 1 & k \in [0, W_0 - 2] & \\ P\{0^+, k | 0^+, k+1\} = 1 & k \in [0, W_0 - 3] & \\ P\{0^-, k | R, 0\} = p/W_0 & k \in [0, W_0 - 1] & \\ P\{0^+, k | i, 0\} = (1-p)/(W_0 - 1) & k \in [0, W_0 - 2] & \forall i \\ P\{i, k | i-1, 0\} = p/W_i & k \in [0, W_i - 1] & i \in [1, R]. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Se caso houver uma transmissão bem sucedida, um novo valor para o contador de resguardo é aleatoriamente escolhido entre 0 e  $CW_{min}$ . Se caso o valor 0 for sorteado, não há transição de estado, indicando que mais uma transmissão deverá ser realizada imediatamente após a transmissão anterior. Depois de uma transmissão bem sucedida, um *slot* de tempo extra deve ser transcorrido conforme ilustra a Figura 2.10. Isso significa que o estado alcançado após uma transmissão bem sucedida deverá ser o que corresponde a um decremento no contador. Sendo assim, os possíveis estados do estágio zero a serem alcançados através de transições após uma transmissão com sucesso estão na faixa entre 1 e  $CW_{min} - 1$ .

Entretanto, se após uma colisão o número de tentativas de retransmissão atingiu seu valor máximo  $R$ , não haverá mais a possibilidade de haver uma transmissão consecutiva como no caso da transmissão com sucesso. Sendo assim, a transição para o estágio zero ocorre com um valor para o contador de resguardo estando entre 0 e  $CW_{min}$ . Essa faixa de valores é a mesma para os casos de colisão que ocorram em estados diferentes de  $R$ . É sensível o fato de que o modelo proposto por Tinnirello *et al.* considere o congelamento do contador de resguardo, mas não utilize transições em *loop* para isso.

Considerando a cadeia de *Markov* aprimorada da Figura 2.11, a probabilidade  $\tau$  de que uma estação transmita em um determinado *slot* de tempo é dada por [26]

$$\begin{aligned} \tau &= \sum_{j=1}^R b_{j,0} + b_{0^-,0} + b_{0^+,0} \\ &= \frac{1 - p^{R+1}}{1 - p} b_{0,0} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1-p}{2(1-p^{R+1})} \left[ \sum_{j=0}^R p^j (2^j W - 1) - (1 - p^{R+1}) \right]}. \end{aligned} \quad (2.11)$$



**Figura 2.11** Cadeia de *Markov* bidimensional - Tinnirello 2010. Fonte: [26]

A probabilidade condicional de colisão  $p$ , assim como a vazão de saturação normalizada  $\bar{S}$ , são determinadas de maneira similar ao modelo de Bianchi [22] e resultam que

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (2.12)$$

$$\bar{S} = \frac{P_{tr} P_s \overline{E[P]}}{(1 - P_{tr}) \sigma + P_{tr} P_s \overline{T_s} + P_{tr} (1 - P_s) \overline{T_c}}. \quad (2.13)$$

$\overline{E[P]}$  representa o valor médio do tamanho do pacote.  $\overline{T_s}$  e  $\overline{T_c}$  representam os tempos utilizados em transmissões bem sucedidas e em colisões, respectivamente. Neste caso, deve-se considerar também a possibilidade de ocorrerem transmissões bem sucedidas consecutivas dentro de um mesmo *slot* como apresentado no modelo. Os valores para cada uma destas variáveis são determinadas por [26]

$$\overline{E[P]} = P \frac{CW_{min} + 1}{CW_{min}} \quad (2.14)$$

$$\overline{T_s} = T_s \frac{CW_{min} + 1}{CW_{min}} + \delta \quad (2.15)$$

$$\bar{T}_c = T_c + \delta \quad (2.16)$$

onde  $P$  representa o tamanho médio dos pacotes desconsiderando-se as transmissões consecutivas,  $T_s$  o tempo para uma transmissão bem sucedida de um único pacote e  $T_c$  o tempo de uma única colisão.

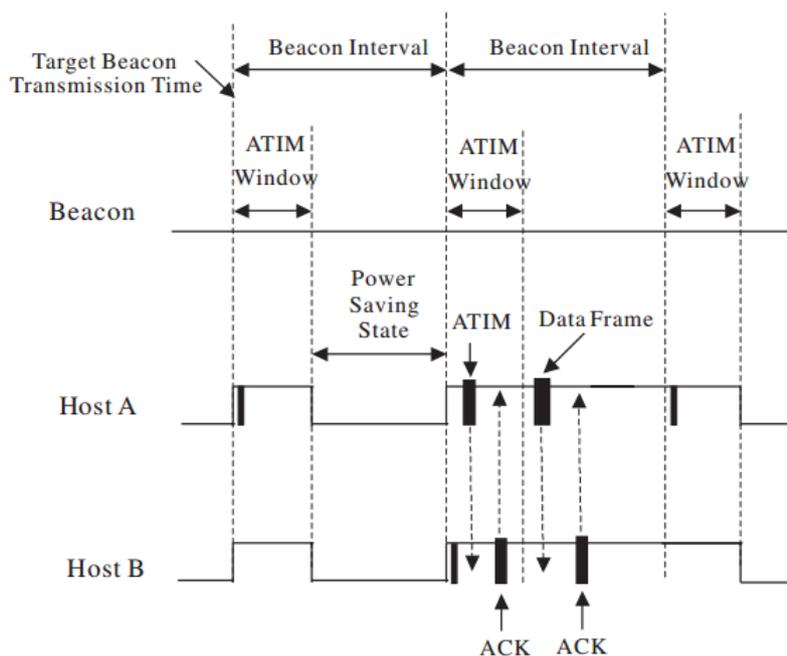
### 2.3.2 IEEE 802.11 *Power Saving Mode/Mechanism*

A principal restrição em redes *ad hoc* sem fio e de sensores é o consumo de energia de suas estações. Por não estarem fisicamente conectadas a fontes de energia, os dispositivos sem fio costumam ser energizados por baterias. Um nó pode consumir energia ao transmitir pacotes (*TX mode*), ao processar pacotes recebidos (*RX mode*), e até mesmo quando estiver ocioso (*IDLE mode*). Em padrões IEEE 802.11, onde são empregados mecanismos de contenção e detecção da portadora (do inglês *Carrier Sense*), os nós devem escutar o canal de comunicação antes de transmitir os dados. Nesse período, o nó encontra-se ocioso executando tarefas úteis que podem consumir uma quantidade de energia não trivial. Geralmente, o consumo de energia durante a transmissão e recepção de pacotes é maior que o consumo quando o dispositivo está ocioso. Entretanto, o consumo de energia do dispositivo durante o *IDLE mode* não é necessariamente insignificante.

Para que o dispositivo possa economizar energia, um estado adicional denominado modo de suspensão ou de inatividade (do inglês *SLEEP mode* ou *DOZE mode*) é geralmente projetado para que ele possa “dormir”. Durante este estado, o consumo de energia é significativamente menor do que nos outros estados apresentados. Adicionalmente, para que as estações possam retomar normalmente as suas comunicações sem prejuízo, elas devem “acordar” após um certo período programado ativando o modo *AWAKEN*. Nesta subseção são apresentados os mecanismos eficientes de economia de energia do Padrão IEEE 802.11 PSM descritos em [9, 13, 14, 15, 16], e que são utilizados neste trabalho e em protocolos multicanais da camada de enlace do tipo *Split Phase* [12] retratados na próxima seção.

O Padrão IEEE 802.11 PSM pode ser utilizado tanto em redes com infraestrutura (*i.e.* BSS, do inglês *Basic Service Set*) quanto em redes IBSS (do inglês *Independent BSS*). Nos dois casos, o objetivo é o mesmo: proporcionar economia de energia nas redes sem fio. As redes *ad hoc* se enquadram no caso das redes IBSS, e é sobre a aplicação do *Power Save Mode* em redes IBSS que os próximos parágrafos irão se concentrar.

Todos os eventos da rede são executados dentro de intervalos entre *beacons* que são divididos em duas fases. A primeira etapa viabiliza a troca de pacotes de controle entre as estações que desejam transmitir dados. Estes pacotes, denominados de pacotes ATIM (do inglês *Announcement Traffic Indication MAP*), carregam uma estrutura de dados em formato de mapa que indica quais são as estações que irão participar da transmissão de dados na fase subsequente. À primeira etapa dá-se o nome de fase de negociação ou Janela ATIM (do inglês *ATIM-Window*). O período da janela ATIM é regido pelas regras do Padrão IEEE 802.11 DCF. Se caso as negociações forem bem sucedidas, os nós que trocaram os pacotes de controle garantem participação na próxima fase. Caso contrário, eles deverão esperar pelo início da janela



**Figura 2.12** Diagrama temporal do funcionamento do Padrão IEEE 802.11 PSM. Fonte: [15]

ATIM do próximo intervalo entre *beacons*.

A segunda etapa, por sua vez, proporciona a efetiva troca de pacotes de dados (*DATA Frame*). As estações que não tenham pacotes a transmitir ou a receber passam a entrar no estado *DOZE mode* até o início do próximo intervalo entre *beacons*, onde suas atividades serão retomadas pelo estímulo do *AWAKEN mode*. Para informar à rede que os pacotes ATIM e de dados foram recebidos com sucesso, durante todo o intervalo entre *beacons* as estações receptoras devem enviar pacotes de reconhecimento (ACK, do inglês *acknowledgement*). A Figura 2.12 ilustra o diagrama temporal da troca de pacotes entre as estações A e B.

### 2.3.3 IEEE 802.11ac

O Padrão IEEE 802.11ac, proposto em [27, 28], é o sucessor do Padrão IEEE 802.11n [29]. Assim como os demais padrões da família IEEE 802.11, este padrão da camada de enlace também é baseado em contenção. Ele foi desenvolvido entre 2011 e 2013 com previsão de lançamento para o início de 2020.

O padrão IEEE 802.11n foi o pioneiro no quesito da utilização do MIMO na comunicação WLAN, fazendo com que os nós pudessem utilizar até quatro antenas e tirassem proveito da diversidade espacial, do conhecimento do estado do canal (CSI, do inglês *Channel State Information*), e conseqüentemente, da formação de raios direcionados (do inglês *beamforming*) [30]. Com isso, foi permitida a ampliação da vazão da rede em até quatro vezes. No padrão mais recente, foi possível que o número de antenas permitidas fosse ampliado para oito, sendo que, no máximo, quatro delas estariam em um só nó. Com o IEEE 802.11ac, é factível combinar

até 24 canais de 10MHz, ou canais de 20, 80 e até 160MHz. Adicionalmente, tornou-se prática a utilização de uma constelação com uma maior quantidade de informação por símbolo: 256 QAM (do inglês *Quadrature Amplitude Modulation*) comparado ao 64 QAM utilizado no padrão anterior.

O diferencial do padrão IEEE 802.11ac é a possibilidade de se realizar MU-MIMO (do inglês *Multiuser MIMO*), e conseqüentemente, a detecção de múltiplos usuários (do inglês *MIMO Multiuser Detection*). Com isso, torna-se possível a transmissão de múltiplos sinais diferentes simultaneamente em um mesmo canal de frequência, e a decodificação com sucesso de um ou mais sinais por parte do receptor. Conseqüentemente, a vazão da rede cresce na ordem do menor número de antenas disponíveis entre transmissor e receptor, conforme descrito em [31]. Este tipo de comunicação torna-se viável com a utilização de esquemas de codificação e decodificação de sinais apresentado por *Alamouti* em [32].

Em redes com uma infraestrutura organizacional, este tipo de metodologia pode se tornar inviável, tendo em vista que tal característica pode ocasionar um estorvo no ganho de vazão devido às estações clientes estarem centralizando os seus dados em *hotspots*. Porém, para redes *ad hoc* e de sensores, há uma homogeneidade maior devido às características de descentralização e distribuição dos dados. Os receptores de redes com detecção de múltiplos usuários devem ser capazes de diferenciar, por intermédio de um conjunto de antenas, os seus sinais das demais interferências concorrentemente absorvidas. Os métodos tradicionais de detecção de múltiplos usuários envolvem filtros adaptativos, *Rake Receivers*, decorrelacionamento, detecção adaptativa e detecção ótima, envolvendo soluções tanto de *hardware* quanto de *software* [30, 33]. Para simplificar a complexidade destas técnicas, foram propostas outras alternativas como, por exemplo, os detectores lineares de múltiplos usuários [33]. Tal alternativa pode ser ainda mais assingelada através da utilização de iterações, que é o caso das arquiteturas V-BLAST [21]. Seu funcionamento consiste em identificar e decodificar o sinal com maior razão sinal-ruído pós processamento através de múltiplas antenas de recepção. Posteriormente, esse sinal tem o efeito cancelado para que o sinal com a segunda maior razão seja decodificado. Este processo iterativo permite a identificação e decodificação de vários sinais transmitidos simultaneamente em uma mesma frequência de forma eficiente.

## 2.4 Trabalhos Relacionados

Muitos protocolos multicanais têm sido propostos na literatura [19, 20, 34, 35, 36, 37]. A abordagem híbrida apresentada neste trabalho baseia-se no protocolo MAC multicanal para comunicação muitos-para-muitos (M2MMAC) [19, 20] e no protocolo MAC multicanal híbrido (H-MMAC) [37]. A operabilidade de tais protocolos está relacionada ao modo de funcionamento dos protocolos *Split Phase* [12] e ao padrão IEEE 802.11 PSM [9, 13, 14, 15, 16]. Conforme visto na seção anterior, este padrão estabelece soluções para a redução do consumo de energia em estações de rede sem fio. Como um dos precursores dos Protocolos MAC Multicanais *Split Phase*, surge no cenário das redes *ad hoc* o protocolo MMAC (do inglês *Multichannel MAC for Ad Hoc Networks*) [34].

Os Protocolos *Split Phase* se caracterizam por dividirem a comunicação em uma fase de negociação e uma fase de transmissão de dados. No primeiro período, os nós que desejam

enviar dados trocam pacotes de controle em um canal padrão previamente estabelecido. No segundo período, é realizada a transmissão de pacotes de dados nos canais escolhidos na fase anterior.

Nesta seção serão revisados os protocolos multicanais a serem comparados com a abordagem híbrida H-M2MMAC aqui proposta.

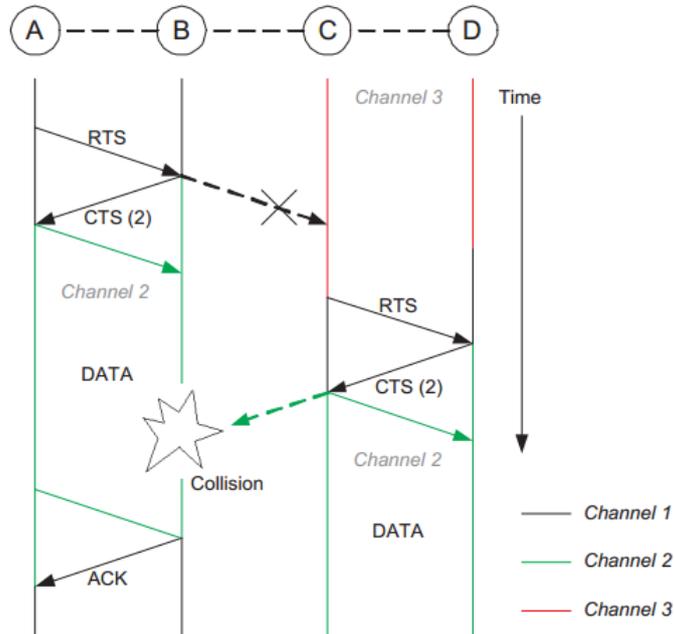
### 2.4.1 Protocolo MAC Multicanal para Redes *Ad Hoc* - MMAC

O protocolo MMAC, proposto em [34], destacou-se por ser um dos primeiros protocolos multicanais para redes *ad hoc* a solucionar o problema do terminal escondido multicanal. Este problema acontece pelo fato das estações não poderem monitorar mais de um canal simultaneamente, dado que cada estação possui somente um transceptor *half-duplex*. Consequentemente, as estações não conseguem evitar a ocorrência de colisões na rede pelo método tradicional do CSMA/CA.

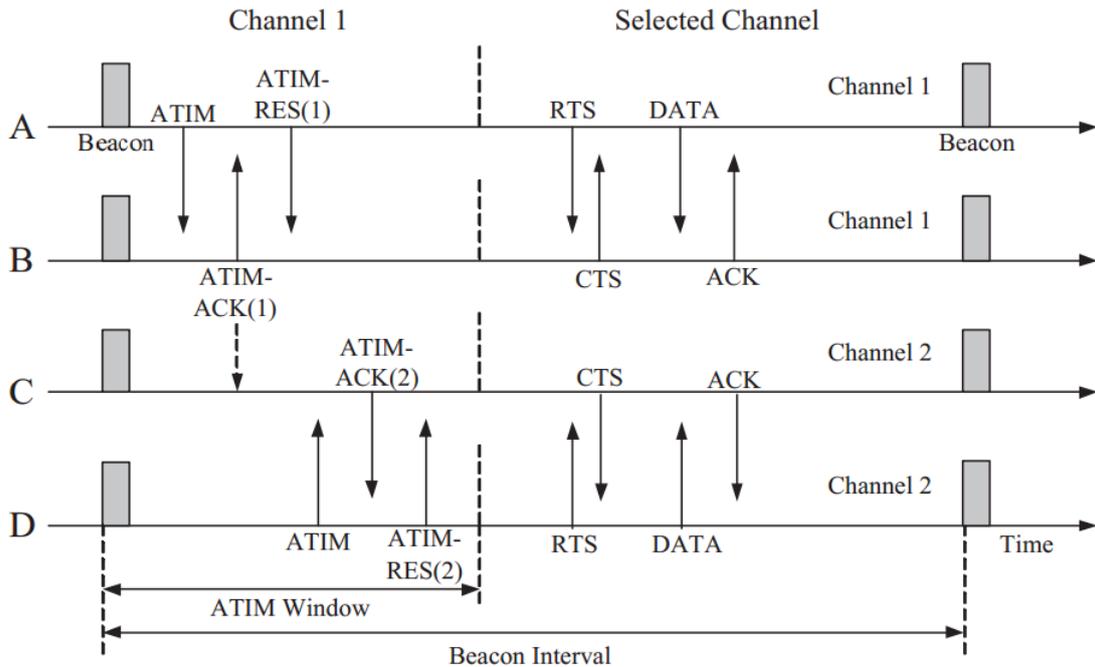
Considere o cenário apresentado na Figura 2.13. O nó *A* possui dados a serem enviados para o nó *B*. Devido aos mecanismos de Detecção Virtual da Portadora (do inglês *Virtual Carrier Sense*), o nó *A* envia um pacote RTS no canal 1, que é o canal de controle, requisitando o envio de dados. *B* escolhe o canal 2 para comunicação dos dados e envia um pacote CTS para *A*. Durante a troca de pacotes de controle no canal 1, *C* está ocupado no canal 3 e não consegue detectar o pacote CTS enviado por *B*. Enquanto *A* e *B* iniciam a comunicação efetiva de dados no canal 2, *C* e *D* negociam no canal de controle uma nova comunicação. Coincidentemente, *D* também escolhe o canal 2 para a comunicação de dados e envia um pacote CTS para *C* informando o canal escolhido. Deste modo, ocorre uma colisão e o desempenho da rede é comprometido.

O protocolo MMAC se diferenciou dos demais protocolos multicanais propostos por dividir a comunicação em intervalos de *beacon* com duas fases. De forma similar ao padrão IEEE 802.11 PSM, a primeira fase é denominada Janela ATIM (do inglês *ATIM Window*) e a segunda Janela de Comunicação (do inglês *Communication-Window*). Mecanismos de Detecção Virtual da Portadora são utilizados durante as duas fases de comunicação.

Na primeira fase, as estações que desejam se comunicar iniciam uma negociação de três vias (do inglês *Three-Way Handshake*). A estação fonte envia à estação destino um pacote ATIM e aguarda pelo recebimento de um pacote ATIM-ACK. Cada estação mantém uma lista de canais não sobrepostos preferenciais. Esses canais são escolhidos por serem os menos saturados da rede e os menos utilizados por outras estações nas proximidades. Se nenhuma das estações ainda não tenha escolhido um canal devido a uma outra negociação realizada anteriormente, um dos canais preferenciais é escolhido para a comunicação. Decidir por escolher um dos canais preferenciais fará com que aumente a probabilidade de transmissão de dados bem sucedida, além de maximizar a utilização dos recursos disponíveis e minimizar a contenção. Se caso uma, e somente uma das estações já tenha um canal escolhido, a outra estação será alocada a tal canal. Por fim, se as duas estações já tenham um canal definido e estes canais são diferentes, a transmissão dos pacotes em questão deverá aguardar até a próxima Janela ATIM, onde haverá novas negociações. Dependendo da escolha do canal de dados feita pelas duas estações, um terceiro pacote de controle, chamado ATIM-RES, é enviado. Nele é definido o canal a ser utilizado para que também sirva de informação às demais estações próximas ao transmissor.



