



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Características do Usuário Primário e seu Impacto nos Mecanismos de Acesso Dinâmico ao Espectro

Felipe de Moraes Modesto

Brasília
2014



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Características do Usuário Primário e seu Impacto nos Mecanismos de Acesso Dinâmico ao Espectro

Felipe de Moraes Modesto

Dissertação apresentada como requisito parcial
para conclusão do Mestrado em Informática

Orientador

Prof. Dr. André Costa Drummond

Coorientador

Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília

2014

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

Coordenador: Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. André Costa Drummond (Orientador) — CIC/UnB
Prof. Dr. Marcelo Menezes de Carvalho — ENE/UnB
Prof.^a Dr.^a Juliana Freitag Borin — IC/UNICAMP

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Modesto, Felipe de Moraes.

Características do Usuário Primário e seu Impacto nos Mecanismos de Acesso Dinâmico ao Espectro / Felipe de Moraes Modesto. Brasília : UnB, 2014.

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

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

1. Acesso Dinâmico ao Espectro, 2. Adaptabilidade, 3. Parametrização, 4. Protocolo de Acesso ao Meio, 5. Reuso de Espectro

CDU 004.7

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

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus pais, irmão e esposa. Vocês são a minha força.

Agradecimentos

Dedicatórias imortalizam contribuições individuais, tanto subjetivas quanto objetivas ao trabalho de uma pessoa. Desta forma, para que não haja injustiça, agradeço em ordem alfabética as seguintes pessoas por suas contribuições diretas: Adriana Vieira de Moraes, André Costa Drummond, Eliane Machado de Melo, Eline Alves de Moraes, Giovanna Florence Dias Gomes, Igor Rafael de Sousa, Jacir Luiz Bordim, Lucas Augusto de Almeida, Luiz Cláudio Modesto Pereira, Marcos Fagundes Caetano, Thiago Henrique de Moraes Modesto, Thiago Fernandes Neves, Ulisses Rodrigues Afonseca. Agradeço também as seguintes pessoas por suas contribuições indiretas ao meu trabalho: Anderson Campos Cardoso, André Segovia, Carla Castanho, Daniel Saad, Fernando Mendonça, Carolina Alvim, Felipe Santos, Herman Ferreira, João Felipe Rodrigues Veloso, João Lucas de Moraes Dutra, João Paulo Costa Resende, Juarez Paulino, Julio Kiyuna Higa, Lineu Neto, Lucas Lima da Rocha Pitta, Luigi Reffatti, Vinícius Santana Rossignoli, Matheus Lima da Rocha Pitta, Marcelo Leite, Pedro Kaled da Cás, Thiago Coelho Vieira.

Resumo

Acesso oportunístico é um novo modelo de alocação de espectro cujo objetivo é reaproveitar porções subutilizadas do espectro licenciado. Em redes de acesso dinâmico, os detentores de licença, conhecidos como usuários primários, permitem que usuários não licenciados, chamados usuários secundários, explorem o espectro ocioso. Um dos problemas enfrentados durante reuso de espectro é a dificuldade que usuários secundários têm de obter retorno eficiente das oportunidades de acesso disponíveis. A exploração das oportunidades de acesso depende da capacidade de usuários secundários analisarem o ambiente em que se encontram e adaptarem sua comunicação a esse meio. Este trabalho considera a modelagem do espectro de forma realista como mecanismo para uma avaliação de um protocolo de acesso secundário. O acesso secundário ao espectro foi avaliado com base em uma modelagem feita em função de um conjunto de parâmetros: dimensão do espectro acessível \mathcal{K} , número de canais alocados por comunicação λ , taxa de disponibilidade do espectro P , tempo de transmissão de usuários primários T_t^{UP} , tempo de transmissão de usuários secundários T_t^{US} e tempo de sensoriamento T_s do espectro. A interferência destes parâmetros no acesso secundário foi avaliada analiticamente e através de simulações. Os resultados obtidos demonstram que a boa caracterização dos parâmetros de acesso tanto de usuários primários quanto secundários permite uma melhor utilização dos recursos existentes. Foi verificado a disponibilidade do espectro e o tamanho dos pacotes de dados primários influenciam significativamente o acesso secundário de forma que o acesso secundário efetivo varia de 1% à 98% em função destes parâmetros. Os resultados obtidos demonstram que a avaliação do meio na definição de protocolos de controle de acesso é fundamental.

Palavras-chave: Acesso Dinâmico ao Espectro, Adaptabilidade, Parametrização, Protocolo de Acesso ao Meio, Reuso de Espectro

Abstract

Dynamic spectrum access is a new approach to spectrum allocation developed to explore underutilized portions of the licensed spectrum. In dynamic spectrum access networks, licensed users (also known as primary users) allow unlicensed users (also known as secondary users) to access spectrum opportunistically. One of the main challenges faced by secondary users is the ever changing nature of the licensed spectrum, which reduces opportunity exploitation. The effectiveness of spectrum reuse is directly related to the ability secondary users have of adapting to their environment. This work considers the realistic modeling of primary and secondary users spectrum access as an evaluation model for dynamic spectrum access protocols. Secondary access was evaluated based on spectrum modeling based on the following parameters: size of the accessible spectrum \mathcal{K} , number of channels allocated per communication λ , spectrum availability rate P , primary and secondary data packet sizes T_t^{UP} and T_t^{US} and spectrum sensing time T_s . The interference of these parameters in secondary spectrum access was evaluated by computer simulations. The results obtained show that the availability rate P and primary data packet sizes T_t^{UP} affect secondary access significantly and that secondary users adaptation allows for efficient spectrum resource exploitation. The percentage of successful communications vary from 1% when spectrum conditions are not adequate to 98% when conditions are optimal. These results demonstrate the need for more thorough spectrum evaluation in medium access control protocols.

Keywords: Adaptability, Dynamic Spectrum Access, Medium Spectrum Access Protocol Parametrization, Spectrum Reuse

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Contribuições	2
1.3	Publicações	3
1.4	Organização do Documento	4
2	Acesso Dinâmico	5
2.1	Alocação do Espectro	5
2.2	Acesso Dinâmico ao Espectro	8
2.2.1	Sensoriamento do Espectro	10
2.2.2	Política de Interferência	12
2.2.3	Gerência e Compartilhamento do Espectro	12
2.2.4	Estrutura de Redes Secundárias	14
2.3	Usuários Primários	15
2.3.1	Modelos de Tráfego	16
2.3.2	Desafios	17
3	Estado da Arte	19
3.1	Mecanismos de Sensoriamento	19
3.2	Mecanismos de Controle de Acesso	20
3.3	Adaptabilidade	23
3.4	Discussão	23
4	Modelo de Espectro	26
4.1	Modelo de Acesso	26
4.2	Exemplo do Processo de Comunicação	28
4.3	Métricas para Avaliação do Uso do Espectro	29
4.4	Análise das Métricas	31
5	Modelo de Exploração	35
5.1	Protocolo de Comunicação	35
5.2	Simulador de Comunicações	38
5.2.1	Gerador de Traços	39
5.2.2	Simulador de Comunicações	40
5.3	Avaliação da Caracterização do Espectro	40
5.3.1	Influência do Número de Canais de Dados (\mathcal{K})	40
5.3.2	Influência do Número de Canais por Transmissão (λ)	41

5.3.3	Influência da Disponibilidade Média do Espectro (P)	42
5.3.4	Influência do Tamanho Médio dos Pacotes Primários (T_t^{UP})	43
5.3.5	Influência do Tamanho Médio dos Pacotes Secundários (T_t^{US})	46
5.4	Técnicas para Exploração do Espectro	47
5.4.1	Estimação da Disponibilidade do Espectro	47
5.4.2	Controle de Sensoriamento	48
5.4.3	Controle do Tamanho do Pacote	49
5.5	Avaliação das Técnicas para Exploração do Espectro	49
5.5.1	Controle de Sensoriamento	50
5.5.2	Controle do Tamanho do Pacote	51
5.6	Discussão	53
6	Conclusões	54
	Referências	56
A	Simulador	63
A.1	Arquitetura do Simulador	63
A.2	Validação dos Traços	64
A.3	Interface Gráfica	64

Lista de Figuras

2.1	Alocação do espectro nos Estados Unidos [1].	6
2.2	Alocação do espectro no Brasil [2].	7
2.3	Ocupação do Espectro em Berkeley [3].	8
2.4	Ocupação do Espectro em Chicago e Nova York [4].	9
2.5	Exemplo do funcionamento de acesso dinâmico ao espectro.	11
2.6	Carga de uma torre para celulares ao longo de três semanas [5].	15
2.7	Exemplos de estruturas de autocorrelação de processos com dependências de curta e longa duração.	16
4.1	Exemplo de processo de comunicação com 1 canal de dados.	28
4.2	Exemplo de processo de comunicação com 2 canais de dados.	28
4.3	Possíveis resultados do sensoriamento e exploração do espectro.	29
4.4	Avaliação da variações do tempo de comunicação segundo a Equação (4.4).	31
4.5	Avaliação da variações da vazão segundo a Equação (4.5).	32
4.6	Variação da Equação (4.6) para $T_s = 2$	33
4.7	Valores de λ calculados com base na Equação (4.8).	34
5.1	Ciclo de Comunicação.	37
5.2	Exemplo de processo de comunicação com 4 canais de dados.	37
5.3	Arquitetura Geral do Simulador.	38
5.4	Análise da influência da dimensão do espectro no percentual de sucessos para $P = 50\%$ e $T_t^{US} = 20$	41
5.5	Análise da influência do número de canais alocados por comunicação no percentual de sucessos para $T_t^{US} = 80$	42
5.6	Análise da variação de P e T_t^{UP} para $T_t^{US} = 40$	43
5.7	Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{US} = 20$	44
5.8	Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{US} = 80$	44
5.9	Variação do percentual de indisponibilidade do espectro para $T_t^{US} = 40$	45
5.10	Variação do percentual de falhas de transmissão para $T_t^{US} = 40$	45
5.11	Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{UP} = 80$	46
5.12	Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{UP} = 160$	47
5.13	Análise da influência do algoritmo de controle de sensoriamento.	51
5.14	Análise da influência do algoritmo de controle do tamanho dos pacotes no percentual de sucessos para $P = 50\%$	52
5.15	Análise da influência do algoritmo de controle do tamanho dos pacotes no percentual de falhas de transmissão para $P = 50\%$	52
A.1	Diagrama de classes do simulador.	63

A.2	Gráficos de análise de um traço gerado onde $H = 0,8$	64
A.3	Interface do simulador.	65

Lista de Tabelas

3.1	Classificação dos protocolos de controle de acesso ao meio	24
4.1	Parâmetros para modelagem do espectro	27
5.1	Parâmetros de simulação.	38

Lista de Acrônimos

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	Estação Rádio Base (do Inglês <i>Base Station</i>)
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CR	Rádio Cognitivo (do Inglês <i>Cognitive Radio</i>)
CTS	<i>Clear-To-Send</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DSA	Acesso Dinâmico ao Espectro (do Inglês <i>Dynamic Spectrum Access</i>)
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier (do Inglês <i>Fast Fourier Transform</i>)
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ILP	Programação Inteira Linear (do Inglês <i>Integer Linear Programming</i>)
LRD	Dependência de Longa Duração (do Inglês <i>Long Range Dependency</i>)
MAC	Controle de Acesso ao Meio (do Inglês <i>Medium Access Control</i>)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OSA	<i>Opportunistic Spectrum Access</i>
PTE	Problema do Terminal Escondido
PTEMC	Problema do Terminal Escondido para Múltiplos Canais
PTE_x	Problema do Terminal Exposto
RTS	<i>Request-To-Send</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SRD	Dependência de Curta Duração (do Inglês <i>Short Range Dependency</i>)
SSA	Alocação Estática do Espectro (do Inglês <i>Static Spectrum Allocation</i>)
UP	Usuário Primário
US	Usuário Secundário
UWB	<i>Ultra Wideband</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Network</i>

Capítulo 1

Introdução

O crescimento na quantidade e densidade de tecnologias sem fio motiva o aumento na demanda por espectro eletromagnético e, cada vez mais, percebe-se um esgotamento das frequências disponíveis para uso. Este esgotamento é consequência da política de alocação em vigência, e é causa da escassez de espectro (do Inglês *Spectrum Scarcity*) [6]. Entretanto, diversos estudos demonstram que a escassez percebida é artificial e que, de fato, as taxas de uso do espectro são bastante baixas, mesmo em regiões urbanas [3, 7, 8]. Por exemplo, o estudo realizado em [3] verificou que a taxa de uso das frequências entre 3GHz e 5GHz é inferior a 5%. Similarmente, o trabalho apresentado em [7] descreve que, enquanto as frequências destinadas à televisão e telefonia celular mantiveram-se ocupadas, outras faixas ficaram ociosas durante praticamente todo o período analisado. Em especial, percebe-se uma superlotação de frequências não licenciadas, como as bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) quando comparadas com altas taxas de disponibilidade percebida em frequências proprietárias [9].

Acesso Dinâmico ao Espectro (do Inglês *Dynamic Spectrum Access*) surge como uma alternativa que torna possível o desenvolvimento de novas tecnologias na forma do reuso de espectro. A implementação de Acesso Dinâmico tem como objetivo permitir um aumento na eficiência do espectro [10]. Em redes de Acesso Dinâmico, há duas classes de usuários: (i) usuário primário (UP), ou detentor de licença, e (ii) o usuário secundário (US), também chamado de oportunista. Enquanto um UP tem garantia de acesso e uso das frequências licenciadas, um US somente pode explorar oportunidades, isto é, momentos em que as faixas licenciadas estejam ociosas. Usuários Primários possuem garantia de acesso ao espectro, no entanto, acessam o espectro de forma irregular e, em diversos momentos, o espectro licenciado apresenta alta taxa de disponibilidade [11]. Outro obstáculo se refere ao fato de geralmente não haver coordenação entre os usuários primários e secundários. USs têm direito de explorar porções de espectro não utilizadas por UPs. Quando acesso é concedido aos USs, estes devem adotar mecanismos que garantam que não haja interferência em comunicações primárias, protegendo os detentores de licença [10]. Por exemplo, considera-se o uso de controle de potência necessário para que transmissões secundárias não interfiram em comunicações primárias [12].

Garantir que comunicações secundárias não interfiram no acesso primário é fundamental, pois não é possível prever o acesso primário. Conseqüentemente, é de grande interesse o estudo de mecanismos que resultem em melhorias no reuso de espectro. Vários trabalhos propõem técnicas com este objetivo e, em muitos casos, características do espectro são

avaliadas [13, 14, 15]. Apesar de não possibilitar a previsão de uso, a análise do comportamento do espectro permite que USs tomem decisões e tornem seu acesso ao espectro mais objetivo e eficiente. Dentre as características estudadas, a taxa de disponibilidade do espectro é uma das mais consideradas. Em um conjunto de trabalhos [14, 16] os autores consideram a taxa de disponibilidade como parâmetro em seus modelos de comunicação. Similarmente, em Takyu et al. [17] e Wang et al. [18] os autores propõem modelos de sensoriamento considerando a disponibilidade do espectro. Os autores de [19, 20, 21] sugerem técnicas para a seleção ótima de canais. Estes trabalhos são exemplo do conjunto de estudos relacionados ao acesso dinâmico. Entretanto, na literatura existente, são feitas considerações limitadas no que se refere a avaliação do acesso primário, e não havendo, salvo melhor juízo, trabalhos que estudem a influência de parâmetros de comunicação, como o tamanho médio de pacotes de dados e intervalo de comunicação, dentre outros, no uso do espectro por USs.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é *estudar as características de usuários primários e seus impactos em comunicações secundárias*. Para isto, os seguintes objetivos específicos são definidos para este projeto:

- Definição de um modelo de comunicação;
- Parametrização do Acesso ao Espectro;
- Avaliação da influência dos parâmetros de interesse;
- Definição de estratégias para otimizar o acesso secundário;
- Proposição de técnicas para melhorar o acesso ao espectro;
- Simulação e análise do modelo proposto.

1.2 Contribuições

Dentre as principais contribuições do trabalho, destacam-se:

- Caracterização realista dos modelos de tráfego para redes de acesso dinâmico em função dos seguintes parâmetros:
 - Número de canais acessíveis (\mathcal{K});
 - Disponibilidade Média do Espectro (P);
 - Tamanho médio dos pacotes enviados por usuários primários (T_t^{UP});
 - Tamanho médio dos pacotes enviados por usuários secundários (T_t^{US});
 - Tempo de sensoriamento de um canal (T_s);
 - Número de Canais alocados por Comunicação (λ).
- Definição de um modelo de rede e controle de acesso ao espectro;

- Avaliação e identificação da interferência de parâmetros de comunicação definidos no uso do espectro;
- Definição de três estratégias para melhoria da qualidade do acesso secundário:
 - Estimção da disponibilidade média do espectro por média móvel ou banda passante equivalente;
 - Controle de parada do processo de sensoriamento, baseado no proposto por Jia et al. [14];
 - Ajuste dos pacotes de dados secundários (T_t^{US}) em função da ocorrência de falhas de transmissão.
- Desenvolvimento de Gerador de Tráfego em *Java* que produz traços em função dos parâmetros listados;
- Desenvolvimento de Simulador de protocolos em *Java* que utiliza traços gerados;;

1.3 Publicações

Os seguintes artigos foram elaborados durante o mestrado e serviram como base para a elaboração do conteúdo apresentado nesta dissertação:

- **CANDAR'13:** *Improving Channel Usage in Networks Employing Dynamic Spectrum Access.*
 - Conferência: *The First International Symposium on Computing and Networking — Across Practical Development and Theoretical Research*;
 - Situação: Publicado em dezembro de 2013 [22].
- **CLEI'12:** *A Dynamic Spectrum Access MAC Protocol Based on Spectrum Analysis and Spectrum Sharing.*
 - Conferência: *XXXVIII Conferencia Latinoamericana en Informática*;
 - Situação: Publicado em outubro de 2012 [23].
- **IPDPSW'12:** *An Opportunistic MAC Protocol Based on Statistical Spectrum Analysis.*
 - Conferência: *26th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium Workshops*;
 - Situação: Publicado em maio de 2012 [24].

