



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Um Estudo Comparativo Entre Protocolos De Controle de Acesso Ao Meio Baseados Em Pontos de Encontros Para Múltiplos Canais Ortogonais

José Melo de Assis Fonseca

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Computação — Licenciatura

Orientador

Prof. MsC. Marcos Fagundes Caetano

Brasília
2016

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Curso de Computação — Licenciatura

Coordenador: Prof. MsC. Pedro Antônio Dourado Rezende

Banca examinadora composta por:

Prof. MsC. Marcos Fagundes Caetano (Orientador) — CIC/UnB

Prof. Dr. Eduardo Adilio Pelinson Alchieri — CIC/UnB

Prof. MsC. João José Costa Gondim — CIC/UnB

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Fonseca, José Melo de Assis.

Um Estudo Comparativo Entre Protocolos De Controle de Acesso Ao Meio Baseados Em Pontos de Encontros Para Múltiplos Canais Ortogonais / José Melo de Assis Fonseca. Brasília : UnB, 2016.

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

Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

1. wifi, 2. 802.11, 3. chma, 4. mcmac, 5. redes

CDU 002

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

Dedicatória

A meus pais, José e Elvira.

Agradecimentos

Agradeço a toda minha família, e aos amigos que me apoiaram durante essa jornada. Sem o apoio de minhas irmãs, meus pais, tios, primos e amigos mais próximos não teria sido possível concluir este curso. Faço um agradecimento especial a todos os professores com quem tive a oportunidade de aprender durante o curso de Licenciatura em Computação, em especial a meu orientador, professor MsC. Marcos Fagundes Caetano, com quem tive a especial oportunidade de estudar durante os últimos dois anos do curso, e ao seu próprio orientador, professor Dr. Jacir Luiz Bordim, que sempre emprestou seu valioso conhecimento quando haviam dúvidas que mais ninguém podia sanar. Como parte dos trabalhos realizados no curso de Licenciatura em Computação, tive a oportunidade de ministrar aulas a duas turmas de alunos que, no fim, me ensinaram tanto quanto eu tive a oportunidade de ensinar a eles. Agradeço aos coordenadores e alunos do CEDEP, na cidade satélite do Paranoá, à coordenação e alunos da Escola de Informática do CPD da UnB, bem como à professora Dra. Maria de Fátima Brandão, responsável por coordenar esse precioso projeto envolvendo a prática pedagógica como instrumento de mudança social. Por fim, mas não menos importante, agradeço aos amigos que fiz durante o curso. O primeiro dia de aula da turma do primeiro semestre de 2012 parece que ocorreu ainda ontem, e as amizades que lá começamos a construir seguirão comigo sempre.

Resumo

O presente estudo tem como objetivo avaliar protocolos de controle de acesso ao meio para redes sem fio funcionando em modo de operação não infraestruturado para ambientes com múltiplos canais ortogonais. Motivado pela necessidade de realizar melhor utilização do limitado espectro eletromagnético, foi realizada uma breve revisão do estado da arte, onde são discutidos protocolos que representam importantes paradigmas na metodologia de distribuição dos recursos de rede. Os protocolos CHMA [44], McMAC (*Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol* [39]) e IEEE 802.11 [16] são implementados em linguagem C++, utilizando como base o ambiente de simulação de eventos discretos Omnet++ e o *framework* MiXiM [21]. Com base nos resultados obtidos na simulação dos três protocolos foi realizado um estudo comparativo onde os resultados foram contrastados de acordo com a vazão total de rede e a justiça com a qual os protocolos distribuem os recursos disponíveis. Os resultados obtidos apontam para um significativo ganho de desempenho para protocolos que utilizam múltiplos canais ortogonais, em especial quando o protocolo permite encontros paralelos. O protocolo McMAC apresentou a maior vazão total de rede entre os protocolos comparados, em especial quando há maior número de canais e de nós participantes, chegando a atingir aproximadamente dez vezes a vazão total do protocolo CHMA quando há 128 pares de nós concorrendo para utilizar 64 canais no envio de quadros de dados de 1500 *bytes*.

Palavras-chave: wifi,802.11,chma,mcmac,redes

Abstract

The purpose of this study is to establish a comparison between medium access control protocols (MAC's) for ad-hoc wireless networks, motivated by the need to make better use of the limited electromagnetic spectrum available in wireless communications. A short review of the state of the art is presented, from which three protocols are chosen for comparison. Protocols CHMA (*Channel Hopping Multiple Access* [44]), McMAC (*Parallel Rendezvous Multi-Channel MAC Protocol* [39]) and 802.11 [16] were implemented in the C++ programming language under the Omnet++ discrete event simulator using the MiXiM [21] framework. The implemented protocols are then simulated and the results are compared based on total network throughput and their fairness in the distribution of available resources. The results show significant gains by protocols able to make use of multiple channels, especially when the protocol allows for multiple parallel transmissions. The McMAC protocol obtained the best total network throughput, with up to approximately ten times the total network throughput when 128 pairs of nodes contend for 64 channels to transmit 1500 byte frames.

Keywords: wifi,802.11,chma,mcmac,networking

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Identificação do Problema	4
1.2	Motivação	5
1.3	Objetivo Geral	5
1.4	Objetivos Específicos	5
1.5	Metodologia	5
1.6	Organização do Documento	6
1.7	Considerações Finais	6
2	Revisão Teórica	7
2.1	Conceitos Fundamentais	7
2.1.1	O modelo OSI	7
2.1.2	Protocolos de Múltiplo Acesso ao Meio	9
2.1.3	Protocolos MAC	10
2.1.4	Colisões	11
2.1.5	Vazão Total da Rede	11
2.1.6	Problema do Terminal Escondido	11
2.1.7	Problema do Terminal Exposto	12
2.1.8	Encontros ou <i>Rendezvous</i>	13
2.1.9	Redes Infraestruturadas e Redes <i>Ad-Hoc</i>	13
2.1.10	Encontros Simples ou Paralelos	14
2.1.11	Resumo da Seção	14
2.2	Protocolos MAC	14
2.2.1	A Família de Protocolos IEEE 802.11	15
2.2.2	Protocolos Com Saltos Entre Canais	21
2.2.3	O Protocolo CHMA	21
2.2.4	Protocolo McMAC	23
2.3	Considerações Finais	25

3	Modelo Analítico	27
3.1	Modelo de Bianchi	27
3.2	Justiça dos Protocolos (<i>Fairness</i>)	29
3.3	Considerações Finais	31
4	Simulação e Comparação dos Resultados	32
4.1	<i>Framework</i> de Simulação de Protocolos MiXiM	32
4.1.1	Implementação dos Protocolos sob o MiXiM	33
4.2	Parâmetros Para Simulação	34
4.3	Simulação	35
4.4	Comparação	36
4.4.1	Comparação de Vazão e Justiça para Um Canal	36
4.4.2	Comparação para Múltiplos Canais Ortogonais	37
4.5	Considerações Finais	44
5	Conclusão	47
5.1	Trabalhos Futuros	48
	Referências	49

Lista de Figuras

1.1	Número de dispositivos que utilizam redes WiFi e redes de telefonia celular. Adaptado de [9].	4
2.1	Modelo OSI de arquitetura de rede em camadas. Adaptado de [25].	8
2.2	Camadas correspondentes, de nós remotos, tratam as mesmas estruturas de dados. Adaptado de [36].	8
2.3	Taxonomia de protocolos de controle de acesso ao meio de acordo com [23]	10
2.4	Problema dos terminais escondidos [25]	12
2.5	Cenário onde ocorre o problema do terminal exposto. Adaptado de [38] . .	13
2.6	Uma transmissão completa do protocolo IEEE 802.11 ilustrada. Adaptado de [25].	17
2.7	Divisão do espectro eletromagnético em 13 canais no protocolo IEEE 802.11	17
2.8	Divisão do tempo em fatias discretas de tempo.	18
2.9	Ilustração do Funcionamento do Protocolo CHMA	22
2.10	Funcionamento do Protocolo McMAC	24
4.1	Comparação da Vazão dos Protocolos Utilizando Apenas Um Canal	37
4.2	Comparação da Justiça de Protocolos de Um Canal	38
4.3	Comparação da Vazão Total de Rede Para 2 Canais	39
4.4	Comparação da Justiça de Protocolos de 2 Canais	39
4.5	Comparação da Vazão Total de Rede Para 4 Canais	40
4.6	Comparação da Justiça de Protocolos de 4 Canais	41
4.7	Comparação da Vazão Total de Rede Para 8 Canais	42
4.8	Comparação da Justiça de Protocolos de 8 Canais	42
4.9	Comparação da Vazão Total de Rede Para 16 Canais	43
4.10	Comparação da Justiça de Protocolos de 16 Canais	44
4.11	Comparação da Vazão Total de Rede Para 32 Canais	45
4.12	Comparação da Justiça de Protocolos de 32 Canais	45
4.13	Comparação da Vazão Total de Rede Para 64 Canais	46
4.14	Comparação da Justiça de Protocolos de 64 Canais	46

Lista de Tabelas

2.1	Resumo de Características dos Protocolos Comparados	25
3.1	Parâmetros utilizados no modelo analítico de Bianchi	30

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACK Acknowledgement. 19, 34

AP Access Point. 12

BSS Basic Service Set. 15

CCA Clear Channel Assessment. 15, 18, 19

CDMA Code Division Multiple Access. 9

CHMA Channel Hopping Multiple Access. vi, vii, 21, 22, 33–38, 40, 41, 43, 47

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance. 9, 11, 14, 15

CTS Clear To Send. 12, 16, 20, 22, 34

CW Contention Window. 19

DCF Distributed Control Function. 15, 18, 36

DIFS Distributed Inter-Frame Space. 16, 18, 19

EIFS Extended Inter-Frame Space. 19

FDMA Frequency Division Multiple Access. 9

GHz Gigahertz. 15

GPS Global Positioning System. 9

GSM Global System for Mobile Communications. 9

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. viii, x, 4, 9, 14–23, 27, 33, 35–37

ISM Industrial, Scientific and Medical. 3–5, 15, 16

LLC Link Layer Control. 8

MAC Medium Access Control. vi, vii, 6, 7, 10–13, 18, 19, 21, 23, 24, 33

Mbps Megabits per second.. 37, 40

MHz Megahertz. 15

NAV Network Allocation Vector. 16

OSI Open Systems Interconnection. 7, 13, 33

OSI-RM OSI Reference Model. 8

PIFS Point Inter-Frame Space. 18, 19

RTS Ready To Send. 12, 16, 20, 22, 34

SDMA Space Division Multiple Access. 9

SDR Software Defined Radio. 48

SIFS Short Inter-Frame Space. 16, 18, 19

SRC Short Retry Counter. 20

SSID Service Station ID. 15

TDMA Time Division Multiple Access. 9

WiFi Wireless Fidelity. x, 3, 4, 15, 18

Capítulo 1

Introdução

O presente estudo aborda protocolos de controle de acesso ao meio para redes sem fio. Esse tipo de rede não emprega um meio físico de estado sólido, como fios de cobre ou fibras ópticas. O meio empregado pelas redes sem fio é o espectro eletromagnético, que é um recurso limitado e compartilhado por todos os ocupantes de um determinado espaço físico [25].

A partir dos anos 1980, o governo dos Estados Unidos passou a alocar faixas de frequências que podem ser utilizadas livremente, não exigindo licenciamento prévio [12]. A banda de frequências não licenciada, na qual enquadram-se as redes sem fio, é denominada ISM (do inglês *Industrial, Scientific and Medical*) e é utilizada por diversos dispositivos eletrodomésticos e industriais. No presente trabalho serão investigados protocolos de controle de acesso ao meio que fazem uso da banda ISM.

De acordo com o relatório *Mobility Report*, publicado pela empresa Ericsson, a estimativa é de que existirão 28 bilhões de dispositivos conectados à Internet até o ano de 2021 [34]. Segundo o mesmo levantamento, a taxa de crescimento do número de dispositivos conectados entre 2015 e 2021 será de 23% por ano. Segundo o relatório *Visual Networking Index*, publicado pela empresa Cisco [9], durante o ano de 2015, 55% de todo o tráfego de rede oriundo de dispositivos móveis foi gerado por serviços de vídeos, que são um tipo de mídia que exige um constante fluxo de dados para viabilizar uma experiência multimídia sem interrupções. Ainda de acordo com essa pesquisa, o número de dispositivos que utilizam as redes WiFi chega a ser mais de três vezes maior que nas redes de telefonia celular, conforme ilustrado na Figura 1.1.

Diante dessa realidade, vê-se que fazer uso eficiente do espectro eletromagnético é imprescindível para atender ao crescimento do número de usuários conectados às redes sem fio. No presente estudo o termo recurso de rede refere-se aos canais, ou faixas do espectro eletromagnético. Protocolos que façam melhor uso dos recursos de rede disponíveis, ou seja que fazem melhor uso dos canais ou subdivisões do espectro eletromagnético, devem

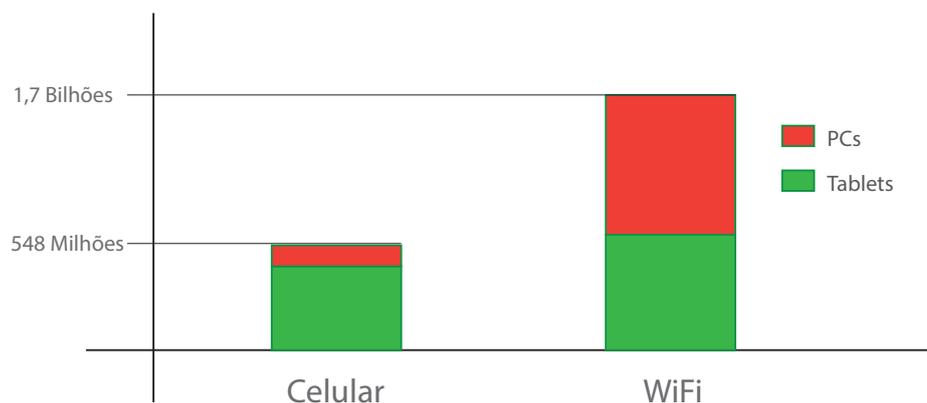


Figura 1.1: Número de dispositivos que utilizam redes WiFi e redes de telefonia celular. Adaptado de [9].

ser empregados para garantir a escalabilidade do serviço de rede.

1.1 Identificação do Problema

Por tratar-se de uma faixa de frequências não licenciada, dispensando os usuários de obter uma concessão especial para utilizá-la, há abundante desenvolvimento de produtos que utilizam a banda ISM. Entre as classes de dispositivos que empregam a mesma faixa que redes IEEE 802.11, temos [10]:

- Fornos de microondas;
- Telefones sem fio;
- Câmeras de vigilância sem fio;
- Motores de elevadores;
- Máquinas de corte de metal utilizando plasma;
- Dispositivos Bluetooth;
- Aeromodelos, *drones* e outros brinquedos de controle remoto;
- Outras redes IEEE 802.11 localizadas nas proximidades.

O problema abordado no presente estudo é o fato da banda de rede ISM encontrar-se cada vez mais congestionada diante da demanda crescente por comunicação sem fio. Em função disso é preciso avaliar protocolos de controle de acesso ao meio para identificar aqueles que efetuam melhor uso dos recursos de rede disponíveis.

1.2 Motivação

Quando o número de participantes de uma rede sem fio cresce, a concorrência pelo espectro eletromagnético da banda ISM passa a exigir protocolos de comunicação eficientes e que são capazes de distribuir os recursos disponíveis de forma justa. No entanto, a implementação de tais protocolos apresenta desafios especiais, particularmente na transmissão de dados quando há grande número de participantes da rede que necessitam acessar o meio eletromagnético simultaneamente. Assim, é necessário obter maior conhecimento dos protocolos para investigar que benefícios cada estratégia de controle de acesso ao meio pode propiciar. A simulação de protocolos em ambiente virtual permite avaliar seu desempenho antes de desenvolver uma solução empregando *hardware* físico para testes em situação real.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é realizar uma avaliação de protocolos de controle de acesso ao meio para múltiplos canais ortogonais em redes sem fio não estruturadas (em configuração *ad-hoc*).