**Figura 2.13** Problema do terminal escondido em um ambiente multicanal. Fonte: [34]



**Figura 2.14** Diagrama temporal do funcionamento do protocolo MMAC. Fonte: [34]

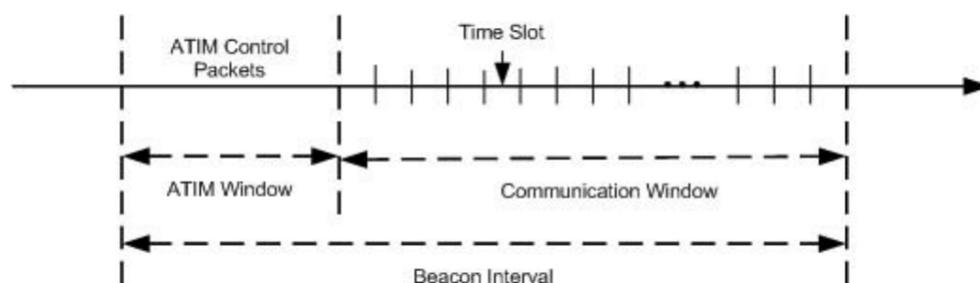
Na fase de comunicação, ainda são trocados pacotes RTS e CTS. Isso faz-se necessário tendo em vista que os canais não são exclusivos a um par de nós, além de fornecer um maior nível de compatibilidade com os equipamentos legados que não participam do mesmo protocolo, mas que utilizam os mesmos canais. A Figura 2.14 apresenta o processo de negociação de canais e troca de dados do protocolo. Na imagem, é possível perceber a troca de pacotes de controle entre os nós *A* e *B* na Janela ATIM do Canal Padrão. Fica firmado que o canal 1 será o canal escolhido para a troca de pacotes de dados. Os nós *C* e *D*, por sua vez, decidem escolher o canal 2 já tendo o conhecimento de que o canal 1 está ocupado. Sendo assim, o problema do terminal escondido multicanal é solucionado.

As estações que não tenham pacotes a serem transmitidos ou recebidos entrarão em *DOZE mode* durante a Janela de Comunicação. A partir do início do próximo intervalo de *beacon*, tais estações deverão retornar ao estado *AWAKEN* para participarem da Janela ATIM seguinte.

#### 2.4.2 Protocolo MAC Multicanal com Eficiência Energética para Redes *Ad Hoc* - TMMAC

O protocolo TMMAC, proposto em [35], incorpora as vantagens proporcionadas pelo protocolo MMAC combinadas à abordagem de multiplexação por divisão de tempo (TDMA). A Janela de Comunicação é dividida em *slots* de tempo fixos, o que propicia às estações não envolvidas na comunicação de um determinado *slot* a possibilidade de entrarem em *DOZE mode*. A duração de cada *slot* equivale ao tempo mínimo necessário para a transmissão ou recepção de um único pacote de dados, incluindo o tempo para mudar de canal e o tempo para o envio do pacote de reconhecimento. Com isso, é possível alcançar uma maior eficiência energética, sendo o TMMAC um algoritmo de agendamento TDMA adaptativo e eficiente em termos de energia. Complementarmente, os autores propõem que as estações sejam baseadas em transceptores únicos *half-duplex*.

Como os recursos negociados durante a Janela ATIM são a combinação de canal e *slot* de tempo, o número de negociações pode ser ainda maior. Sendo assim, os autores ainda propõem um mecanismo de ajuste dinâmico da duração da Janela ATIM com base em padrões de tráfego diferentes da rede. O ajuste dinâmico permite maximizar a vazão do protocolo mediante a quantidade de estações que estão disputando o canal de controle. A Figura 2.15 apresenta a arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC.



**Figura 2.15** Arquitetura geral de funcionamento do protocolo TMMAC. Fonte: [35]

São utilizadas duas estruturas de dados para o TMMAC denominadas de CUB (do inglês *Channel Usage Bitmap*) e CAB (do inglês *Channel Allocation Bitmap*). Os CUB's são mantidos em cada estação e transmitidos através dos pacotes ATIM. Cada CUB representa a informação atual de utilização de um canal. Existem  $M$  CUB's em cada estação, onde  $M$  representa a quantidade de canais disponíveis. Com isso, é possível acompanhar as alocações de todas as negociações anteriores na Janela ATIM atual. A Figura 2.16 apresenta um exemplo de um CUB referente às informações de utilização do  $i$ -ésimo canal em diferentes *slots* para um determinado intervalo entre *beacons*. Se o intervalo entre *beacons* possui  $N$  *slots*, cada CUB conterá  $N$  bits. É utilizada a definição  $CUB_{i,j}$  para denotar o  $j$ -ésimo bit do  $CUB_i$ . O bit "1" determina que o *slot*  $j$  do canal  $i$  já foi alocado em negociações anteriores. Os CAB's possuem a mesma estrutura de dados dos CUB's, porém indicam somente quais foram os *slots* de tempo de um canal específico que foram alocados pela negociação atual. Os CAB's são transmitidos somente pelos pacotes ATIM-ACK, ATIM-RES ou ATIM-BRD para indicar aos vizinhos quais os canais e quais os *slots* de tempo que foram alocados pela negociação atual. Os CAB's não são persistidos nas estações. O bit "1" determina que o *slot* de tempo  $j$  do canal  $i$  foi alocado na negociação atual.

	Slot 1	Slot 2	Slot 3	Slot 4	...	Slot $N$
$CUB_i$	1	1	0	0	...	0

**Figura 2.16** Exemplo de estrutura CUB. Fonte: [35]

As modificações dos CUB's seguirão as seguintes regras: (1) Os bits serão redefinidos para zero assim que a estação é ligada ou no início de cada intervalo entre *beacons*. (2) Com o estabelecimento de uma negociação com sucesso para transmissão de dados no *slot* de tempo  $j$  do canal  $i$ , os bits do *slot* de tempo  $j$  dos  $i$ -ésimos CUB's das estações de transmissão e recepção de dados serão definidos como "1". (3) Se uma estação detectar um ATIM-ACK ou ATIM-RES, o  $CUB_{i,j}$  será definido como "1" se o  $CAB_{i,j}$  contido no pacote for igual a "1". As ações (2) e (3) são realizadas através de operações a nível de bit (*bit-NOR*) entre o CAB da negociação e o CUB da própria estação. Deste modo, é determinado o conjunto de recursos disponíveis para a comunicação em curso.

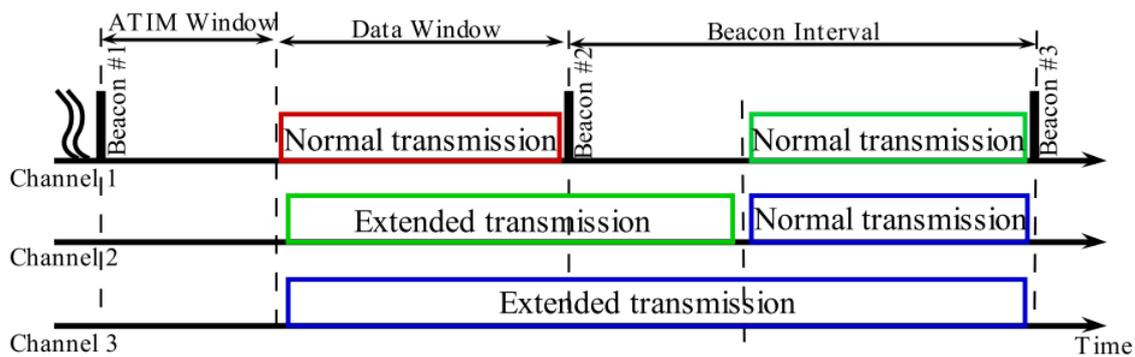
Na fase de comunicação, são trocados os pacotes de dados sem a necessidade da utilização de mecanismos de detecção virtual da portadora como pacotes RTS e CTS. Isto se torna possível pois cada *slot* de tempo é exclusivo para a troca de dados entre um par de nós. Entretanto, os autores afirmam que o TMMAC não é um protocolo livre de colisões, pois não se pode garantir que todas as negociações foram realizadas com perfeição durante a fase de negociação. Para amenizar a sobrecarga na troca de pacotes de controle e diminuir a quantidade de bits a serem transmitidos em cada pacote, os autores estabeleceram que as estruturas CAB's informarão apenas sobre os três canais de frequência menos utilizados.

Adicionalmente, os autores informam sobre a possibilidade de transmissão de pacotes *broadcast* pelo protocolo. Os resultados mostram que o protocolo atinge uma vazão de saturação 113% superior e um decréscimo de 74% de energia por pacote quando comparado ao protocolo MMAC.

### 2.4.3 Protocolo MAC Multicanal Híbrido - H-MMAC

O protocolo H-MMAC, proposto em [37], tem como objetivo possibilitar a transmissão de dados durante a fase de negociação, enquanto uma outra parcela dos nós da rede realiza *Three-Way Handshake* no canal de controle durante o intervalo da Janela ATIM. Cada nó possui um único transceptor *half-duplex*, possuindo a capacidade de mudar de canal dinamicamente. O canal de controle também pode ser utilizado para transferir pacotes de dados durante a janela de comunicação assim como os outros canais. Portanto, os nós têm dois modos de transmissão possíveis, que são:

- **Modo Normal:** As estações transmitem dados somente na fase de comunicação. Tendo em vista que o canal padrão utiliza a janela ATIM para troca de pacotes de controle, somente o modo de transmissão normal pode ser utilizado neste canal;
- **Modo Estendido:** As estações podem transmitir dados durante a janela de comunicação e a janela ATIM do próximo intervalo de *beacon* dos canais exclusivos para transmissão de dados. A transmissão pode se estender até o fim do próximo intervalo de *beacon* se, e somente se, os outros nós que estiveram na janela ATIM do canal padrão não utilizarem os canais exclusivos de dados em questão. Isso mantém os critérios de justiça entre os nós da rede. Assim como ocorre no protocolo MMAC, os nós não podem monitorar mais de um canal simultaneamente. Sendo assim, aqueles que utilizam o modo estendido devem se abster de comunicar durante a janela de comunicação seguinte se caso o canal estiver ocupado, tendo em vista que estes nós não participaram das negociações ocorridas durante a janela ATIM e desconhecem quais canais estão sendo utilizados durante a fase de comunicação. Tais medidas são necessárias para que não ocorra o problema do terminal escondido multicanal. Posto isto, nem sempre é vantajoso permanecer neste estado.



**Figura 2.17** Exemplo dos modos de transmissão do protocolo H-MMAC. Fonte: [37]

A Figura 2.17 exemplifica os tipos de transmissão do protocolo H-MMAC. Os autores afirmam haver vantagens no modo de transmissão estendido, principalmente em situações de alta carga de dados. O mesmo não se pode afirmar em casos onde há uma baixa carga. Por este

motivo o protocolo é híbrido, ou seja, o modo de transmissão é selecionado conforme o nível de carga na rede.

Existem quatro tipos de nós durante o intervalo ATIM: *Normal*, *Ongoing*, *Limited* e *Unknown*. Estes tipos ajudam os nós a acompanharem o status dos seus vizinhos.

- ***Normal***: Refere-se aos nós que estão na janela de negociação do canal padrão e que podem atualizar as suas informações sobre os nós vizinhos;
- ***Ongoing***: Refere-se aos nós que estão no modo de transmissão estendido e estão trocando dados durante a janela de negociação atual;
- ***Limited***: Refere-se aos nós que possuem informações limitadas dos seus vizinhos por estarem no modo *Ongoing* no último intervalo de *beacon*;
- ***Unknown***: Refere-se aos nós dos quais não se tem informação.

Cada nó sempre estará em um dos dois estados: *Normal* ou *Ongoing*. Porém, a sua percepção quanto aos seus vizinhos pode se apresentar entre os quatro estados apresentados anteriormente. Se o estado dos vizinhos estiver atualizado, o nó poderá determinar se o vizinho está apto a se comunicar ou não. Estas informações são mantidas em uma estrutura de dados denominada lista de informações dos vizinhos (NIL, do inglês *Neighbor Information List*), onde também é registrado em que canais os nós estão se comunicando. Assim como o protocolo MMAC, uma outra estrutura de dados denominada lista de canais preferenciais (PCL, do inglês *Preferable Channel List*) é mantida para a escolha dos melhores canais possíveis. Estas estruturas de dados são mantidas em cada estação.

#### 2.4.4 Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos - M2MMAC

O protocolo M2MMAC, proposto em [19, 20], objetiva o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis em uma rede multicanal, possibilitando a transmissão e recepção simultâneas de dados caracterizadas por uma comunicação muitos-para-muitos. Assim como os demais protocolos apresentados anteriormente, o M2MMAC é um protocolo *Split Phase* e utiliza duas fases durante o intervalo entre *beacons*. Durante a janela ATIM, no canal de controle estabelecido previamente, os pares de nós que conquistaram uma negociação com sucesso definem frequências (ou canais) diferentes de recepção, onde cada transmissor e receptor terá um canal de recepção exclusivo durante a janela de comunicação. A rede deve dispor de  $M$  canais de frequência não sobrepostos ortogonais.

O protocolo exige que todos os nós da rede possuam um transmissor e um receptor, ambos *simplex*, compondo um transceptor integrado com cadeias paralelas de processamento de sinais que transmite sincronicamente em frequências diferentes, enquanto recebe dados em um único canal de frequência distinto. Os nós são equipados com um conjunto de  $B$  antenas de recepção e uma única antena para transmissão [19, 20].

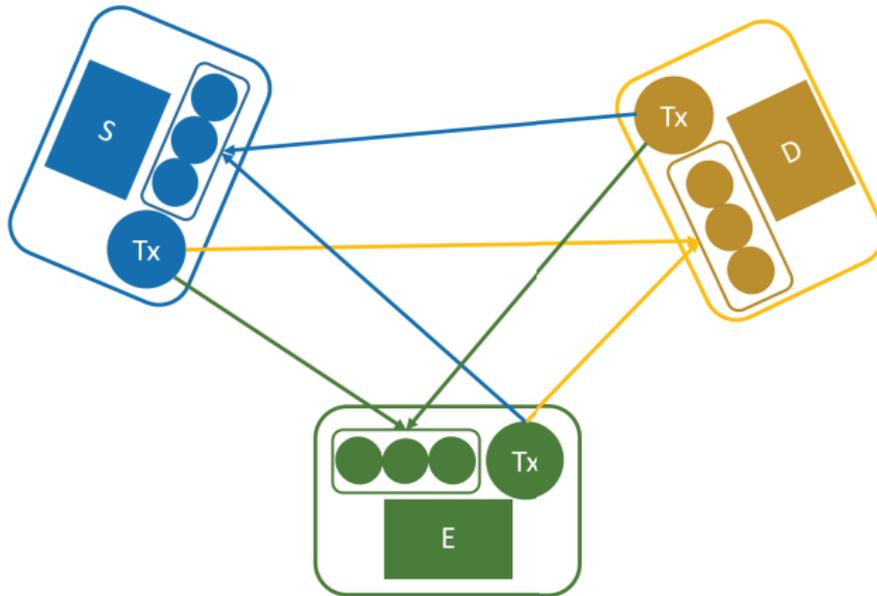
Para haver a sincronização entre os nós participantes da rede, possibilitando o início do intervalo entre *beacons* no mesmo instante, os nós são equipados com uma solução de sincronismo *out-of-band* como o GPS [19, 38]. Além disso, o M2MMAC procura utilizar a técnica

de detecção de múltiplos usuários MIMO de forma bem sucedida, fazendo-se necessário que os nós estejam suficientemente distantes para se evitar a correlação espacial dentre os diferentes sinais transmitidos [17, 19, 39]. Adicionalmente, cada nó deve alcançar e ser alcançado por todos os outros nós da rede, sendo a comunicação sempre em único salto (do inglês *single-hop*).

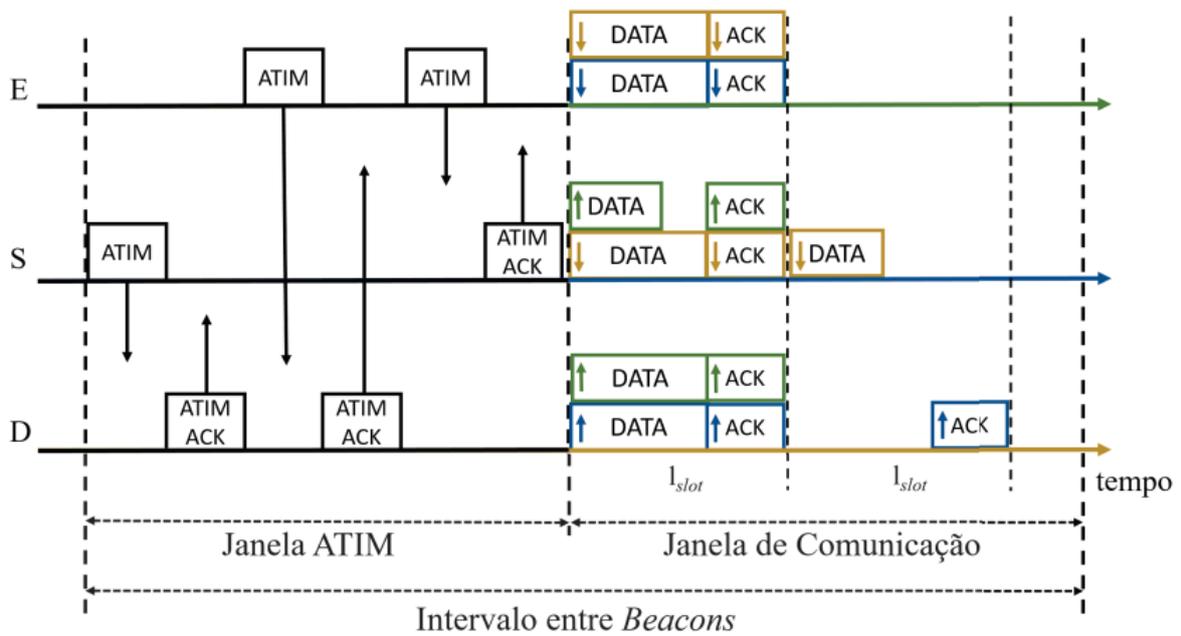
Como explicado na seção anterior, o padrão IEEE 802.11 confere a cada nó o conhecimento das informações do estado de cada canal. Estas informações podem ser adquiridas e atualizadas em uma estrutura de dados denominada NAV (do inglês *Network Allocation Vector*). Desta maneira, se o nó detectar que algum canal está ocupado por uma outra comunicação em curso, ele se abstém de transmitir para evitar a ocorrência de colisão de pacotes [9]. Para que a proposta do protocolo M2MMAC seguisse o seu curso natural de funcionamento, a estrutura NAV teve que ser modificada. Tendo em vista que cada canal só pode ser utilizado por um único nó para recepção de dados na janela de comunicação, o vetor NAV deverá apenas classificar os canais como utilizados ou não utilizados [19]. Sempre que um nó detectar qualquer pacote de controle durante o intervalo de negociação, ele deverá registrar em seu NAV os canais que passaram a estar ocupados. No momento em que o nó recebe o seu primeiro pacote ATIM, ele deve verificar em seu NAV se existe algum canal disponível para recepção de dados. Havendo mais de um canal de frequência disponível, o nó escolhe o canal aleatoriamente. A partir deste ponto, o nó passará a utilizar o canal escolhido durante a janela de comunicação atual para este e outros fluxos estabelecidos posteriormente com outros nós. Ademais, o NAV também é empregado para indicar a quantidade de fluxos de transmissão que um nó estará participando. Conforme descrito em [40], se um nó possui  $B$  antenas disponíveis, ele poderá decodificar até  $(B - 1)$  sinais distintos ao mesmo tempo. Essa limitação da quantidade de fluxos de comunicação é imposta pela detecção de múltiplos usuários MIMO. Adicionalmente, o NAV deve registrar a quantidade de pacotes de dados a serem transmitidos em cada um dos fluxos de transmissão. Vale salientar que o NAV deve ser zerado ao final de todo intervalo entre *beacons*.