1.4 Organização do Documento

A apresentação do estudo desenvolvido por este trabalho é dividida em etapas. Primeiramente, apresenta-se no Capítulo 2 os conceitos relacionados ao acesso dinâmico. O Capítulo 3 apresenta uma revisão do estado da arte sobre o tema abordado no capítulo anterior e finaliza com uma discussão sobre os trabalhos apresentados. Com base no estado da arte, o Capítulo 4 apresenta uma abordagem para a parametrização do espectro, avaliada em função de um conjunto de métricas. O modelo de acesso proposto no Capítulo 4 é utilizado para a apresentação da proposta de um protocolo de controle de acesso, feita no Capítulo 5. O protocolo proposto é avaliado em função dos parâmetros definidos e das técnicas propostas com o objetivo de verificar sua eficiência e adaptabilidade. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, os próximos passos desta linha de pesquisa, bem como possíveis evoluções e extensões.

Capítulo 2

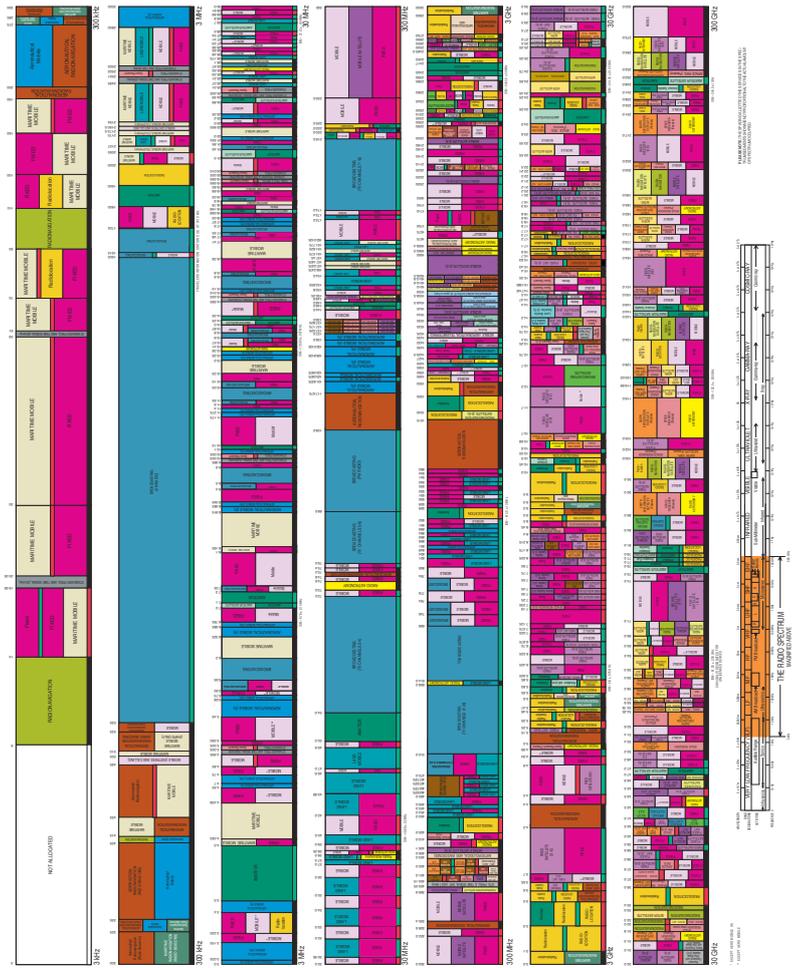
Acesso Dinâmico

Neste capítulo são apresentados os conceitos relacionados ao acesso oportunístico. Serão discutidos a proposta de acesso dinâmico como alternativa ao modelo atual de alocação de espectro, quais os modelos de implementação de acesso dinâmico e como o acesso primário pode ser caracterizado.

2.1 Alocação do Espectro

O uso do espectro eletromagnético para comunicação é um fenômeno global iniciado há mais de cem anos com a invenção do primeiro aparelho de rádio [9]. Com o passar dos anos, novas tecnologias foram desenvolvidas e tiveram porções do espectro alocadas para seu funcionamento. Em um certo instante fez-se necessária a implementação de um modelo de gerência do espectro, e a política de alocação do espectro proposta tinha como objetivo proteger os usuários detentores de licença de interferência.

O modelo atual de divisão do espectro de rádio é conhecido como modelo Estático de Alocação de Espectro (do Inglês *Static Spectrum Allocation* - SSA) [25]. Nele, de forma geral, o espectro é agrupado e dividido em conjuntos de frequências, cada um destinado a uma aplicação específica. Este modelo protege os detentores de licença de interferência por dispositivos não licenciados, garantindo direito de exploração exclusivo do espectro licenciado. Com o aumento na quantidade e densidade de dispositivos sem fio, a política de alocação do espectro causou um efeito colateral chamado *escassez de espectro* (do Inglês *Spectrum Scarcity*) [6]. Nas Figuras 2.1 e 2.2 são apresentadas tabelas de alocação do espectro nos Estados Unidos e no Brasil. Apesar de algumas diferenças na alocação dos fragmentos de espectro, em ambos os países há poucas faixas disponíveis para alocação, caracterizando a escassez do espectro percebida.



UNITED STATES FREQUENCY ALLOCATIONS THE RADIO SPECTRUM

RADIO SERVICES COLOR LEGEND	
	AERONAUTICAL MOBILE
	INTER-SATELLITE
	AERONAUTICAL MOBILE SATELLITE
	RADIO ASTRONOMY
	LAND MOBILE
	RADIO DETERMINATION SATELLITE
	RADIOLOCATION
	AERONAUTICAL RADIO NAVIGATION
	LAND MOBILE SATELLITE
	RADIOLOCATION SATELLITE
	AMATEUR
	MARITIME MOBILE
	RADIOLOCATION SATELLITE
	AMATEUR SATELLITE
	MARITIME MOBILE SATELLITE
	RADIO NAVIGATION
	BROADCASTING
	MARITIME RADIO NAVIGATION
	BROADCASTING SATELLITE
	SPACE OPERATION
	BROADCASTING SATELLITE
	METEOLOGICAL AIDS
	SPACE RESEARCH
	BIRTH EXPLORATION SATELLITE
	METEOLOGICAL SATELLITE
	FIXED
	MOBILE
	STANDARD FREQUENCY AND TIME SIGNAL
	FIXED SATELLITE
	MOBILE SATELLITE
	STANDARD FREQUENCY AND TIME SIGNAL SATELLITE
	GOVERNMENT EXCLUSIVE
	NON-GOVERNMENT EXCLUSIVE
	GOVERNMENT-GOVERNMENT SHARED

Figura 2.1: Alocação do espectro nos Estados Unidos [1].

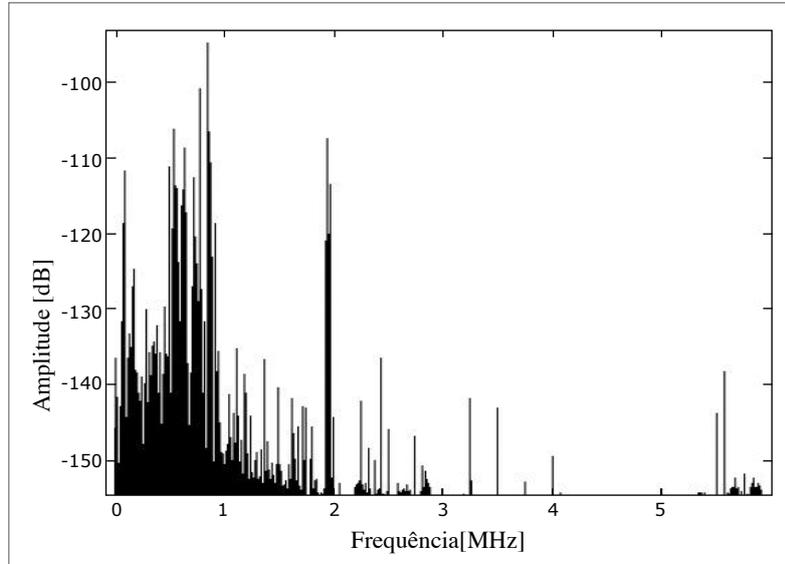


Figura 2.3: Ocupação do Espectro em Berkeley [3].

Entretanto, diversos estudos demonstram que a escassez promovida pelo atual modelo de alocação é artificial e que, de fato, as taxas de uso do espectro são bastante baixas, mesmo em regiões urbanas [3, 8, 4]. Por exemplo, as Figuras 2.3 e 2.4 são apresentados os resultados de dois estudos feitos nos Estados Unidos sobre a ocupação do espectro. Em ambos os cenários, percebe-se uma ocupação relativamente baixa de muitas frequências avaliadas. Em [9], os autores descrevem que enquanto a maior parte do espectro estudado é subutilizado, percebe-se uma superlotação de frequências não licenciadas, como as bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM). Estas frequências não são licenciadas e são acessíveis a inúmeras tecnologias como *Wi-Fi* e *Bluetooth*. O contraste entre o uso de bandas licenciadas e não licenciadas demonstra o desequilíbrio no uso do espectro.

Diversas soluções foram propostas para remediar a situação, incluindo a exclusão de licenças de espectro subutilizadas ou até o fim do licenciamento de espectro [10]. Entretanto, estas soluções são financeiramente inviáveis e, em geral, não são populares na literatura. Uma proposta que busca solucionar o problema de alocação de espectro com mínima interferência na política de licenciamento é conhecida como a política de Acesso Dinâmico ao Espectro (do Inglês *Dynamic Spectrum Access* - DSA).

2.2 Acesso Dinâmico ao Espectro

Acesso dinâmico ao espectro é uma política de acesso baseada na exploração de oportunidades de acesso. Oportunidades de acesso são definidas como instantes em que faixas de espectro eletromagnético licenciado encontram-se ociosas. O objetivo da política de acesso dinâmico é flexibilizar os parâmetros de funcionamento de redes existentes para incorporação de novos dispositivos [26]. A política de acesso dinâmico implementada depende de parâmetros do ambiente, como restrições geográficas das oportunidades de acesso e a regularidade da ocorrência de tais oportunidades, dentre outras características.

Com o objetivo de definir uma nomenclatura comum e listar as propostas existentes, uma série de revisões do estado da arte tem sido apresentadas [12, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

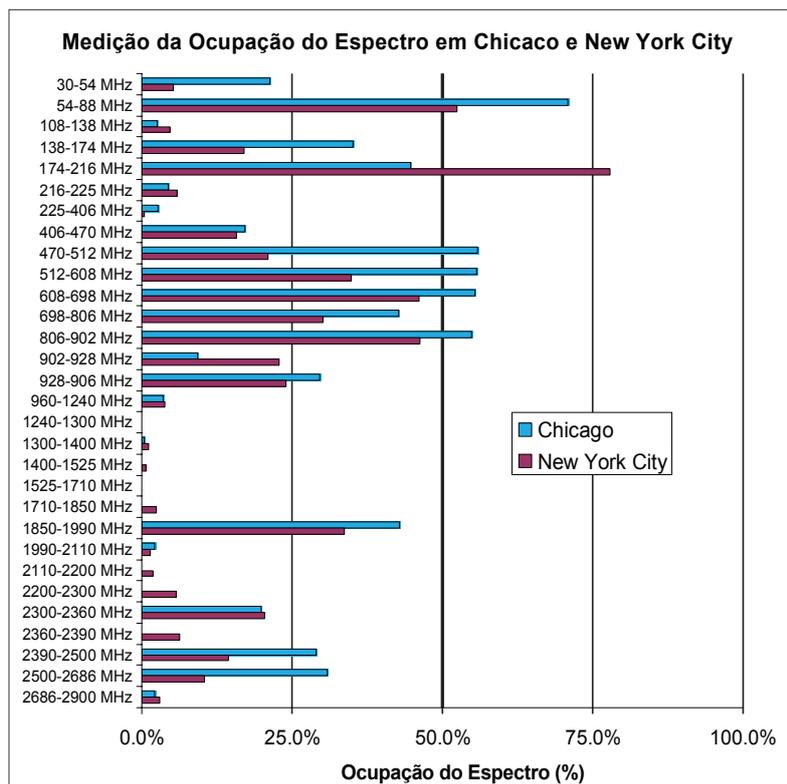


Figura 2.4: Ocupação do Espectro em Chicago e Nova York [4].

O modelo de rede de acesso dinâmico considerado pela maior parte da literatura é o modelo de acesso hierárquico, também conhecido como acesso oportunístico ao espectro (do Inglês *Opportunistic Spectrum Access* - OSA) [6]. Neste modelo, os usuários que acessam o espectro são divididos de acordo com seus direitos. Usuários primários possuem acesso pleno ao espectro e devem ser protegidos de interferência, enquanto os usuários secundários são obrigados a aceitar e lidar com interferência de usuários primários, somente acessando o espectro ocioso e mantendo sua interferência abaixo de um limiar pré-definido. Este modelo tem como objetivo possibilitar a implementação de reuso do espectro sem necessidade de modificar redes já existentes. O acesso dinâmico hierárquico é interessante, pois dispositivos já existentes, conhecidos como dispositivos legados, não necessitam de modificações para que redes secundárias sejam implementadas. Adicionalmente, com a implantação de redes secundárias, há uma redução na necessidade de alocação de novas faixas de espectro. As características fundamentais de uma rede secundária são [10]:

- **Sensoriamento do espectro:** uma rede deve ser capaz de determinar quais faixas de espectro estão disponíveis para que não haja interferência em comunicações primárias;
- **Gerenciamento do espectro:** dentre as faixas de espectro consideradas disponíveis, um dispositivo deve possuir um mecanismo para selecionar a faixa mais apropriada para sua transmissão de dados;

- **Mobilidade espectral:** um usuário secundário deve ser capaz de regular sua transmissão e migrar entre diferentes faixas de espectro para garantir a continuidade de suas comunicações;
- **Compartilhamento do espectro:** usuários secundários devem compartilhar o espectro de maneira justa para garantir acesso múltiplo ao espectro.

O acesso dinâmico hierárquico pode ser implementado de duas maneiras diferentes: (i) *Underlay* de espectro ou (ii) *Overlay* de espectro, também conhecido como *Interference Avoidance* [6, 10, 33]. No *underlay* de espectro, os usuários secundários regulam o sinal de sua comunicação de forma que mantenham a interferência nos usuários primários dentro de um patamar estabelecido. Para isto, usuários secundários devem operar abaixo do patamar de interferência, espalhando seu sinal utilizando, por exemplo, Bandas Ultralargas (do Inglês *Ultra Wide Frequency-Bands* - UWB) [9]. UWBs são conjuntos de frequência relativamente numerosos utilizados simultaneamente por um dispositivo para compensar a baixa amplitude de sinal usado durante a transmissão de dados.

Na política de *overlay* de espectro, usuários secundários jamais utilizam um conjunto de frequências ocupadas por um usuário primário, salvo quando o uso de antenas direcionais permite que a comunicação secundária não interfira na comunicação primária. Este é o cenário de maior interesse científico e, portanto, ao longo deste texto, sempre que houver alguma referência ao modelo de acesso dinâmico, trata-se do modelo de acesso dinâmico hierárquico implementado por *overlay* de espectro. Note que é possível que ambos *overlay* e *underlay* sejam usados em conjunção, com *underlay* sendo utilizado, por exemplo, para auxiliar a mitigação de interferência.

2.2.1 Sensoriamento do Espectro

O padrão IEEE 802.11 é uma das normas de comunicação sem-fio mais conhecidos e utilizados [34]. Nele, o controle de acesso ao espectro é feito por um protocolo chamado CSMA/CA. O objetivo do CSMA/CA é implementar o controle de acesso ao meio com anulação/prevenção de colisão. No CSMA/CA, dispositivos “escutam” o espectro antes de iniciarem suas comunicações para verificar seu uso por outros dispositivos e se comunicam caso o canal esteja disponível. Este processo, também chamado de sensoriamento, juntamente a com posterior troca de pacotes de controle, reduz a probabilidade de usuários inteferirem em comunicações em andamento. Caso uma transmissão esteja em andamento, usuários aguardam e repetem o sensoriamento após um período pré-determinado também conhecido como período de *backoff*. No IEEE 802.11, durante a inicialização da rede, a seleção do canal de dados pode ser feita com base na ocupação dos canais. Entretanto como o modelo de acesso não é dinâmico, após a seleção do canal, os usuários permanecem no mesmo canal independente da variação na qualidade no acesso ao espectro.

A Figura 2.5 ilustra o comportamento de um usuário secundário em uma rede de acesso dinâmico. Neste exemplo, um usuário secundário migra entre diversas frequências em função das oportunidades de acesso existentes. A busca por buracos espectrais é necessária para que usuários secundários não interfiram em comunicações primárias. Para garantir a não-interferência em comunicações primárias, usuários secundários devem implementar mecanismos que permitam a identificação das oportunidades de comunicação [29]. Por isto, intuitivamente, uma comunicação secundária normalmente é precedida de uma fase

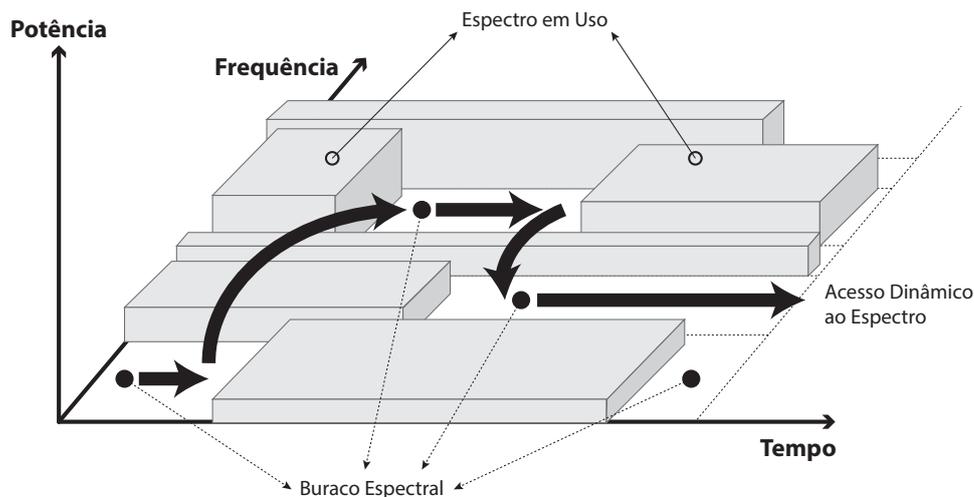


Figura 2.5: Exemplo do funcionamento de acesso dinâmico ao espectro.

de sensoriamento. A fase de sensoriamento corresponde ao momento em que um usuário secundário verifica o estado atual do espectro em busca de oportunidades de transmissão. No contexto de acesso dinâmico, uma oportunidade de transmissão é definida como um período de tempo em que um conjunto de frequências encontra-se ocioso. Uma oportunidade de acesso depende exclusivamente da atividade de usuários primários. Falhas no acesso causadas por colisão dentre comunicações secundárias não impedem um canal de possuir oportunidades de acesso ao espectro.