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- Investigar como o número de nós e o tamanho dos dados transmitidos influem na vazão total da rede para cada protocolo;
- Determinar de que forma os protocolos que empregam múltiplos canais alteram a vazão total da rede;
- Comparar a justiça dos protocolos na distribuição dos recursos de rede que, no presente estudo, são canais ortogonais do espectro eletromagnético;
- Verificar se protocolos que permitem encontros paralelos entre nós podem ser mais eficientes que aqueles de encontros simples.

1.5 Metodologia

Para concretizar o presente estudo comparativo, primeiramente foi realizado um levantamento do estado da arte dos protocolos para redes sem-fio. A partir desse levantamento

inicial, selecionaram-se três protocolos que representam importantes paradigmas na distribuição dos recursos de uma rede. Os protocolos selecionados foram, então, implementados sob um ambiente de simulação que oferece todos os componentes necessários para a construção de uma rede de computadores virtual. Foram executadas simulações sob cenários variados, de modo a investigar o comportamento dos protocolos nas diversas situações que podem ocorrer em casos reais de uso. Os resultados das simulações são, então, compilados e apresentados na forma de gráficos que permitem efetuar a comparação entre os protocolos.

1.6 Organização do Documento

O documento encontra-se estruturado da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 é realizada uma revisão teórica de conceitos técnicos e dos protocolos MAC relevantes ao presente trabalho;
- O Capítulo 3 apresenta o modelo teórico empregado no estudo comparativo;
- No Capítulo 4 encontra-se a descrição da implementação dos protocolos sob o ambiente de simulação empregado, a metodologia e parâmetros de simulação utilizados e os resultados obtidos;
- Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

1.7 Considerações Finais

Neste capítulo introdutório foi identificado e contextualizado o problema ocasionado pelo grande crescimento de usuários das redes sem fio. Uma vez apresentados os objetivos gerais e específicos, foi apresentada a motivação para a realização desta investigação. É, então, proposta uma metodologia de implementação dos protocolos, simulação e avaliação dos resultados que permitirá comparar o desempenho dos protocolos em situações que podem ocorrer em uma rede de computadores real. Concluída esta introdução, é possível prosseguir à revisão teórica que se faz necessária para fundamentar o desenvolvimento do presente estudo.

Capítulo 2

Revisão Teórica

Ao longo desta revisão teórica, serão apresentados os princípios necessários à compreensão do problema identificado e à subsequente execução da metodologia proposta. Inicialmente são apresentados conceitos gerais de redes de computadores que, posteriormente, serão aplicados na implementação e comparação dos protocolos. Por fim, é realizada uma revisão do funcionamento dos protocolos selecionados para o estudo comparativo.

2.1 Conceitos Fundamentais

As redes de computador tem a função de viabilizar a transmissão de dados entre nós remotos [41]. O protocolo é o componente lógico da rede que estabelece as regras de comunicação entre seus participantes. Tradicionalmente, adota-se a arquitetura em camadas para a implementação dos protocolos de rede, onde cada camada realiza uma tarefa específica e possui uma interface bem definida com as camadas adjacentes. O modelo ISO OSI é a arquitetura em camadas mais utilizada na implementação de redes de computadores [3].

2.1.1 O modelo OSI

O modelo OSI especifica 7 camadas, conforme ilustrado na Figura 2.1. Cada camada possui uma estrutura de dados específica que emprega para efetuar a transmissão e recepção. De acordo com [25], no modelo OSI, essas estruturas de dados são denominadas:

- Mensagens, quando enviados ou recebidos pela camada de aplicação;
- Segmentos, quando são processados na camada de transporte;
- Datagramas, quando são interpretados na camada de redes e;
- Quadros de Dados (*Frames*, na língua inglesa) quando são processados na camada de enlace (MAC).

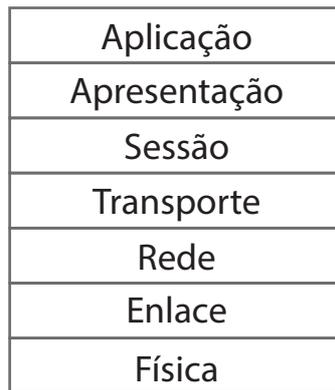


Figura 2.1: Modelo OSI de arquitetura de rede em camadas. Adaptado de [25].

Essa nomenclatura faz parte da convenção OSI, e busca diferenciar as diversas unidades lógicas de transmissão de dados, bem como auxiliar na identificação da camada onde cada estrutura de dados é tratada. A Figura 2.2 ilustra como as camadas tratam as mesmas estruturas de dados geradas em sua contrapartida remota, abstraindo a complexidade das camadas inferiores [36].

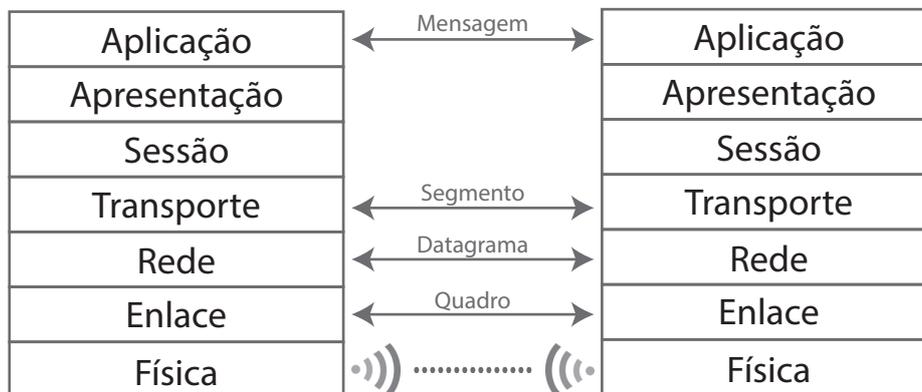


Figura 2.2: Camadas correspondentes, de nós remotos, tratam as mesmas estruturas de dados. Adaptado de [36].

O modelo OSI-RM (*OSI Reference Model*, na língua inglesa), divide a camada de enlace em duas subcamadas : MAC (*Medium Access Control*, na língua inglesa) e LLC (*Link Layer Control*, na língua inglesa). A subcamada MAC realiza o controle de acesso ao meio, e é o foco do presente estudo. A estrutura de dados específica à camada de enlace é o quadro de dados (ou *data frame*, na língua inglesa).

2.1.2 Protocolos de Múltiplo Acesso ao Meio

Protocolos de múltiplo acesso permitem que diversos nós de uma rede se comuniquem utilizando a mesma frequência [1]. Caso não houvessem protocolos de múltiplo acesso, seria exigida uma faixa de frequências exclusiva para cada par de nós comunicantes. Os principais sistemas de múltiplo acesso ao meio que se encontram em amplo uso na atualidade são:

- CDMA (Code Division Multiple Access, na língua inglesa): É um protocolo amplamente utilizado em redes de telefonia móvel. Cada dispositivo utiliza uma codificação predeterminada para distinguir seu tráfego daquele de outros nós. O sistema de localização GPS (na língua inglesa (*Global Positioning System*)) é a aplicação mais popular que utiliza o padrão CDMA [40].
- TDMA (Time Division Multiple Access, na língua inglesa): Um determinado *slot* de tempo é atribuído a um dispositivo dentro de uma frequência. Slots alternados são atribuídos a diferentes dispositivos. O sistema de telefonia celular GSM utiliza o padrão TDMA [43].
- FDMA (Frequency Division Multiple Access, na língua inglesa): Cada nó da rede se comunica com frequência pré-determinada. Análoga à transmissão de programas de áudio de rádios tradicionais, cada estação encontra-se transmitindo em frequência conhecida por todos os receptores. A constelação internacional de satélites Intelsat utiliza o padrão FDMA [13].
- SDMA (Space Division Multiple Access, na língua inglesa): Neste método o espaço físico da transmissão é segmentado, direcionando transmissões de e para os nós da rede de acordo com sua localização. Assim SDMA permite a comunicação na mesma frequência entre dispositivos localizados fisicamente em regiões distintas. Sistemas de satélites podem empregar o padrão SDMA, normalmente trabalhando em conjunto com TDMA ou FDMA [30].
- CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance, na língua inglesa) É o padrão empregado pela família de protocolos IEEE 802.11 [8]. O esquema CSMA/CA procura evitar colisões por meio de dois mecanismos. O primeiro é um conjunto de intervalos que são adicionados entre as transmissões de quadros visando aumentar a probabilidade de ocorrer o sensoriamento de um eventual canal ocupado durante esse período de contenção. O segundo mecanismo envolve o aumento exponencial dos intervalos de contenção. Cada vez que o canal é detectado ocupado, o período de contenção é aumentado exponencialmente [50]. Ambos os mecanismos visam aumentar a probabilidade do canal ser liberado antes do nó efetuar sua pró-

xima transmissão, e daí origina-se o termo *Collision Avoidance* (evasão de colisões, na língua inglesa).

O sistema CSMA/CA forma a base da implementação da função DCF da família de protocolos IEEE 802.11, que será discutida, posteriormente, na seção 2.2.1.

2.1.3 Protocolos MAC

O controle da transmissão, bem como a tradução, livre de erros, de um fluxo de bits para quadros de dados da camada de enlace, é a principal função executada pelo protocolo MAC [5]. O protocolo MAC opera na subcamada de mesmo nome como componente da camada de enlace, e permite que toda a complexidade envolvida na comunicação no nível da camada física seja logicamente abstraída. A Figura 2.3 apresenta uma taxonomia simplificada dos vários tipos de protocolos MAC segundo [23].

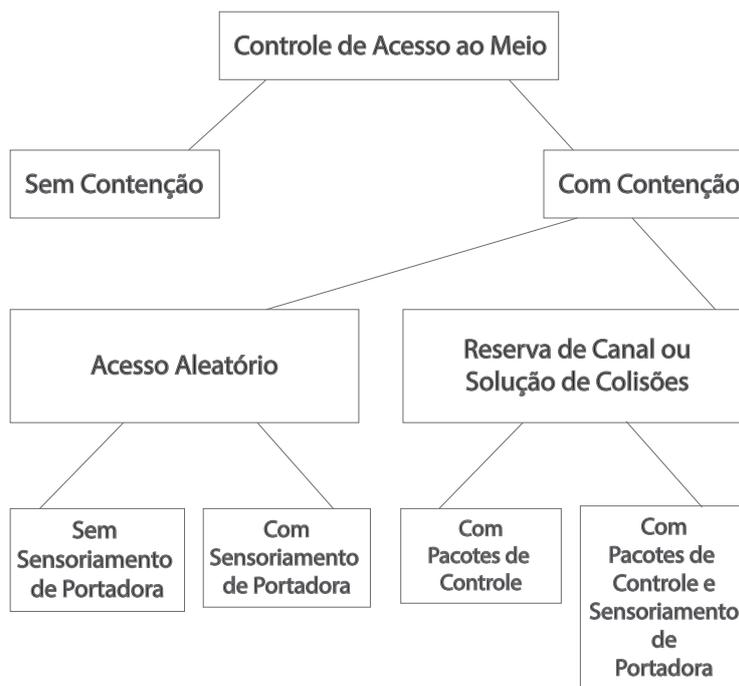


Figura 2.3: Taxonomia de protocolos de controle de acesso ao meio de acordo com [23]

Os protocolos de controle de acesso ao meio podem reservar partes do espectro eletromagnético para cada nó ou podem deixar que os participantes disputem para obter acesso ao meio sem fio. Quando o protocolo efetua reserva de recursos, garantindo que cada nó poderá efetuar uma certa quantidade de transmissões, dizemos que é um protocolo sem contenção (uma das duas classificações principais vistas na Figura 2.3). Quando ocorre

disputa entre os nós para acessar o meio, dizemos que é um protocolo com contenção. Os protocolos investigados no presente trabalho possuem período de contenção, pois permitem que nós disputem entre si para obter acesso ao meio. Tais protocolos não são capazes de garantir uma quantidade mínima de recursos para cada nó participante da rede [2].

Existem desafios especiais na implementação de protocolos para redes sem fio como, por exemplo, a possibilidade de ocorrerem colisões com outras transmissões, terminais ocultos, terminais expostos, entre outros. A seguir são apresentadas algumas dessas particularidades.

2.1.4 Colisões

No meio sem fio, quando mais de uma transmissão ocorre ao mesmo tempo, em um mesmo canal, ocorre uma colisão. Quadros de dados que sofrem colisão são descartados pois, nessa condição, a camada física torna-se incapaz de assegurar a integridade dos dados. Um dos principais objetivos dos protocolos MAC baseados no padrão CSMA/CA (conforme discutido na seção 2.1.2) é evitar as colisões. A estratégia de evasão de colisões implementada nos protocolos que compõem o presente estudo será abordada no detalhamento do protocolo IEEE 802.11 (seção 2.2.1).

2.1.5 Vazão Total da Rede

A vazão total da rede é dada pela razão entre o somatório da quantidade de dados transmitidos por cada nó e o período de tempo na qual as transmissões ocorreram.

Seja T_i a quantidade de bytes transmitidos pelo nó i durante s segundos, em uma rede composta por N nós. Temos então que a vazão total da rede S , em Mbps, é dada pela seguinte expressão:

$$S = \frac{8 \cdot \sum_{i=1}^N T_i}{s} \quad (2.1)$$

Segue que o total de bytes transferidos será o múltiplo de quadros de dados transmitidos com sucesso pelo tamanho dos dados contidos em cada quadro.

2.1.6 Problema do Terminal Escondido

Quando um ponto de acesso se encontra dentro do raio de transmissão de dois nós da rede, porém esses nós se encontram mutuamente fora de alcance entre si, pode ocorrer o problema do terminal escondido. O nome faz alusão ao fato de pares de nós remotos não serem capazes de detectar transmissões mútuas, por encontrarem-se fora de alcance um do outro. Dessa forma os nós encontram-se escondidos um do outro. Nessa condição,

caso ambos efetuem uma transmissão dentro de um mesmo intervalo de tempo, ocorrerá uma colisão no ponto de acesso, pois este se encontra dentro do raio de alcance de ambos os nós transmissores. [25].

Na Figura 2.4, temos ilustrada a situação em que ocorre o problema do terminal escondido. No caso é mostrada uma rede estruturada que utiliza o ponto de acesso AP. Os nós A e B encontram-se fora do alcance um do outro, logo o sensoriamento do meio feito individualmente pelos nós indicará que o canal encontra-se livre para transmissão. Porém, AP recebe as transmissões de ambos A e B. Ao haver uma transmissão simultânea de A e B para AP, ocorrerá a colisão e ambos os pacotes serão descartados.

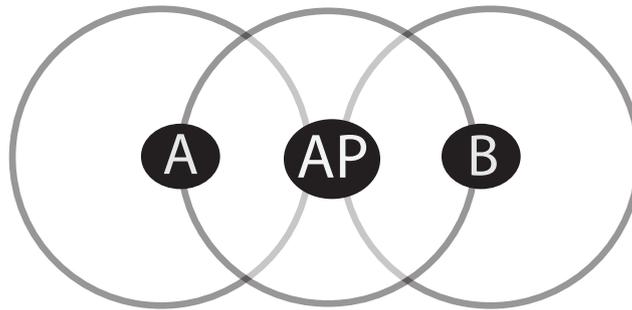


Figura 2.4: Problema dos terminais escondidos [25]

Protocolos MAC procuram solucionar o problema dos terminais ocultos por meio de quadros de comando RTS (do inglês *Ready To Send*) e CTS (do inglês *Clear To Send*) onde o terminal prestes a efetuar a transmissão solicita informação de disponibilidade do canal ao AP enviando um quadro RTS. Caso o canal se encontre livre, o AP responderá um quadro CTS autorizando o início da transmissão dos dados. Caso já exista outra transmissão em andamento, o AP não responderá ao quadro RTS e o transmissor permanecerá em estado de contenção antes de retransmitir um quadro RTS.