Os fluxos de transmissão são negociados aos pares na janela ATIM e garantem a comunicação bidirecional entre um par de nós específico na janela de comunicação. Similarmente aos protocolos apresentados anteriormente, as negociações necessárias para a reserva de fluxos de comunicação se iniciam com a transmissão de um pacote ATIM por um nó fonte, para um nó destino. O pacote ATIM irá indicar a quantidade de pacotes de dados a serem enviados e a frequência de recepção do transmissor na janela de comunicação. Mesmo que as informações verdadeiramente úteis estejam em posse do transmissor, faz-se necessário que o receptor também envie pacotes ao canal de recepção do transmissor confirmando o recebimento dos dados, mesmo que em seguida o nó destino não tenha dados a serem enviados ao nó fonte no mesmo intervalo entre *beacons*. Posteriormente, o nó destino deverá consultar o seu NAV para verificar se ainda existe a possibilidade de se estabelecer mais um fluxo de transmissão na próxima fase. Se for possível, o nó destino deverá enviar um pacote ATIM-ACK indicando a sua frequência de recepção e o número de pacotes de dados que eventualmente ele tenha que transmitir ao nó fonte. Se for inviável, o nó destino deverá enviar um ATIM-NACK. De forma alternativa, o nó fonte poderia iniciar a contagem de um temporizador aguardando um ATIM-ACK até um determinado tempo limite ( $ACK_{timeout}$ ) [19].

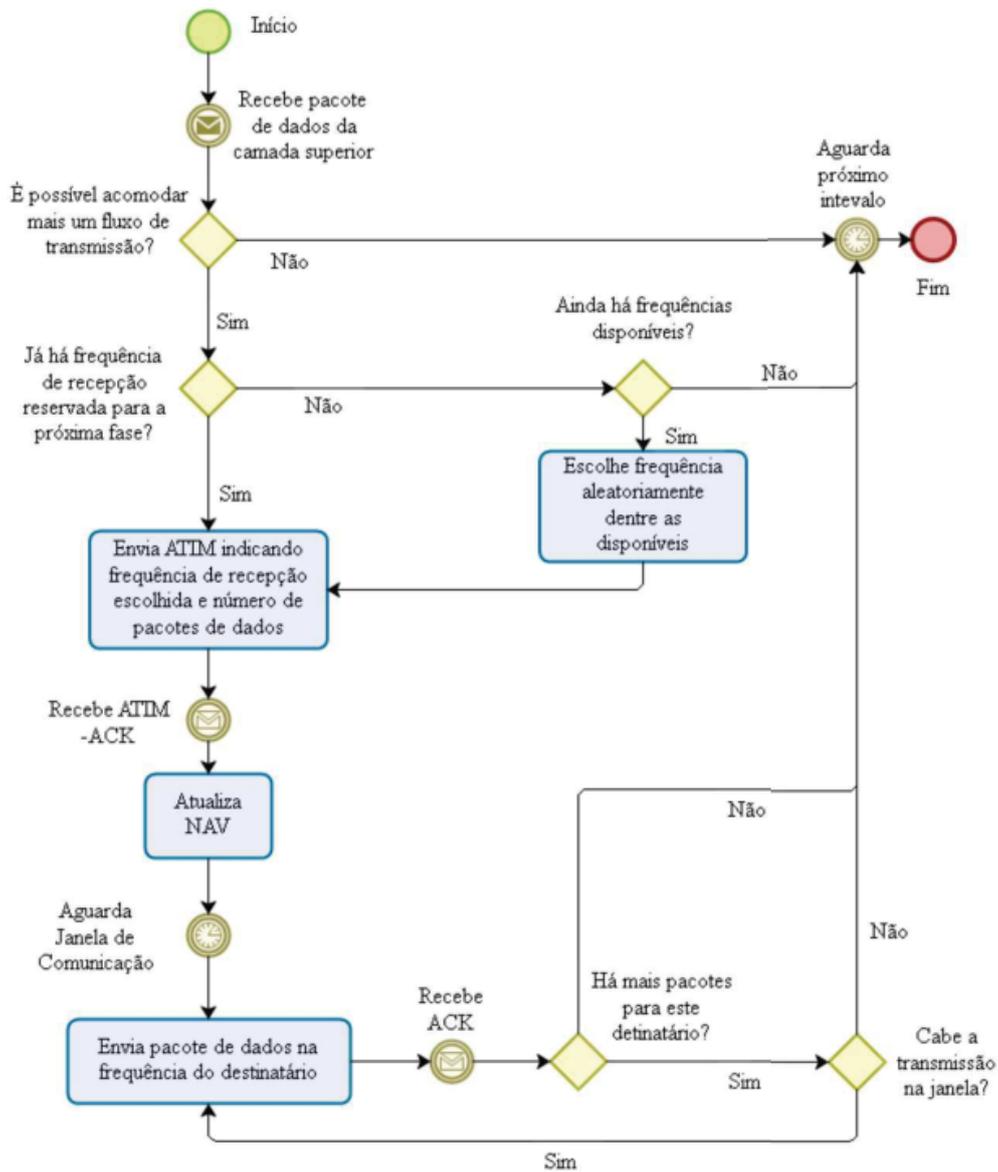
Uma vez que a negociação tenha sido realizada com êxito, os pacotes de dados, juntamente com os pacotes de confirmação, poderão ser transmitidos de forma simultânea e bidirecional



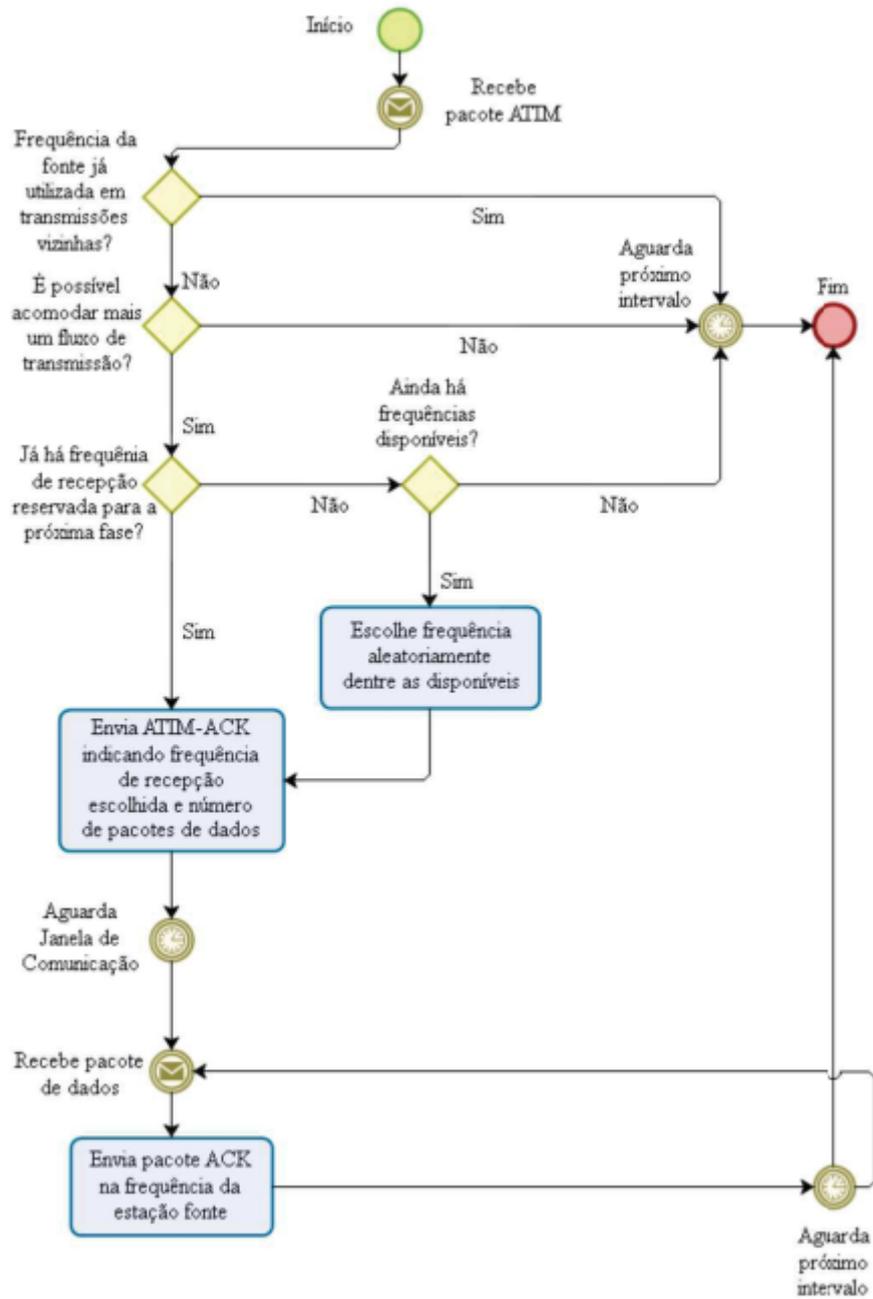
**Figura 2.18** Nós S, D e E realizam transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes durante a Janela de Comunicação. Fonte: [19]



**Figura 2.19** Negociações de fluxos de comunicação e transmissão de dados. Fonte: [19]



**Figura 2.20** Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo transmissor durante um intervalo entre *beacons*. Fonte: [19]



**Figura 2.21** Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo receptor durante um intervalo entre beacons. Fonte: [19]

entre o par de nós enquanto houver espaço na janela de comunicação. Se algum nó não dispor de dados a serem transmitidos ou recebidos na próxima fase de comunicação, ele deverá entrar em *DOZE mode* até o início do próximo intervalo entre *beacons* para economizar energia. A Figura 2.18 exemplifica uma rede de comunicação muitos-para-muitos com três nós (*S*, *D* e *E*) durante a janela de comunicação, onde cada nó possui um conjunto de três antenas de recepção realizando a detecção de múltiplos usuários MIMO para efetivar a decodificação simultânea dos pacotes.

Na Figura 2.19 é apresentado um diagrama temporal de como funcionaria o protocolo durante um intervalo entre *beacons*. Durante o período da janela ATIM, são realizadas três negociações com sucesso representadas por pacotes da cor preta. Imediatamente após o início da janela de comunicação, a troca de pacotes de dados e dos seus respectivos pacotes de confirmação ACK é efetivada. Uma nova rodada de transmissões é efetuada após o recebimento das confirmações. Para que haja um sincronismo na rede, cada rodada de transmissões só deve começar após transcorridos  $l_{slot}$  segundos, onde  $l_{slot}$  representa o tempo total para a transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede, juntamente com a confirmação de recebimento [19].

As Figuras 2.20 e 2.21 apresentam os fluxogramas das sequências de eventos durante um intervalo entre *beacons* realizados pelo transmissor e receptor, respectivamente. Considera-se nestes casos a utilização de temporizadores em vez da transmissão de pacotes ATIM-NACK.

# H-M2MMAC: Um Protocolo MAC Híbrido Multicanal de Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes 802.11

## 3.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma abordagem híbrida e adaptativa do Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos (M2MMAC) [19, 20]. A esta variante dá-se o nome de H-M2MMAC. Assim como o protocolo M2MMAC, o H-M2MMAC adota o Padrão IEEE 802.11 PSM (do inglês *Power Saving Mode/Mechanism*) como mecanismo de redução do consumo de energia em suas estações [9, 13, 14, 15, 16]. Além de recorrer aos recursos multicanais disponíveis e viabilizar a transmissão e recepção simultânea de múltiplos pacotes de dados utilizando a tecnologia baseada no Padrão IEEE 802.11, o H-M2MMAC delega aos nós a oportunidade de transmitir pacotes de dados durante a fase de negociação enquanto a outra parcela dos nós da rede realiza *Two-Way Handshaking* no canal de controle durante o intervalo da Janela ATIM (do inglês *Announcement Traffic Indication Message Window*) baseando-se na condição de alto tráfego na rede. Trabalhos como os propostos em [37, 41] visam aplicar esta característica, proporcionando uma comunicação mais eficiente e robusta.

Algumas das premissas do protocolo M2MMAC descritas em [19] permanecem válidas para a abordagem híbrida aqui proposta. Entre elas, é importante citar:

1. Utilizar o GPS como a solução de sincronismo *out-of-band* para todos os nós;
2. Proporcionar a todas as estações o conhecimento do estado dos canais;
3. Impossibilitar a correlação espacial dentre os diferentes sinais transmitidos pela garantia de que os nós estejam suficientemente distantes;
4. Equipar cada estação com um transceptor integrado com cadeias paralelas de processamento de sinais contendo  $B$  antenas de recepção, seguindo um esquema simplificado de *hardware* para transmissão e recepção de pacotes de dados e de controle;
5. Possibilitar a comunicação em único salto (do inglês *single-hop*) em que todos os nós estão ao alcance uns dos outros e portanto não há o terminal escondido;
6. Considerar que os  $M$  canais de frequência são ortogonais e não sobrepostos;
7. Seguir as instruções para a seleção de canais apresentadas para o M2MMAC;
8. Proporcionar a transmissão e recepção simultâneas de múltiplos pacotes de dados, considerando os  $(B - 1)$  fluxos de transmissão máximos que cada estação pode comportar no seu canal de recepção.

O restante deste capítulo abordará os seguintes tópicos: (1) as diferenças entre os modelos de transmissão da rede - normal, estendido e híbrido - destacando as vantagens e desvantagens de cada um e os critérios de decisão por parte das estações para o modelo híbrido, (2) as estruturas de dados utilizadas por cada estação: NAV (do inglês *Network Allocation Vector*) e NIL (do inglês *Neighbor Information List*), (3) uma breve descrição dos pacotes de controle, e (4) o modo de operação do protocolo proposto.

## 3.2 Modelos de Transmissão

São definidos dois modos de transmissão para as estações com características similares às descritas em [37]. No modo normal (N-Tx), a comunicação entre duas estações segue a sua execução habitual. Neste caso, os dados devem ser transmitidos somente na janela de comunicação. No modo estendido (E-Tx), a transmissão pode ser realizada durante a janela de comunicação e no seguinte intervalo da janela ATIM. As estações que realizam o modo estendido de transmissão, salvo exceções a serem apresentadas posteriormente para o modelo híbrido aqui proposto, devem se abster de se comunicarem na janela de comunicação seguinte.

Em critérios de taxonomia dos protocolos *Split Phase* no que se refere ao modelo de transmissão da rede, é possível classificá-los em três tipos: Normal, Estendido e Híbrido. No Modelo Normal, a comunicação entre todos os nós só ocorre obrigatoriamente na janela de comunicação, seja qual for o *beacon* e o canal de frequência. Sua desvantagem é que os intervalos das janelas de negociação dos canais que são exclusivos para troca de dados são desperdiçados. Este modelo é representado por protocolos como o MMAC e o M2MMAC. No Modelo Estendido, as estações sempre exercerão a transmissão estendida, independentemente do nível de carga da rede. Sua desvantagem é que, em condições de baixa carga da rede (poucas estações e baixa demanda de pacotes de dados), os intervalos das janelas de comunicação dos *beacons* subsequentes são desperdiçados, haja vista que neste modelo as estações devem se abster de se comunicarem na janela de comunicação seguinte. Como resultado, o desempenho da rede cai, proporcionando atrasos e baixa vazão. No Modelo Híbrido, por sua vez, os nós decidem qual será o modo de transmissão exercido com base no tráfego da rede: Modo Normal em casos de baixa carga e Modo Estendido em casos de alta demanda de dados. Ou seja, ele se adapta ao tráfego da rede. Este modelo é representado por protocolos como o H-MMAC e será utilizado para o trabalho aqui proposto.

Cada par de fluxos de transmissão deve ser classificado como normal ou estendido. Se um nó contiver pelo menos um fluxo de transmissão estendido, ele deverá ser classificado como do tipo estendido, mesmo que um ou mais fluxos normais sejam utilizados pelo mesmo nó. Dois aspectos decisivos que estimarão a carga de tráfego na rede do H-M2MMAC são o número de nós que estão competindo no canal padrão para transmitir pacotes de dados, e o número de pacotes de dados que serão transmitidos pela estação fonte. Dito isto, a estação fonte poderá escolher o tipo do par de fluxos de transmissão mediante os seguintes critérios:

- As estações devem averiguar a densidade da rede mediante o número de colisões de seus pacotes de controle. Quanto maior o número de estações competindo na janela de negociação, maior o número de colisões. Quando uma colisão ocorre, o número de ten-

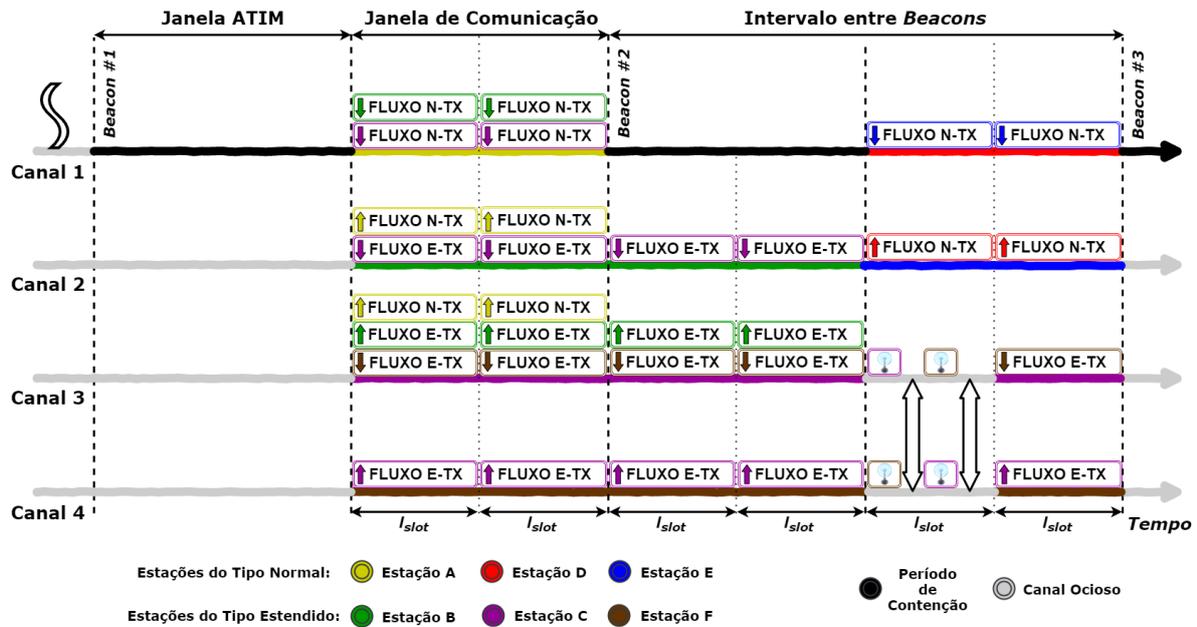
tativas de retransmissão é incrementado. Assim como proposto em [37], um limiar de retransmissões ( $E-Tx\_Retry\_Threshold$ ) é definido como o ponto de partida para seleção do tipo de transmissão. Se o número de tentativas de retransmissão é maior que  $E-Tx\_Retry\_Threshold$ , a estação fonte decidirá se selecionará o tipo estendido mediante o número de pacotes de dados em seu *buffer*.

- O espaço de tempo necessário para a transmissão de um único pacote é definido por  $l_{slot}$ , que corresponde ao tempo total para transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede, incluindo a confirmação de recebimento [19, 20]. Se caso a estação portar em seu *buffer* uma quantidade de pacotes de dados superior ao número de intervalos  $l_{slot}$  presentes no período de comunicação, ela decidirá que o par de fluxos de transmissão será do tipo estendido e enviará um pacote ATIM para o receptor indicando esta escolha. O comprimento do intervalo de negociação, assim como o de comunicação, deve ser múltiplo do comprimento do intervalo  $l_{slot}$ , haja vista que a abordagem híbrida possibilita a troca de dados durante o intervalo de negociação.

Se caso a estação fonte compreender que não há a necessidade de realizar uma transmissão estendida, ainda assim o nó receptor poderá optar por um par de fluxos do tipo estendido caso verifique posteriormente que a carga da rede aumentou, e/ou detenha uma quantidade de pacotes a serem enviados à estação fonte que seja superior ao número de intervalos  $l_{slot}$  presentes no período de comunicação.