Para que uma comunicação secundária seja possível, uma faixa espectral deve estar disponível para ambos transmissor e receptor. Ou seja, o transmissor secundário não deve interferir na comunicação de receptores primários e o receptor secundário não deve sofrer interferência de transmissores primários [12].

O sensoriamento de espectro é, se não a mais importante [12], uma das atividades fundamentais de uma rede de acesso dinâmico. A detecção de usuários primários é geralmente implementada pela medição de níveis de potência, entretanto, a avaliação da forma de onda e avaliação da existência de processos cicloestacionários também podem ser utilizados como mecanismos de sensoriamento dependendo do uso do espectro e necessidade de distinção de acesso primário de ruído. O protocolo de controle de acesso ao meio (do Inglês *Medium Access Control* - MAC) não necessariamente está ciente do modelo de detecção considerado na proposta [29]. Adicionalmente, na literatura, em geral, considera-se que somente um canal é sensoriado por vez. Desta forma, a otimização do processo de sensoriamento é fundamental para garantir que não haja interferência e para reduzir o desperdício de oportunidades resultantes da sobrecarga causada pelo tempo gasto durante o sensoriamento. Mesmo em propostas nas quais um único canal é utilizado por transmissão, usuários devem avaliar o estado de múltiplos canais para selecionar o mais adequado a sua comunicação. Visto que o sensoriamento de todos os canais disponíveis de forma sequencial é impraticável, usuários devem adotar mecanismos para controlar o sensoriamento do espectro. Além da otimização do tempo de sensoriamento, usuários podem adotar mecanismos para otimizar a escolha dos canais utilizados.

2.2.2 Política de Interferência

Apesar de o sensoriamento de espectro proteger comunicações primárias, esta política por si só não garante que usuários secundários jamais interfiram em comunicações primárias. Usuários secundários não são capazes de prever o retorno de usuários primários ao espectro. Logo, é plenamente possível que, após o sensoriamento do espectro e início de uma comunicação, usuários secundários se deparem com a situação de um usuário primário retornando ao espectro e causando colisão na transmissão de dados [9].

Em geral, os limites toleráveis da interferência secundária são explicitados por dois parâmetros: (i) a potência mínima η a partir de onde interferência é percebida por um usuário primário e (ii) a probabilidade ς da interferência percebida por um usuário primário exceder η [10]. O primeiro parâmetro, η , define o nível mínimo de ruído percebido por usuários primários. Isto significa que valores abaixo de η não interferem em comunicações primárias, enquanto valores iguais ou superiores a η causam colisão em comunicações primárias. O segundo parâmetro, ς , especifica a probabilidade máxima de colisão. Enquanto cada usuário secundário é responsável pelo controle de seus parâmetros de funcionamento, em uma rede com múltiplos usuários os parâmetros de interferência η e ς devem ser estabelecidos sobre o agregado das transmissões feitas pela rede, cada usuário sendo responsável pelo controle de sua transmissão.

Enquanto em certas bandas compartilhadas, a interferência é característica intrínseca do ambiente, usuários primários gastam bilhões para possuir garantias de acesso exclusivo e, conseqüentemente, são menos tolerantes à interferência. O impacto da interferência causada por usuários secundários depende do modelo de uso de usuários primários e, enquanto para certas categorias de dispositivos a introdução de novos dispositivos pode não causar grande interferência no uso por usuários primários, em aparelhos de rádio amador, por exemplo, qualquer acesso secundário causa interferência significativa, forçando os aparelhos a emitir ruídos [6]. Isto ocorre, pois a ausência de sinal, ou silêncio neste cenário, é uma forma de uso do espectro. A definição de uma política de interferência depende do entendimento dos detentores de licença do que pode ser caracterizado como ruído e de sua capacidade de lidar com tal cenário, além, obviamente, dos custos resultantes da introdução de usuários secundários.

2.2.3 Gerência e Compartilhamento do Espectro

Uma vez que oportunidades de acesso sejam detectadas, usuários secundários devem decidir como e quando explorá-las. Dada a existência de falhas no processo de transmissão, o conjunto de frequências utilizado bem a estratégia de acesso e compartilhamento das oportunidades de acesso fazem parte do processo de gestão da rede.

Em relação à existência de falhas no processo de sensoriamento, se o modelo de sensoriamento for isento de erros, a decisão de acesso é óbvia. Entretanto, na presença de erros de sensoriamento, usuários devem tomar decisões em relação à confiabilidade do sensoriamento feito seguindo a política de interferência discutida anteriormente e buscando um equilíbrio entre o desperdício de oportunidades e a possibilidade de colisão com usuários primários [10].

A ordem de sensoriamento como parte do processo de exploração do espectro é explorada por diversas propostas, desde a percepção como um problema de parada [14, 19, 21] até a busca por soluções ótimas. Entretanto, como o custo computacional do problema

da parada não é polinomial, o objetivo de trabalhos com esta abordagem é a definição de soluções sub-ótimas com menor nível de complexidade [20].

Com auxílio do uso da transformada rápida de Fourier (do Inglês *Fast Fourier Transform* - FFT), dispositivos são capazes de sensoriar um maior número de frequências em menor tempo. Apesar da redução na qualidade do sensoriamento, o conhecimento obtido pode ser utilizado para refinar a política de acesso e seleção de canais para alocação.

Em relação ao compartilhamento de oportunidades, a taxa com que as oportunidades variam em função do tempo é fundamental na definição da política de acesso. Em um cenário onde a localização do usuário secundário implica variação no conjunto de oportunidades de acesso, a alocação de oportunidades e estabelecimento de conexões equivale ao problema de coloração de grafos [35, 36, 37]. Neste caso, a aplicação do algoritmo de coloração de grafos maximiza o número de comunicações que podem ocorrer simultaneamente, minimizando o tempo total de acesso e maximizando o uso dos canais.

A implementação de políticas de acesso ao meio em geral contempla a divisão do espectro entre usuários seja por cooperação ou competição. Ambos os modelos - tanto cooperativo quanto competitivo - vêm sendo propostos com técnicas variando de contenção ao espectro à teoria de jogos [14, 38].

Propostas podem ser avaliadas com base no grau de coordenação entre usuários [30]. Em propostas nas quais há colaboração entre usuários na divisão do espectro, por exemplo, percebe-se um alto grau de coordenação. Neste cenário, protocolos comumente implementam mecanismos de coordenação utilizando um canal comum de controle para possibilitar a gerência do acesso aos canais de dados. A coordenação entre usuários reduz a probabilidade de colisão entre comunicações secundárias, aumentando a eficiência no acesso ao espectro. Entretanto, a coordenação é uma tarefa custosa e o canal utilizado para controle pode ser percebido como um gargalo, dado que grande quantidade de tempo é necessária para que tal coordenação seja atingida [28]. Adicionalmente, a necessidade de coordenação por si só pode ser considerada um gargalo, visto que oportunidades de acesso são desperdiçadas enquanto dispositivos trocam informações. Apesar deste argumento somente ser válido para protocolos em que um único transceptor é utilizado por equipamento, esta é uma abordagem bastante popular. Em trabalhos onde usuários possuem um segundo transceptor, não há um custo envolvido no acesso ao canal de controle. Adicionalmente, a coordenação impede, ou mitiga, dependendo da abordagem, a ocorrência do problema do terminal escondido para múltiplos canais (PTEMC), uma vez que durante a coordenação os usuários convergem para o canal de controle [39].

Em propostas onde há competição pelo acesso ao espectro, o grau de coordenação é menor, e a contenção é mais direta, não havendo negociação entre usuários. Em geral, a contenção do espectro envolve um modelo de *backoff* seguido pela exploração dos canais selecionados. A contenção pode ser feita tanto nos canais utilizados para transmissão quanto em um canal de controle. Em redes colaborativas, o aumento no número de usuários implica um aumento no número de pacotes trocados e, conseqüentemente, maior custo de coordenação. Entretanto, em redes competitivas, um aumento no número de usuários implica maior competição por recursos, e a superexploração do meio pode levar a um cenário de tragédia dos comuns [38]. Neste caso, a competição excessiva por espectro resulta em um aumento no número de colisões resultante de tentativas de acesso simultâneas e subsequente redução da qualidade do acesso ao espectro.

2.2.4 Estrutura de Redes Secundárias

Uma rede secundária também pode ser classificada em função de sua estrutura, no caso as classificações são: centralizada ou distribuída (*ad hoc*). Em uma rede centralizada, o acesso ao espectro é gerenciado por um dispositivo centralizador ou um servidor de alocação, enquanto em uma distribuída a coordenação e divisão do espectro são feitas pelos próprios usuários secundários.

Redes de acesso dinâmico centralizadas são divididas em células, compostas por uma estação base (do Inglês *Base Station* - BS) e um grupo de usuários secundários. Apesar de requererem custos iniciais significativos para implementação, redes centralizadas oferecem maior justiça e eficiência na alocação do espectro [30]. Redes secundárias centralizadas podem ser classificadas em dois grupos com base nas responsabilidades da estação base: (i) redes de acesso ao espectro e (ii) redes de alocação do espectro. Em redes de acesso ao espectro, o dispositivo centralizador é responsável por todo o intermédio do processo de comunicação, incluindo a alocação espacial e temporal de cada comunicação [40, 41]. Em redes de alocação de espectro, a única responsabilidade do dispositivo centralizador é ceder o espectro a usuários quando requisitado. Neste modelo, usuários secundários recebem uma mensagem de controle do BS com a lista de espectro disponível. A principal proposta de acesso dinâmico centralizado é o padrão IEEE 802.22 [42]. Seu objetivo é propor um modelo de reuso de espectro para as frequências de televisão em regiões rurais. O padrão IEEE 802.22 aproveita a disponibilidade do espectro de televisão em regiões rurais para seu funcionamento. O objetivo deste padrão é promover a inserção digital em regiões rurais com custo reduzido.

Redes de acesso dinâmico distribuídas são caracterizadas pela ausência de dispositivos centralizadores, tal que todo processo de comunicação é feito diretamente entre os usuários secundários [10]. Nesta categoria de rede, a coordenação entre usuários secundários é uma tarefa complexa e depende do grau de coesão entre os usuários. Redes dinâmicas distribuídas são divididas com base na existência e caracterização do canal de controle:

- **Canal de Controle Global:** O canal de controle é usado unicamente para coordenação e é o mesmo independentemente de outras características de uma rede;
- **Canal de Controle Local:** Não há distinção formal entre canal de dados e de controle, e o canal de controle é escolhido pelos usuários secundários conforme a disponibilidade do espectro em uma região;
- **Canal de Controle Configurável:** Similar ao modelo de controle local, salvo que a escolha do canal varia de acordo com o tempo e não de acordo com a região;
- **Ausência de Canal de Controle:** Sem a existência de um canal usado para controle, usuários secundários utilizam canais de forma indistinta para transmitir pacotes de dado e de controle.

Apesar de ser possível implementar o canal de controle de diversas maneiras, a proposição de um protocolo no qual o canal de controle não seja global implica uma série de dificuldades. Consequentemente a maior parte dos trabalhos considera a existência de um canal global de controle. Este fato pode ser comprovado pela classificação dos trabalhos apresentados nos *surveys* existentes [12, 28, 29, 30, 31, 32].

Em geral, modelos de acesso dinâmico são implementados em plataformas de rádio cognitivo. Um dispositivo de rádio cognitivo é um aparelho de comunicação capaz de alterar seus parâmetros de funcionamento de forma automática, inclusive possuindo capacidade de aprendizado [43]. O termo rádio cognitivo foi citado primeiramente por Joseph Mitolla III em 1998 e, embora dispositivos de rádio cognitivo sejam úteis na área de acesso dinâmico, esta classe de dispositivo representa um paradigma mais amplo onde diversos outros parâmetros de comunicação podem ser melhorados pelo uso da cognição [10].

2.3 Usuários Primários

Em uma rede de acesso dinâmico, usuários primários são definidos como dispositivos sem fio que possuem licença de uso do espectro. Isto significa que estes dispositivos possuem prioridade de acesso ao espectro e suas comunicações não devem sofrer interferência por usuários secundários.

O acesso ao espectro por usuários primários pode ser caracterizado em função de sua frequência, regularidade, duração e o intervalo entre acessos. A frequência com que usuários acessam o espectro define a taxa de disponibilidade do espectro. As altas taxas de disponibilidade percebidas por estudos feitos recentemente são a característica que motiva a implementação de redes de acesso dinâmico. Diferentes trabalhos possuem resultados a respeito da disponibilidade do espectro e os valores variam de 68% até 99,5% de disponibilidade dependendo da frequência e local [3, 8, 4].

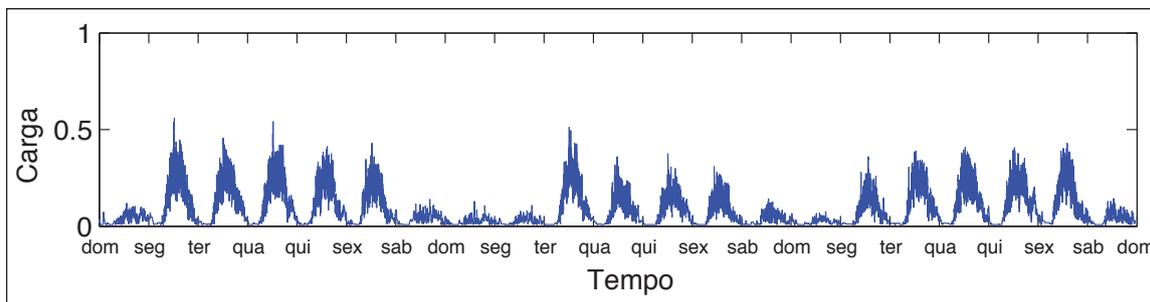


Figura 2.6: Carga de uma torre para celulares ao longo de três semanas [5].

A regularidade do acesso ao espectro define como a disponibilidade do espectro varia em função do tempo. Assim como outras atividades humanas, como o consumo de energia elétrica, a transmissão de dados em uma rede sem fio depende dos usuários e, portanto, comunicações sem fio geralmente apresentam variação significativa em seu uso ao longo do tempo. Por exemplo, a Figura 2.6 apresenta a variação da carga de uma torre de telefonia celular avaliada em [5]. Percebe-se uma variação da carga ao longo de cada dia avaliado, e entre dias diferentes. Enquanto há um ciclo diário no uso da telefonia móvel, este é bastante irregular, havendo diferenças entre dias e semanas consecutivas. A irregularidade do acesso de usuários primários ao meio é um dos maiores desafios na definição de protocolos, os quais devem se adaptar a flutuações no uso do espectro.

O tempo gasto por usuários secundários durante seu acesso ao espectro depende da atividade que exercem, e a distribuição dos acessos ao longo do tempo pode variar significativamente. Em [5] também foram avaliados os tempos de duração de ligações telefônicas

e foi percebido que o desvio padrão entre os tempos era significativo e excluía a possibilidade de modelar o acesso destes usuários por funções exponenciais, o que torna sua análise mais complexa. Com base nestas constatações, o autor argumenta que usuários secundários devem estar cientes da existência de flutuações em curta escala ao implementarem um modelo de reuso do espectro. Esta constatação denota a necessidade de estudar diferentes modelos de tráfego.

Enquanto duas redes primárias podem apresentar taxas de disponibilidade similares, suas distribuições de acesso podem divergir significativamente. Em padrões de acesso determinístico, a transmissão de um usuário primário pode ser modelado para estados *ON* e *OFF* com durações fixas. Entretanto, processos estocásticos variam de distribuições *Poisson* a tráfegos auto-similares distribuídos. Mais especificamente, a flutuação na taxa de disponibilidade percebida em tráfegos autossimilares pode degradar a performance de uma rede [44, 45]. Justamente por parte da literatura demonstrar que o tráfego *Poisson* não necessariamente descreve o modelo de acesso primário, deve-se considerar modelos mais complexos na construção de cenários de tráfego realistas.

2.3.1 Modelos de Tráfego

A dependência de longa duração (do Inglês *Long Range Dependency* - LRD) é um fenômeno que pode ser percebido pela análise temporal de um conjunto de dados baseada no estudo do movimento Browniano fracional (do Inglês *fractional Brownian motion* (*fBm*)) [46], visto que o *fBm* é um modelo de processo estocástico com características de dependência de longa duração. Um processo estacionário possui dependência de longa duração se a área sob a curva de sua função de autocorrelação é infinita [47].