2.1.7 Problema do Terminal Exposto

O problema do terminal exposto ocorre quando um nó deixa, desnecessariamente, de efetuar uma transmissão por haver sensoriado a transmissão de outro nó em sua proximidade. Na Figura 2.5 temos ilustrado o problema do terminal exposto. O nó B deseja transmitir para D, porém o nó C encontra-se exposto a B. Assim, B e C detectam o canal ocupado e ingressam, desnecessariamente, em estado de contenção. Quando há um grande número de nós, o problema do terminal exposto pode levar a significativa degradação da vazão da rede [6].

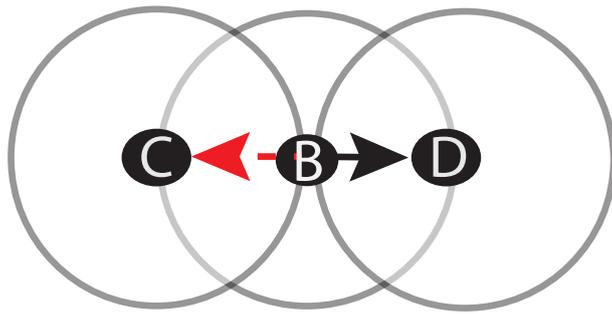


Figura 2.5: Cenário onde ocorre o problema do terminal exposto. Adaptado de [38]

2.1.8 Encontros ou *Rendezvous*

Um encontro (*rendezvous*, na língua francesa) é o acordo que ocorre entre transmissor e receptor, em determinado canal de rádio, durante espaço de tempo suficiente para permitir a transmissão completa de um quadro (*frame*, na língua inglesa) de dados. O encontro envolve duas camadas do padrão OSI, a camada física e a camada de enlace de dados. Ou seja, é preciso que a camada física tanto do transmissor quanto do receptor cheguem a um acordo, e que o protocolo MAC estabeleça corretamente um circuito virtual entre os dois nós. Para que isso ocorra, é preciso que os nós determinem, utilizando algum mecanismo lógico, em qual canal o seu par se encontra para que então seja possível buscar iniciar um encontro.

Com relação à estratégia para promover encontros, o presente trabalho efetua a comparação de protocolos onde ou há apenas um canal (e portanto não é necessário buscar os demais nós), onde os nós saltam conjuntamente e encontram-se todos no mesmo canal ou, o terceiro tipo, quando os nós saltam de forma independente porém há uma função utilizada para determinar o canal onde provavelmente se encontram em determinado momento.

2.1.9 Redes Infraestruturadas e Redes *Ad-Hoc*

Redes infraestruturadas são formadas por nós que se comunicam com um concentrador do tráfego de rede (pontos de acesso ou *access points*, na língua inglesa) que centraliza o controle do tráfego entre os usuários. Nesse tipo de rede não há comunicação direta entre os nós, e todo o tráfego deve passar pelo ponto de acesso. Já as redes ad-hoc são formadas quando dispositivos aproximam-se uns dos outros e passam a comunicar-se, sem haver um nó centralizador do tráfego de rede. O termo utilizado para a conexão entre nós em redes ad-hoc é *rendezvous*, termo oriundo da língua francesa que significa encontro. No presente trabalho será dado enfoque às redes ad-hoc, ou seja, não estruturadas e a

três tipos de protocolos: de único canal, de *rendezvous* simples onde apenas um par de nós efetua encontro por vez e de *rendezvous* paralelo onde vários pares de nós podem efetuar comunicação simultaneamente. A Figura 2.4 utilizada para ilustrar o problema do terminal escondido apresenta uma configuração de rede estruturada. Já a Figura 2.5 que ilustra o problema do terminal exposto mostra uma configuração típica de rede *ad-hoc* onde não há ponto de acesso.

2.1.10 Encontros Simples ou Paralelos

Protocolos que permitem encontros em apenas um canal por vez são denominados protocolos de encontro simples (na língua inglesa, *single rendezvous*). Aqueles que viabilizam encontros em várias faixas de frequências, simultaneamente, são denominados protocolos de encontros paralelos (o *parallel rendezvous*, na língua inglesa).

2.1.11 Resumo da Seção

Foi realizada uma revisão teórica sobre a função dos protocolos de controle de acesso ao meio sem fio, e os principais desafios enfrentados na sua implementação. Foi visto que protocolos baseados no sistema CSMA/CA empregam estados de contenção para buscar evitar colisões, e que a extensão do período no qual o nó se encontra em estado de contenção cresce exponencialmente com o sensoriamento do canal ocupado. Esta característica será determinante na aferição do desempenho dos protocolos realizada posteriormente no presente estudo. Foram, também, discutidos os principais desafios enfrentados na implementação de protocolos de controle de acesso ao meio sem fio como os problemas dos terminais ocultos, terminais expostos, bem como o conceito de encontros, ou *rendezvous*. O desempenho dos protocolos implementados e comparados no presente trabalho depende, diretamente, dos conceitos vistos neste capítulo. O número de colisões e a capacidade do protocolo de promover encontros simples ou paralelos entre os nós, principalmente quando há grande número de usuários, são fatores determinantes na vazão total da rede e na justiça do protocolo, conforme será visto na seção 4.4.

2.2 Protocolos MAC

Nesta seção serão vistos os protocolos que formam o foco do presente estudo comparativo. O protocolo IEEE 802.11 forma a base sobre a qual os demais protocolos foram implementados, e introduz importantes conceitos que serão empregados nos protocolos CHMA e McMAC, que são visitados em seguida.

2.2.1 A Família de Protocolos IEEE 802.11

A ampla difusão do protocolo IEEE 802.11 *Wireless Lan*, popularmente conhecido por WiFi [25, p. 526], trouxe enorme popularidade às redes sem fio após a banda ISM tornar-se disponível ao público para uso não licenciado. [26] A família de protocolos IEEE 802.11 encontra-se em amplo uso em redes sem fio domésticas e corporativas. Dispositivos com apenas um rádio transceptor podem ser construídos com baixo custo, e a configuração de redes utilizando os protocolos 802.11 é tarefa relativamente fácil. Assim, as redes 802.11 (também denominadas redes WiFi) foram rapidamente adotadas por usuários caseiros, mas logo passaram a ser, também, instaladas em ambientes empresariais. No entanto, quando há grande número de usuários, as redes 802.11 apresentam degradação no seu desempenho. A suíte de protocolos 802.11 possui entre 11 e 14 canais para transmissão de dados e controle, porém apenas 3 canais são totalmente disjuntos (canais 1, 6 e 11). Nas redes 802.11 que seguem o padrão japonês, conta-se com um canal adicional (totalizando 14). Há, portanto, sobreposição de frequências entre canais que não possuem, pelo menos, 5 canais interpostos entre si [25]. Dessa forma, apenas três canais podem ser usados para somar a vazão de uma rede sem fio padrão 802.11.

Visão Geral do Protocolo

Sistemas baseados na família de protocolos IEEE 802.11 são organizados de forma hierárquica, onde uma Estação de Serviços de Base (BSS, ou Base Service Station na língua inglesa) é a raiz de uma árvore que representa o que coloquialmente conhecemos por uma *rede sem fio*. A estação de base deve possuir um identificador único para que possa ser descoberta por dispositivos que desejam ingressar na rede. A esse identificador damos o nome de Identificador de Estação de Base (SSID, ou Service Station ID na língua inglesa). Quando verificamos a lista de redes sem fio disponíveis para conexão em de terminado local, o SSID é o identificador que veremos listado e que, coloquialmente, denomina-se nome da rede. A comunicação entre os nós se dá nas faixas de frequências de 2.485 MHz e 5 GHz, conforme estabelecido pela regulamentação da banda ISM [37].

Detalhamento do Funcionamento do Protocolo

O controle de tráfego é realizado por meio de uma função de controle distribuído, ou DCF, que é uma implementação do sistema CSMA/CA. No sistema CSMA/CA, antes de iniciar uma transmissão, os nós participantes da rede devem sensoriar o meio para verificar que não existe outra transmissão em andamento. A esse procedimento dá-se o nome de CCA (*Clear Channel Assessment*) [47]. Para evitar o problema dos terminais

escondidos 2.1.6 o protocolo utiliza, também, a sequência RTS/CTS antes de iniciar a transmissão.

A Figura 2.6 ilustra uma transmissão completa no protocolo IEEE 802.11. O nó transmissor inicia o procedimento aguardando um intervalo DIFS (*Double Inter-Frame Space*, na língua inglesa). Em seguida envia um pacote RTS endereçado ao nó de destino. Caso o nó destino se encontre disponível, aguardará um período SIFS (*Single Inter-Frame Space*, na língua inglesa) e então responderá com um quadro CTS. O transmissor aguardará mais um período SIFS, e iniciará a transmissão do quadro contendo os dados. O receptor aguarda um novo período SIFS, e responde com um quadro ACK (*Acknowledgement*, na língua inglesa).

Ainda na Figura 2.6, vemos que os quadros CTS e ACK enviados pelo receptor são captados por outros nós da rede. Quadros recebidos, mas que são destinados a outros nós, são utilizados na determinação do valor NAV (*Network Allocation Vector*, na língua inglesa). O valor NAV faz parte de um mecanismo temporizador que indica quando o nó deverá iniciar a próxima transmissão. O valor NAV é medido em microssegundos e é decrementado periodicamente pelo protocolo. Quando o contador NAV atinge o valor zero, o nó pode iniciar uma nova transmissão. Ao receber outras transmissões, não endereçadas a ele, o nó detecta o canal ocupado e incrementa o valor NAV de acordo [14].

Canais

A família de protocolos IEEE 802.11 emprega entre 11 e 14 canais. Nos Estados Unidos o canal número 14 não é autorizado a funcionar dentro da banda ISM, alguns equipamentos desenvolvidos para o mercado do Japão trazem este canal habilitado [28]. A Figura 2.7 ilustra como, em uma rede IEEE 802.11 de 13 canais, ocorre a sobreposição de frequências entre canais adjacentes. As linhas verticais interceptam a largura de banda de outros canais. Vemos, graficamente, que para que dois canais sejam totalmente ortogonais, e nenhuma linha vertical intercepte suas bandas horizontais, devem haver 5 canais separando-os.

Fatias de Tempo

A camada de enlace não trata da modulação dos dados e complexidades associadas à propagação eletromagnética dos sinais. Conforme discutido na seção 2.1.1, a camada física abstrai apresenta à camada superior apenas uma visão lógica do tráfego de dados na forma de quadros [15], [41]. Dessa forma, a medição do tempo é, também, logicamente particionada em intervalos discretos dentro dos quais possam ser executadas as funções da camada de enlace. Temos, então, fatias de tempo conforme ilustrado na Figura 2.8.

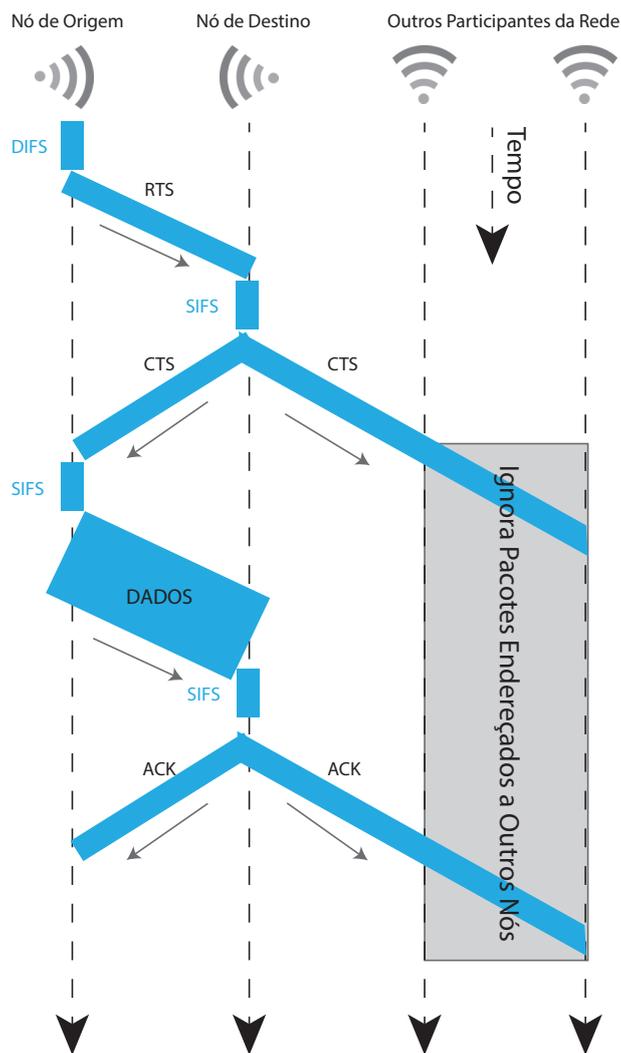


Figura 2.6: Uma transmissão completa do protocolo IEEE 802.11 ilustrada. Adaptado de [25].

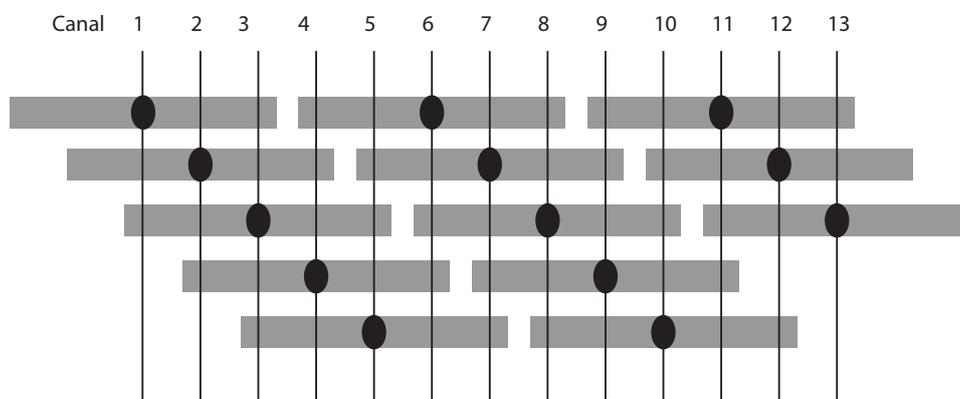


Figura 2.7: Divisão do espectro eletromagnético em 13 canais no protocolo IEEE 802.11

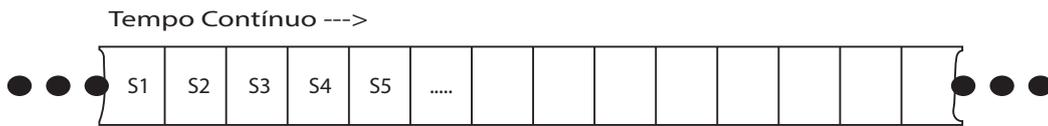


Figura 2.8: Divisão do tempo em fatias discretas de tempo.

Todas as funções executadas pela DCF da família de protocolos IEEE 802.11 baseiam-se nas fatias discretas de tempo e não em intervalos contínuos. Ou seja, na especificação do protocolo encontram-se mencionados intervalos SIFS, DIFS e PIFS que se referem a um certo número de fatias, e não a intervalos contínuos. No padrão IEEE 802.11a, uma fatia equivale a 9 uS [47].