A Figura 3.1 ilustra um exemplo dos possíveis tipos de fluxos de transmissão e recepção para as estações do H-M2MMAC. Considerando que a janela ATIM do canal 1 é utilizada pelas estações para troca de pacotes de controle, somente o modo de transmissão normal pode ser escolhido neste canal. Normalmente, a transmissão estendida termina no fim da próxima janela ATIM, conforme ilustrado na Figura 3.1 durante a reserva do canal 2 pela estação B. Entretanto, a comunicação pode se estender até o fim do próximo intervalo entre *beacons* se, e somente se, nenhum outro nó que participará da próxima janela de negociação decidir reservar o canal no próximo intervalo de comunicação de dados, mantendo desta maneira os critérios de justiça entre os nós da rede. Os autores *Dang et al.*, ao definirem o funcionamento do protocolo H-MMAC em [37], forneceram esta possibilidade. Como a comunicação entre um par de estações do H-MMAC ocorre em um mesmo canal, basta que o transmissor sintonize o canal em questão para verificar se alguma outra estação está ocupando o canal. Entretanto, para o protocolo H-M2MMAC, a comunicação mútua transcorre entre dois canais. O par de estações que necessitar estender a comunicação até o fim do próximo intervalo entre *beacons* deve sintonizar seus próprios canais de recepção e garantir, por um determinado período de tempo, que nenhum destes canais estejam sendo utilizados por outros nós que porventura tenham estabelecido uma outra negociação na janela ATIM seguinte. Mesmo que esta condição seja satisfeita, cada estação do par comunicante deve confirmar que o canal para o qual continuariam transmitindo também está desocupado. Sendo assim, faz-se necessário ainda que cada estação do par comunicante sintonize o canal para o qual os dados continuariam sendo transmitidos ao seu respectivo par, haja vista que a comunicação é sempre bidirecional, e que para cada par são reservados dois canais (um para cada estação). Com isso, a estação deve alternar dinamicamente o contexto do seu transceptor para o canal deste nó vizinho. Finalizado o sintonamento,

a estação deve alternar para o seu canal de origem e continuar com a troca de dados caso as condições anteriormente definidas sejam satisfeitas. Caso contrário, o par de estações deve se abster de transmitir dados e aguardar por uma posterior negociação. Esse modo de escuta mútua evita uma colisão de pacotes desnecessária.



**Figura 3.1** Exemplo dos tipos de transmissão dos nós e dos seus respectivos fluxos de dados no protocolo H-M2MMAC.

Esta possível vertente do protocolo está ilustrada na Figura 3.1 durante a reserva dos canais 3 e 4 pelas estações C e F no primeiro intervalo entre *beacons*, respectivamente. Na segunda janela de comunicação, as estações C e F monitoram inicialmente seus próprios canais durante o início do primeiro  $l_{slot}$  (as antenas contornadas por retângulos representam este sensoramento). Estando os canais ociosos, as estações alternam o contexto dos seus transceptores (a estação C, identificada pela cor lilás, monitora o canal 4; e a estação F, identificada pela cor marrom, monitora o canal 3). As setas de cor preta representam esta alternância. As estações monitoram os canais, identificam-os como canais ociosos, e alternam mais uma vez o contexto de seus transceptores para que somente no início do próximo intervalo  $l_{slot}$  elas possam prosseguir com a comunicação. O tempo mínimo para o monitoramento de cada canal deve ser  $(T_{channel\_switching} + DIFS + CW_{min} \times Slot\_time)$  conforme apresentado por *Dang et al.* em [37]. É importante destacar que embora a Figura 3.1 indique que o período de monitoramento foi realizado em um único intervalo  $l_{slot}$ , a quantidade de intervalos  $l_{slot}$  a serem transcorridos durante este período ainda pode ser maior, haja vista que  $l_{slot}$  depende inteiramente do tamanho do maior pacote de dados permitido na rede.

### 3.3 Estruturas de Dados: NAV e NIL

#### 3.3.1 NAV - *Network Allocation Vector*

Conforme explicado no capítulo anterior, o Padrão IEEE 802.11 especifica uma estrutura de dados denominada NAV. A sua função é manter os nós informados quanto ao conhecimento das informações do estado de cada canal. Sendo assim, se caso a estação verificar em seu NAV que um determinado canal de frequência está ocupado, ele se abstém de transmitir para evitar colisões. Para o funcionamento adequado do protocolo proposto neste trabalho, faz-se necessário que algumas alterações sejam realizadas no vetor NAV de cada estação.

Tomando-se como premissa a característica herdada pelo protocolo M2MMAC de que um canal não pode ser compartilhado por mais de um nó durante a fase de comunicação, a estrutura NAV deverá ser alterada para que seja possível classificar cada canal de frequência disponível como utilizável ou não utilizável durante a próxima fase de comunicação. Além disso, a estação que necessitar trocar dados na próxima fase de comunicação deverá registrar em seu NAV durante o período de negociação qual o canal de recepção que ele estará sintonizado. A escolha é realizada aleatoriamente com base no registro de utilização de cada canal. Complementarmente, o vetor deve informar a quantidade de pares de fluxos de comunicação em que o nó está participando. Esta informação é essencial, tendo em vista que os nós têm um número limitado de antenas de recepção e seguem as diretrizes da detecção de múltiplos usuários MIMO. Para cada par de fluxos, o NAV ainda deverá informar a frequência para envio de pacotes de reconhecimento e a quantidade de pacotes a serem recebidos. Esta última informação servirá como um dos pilares de tomada de decisão para a escolha do modo de transmissão entre o par de nós, haja vista que o protocolo aqui proposto adota uma abordagem híbrida de comunicação explicada na seção anterior. Por fim, o NAV deverá registrar o endereço atual de sua estação que será indexado nos pacotes de controle a serem trocados durante o intervalo da Janela ATIM.

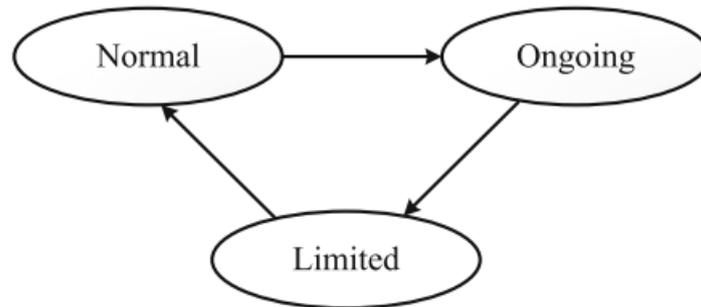
#### 3.3.2 NIL - *Neighbor Information List*

Uma segunda estrutura de dados denominada lista de informação dos vizinhos (NIL, do inglês *Neighbor Information List*) é armazenada na estação para registrar as principais informações de cada vizinho da rede. A NIL mantém informações atualizadas tais como: endereço, canal de frequência, classificação e modo de transmissão de cada estação vizinha.

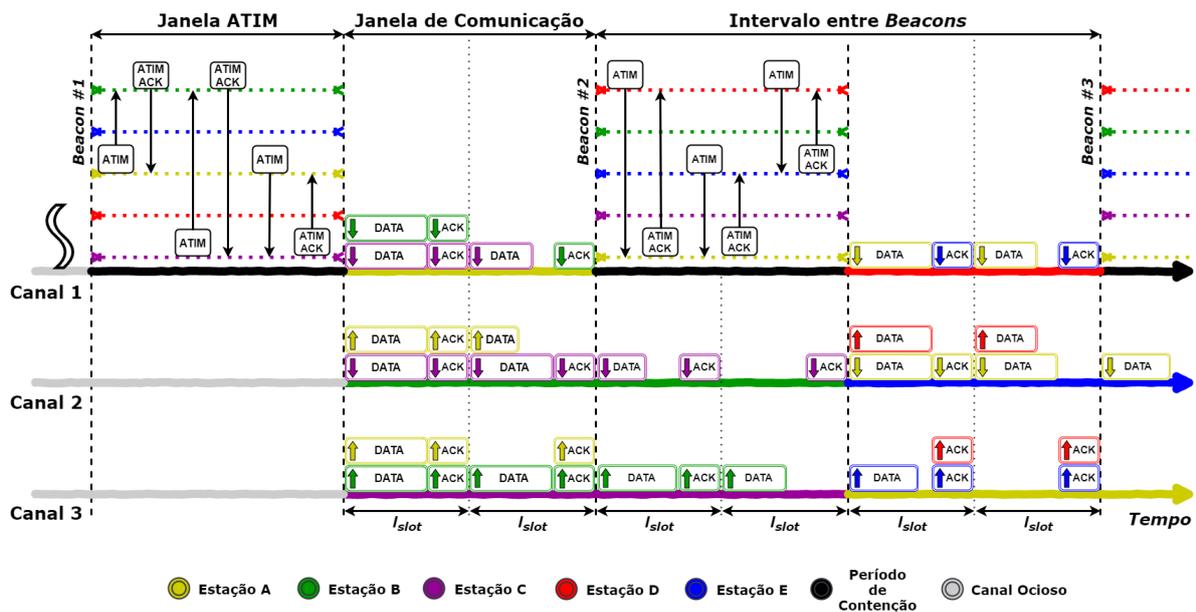
O campo endereço é a identidade da estação na rede. O campo canal apresenta o canal de frequência que será ocupado pelo nó vizinho durante o período de comunicação. À uma estação ociosa será atribuído 0 neste campo. Semelhantemente ao protocolo H-MMAC, o H-M2MMAC outorga às estações da rede a classificação dos seus vizinhos em quatro tipos diferentes durante a janela ATIM: *Normal*, *Ongoing*, *Limited* e *Unknown*. Individualmente, cada nó pode se classificar como *Normal* ou *Ongoing*. Por fim, o campo modo de transmissão indica se a estação selecionou no intervalo de negociação atual o modo de transmissão normal (N-Tx) ou estendido (E-Tx).

Se uma estação escolheu o modo de transmissão estendido no intervalo entre *beacons* precedente, isso implicará na sua classificação, pelas demais estações vizinhas, como tipo *Ongoing* na janela ATIM corrente, como tipo *Limited* na próxima janela ATIM, e conseqüentemente

como tipo *Normal* na janela seguinte. A Figura 3.2 apresenta a sequência de classificações para uma estação que selecionou o tipo de transmissão estendida. Se um nó se classifica como do tipo *Ongoing* na Janela ATIM atual, ele não conseguirá escutar os pacotes de controle na janela ATIM do próximo intervalo entre *beacons*. Consequentemente, ele terá que classificar os seus nós vizinhos como tipo *Unknown* [37].



**Figura 3.2** Sequência de transições de classificações para uma estação do tipo estendida. Fonte: [37]



**Figura 3.3** Diagrama temporal da negociação de fluxos e posterior transmissão de dados do Protocolo H-M2MMAC.

A Figura 3.3 ilustra o diagrama temporal de uma possível negociação de fluxos e posterior transmissão de dados do H-M2MMAC. No primeiro intervalo entre *beacons* as estações B e C são classificadas como tipo *Normal* e selecionam o modo de transmissão estendida. No segundo intervalo, elas classificarão a si mesmas e serão classificadas pelas estações vizinhas como tipo *Ongoing*, e conseqüentemente não escutarão os pacotes de controle enviados por seus vizinhos

neste *beacon*. O pior caso ocorre quando as estações B e C perdem os pacotes de controle das estações vizinhas que irão selecionar o modo de transmissão estendida, que na Figura 3.3 são representadas pelas estações A e E. Como resultado, as estações B e C serão classificadas pelos seus vizinhos como tipo *Limited* no terceiro intervalo entre *beacons* e poderá escutar os pacotes de controle dos seus vizinhos para atualização da sua NIL. As estações A e E estarão disponíveis somente na quarta Janela ATIM do canal padrão, o que permitirá que as estações B ou C possam realizar negociações com as estações A ou E. Sendo assim, as estações B e C serão classificadas como tipo *Normal* somente no quarto intervalo entre *beacons*.

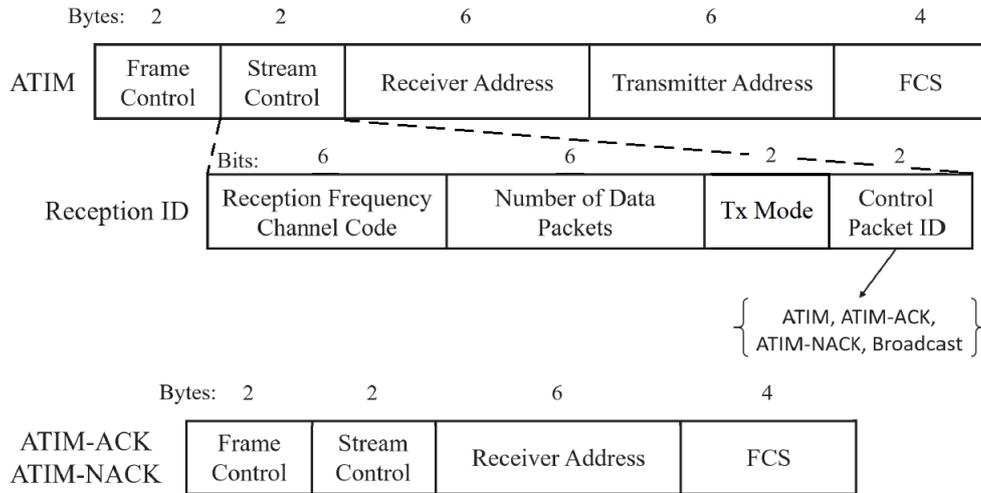
Na segunda janela ATIM, as estações B e C não escutarão os pacotes de controle trocados entre os seus vizinhos no canal padrão (canal 1). Por isso, elas classificarão os seus vizinhos como tipo *Unknown*. Mesmo que as estações B e C estivessem cientes de que outras duas estações F e G, não ilustradas na Figura 3.3, tivessem estabelecido uma negociação na janela ATIM do primeiro intervalo entre *beacons*, selecionando o modo de transmissão estendida e trocando pacotes de dados em um quarto e quinto canais também não ilustrados na Figura 3.3, as estações F e G permaneceriam desconhecidas para B e C no terceiro intervalo entre *beacons* até o momento em que fossem enviados pacotes de controle para o conhecimento e atualização das estruturas NIL das estações B e C. Na quarta janela ATIM, as estações restantes do tipo *Unknown* são alteradas automaticamente para estações do tipo *Normal*.

Para que uma estação possa trocar dados, é necessário que ela conheça o *status* atual dos seus vizinhos. Ela atualiza a sua própria classificação como *Normal* ou *Ongoing* e, em seguida, atualiza a sua NIL antes de cada *beacon*. Durante o intervalo de negociação, sempre que um pacote ATIM de uma estação vizinha é detectado, os campos canal e modo de transmissão da NIL poderão ser atualizados para o respectivo registro da NIL cujo campo endereço seja equivalente ao endereço de transmissão do pacote ATIM. A atualização da NIL é realizada por camadas superiores da rede. Como uma negociação só pode ser confirmada através de um pacote de reconhecimento (ATIM-ACK), ao ser recebido um pacote ATIM, é necessário que a estação aguarde pelo respectivo pacote ATIM-ACK. Assim que o ATIM-ACK é recebido, são realizadas as atualizações. Caso não seja recebido o ATIM-ACK, as informações que seriam atualizadas na NIL deverão ser descartadas. No transcorrer dos intervalos entre *beacons*, o campo classificação do registro da NIL correspondente a este vizinho deve ser atualizado conforme descrito nesta subseção. Portanto, é de extrema importância que a estação mantenha a sua NIL atualizada.

### 3.4 Pacotes de Controle

Durante o intervalo de negociação, as estações que possuem pacotes de dados em seu *buffer* para serem transmitidos a uma estação vizinha devem anunciar esta necessidade através de pacotes ATIM. Esse tipo de *frame* de controle é bastante similar ao RTS do Padrão IEEE 802.11 DCF [9], e principalmente ao ATIM apresentado em [19, 20]. Ele é composto pelos seguintes campos: *Frame Control*, *Stream Control*, *Receiver Address*, *Transmitter Address* e *Frame Check Sequence*. A Figura 3.4 ilustra a estrutura do *frame*.

A principal diferença entre o RTS e o ATIM proposto aqui e em [19, 20] é a modificação do campo *Duration ID* do RTS para o *Stream Control* do ATIM. Os nós de estações IEEE



**Figura 3.4** Pacotes de Controle do Protocolo H-M2MMAC. Adaptado de [19].

802.11 legadas utilizam este campo do RTS para atualizarem seus NAV's apropriadamente. Esse campo funciona como parte do mecanismo de prevenção de colisões para que as estações vizinhas registrem a utilização futura do canal e se abstenham de transmitir dados enquanto o canal estiver ocupado por uma outra comunicação em curso. O *Stream Control* proporciona alguns subcampos com informações importantes para o funcionamento dos protocolos M2MMAC e H-M2MMAC, que são:

1. **Reception Frequency Channel Code:** Representa o canal de frequência que o transmissor estará sintonizado durante a próxima fase de comunicação. É utilizado para informar o canal de frequência pelo qual o destinatário enviará os *frames* de reconhecimento (ATIM-ACK e ATIM-NACK), e para atualizar as estações vizinhas no que se refere aos registros de utilização dos canais de frequência das NAV's e os registros do canal de frequência das NIL's;
2. **Number of Data Packets:** Informa ao destinatário a quantidade de pacotes de dados que serão transmitidos no fluxo de transmissão na fase posterior. Esta informação também deverá ser atualizada na NAV do destinatário;
3. **Control Packet ID:** Classifica o *frame* de controle em uma entre quatro alternativas, que são: ATIM, ATIM-ACK, ATIM-NACK ou ATIM-BRD (do inglês *ATIM Broadcast*). Os pacotes de controle ATIM-ACK e ATIM-NACK correspondem aos ACK e NACK do Padrão IEEE 802.11 DCF, respectivamente.

Uma simples alteração no campo *Stream Control* do ATIM proposto por Ghobad e Moraes em [19, 20] foi implementada para a formatação do ATIM aqui proposto. A adaptação utiliza dois *bits* do subcampo *Control Packet ID* para a formação de um conjunto de *flags* denominado *Tx Mode*. A primeira *flag* indicará o modo de transmissão dos fluxos de comunicação do par

de estações que estabeleceram o *Two-Way Handshaking*. Esta informação deverá ser atualizada na estrutura NAV das duas estações comunicantes. A segunda *flag* informará o modo de transmissão da estação fonte para que as NIL's das estações vizinhas possam ser atualizadas. O acionamento das *flags* indicará que o modo de transmissão é do tipo estendido. Como explicado anteriormente, se a estação estabelecer com algum vizinho pelo menos um par de fluxos de comunicação do tipo estendido, tal estação será rotulada como uma estação de modo estendido, mesmo que ela detenha um ou mais fluxos do tipo normal. A adaptação não comprometerá o bom funcionamento do protocolo, haja vista que o campo *Control Packet ID* pode ser ainda representado pelos dois bits restantes do protocolo M2MMAC.

Mesmo que um canal de frequência esteja livre no momento da elaboração do pacote ATIM ou ATIM-ACK, existe a possibilidade de o canal ser reservado por outra estação no período de resguardo em um momento imediatamente anterior. Sendo assim, as estações devem ser capazes de eventualmente modificarem as informações descritas acima e atualizarem o registro de utilização de cada canal da estrutura NAV. Se algum outro canal ainda estiver disponível, a estação mudará de canal. Caso contrário, a comunicação deve ser abortada, e a estação fonte deverá aguardar até o próximo intervalo entre *beacons* para tentar reservar um canal no período de contenção da janela de negociação.

### 3.5 Modo de Operação do Protocolo H-M2MMAC

Inicialmente, para que seja estabelecido um enlace de comunicação entre um par de nós, a estação fonte deverá confirmar se é possível acomodar mais um fluxo de transmissão. Posteriormente, a estação fonte verifica a classificação do destinatário na estrutura NIL. A estação destinatária deve obrigatoriamente ser classificada pela estação fonte como tipo *Normal* ou *Limited* [37]. Se caso a classificação do receptor for do tipo *Ongoing* ou *Unknown*, o transmissor deverá esperar até o próximo intervalo entre *beacons* para tentar estabelecer um enlace de comunicação. Outro fator importante a ser considerado pela estação fonte é a reserva de um canal de frequência disponível para recepção de dados. A estação deverá consultar sua estrutura NAV e verificar o registro de utilização de cada canal. Se existirem um ou mais canais disponíveis, a seleção é realizada aleatoriamente. Caso contrário, deve-se aguardar pelo próximo intervalo entre *beacons*.

Sendo satisfeitas as premissas iniciais descritas acima, a estação fonte decidirá qual o tipo do par de fluxos de comunicação a ser estabelecido com base no tráfego da rede. Os fluxos de transmissão são formados aos pares e possibilitam a comunicação bidirecional entre as estações durante o período posterior à fase de negociação. As negociações se iniciam com a transmissão de um pacote ATIM por parte da estação fonte que detém dados a serem transmitidos para a estação destinatária durante a janela ATIM. O nó transmissor anexará ao campo *Stream Control* do pacote ATIM o seu canal de recepção, a quantidade de pacotes a serem enviados no fluxo de transmissão, o modo de transmissão do par de fluxos de comunicação, o modo de transmissão da estação e o *ID* do pacote de controle, que neste caso é "00". Por padrão, o modo de transmissão da estação é 0. Se o par de fluxos de comunicação for do tipo estendido, as duas *flags* do subcampo *Tx Mode* devem ser acionadas.