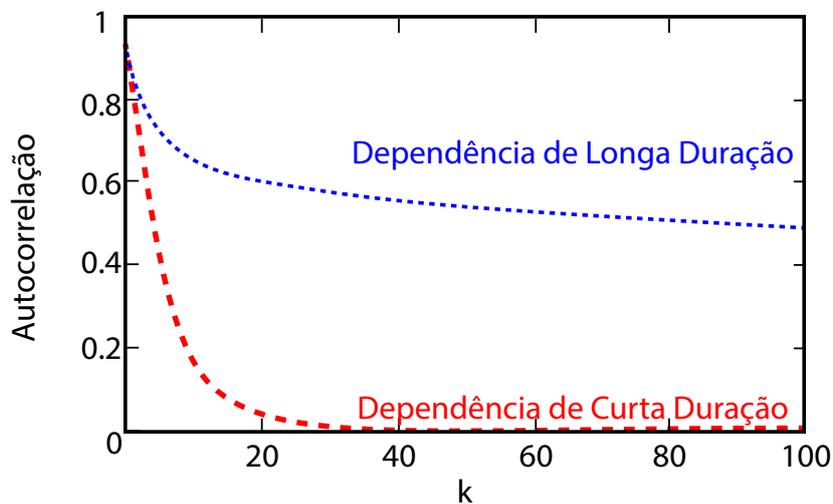


Figura 2.7: Exemplos de estruturas de autocorrelação de processos com dependências de curta e longa duração.

O decaimento da autocorrelação em distribuições com dependência de curta duração (SRD) e LRD podem ser observadas na Figura 2.7. Neste exemplo, percebe-se que para uma variável k o decaimento da autocorrelação ocorre de forma exponencial para a distribuição SRD, enquanto que para a distribuição LRD o decaimento não é totalizável,

ou seja, dada uma função de autocorrelação $r(k)$, $\sum_k r(k) = \infty$. Isto significa que em Modelos de tráfego com LRD, a autocorrelação entre valores gerados por um modelo se mantém perceptível em diferentes escalas. O parâmetro de Hurst (H) é uma medida da extensão da dependência de uma distribuição e H pode assumir valores de 0 a 1. O valor 0,5 indica ausência de dependência de longa duração e quanto mais próximo de 1 for o valor de H , maior o grau de dependência [48].

A distribuição mais comumente usada para modelar tráfego é a distribuição de *Poisson*. Ela também é tradicionalmente usada na análise de tráfego de redes telefônicas. Em geral o tráfego *Poisson* aproxima bem o modelo de comunicação dos usuários primários, mas omite detalhes e suaviza a percepção da distribuição do tráfego [5].

Em um modelo *On/Off* o tráfego oscila entre os estados *On* e *Off* [49]. Durante um período *On*, tráfego é gerado de acordo com uma taxa constante r correspondente à média da distribuição. Durante um período *Off*, nenhum tráfego é gerado. O período gasto entre os estados *On* e *Off* é chamado de *período de transição*. As durações dos períodos *On* e *Off* são independentes e são regidas por distribuições que podem seguir outros modelos. Enquanto um processo *On/Off* não é caracterizado por possuir dependência de longa duração, a distribuição dos períodos *On* e *Off* pode atribuir tal característica ao processo.

Embora nem todo modelo autossimilar apresente dependência de longa duração, um conjunto destes modelos apresenta LRD. A autossimilaridade, ou autossimilaridade, é uma característica de uma distribuição que não varia dependendo da escala observada. Um exemplo intuitivo da autossimilaridade está nos fractais, objetos geométricos que podem ser divididos em partes cada uma das quais semelhante ao objeto original. Visualmente, a autossimilaridade de tráfego é percebida como uma invariância da distribuição em relação à escala de tempo [50]. Essencialmente, um processo é autossimilar se, nas diversas escalas de tempo, o processo mantiver suas propriedades estatísticas exceto por um fator constante escalar [51]. A importância do comportamento autossimilar está no fato de o tráfego não se tornar suavizado em torno de um valor médio para escalas maiores.

O Ruído Gaussiano Fracionário (do Inglês *Fractional Gaussian Noise* - fGN) é um processo estocástico estacionário autossimilar que apresenta dependência de longa duração [52]. Um processo fGN é normalmente definido como uma série de variáveis Gaussianas aleatórias associadas a um processo movimento Browniano fracional (do Inglês *fractional Brownian motion* - fBm) de forma que um fGN corresponde à primeira diferença de um processo autossimilar obtido pela amostragem do fBM [53]. Um fGN apresenta autossimilaridade para $0,5 < H < 1$.

2.3.2 Desafios

Por ser uma área de pesquisa bastante recente, diversos obstáculos devem ser solucionados para possibilitar a implementação de redes de acesso secundário.

Em relação ao sensoriamento de espectro, diversos tópicos encontram-se em aberto. A correta identificação de oportunidades de acesso é fundamental para implementação de redes de acesso secundário. Obviamente, usuários devem ser capazes de identificar as oportunidades de forma eficiente. Para isto, é necessário que o modelo de sensoriamento seja capaz de detectar com rapidez e exatidão a presença de usuários primários. Dado o desvanecimento de sinal e presença de erros no processo de sensoriamento, os modelos propostos devem ser capazes de distinguir usuários primários de ruído, corretamente

identificando o acesso primário. A qualidade do sensoriamento está relacionada ao tempo gasto durante o sensoriamento de espectro, entretanto, deve-se minimizar o tempo necessário para sensoriar um canal, pois o tempo gasto durante sensoriamento pode levar ao desperdício do potencial de reuso.

A interferência em comunicações primárias é um tópico pertencente a diversas áreas da pesquisa sobre acesso secundário. A possibilidade de falha no processo de sensoriamento, não sincronização entre comunicações primárias e secundárias, ruído resultante de comunicações secundárias e o problema do terminal escondido são potenciais causas de interferência secundária em usuários primários. Por este motivo, é necessário que autores considerem os efeitos dos aspectos de seus modelos no acesso primário.

A menos que seja expressamente definido, todos os usuários secundários de uma rede de acesso dinâmico possuem a mesma prioridade de acesso ao espectro. Por este motivo, é necessário que algum modelo de gerência esteja presente. Em redes onde há competição entre usuários, o tempo gasto na contenção de espectro causa desperdício das oportunidades de acesso. Especialmente com o crescimento de redes competitivas, o custo de contenção pode tornar a proposta inaplicável. Similarmente, em redes onde há coordenação entre usuários no acesso ao espectro, a gestão de acesso pode causar gargalos e desperdício ainda maior. Os modelos de acesso propostos devem garantir eficácia, de forma que menor esforço seja necessário para organizar o acesso ao espectro. Justiça também é fundamental na definição de protocolos de acesso ao meio. É necessário garantir que todos os usuários possuam a mesma chance de explorar as oportunidades existentes. A justiça, entretanto, não deve vir a custo de eficiência na exploração do espectro, dado que esta é a função de uma rede de acesso dinâmico.

Capítulo 3

Estado da Arte

Dentre os aspectos de comunicação estudados pela literatura existente, encontram-se modelos de sensoriamento, transmissão de dados, controle de acesso, compartilhamento do espectro e controle de interferência. Neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados ao tema de acesso dinâmico, incluindo protocolos de controle de acesso ao meio para redes distribuídas, modelos de sensoriamento, controle de acesso e compartilhamento do espectro.

3.1 Mecanismos de Sensoriamento

Propostas relativas ao sensoriamento de espectro são divididas dentre as focadas na otimização do aspecto físico do sensoriamento e propostas relacionadas à gerência do sensoriamento como parte do processo de comunicação, ou, em termos técnicos, propostas que lidam com as camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC).

O padrão IEEE 802.11 implementa um mecanismo de controle de acesso ao meio capaz de evitar que usuários interfiram em comunicações em ocorrência e compitam por acesso ao espectro disponível. Entretanto, neste padrão, todos os dispositivos possuem a mesma prioridade de acesso, e não há preocupação com a proteção de certos usuários. Logo, enquanto o modelo CSMA/CA é uma solução válida para contenção de espectro, em redes de acesso dinâmico, os usuários secundários (US) devem implementar políticas adicionais para lidar com os desafios da presença de usuários primários.

Diversos trabalhos abordam a otimização do sensoriamento na camada PHY por meio da otimização do mecanismo de sensoriamento. No trabalho apresentado por Wang et al. [18] os autores propõem um modelo de otimização numérica do tempo de sensoriamento para um único canal acessado. Os autores demonstram que o uso do espectro pode ser maximizado com base na otimização do tempo de sensoriamento. O modelo proposto baseado no ruído aditivo branco e gaussiano, onde $H = 0,5$. Por este motivo, este modelo não é compatível com cenários onde percebe-se LRD [54]. Infelizmente, o custo computacional para otimizar o sensoriamento é muito alto e parte dos dados necessários para a decisão de otimização não são obtidos de forma prática, reduzindo a probabilidade de aplicação deste modelo. Similarmente, os autores de [55] propõem um modelo de otimização baseado no ajuste dos parâmetros de sensoriamento. Neste trabalho, entretanto, o acesso primário é modelado com base em um processo *Poissoniano*.

Na camada MAC, diversos aspectos do sensoriamento são estudados na literatura. No caso em que um único dispositivo tem acesso a múltiplos canais mas somente transmite dados em um canal, a ordem de sensoriamento é um tópico para análise. No trabalho apresentado em [20], os autores propõem um modelo de programação dinâmica para busca da ordem de sensoriamento que busca definir a sequência em que os canais de dados devem ser sensoriados em função da taxa de disponibilidade dos canais avaliados. Infelizmente, o custo computacional da abordagem proposta é relativamente alto e na presença de múltiplos usuários a seleção da mesma ordem de sensoriamento por múltiplos usuários deve ser investigada. Os autores de [56] propõem uma solução baseada em árvores de decisão. O objetivo de ambos os trabalhos é buscar uma solução sub-ótima para a decisão da ordem de sensoriamento, visto que a definição é um problema não polinomial. Entretanto, o custo de ambas as abordagens é relativamente alto. Apesar do custo computacional, ambas as propostas são exemplo do ganho obtido com a definição de uma ordem de sensoriamento. Mendes et al. [57] propõem que a ordem de sensoriamento seja definida com base no aprendizado por reforço. Os autores argumentam que as soluções sub-ótimas, apesar de seus resultados, requerem conhecimento prévio sobre o espectro. Para sanar esta limitação, é proposto um modelo adaptativo capaz de obter resultados muito próximos dos ótimos.

Jia et al. [14] propõem que o processo de sensoriamento seja gerido por um algoritmo de parada, o qual define o número de canais utilizados durante a transmissão de dados. A cada canal sensoriado, o algoritmo avalia as estatísticas do espectro e mede o ganho de continuar o processo de sensoriamento em relação ao início da transmissão de dados. Na proposta, os autores consideram que um único par de comunicação possui direito de acesso ao espectro e isto potencialmente promove grande desperdício de oportunidades. Entretanto, esta abordagem pode ser incorporada no mecanismo de acesso de outras propostas.

A colaboração dos usuários pode ser implementada para reduzir o custo de sensoriamento [12]. No padrão IEEE 802.22, por exemplo, acesso ao espectro é coordenado por estações rádio-base (*Base Station* - BS) as quais delegam a tarefa de sensoriamento a seus usuários [58]. A BS decide como dividir o espectro com base nas informações de disponibilidade do espectro coletadas. No trabalho proposto em [59], os usuários secundários formam grupos para se comunicar e, enquanto os membros de um grupo se comunicam normalmente, o líder do grupo sensoria o espectro continuamente. Os resultados são posteriormente compartilhados com outros grupos. As informações divulgadas por líderes são utilizadas por usuários na escolha dos canais a serem acessados.

Os trabalhos listados demonstram a variedade de aspectos ainda em aberto referentes ao processo de sensoriamento do espectro. Enquanto as propostas focadas na camada física são relativamente independentes do restante, a implementação de políticas de sensoriamento na camada MAC está relacionada a diversos outros aspectos do modelo de comunicação e devem ser estudadas com bastante atenção.

3.2 Mecanismos de Controle de Acesso

Em redes sem-fio convencionais, os parâmetros de funcionamento dos protocolos MAC como definição do canal utilizado não foram projetados para serem alterados dinamicamente [60]. Conseqüentemente, usuários não são capazes de alterar seus parâmetros com

base na mudança das oportunidades da rede em que se encontram. Para aproveitar as oportunidades, protocolos de acesso dinâmico devem se moldar às oportunidades de acesso.

Na presença de múltiplos canais, parte da literatura existente considera o desafio de explorar todo o espectro eficientemente. Uma abordagem comum se baseia no uso de um canal de controle para gerência de acesso ao espectro. So et al. [39] propõem um protocolo onde um canal de controle é utilizado para coordenação. O acesso ao canal de controle é sincronizado e ocorre durante o início da etapa de gerência. Cada usuário mantém uma lista de canais chamada *Preferred Channel List* (PCL), a qual classifica o interesse de acesso do usuário nos canais acessíveis. Usuários utilizam um mecanismo baseado no algoritmo *Distributed Coordination Function* (DCF) do padrão IEEE 802.11 para divulgar suas PCLs durante contenção de espectro [34]. A maior desvantagem desta abordagem é que o acesso sincronizado pode ser difícil de ser implementado em uma rede distribuída, além do desperdício de oportunidades resultante do tempo gasto durante a coordenação. A solução apresentada por Zhang et al. [61] se baseia na definida no trabalho de So et al. [39] e busca reduzir o custo de sincronização, possibilitando que múltiplas transmissões consecutivas sejam negociadas para cada canal durante uma única etapa de gerência. O quadro de comunicação de todos os canais é sincronizado para que usuários saibam o momento em que devem migrar para o canal de controle, evitando, assim, o problema do terminal escondido para múltiplos canais (PTEMC). A proposta apresentada por Cordeiro et al. [62] propõem um modelo de coordenação alternativo ao proposto por Zhang et al. [61]. O período de coordenação, chamado de *Beacon Period* (BP), é temporizado individualmente por canal para reduzir o desperdício de oportunidades promovido pela coordenação e para permitir mobilidade espectral de usuários. Durante um BP, todos os usuários que acessam um mesmo canal enviam informações obtidas durante ciclos anteriores, incluindo informações sobre alocação de espectro no restante do espectro. O compartilhamento de informações possibilita que usuários tenham informações sobre outros grupos, de forma que a mobilidade espectral não cause o PTE ou o PTEMC. O papel do canal de controle nesta abordagem é permitir gerência dos grupos e temporização da rede. Entretanto, sem a presença de um dispositivo centralizador a garantia de que os BPs não sejam sincronizados não é clara, assim como a escalabilidade desta proposta [28].

O protocolo proposto POR Thoppian et al. [63] considera a modelagem do controle de acesso ao espectro como um modelo de programação linear inteira (*Integer Linear Programming* - ILP). Para isto, durante a etapa de coordenação, os dispositivos convergem para o canal de controle para que troquem informações sobre suas intenções de transmissão. A cada iteração, os usuários transmitem uma mensagem por *broadcast* onde definem o canal e quadro em que querem transmitir seu pacote, de forma que a propagação das mensagens seja similar ao que ocorre em uma busca em largura. A cada ciclo, usuários atualizam suas tabelas e enviam novos pedidos até que ocorra uma convergência na rede. O tempo necessário para convergência, no entanto, é bastante alto e requer que usuários tenham conhecimento de seus vizinhos de até 2 saltos. Estas restrições tornam a aplicação desta proposta limitada.

A proposta apresentada por Hamdaoui et al. [59] implementa um mecanismo para coordenação com base no interesse de transmissão dos usuários. Grupos são formados por usuários com interesse em transmitir dados entre si. Cada grupo elege um líder, responsável por medir o uso do espectro e informar a outros grupos sobre a condição do canal pelo

qual é responsável. Durante o período de transmissão de dados, os membros de um grupo competem por acesso ao meio utilizando o DCF do IEEE 802.11. Dentre os potenciais problemas, a quantidade de informações trocadas entre usuários e a independência dos grupos não garantem uso eficiente do espectro e proteção de usuários primários [28].

O custo necessário para coordenação motivou trabalhos a considerar a competição por espectro como alternativa ao modelo de coordenação. Ma et al. [64] propõem que os USs possuam uma lista de frequências utilizadas por seus vizinhos para recebimento de dados. Estas listas são mantidas para facilitar a comunicação entre usuários sem a necessidade de acesso a um canal de controle. Estas listas também permitem que usuários sem espectro em comum se comuniquem. Entretanto, para que usuários se comuniquem sem canal em comum, usuários devem ser capazes de distinguir acesso primário de ruído ou outros tipos de interferência, e os autores não sugerem como este obstáculo pode ser tratado [28].

Jia et al. [14] a existência de um canal de controle global utilizado por todos os usuários na contenção do espectro. A contenção é feita por meio de *random backoff* e os usuários “vencedores” têm acesso garantido a todo o espectro disponível. Estes usuários utilizam os canais de acordo com seu interesse, retornando ao canal de controle após a transmissão de dados para avisar o final da transmissão. Os autores também consideram a existência de limitações físicas nos dispositivos e o algoritmo utilizado para controlar o sensoriamento limita significativamente o número de canais utilizados. Caso o número de canais seja superior às limitações dos dispositivos, ou caso os usuários decidam não utilizar um subconjunto de canais, ocorre desperdício de espectro. No padrão IEEE 802.22 o espectro acessível contém mais de 50 canais serem acessíveis [58]. Caso este mesmo cenário de disponibilidade fosse aplicado ao modelo em questão, o número de canais utilizados seria significativamente baixo e implicaria em um desperdício considerável de espectro.

Hsu et al. [65] propõem um modelo alternativo de contenção e acesso ao espectro baseado na agregação de múltiplos canais para transmissão de dados. Nesta proposta, o espectro não é alocado como um todo de forma que emissor e receptor selecionam os canais utilizados para a transmissão durante a contenção do espectro com base no tempo de *backoff* necessário para a exploração dos canais selecionados. O tempo de *backoff* considerado é o tempo necessário para reduzir a probabilidade de colisão entre transmissões, e é calculado com base no número de usuários na rede e na taxa de uso dos canais selecionados. Enquanto o mecanismo para agregação proposto é interessante, resultados demonstram que o modelo de rede não é escalável, e que o aumento no número de usuários ou canais agregado reduz significativamente a taxa de sucesso de comunicações e vazão da rede.

O trabalho proposto por Zhao et al. [66] não considera a existência de uma etapa de coordenação. Para que comunicações possam ocorrer, os usuários escuta por requisições de transmissão em um conjunto de frequências de seu interesse. Caso um usuário receba uma mensagem de requisição, chamada de *handshake*, troca pacotes para definir um algoritmo de salto entre canais para sensoriamento e transmissão. Usuários sensoriam os canais definidos anteriormente e transmitem dados utilizando um mecanismo de *backoff* similar ao CSMA/CA.