A DCF do Protocolo IEEE 802.11

As principais funções realizadas pelo protocolo MAC do padrão IEEE 802.11 são agrupadas sob a denominação DCF (*Distributed Control Function*, na língua inglesa). A DCF realiza as seguintes funções primordiais, que serão abordadas uma a uma em seguida [47]:

- Sensoriamento de Canal Livre
- Temporização de Intervalos entre *Frames* (SIFS, DIFS e PIFS)
- Quadros de Controle RTS e CTS 2.2.1
- Retransmissões
- *Backoff* Exponencial
- Fragmentação

Sensoriamento de Canal Livre

Antes de iniciar uma transmissão, o dispositivo efetua sensoriamento do meio, procedimento denominado CCA (*Clear Channel Assessment*, na língua inglesa). Caso um sinal com -82dBm ou mais seja captado pelo rádio, o dispositivo obtém resultado negativo do CCA e não inicia a transmissão. De fato, caso exista ruído eletromagnético com essa potência ou superior oriundo de fornos microondas, e outros dispositivos funcionando na banda ISM, será impossível iniciar a transmissão de dados por meio do protocolo IEEE 802.11. Este tipo de interferência ocasiona o bloqueio efetivo de sinais WiFi, e pode ser utilizado de maneira deliberada para impedir transmissões de redes IEEE 802.11 em determinada área [33].

Temporização de Intervalos entre Quadros

Ao receber confirmação positiva do procedimento CCA, o dispositivo então aguarda um intervalo SIFS (que equivale a 2 fatias no caso do padrão IEEE 802.11a [47]) antes de iniciar sua transmissão. Durante o intervalo SIFS não há sensoriamento do meio. Após um intervalo SIFS é realizado novo CCA e, caso o meio se encontre livre, aguarda-se um intervalo DIFS, após o qual inicia-se a transmissão (a Figura 2.6 inicia a ilustração a partir do intervalo DIFS). Nota-se, portanto, que há diversos intervalos de tempos especificados pelo padrão IEEE 802.11, criados para buscar evitar colisões. São eles [47] :

- SIFS: Durante este período de espera o rádio não efetua CCA. Normalmente dura 2 fatias de tempo;
- DIFS: Período de retardo após o CCA por nós de uma rede estruturada. Normalmente dura 4 fatias de tempo;
- PIFS: Período de retardo após o CCA por nós de uma rede *ad-hoc*. Normalmente dura 2.5 fatias de tempo;
- EIFS: Período de retardo estendido, empregado após ocorrer falha na retransmissão de pacotes, normalmente devido ao problema de terminais ocultos. Normalmente dura 22 fatias de tempo.

Os intervalos entre quadros SIFS e DIFS encontram-se ilustrados na Figura 2.6.

Quadros de Controle RTS e CTS

Juntamente com o emprego dos intervalos supra elencados, o protocolo MAC busca evitar colisões por meio do envio de sinais de controle. No caso de uma transmissão bem sucedida, um *frame* ACK é transmitido o que indica à rede que a transmissão que havia sido detectada foi concluída com sucesso. O não recebimento desse quadro de controle dentro de determinado espaço de tempo indica que houve falha na transmissão.

As colisões ocorrem quando duas estações iniciam a transmissão aproximadamente ao mesmo tempo. Quando dois nós encontram-se perfeitamente sincronizados, ambos efetuam o sensoriamento do canal ao mesmo tempo, e obtém CCA positivo juntos. Para evitar que nós se encontrem perfeitamente sincronizados, cada transmissor possui uma janela de contenção (CW). O tamanho dessa janela é duplicado a cada procedimento de *backoff* causado por transmissão sem sucesso. Dessa forma, os nós que não tiveram problemas na última transmissão irão ter tamanhos de CW distintos daqueles que sensoriarão uma colisão. Variando o número de fatias de tempo do *backoff*, combinado com as janelas de contenção, a probabilidade de colisões é então reduzida [47].

Retransmissões

O terminal envia quadros de controle RTS (avisa de que está livre para transmitir) ao meio, buscando receber a autorização por meio de um quadro CTS (confirmação de que o nó solicitante se encontra livre para transmitir). Ao perder um certo número de pacotes RTS, o contador SRC é incrementado. Cada implementação trata o contador SRC de determinada maneira. No caso específico do IEEE 802.11a caso SRC atinja 7, o frame que se buscava transmitir é descartado e aguarda-se da rede um sinal de que houve uma transmissão com sucesso para então reiniciar o procedimento com $SRC = 0$.

Backoff Exponencial

Conforme mencionado na seção 2.2.1, a cada situação de contingência encontrada um valor aleatório de *backoff* é iniciado, no qual o nó aguarda, sem transmitir, durante um determinado número de fatias de tempo. O valor do *backoff* em fatias aumenta de forma exponencial, normalmente dobrando a cada nova iteração. O valor inicial aleatório somado ao *backoff* permite que seja reduzida a probabilidade de nós encontrarem-se sincronizados.

Pontos Fortes

- Permite a construção de dispositivos com baixo consumo de energia [29];
- A simplicidade do sistema possibilita a miniaturização do rádio, o qual pode ser embarcado em diversos tipos de dispositivos miniaturizados [24];
- Rádios 802.11 podem ser construídos a baixo custo [10];
- O protocolo é justo na distribuição de recursos de rede [18].

Pontos Fracos

- Em ambientes com grande número de usuários, as colisões de quadros de dados tornam-se um problema crítico, e o desempenho do protocolo sofre degradação conforme verificado na seção 4.1;
- Comandos e dados trafegam por um único canal, consumindo recursos que poderiam ser destinados exclusivamente à transmissão de dados;
- Apesar de possuir 3 canais ortogonais, dispositivos IEEE 802.11 permanecem no mesmo canal durante todo seu funcionamento. Esse fato ocasiona congestionamento e degradação na vazão quando há grande número de nós participando da rede, conforme verificado na simulação apresentada na seção 4.4.1.

2.2.2 Protocolos Com Saltos Entre Canais

Conforme discutido na Seção 2.2.1, os nós de uma rede que emprega o protocolo IEEE 802.11 não modificam seus canais após a configuração inicial. Visando efetuar melhor utilização dos recursos de rede disponíveis, foram desenvolvidos protocolos onde os nós efetuam saltos entre canais ao longo do tempo [49]. A intenção deste tipo de protocolo é distribuir o tráfego de rede entre canais ortogonais, em contraste com o protocolo IEEE 802.11 onde todo o tráfego da rede utiliza um único canal.

Os protocolos que utilizam múltiplos canais diferenciam-se de acordo com a estratégia adotada para negociar o canal usado para realizar um encontro, e a forma como solucionam contenções para acesso ao meio [39]. Com relação à forma de solução de contenções, os protocolos abordados no presente estudo utilizam a DCF da família de protocolos IEEE 802.11, conforme visto na seção 2.2.1. Portanto, a diferença entre os protocolos aqui investigados encontra-se na forma como negociam o canal utilizado para realizar encontros.

No presente estudo são comparados dois protocolos que realizam saltos entre canais, CHMA e McMAC. Ambos abordam a estratégia de saltos entre canais de forma diferente, e seu funcionamento será discutido em seguida.

2.2.3 O Protocolo CHMA

O protocolo CHMA [45] é um protocolo MAC de múltiplos canais que pode ser empregado em redes *ad-hoc* compostas por dispositivos com apenas um rádio trabalhando em modo *half-duplex*, ou seja onde a transmissão e a recepção não ocorrem ao mesmo tempo. Encontra-se facilmente esse tipo de equipamento e redes pré-existentes utilizando essa configuração, a exemplo do *hardware* encontrado nas redes IEEE 802.11.

Visão Geral do Protocolo

O protocolo CHMA é diferente dos protocolos da família IEEE 802.11 pois os nós saltam entre múltiplos canais enquanto que nas redes IEEE 802.11 os nós permanecem, estaticamente, no canal que foi pré-determinado para o funcionamento da rede. No protocolo CHMA, os nós saltam entre canais de forma conjunta. Dois nós deixam de saltar apenas quando ocorre um encontro entre eles.

A comunicação entre nós inicia-se empregando a função DCF conforme descrita na seção relativa ao protocolo IEEE 802.11 2.2.1. Porém, após iniciar-se um encontro, os demais nós prosseguem saltando para os próximos canais, enquanto que o par de nós participantes do encontro completam sua transmissão permanecendo no mesmo canal.

Detalhamento do Funcionamento do Protocolo

Assim como o protocolo IEEE 802.11, o CHMA divide o tempo em fatias discretas. Conforme pode ser verificado na Figura 2.9, a duração de cada fatia deve ser suficiente para enviar um quadro de controle RTS ou CTS [45]. Na primeira fatia de tempo, o nó que possui quadros na fila de transmissão envia um pacote RTS, seguindo a rotina DCF. Os nós da rede saltam para o próximo canal. Caso se encontre disponível, o nó ao qual o pacote RTS foi endereçado responde com um quadro CTS autorizando a transmissão. Caso contrário, não responde ao pacote RTS. Quando o encontro ocorre com sucesso, o par de nós deixa de saltar com os demais, e concluir a transmissão dados da mesma forma que ocorre no protocolo IEEE 802.11. Os demais nós prosseguem saltando aos próximos canais. Ao fim da transmissão, os nós que haviam realizado o encontro retomam a sequência de saltos no ponto em que se encontram os demais nós da rede.

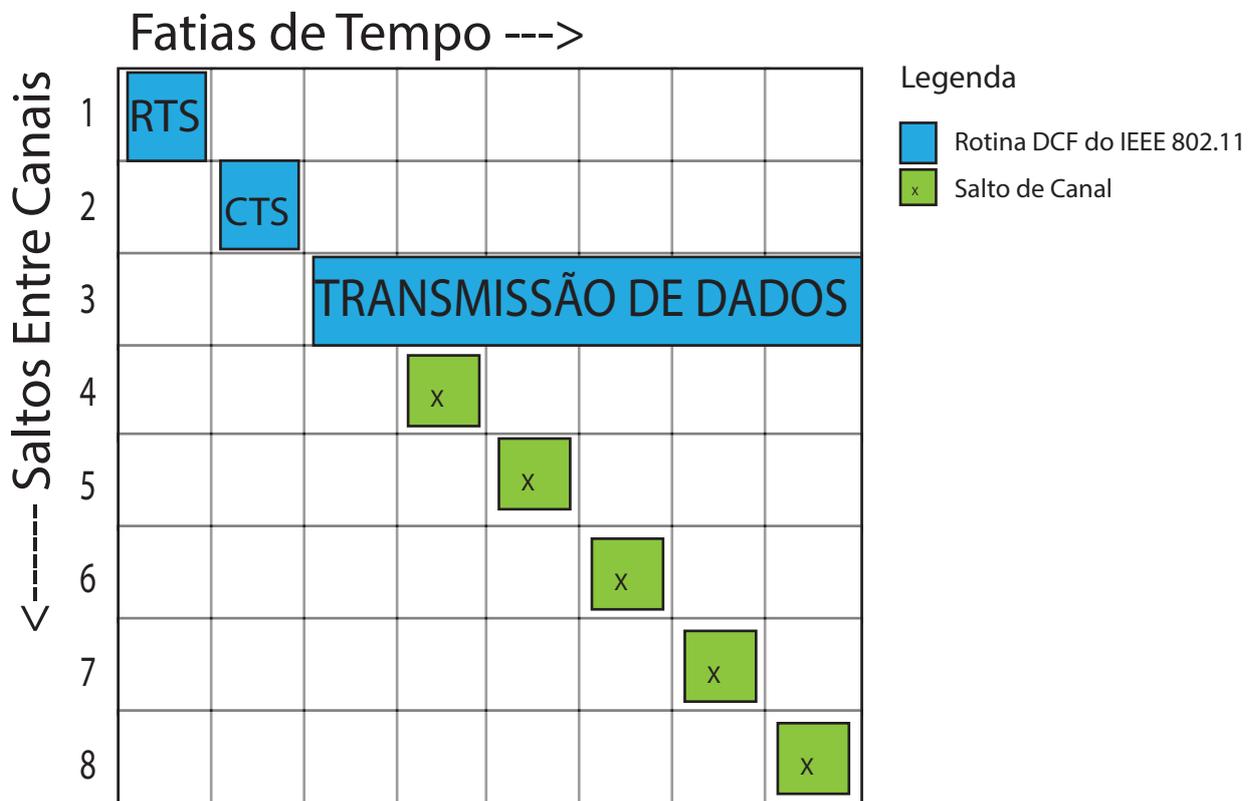


Figura 2.9: Ilustração do Funcionamento do Protocolo CHMA

Pontos Fortes

- Utiliza múltiplos canais dinamicamente.

Pontos Fracos

- Com a frequente alternância de canais, o tempo que o rádio requer para completar a mudança de frequências torna-se prejudicial ao desempenho do protocolo. Dispositivos que seguem o padrão IEEE 802.11 podem levar até 200 uS para alternar entre dois canais [19].

2.2.4 Protocolo McMAC

O protocolo McMAC busca solucionar o problema de congestionamento, interferência e degradação no canal de controle por meio de uma estratégia de encontros paralelos [39]. O principal diferencial do protocolo McMAC em relação ao protocolo CHMA encontra-se no fato de permitir que mais de um par de nós realize encontro simultaneamente.

Visão Geral do Protocolo

Os encontros paralelos são viabilizados pelo fato de cada nó possuir uma sequência própria de saltos, em contraste com o protocolo CHMA onde todos os nós saltam conjuntamente para o mesmo canal. Quando todos os nós saltam para o mesmo canal, apenas um par de nós pode efetuar encontro, ou ocorrerá uma colisão.

Detalhamento do Funcionamento do Protocolo

Cada nó participante da rede salta de canal em canal em ordem pseudo-aleatória. A sequência de canais para onde o nó irá saltar é pré-determinada e pode ser gerada por qualquer nó da rede conhecendo apenas o endereço MAC do nó de destino. Utilizando a abordagem funcional para geração da sequência de saltos evita-se que seja necessário um canal de controle, pois cada nó é capaz de determinar em qual canal sua contrapartida provavelmente se encontra durante determinada fatia de tempo partindo de seu endereço MAC.

Conforme a Figura 2.10 os nós de uma rede McMAC possuem sequências próprias de saltos entre canais. Ao buscar iniciar uma nova transmissão, o nó deve saltar para o canal do nó de destino e, então, caso o encontro ocorra com sucesso, poderá iniciar a transmissão empregando a rotina DCF do protocolo IEEE 802.11.

O gerador linear congruente de números pseudo-aleatórios [20] utilizado na implementação de referência é dado pela recursão $X(t) = 16807 \cdot X(t-1) \bmod M$. A escolha deste gerador de sequências pseudo-aleatória se deu em função de sua previsibilidade e por apresentar sequências de comprimento máximo M [32], onde $M = (2^{31} - 1)$ e $t = 1, 2, \dots, T$. O retorno $X(t)$ módulo N é o número da fatia de tempo de canal para onde o nó irá saltar no próximo slot. A operação modulo M é executada para obter-se um número de canal

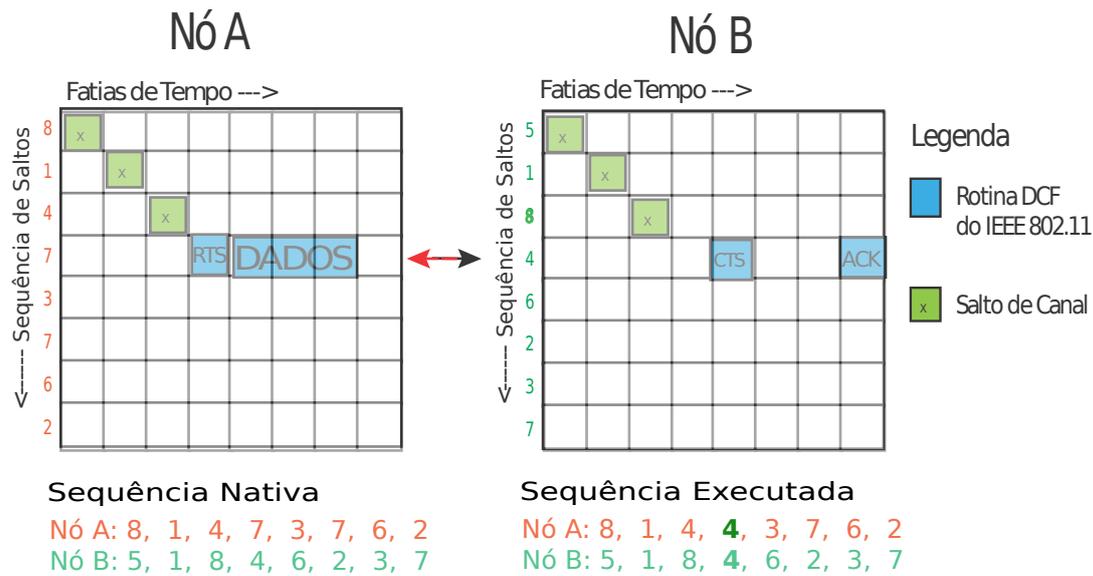


Figura 2.10: Funcionamento do Protocolo McMAC

na faixa 0 a $N-1$, onde N é a quantidade de canais do rádio. O valor $X(0)$ é o valor inicial da sequência (*seed*, na língua inglesa), e é derivado a partir do endereço MAC da interface de rede do nó.