Ao receber o pacote ATIM, a estação destinatária deverá consultar os campos de registro

de utilização de cada canal e da quantidade de pares de fluxos de comunicação da sua estrutura NAV para verificar se ainda é possível acomodar mais um fluxo de recepção na próxima fase. Caso positivo, a estação decidirá definitivamente qual será o tipo dos fluxos de transmissão e de recepção a serem estabelecidos e enviará um pacote de reconhecimento (ATIM-ACK) ao remetente, anexando suas informações ao campo *Stream Control*. Caso contrário, um ATIM-NACK poderá ser enviado. Assim como proposto por *Ghobad e Moraes* em [19, 20], um temporizador na estação transmissora poderá ser utilizado como forma alternativa, dispensando desta forma o envio do pacote ATIM-NACK. Porém esta opção deverá ser utilizada com cautela. O *ID* do pacote de reconhecimento será “01” se o pacote for ATIM-ACK ou “10” se o pacote for ATIM-NACK.

Uma vez que a negociação tenha sido realizada com sucesso, as estações devem migrar para os canais de recepção estabelecidos durante a fase de negociação para trocar os pacotes de dados durante a fase de comunicação. Se os fluxos de transmissão e recepção forem estendidos, a comunicação poderá acontecer até a próxima janela ATIM, ou até mesmo ao fim do próximo intervalo entre *beacons*.

Ao término da transmissão e recepção de dados simultâneos em todos os fluxos de comunicação comuns a uma estação comunicante, a estação deverá entrar no estado *DOZE mode* a fim de economizar energia. No início do próximo intervalo entre *beacons*, as estações deverão “acordar” pelo estímulo do estado *AWAKEN mode*. As estações que não obtiveram sucesso em estabelecer um enlace de comunicação durante a fase de negociação ou que não tinham pacotes de dados a serem transmitidos ou recebidos também deverão entrar no estado *DOZE mode*.

A Figura 3.3 ilustra um diagrama temporal durante dois intervalos entre *beacons*. São disponibilizados um canal padrão/controle (Canal 1), dois canais de dados (Canais 2 e 3) e cinco estações (A, B, C, D e E). Cada estação é identificada por uma cor específica na legenda da parte inferior da figura. Em cada uma das janelas correspondentes aos dois intervalos entre *beacons*, cada um dos canais é rotulado por uma cor diferente que representa a ocupação do canal por uma das estações naquele intervalo de tempo específico. A cor preta identifica os períodos de contenção durante os intervalos de negociação do canal de controle. A cor cinza desvela o fato de que o canal está ocioso antes do primeiro intervalo entre *beacons*, e nos canais de dados durante a primeira janela ATIM, confirmando que neste período a troca efetiva de dados ainda está para começar. Na primeira janela ATIM, são realizadas três negociações de forma bem sucedida entre as estações A, B e C, perfazendo um total de seis fluxos de transmissão. Os pacotes ATIM e ATIM-ACK são representados pela cor preta. Cada linha sobreposta pontilhada nos intervalos de negociação representam a atividade dos transceptores integrados para transmissão e recepção dos sinais de cada estação. Pelo fato de estarem sobrepostas no canal de controle, isso mostra que as estações disputam por negociações bem sucedidas. Na primeira janela de comunicação, a estação A possui dois fluxos de transmissão do tipo normal, o que a identifica como uma estação do tipo de transmissão Normal. Entretanto, as estações B e C possuem um fluxo do tipo normal (utilizado para transmissão dos dados à estação A) e um fluxo do tipo estendido (utilizado para a comunicação mútua entre B e C) cada uma. Sendo assim, elas serão classificadas como estações do tipo de transmissão estendido por deterem pelo menos um fluxo de transmissão estendido. Na segunda janela ATIM, as estações B e C ainda permanecem trocando pacotes de dados. Por este motivo, elas estarão impossibilitadas de decodificar os

pacotes de controle dos vizinhos. Elas classificarão os seus vizinhos como tipo *Unknown* até o momento em que forem enviados pacotes de controle para o conhecimento e atualização das suas estruturas NIL. A estação A participa mais uma vez da fase de negociação por ter sido classificada como uma estação do tipo Normal durante o primeiro *beacon*. Mais três negociações são realizadas com sucesso, agora entre as estações A, D e E. Diferentemente do primeiro intervalo entre *beacons*, a estação A escolheu o Canal 3 para recepção dos dados, mostrando que a escolha é aleatória. Sob a perspectiva dos vizinhos, as estações B e C são classificadas como *Normal*, *Ongoing* e *Limited* nos *beacons* de números 1, 2 e 3, respectivamente. De forma particular, as estações B e C se auto classificam como *Normal* nos *beacons* de números 1 e 3, e como *Ongoing* no *beacon* 2.

A fim de manter o sincronismo, o início de todas as transmissões de pacotes de dados deve se dar após transcorridos  $l_{slot}$  segundos, conforme definido em [19].  $l_{slot}$  corresponde ao tempo total para transmissão do maior pacote de dados permitido pela rede, incluindo a confirmação de recebimento. Mesmo que os pacotes tenham tamanhos menores que o máximo permitido pela rede, a confirmação de recebimento deverá ocorrer somente após  $(l_{slot} - l_{ACK})$  segundos, onde  $l_{ACK}$  representa o tempo necessário para a transmissão da confirmação de recebimento. Esta situação pode ser vista, por exemplo, no segundo  $l_{slot}$  da janela de comunicação do Canal 1.

Ainda é possível que as estações necessitem transmitir em difusão pacotes ATIM-BRD (*broadcast*) a todos os vizinhos (*Control Packet ID* = "11"). A abordagem híbrida aqui proposta também deve prover suporte a este tipo de transmissão. Neste caso, a estação deverá disputar no canal padrão para transmitir o pacote durante o intervalo de negociação. A estação deve ainda consultar a sua NIL para verificar se todos os nós da rede estão na janela ATIM do canal padrão. Se alguns dos nós estiverem em canais de dados, o contador de tentativas de retransmissão é incrementado e a estação só poderá tentar retransmitir o pacote no próximo intervalo entre *beacons*. Tal procedimento não exige respostas das outras estações com ATIM-ACK.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam os fluxogramas das sequências de eventos durante um intervalo entre *beacons* realizados pelo transmissor e receptor, respectivamente. Assim como os fluxogramas do protocolo M2MMAC, é considerada nestes casos a utilização de temporizadores em vez da transmissão de pacotes ATIM-NACK.

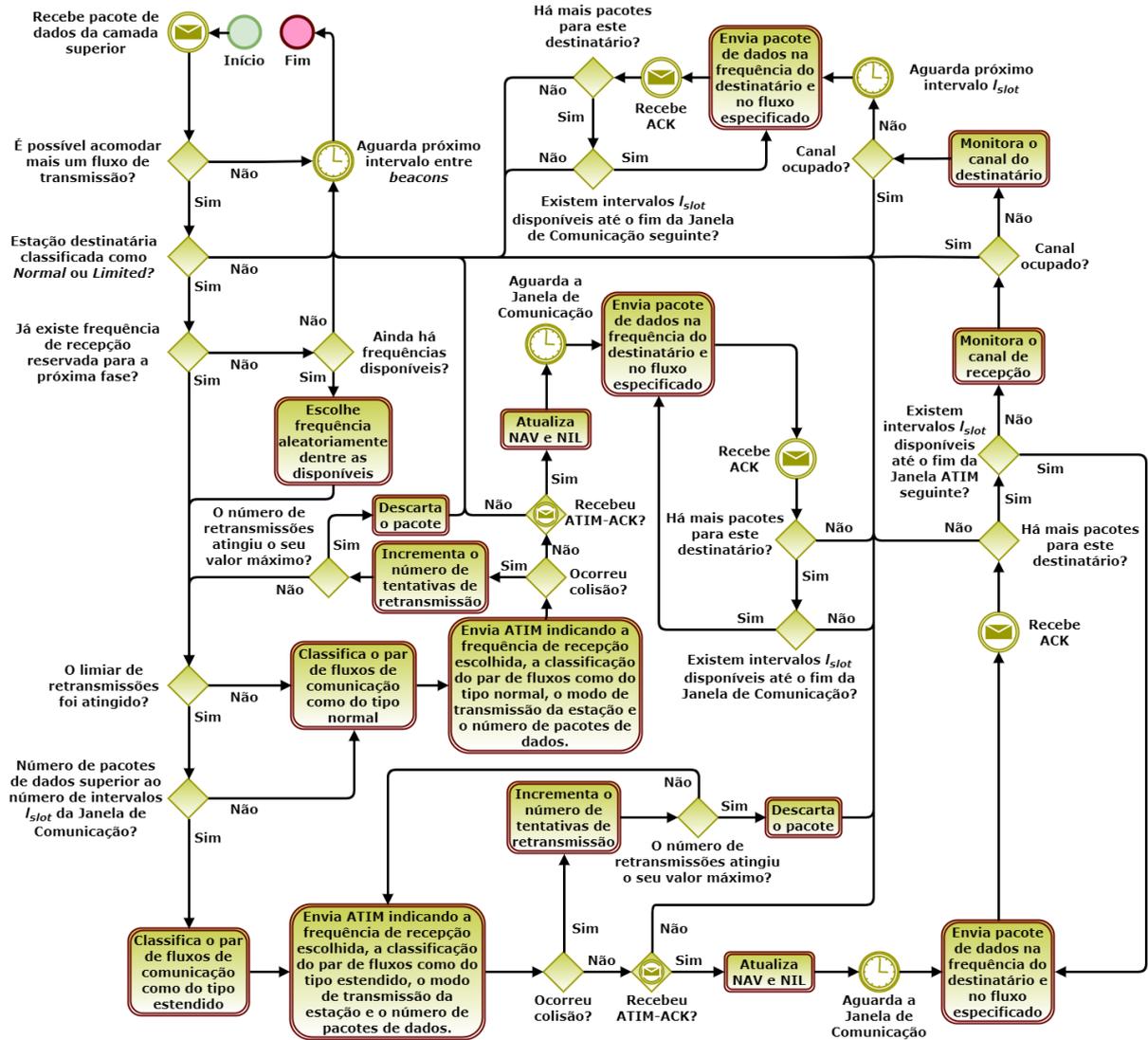


Figura 3.5 Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo transmissor durante um intervalo entre beacons do Protocolo H-M2MMAC.

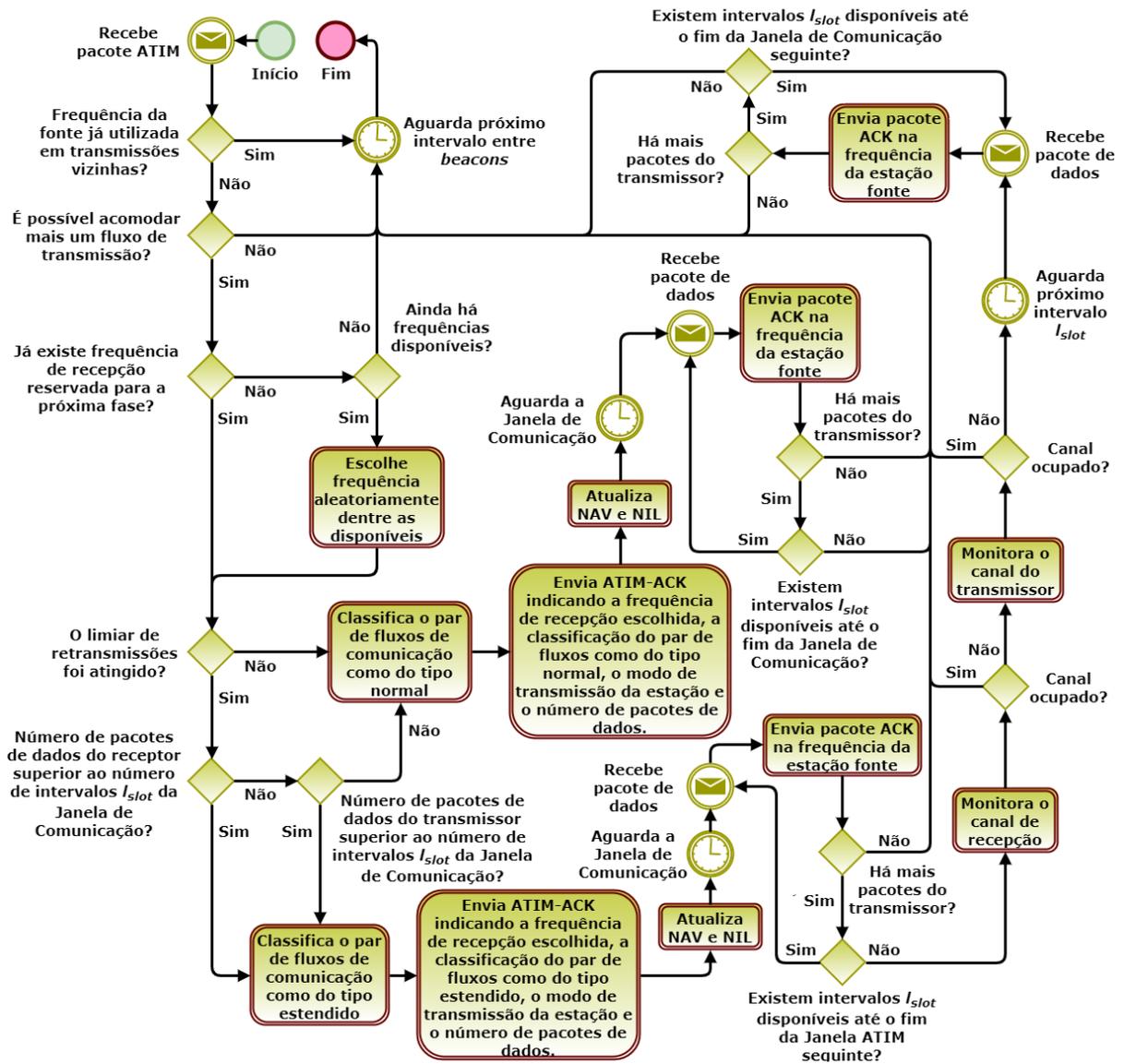


Figura 3.6 Fluxograma da sequência de eventos realizados pelo receptor durante um intervalo entre beacons do Protocolo H-M2MMAC.

## Modelagem Matemática

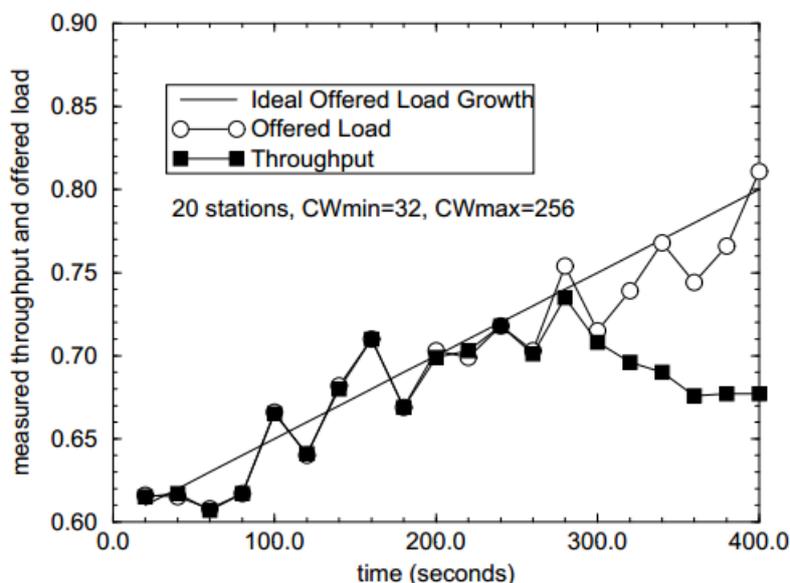
### 4.1 Introdução

Este capítulo apresenta o modelo analítico necessário para avaliação de desempenho do protocolo proposto, o H-M2MMAC. O modelo é alicerçado sob a perspectiva de uma das figuras de desempenho fundamentais: a Vazão Agregada de Saturação.

O restante deste capítulo abordará os seguintes tópicos: (1) a definição do conceito de Vazão Agregada de Saturação; (2) os modelos de avaliação de desempenho do Padrão IEEE 802.11 e dos protocolos multicanais apresentados no capítulo 2, também avaliados sob a métrica da vazão agregada de saturação; (3) e o modelo analítico do protocolo proposto.

### 4.2 Vazão Agregada de Saturação

Em [22], *Bianchi* descreve a vazão de saturação como uma figura de desempenho fundamental representada pela vazão da rede ao se alcançar a carga máxima suportada pelo sistema em condições estáveis. À medida que a demanda por dados cresce, a taxa de transferência aumenta até um valor máximo denominado vazão máxima (do inglês *Maximum Throughput*). Entretanto, quando o valor máximo é ultrapassado, o esquema de acesso aleatório é prejudicado por decorrência da grande quantidade de colisões de pacotes. Conseqüentemente, a latência (*delay*) da rede aumenta e a taxa de transferência diminui significativamente.



**Figura 4.1** Medição da vazão da rede 802.11 mediante o crescimento da carga oferecida linearmente com o tempo. Fonte: [22]

Conforme descrito em [42, 43], o padrão IEEE 802.11 pode exibir alguma forma de instabilidade. A Figura 4.1, apresentada em [22] para fins de exemplificação, revela os resultados de simulações para medição da vazão da rede 802.11 mediante o crescimento da carga oferecida linearmente com o tempo. A linha reta representa o crescimento da carga ideal oferecida. A carga oferecida durante a simulação foi gerada de acordo com um processo de chegada de *Poisson* de pacotes de tamanho fixo, onde a taxa de chegada variou ao longo da simulação para combinar com a carga ideal oferecida. A figura informa o *throughput* do sistema em intervalos de tempo de 20 segundos mediante a carga oferecida na rede para 20 estações. É possível observar que a vazão medida segue próxima à carga oferecida para os primeiros 260 segundos de simulação. A partir deste ponto, a vazão começa a se distanciar da carga oferecida, e as filas de pacotes de dados de cada estação vão sendo sobrecarregadas. A vazão atingida em 260 segundos de simulação representa a vazão de saturação em condições de sobrecarga do sistema.

A vazão agregada é o somatório das vazões individuais de cada fluxo de dados existente na rede, sendo fornecida uma medida da intensidade de utilização do meio de comunicação pelos pares comunicantes. Sendo assim, a vazão agregada de saturação objetiva fornecer o somatório das vazões máximas individuais de cada fluxo de dados da rede sob condições estáveis.

### 4.3 Modelos Analíticos - Padrão 802.11 e Protocolos Multicanais

Para a modelagem matemática do Padrão IEEE 802.11 e dos protocolos multicanais apresentados no Capítulo 2, são cogitados  $M$  canais não sobrepostos e  $n$  estações disponíveis na rede. Considerando que o modelo será fundamentado sob a métrica da vazão agregada de saturação, todas as estações da rede sempre terão pacotes de dados em seus *buffers* a serem transmitidos. Os protocolos MMAC e H-MMAC possuem dois períodos de contenção onde as estações disputam pelo envio bem sucedido de pacotes, a saber, as janelas ATIM e de comunicação. Para os protocolos MMAC e H-MMAC apresentados por *Dang et al.* em [37] são utilizados os sobrescritos  $(^a)$  para notações da Janela ATIM e  $(^d)$  para notações da Janela de Comunicação.

No trabalho proposto por *Ghobad* em [19], especificamente no Capítulo 6, foram realizados testes no modelo matemático do M2MMAC considerando alguns dos modelos de análise de desempenho do Padrão IEEE 802.11 DCF propostos em [22, 23, 24, 25, 26]. Esses testes foram executados com o propósito de se encontrar um modelo DCF que mais se aproximasse dos resultados das simulações com o *Network Simulator 3* [44], considerando como ponto de análise a quantidade de negociações bem sucedidas na Janela ATIM. Concluiu-se que o modelo DCF proposto por *Tinnirello et al.* em [26] foi o que apresentou maior concordância com as simulações realizadas, especificamente com a premissa do caso DIFS. *Ghobad* testifica que a maior divergência do modelo de *Tinnirello et al.* com as simulações é de 7% em toda a faixa observada. Por este motivo, *Ghobad* utiliza tal modelo no remanescente do seu trabalho.