Embora os trabalhos apresentados proponham protocolos de controle de acesso ao meio para redes de acesso dinâmico, os trabalhos resolvem problemas pontuais. Algumas propostas buscam otimizar o sensoriamento, outras o controle de acesso. Seja por coor-

denaço ou contenço, a literatura apresentada analisa seus modelos em cenários pouco detalhados. Análise mais aprofundada é necessária para medir a eficiência destes protocolos em termos de sua capacidade de exploração do espectro e de adaptação a diferentes ambientes.

3.3 Adaptabilidade

Adaptabilidade é uma característica fundamental de redes de acesso dinâmico. Usuários devem analisar o ambiente em que se encontram e se adaptar para maximizar sua capacidade de exploração do espectro. Cormio et al. [28] sugerem a necessidade de otimizar o tempo de sensoriamento e o tempo de transmissão. Caso os tempos de sensoriamento e transmissão sejam independentes, ou seja, caso o ciclo de comunicação não esteja atrelado a um quadro de tamanho fixo, um foco de estudos é o balanço entre a minimização do número de erros de sensoriamento e o tempo total de sensoriamento. O mecanismo de seleção de canais proposto por Zhao et al. [66] se baseia em conhecimento gerado por usuários. Inicialmente, o protocolo não é eficiente, entretanto, ao longo dos ciclos de comunicação, o protocolo se torna mais eficiente. Para isto o protocolo assume que o uso do espectro é relativamente invariante, visto que mudanças frequentes na disponibilidade do espectro afetam negativamente o modelo de exploração proposto. Similarmente, no trabalho proposto por Jia et al. [14], o controle de parada do sensoriamento utiliza a disponibilidade média do espectro como base para o cálculo da vazão da rede. Apesar dos resultados obtidos serem interessantes, as limitações físicas limitam o potencial do algoritmo de parada. Nos trabalhos propostos por Tan et al. [16] e Jiang et al. [20], a divisão dos canais dentre os usuários é feita com base na disponibilidade do espectro. Enquanto Jiang et al. [20] considera que a disponibilidade é medida iterativamente, Tan et al. [16] considera que usuários medem a disponibilidade do espectro continuamente durante um período de tempo longo para coletar informações sobre a disponibilidade do espectro.

Alguns trabalhos da literatura ressaltam a avaliação do espectro como mecanismo para otimização do acesso secundário [5]. Entretanto, as considerações apresentadas são limitadas à disponibilidade do espectro. Não há trabalhos que estudem a influência de parâmetros de comunicação, como o tamanho médio de pacotes de dados e intervalo de comunicação, dentre outros, no uso do espectro por usuários primários. Esta constatação contrasta com a literatura existente relativa à modelagem do acesso primário, na qual trabalhos modelam acesso primário com base em diversos modelos [12, 67, 68, 69, 70]. O estudo de acesso dinâmico é um tópico recente e, em parte, justifica o descompasso dentre a modelagem do uso do espectro e os cenários considerados pelos trabalhos levantados. Entretanto, é fundamental que trabalhos considerem cenários mais variados e bem detalhados, possivelmente incorporando esta avaliação a seus protocolos.

3.4 Discussão

Ao longo deste capítulo foram apresentados trabalhos focados em resolver diversos problemas relativos ao acesso dinâmico. Foram listados artigos focados na otimização do processo de sensoriamento, modelagem do acesso primário e protocolos de acesso ao meio

com abordagens diversificadas. Os trabalhos foram descritos bem como suas contribuições e deficiências. As propostas de sensoriamento detalhadas descrevem modelos para otimização do tempo de sensoriamento e os modelos de tráfego caracterizam comportamentos de usuários primários. Entretanto, os protocolos de acesso listados abordam o tópico de forma bastante distinta. Os trabalhos consideram estruturas de rede, propriedades do espectro e dos usuários primários de maneiras significativamente diferentes. Enquanto em certos trabalhos usuários utilizam um canal de controle para coordenação, em outros, competem por acesso diretamente nos canais de dados. As diferença entre os protocolos de acesso definidos e os cenários avaliados por estes trabalhos dificultam a definição de um modelo comum para comparação das propostas existentes. Adicionalmente, a ausência de detalhes no ambiente considerado para modelagem e a falta de variedade dos cenários considerados tornam impraticável a comparação de duas abordagens distintas com base em seus resultados.

Tabela 3.1: Classificação dos protocolos de controle de acesso ao meio

Protocolo	Canal de Controle	Controle de Acesso	Agregação de Canais
SRAC [64]	Não	Contenção	Sim
POMDP [66]	Não	Contenção	Não
IEEE 802.22 [71]	Não	Centralizado	Sim
MMAC [39]	Local	Contenção	Não
TMMAC [61]	Global	Contenção	Não
HC-MAC [14]	Global	Contenção	Sim
SCA-MAC [65]	Global	Contenção	Sim
OS-MAC [59]	Global	Contenção	Não
ILP based MAC [63]	Global	Coordenação	Não
Tan et al. [16]	Global	Coordenação	Não

A Tabela 3.1 lista as características dos protocolos de acesso ao meio apresentados neste capítulo. Em cada linha as seguintes características de um protocolo são listadas: (i) modelo de canal de controle considerado, (ii) mecanismo para controle de acesso e (iii) a agregação de canais para transmissão de dados. Os modelos de controle, modelos de acesso e número de canais acessados considerados variam de acordo com a proposta e diversas combinações das características foram detalhadas ao longo do texto. De fato, das possíveis combinações das características listadas, salvo melhor juízo, não foi encontrada na literatura uma proposta que considere o uso de um canal de controle para permitir a coordenação de usuários no acesso ao espectro com agregação de canais na transmissão de dados. A agregação de canais na transmissão de dados pode levar a ocorrência do PTEMC em protocolos onde diversos usuários acessam o espectro simultaneamente, visto que o sensoriamento de múltiplos canais é, geralmente, considerado como sequencial. Neste caso, a coordenação entre usuários pode ser usada para evitar a ocorrência deste problema, ressaltando a importância do estudo deste cenário.

Foi discutida a necessidade da avaliação do funcionamento de protocolos propostos em múltiplos cenários. Os protocolos listados utilizam uma gama de simuladores, como QualNet, NS-2, GloMoSim e OPNET [72, 73, 74, 75]. O uso de plataformas diferentes dificultam a comparação de diferentes trabalhos. Enquanto estas plataformas foram desenvolvidas para simular diferentes protocolos sem-fio, devem ser adaptadas para o uso

de protocolos de acesso dinâmico. Inclusive, a variedade dos ambientes definidos pode dificultar o uso de um simulador tradicional. Dado que o acesso ao meio pode ser caracterizado em função de diversos parâmetros de seu funcionamento, é necessário estudar quais as características fundamentais de uma rede de acesso dinâmico, qual seu papel e como podem interferir no funcionamento de redes de acesso dinâmico.

Com base no conteúdo discutido, percebe-se a existência de oportunidades no estudo de acesso dinâmico. Considera-se interessante avaliar modelagem do espectro acessível em função da seleção e caracterização de parâmetros do uso do espectro por usuários primários e secundários. A descrição do ambiente serve de base para um estudo do impacto de características do acesso primário em um protocolo, feita com auxílio de simulações. Para isto, é necessária a definição de um protocolo de controle acesso ao meio e ambiente de simulação capaz de avaliar este protocolo em função de um conjunto mais detalhado e variado de parâmetros.

Capítulo 4

Modelo de Espectro

Em redes de acesso dinâmico, usuários primários e secundários compartilham o espectro licenciado. A forma com que estes usuários exploram o meio depende das características do espectro acessível. Ao longo deste capítulo, será descrito o modelo de rede considerado neste trabalho, quais variáveis podem ser utilizadas na caracterização do espectro e como elas podem ser avaliadas. O capítulo encerra com uma breve análise das métricas definidas.

4.1 Modelo de Acesso

O modelo de acesso apresentado nesta seção é semelhante aos modelos definidos por Jia et al. [14] e Hamdaoui et al. [59]. Neste modelo, um conjunto de usuários primários (UP) e usuários secundários (US) estão presentes onde USs buscam oportunidades para acessar o espectro. USs estão sujeitos à interferência primária e, portanto, a avaliação de oportunidades é implementada por um modelo de sensoriamento similar ao cenário considerado por Yucek et al. [12]. Conforme definido por Zhao et al. [10], o modelo apresentado considera que USs utilizam técnicas de *Underlay* e *Overlay* para regular suas transmissões de forma a não interferir em comunicações primárias.

Considere um conjunto finito de canais $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{\mathcal{K}}\}$ todos capazes de proporcionar a mesma vazão, tal que $|C| = \mathcal{K}$ canais de dados estejam disponíveis sem que haja sobreposição das frequências de dois canais distintos. O acesso a um canal $c_i \in C$ é dividido em *Unidades de Tempo* (UT) de forma que transmissões primárias e secundárias sejam iniciadas no início de uma UT, podendo durar uma ou mais UTs. De acordo com a taxonomia apresentada em [76], o modelo de acesso secundário pertence à classe dos protocolos de comunicação sincronizados. Semelhante a [14, 59, 65], além dos \mathcal{K} canais utilizados para a transferência de dados, considera-se a existência de um canal adicional, chamado de canal de controle, utilizado para a gerência do acesso ao espectro.

O modelo de acesso secundário segue a divisão em UTs e usuários secundários (US) são capazes de transmitir pacotes de dados em λ ($1 \leq \lambda \leq \mathcal{K}$) canais simultaneamente. Considere T_t como o número de unidades de tempo necessárias para transmitir um pacote de dados em um canal c_i e \mathcal{T}_D o tempo em UTs necessário para que uma comunicação

ocorra quando λ canais são utilizados tal que:

$$\mathcal{T}_D = \begin{cases} T_t & \lambda = 1 \\ \lceil T_t/\lambda \rceil & \lambda > 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Antes de explorar um canal c_i , USs devem verificar a disponibilidade deste canal. O tempo necessário para verificar a disponibilidade de um canal c_i , em UTs, é igual a T_s . Para que o modelo não perca generalidade, entende-se que T_s é um processo que envolve tarefas adicionais, como o período de reserva do canal semelhante ao modelo definido em Jia et al. [14]. Considera-se que um único canal é sensoriado por vez e que o processo de sensoriamento é isento de erros [14].

A disponibilidade de um canal c_i é definida com base no uso de usuários primários tal que, dada a divisão do tempo em UTs, p_i define o percentual de UTs em que o canal c_i está disponível para exploração por USs. O uso dos canais em C varia de forma tal que sejam c_i, c_j dois canais distintos ($c_i \neq c_j$), suas disponibilidades também serão diferentes ($p_i \neq p_j$) assim como considerado em [16]. Desta forma, a taxa de disponibilidade média do espectro definida como P , é obtida com base na média das disponibilidades dos $c_i \in C$ canais, ou seja:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{\mathcal{K}} p_i}{\mathcal{K}} \quad (4.2)$$

Dado que cada canal c_i possui uma taxa de disponibilidade diferente, h_P define o limite da variação da disponibilidade p_i de um canal $c_i \in C$ em relação à disponibilidade média P , ou seja:

$$h_P = \max |P - p_i|, \quad i = 1, 2, \dots, \mathcal{K} \quad (4.3)$$

Tabela 4.1: Parâmetros para modelagem do espectro

Variável	Descrição
C	Conjunto de canais acessíveis.
c_i	i -ésimo canal do conjunto C .
p_i	Taxa de disponibilidade do canal c_i .
P	Taxa de disponibilidade média do conjunto C em uma determinada UT.
h_P	Limite máximo da variação da disponibilidade de um canal c_i em relação a P .
T_t	UTs necessárias para que um usuário transmita um pacote de dados em um canal c_i .
T_s	UTs necessárias para que um conjunto de USs verifique a disponibilidade de um canal c_i .
λ	Número de canais alocados à transmissão de dados entre dois ou mais USs.
UT	Unidade de tempo de comunicação.

A Tabela 4.1 lista os parâmetros do modelo de espectro considerados listados e detalhadas ao longo do texto. Com base no modelo definido, a próxima seção apresenta um exemplo de comunicação que considera este cenário.

4.2 Exemplo do Processo de Comunicação

Considere o modelo de comunicação intuitivo para USs ilustrado na Figura 4.1, onde $T_s = 2$ e $\lambda = 1$. Neste cenário, os usuários acessam o canal c_1 e verificam a disponibilidade do canal ao longo de duas unidades de tempo. Após o sensoriamento, os usuários verificam que o canal está disponível e transmitem um pacote de dados de tamanho $T_t = 20$ UTs. Como um único canal foi utilizado, o tempo de transmissão é $\mathcal{T}_D = 20$ UTs. Considere agora o exemplo apresentado na Figura 4.2, onde $\lambda = 2$ e $T_s = 1$. Neste caso, os canais c_1 e c_2 são sensoriados, totalizando um período de sensoriamento de 2 UTs. Durante o sensoriamento, ambos os canais são considerados disponíveis, e o pacote de dados é transmitido em um tempo $\mathcal{T}_D = 20/2 = 10$ UTs.

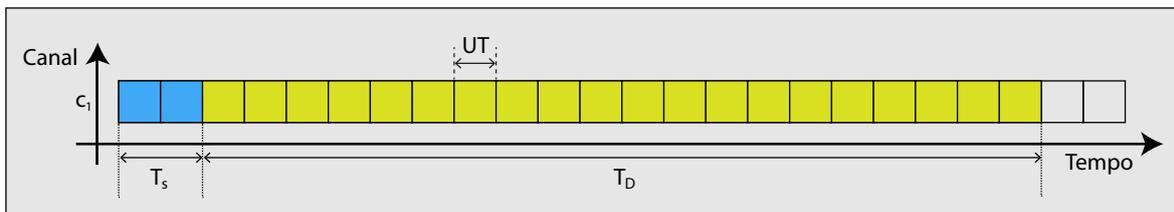


Figura 4.1: Exemplo de processo de comunicação com 1 canal de dados.

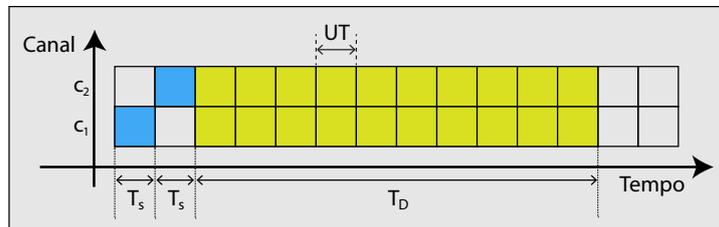


Figura 4.2: Exemplo de processo de comunicação com 2 canais de dados.

Nestes exemplos, o espectro avaliado estava disponível. Entretanto, durante a exploração do espectro, USs se deparam com cenários de disponibilidade distintos. A Figura 4.3 ilustra os possíveis resultados do sensoriamento e exploração de um canal com $T_s = 2$. Em cada cenário, é listada uma combinação de resultado de sensoriamento e transmissão de dados. No cenário 1, o canal avaliado é percebido como ocupado durante o sensoriamento e este estado persiste durante todo o período de comunicação. No cenário 2, o canal é avaliado como disponível e um pacote de dados é transmitido com sucesso. Nos cenários 3 e 4, entretanto, o estado verificado durante o sensoriamento não representa o estado do canal ao longo do período utilizado para comunicação. No cenário 3, o canal é verificado como indisponível, todavia, brevemente após o sensoriamento, o canal passa a

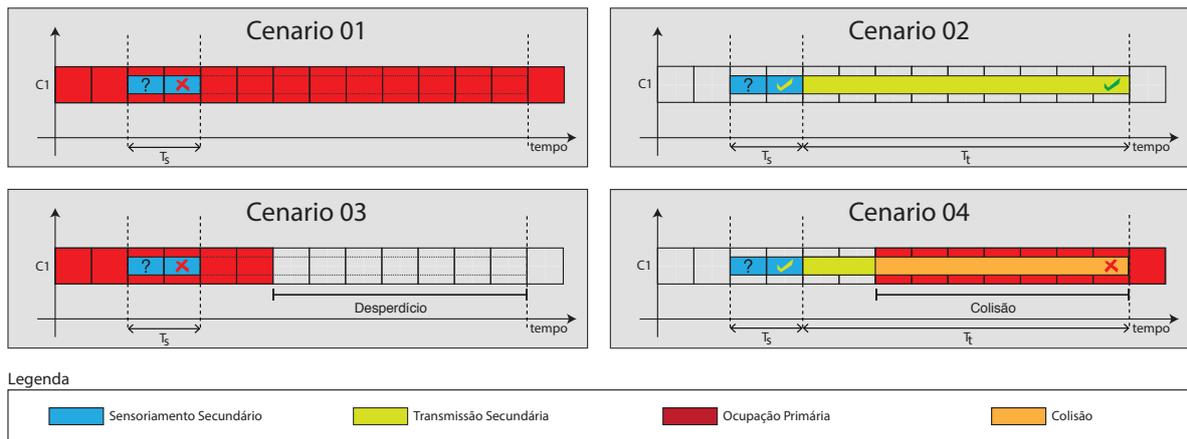


Figura 4.3: Possíveis resultados do sensoriamento e exploração do espectro.

estar disponível. Neste caso, o canal não será utilizado, desperdiçando uma possibilidade de reuso. No cenário 4, o canal é verificado como disponível e, durante a transmissão de dados, o espectro passa a ser utilizado por usuários primários causando uma colisão entre comunicações e invalidando os dados transmitidos pelo US. Nos exemplos listados demonstra-se que a não garantia de acesso ao espectro afeta o uso independentemente da capacidade de sensoriamento de um US. Percebem-se três possíveis resultados para o acesso ao espectro:

- **Indisponibilidade de Espectro:** Ocorre quando nenhum dos canais alocados à comunicação está disponível, e não é possível prosseguir para a etapa de transmissão;
- **Falha na Transmissão:** Ocorre quando há algum tipo de colisão durante a transmissão do pacote de dados;
- **Sucesso na Transmissão:** Ocorre quando ambos, o sensoriamento e a transmissão ocorrem sem que sejam percebidos problemas.