Sequências Alternativas de Saltos

DaSilva *et al* apresenta outras estratégias para sequenciamento de saltos entre canais [42]:

- **Ordem aleatória de canais.** Canais são escolhidos com probabilidade de $\frac{1}{N}$, onde N é o número de canais.
- **Gerador de Sequência Ortogonal** Cada dispositivo possui um gerador de sequência conhecido pelos demais nós. Esta é a estratégia original adotada pelo protocolo McMAC.
- **Algoritmo Modular** O canal é acrescentado de um certo número não negativo e , ao atingir ou ultrapassar o número de canais, lhe é aplicado a operação módulo um número primo para reiniciar a sequência.
- **Algoritmo Modular de Relógio** O número do canal é acrescentado de um certo número não negativo e , ao atingir ou ultrapassar o número de canais, lhe é aplicado a operação módulo um número primo p qualquer, reiniciando então a sequência a partir de $n \bmod p$.

Protocolo	Realiza Saltos Entre Canais?	Permite Encontros Paralelos?
IEEE 802.11b	Não	Não
CHMA	Sim	Não
McMAC	Sim	Sim

Tabela 2.1: Resumo de Características dos Protocolos Comparados

- **Algoritmo Modular de Relógio Modificado** Em determinadas circunstâncias, o algoritmo modular impede que ocorra *rendezvous* [42]. O algoritmo modular é modificado para escolher números primos dentro de uma faixa limitada.

Assim como ocorre na estratégia de saltos entre canais adotado pelo protocolo McMAC, os demais algoritmos abordados por DaSilva não exigem comunicação de sincronização de sequências entre os nós. Dessa forma são denominados algoritmos de *rendezvous* às cegas [11].

Pontos Fortes

- Ortogonalidade da função de coordenação entre nós;
- Não requer um canal de controle;
- Permite encontros paralelos.

Ponto Fraco

- O protocolo exige que os relógios (*clock*) dos nós encontrem-se sincronizados, de modo que o ponto em que cada nó se encontra na sequência pseudo-aleatória de saltos seja conhecido pelos demais pares.

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos que fundamentam o estudo das redes sem fio e a implementação de protocolos de controle de acesso ao meio. Foram abordados os protocolos que compõem o presente estudo comparativo, onde foi visto que o protocolo IEEE 802.11 forma a base sobre a qual os protocolos CHMA e McMAC foram implementados. A Tabela 2.1 apresenta um resumo das principais características que diferenciam os protocolos.

A função DCF do protocolo IEEE 802.11, que implementa a estratégia de contenção para acesso ao canal, foi reutilizada nos protocolos CHMA e McMAC sem quaisquer alterações. Os protocolos poderão, portanto, passar por comparação sabendo-se que houve

alteração apenas no algoritmo empregado para realizar saltos entre canais e a forma como são negociados os encontros entre nós.

Capítulo 3

Modelo Analítico

No presente capítulo é apresentado o modelo analítico que permitirá aferir, de forma objetiva, o desempenho dos protocolos de controle de acesso ao meio. Para realizar a avaliação da vazão máxima teórica quando a rede utiliza apenas um canal, foi empregado o modelo matemático de Bianchi [4].

À medida da eficácia do protocolo na distribuição dos recursos da rede dá-se o nome de justiça. Foi adotado o modelo matemático descrito em [17] para avaliar a justiça dos protocolos, e a forma como o coeficiente de justiça é calculado é apresentada na seção 3.2.

3.1 Modelo de Bianchi

O modelo matemático desenvolvido por Giuseppe Bianchi [4] visa medir a vazão máxima teórica de uma rede que usa a família de protocolos IEEE 802.11 quando esta se encontra saturada. Bianchi pressupõe condições ideais para o canal onde não ocorre o problema de terminais escondidos e os nós sempre possuem dados para enviar. Assim obtém-se o que se denomina a vazão de saturação da rede.

A análise da vazão de saturação da rede pelo modelo de Bianchi é realizada em duas etapas. Primeiramente, é feita uma modelagem baseada em cadeias de Markov para um terminal isolado da rede, onde é obtida a probabilidade τ de que o nó efetue uma transmissão dentro de uma fatia aleatória de tempo. Na segunda etapa são levados em consideração todos os eventos que podem ocorrer dentro de uma fatia de tempo para, assim, expressar a vazão obtida em função de τ [4].

Primeiramente será apresentada a derivação algébrica da fórmula de Bianchi, extraída diretamente de [4], para então aplicá-la a parâmetros extraídos do protocolo IEEE 802.11, obtendo assim uma expressão que estabelece a vazão da rede em função do número de nós.

Seja P_{tr} a probabilidade de que pelo menos uma transmissão foi realizada na fatia de tempo sendo considerada. Se há n nós disputando o acesso ao canal temos a Equação 3.3. O cálculo de τ é dado pela Equação 3.1 onde W e m são constantes definidas pelo protocolo e, na implementação usada no presente estudo, encontram-se definidas na Tabela 3.1. Observa-se que o parâmetro p de 3.1 é determinado por meio de 3.2. Segue que 3.1 e 3.3 formam um sistema não linear que deve ser resolvido por meio de métodos numéricos [4].

$$\tau(p) = \frac{2}{1 + W + pW \sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i} \quad (3.1)$$

$$p = 1 - (1 - \tau)^{n-1} \quad (3.2)$$

$$P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n \quad (3.3)$$

A probabilidade P_s de que ocorra uma transmissão com sucesso é dada pela probabilidade de que somente um nó efetue transmissão, condicionada à probabilidade de que um nó qualquer faça uma transmissão. Essa probabilidade condicional ocorre pois, conforme visto na seção 2.1.4, caso ocorram duas transmissões simultâneas haverá uma colisão e a transmissão não terá sucesso. Expressamos, portanto, a probabilidade condicional P_s de acordo com a Equação 3.4 onde o valor de τ deve ter sido calculado previamente de acordo com a Equação 3.3 e 3.2 para um determinado número de nós.

$$P_s = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1 - \tau)^{n-1}}{1 - (1 - \tau)^n} \quad (3.4)$$

De forma geral, temos que a vazão S é dada pela Equação 3.9 onde E é o operador de valor esperado, ou média simples. Seja $E[P]$ o tamanho médio dos dados transmitidos, por quadro. Então a quantidade de dados transmitidos em uma fatia de tempo é dada por $P_{tr} \cdot P_s \cdot E[P]$, já que uma transmissão com sucesso ocorre com probabilidade $P_{tr} \cdot P_s$.

$$S = \frac{E[\text{tamanho dos dados transmitidos em uma fatia de tempo}]}{E[\text{tamanho de uma fatia de tempo}]} \quad (3.5)$$

Temos agora três probabilidades disjuntas para a duração possível de uma fatia de tempo:

- Probabilidade $P_{tr} \cdot P_s$ de haver uma transmissão bem sucedida;
- Probabilidade $1 - P_{tr}$ de haver zero transmissão de dados;
- Probabilidade $P_{tr}(1 - P_s)$ de ocorrer uma colisão.

Durante qualquer fatia de tempo, o protocolo pode estar apenas em um dos estados acima elencados: em uma transmissão bem sucedida, em um erro de colisão, ou em uma transmissão que não contém dados. Segue que a soma das probabilidades do protocolo encontrar-se em cada estado multiplicadas pelo tempo que cada estado consome, deve ser igual ao tamanho total da fatia de tempo. Substituindo a soma das três probabilidades disjuntas no denominador da Equação 3.9, multiplicando cada termo pelo tempo que o evento ao qual a probabilidade se refere consome, obtemos a Equação 3.10 onde T_s é o tempo médio em que o canal é sensoriado como estando ocupado devido a uma transmissão com sucesso e T_c é o período médio de uma colisão, e σ é a duração de uma fatia de tempo vazia.

$$S = \frac{P_s \cdot P_{tr} \cdot E[P]}{(1 - P_{tr})\sigma + P_{tr} \cdot P_s \cdot T_s + P_{tr} \cdot (1 - P_s)T_c} \quad (3.6)$$

De posse da expressão 3.10 podemos aplicar os valores para T_c e T_s derivados da função DCF do protocolo IEEE 802.11. Para determinar os valores T_c e T_s é preciso somar os intervalos de tempo que ocorrem em cada quadro transmitido com sucesso, e também nas colisões. Porém, conforme será visto em seguida, o parâmetro T_s será eliminado na derivação da Equação 3.10. Temos então a Equação 3.7, onde RTS, DIFS e δ são intervalos de tempo determinados pelo protocolo. No presente estudo foram empregados os valores elencados na Tabela 3.1, oriundos da implementação da função DCF no código fonte implementado no presente estudo comparativo.

$$T_c = RTS + DIFS + \delta \quad (3.7)$$

O passo seguinte no modelo de Bianchi é considerar os intervalos de tempo de uma transmissão bem sucedida e de uma colisão, para depois encontrar a vazão do sistema em função de τ . A derivação da equação 3.10, conforme [4], simplifica a expressão eliminando o parâmetro T_s devido a este ser uma constante e estabelece a vazão em função de τ e o número de nós por meio da Equação 3.8, onde o valor de T_c é dado pela expressão $SOMA_{TC} = RTS + DIFS + DELTA$, empregando valores elencados na Tabela 3.1.

$$(1 - \tau)^n - T_c \cdot \{n \cdot \tau - [1 - (1 - \tau)]\} = 0 \quad (3.8)$$

3.2 Justiça dos Protocolos (*Fairness*)

Para determinar a justiça com que os protocolos comparados distribuem os recursos de rede disponíveis, foi empregado o modelo matemático de [17]. Por este modelo, a justiça do protocolo é determinada pela seguinte expressão:

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
FRAME	8184	RTS	160 + PHY_HEADER
DIFS	128	W	32
MAC_HEADER	272	CTS	112 + PHY_HEADER
PHY_HEADER	128	DELTA (δ)	1
HEADERS	MAC_HEADER + PHY_HEADER	m	3
SLOT_TIME	20	T_c	$SOMA_{TC}$
SIFS	28	ACK	112 + PHY_HEADER

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados no modelo analítico de Bianchi

$$\frac{(\sum_{i=1}^n th_i)^2}{n \cdot (\sum_{i=1}^n th_i^2)} \quad (3.9)$$

Onde th_i representa a quantidade de dados transmitidos pelo nó i e n representa o número de nós da rede. Observa-se que, caso todos os nós efetuem a transmissão da mesma quantidade de dados, a expressão reduz-se a :

$$\frac{(\sum_{i=1}^n th_i)^2}{n \cdot (\sum_{i=1}^n th_i^2)} = \frac{(n \cdot th_i)^2}{n \cdot (nth_i^2)} = \frac{n^2 \cdot th_i^2}{n^2 \cdot th_i^2} = 1 \quad (3.10)$$

Segue que, se o protocolo é absolutamente justo, e distribui os recursos de rede de modo que todos os nós transmitem a mesma quantia de dados, o coeficiente de justiça é igual à unidade. No pior caso, onde nenhum nó foi capaz de realizar uma transmissão, vemos, trivialmente, que a justiça do protocolo não é definida.

$$\frac{(\sum_{i=1}^n th_i)^2}{n \cdot (\sum_{i=1}^n th_i^2)} = \frac{0}{n \cdot 0} \implies \perp \quad (3.11)$$

Outro caso possível, que serve para ilustrar o funcionamento do coeficiente de justiça, é quando ocorre o monopólio da rede por parte de um único par de nós comunicantes. Então, seja o nó i o único que realizou transmissões. Temos que a quantidade de dados que i transmitiu é igual ao de seu par na rede. Segue que a soma dos dados transmitidos será $2 \cdot th_i$.

$$\frac{(\sum_{j=1}^n th_j)^2}{n \cdot (\sum_{j=1}^n th_j^2)} = \frac{(2 \cdot th_i)^2}{2 \cdot n \cdot th_i^2} = \frac{4 \cdot th_i^2}{2 \cdot n \cdot th_i^2} = \frac{2}{n} \quad (3.12)$$

Para $n = 2$ temos que o protocolo onde há o monopólio das transmissões por um par de nós é justo, porém elevando o número de nós temos que $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{n} \rightarrow 0$

3.3 Considerações Finais

No presente capítulo foi visto o modelo de Bianchi, usado para estimar a vazão máxima teórica da rede quando é empregado apenas um canal que, conforme visto, nos permite estabelecer um valor máximo teórico para a comparação do desempenho dos protocolos em relação ao protocolo IEEE 802.11 quando há saturação da rede. Para avaliar a justiça com que os protocolos distribuem os recursos da rede entre os nós, foi empregado o modelo descrito em [17].

Capítulo 4

Simulação e Comparação dos Resultados

Na presente seção será apresentado o *framework* de redes MiXiM (*portmanteau* de *mixed simulator*), o ambiente de simulação Omnet++ e a descrição da implementação dos protocolos sob esse ambiente. Em seguida são apresentados os parâmetros que foram empregados na simulação dos protocolos e, por fim, os resultados obtidos por meio da simulação. A variação dos parâmetros da simulação teve o propósito de avaliar os protocolos sob cenários variados para que fosse possível obter uma visão geral do comportamento dos protocolos dados diferentes recursos de rede.

A avaliação de protocolos de rede pode ser realizada por meio de modelagem matemática ou por meio de simulação [48]. No presente estudo foi adotada a estratégia de simulação como ferramenta usada para investigar o comportamento dos protocolos MAC para redes sem fio. O sistema selecionado para implementação dos protocolos possui ampla aceitação e é empregado na pesquisa e desenvolvimento de protocolos nos meios industrial e acadêmico [7]. Os resultados obtidos permitem, portanto, obter-se um alto grau de confiança sobre o comportamento que o protocolo terá em uma aplicação real.

4.1 *Framework* de Simulação de Protocolos MiXiM

No desenvolvimento, e posterior simulação, dos protocolos IEEE 802.11, CHMA e McMAC foi empregado o *framework* MiXiM [22].

O sistema MiXiM é compilado dentro do ambiente de simulação OMNeT++ e traz, já embarcados na instalação original, componentes para a modelagem de redes sem fio, como obstáculos físicos virtuais, simulação de mobilidade dos nós, efeitos causados pela distância de transmissão (*fading*), entre outros elementos existentes em ambientes reais.

O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos, em cima do qual diversos sistemas de transmissão e processamento de mensagens podem ser implementados. O MiXiM agrega diversas funcionalidades do OMNeT++ de modo a oferecer um ambiente integrado para simulação e testes de redes de diversas naturezas (telefonia móvel, redes de área local, redes de sensores, e assim por diante).