Considerando os argumentos apresentados por *Ghobad*, também será empregado para este trabalho o modelo refinado de *Tinnirello et al.* proposto em [26]. A probabilidade de transmissão  $\tau$  por parte de uma estação e a probabilidade de colisão condicional de que mais de uma estação transmita em um dado *Time Slot* são definidas, respectivamente, por

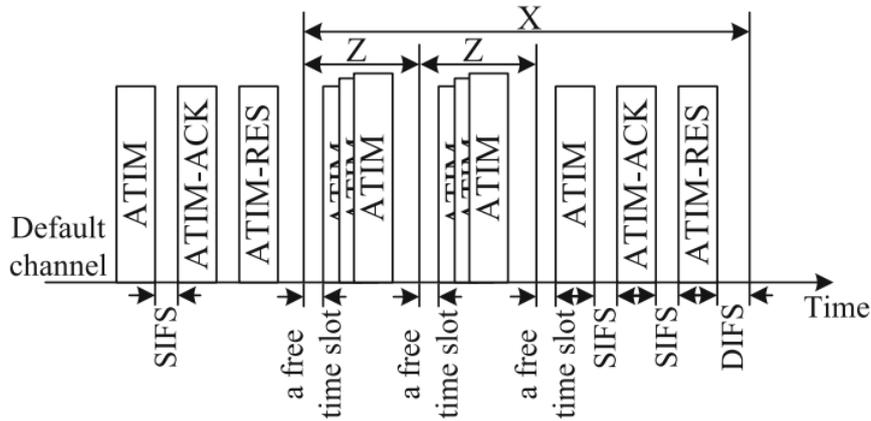
$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1-p}{2(1-p^{R+1})} \left[ \sum_{j=0}^R p^j (2^j W - 1) - (1-p^{R+1}) \right]}, \quad (2.11)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1}. \quad (2.12)$$

A probabilidade de transmissão  $\tau$  pode ser resolvida aproveitando-se de técnicas numéricas. As equações (2.11) e (2.12) são utilizadas para o cálculo das probabilidades  $\tau^a$  e  $\tau^d$  nos períodos de contenção da Janela ATIM e de Comunicação, respectivamente.

Quando um par de estações dos protocolos MMAC e H-MMAC estabelece uma negociação que determina a reserva de um canal durante a janela ATIM, a contenção proveniente do par de estações no canal de controle é interrompida. Este modelo de contenção da janela ATIM, proposto em [45] e considerado em [37], pode ser observado na Figura 4.2. Considera-se que  $n^a$  estações estejam competindo no canal padrão para envio de pacotes de controle. As equações (2.11) e (2.12) devem ser reescritas para a janela ATIM como

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau^a = \frac{1}{1 + \frac{1-p^a}{2(1-p^{a(R+1)})} \left[ \sum_{j=0}^R p^{a(j)} (2^j W - 1) - (1-p^{a(R+1)}) \right]}, \\ p^a = 1 - (1 - \tau^a)^{n^a-1}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$



**Figura 4.2** Modelo de Contenção para reserva de canal durante a janela ATIM. Fonte: [37]

As probabilidades  $p_{idle}^a$ ,  $p_{busy}^a$ ,  $p_{suc}^a$  e  $p_{col}^a$  em cada *Time Slot*, e as durações de uma transmissão com colisão  $T_{col}^a$  e com sucesso  $T_{suc}^a$  durante a janela ATIM são dadas por

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{idle}^a = (1 - \tau^a)^{n^a} \\ p_{buzzy}^a = 1 - p_{idle}^a \\ p_{suc}^a = n^a \tau^a (1 - \tau^a)^{n^a - 1} \\ p_{col}^a = p_{buzzy}^a - p_{suc}^a \\ T_{col}^a = T_{atim} + T_{difs} \\ T_{suc}^a = T_{atim} + T_{atim\_ack} + T_{atim\_res} + 2 \cdot T_{sifs} + T_{difs}. \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Conforme descrito em [45, 37], os valores médios do intervalo entre dois *Time Slots* ociosos ( $Z^a$ ), e do intervalo da disputa de acesso ao canal no momento em que os pacotes de controle são transmitidos com sucesso são dados, respectivamente, por

$$E[Z^a] = T_{idle} + \frac{p_{col}^a}{p_{idle}^a + p_{col}^a} T_{col}^a, \quad (4.3)$$

$$E[X^a] = \frac{1}{p_{suc}^a} T_{idle} + \frac{p_{col}^a}{p_{suc}^a} T_{col}^a + T_{suc}^a. \quad (4.4)$$

A equação (4.4) representa a duração média de uma negociação ATIM com sucesso. De maneira análoga, a duração média de uma transmissão de dados com sucesso  $E[X^d]$  pode ser alcançada bastando somente modificar os sobrescritos ( $^a$ ) para ( $^d$ ). Sendo assim,  $E[X^d]$  é dado por

$$E[X^d] = \frac{1}{p_{suc}^d} T_{idle} + \frac{p_{col}^d}{p_{suc}^d} T_{col}^d + T_{suc}^d \quad (4.5)$$

onde

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau^d = \frac{1}{1 + \frac{1 - p^d}{2(1 - p^{d(R+1)})} \left[ \sum_{j=0}^R p^{d(j)} (2^j W - 1) - (1 - p^{d(R+1)}) \right]} \\ p^d = 1 - (1 - \tau^d)^{n^d - 1} \\ p_{idle}^d = (1 - \tau^d)^{n^d} \\ p_{buzzy}^d = 1 - p_{idle}^d \\ p_{suc}^d = n^d \tau^d (1 - \tau^d)^{n^d - 1} \\ p_{col}^d = p_{buzzy}^d - p_{suc}^d \\ T_{col}^d = T_{rts} + T_{difs} \\ T_{suc}^d = T_{rts} + T_{cts} + T_{data} + T_{ack} + 3 \cdot T_{sifs} + T_{difs}. \end{array} \right.$$

O número de negociações ATIM com sucesso durante a janela ATIM é dado por

$$n_{suc} = \left\lfloor \frac{T_{atim\_window}}{E[X^a]} \right\rfloor. \quad (4.6)$$

Por fim, se a carga de todos os canais de dados for balanceada, o número de nós em cada canal de dados ( $n^d$ ) é dado por

$$n^d = \frac{n_{suc}}{M}. \quad (4.7)$$

#### 4.3.1 Análise do Padrão IEEE 802.11

No padrão IEEE 802.11 apenas um canal é utilizado para a transmissão de dados. Existem  $n$  estações competindo pelo canal. Para que seja calculada a duração média de uma transmissão de dados com sucesso, deve-se considerar que o número de estações  $n^d$  disponíveis para troca de dados é igual a  $n$ , haja vista que em condições de saturação todas as estações da rede possuem dados a serem transmitidos. Considerando-se que o comprimento de um pacote de dados enviado em cada intervalo  $E[X^d]$  é igual a  $L_{data}$ , a vazão de saturação para o padrão IEEE 802.11 é dada por

$$S^{802.11} = \frac{L_{data}}{E[X^d]}. \quad (4.8)$$

#### 4.3.2 Análise do Protocolo MMAC

O MMAC, por ser um protocolo multicanal, possui  $M$  canais disponíveis e  $n$  estações que desejam transmitir na rede saturada. Porém, devido à sua característica *Split Phase*, todas as estações devem competir no canal padrão para a transmissão de pacotes ATIM, ocasionando o fato de que  $n^a = n$ . O número médio de pacotes de dados  $N_{data}^{MMAC}$  enviados nos  $M$  canais durante cada janela de comunicação é dado por

$$N_{data}^{MMAC} = M \left\lfloor \frac{T_{data\_window}}{E[X^d]} \right\rfloor \quad (4.9)$$

sendo este o número médio de pacotes de dados enviados em cada intervalo entre *beacons*, onde  $\lfloor x \rfloor$  representa o inteiro maior ou igual a  $x$ . Por fim, pode-se determinar a vazão de saturação por

$$S^{MMAC} = \frac{N_{data}^{MMAC} L_{data}}{T_{beacon}}. \quad (4.10)$$

#### 4.3.3 Análise do Protocolo TMMAC

A vazão do protocolo TMMAC é determinada principalmente pelo número de pacotes que podem ser agendados durante a Janela ATIM ( $n_{schedule}$ ), e o número máximo de pacotes que

podem ser acomodados durante a Janela de Comunicação ( $n_{accommodate}$ ). Estes números são dados por

$$n_{schedule} = N_s \times l_{atim} \times \eta, \quad (4.11)$$

$$n_{accommodate} = \left\lfloor \frac{l_{beacon} - l_{atim}}{l_{slot}} \right\rfloor \times M, \quad (4.12)$$

onde  $\eta$  representa o número de pacotes de dados agendados por uma negociação bem sucedida,  $M$  representa o número de canais disponíveis,  $l_{slot}$  representa o comprimento de um *slot*, e  $N_s$  representa o número de negociações com sucesso por unidade de tempo que é dado por

$$N_s = \frac{P_{succ}}{P_{idle}\sigma + P_{succ}T_s^{atim} + P_{coll}T_c^{atim}}. \quad (4.13)$$

$T_s^{atim}$  e  $T_c^{atim}$  representam o tempo médio em que o canal é sensoreado como ocupado devido a uma negociação com sucesso e uma colisão dos pacotes ATIM, respectivamente. Sendo assim, o número real de pacotes transmitidos durante a Janela de Comunicação é o menor valor entre  $n_{schedule}$  e  $n_{accommodate}$ , sendo definido por

$$n_{actual} = \min\{n_{schedule}, n_{accommodate}\}. \quad (4.14)$$

Por fim, a vazão do protocolo TMMAC é dada por

$$S^{TMMAC} = \frac{E(P_d) \times n_{actual}}{l_{beacon}}, \quad (4.15)$$

onde  $E(P_d)$  representa o tamanho médio da carga útil do pacote de dados.

#### 4.3.4 Análise do Protocolo H-MMAC

Diferentemente do protocolo MMAC, o H-MMAC outorga a oportunidade de suas estações transmitirem dados no próximo intervalo da janela ATIM. Neste caso, algumas das estações da rede estarão trocando pacotes de dados nos  $(M - 1)$  canais de dados, enquanto outras estações estarão trocando pacotes de controle durante o período de negociação do canal padrão. Existem  $n$  estações disponíveis na rede, onde uma parte delas ( $n^a$ ) estará no canal padrão durante a janela ATIM, e conseqüentemente a outra parcela ( $n^d$ ) estará em cada um dos canais de dados durante a janela de comunicação e a próxima janela ATIM. Sendo assim, tem-se que

$$n^a = n - n^d(M - 1). \quad (4.16)$$

Através das equações (4.1), (4.7) e (4.16) torna-se possível calcular  $n^d$  e a duração média para uma transmissão de dados com sucesso  $E[X^d]$ . Considerando que os canais foram reservados no período de negociação e que a rede está saturada, pode-se afirmar que as estações realizarão a transmissão estendida com um período de duração igual a um intervalo entre *beacons* para os  $(M - 1)$  canais de dados, e a transmissão normal com um período equivalente à

janela ATIM no canal padrão. Por isso, o número médio de pacotes de dados enviados durante cada intervalo entre *beacons* é dado por

$$N_{data}^{HMMAC} = \left\lfloor \frac{T_{data\_window}}{E[X^d]} \right\rfloor + (M - 1) \left\lfloor \frac{T_{beacon}}{E[X^d]} \right\rfloor. \quad (4.17)$$

Isto posto, a vazão de saturação para o protocolo H-MMAC é dada por

$$S^{HMMAC} = \frac{N_{data}^{HMMAC} L_{data}}{T_{beacon}}. \quad (4.18)$$

As estações do H-MMAC escolhem seus modos de transmissão considerando o estado atual da rede. Se a carga da rede estiver baixa, as estações se comunicam pelo modo de transmissão normal, assim como ocorre no protocolo MMAC. Entretanto, se a carga estiver alta, as estações se comunicam pelo modo de transmissão estendido para aumentar o desempenho da rede. Para que todos os canais de dados possam ser utilizados no modo estendido de comunicação, *Dang et al.* utilizam a prerrogativa de que é necessário pelo menos duas estações em cada canal para troca de dados, isto é  $n^d = 2$ . Adicionalmente, o número de estações no canal padrão durante a janela ATIM ( $n^a$ ) deve ser maior que  $n^d M$ . Fazendo-se uso da equação (4.16), conclui-se que

$$\left. \begin{array}{l} n^a = n - n^d(M - 1) \\ n^a \geq n^d M \\ n^d \geq 2 \end{array} \right\} \implies n \geq n^d(2M - 1). \quad (4.19)$$

Quando o número de estações satisfaz a equação (4.19), as estações utilizam o modo estendido de transmissão, e o H-MMAC supera o MMAC em quesitos de desempenho.

#### 4.3.5 Análise do Protocolo M2MMAC

Levando-se em consideração que o protocolo M2MMAC é um dos precursores em comunicações muitos-para-muitos para redes multicanais, *Ghobad e Moraes* apresentam em [19, 20] um modelo matemático peculiar. Neste caso, o protocolo utiliza apenas um período de contenção durante a janela de negociação, diferentemente dos protocolos MMAC e H-MMAC. Isso ocorre devido ao fato de que no período de comunicação cada canal é ocupado unicamente por uma estação, sendo desnecessário o envio de *frames* de controle RTS e CTS para detecção da portadora. Adicionalmente, deve-se considerar, para cada estação, a quantidade máxima de fluxos de transmissão possíveis, que é limitada aos números de estações, canais e antenas disponíveis. Também é necessário conhecer o número máximo de pacotes de dados que enquadram-se em uma única janela de comunicação por fluxo de transmissão, e o número de fluxos de transmissão negociáveis durante a janela ATIM.

Preliminarmente, *Ghobad e Moraes* frisam a premissa de que o número de fluxos de transmissão em uma janela de comunicação jamais poderá ser superior a  $C(C - 1)$ , sendo  $C$  o número de nós que integram a rede. Em segundo lugar, o número de estações comunicantes na janela de

comunicação não poderá ultrapassar o número total de  $M$  canais disponíveis. Assim, o número de nós participantes na fase de comunicação é definido como  $P = \min\{M, C\}$ . Consequentemente, o número de fluxos de transmissão estará limitado de fato por  $P(P-1)$ . E em último lugar, o número de sinais que a estação poderá decodificar simultaneamente na sua frequência de recepção é estipulado pela quantidade de antenas disponíveis. Dito isto, o número de fluxos de transmissão para cada nó não poderá ser superior a  $(B-1)$  [40]. Como resultado, o número máximo de fluxos na rede como um todo estará também limitado a  $P(B-1)$ . O número máximo de transmissões de pacotes de dados que podem ser acomodadas em uma janela de comunicação por fluxo de transmissão é determinado por

$$n_{max} = \left\lfloor \frac{l_{beacon} - l_{atim}}{l_{slot}} \right\rfloor, \quad (4.20)$$

onde  $l_{slot}$  é dado por

$$l_{slot} = \frac{DATA}{R} + SIFS + \delta + \frac{ACK}{R} + \delta + SIFS. \quad (4.21)$$

Em casos onde a taxa básica de transmissão do protocolo é diferente da taxa de transmissão a ser utilizada para o envio dos dados, a equação (4.22) torna-se

$$l_{slot} = \frac{DATA - H_P}{R} + \frac{H_P}{R_{basic}} + SIFS + \delta + \frac{ACK - H_P}{R} + \frac{H_P}{R_{basic}} + \delta + SIFS. \quad (4.22)$$

As negociações de fluxos de transmissão seguem um esquema de troca de pacotes de controle ATIM e ATIM-ACK, onde podem ocorrer colisões, *slots* de tempo vazios e negociações bem sucedidas. Para o cômputo do número médio de negociações bem sucedidas por unidade de tempo ( $N_s$ ), faz-se necessário conhecer inicialmente a vazão de saturação normalizada de uma rede que utiliza o padrão DCF. Tal vazão pode ser calculada como

$$\overline{S^{M2MMAC}} = \frac{P_{succ}E[P]}{P_{idle}\sigma + P_{succ}T_s + P_{coll}T_c}. \quad (4.23)$$

Para maiores detalhes sobre a vazão de saturação normalizada, indica-se a Seção 2.3.1. Dito isto,  $N_s$  é dado por

$$N_s = \frac{\overline{S}}{E[P]} = \frac{P_{succ}}{P_{idle}\sigma + P_{succ}T_s + P_{coll}T_c}. \quad (4.24)$$

Para o protocolo M2MMAC,  $T_s$  e  $T_c$  podem ser expressos, respectivamente, por

$$T_s = \frac{ATIM}{R} + SIFS + \delta + \frac{ATIMACK}{R} + DIFS + \delta \quad (4.25)$$

e

$$T_c = \frac{ATIM}{R} + DIFS + \delta. \quad (4.26)$$

Em casos onde a taxa básica de transmissão do protocolo é diferente da taxa de transmissão a ser utilizada para o envio dos dados, as equações (4.25) e (4.26) tornam-se

$$T_s = \frac{ATIM - H_P}{R} + \frac{H_P}{R_{basic}} + SIFS + \delta + \frac{ATIMACK - H_P}{R} + \frac{H_P}{R_{basic}} + DIFS + \delta \quad (4.27)$$

e

$$T_c = \frac{ATIM - H_P}{R} + \frac{H_P}{R_{basic}} + DIFS + \delta. \quad (4.28)$$

Considerando que todas as análises dos protocolos apresentadas seguem o modelo de *Tin-nirello et al.* retratado em [26], deve-se considerar que uma transmissão bem-sucedida pode incluir vários quadros consecutivos. Sendo assim, o número médio de negociações bem sucedidas por unidade de tempo ( $N_s$ ) deve ser calculado por [26]

$$N_s = \frac{P_{succ}}{P_{idle}\sigma + P_{succ}\overline{T_s} + P_{coll}\overline{T_c}}, \quad (4.29)$$

onde  $\overline{T_s}$  e  $\overline{T_c}$  são dados, respectivamente, por [26]

$$\overline{T_s} = T_s \frac{CW_{min} + 1}{CW_{min}} + \delta, \quad (2.15)$$

$$\overline{T_c} = T_c + \delta. \quad (2.16)$$

Como cada negociação bem sucedida agenda dois fluxos de transmissão, estabelecendo desta maneira uma comunicação bidirecional, o número médio de fluxos de transmissão que podem ser negociados em uma única janela de negociação ( $n_{sched}$ ) é dado por

$$n_{sched} = 2N_s l_{atim}. \quad (4.30)$$

Sendo assim, a vazão agregada de saturação do protocolo M2MMAC é dada por

$$S^{M2MMAC} = \frac{\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\} n_{max} \cdot DATA}{l_{beacon}}. \quad (4.31)$$

Se caso o termo  $\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\}$  retornar um número ímpar, este deve ser arredondado para o número imediatamente inferior, haja vista que os fluxos de transmissão são

negociados aos pares. Se a vazão de saturação for avaliada considerando-se apenas a carga útil do pacote de dados (*goodput* da transmissão), deve-se desconsiderar os bits utilizados para os cabeçalhos da camada de enlace e da camada física. Dito isto, a vazão ficará

$$S^{M2MMAC} = \frac{\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\} n_{max} \cdot (DATA - H_P - H_M)}{l_{beacon}}. \quad (4.32)$$

#### 4.4 Modelo Analítico do Novo Protocolo H-M2MMAC Proposto

O H-M2MMAC procura integrar o atributo de comunicação muitos-para-muitos para redes multicanais do M2MMAC com a abordagem híbrida proposta pelo H-MMAC, possibilitando o prolongamento da comunicação entre pares comunicantes para a próxima janela ATIM. São consideradas  $C$  estações disponíveis na rede. Quando o sistema está saturado,  $C^a$  estações estarão no canal padrão durante a janela ATIM tentando estabelecer negociações, enquanto as  $C^d$  estações restantes estarão distribuídas entre os canais de dados no modo de transmissão estendido. Assim como o M2MMAC, o H-M2MMAC utiliza apenas um período de contenção, a saber, a janela de negociação do canal padrão. Porém, o período de contenção será disputado apenas pelas estações que não estabeleceram fluxos de transmissão do tipo estendido na janela ATIM antecedente, ou seja, as estações do grupo  $C^a$ . Sendo assim, algumas alterações devem ser realizadas para a definição do número de fluxos de transmissão máximos.

A primeira alteração, efetuada no primeiro limitante do número de fluxos de transmissão máximos, estabelece que este número jamais poderá ser superior a  $C^a(C^a - 1)$ . Em segundo lugar, como o número de estações comunicantes no período posterior à negociação não poderá ultrapassar o número total de  $M$  canais disponíveis, então  $P$  deve ser redefinido como  $P = \min\{M, C^a\}$ . O segundo e terceiro limitantes,  $P(P - 1)$  e  $P(B - 1)$ , devem considerar este novo valor de  $P$ .