Quando múltiplos canais são avaliados, o sensoriamento é feito de forma sequencial, um canal por vez, com a transmissão de dados iniciada após o fim do sensoriamento, similarmente ao exemplo da Figura 4.2. A presença de usuários primários em um ou mais canais de dados utilizados para a transmissão de dados causa colisão e conseqüente falha na transmissão secundária, similar ao considerado por Hsu et al. [65]. Os possíveis resultados de comunicação listados, no entanto, são os mesmos na presença e no uso de múltiplos canais. Com base na estrutura de acesso ao espectro descrita, é possível definir mecanismos para avaliar o acesso ao espectro.

4.3 Métricas para Avaliação do Uso do Espectro

A eficiência do acesso dinâmico pode ser avaliada analiticamente em função de certos parâmetros como, por exemplo, em função da dimensão do espectro acessível (\mathcal{K}), dos

tempos de sensoriamento (T_s), transmissão (T_t) e do número de canais alocados a cada comunicação (λ). Com base nestes parâmetros, este trabalho define três métricas para avaliação do uso do espectro: o tempo de uma comunicação (*Métrica 1*), a vazão de uma rede (*Métrica 2*) e a razão entre vazão e tempo de comunicação (*Métrica 3*). Para simplificar a avaliação, as métricas serão avaliadas, inicialmente, sem considerar a presença de usuários primários, ou seja, quando todo o espectro pode ser utilizado. Esta decisão foi tomada pois a modelagem matemática para descrever a interferência de usuários primários não é trivial.

Métrica 1: O tempo total de comunicação $\mathcal{T}(\lambda)$ é definido como a soma do tempo necessário para sensoriar os λ canais alocados à comunicação e o tempo necessário para transmitir o pacote de dados, conforme apresentado na Equação (4.4):

$$\mathcal{T}(\lambda) = \lambda \cdot T_s + \mathcal{T}_D \quad (4.4)$$

Métrica 2: A taxa de transmissão $\mathcal{V}(\lambda)$ é definida como a razão da quantidade de dados enviados por um conjunto de transmissões pela duração das transmissões em questão, conforme apresentado na Equação (4.5):

$$\mathcal{V}(\lambda) = \frac{\frac{\kappa}{\lambda} \cdot T_t}{\lambda \cdot T_s + \mathcal{T}_D} \quad (4.5)$$

O tempo total de comunicação e vazão são métricas cuja maximização não pode ser obtida simultaneamente. Desta forma, para buscar um equilíbrio entre as métricas 1 e 2 define-se a métrica 3.

Métrica 3: A proporção entre a vazão da rede (*Métrica 1*) e o tempo total de comunicação (*Métrica 2*) é definida pela razão de seus valores, conforme expressado na Equação (4.6):

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{\mathcal{V}(\lambda)}{\mathcal{T}(\lambda)} = \frac{\frac{\kappa}{\lambda} \cdot T_t}{(\lambda \cdot T_s + \mathcal{T}_D)^2} \quad (4.6)$$

A Equação (4.7) apresenta o resultado da derivação da Equação (4.6) em função de λ :

$$\frac{d}{d\lambda} \mathcal{R}(\lambda) = \frac{\kappa \cdot T_t \cdot (T_t - 3 \cdot T_s \cdot \lambda^2)}{(T_t + T_s \cdot \lambda^2)^3} \quad (4.7)$$

Por fim, a Equação (4.8) define o número de canais que maximiza a razão entre a vazão da rede e o tempo de comunicação:

$$\lambda = \sqrt{\frac{T_t}{3 \cdot T_s}} \quad (4.8)$$

O valor obtido pela Equação (4.8) maximiza a métrica 3 com base nos valores de T_t e T_s e pode ser utilizado na divisão do espectro.

4.4 Análise das Métricas

Nesta seção o modelo de rede descrito ao longo deste capítulo será analisado. Os estudos têm como objetivo verificar a influência dos parâmetros listados na Tabela 4.1 utilizando as equações listadas. Dentre os objetivos definidos, busca-se demonstrar a existência de valores de λ que maximizam a exploração do espectro considerando as equações definidas. Os conjuntos iniciais de resultados apresentados avaliam a comunicação secundária independentemente do acesso primário, ou seja, consideram um cenário de disponibilidade plena ($P = 100\%$).

As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam a avaliação do tempo de comunicação e vazão de uma rede que segue o modelo de comunicação definido na Seção 4.1. No cenário avaliado, considera-se a existência de $\mathcal{K} = 20$ canais, divididos tal que cada comunicação possua exatamente λ canais. Na Figura 4.4 cada linha corresponde a um valor de T_t sobre os quais são traçadas as durações dos tempos de comunicação com base na Equação (4.4). O tempo total de cada comunicação é dado em função do tempo de sensoriamento e transmissão e, para cada valor de T_t , há um valor de λ para cada curva em que o tempo total é minimizado. Naturalmente, conforme um maior número de canais é alocado a cada comunicação, maior tempo é gasto em sensoriamento, o que caracteriza um desperdício de oportunidades, reduzindo a vazão da rede. Para cada valor de T_t , o número de canais alocado por comunicação (λ) que minimiza o tempo total de transmissão \mathcal{T} das comunicações é mínimo quando para λ entre 3 e 6. Com um aumento no tempo de transmissão T_t , os melhores resultados em termos do tempo de comunicação $\mathcal{T}(\lambda)$ ocorrem quando há um aumento no número de canais λ alocados por transmissão.

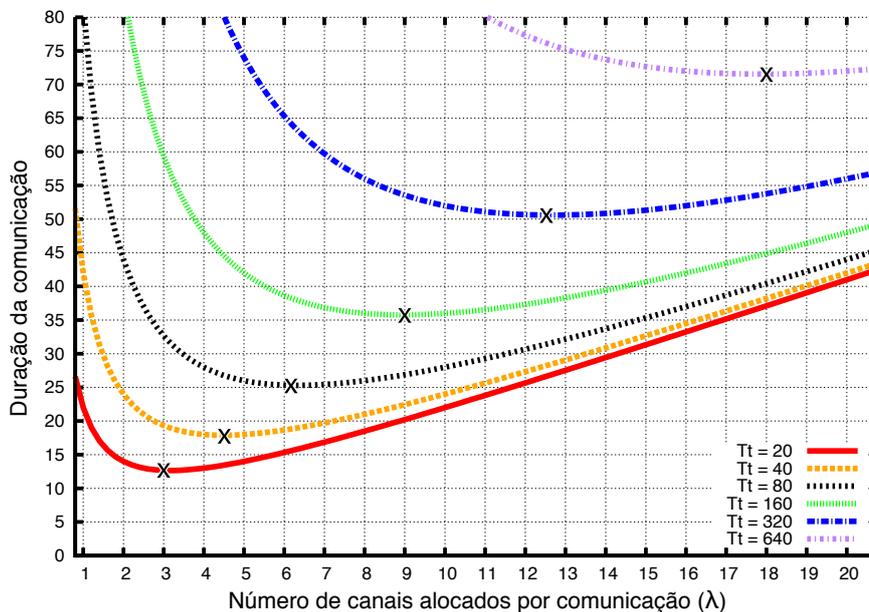


Figura 4.4: Avaliação da variações do tempo de comunicação segundo a Equação (4.4).

Na Figura 4.5 são apresentadas vazões para diversos valores de T_t em função do número de canais λ alocados a cada comunicação. Diferentemente do tempo de comunicação, a

variação da vazão da rede é caracterizada por uma função estritamente decrescente. A diferença na distribuição das duas métricas avaliadas denota a necessidade de avaliação do equilíbrio entre as métricas 1 e 2. Avaliando os valores que minimizam os tempos de comunicação, marcados em cada curva da Figura 4.5 por um \times , percebe-se que há uma redução de 20% a 30% na vazão da rede, resultado do aumento do custo de sensoriamento. A redução percebida na vazão é razoável, entretanto permite uma redução do tempo total de comunicação (\mathcal{T}) de 40% quando $T_t = 20$ e superior a 90% quando $T_t = 640$. Os valores escolhidos para T_s foram definidos com base nos valores de T_t de forma que fosse possível avaliar cenários onde o pacote de dados fosse proporcionalmente pequeno ou grande comparado com o tempo de sensoriamento.

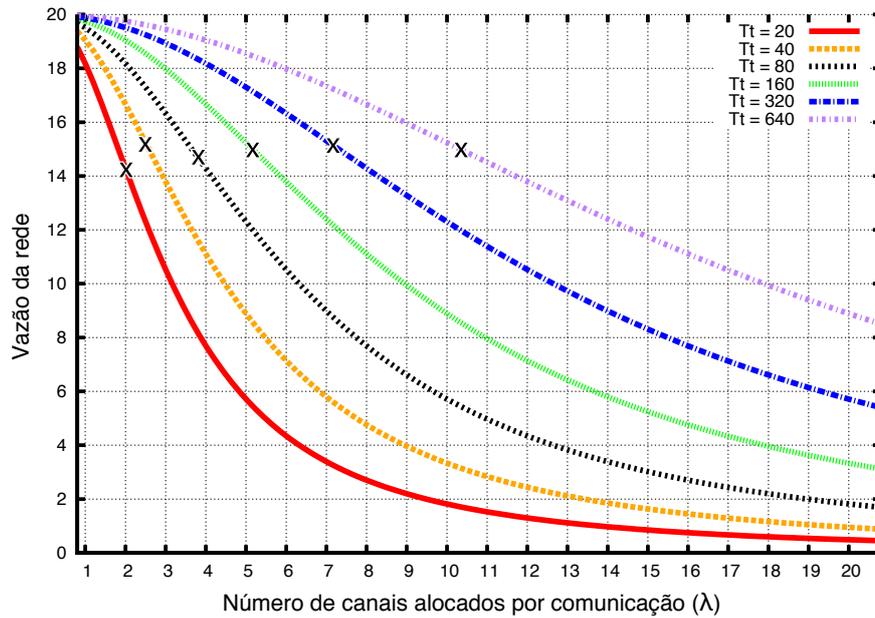


Figura 4.5: Avaliação da variações da vazão segundo a Equação (4.5).

Com base nas equações apresentadas na Seção 4.3 foi avaliada a variação da razão entre vazão e tempo de comunicação em diversos cenários (métrica 3). A Figura 4.6 apresenta os resultados da análise da Equação (4.6). Nela são apresentadas as variações da métrica 3 para múltiplos tamanhos do pacote de dados secundário (T_t). Em cada curva, um único valor maximiza a razão, com valores variando de $\lambda = 2$ a $\lambda = 10$. Naturalmente, conforme o pacote de dados é maior, também será o número de canais que maximiza a razão. Entretanto, para grande parte dos cenários, o valor máximo está entre $2 \leq \lambda \leq 5$. Esta constatação é importante, pois os mesmos valores que maximizam a Métrica 3 minimizam a Métrica 1.

A Figura 4.7 avalia o impacto do tempo de sensoriamento T_t no processo de comunicação com base na Equação (4.8) tal que cada curva traçada no gráfico representa um valor de T_s . A diferença entre quaisquer dois valores de T_t demonstra que quanto maior é o tempo de sensoriamento, menor é o número de canais que maximiza o tempo total de comunicação. Isto ocorre porque o tempo total gasto em sensoriamento cresce em proporção direta a λ e, com o aumento do valor de T_t , o tempo total de sensoriamento

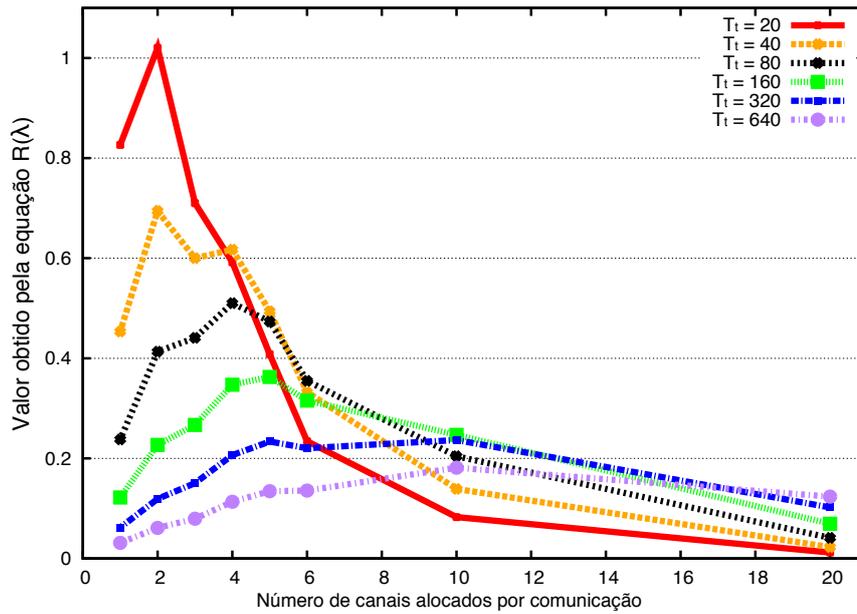


Figura 4.6: Variação da Equação (4.6) para $T_s = 2$.

se torna cada vez mais importante. Este fato pode ser verificado avaliando a diferença entre os valores de λ para cenários com os mesmos valores de T_t e diferentes valores de T_s . Nestes casos, para um mesmo valor de T_t , o tempo total de sensoriamento passa a ter um custo extremamente elevado conforme o valor de T_s aumenta, não sendo atrativo alocar maior quantidade de canais por cada comunicação. Excepcionalmente, quando $T_t = 1$, o tempo de transmissão \mathcal{T}_D é responsável por maior parte do custo do acesso ao espectro e, portanto, a divisão do pacote de dados em maior número de canais é uma tática eficiente para minimizar o tempo de comunicação e maximizar a razão entre vazão e tempo de comunicação.

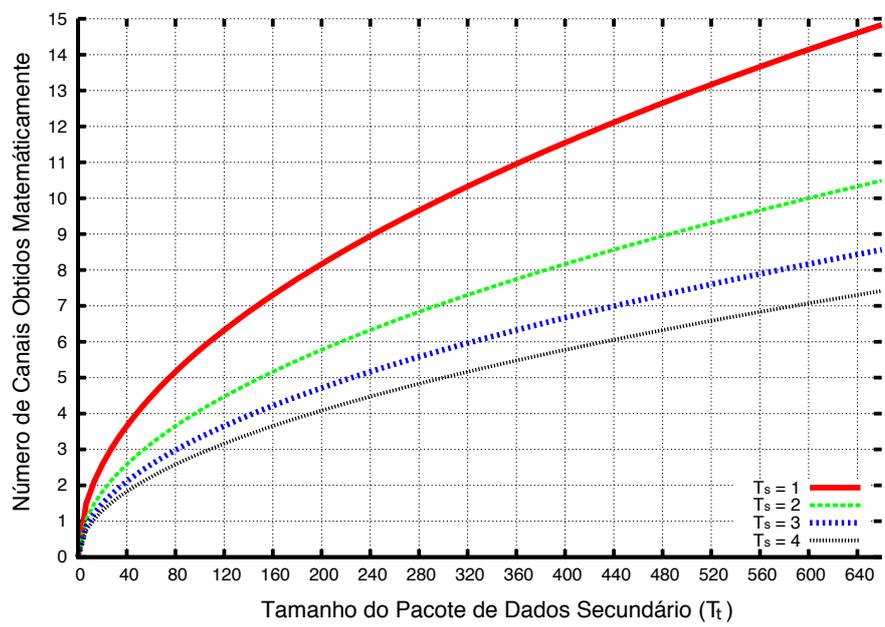


Figura 4.7: Valores de λ calculados com base na Equação (4.8).

Capítulo 5

Modelo de Exploração

O capítulo anterior define um modelo básico de comunicação utilizado na parametrização do acesso ao espectro. Este modelo é utilizado na definição do protocolo de controle de acesso ao meio focado na coordenação entre usuários para exploração do espectro. Este protocolo será descrito neste capítulo, bem como uma série de técnicas propostas para otimizar seu funcionamento. Serão apresentados resultados de simulação avaliando a influência dos parâmetros de caracterização do espectro e das técnicas propostas.

5.1 Protocolo de Comunicação

Nesta seção é apresentado o protocolo de comunicação proposto neste trabalho. Para tal, considere uma rede secundária como sendo formada por um grupo de USs conectados diretamente entre si. Cada US desta rede possui um transceptor, utilizado para acessar um conjunto de canais de dados C e um canal de controle global, utilizado para a coordenação do acesso ao espectro. O número de usuários secundários na rede é suficientemente grande para que, em um determinado momento, as oportunidades de espectro sejam sempre exploradas.

O protocolo de comunicação proposto é detalhado no Algoritmo 1 e é dividido em três etapas básicas:

- **Coordenação:** Linhas 1 a 8, onde usuários acessam o canal de controle com o propósito de garantir uma divisão do espectro de forma eficiente e justa. Usuários divulgam suas intenções de transmissão e conhecimento sobre o espectro para os demais nós. As informações compartilhadas por US são utilizadas para dividir o espectro, e o processo de coordenação tem como saída a duração máxima do tempo de comunicação e a divisão do canais.
- **Sensoriamento:** Linhas 10 a 14, onde, com base na divisão do espectro, usuários sensoriam os canais alocados a suas comunicações.
- **Transmissão:** Linha 16, onde os usuários utilizam os canais disponíveis para transmitir seus pacotes de dados.