4.1.1 Implementação dos Protocolos sob o MiXiM

A implementação dos protocolos comparados teve como ponto de partida a função de controle distribuída (DCF) da família de protocolos IEEE 802.11 [35], que foi discutida na seção 2.2.1. O código, implementado em linguagem C++, implementa a camada de controle de acesso ao meio (MAC), e reutiliza as demais camadas OSI fornecidas pelo *framework* MiXiM. A abordagem modular permite que seja alterada apenas a camada MAC, mantendo-se constantes as demais configurações do ambiente virtual. Esta estratégia faz uso da arquitetura em camadas discutida na seção 2.1.1.

O ambiente Omnet++ emprega mensagens assíncronas para gerar os diversos eventos que simulam uma rede de computadores. Cada mensagem possui uma estrutura de dados global e uma rotina que é chamada para tratar a ocorrência dessa mensagem. Os nós podem receber mensagens destinadas para outros nós, cujo tratamento deve ser dado de acordo com o protocolo específico.

O comportamento de troca de canais dos protocolos CHMA e McMAC foram implementados empregando-se a geração e o tratamento de mensagens assíncronas. Já o protocolo IEEE 802.11 não efetua troca de canais durante a simulação. A função DCF do protocolo IEEE 802.11, conforme discutida na seção 2.2.1, não passou por alterações nas implementações dos protocolos CHMA e McMAC. Dessa forma, os resultados obtidos na simulação refletem apenas as diferentes estratégias de saltos entre canais.

Implementação em Linguagem C++

O protocolo MAC é uma subclasse de BaseMacLayer, oriunda do framework MiXiM. Sendo uma classe C++, o protocolo inicia sua operação em um estado inicial configurado por meio do construtor e de parâmetros informados no arquivo omnetpp.ini. Após a instanciação da classe do protocolo realizada pelo ambiente de simulação, é chamada a rotina void initialize(int stage) passando-lhe em que estágio se encontra a inicialização do protocolo. Os protocolos IEEE 802.11b, McMAC e CHMA comparados no presente trabalho implementam os estágios 0 e 1, que ocorrem nessa ordem. No estágio 0, o protocolo lê as configurações fornecidas no arquivo omnetpp.ini e as traduz para estruturas de dados internas do MiXiM. Nessa etapa são inicializadas variáveis essenciais ao funcio-

namento do protocolo como a taxa de transmissão (*bitrate*), potência de transmissão do rádio, intervalos que devem ser aguardados entre frames (IFS ou *Inter-frame Spaces*). No estágio 1, o rádio é colocado no canal inicial determinado pelo protocolo e são agendadas as eventuais mensagens assíncronas que o protocolo necessita para seu funcionamento. Nos protocolos de múltiplos canais CHMA e McMAC, a mensagem para iniciar os saltos entre canais é agendada ao fim do estágio 1.

Com o retorno da rotina *initialize*, o protocolo passa apenas a responder eventos oriundos do ambiente Omnet++ por meio de rotinas *handle**. Entre os eventos que são tratados encontram-se o recebimento de uma mensagem das camadas superior e inferior, tratamento de *timeouts* que ocorrem quando pacotes podem se perder devido a colisões, o tratamento de tipos de quadros de dados específicos ao protocolo como RTS, CTS, ACK e DADOS. Neste estágio o protocolo passa a se comportar como uma máquina de estados que aguarda o recebimento de eventos assíncronos, modificando seu estado de acordo com cada evento respondido (por meio das rotinas *handle**), e efetuando transição para um novo estado.

4.2 Parâmetros Para Simulação

A simulação de protocolos de controle de acesso ao meio exige que algumas convenções sejam adotadas de modo a aproximar as condições àquelas do funcionamento do protocolo em situação real. É preciso estabelecer as condições nas quais os nós deverão comunicar-se, a quantidade de dados que deverão ser enviados a cada transmissão, entre outros parâmetros que serão detalhados a seguir.

Para efetuar as comparações, foram adotadas as seguintes premissas:

- Os nós comunicam-se apenas entre pares;
- A camada de aplicação sempre possui dados a enviar;
- A rede encontra-se saturada;
- A probabilidade de que ocorram colisões entre transmissões independe do número de retransmissões já ocorridas [4].

O fato da comunicação ocorrer apenas entre pares assegura que a rede possuirá 50% de nós transmissores e 50% de nós receptores. Nesta configuração, camada de aplicação, segundo o modelo OSI (visto na seção 2.1.1), sempre possuirá mensagens para enviar à camada MAC. Em outras palavras, a fila de transmissão do protocolo da camada MAC não se encontrará vazia ao longo da simulação. Como consequência das duas primeiras premissas, a rede encontrar-se-á saturada pois todos os nós transmissores possuem um nó

receptor correspondente e todos os transmissores sempre possuem quadros para transmitir. Por fim, os nós não armazenarão informação de estado entre uma transmissão e a próxima. Assim, o sucesso ou não de cada transmissão independe do resultado do ciclo de transmissão anterior [4].

Temos, assim, um cenário de saturação da rede que nos permite efetuar uma comparação entre os protocolos IEEE 802.11, CHMA e McMAC em situação próxima da ideal.

4.3 Simulação

O ambiente Omnet++ possui diversos parâmetros que podem ser ajustados e que possuem influência sobre o desempenho do protocolo. Entre as variáveis disponíveis durante a simulação, podemos elencar as seguintes: [19]

- Tamanho dos dados (*payload*) transmitidos;
- Tamanho da fatia de tempo alocada para os vários temporizadores do protocolo;
- A estratégia de saltos entre canais e como ser darão os encontros entre os nós da rede quando houver necessidade de transmitir;
- A existência ou não de um canal de controle do protocolo;
- O número de canais;
- O número de nós da rede simulada;
- Estratégias para o sensoriamentos do canal, visando detectar sua disponibilidade.

No presente estudo foram variados o tamanho dos dados, a estratégia de saltos entre canais, o número de canais e o número de nós da rede. A estratégia de sensoriamento do canal foi mantida constante, empregando a implementação utilizada no protocolo IEEE 802.11b. O tamanho da fatia de tempo alocada para os temporizadores do protocolo também foi mantido constante. Os intervalos SIFS e DIFS foram mantidos conforme a especificação do protocolo IEEE 802.11, conforme visto na seção 2.2.1.

Em resumo, os protocolos CHMA, McMAC e IEEE 802.11b foram comparados empregando a seguinte configuração:

- Variou-se o número de canais entre 1, 8, 32 e 64. Os canais são totalmente ortogonais (independentes);
- 2 mbits/s de vazão nominal máxima por canal;

- Simulação com duração de 15 segundos;
- 5 Repetições por configuração;
- Empregou-se um período de 4 milisegundos para saltos entre canais;
- Variando-se 1 a 128 pares de nós comunicantes;
- *Payloads*(quantidade de dados por *frame*) variando entre 64, 512 e 1500 *bytes*.

O tempo de 15 segundos de simulação, juntamente com o período de 4 ms entre saltos, permite que os protocolos CHMA e McMAC realizem 3750 saltos entre canais, quantidade que permite avaliar o impacto da estratégia de alternância de canais na vazão total da rede. A variação dos parâmetros *payload*, números de pares de nós e de canais, nos permitem simular o comportamento dos protocolos em diferentes contextos que ocorrem frequentemente em redes *ad-hoc*. O tamanho dos dados transmitidos (*payload*) foram assim selecionados pois a configuração de 64 bytes representa o menor quadro de dados passível de transmissão no protocolo IEEE 802.11b [31] e 1500 bytes representa o maior pacote de dados na especificação IEEE 802.11b [51].

Os resultados da simulação são arquivos de dados escalares produzidos pelo ambiente Omnet++. [46] Foi empregada a linguagem de programação R e a biblioteca omnetpp para processar os arquivos de dados escalares, bem como para gerar os gráficos com os resultados totalizados. [27]

4.4 Comparação

Nesta seção são apresentadas as configurações das variáveis de simulação, bem como são discutidos os resultados obtidos para cada combinação de parâmetros. São apresentados os gráficos de vazão total da rede (soma da vazão de cada nó que efetuou transmissões com sucesso) e da justiça do protocolo para cada configuração, conforme o modelo analítico discutido na seção 3.2.

4.4.1 Comparação de Vazão e Justiça para Um Canal

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação. A Figura 4.1 apresenta a vazão total da rede obtida na configuração com apenas um canal. Nota-se que os protocolos apresentam comportamento semelhante para cada tamanho específico de *payload*. Isto se dá devido ao fato dos protocolos de múltiplos canais (especificamente CHMA e McMAC) terem, como base, a mesma função do protocolo IEEE 802.11, porém executam seu algoritmo de saltos entre canais mesmo quando há apenas um canal disponível. Seu comportamento, então, reduz-se, aproximadamente, à função DCF oriunda do

protocolo IEEE 802.11, com ligeiras variações ocasionadas pelo custo do procedimento de escolha do canal. Observa-se que, como esperado, o modelo de Bianchi3.1 estabelece a vazão de saturação da rede, que é a estimativa mais otimista de vazão máxima teórica para os protocolos derivados da família IEEE 802.11. Os protocolos IEEE 802.11b, CHMA e McMAC aproximam-se do teto de Bianchi apenas com *payload* de 1500 bytes. Para pacotes de dados pequenos (64 bytes) os três protocolos elencados não atingem sequer 25 % da vazão do canal

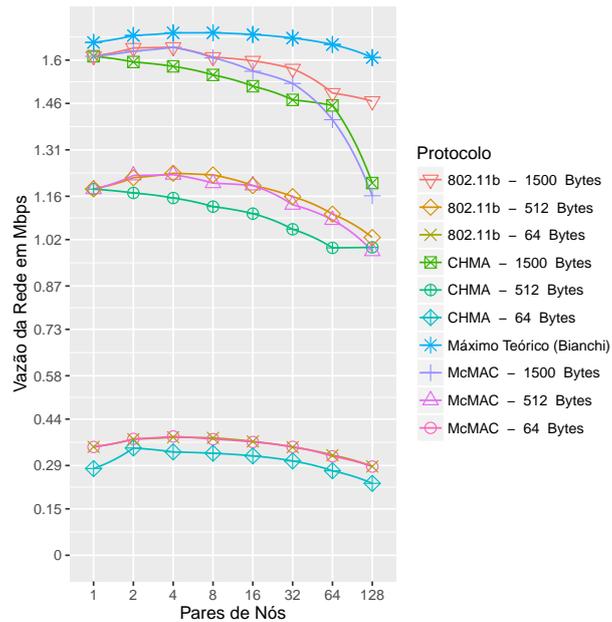


Figura 4.1: Comparação da Vazão dos Protocolos Utilizando Apenas Um Canal

Na Figura 4.2 observa-se que, apesar dos protocolos apresentarem vazão total de rede semelhante quando configurados com parâmetros iguais, a justiça com que os protocolos distribuem os recursos de rede varia entre as implementações. O protocolo 802.11b apresenta maior concentração de recursos em um número menor de nós da rede quando o número de participantes aumenta.

4.4.2 Comparação para Múltiplos Canais Ortogonais

O estudo comparativo entre protocolos de apenas um canal demonstra que, apesar de utilizarmos um canal físico de 2Mbps nominais, a vazão máxima teórica encontra-se abaixo desse teto. Da mesma maneira, ao tornarmos mais canais disponíveis aos protocolos, verifica-se que a vazão total da rede não apresenta crescimento linear em função da quantidade de canais disponíveis. A comparação com o protocolo IEEE 802.11 não é possível com múltiplos canais. Segue que, nos gráficos para número de canais maior que 1, esse protocolo e tampouco o valor de referência de máxima vazão teórica, obtido por meio do

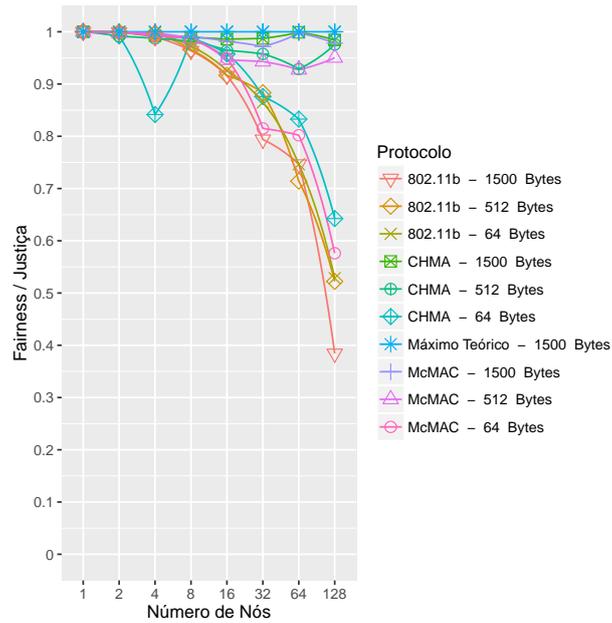


Figura 4.2: Comparação da Justiça de Protocolos de Um Canal

modelo de Bianchi, são apresentados. Nos casos para comparação com mais de um canal, os resultados foram obtidos por meio de simulação.

Comparação de Vazão para 2 Canais

Na comparação entre os protocolos CHMA e McMAC para 2 canais ortogonais, conforme Figura 4.3, nota-se que os protocolos apresentam valores de pico semelhantes, mas iniciam a degradação na vazão total de rede com números distintos de nós. Para *payloads* de 512 e 1500 bytes, o protocolo CHMA inicia a degradação com 4 pares de nós, enquanto o McMAC segue em tendência positiva até 16 e 32 pares de nós, respectivamente. Em ambos os protocolos a vazão total para pacotes de 64 bytes fica abaixo de 1mbps, dos 4mbps disponibilizados pelos 2 canais independentes.