Como cada canal só pode ser ocupado por uma única estação, então  $C^d$  sempre será igual a 1. Sendo assim, a quantidade de canais que estarão sendo utilizados no período posterior à negociação ficará limitado ao número  $P$  de nós participantes neste período. Consequentemente, a equação (4.16) pode ser redefinida de duas formas:

1. Se  $P$  fornecer como valor mínimo a quantidade  $M$  de canais disponíveis, então a equação (4.16) será redefinida como

$$C^a = C - (M - 1). \quad (4.33)$$

2. Entretanto, se  $P$  fornecer como valor mínimo a quantidade  $C^a$  de estações que estarão no canal padrão durante a janela ATIM, então a equação (4.16) será redefinida como

$$\begin{aligned} C^a &= C - (C^a - 1) \\ &= (C + 1)/2. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Em geral, a equação pode ser redefinida como

$$C^a = C - (P - 1). \quad (4.35)$$

O número máximo de transmissões de pacotes de dados que podem ser acomodadas em uma janela de comunicação por fluxo de transmissão ( $n_{max}$ ) ficará fadado somente ao canal padrão. Isso porque nos demais canais de dados que estarão sendo utilizados por nós que utilizam o método estendido, a comunicação prolonga-se até o fim da próxima janela ATIM. Sendo assim, os pacotes de dados poderão ser acomodados em um espaço de tempo equivalente a um intervalo entre *beacons*. Dito isto, o número máximo de transmissões de pacotes de dados por fluxo de transmissão que podem ser acomodadas em um período de tempo equivalente a um intervalo entre *beacons* ( $n_{maxBEACON}$ ) é dado por

$$n_{maxBEACON} = \left\lfloor \frac{l_{beacon}}{l_{slot}} \right\rfloor. \quad (4.36)$$

Considerando a equação (4.31), a vazão agregada de saturação do M2MMAC pode ser ajustada para o H-M2MMAC, resultando

$$S^{HM2MMAC} = \frac{\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\} \left( n_{max} \frac{1}{P} + n_{maxBEACON} \frac{P-1}{P} \right) DATA}{l_{beacon}}, \quad (4.37)$$

onde o termo  $(n_{max} \frac{1}{P})$  representa o número máximo de transmissões de pacotes de dados no canal padrão, e o termo  $(n_{maxBEACON} \frac{P-1}{P})$  representa o número máximo de transmissões de pacotes de dados nos demais canais de dados que estão sendo utilizados pelas estações no modo estendido de transmissão.

A regra de arredondamento para o número imediatamente inferior do termo  $\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\}$  caso ele retorne um número ímpar permanece inalterada. Assim como o protocolo M2MMAC, se a vazão de saturação for avaliada considerando-se apenas a carga útil do pacote de dados (*goodput* da transmissão), deve-se desconsiderar os bits utilizados para os cabeçalhos da camada de enlace e da camada física. Dito isto, a vazão ficará

$$S^{HM2MMAC} = \frac{\min\{P(P-1), P(B-1), n_{sched}\} \left( \frac{n_{max}}{P} + n_{maxBEACON} \frac{P-1}{P} \right) (DATA - H_P - H_M)}{l_{beacon}}. \quad (4.38)$$

Assim como ocorre no protocolo H-MMAC, as estações do H-M2MMAC escolhem seus modos de transmissão considerando o estado atual da rede. Se a carga da rede estiver baixa, as estações se comunicam pelo modo de transmissão normal, assim como ocorre no protocolo M2MMAC. Entretanto, se a carga estiver alta, as estações se comunicam pelo modo de transmissão estendido para aumentar o desempenho da rede. Para que todos os canais de dados

possam ser utilizados no modo estendido de comunicação, é necessário que os critérios descritos na Seção 3.2 sejam obedecidos para todos os canais de dados. Adicionalmente, o número de estações no canal padrão durante a janela ATIM ( $C^a$ ) deve ser maior que  $P$ . Fazendo-se uso da equação (4.35), conclui-se que

$$\left. \begin{array}{l} C^a = C - (P - 1) \\ C^a \geq P \end{array} \right\} \implies C \geq 2P - 1. \quad (4.39)$$

Quando o número de estações satisfaz a equação (4.39), as estações utilizam o modo estendido de transmissão, e o H-M2MMAC supera o M2MMAC em quesitos de desempenho conforme será visto no próximo capítulo.

## Avaliação de Desempenho

### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados alcançados para a vazão agregada de saturação do protocolo H-M2MMAC, comparando-os com os de outros protocolos multicanais retratados no Capítulo 2. O restante deste capítulo abordará os seguintes tópicos: (1) a metodologia utilizada para a realização das simulações numéricas do modelo apresentado no Capítulo 4, (2) e a descrição dos resultados obtidos.

### 5.2 Metodologia

Para a realização das simulações numéricas para o modelo proposto no Capítulo 4, foi utilizado um *software* interativo voltado para o cálculo numérico: o MATLAB. Os resultados obtidos por meio do modelo matemático apresentado no capítulo anterior são examinados em função de quatro parâmetros: (1) o número de estações na rede ( $C$ ); (2) o número de canais de frequência não sobrepostos disponíveis ( $M$ ); (3) a duração do intervalo de negociação (*ATIM Window*); (4) e o número de antenas de recepção ( $B$ ). O desempenho da rede é determinado exclusivamente pela capacidade de transmissão de dados durante a fase de comunicação.

Salvo quando especificado em contrário, são utilizados os parâmetros da Tabela 5.1 para a condução da avaliação analítica de desempenho. Estes valores correspondem aos valores do Padrão IEEE 802.11b. De acordo com *Ghobad* em [19], em até aproximadamente 30 estações na rede, a vazão de dados não é limitada pelo período de contenção que ocorre na janela de negociação. Ou seja, os nós participantes conseguem utilizar a duração da janela para negociar os fluxos de transmissão possíveis.

*Ghobad* prossegue afirmando que se caso o limiar de aproximadamente 30 estações comunicantes for ultrapassado, a contenção que ocorre na Janela ATIM pode resultar em um número insuficiente de negociações de fluxo bem sucedidas frente aos recursos disponíveis, ocasionando a limitação da vazão da rede antes de que outros fatores de restrição sejam atingidos (*e.g.* número de canais disponíveis) [19].

As expressões utilizadas para a vazão agregada de saturação de cada um dos protocolos comparados são apresentadas nas equações (4.8), (4.10), (4.15), (4.18), (4.31) e (4.37). Conforme descrito por *Ghobad* em [19], a sobrecarga dos protocolos pode exercer grande impacto em seus desempenhos em termos de vazão de saturação. Nesse sentido, para investigar mais adequadamente o desempenho de cada protocolo, os resultados das vazões de saturação serão obtidos considerando-se apenas a carga útil do pacote de dados (*payload*). Serão desconsiderados os *bits* utilizados para cabeçalhos da camada MAC e da camada PHY. Sendo assim, pode-se afirmar que esta avaliação considera apenas o *goodput* da transmissão. Também é importante afirmar que o número de pacotes de dados agendados por negociação bem sucedida ( $\eta$ ) do protocolo TMMAC foi configurado de modo a não limitar a vazão máxima do protocolo. Sendo assim, o  $\eta$  foi igualado ao número máximo de pacotes que uma estação pode transmitir em

**Tabela 5.1** Parâmetros e valores para as simulações numéricas

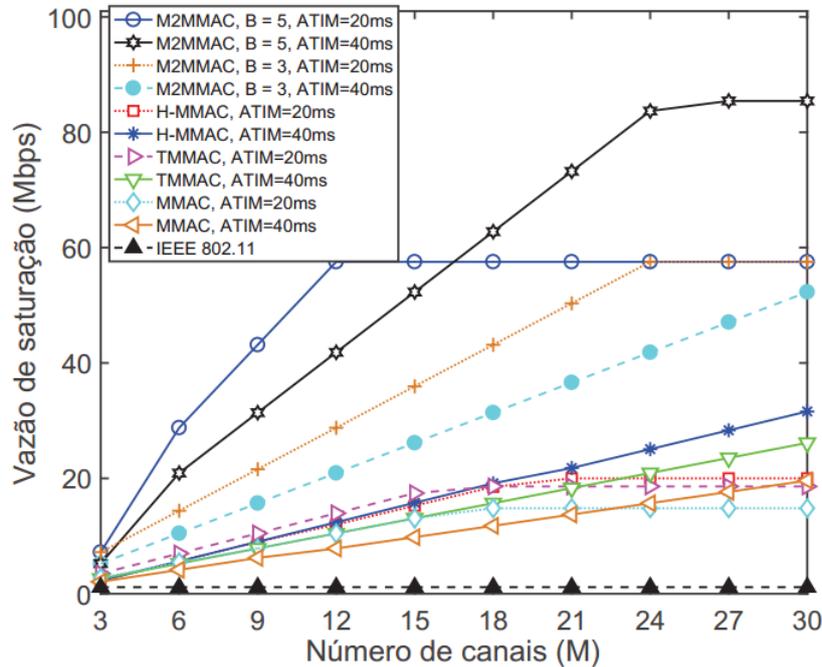
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Número de Nós ( $C$ )	60
Antenas de Recepção ( $B$ )	3
Canais Disponíveis ( $M$ )	24
Taxa de Transmissão ( $R$ )	2Mbps
Taxa de Transmissão Básica ( $R_{basic}$ )	1Mbps
Intervalo entre <i>Beacons</i> ( $I_{beacon}$ )	100ms
Janela ATIM ( $I_{atim}$ )	20ms
Janela de Resguardo Mínima ( $CW_{min}$ )	32
Atraso de Propagação ( $\delta$ )	1 $\mu$ s
Pacote de Dados ( $DATA$ )	512Bytes
Cabeçalho MAC	34Bytes
Cabeçalho PHY	24Bytes
Pacote ACK	304bits
Pacote RTS	352bits
Pacote CTS	304bits
Pacote ATIM	352bits
Pacote ATIMACK	304bits
Slot de Tempo ( $\sigma$ )	20 $\mu$ s
Short Interframe Space (SIFS)	10 $\mu$ s
Data Interframe Space (DIFS)	50 $\mu$ s
Área do Plano ( $A$ )	250m <sup>2</sup>

uma única Janela de Comunicação, conforme estabelecido por *Ghobad* em [19].

### 5.3 Resultados e Discussão

A Figura 5.1, apresentada em [19], indica as vazões agregadas de saturação dos protocolos IEEE 802.11 DCF, MMAC, TMMAC, H-MMAC e M2MMAC em função do número de canais não sobrepostos disponíveis ( $M$ ). *Ghobad* comprova que o M2MMAC supera os outros protocolos em função do número de canais disponíveis. Quando as estações são equipadas com três antenas de recepção ( $B = 3$ ), a rede possui 24 canais disponíveis ( $M = 24$ ), e a duração da janela ATIM é de 40ms ( $ATIM = 40ms$ ) o protocolo M2MMAC provê quase o dobro da vazão quando comparado ao protocolo que proporciona a maior vazão dentre os protocolos relacionados (H-MMAC). Se forem fornecidas mais duas antenas de recepção ( $B = 5$ ), a vazão do M2MMAC alcança quase o quádruplo da vazão do H-MMAC. Como o 802.11 DCF utiliza somente um canal, sua vazão permanece constante e inalterável com o aumento do número de canais, diferentemente dos demais protocolos multicanais.

Para o protocolo M2MMAC, é importante citar que a vazão satura quando se atinge um



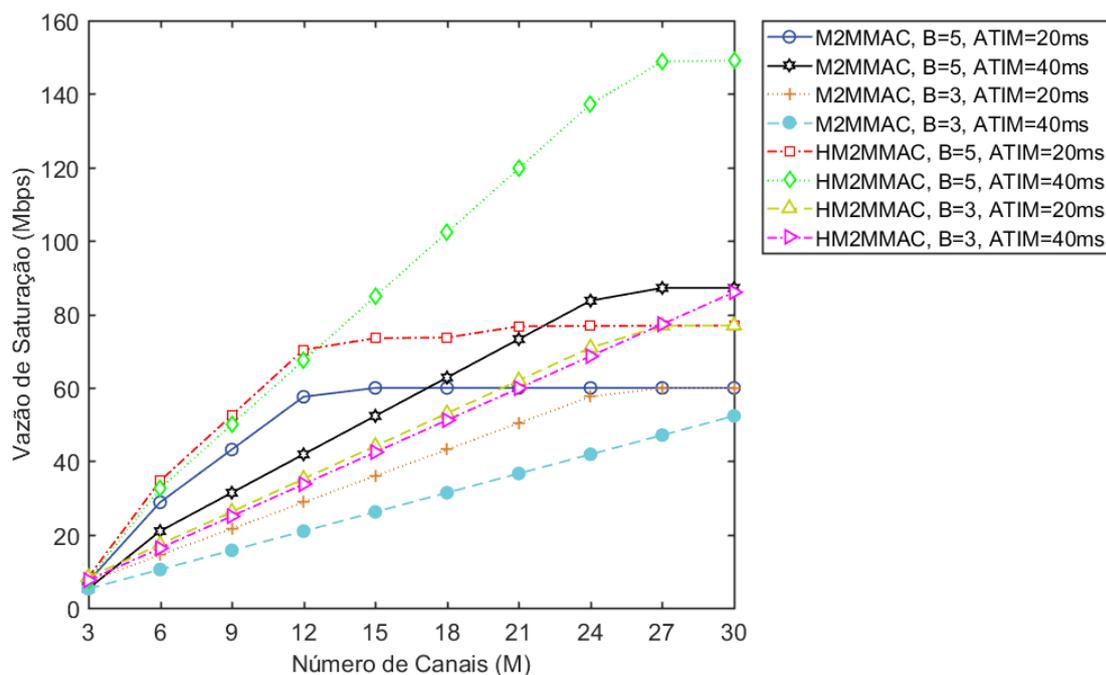
**Figura 5.1** Vazão agregada de saturação *versus* número de canais disponíveis ( $M$ ) para os protocolos correlatos ao H-M2MMAC. Fonte: [19]

determinado número de canais. Isso ocorre porque mesmo com um número crescente de canais, torna-se inviável o estabelecimento de um número maior de negociações caso a janela ATIM não tenha uma duração suficiente. Sendo assim, é possível afirmar pela Figura 5.1 que mesmo com uma duração de  $40ms$  para Janela ATIM, este intervalo de tempo mostra-se insuficiente para negociar todos os fluxos de negociação que as estações e o meio de transmissão sem fio podem suportar na configuração com  $B = 5$  e  $M = 24$  ou números superiores. A Figura 5.1 também mostra que a curva com  $B = 3$  e  $ATIM = 40ms$  não satura com uma quantidade de até 30 canais disponíveis. Porém, se a quantidade de canais continuasse crescendo, certamente a vazão tenderia a saturar posteriormente. Dito isto, os recursos da janela de comunicação ficam subutilizados, indicando que o tamanho da Janela ATIM é um importante parâmetro a ser considerado para aumentar a eficiência do protocolo na utilização dos recursos disponíveis.

O número de antenas é também um importante parâmetro a ser analisado. Mesmo que uma duração maior da janela ATIM seja uma condição necessária para acomodar um número maior de negociações, ainda se corre o risco da vazão saturar caso o número de antenas de recepção também seja maior, mesmo que o desempenho entregue à rede seja superior.

A Figura 5.2 indica as vazões agregadas de saturação em função do número de canais não sobrepostos disponíveis ( $M$ ), porém considerando agora que a verificação ocorre entre os modelos dos protocolos M2MMAC e H-M2MMAC. Quando as estações são equipadas com cinco antenas de recepção ( $B = 5$ ), a rede possui 30 canais disponíveis ( $M = 30$ ), e a duração da janela ATIM é de  $40ms$  ( $ATIM = 40ms$ ), o protocolo H-M2MMAC apresenta um acréscimo de aproximadamente 74% da vazão em relação ao M2MMAC, sendo este o melhor caso observado.

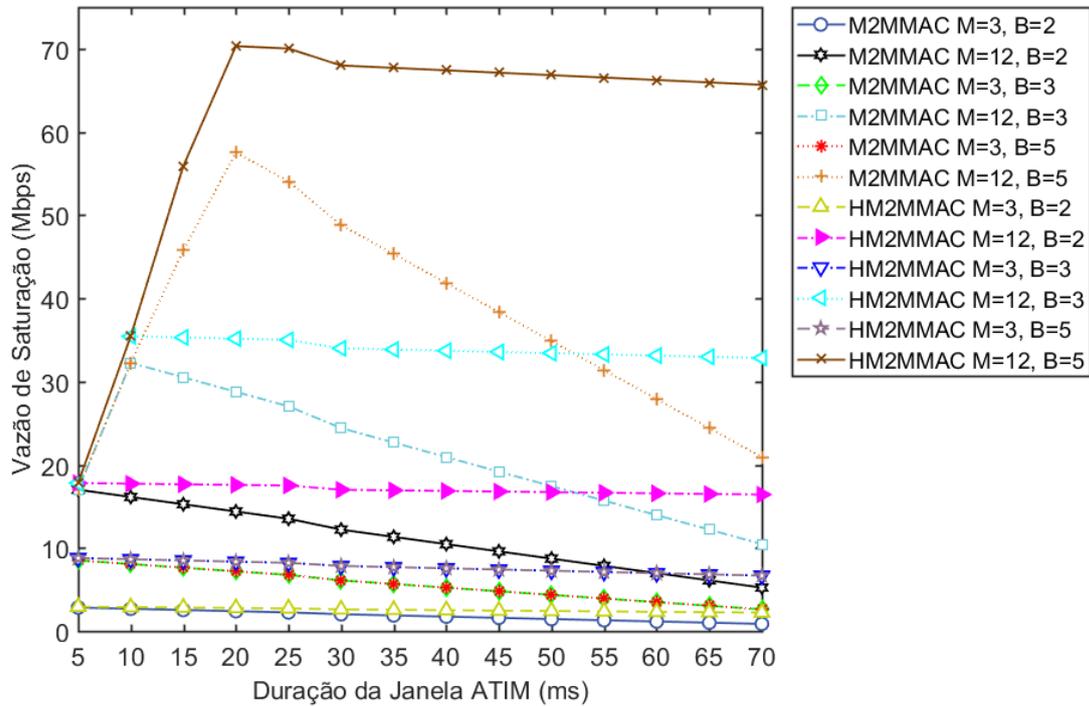
O número de antenas de recepção e a duração da janela ATIM continuam sendo métricas importantes para o desempenho da rede. É importante salientar que, mesmo que o H-M2MMAC proporcione uma maior vazão nos casos de alta carga na rede, se a janela ATIM não for suficientemente longa para acomodar uma determinada quantidade de negociações, os canais de dados continuarão subutilizados inclusive no próximo intervalo entre *beacons*.



**Figura 5.2** Vazão agregada de saturação *versus* número de canais disponíveis ( $M$ ) para os protocolos M2MMAC e H-M2MMAC.

A Figura 5.3 apresenta a influência da duração da Janela ATIM na vazão de saturação da rede com 60 estações disputando o canal padrão para os protocolos M2MMAC e H-M2MMAC. O desempenho da rede é posto em prova para diferentes combinações de números de antenas de recepção ( $B$ ) e canais disponíveis ( $M$ ) em função da duração da janela ATIM. Para o protocolo M2MMAC, especificamente para os casos onde  $M = 12$  e  $B \neq 2$ , as curvas crescem até alcançarem um valor máximo. Neste ponto, a janela ATIM já possui um intervalo suficiente para acomodar todas as negociações de fluxos de transmissão que os recursos disponíveis podem tolerar. A partir daí, as curvas começam a decair, demonstrando que mesmo que a janela ATIM tenha um intervalo suficientemente longo para troca de pacotes de controle, a rede perde desempenho pois o intervalo da janela de comunicação também decresce. Para os demais casos, observa-se que as curvas sempre tendem a decair. A comparação entre as curvas para  $M = 3$ ,  $B = 5$  e  $M = 3$ ,  $B = 3$  mostra que um número maior de antenas nem sempre acarreta em uma maior vazão. Sendo assim, é suficiente que o número de antenas corresponda ao número de canais disponíveis ( $B = M$ ). O aumento no número de estações que disputam o canal padrão também pode ser considerado um fator de influência sobre o tamanho ideal para a Janela ATIM.

Um número maior de estações na rede pode levar a uma necessidade maior de tempo para que as estações estabeleçam a quantidade de negociações adequada.