Algoritmo 1 Protocolo de Comunicação

- 1: USs acessam o canal de controle;
 - 2: **PARA** cada usuário u_i na rede **FAÇA**
 - 3: **SE** u_i transmitiu/recebeu dados na última rodada **ENTÃO**
 - 4: u_i divulga o estado dos canais sensorizados e os resultados de sua comunicação.
 - 5: **FIM (SE)**
 - 6: **FIM (PARA)**
 - 7: Usuários definem λ utilizando a Equação (4.8);
 - 8: Divisão do Espectro em \mathcal{K}/λ comunicações.
 - 9: **PARA** Cada par de comunicação (e_i, e_j) **FAÇA**
 - 10: **PARA** cada canal c_i alocado a um par de transmissão (e_i, e_j) **FAÇA**
 - 11: Usuários sensoriam o canal c_i durante t_s UTs;
 - 12: **SE** o canal estiver disponível para ambos e_i e e_j **ENTÃO**
 - 13: O canal é marcado para uso na transmissão de dados;
 - 14: **FIM (SE)**
 - 15: **FIM (PARA)**
 - 16: u_i transmite dados para u_j nos canais disponíveis para ambos os usuários;
 - 17: **FIM (PARA)**
-

O Protocolo de comunicação proposto contém três etapas distintas. Entretanto, o foco deste trabalho é avaliar aspectos da parametrização das comunicações primárias e secundárias no reuso de espectro. Por este motivo, as avaliações concentram-se no uso dos canais de dados. No entanto, o processo de coordenação ocorre no canal de controle. Logo, enquanto a coordenação é parte fundamental do controle de acesso ao meio, esta etapa não é influenciada pelos parâmetros de comunicação definidos no Capítulo 4 e, portanto, não tem seu custo avaliado. A Figura 5.1, ilustra como o ciclo de comunicação é percebido neste trabalho.

Para exemplificar o funcionamento do protocolo de comunicação definido no Algoritmo 1, considere o processo de comunicação ilustrado pela Figura 5.2. No cenário ilustrado nesta figura, $T_s = 1$, $T_t^{US} = 20$ e $\mathcal{K} = 4$. No início do ciclo de comunicação, os usuários da rede considerada no exemplo migram para o canal de controle. Os usuários trocam informações e, com base na Equação (4.8), define-se $\lambda = 2$. Desta forma duas comunicações podem ocorrer simultaneamente, com os canais $\{c_1, c_2\}$ alocados para comunicação A e $\{c_3, c_4\}$ alocados à comunicação B. Com base na divisão do espectro os usuários iniciam o processo de sensoriamento de dados. Os usuários da transmissão A sensoriam os canais alocados a sua comunicação e verificam que ambos estão disponíveis. Simultaneamente, os usuários responsáveis pela transmissão B sensoriam os canais c_3 e c_4 e verificam que o canal c_3 está ocupado. Dado que o tempo de transmissão, definido pela Equação (4.1), é $\mathcal{T}_D = 10$, os usuários da comunicação A (2 canais disponíveis) transferem um pacote de $T_t^{US} = 20$ UTs, enquanto os usuários da comunicação B (1 canal disponível) transferem um pacote de $T_t^{US} = 10$ UTs. Ao fim das transferências de dados, o ciclo de comunicação é finalizado e os usuários retornam ao canal de controle.

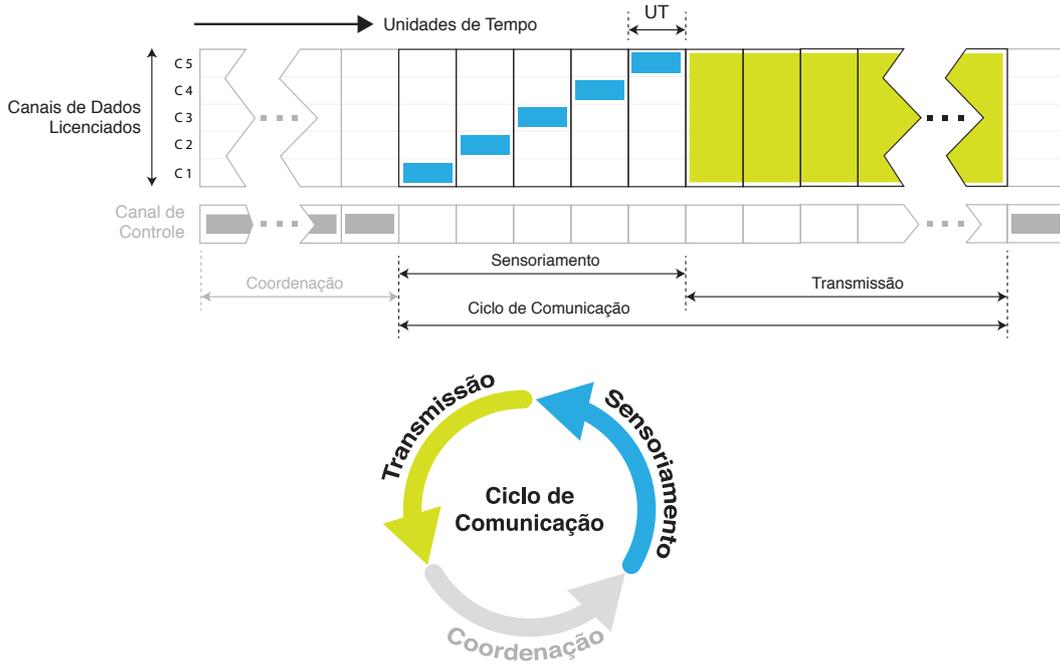


Figura 5.1: Ciclo de Comunicação.

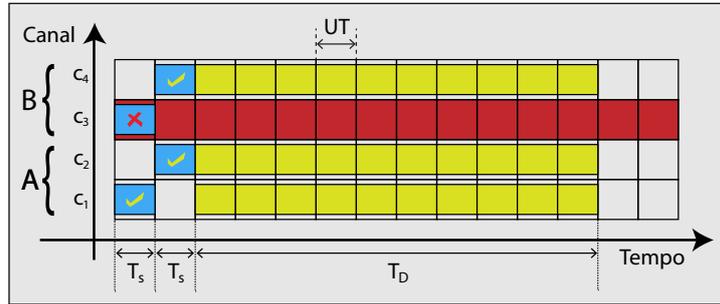


Figura 5.2: Exemplo de processo de comunicação com 4 canais de dados.

Há cenários onde a divisão do espectro não é perfeita e um subconjunto de canais não é alocado a nenhuma comunicação. Neste caso, para que não haja desperdício, os canais remanescentes são agrupados em uma comunicação adicional. Apesar de o número de canais alocado a comunicação adicional ser inferior ao restante, o processo de comunicação permanece sincronizado com o tempo total \mathcal{T}_D sendo o mesmo. Isto significa que o tamanho do pacote de dados enviado por esta comunicação é definido tal que seu \mathcal{T}_D seja o mesmo para todos. A dimensão do conjunto de comunicações é definida de forma que

$$\mathcal{C} = \begin{cases} \mathcal{K} + 1, & (\mathcal{K} - \kappa/\lambda \cdot \mathcal{K}) \neq 0 \\ \mathcal{K}, & (\mathcal{K} - \kappa/\lambda \cdot \mathcal{K}) = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

onde \mathcal{C} representa o número de comunicações ao final da divisão do espectro.

5.2 Simulador de Comunicações

O simulador utilizado foi desenvolvido especificamente para este trabalho de forma que seja possível controlar o ambiente de simulação em função dos parâmetros listados na Tabela 5.1. A ocupação do espectro gerada pelo simulador é feita de forma que cada canal seja ocupado por um único usuário primário. Esta especificidade foi considerada necessária para que fosse possível garantir compatibilidade da disponibilidade P proposta com os traços gerados pelo simulador. Os parâmetros que caracterizam a ocupação do espectro incluem ambos os tempos de transmissão de UPs e USs. Portanto, para diferenciar o acesso primário do secundário, o tamanho dos pacotes de dados primários será representado por T_t^{UP} e o tamanho de pacotes secundários por T_t^{US} , ambos em UTs. Estes parâmetros fazem parte de um conjunto utilizado na definição do ambiente de simulação.

Tabela 5.1: Parâmetros de simulação.

Variável	Valores Simulados
\mathcal{K}	10, 20, 30, 40 e 50
λ	1 a 10
P	50% a 90%
h_P	20%
v_P	20%
H	0,8
T_t^{UP}	5 a 640 UTs
T_t^{US}	10 a 80 UTs
T_s	1 e 2 UTs

O processo de simulação é dividido em duas etapas fundamentais conforme diagramado na Figura 5.3. O primeiro componente de simulação, nomeado *Gerador de Traços*, é responsável pela construção do estado do espectro ao longo da simulação. O segundo componente da simulação, chamado de *Simulador de Comunicações*, é responsável pela simulação da comunicação secundária no espectro gerado anteriormente. Ambos os componentes são gerenciados e interligados por um gerenciador responsável pela passagem de parâmetros e coleta de dados, além de outras tarefas. Nas próximas subseções, o simulador será descrito em maior detalhe e dar-se-á ênfase ao funcionamento dos seus componentes principais.

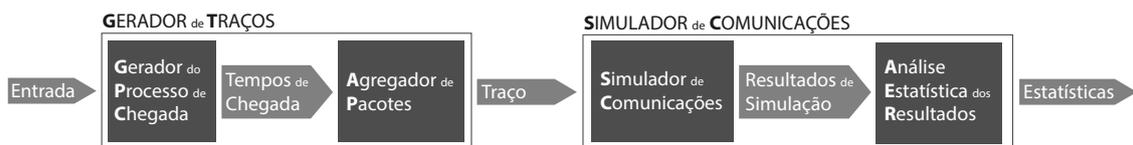


Figura 5.3: Arquitetura Geral do Simulador.

5.2.1 Gerador de Traços

O gerador de traços é o componente do simulador responsável pela construção do estado do espectro primário baseado nos parâmetros de entrada recebidos. Além dos parâmetros definidos na Tabela 5.1, são utilizados como parâmetros o número Ciclos de Comunicação R , o número de Variações na Disponibilidade do Espectro D_p e a variabilidade da Taxa de Disponibilidade do Espectro v_p .

Primeiramente, P , h_p e v_p são utilizados para definir as características gerais da disponibilidade do espectro. O valor atribuído à P define a média geral da disponibilidade do espectro e a homogeneidade h_p descreve o quanto cada canal varia em relação à média global P , conforme definido na Equação (4.3). Com estes parâmetros define-se a disponibilidade média de cada canal p_i .

O uso do espectro varia em função do tempo. Desta forma, considera-se que o valor de P varia em função do tempo com base na variabilidade da taxa de disponibilidade v_p . Com base no valor de D_p , são selecionadas, utilizando uma distribuição uniforme, as taxas de disponibilidade de cada canal para cada componente temporal. A tabela resultante é avaliada em termos da média de seus valores e, caso a diferença entre esta média e o valor original de P seja inferior a 5%, ela é utilizada na produção do traço do espectro. Caso contrário, o processo de obtenção de valores é executado novamente.

O processo de coordenação, sensoriamento e transmissão de dados define um conjunto chamado de ciclo de comunicação ou rodada de transmissão. A cada rodada de transmissão, o simulador aplica o Algoritmo 1 e verifica o resultado das comunicações. Para isto, é necessário que um traço contendo o estado do espectro seja gerado.

O histórico do espectro, ou traço, é gerado individualmente para cada componente de disponibilidade de D_p no qual R/D_p rodadas de comunicação são simuladas. Este traço é definido como uma tabela de forma que cada linha representa um canal e cada coluna, uma unidade de tempo. Uma representação da matriz de estado do espectro pode ser visualizada na Figura A.3, do Anexo A. O tamanho do traço é proporcional ao tamanho do componente e os traços gerados são armazenados como um todo na memória primária. Isto é necessário para que características como autossimilaridade sejam inseridas no traço e também para que o tempo de execução seja reduzido, não sendo necessário armazenar e resgatar informações da memória secundária.

A construção do traço de cada canal é feita de forma independente em função da taxa de disponibilidade definida para o canal em questão, além do tamanho médio dos pacote de dados primários T_t^{UP} e do parâmetro de Hurst H definidos para o cenário em questão. Com base nestes parâmetros, o algoritmo utiliza um gerador de números aleatórios autossimilar baseado no Ruído Fractal Gaussiano aplicado sobre um gerador de rajadas para produzir um processo de chegada de pacotes. O processo define a distância, em unidades de tempo, entre dois pacotes e a duração média dos intervalos On e Off são definidos em função de P e T_t^{UP} , com as características de autossimilaridade sendo definidas com base em H . O processo de chegada resultante é uma sequência de números que representam tempos de chegada de pacotes na interface de rede de um usuário primário. Os tempos de chegada preenchem uma lista de unidades de tempo representadas por valores booleanos os quais correspondem à disponibilidade do canal. Por último, a taxa de disponibilidade média do componente é verificada para garantir que seja compatível com o valor definido anteriormente.

5.2.2 Simulador de Comunicações

O simulador de comunicações é responsável pela execução do protocolo proposto e seu núcleo é implementado na forma de uma máquina de estados. Para cada cenário, o simulador recebe um conjunto de parâmetros, incluindo os utilizados pelo gerador de traços, além do tamanho médio de pacotes de dados secundários T_t^{US} . Para cada componente, o simulador requisita do gerador de traços um traço e simula as múltiplas rodadas de comunicação. Assim como o gerador de traços, o simulador de comunicações é executado em uma *thread* gerenciada pelo controlador de simulação.

Transmissões são simuladas por uma classe que implementa uma máquina de estados. O modelo de máquina de estados foi escolhido por sua simplicidade, visto que não há interferência entre comunicações independentes e também porque todas as comunicações são sincronizadas e divididas em unidades de tempo. Cada comunicação é simulada individualmente e, inicialmente, uma recebe uma porção do traço que representa o estado dos canais alocados à comunicação, além do tamanho do pacote de dados T_t^{US} a ser enviado. A simulação executa a máquina de estados e armazena os resultados da simulação, como a matriz de uso do espectro, o resultado da comunicação, dentre outros. A classe que implementa a máquina de estados armazena informações obtidas durante simulação para uso futuro.

O controle das simulações é feito a partir da coleta e interpretação dos dados produzidos por cada um dos simuladores de comunicação que ocorrem durante uma rodada. A cada rodada de simulação, o gerenciador de simulação utiliza um temporizador para repassar a porção do traço atual para as comunicações e coleta o resultado de suas simulações. Os resultados são catalogados e agregados pelo gerenciador de simulação.

Dentre os resultados armazenados estão as estatísticas de uso do espectro, o resultado das comunicações e uma matriz com a representação do uso do espectro ao longo de seu uso. Estes dados são utilizados durante uma avaliação mais detalhada dos resultados, além de serem utilizados pela interface gráfica do sistema durante a execução das simulações. Ao final do processo de simulação, os resultados obtidos são repassados para uma classe de análise. Informações adicionais sobre o simulador, como a validação do tráfego gerado e arquitetura do sistema, podem ser encontradas no Apêndice A.

5.3 Avaliação da Caracterização do Espectro

Para avaliar os parâmetros de caracterização no Capítulo 4, apresenta-se, nesta seção, uma série de resultados de simulação. Os resultados apresentados têm como base os parâmetros da Tabela 5.1 aplicados ao simulador definido na Seção 5.2. Os resultados obtidos correspondem à média de 5 conjuntos independentes de simulação, compostos por 200 mil ciclos de transmissão de dados, tal que um ciclo corresponde às três etapas definidas no Algoritmo 1. Similarmente às médias, as variações apresentadas são obtidas com base nos 5 conjuntos de dados e definem intervalos de confiança de 95%.

5.3.1 Influência do Número de Canais de Dados (\mathcal{K})

Os resultados de simulação que avaliam a influência do número de canais acessíveis \mathcal{K} no uso do espectro são apresentados na Figura 5.4. Cada curva representa a variação

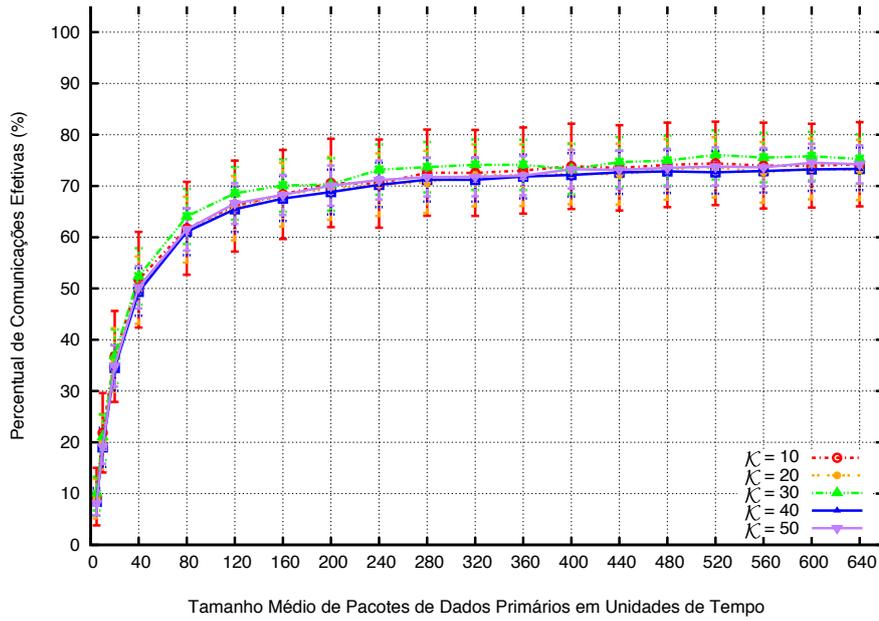


Figura 5.4: Análise da influência da dimensão do espectro no percentual de sucessos para $P = 50\%$ e $T_t^{US} = 20$.

do percentual de sucessos em função do tamanho dos pacotes primários T_t^{US} . Percebe-se que o percentual de sucessos não varia em função de \mathcal{K} , demonstrando uma constância no uso do espectro independente da dimensão do espectro acessível. Este resultado reflete a natureza colaborativa do modelo proposto, pois considera-se que há usuários suficientes para que todo o espectro seja explorado. Conforme o número de canais aumenta, mais comunicações ocorrem simultaneamente. Dado que a dimensão do espectro não interfere nas estatísticas do acesso secundário, para o restante das simulações apresentadas tem-se $\mathcal{K} = 20$.