A Figura 4.4 mostra que os protocolos CHMA e McMAC apresentam coeficiente superior a 0,90 na justiça da distribuição dos recursos de rede para quadros de 1500 bytes de dados. Conforme visto na seção 3.2, o coeficiente igual a 1 ocorre quando a vazão é idêntica entre os nós da rede. Para quadros de 1500 bytes, os protocolos McMAC e CHMA apresentam coeficiente próximo a 1, ou seja os recursos da rede são distribuídos de forma justa. Para pacotes de dados de 64 bytes, a justiça dos protocolos sofre degradação, mas permanece acima de 0,75. Em comparação, o protocolo IEEE 802.11b apresenta justiça abaixo de 0,40 conforme mostra a Figura 4.2

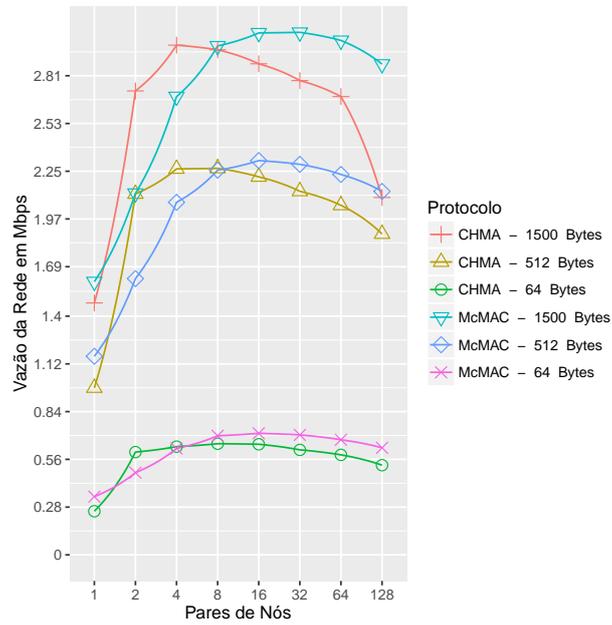


Figura 4.3: Comparação da Vazão Total de Rede Para 2 Canais

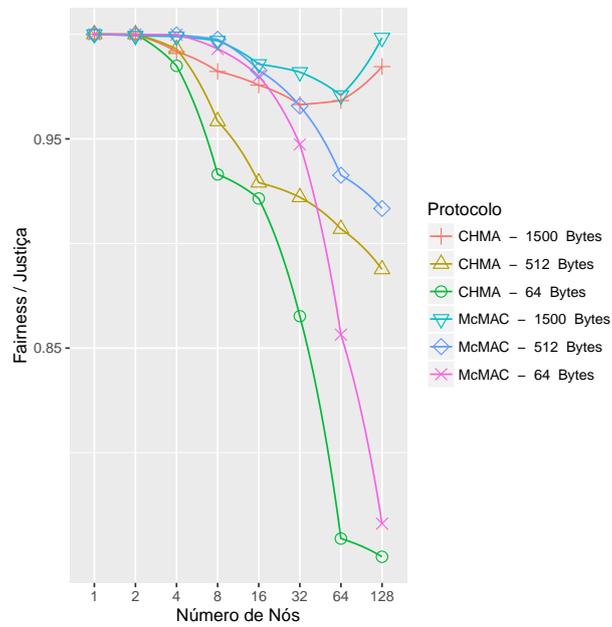


Figura 4.4: Comparação da Justiça de Protocolos de 2 Canais

Comparação de Vazão para 4 Canais

A partir de 4 canais ortogonais, conforme Figura 4.5, o protocolo McMAC passa a mostrar-se bastante superior ao CHMA. Na simulação com *payload* de 1500 bytes, o protocolo McMAC passa a sofrer degradação apenas com 64 pares de nós, enquanto que o CHMA já apresenta declive negativo na vazão total de rede a partir de 16 pares de nós. A vazão total de rede também mostra-se bastante superior no protocolo McMAC, mantendo-se acima de 5.95 Mbps para 64 pares de nós, enquanto que o CHMA apresenta vazão pouco superior a 4.17 mbit/s na mesma configuração. Para pacotes de 64 bytes ambos os protocolos apresentam comportamento semelhante, ficando abaixo de 1.78 Mbps. Nota-se, portanto, que o protocolo McMAC destaca-se positivamente com pacotes de dados maiores.

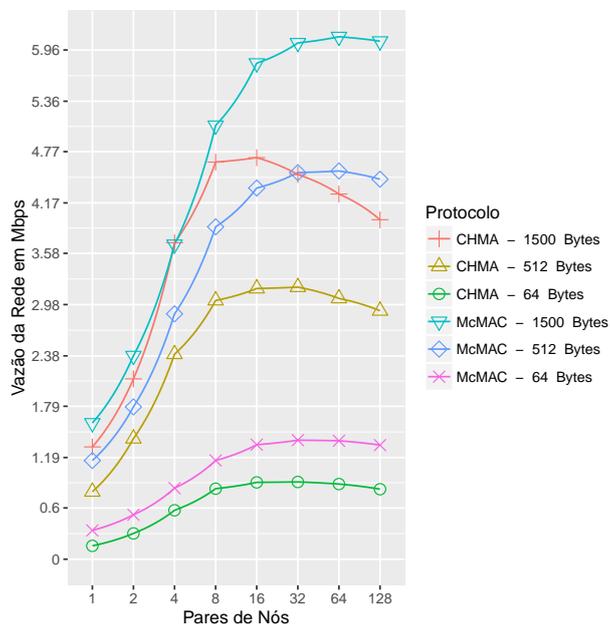


Figura 4.5: Comparação da Vazão Total de Rede Para 4 Canais

A Figura 4.6 mostra que, com a disponibilização de maior número de canais, o piso do coeficiente de justiça do protocolo apresenta aumento em relação ao pior resultado obtido com a configuração com 2 canais. O protocolo McMAC configurado com pacotes de 1500 bytes apresenta a melhor distribuição dos recursos da rede. O protocolo CHMA apresenta coeficiente e justiça acima de 0,91 para pacotes de dados de 1500 bytes, porém, analogamente ao resultado obtido com 2 canais (Figura 4.4), o protocolo apresenta a pior distribuição de recursos quando há 128 pares de nós transmitindo quadros de dados de 64 bytes.

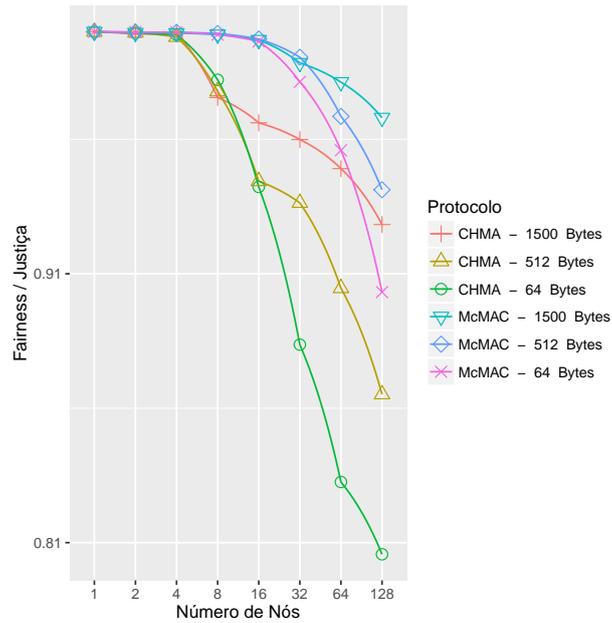


Figura 4.6: Comparação da Justiça de Protocolos de 4 Canais

Comparação de Vazão para 8 Canais

Na simulação com 8 canais ortogonais (Figura 4.7), o protocolo McMAC amplia a vantagem sobre o protocolo CHMA para pacotes com 512 e 1500 bytes de *payload*. Obtém-se um teto com vazão superior a 12.15 mbit/s para o protocolo McMAC com 1500 bytes e 128 pares de nós comunicantes, enquanto o protocolo CHMA obtém seu valor máximo, que é apenas 50 % da vazão máxima do McMAC, com apenas 32 pares de nós. Com o aumento dos recursos da rede, ou seja, com maior número de canais, a vantagem do protocolo de múltiplos *rendezvous* torna-se mais significativa. A justiça do protocolo McMAC também mostra-se superior. Enquanto que no protocolo CHMA a justiça passa a ter uma taxa de variação negativa significativa a partir do momento em que o número de nós torna-se maior ou igual ao número de canais, observa-se que o protocolo McMAC mantém-se acima dos 92% de justiça.

O piso do coeficiente de justiça de 0,83, conforme Figura 4.8, mostra-se novamente superior ao pior resultado obtido na comparação da justiça do protocolo para 4 canais (Figura 4.6). Em outras palavras, quando são disponibilizados mais canais, o pior caso na distribuição de recursos passa por uma melhoria. No entanto, a partir de 8 canais, verifica-se que o protocolo McMAC distribui os recursos de rede de forma superior ao protocolo CHMA em todos os casos. O pior caso do protocolo McMAC, quando o tamanho dos dados é de 64 bytes, é superior ao melhor caso do protocolo CHMA quando os quadros portam 1500 bytes.

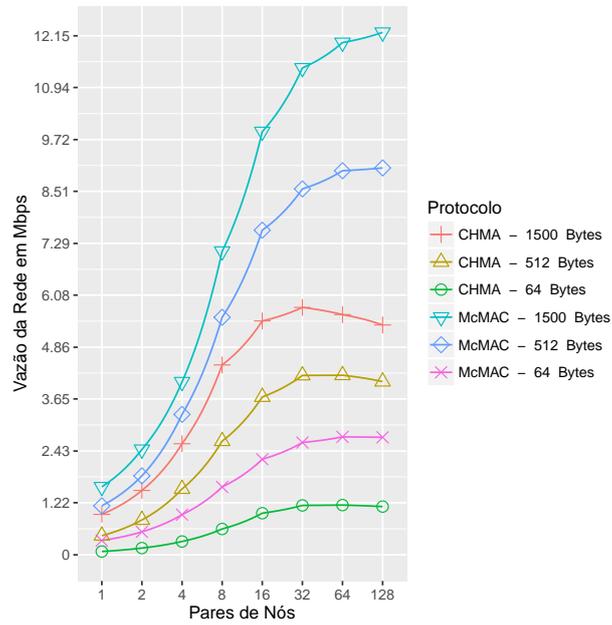


Figura 4.7: Comparação da Vazão Total de Rede Para 8 Canais

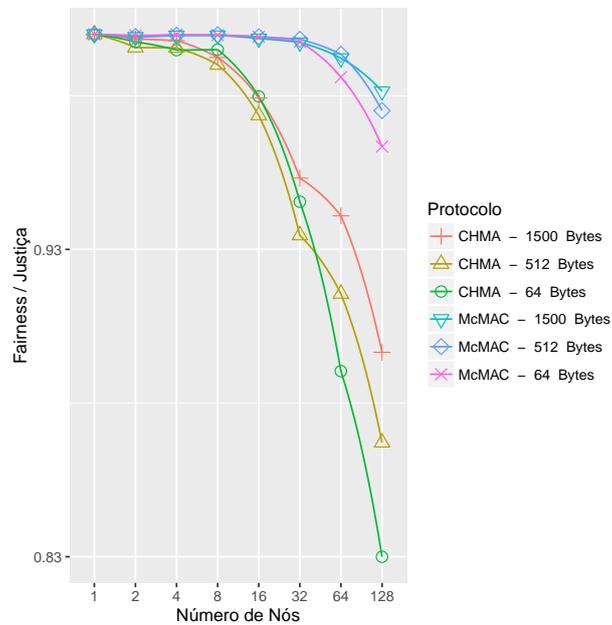


Figura 4.8: Comparação da Justiça de Protocolos de 8 Canais

Comparação de Vazão para N Canais ≥ 16

A partir de 16 canais ortogonais (Figura 4.9), o protocolo CHMA passa a não ser capaz de fazer melhor uso dos canais adicionais, somando apenas cerca de 1 mbit/s à vazão total de rede quando o número de canais passa de 8 para 16. Sendo cada canal nominalmente de 2 mbit/s, observa-se que o protocolo CHMA agrega só 1 mbit/s à vazão total da rede quando a soma dos canais da rede passa de 16 mbit/s para 32 mbit/s nominais. A mesma taxa de crescimento linear é observada quando dobramos o número de canais de 16 para 32 (Figuras 4.9 e 4.11), e 32 para 64 (Figuras 4.11 e 4.13). Em contraste, o protocolo McMAC segue em tendência estritamente crescente, aumentando a vazão proporcionalmente ao número de canais disponíveis. Dessa forma verifica-se que o protocolo que permite múltiplos *rendezvous* paralelos é escalável de acordo com os recursos de rede oferecidos. Observa-se que, ao aumentar o número de canais, a justiça do protocolo McMAC mantém-se constante acima dos 98%, enquanto que a distribuição de recursos de rede realizada pelo protocolo CHMA não se sustenta acima dos 90% quando o número de nós supera o número de canais disponíveis.

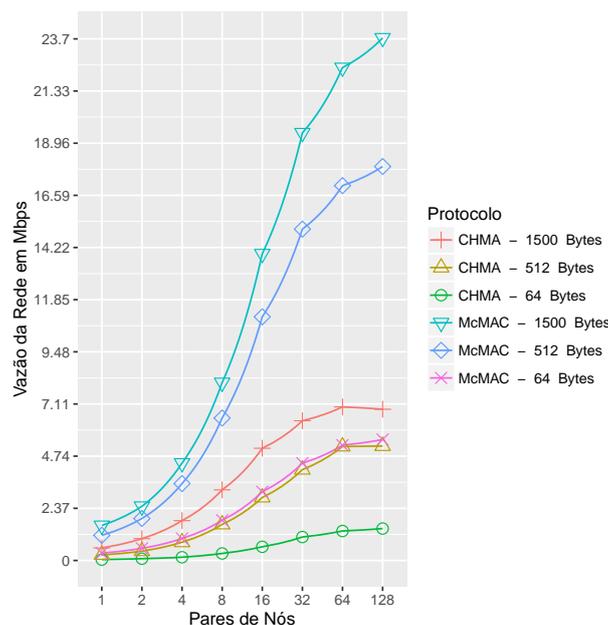


Figura 4.9: Comparação da Vazão Total de Rede Para 16 Canais

As Figuras 4.10, 4.12 e 4.14 refletem os resultados obtidos na comparação da vazão total da rede quando utilizados 16, 32 e 64 canais, respectivamente. Observa-se, mais uma vez, que o protocolo McMAC efetua melhor distribuição dos recursos, mantendo-se com coeficiente de justiça acima de 0,93 para todos os casos, enquanto que o protocolo CHMA apresenta degradação acentuada na justiça da distribuição de recursos conforme o número de usuários aumenta. O reflexo da melhor distribuição de recursos na vazão total

da rede é notável para o protocolo McMAC. Nota-se que a vazão de rede tende a crescer linearmente com a disponibilização de mais canais para o protocolo McMAC, o que não ocorre com o protocolo CHMA.

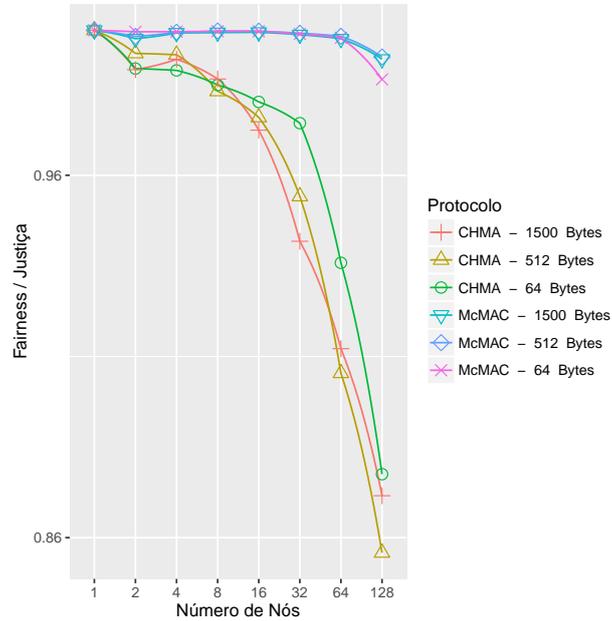


Figura 4.10: Comparação da Justiça de Protocolos de 16 Canais

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos na simulação dos protocolos IEEE 802.11, CHMA e McMAC. O protocolo IEEE 802.11, por utilizar estaticamente um canal por vez, foi comparado apenas na configuração de canal único. Na comparação dos protocolos que fazem saltos entre múltiplos canais, verificou-se que o protocolo McMAC, que permite encontros paralelos, propiciou aumento significativo na vazão total da rede em comparação ao protocolo CHMA, que efetua apenas encontros simples. Em especial nos resultados apresentados nas Figuras 4.11 e 4.13, onde foram disponibilizados 32 e 64 canais, respectivamente, vimos que o protocolo McMAC segue apresentando significativo aumento na vazão total da rede com 64 e 128 pares de nós. Dessa forma, os resultados obtidos no presente estudo indicam que existe motivação para realizar trabalhos futuros na investigação de protocolos MAC que permitem encontros paralelos.