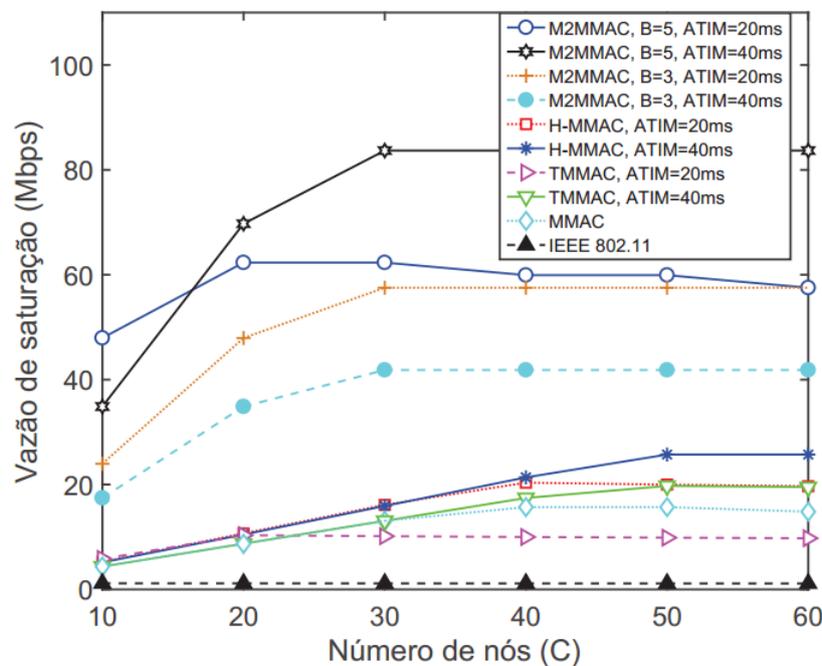
**Figura 5.3** Influência da duração da Janela ATIM na vazão agregada de saturação para diferentes números de antenas de recepção e canais de transmissão disponíveis com  $C = 60$  estações.

Para o protocolo H-M2MMAC, a rede consegue obter um desempenho estabilizado na maioria dos casos, mesmo que o intervalo da janela ATIM cresça. Além disso, o desempenho continua superior ao do protocolo M2MMAC. Isso ocorre devido à característica de troca de pacotes no intervalo de negociação dos canais de dados enquanto os pacotes de controle são trocados na janela ATIM do canal padrão. O H-M2MMAC apresenta, em seu melhor caso, desempenho três vezes maior que o protocolo M2MMAC para as curvas onde  $M = 12$  e  $B = 5$ , e para o caso onde o intervalo da janela ATIM é de  $70ms$  ( $ATIM = 70ms$ ). Também é possível constatar que na comparação entre as curvas para  $M = 3$ ,  $B = 5$  e  $M = 3$ ,  $B = 3$ , o número de antenas maior não implica necessariamente em um acréscimo da vazão. Isto posto, também é preciso considerar para o H-M2MMAC que o número de antenas corresponda ao número de canais.

A Figura 5.4, apresentada em [19], indica as vazões agregadas de saturação dos protocolos IEEE 802.11 DCF, MMAC, TMMAC, H-MMAC e M2MMAC enquanto aumenta-se o número de nós participantes ( $C$ ) para uma quantidade fixa de canais ( $M = 24$ ). O M2MMAC destaca-se mais uma vez em todos os casos. Quando as estações são equipadas com três antenas de recepção ( $B = 3$ ), a duração da janela ATIM é de  $20ms$  ( $ATIM = 20ms$ ), e a rede possui sessenta

estações participantes ( $C = 60$ ), o protocolo M2MMAC provê quase o triplo da vazão quando comparado ao protocolo que proporciona a maior vazão dentre os protocolos relacionados (H-MMAC) sob a mesma configuração. Se forem fornecidas mais duas antenas de recepção ( $B = 5$ ) e a duração da janela ATIM for de  $40ms$  ( $ATIM = 40ms$ ), o M2MMAC alcança vazão superior com o triplo da vazão do H-MMAC sob esta mesma configuração.

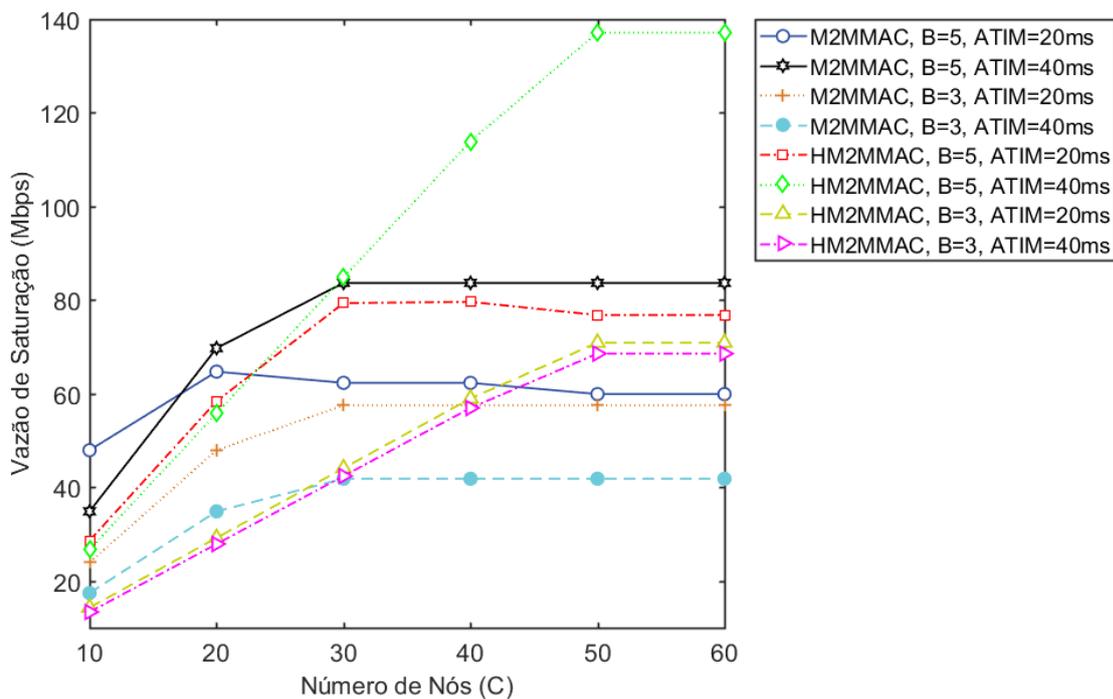
Observa-se ainda que, para as curvas do M2MMAC onde as estações são equipadas com cinco antenas de recepção ( $B = 5$ ), a curva com um intervalo menor da janela ATIM ( $ATIM = 20ms$ ) apresenta uma vazão de saturação superior à curva com um intervalo de  $40ms$  ( $ATIM = 40ms$ ) para um pequeno número de estações ( $C < 17$ , aproximadamente). Porém, com o aumento do número de estações, a vazão da curva com  $20ms$  começa a decrescer. Isso acontece devido ao fato de que são negociados um número menor de fluxos de transmissão na janela ATIM. Sendo assim, a configuração com  $40ms$  mostra-se mais promissora para uma faixa maior de estações participantes na rede observada.



**Figura 5.4** Vazão agregada de saturação *versus* número de estações participantes ( $C$ ) da rede com uma quantidade fixa de canais disponíveis ( $M = 24$ ) para os protocolos correlatos ao H-M2MMAC. Fonte: [19]

A Figura 5.5 indica as vazões agregadas de saturação em função do número de estações participantes da rede, porém considerando agora que a verificação ocorre entre os modelos dos protocolos M2MMAC e H-M2MMAC. As curvas características do H-M2MMAC sempre começam em desvantagem quando comparadas às curvas do M2MMAC sob a mesma configuração. Isso ocorre porque o número de estações na rede não é o suficiente para caracterizar uma rede com alta carga de dados. Na verdade, isso indica que em casos onde a rede possui uma baixa carga de dados, é desvantajoso utilizar o modelo de transmissão estendida. À medida

que o número de estações cresce, a carga da rede vai aumentando, e conseqüentemente, a vazão do protocolo H-M2MMAC se sobressai. Outro fator a ser considerado é que na abordagem híbrida, apenas algumas estações da rede ( $C^a$ ) estarão de fato competindo pelo canal padrão durante a janela ATIM, enquanto a outra parcela ( $C^d$ ) estará trocando dados nos canais de dados restantes. Conseqüentemente, quando o número de estações é pequeno, será mais provável que o número de canais utilizados e de fluxos de transmissão negociados para troca de dados pelo M2MMAC seja maior que o número de canais e fluxos de comunicação pelo H-M2MMAC.



**Figura 5.5** Vazão agregada de saturação *versus* número de estações participantes ( $C$ ) da rede com uma quantidade fixa de canais disponíveis ( $M = 24$ ) para os protocolos M2MMAC e H-M2MMAC.

Outros casos importantes a serem analisados e discutidos, e que ocorrem para os dois protocolos, são os casos onde a rede possui estações com 5 antenas de recepção. Inicialmente, os casos onde a janela ATIM tem um período de tempo igual a  $20ms$  se sobressaiem aos casos de janela igual a  $40ms$ . Isso também é ocasionado pelo número pequeno de estações na rede. Com uma quantidade pequena de estações disputando o canal padrão durante a janela ATIM, a rede consegue alcançar o número máximo de negociações em um intervalo de tempo reduzido. Conseqüentemente, para os casos onde o intervalo da janela ATIM é menor, pode-se trocar dados por um intervalo de tempo maior.

Como o intervalo de tempo da janela ATIM ideal está correlacionado ao número de estações na rede ( $C$ ), de canais de frequência ( $M$ ) e de antenas de recepção disponíveis ( $B$ ), conclui-se que, para todos os casos anteriormente citados, não existe um valor ótimo de duração fixa para a janela ATIM.

## Considerações Finais

Foi apresentado neste trabalho um novo protocolo MAC multicanal para comunicação muitos-para-muitos do tipo *Split Phase* que oferece a uma parcela das estações da rede a oportunidade de realizar transmissões de dados durante a fase de negociação nos canais de dados, enquanto a outra parcela das estações realiza *Two-Way Handshake* no canal de controle durante o intervalo da Janela ATIM. A este novo protocolo dá-se o nome de H-M2MMAC. Adicionalmente, foram apresentados trabalhos correlatos ao protocolo aqui proposto no que tange às comunicações muitos-para-muitos em redes sem fio e protocolos multicanais de camada MAC. Também foram revisados alguns dos Padrões IEEE 802.11 como o DCF (do inglês *Distributed Coordination Function*), o PSM (do inglês *Power Saving Mechanism*) e o Padrão 802.11ac que possibilita às estações a detecção de múltiplos usuários.

Um modelo analítico foi proposto com o objetivo de se avaliar o desempenho do protocolo em termos de vazão agregada de saturação. Através do MATLAB, um *software* interativo voltado para o cálculo numérico, pôde-se comparar o H-M2MMAC com os demais protocolos multicanais relacionados propostos em [19, 20, 34, 35, 37]. O H-M2MMAC mostrou-se superior, sendo analisado em termos do número de estações na rede, do número de antenas de recepção, do número de canais não sobrepostos disponíveis e do ajuste da duração da janela ATIM.

Complementarmente, foi constatada a necessidade de adequar a duração da janela ATIM face ao número de canais de recepção e às antenas disponíveis, além do número de estações participantes na rede. Pôde-se observar que, com o crescimento do número de antenas, eram necessários intervalos de negociação maiores para que todos os recursos da rede fossem utilizados de maneira eficaz. O protocolo H-M2MMAC mostrou-se vantajoso em quesitos de comunicação estendida para a rede com alta carga de dados. Porém, caso o número de estações seja pequeno, o protocolo perde eficiência, tendo em vista que o modelo foi aplicado para situações de saturação da rede, e que sob estas circunstâncias, as estações sempre transmitiriam no modo estendido.

Assim como o M2MMAC, o protocolo H-M2MMAC requer somente um *hardware* transmissor e um receptor, ambos *simplex*, além de técnicas MIMO, sem exigir múltiplos transceptores *half-duplex* ou complexos rádios *full-duplex*.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pode-se citar a inclusão de mecanismos de ajuste dinâmico da duração da Janela ATIM no protocolo aqui proposto e uma abordagem que combine a multiplexação por divisão de tempo para expandir a quantidade máxima de nós que podem participar simultaneamente da janela de comunicação.

Também é importante que o modelo matemático seja validado através de simulações computacionais realizadas com o *Network Simulator 3* [44, 46]. Além disso, é interessante considerar a vazão agregada em casos onde a carga do tráfego da rede está baixa, validando de maneira

mais realista a abordagem híbrida proposta neste trabalho. Consequentemente, com a prerrogativa de que é possível obter a vazão agregada em casos de baixa carga na rede, pode-se incluir os casos aqui não tratados onde os pares se comunicam até o final do próximo intervalo entre *beacons*, e não somente até a próxima janela de comunicação. Também pode ser verificado o desempenho do protocolo sob a perspectiva de atrasos fim a fim.

Uma análise comparativa e simplificada em relação à sobrecarga do H-M2MMAC durante a fase de comunicação com a sobrecarga dos outros protocolos aqui apresentados é outro trabalho futuro a ser considerado. Deve-se analisar a sobrecarga constante devido aos cabeçalhos dos pacotes e a sobrecarga considerando o resguardo aleatório.

Adicionalmente, impactos de limitações da camada física (PHY) no protocolo H-M2MMAC devem ser analisados. Outro tópico de investigação importante e atual a ser cogitado é a consideração de transceptores modernos *full-duplex*. Por fim, planeja-se testar o protocolo H-M2MMAC em kits de rádios reais.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Boston, USA: Prentice-Hall, 2002.
- [2] M. G. Rubinstein, I. M. Moraes, M. E. M. Campista, L. H. M. Costa, and O. C. M. Duarte, “**A Survey on Wireless Ad Hoc Networks,**” in *Mobile and Wireless Communication Networks*, pp. 1–33, Springer, 2006.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “**Wireless Sensor Networks: A Survey,**” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [4] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar, “**Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks,**” in *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 263–270, ACM, 1999.
- [5] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, “**Guest Editors’ Introduction: Overview of Sensor Networks,**” *Computer*, vol. 37, no. 8, pp. 41–49, 2004.
- [6] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2007.
- [7] J. Zheng and A. Jamalipour, *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. John Wiley & Sons, 2009.
- [8] C. S. Raghavendra, K. M. Sivalingam, and T. Znati, *Wireless Sensor Networks*. Springer, 2006.
- [9] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “**Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,**” *IEEE Standard 802.11-1997*, 1997.
- [10] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “**Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Band,**” *IEEE Standard 802.11a-1999*, 1999.
- [11] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “**Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher Speed Physical Layer (PHY) Extension in the 2.4GHz Band,**” *IEEE Standard 802.11b-1999*, 1999.
- [12] J. Mo, H.-S. W. So, and J. Walrand, “**Comparison of Multichannel MAC Protocols,**” *IEEE Transactions on mobile computing*, vol. 7, no. 1, pp. 50–65, 2008.
- [13] H. Woesner, J.-P. Ebert, M. Schlager, and A. Wolisz, “**Power-Saving Mechanisms in Emerging Standards for Wireless LANs: The MAC Level Perspective,**” *IEEE Personal Communications*, vol. 5, no. 3, pp. 40–48, 1998.

- [14] S. Baek and B. D. Choi, “**Performance Analysis of Power Save Mode in IEEE 802.11 Infrastructure WLAN,**” in *Telecommunications, 2008. ICT 2008. International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2008.
- [15] Y.-C. Tseng, C.-S. Hsu, and T.-Y. Hsieh, “**Power-Saving Protocols for IEEE 802.11-based Multi-hop Ad Hoc Networks,**” *Computer Networks*, vol. 43, no. 3, pp. 317–337, 2003.
- [16] M. Tauber and S. N. Bhatti, “**The Effect of the 802.11 Power Save Mechanism (PSM) on Energy Efficiency and Performance during System Activity,**” in *Green Computing and Communications (GreenCom), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 573–580, IEEE, 2012.
- [17] R. M. de Moraes, *Performance Analysis of Wireless Networks*. PhD thesis, University of California, California, Dec. 2005.
- [18] R. M. de Moraes, H. R. Sadjadpour, *et al.*, “**Many-to-Many Communication for Mobile Ad Hoc Networks,**” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 5, 2009.
- [19] P. C. Ghobad, “**M2MMAC: Um Novo Protocolo MAC Multicanal para Comunicação Muitos-para-Muitos em Redes 802.11,**” Master’s thesis, Universidade de Brasília, Brasília, July 2017.
- [20] P. C. Ghobad and R. M. De Moraes, “**Many-to-Many Communication Multichannel MAC Protocol for 802.11-based Wireless Networks,**” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Mar. 2017.
- [21] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. Golden, and R. A. Valenzuela, “**V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel,**” in *Signals, Systems, and Electronics, 1998. ISSSE 98. 1998 URSI International Symposium on*, pp. 295–300, IEEE, 1998.
- [22] G. Bianchi, “**Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,**” *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [23] G. Bianchi, “**IEEE 802.11 - Saturation Throughput Analysis,**” *IEEE communications letters*, vol. 2, no. 12, pp. 318–320, 1998.
- [24] E. Ziouva and T. Antonakopoulos, “**CSMA/CA Performance under High Traffic Conditions: Throughput and Delay Analysis,**” *Computer communications*, vol. 25, no. 3, pp. 313–321, 2002.
- [25] M. Ergen and P. Varaiya, “**Throughput Analysis and Admission Control for IEEE 802.11a,**” *Mobile networks and Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 705–716, 2005.

- [26] I. Tinnirello, G. Bianchi, and Y. Xiao, “**Refinements on IEEE 802.11 Distributed Coordination Function Modeling Approaches**,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 1055–1067, 2010.
- [27] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “**Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6GHz**,” *IEEE Standard 802.11ac*, 2013.
- [28] M. S. Gast, *802.11ac: A Survival Guide: Wi-Fi at Gigabit and Beyond*. "O'Reilly Media, Inc.", 2013.
- [29] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee, “**Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput**,” *IEEE Standard 802.11n*, 2009.
- [30] Y. Du, *Multiuser Detection in Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems by Blind Signal Separation Techniques*. PhD thesis, Florida International University, Miami, Florida, Mar. 2012.
- [31] D. Samardzija, A. Lozano, and C. B. Papadias, “**Design and Experimental Validation of MIMO Multiuser Detection for Downlink Packet Data**,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2005, no. 11, p. 320481, 2005.
- [32] S. M. Alamouti, “**A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications**,” *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [33] H. Dai, S. Jayaweera, H. V. Poor, D. Reynolds, and X. Wang, “**Multiuser Receiver Design**,” *MIMO wireless communications*, 2007.
- [34] J. So and N. 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*, pp. 222–233, ACM, 2004.
- [35] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S. H. Son, and J. A. Stankovic, “**TMMAC: An Energy Efficient Multi-Channel MAC Protocol for Ad Hoc Networks**,” in *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*, pp. 3554–3561, IEEE, 2007.
- [36] W.-T. Chen, J.-C. Liu, T.-K. Huang, and Y.-C. Chang, “**TAMMAC: An Adaptive Multi-channel MAC Protocol for MANETs**,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 11, 2008.
- [37] D. N. M. Dang, C. S. Hong, and S. Lee, “**A Hybrid Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks**,” *Wireless Networks*, vol. 21, pp. 387–404, Aug. 2014.

- [38] I. A. Getting, “**Perspective/navigation-the Global Positioning System,**” *IEEE spectrum*, vol. 30, no. 12, pp. 36–38, 1993.
- [39] S. Umamaheshwar, T. A. Kumar, and K. S. Rao, “**Performance Evaluation of Multiuser MIMO Detection Techniques,**” in *Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 2015 International Conference on*, pp. 1178–1183, IEEE, 2015.
- [40] J. Kim and I. Lee, “**802.11 WLAN: History and New Enabling MIMO Techniques for Next Generation Standards,**” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 134–140, 2015.
- [41] S.-L. Wu, C.-Y. Lin, Y.-C. Tseng, and J.-L. Sheu, “**A New Multi-channel MAC Protocol with on-demand Channel Assignment for Multi-hop Mobile Ad Hoc Networks,**” in *Parallel Architectures, Algorithms and Networks, 2000. I-SPAN 2000. Proceedings. International Symposium on*, pp. 232–237, IEEE, 2000.
- [42] T.-S. Ho and K.-C. Chen, “**Performance Analysis of IEEE 802.11 CSMA/CA Medium Access Control Protocol,**” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC’96., Seventh IEEE International Symposium on*, vol. 2, pp. 407–411, IEEE, 1996.
- [43] H. S. Chhaya and S. Gupta, “**Performance Modeling of Asynchronous Data Transfer Methods of IEEE 802.11 MAC Protocol,**” *Wireless networks*, vol. 3, no. 3, pp. 217–234, 1997.
- [44] NS-3 PROJECT, “**Network Simulator 3.**” <https://www.nsnam.org/news/ns-3-27-released>, Oct. 2017. Release ns-3.27, Accessed: 2017-11-03.
- [45] Q. Wang, S. Leng, H. Fu, and Y. Zhang, “**An IEEE 802.11p-Based Multichannel MAC Scheme with Channel Coordination for Vehicular Ad Hoc Networks,**” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 449–458, 2012.
- [46] NS-3 PROJECT, *NS3 Network Simulator Manual*, Oct. 2017. Release ns-3.27.