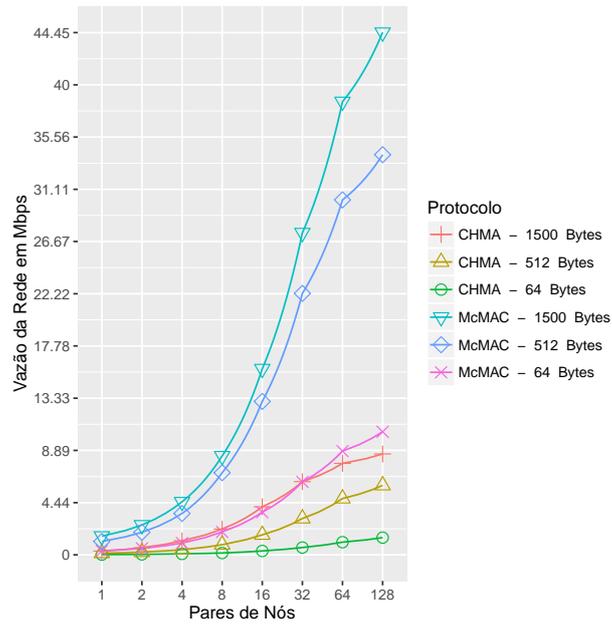


Figura 4.11: Comparação da Vazão Total de Rede Para 32 Canais

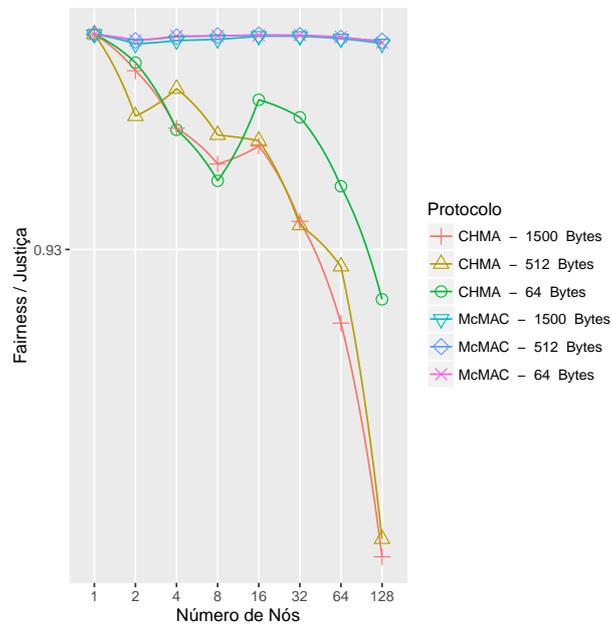


Figura 4.12: Comparação da Justiça de Protocolos de 32 Canais

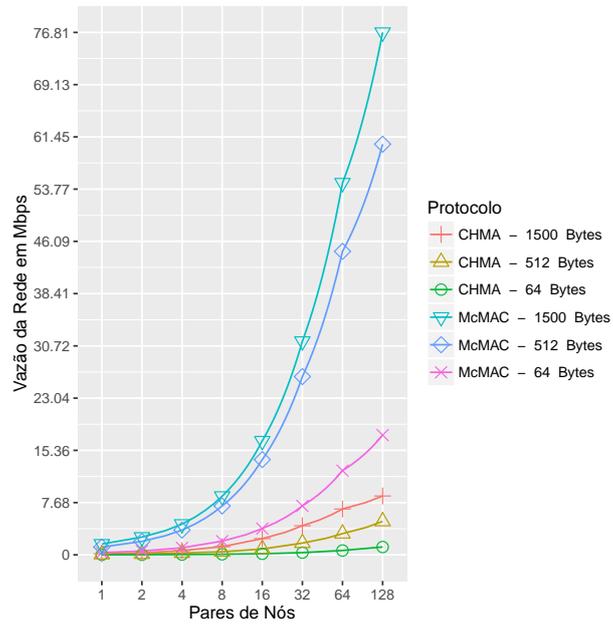


Figura 4.13: Comparação da Vazão Total de Rede Para 64 Canais

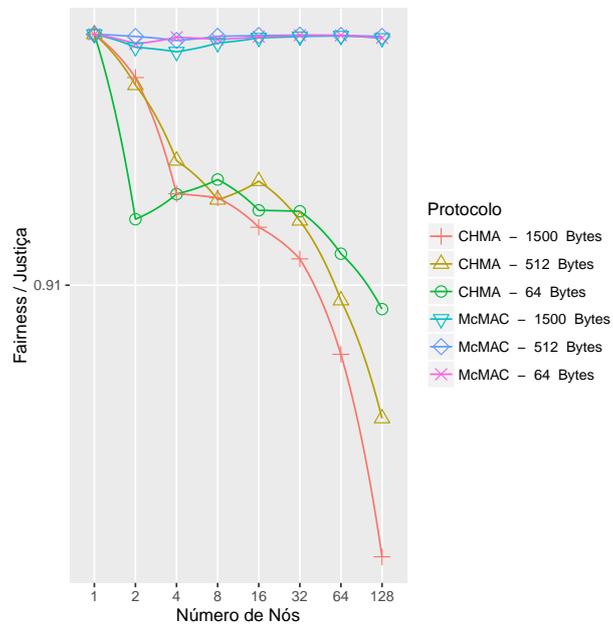


Figura 4.14: Comparação da Justiça de Protocolos de 64 Canais

Capítulo 5

Conclusão

No presente trabalho foi realizada a implementação e comparação de três protocolos que representam paradigmas importantes na maneira como recursos de rede são distribuídos. Foram, então, apresentados os termos e conceitos técnicos relevantes, bem como explicitados a natureza do problema, os objetivos e a metodologia empregada.

Para chegar-se à escolha dos três protocolos implementados e simulados no presente trabalho, foi realizado um levantamento do estado da arte, a partir do qual selecionaram-se protocolos que utilizam apenas um canal, múltiplos canais um de cada vez e, por fim, protocolos de múltiplos canais e encontros paralelos. Os resultados obtidos a partir da simulação demonstram que as redes que permitem encontros paralelos podem propiciar um significativo aumento na vazão total do sistema (Figuras 4.9, 4.11 e 4.13).

Foi investigado como o número de nós e o tamanho dos dados transmitidos influi na vazão total da rede para cada protocolo simulado e verificou-se que quando são transmitidos quadros de dados maiores a vazão total da rede aumenta. Isso se deve ao fato de haver um custo para efetuar o acesso ao meio e, ao transmitir mais dados por vez, o protocolo torna-se mais eficiente.

Determinou-se que o emprego de múltiplos canais ortogonais permite incrementar a vazão total da rede utilizando os mesmos recursos disponíveis aos protocolos que utilizam, estaticamente, um único canal. E, ao permitir que vários pares de nós efetuem transmissões simultaneamente em canais ortogonais, a vazão de rede aumentou consideravelmente.

O protocolo de encontros simples CHMA, implementado e simulado no presente estudo, chega a apresentar vazão total de rede até 10 vezes menor que o protocolo McMAC, dados os mesmos recursos de rede e configurações idênticas de simulação. Dessa forma, atingiu-se o objetivo deste trabalho, e ficou demonstrado que existe motivação para a pesquisa e desenvolvimento de protocolos de encontros múltiplos para redes sem fio *ad-hoc*, pois são capazes de fazer melhor aproveitamento do espectro eletromagnético disponível.

5.1 Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros com protocolos de encontros paralelos podem incluir a implementação do protocolo McMAC em rádios programáveis por meio de software (SDR, ou *Software Defined Radio*, na língua inglesa), visando testar o protocolo em ambiente real. A produção de protótipos de rádios miniaturizados, tendo o protocolo embarcado em *firmware*, também viabilizaria a realização de testes que podem ser levados a campo, potencialmente com grande número de participantes e que podem ser dotados de grande mobilidade. Cenários desse tipo permitiriam avaliar o protocolo em condições diferentes daqueles previstas na simulação executada no presente estudo, utilizando equipamentos que podem ter sido, originalmente, desenvolvidos para protocolos da família IEEE 802.11.

Referências

- [1] Norman Abramson. Multiple access in wireless digital networks. *Proceedings of the IEEE*, 82(9):1360–1370, Sep 1994. 9
- [2] R. Aquino-Santos. *Wireless Technologies in Vehicular Ad Hoc Networks: Present and Future Challenges: Present and Future Challenges*. Premier Reference Source. Information Science Reference, 2012. 11
- [3] I.A.D.V.S. Bagad. *Data Communication*. Technical Publications, 2008. 7
- [4] Giuseppe Bianchi. Performance analysis of the iee 802.11 distributed coordination function. volume 18, pages 535–547. IEEE, 2000. 27, 28, 29, 34, 35
- [5] U.D. Black. *OSI: A Model for Computer Communications Standards*. Prentice-Hall, 1991. 10
- [6] F. Boavida. *Networking 2006: Networking Technologies, Services, and Protocols, Performance of Computer and Communication Networks, Mobile and Wireless Communications Systems : 5th International IFIP-TC6 Networking Conference, Coimbra, Portugal, May 15-19, 2006 : Proceedings*. Computer Communication Networks and Telecommunications. Springer Berlin Heidelberg, 2006. 12
- [7] T. Chamberlain. *Learning OMNeT++*. Community experience distilled. Packt Publishing, 2013. 32
- [8] J.I. Choi, P. Levis, S. Katti, F.A. Tobagi, and Stanford University. Department of Electrical Engineering. *Achieving Collision Avoidance and Fairness in CSMA-based Wireless Mesh Networks*. Stanford University, 2011. 9
- [9] Cisco. Cisco visual networking index. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>. Accessed: 2016-07-23. x, 3, 4
- [10] D.D. Coleman and D.A. Westcott. *CWNA Certified Wireless Network Administrator Official Deluxe Study Guide: Exam CWNA-106*. Wiley, 2015. 4, 20
- [11] B.A. Fette. *Cognitive Radio Technology*. Elsevier Science, 2009. 25
- [12] F.H.P. Fitzek and M.D. Katz. *Cognitive Wireless Networks: Concepts, Methodologies and Visions Inspiring the Age of Enlightenment of Wireless Communications*. Springer Netherlands, 2007. 3

- [13] R.L. Freeman. *Telecommunication System Engineering*. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing. Wiley, 2015. 9
- [14] M. Gast. *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide*. O’Reilly Media, 2005. 16
- [15] J. Geier. *Designing and Deploying 802.11n Wireless Networks*. Networking Technology. Pearson Education, 2010. 16
- [16] IEEE 802.11 Working Group. Higher-speed physical layer extension in the 2.4 ghz band. 2007. vi, vii
- [17] Lucas de M. Guimaraes and Jacir L Bordim. Directional Pulse/Tone Based Channel Reservation with Deafness Avoidance. *CLEI Electronic Journal*, 16:1 – 1, 12 2013. 27, 29, 31
- [18] A. Holt and C.Y. Huang. *802.11 Wireless Networks: Security and Analysis*. Computer Communications and Networks. Springer London, 2010. 20
- [19] M. Jeonghoon, H.S.W. So, and J. Walrand. Comparison of multichannel mac protocols. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(1):50–65, 2008. 23, 35
- [20] D.E. Knuth. *Art of Computer Programming, Volume 2: Seminumerical Algorithms, The*. Pearson Education, 2014. 23
- [21] A. Koepke. A simulator for wireless and mobile networks using the omnet++ simulation engine. <http://sourceforge.net/projects/mixim/>, 2016. Acessado 2016-07-11. vi, vii
- [22] A. Köpke, M. Swigulski, K. Wessel, D. Willkomm, P. T. Klein Haneveld, T. E. V. Parker, O. W. Visser, H. S. Lichte, and S. Valentin. Simulating wireless and mobile networks in omnet++ the mixim vision. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, Simutools ’08*, pages 71:1–71:8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2008. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). 32
- [23] S. Kumar, V.S. Raghavan, and J. Deng. Medium access control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Netw.*, 4(3):326–358, May 2006. x, 10
- [24] A. Kurniawan. *Raspberry Pi Wireless Networks*. PE Press, 2015. 20
- [25] J.F. Kurose and K.W. Ross. *Computer Networking*. Pearson Education, 2012. x, 3, 7, 8, 12, 15, 17
- [26] W. Lemstra, V. Hayes, and J. Groenewegen. *The Innovation Journey of Wi-Fi: The Road to Global Success*. Cambridge University Press, 2010. 15
- [27] OpenSim Ltd. R omnetpp functions for processing omnet++ result files. <https://github.com/omnetpp/omnetpp-resultfiles/blob/master/R-package>, 2014. Acessado 2016-07-11. 36

- [28] T. Maufer. *A Field Guide to Wireless LANs for Administrators and Power Users*. Prentice Hall series in computer networking and distributed systems. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003. 16
- [29] J.L. Mauri and J. Rodrigues. *Green Communication and Networking: Second International Conference, GreeNets 2012, Gaudia, Spain, October 25-26, 2012, Revised Selected Papers*. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 20
- [30] G. Miao, J. Zander, K.W. Sung, and S.B. Slimane. *Fundamentals of Mobile Data Networks*. Cambridge University Press, 2016. 9
- [31] N. Mukherjee, S. Neogy, and S. Roy. *Building Wireless Sensor Networks: Theoretical and Practical Perspectives*. CRC Press, 2015. 36
- [32] S. K. Park and K. W. Miller. Random number generators: Good ones are hard to find. *Commun. ACM*, 31(10):1192–1201, October 1988. 23
- [33] R. Poisel. *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*. Artech House intelligence and information operations series. Artech House, Incorporated, 2011. 18
- [34] Rima Qureshi. Annual mobility report. <https://www.ericsson.com/mobility-report>. Accessed: 2016-07-23. 3
- [35] F.F. Ramos, V. Larios, and H. Unger. *Advanced Distributed Systems: 5th International School and Symposium, ISSADS 2005, Guadalajara, Mexico, January 24-28, 2005, Revised Selected Papers*. Lecture Notes in Computer Science / Programming and Software Engineering. Springer, 2005. 33
- [36] J. Ranta. *Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems 1988: Selected Papers from the Third IFAC/IFIP/IEA/IFORS Conference, Oulu, Finland, 14-16 June 1988*. IFAC Symposia Series. Elsevier Science, 2014. x, 8
- [37] P. Roshan and J. Leary. *802.11 Wireless LAN Fundamentals*. Cisco Press fundamentals series. Cisco Press, 2004. 15
- [38] J. Sarangapani. *Wireless Ad hoc and Sensor Networks: Protocols, Performance, and Control*. Automation and Control Engineering. Taylor & Francis, 2007. x, 13
- [39] H.S. So. Mcmac: A parallel rendezvous multi-channel MAC protocol. pages 334–339, 2007. vi, vii, 21, 23
- [40] F. Swarts, P. van Rooyen, I. Oppermann, and M.P. Lötter. *CDMA Techniques for Third Generation Mobile Systems*. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer US, 2012. 9
- [41] A.S. Tanenbaum and D. Wetherall. *Computer Networks*. Pearson Prentice Hall, 2011. 7, 16

- [42] N.C. Theis, R.W. Thomas, and L.A. DaSilva. Rendezvous for cognitive radios. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 10(2):216–227, Feb 2011. 24, 25
- [43] H.F. Tipton. *Information Security Management Handbook, Fourth Edition*. Number v. 3. Taylor & Francis, 2001. 9
- [44] A. Tzamaloukas and J. J. Garcia-Luna-Aceves. Channel-hopping multiple access. In *Communications, 2000. ICC 2000. 2000 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 415–419 vol.1, 2000. vi, vii
- [45] A. Tzamaloukas and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Channel-hopping multiple access. In *PROC. IEEE ICC 2000*, pages 415–419, 2000. 21, 22
- [46] A. Varga. Omnet++ simulation manual. <http://www.omnetpp.org/>, 2016. Accessed 2016-07-11. 36
- [47] B.H. Walke, S. Mangold, and L. Berlemann. *IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-Hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence*. Wiley, 2007. 15, 18, 19
- [48] K. Wehrle, M. Günes, and J. Gross. *Modeling and Tools for Network Simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 32
- [49] H. Wu and Y. Pan. *Medium Access Control in Wireless Networks*. Wireless networks and mobile computing. Nova Science Publishers, 2008. 21
- [50] A.M. Wyglinski, M. Nekovee, and T. Hou. *Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice*. Elsevier Science, 2009. 9
- [51] S.H. Yang. *Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications*. Signals and Communication Technology. Springer London, 2013. 36