5.3.2 Influência do Número de Canais por Transmissão (λ)

A avaliação da influência de λ em um cenário de acesso secundário onde $\mathcal{K} = 20$, $T_s = 2$, $T_t^{US} = 80$ e $T_t^{UP} = 160$ é apresentada na Figura 5.5. Os resultados apresentados são listados na forma de colunas, agrupadas com base em seus valores de λ . Cada coluna apresenta a probabilidade acumulada de ocorrência dos possíveis resultados de comunicação para uma taxa de disponibilidade média do espectro P . Avaliação dos resultados de simulação de um mesmo valor de P denotam que o cenário onde o percentual de sucessos (coluna verde) é maximizado é $\lambda = 4$. Dado que pela Equação (4.8) é $\lambda = 3,7$ neste cenário, há uma coesão entre os resultados matemáticos e de simulação. Resultados similares foram obtidos em outros conjuntos de simulações, reforçando a análise matemática feita neste capítulo. Considerando o tempo de comunicação $\mathcal{T}(\lambda)$ como um reflexo do número de canais alocados para cada transmissão de dados, ambos o percentual de sucesso e tempo de comunicação têm seus melhores resultados para o mesmo valor de λ . Esta relação pode ser percebida em maior detalhe comparando a curva da duração do tempos de comunicação da Figura 4.5 onde $T_t^{US} = 80$ com os resultados da Figura 4.6.

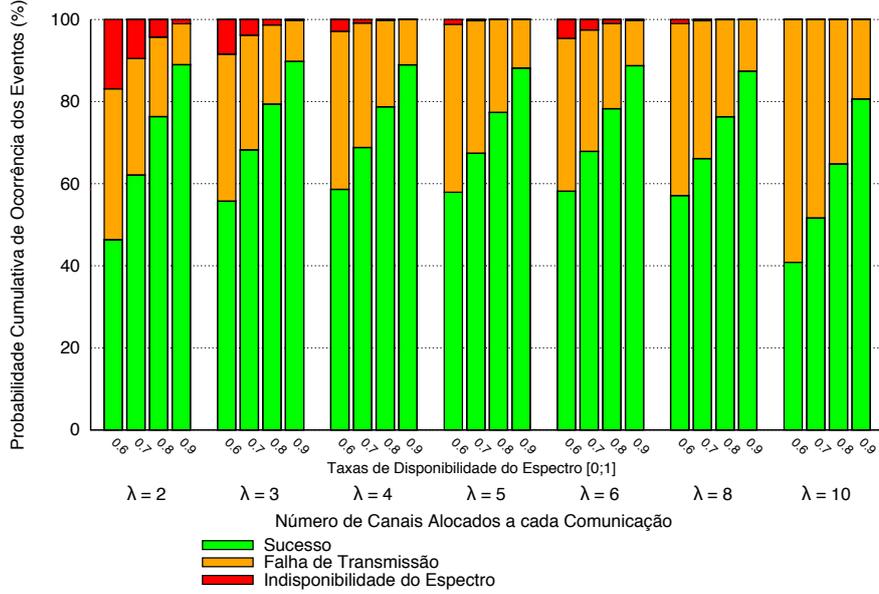


Figura 5.5: Análise da influência do número de canais alocados por comunicação no percentual de sucessos para $T_t^{US} = 80$.

Neste caso, ambas as curvas possuem melhor resultado em ($\lambda = 4$) e pior resultado em ($\lambda = 10$). A diferença entre o pior e melhor caso representa um ganho de até 1,48 vezes o total de sucessos.

5.3.3 Influência da Disponibilidade Média do Espectro (P)

Avaliação da influência de P no percentual de sucessos na transmissão de dados em função da variação do valor de T_t^{UP} pode ser feita com auxílio da Figura 5.6. Nesta figura são traçadas curvas que representam os resultados para um valor de P em função da variação de T_t^{UP} e para $T_t^{US} = 40$. Naturalmente, uma maior disponibilidade implica um aumento na taxa de sucessos. Nos resultados apresentados, o aumento da taxa de disponibilidade promove uma taxa de sucesso de até 98% para $P = 90\%$ ao passo que para $P = 50\%$, o menor percentual de sucessos é de 1,3%. Em termos absolutos, a diferença de $P = 50\%$ e $P = 90\%$ é capaz de promover um aumento de 40,3 vezes na taxa de sucesso em $T_t^{UP} = 5$. Para $T_t^{UP} = 640$, no entanto, a diferença no percentual de sucessos entre $P = 50\%$ e $P = 90\%$ decai de 50,8% para 26,4%. Para este último caso, o aumento é de 1,37 vezes a taxa de sucesso.

A taxa de disponibilidade caracteriza o percentual de UTs em que o espectro está disponível. Entretanto, a capacidade de exploração das oportunidades não depende somente do valor de P mas também do tamanho do pacote primário T_t^{UP} . A comparação dos cenários ($T_t^{UP} = 5, P = 90\%$) e ($T_t^{UP} = 120, P = 50\%$) denota a limitação da influência de P no espectro. Enquanto no primeiro cenário o percentual de sucessos é 52,1%, no segundo o percentual de sucessos é de 57,51%. Ressalta-se que a disponibilidade do primeiro cenário supera em 40% a taxa de disponibilidade do segundo cenário. Esta diferença, no entanto, não se traduz em um maior percentual de comunicações efetivas.

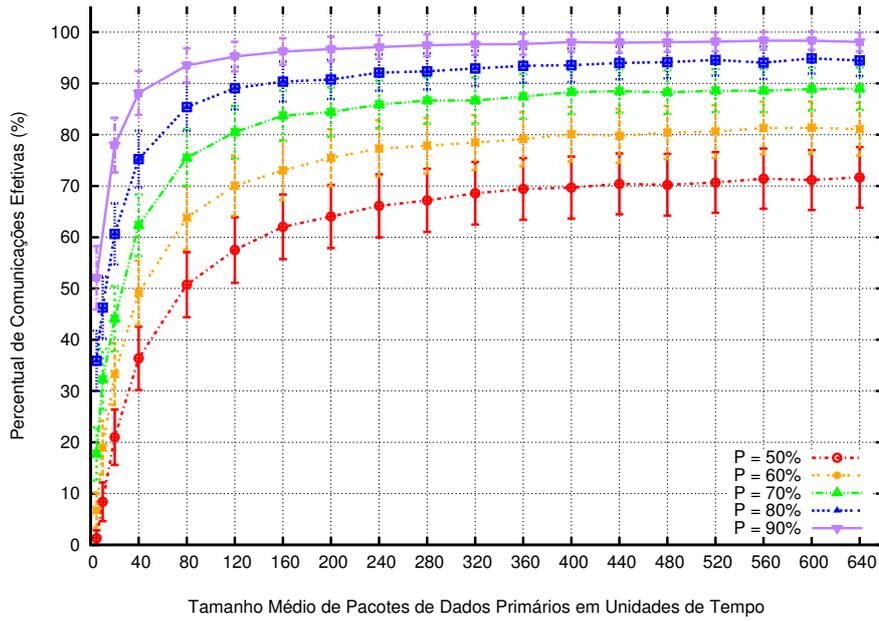


Figura 5.6: Análise da variação de P e T_t^{UP} para $T_t^{US} = 40$.

A equiparação dos valores obtidos sem necessidade de aumento no valor de P motiva a avaliação da influência do tamanho do pacote primário T_t^{UP} no uso do espectro.

5.3.4 Influência do Tamanho Médio dos Pacotes Primários (T_t^{UP})

O tamanho médio do pacote de dados enviado por usuários primários T_t^{UP} define a granularidade da disponibilidade do espectro. Ou seja, para um mesmo valor de P um aumento no tamanho médio de T_t^{UP} reflete em maiores intervalos de disponibilidade, ao passo que uma redução de T_t^{UP} implica menores intervalos de disponibilidade.

Similarmente a P , o comportamento de T_t^{UP} pode ser avaliado pela Figura 5.6. A avaliação de uma curva P denota que um aumento no tamanho dos pacotes primários implica um T_t^{UP} aumento no percentual de sucessos de transmissão. Para $P = 50\%$, a diferença entre $T_t^{UP} = 5$ e $T_t^{UP} = 640$ resulta em um aumento de 55,4 vezes no percentual de sucessos, enquanto para $P = 90\%$ o aumento no valor de T_t^{UP} resulta em um aumento no percentual de sucessos de 1,4 vezes. Isto significa que o tamanho do pacote de dados primário T_t^{UP} possui mais influência no número de sucessos em uma rede secundária que a taxa de disponibilidade. Caso ambos T_t^{UP} e P sejam maximizados, aumento no percentual de sucessos chega a 75,8 vezes.

Percebe-se na Figura 5.6 que há um ponto de saturação a partir do qual aumentos em T_t^{UP} não são traduzidos em ganhos significativos no acesso ao espectro. A partir de $T_t^{UP} = 400$, aumentos no valor de T_t^{UP} não refletem ganhos expressivos no percentual de sucessos. Neste cenário $T_t^{US} = 40$ e, portanto, percebe-se que a diferença de uma ordem de grandeza entre T_t^{UP} e T_t^{US} é suficiente para estagnar o crescimento do percentual de sucessos.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados de simulação para $T_t^{US} = \{20, 80\}$. Embora não seja possível verificar com exatidão a ocorrência deste evento para $T_t^{US} =$

80, percebe-se que há uma tendência nos resultados apresentados. Em todos os casos $T_t^{UP}/T_t^{US} = 10$ é um limiar a partir do qual não há ganhos significativos no uso do espectro em função do aumento de T_t^{UP} . Esta discussão motiva uma avaliação mais detalhada do tamanho dos pacotes de dados enviados por USs.

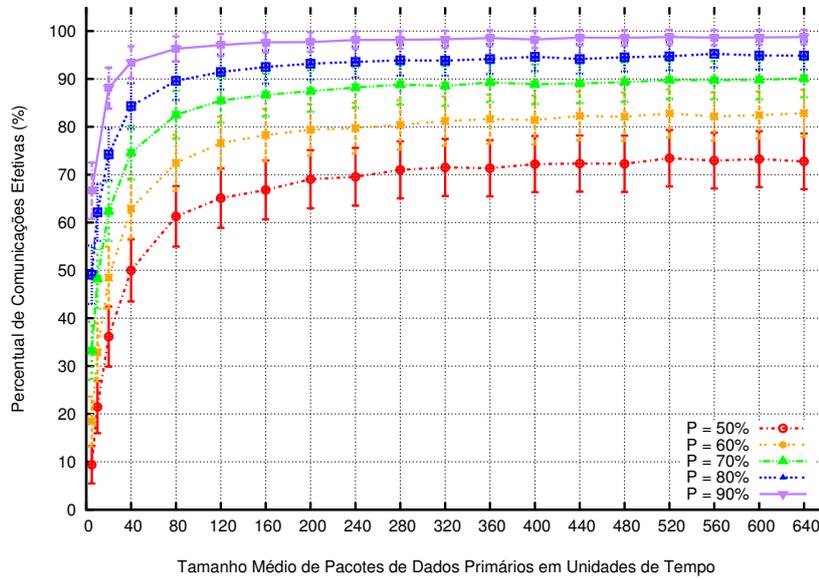


Figura 5.7: Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{US} = 20$.

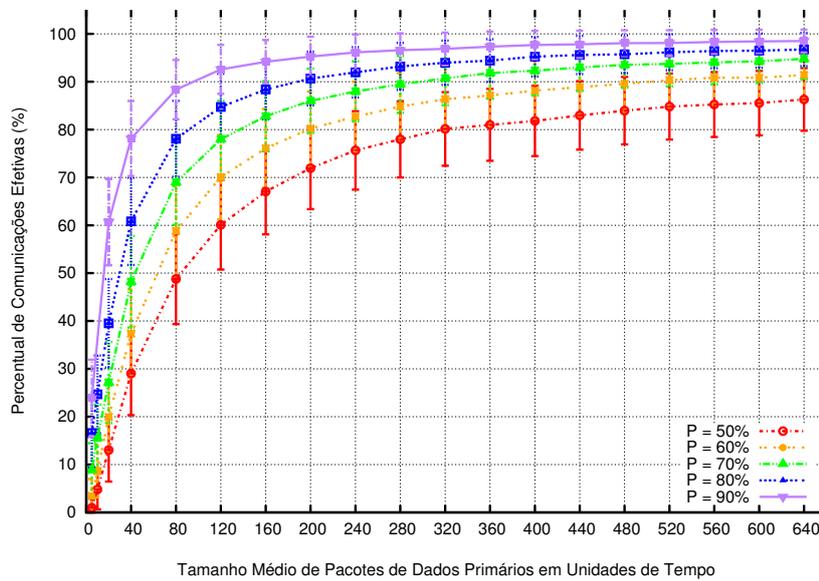


Figura 5.8: Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{US} = 80$.

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam o percentual de ocorrência dos eventos “*indisponibilidade do espectro*” e “*falha de transmissão*” para $T_t^{US} = 40$. Apresenta-se, na Figura 5.9,

o percentual das comunicações em que todos os canais encontram-se indisponíveis. A avaliação dos resultados denota que a indisponibilidade do espectro não depende do valor de T_t^{UP} , verificado pela constância dos resultados para cada curva P . Justamente por não haver variação no valor de P , a probabilidade de todos os canais de uma comunicação estarem indisponíveis durante o sensoriamento não varia.

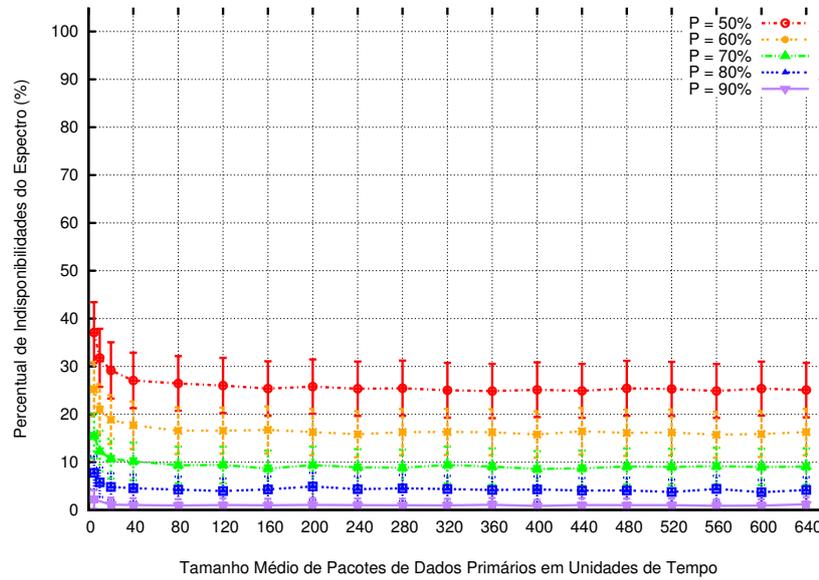


Figura 5.9: Variação do percentual de indisponibilidade do espectro para $T_t^{US} = 40$.

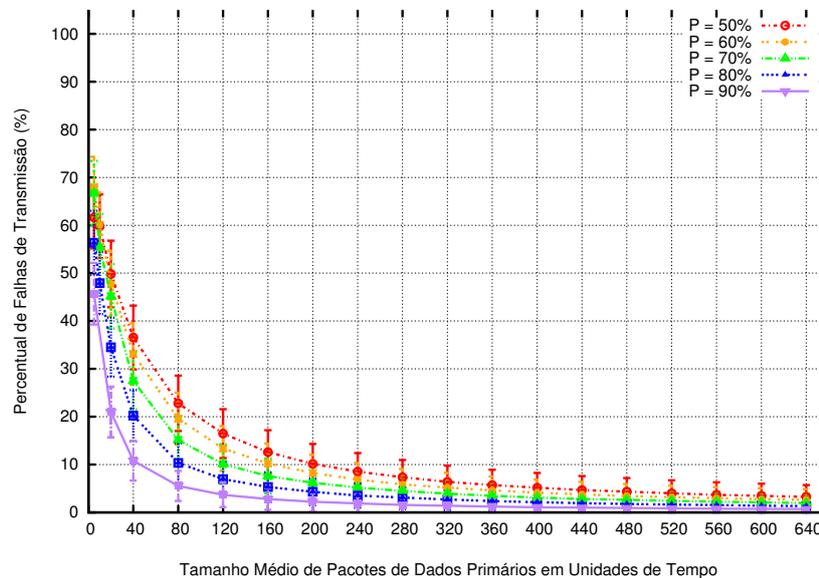


Figura 5.10: Variação do percentual de falhas de transmissão para $T_t^{US} = 40$.

Na Figura 5.10 são apresentados os percentuais de falhas de transmissão em função dos diferentes valores de P . Nela, percebe-se que o percentual de falhas é reduzido conforme

o valor de T_t^{UP} cresce. Isto ocorre, pois a granularidade das oportunidades, conforme descrito anteriormente, implica intervalos de disponibilidade progressivamente maiores e, conseqüentemente, caracterizando ambientes progressivamente mais estáveis.

5.3.5 Influência do Tamanho Médio dos Pacotes Secundários (T_t^{US})

A diferença nos resultados com base na variação de T_t^{US} apresentados na Seção 5.3.4 motiva a verificação da interferência do tamanho do pacote secundário T_t^{US} no ciclo de comunicação. Para isto apresenta-se nas Figuras 5.11 e 5.12 uma avaliação mais detalhada da influência de T_t^{US} nos resultados de comunicação. Por exemplo, dada uma mesma taxa de disponibilidade P e uma mesma média de pacotes primários T_t^{UP} , quão maior for o tamanho do pacote secundário, maior será o percentual de colisões entre transmissões primárias e secundárias. Percebe-se também que a taxa de sucessos cresce em proporção à relação $\frac{T_t^{UP}}{T_t^{US}}$. Por exemplo, os resultados presentes na Figura 5.11 em que $T_t^{US} = 20$ são equiparáveis ao da Figura 5.12 onde $T_t^{US} = 40$. Isto ocorre pois a razão $\frac{T_t^{UP}}{T_t^{US}}$ é a mesma nestes cenários. Esta relação pode ser percebida em outros cenários onde a proporção $\frac{T_t^{UP}}{T_t^{US}}$ é a mesma. Ainda, percebe-se que há um crescimento aproximadamente linear do número de sucessos em proporção direta ao crescimento na proporção entre T_t^{UP} e T_t^{US} .

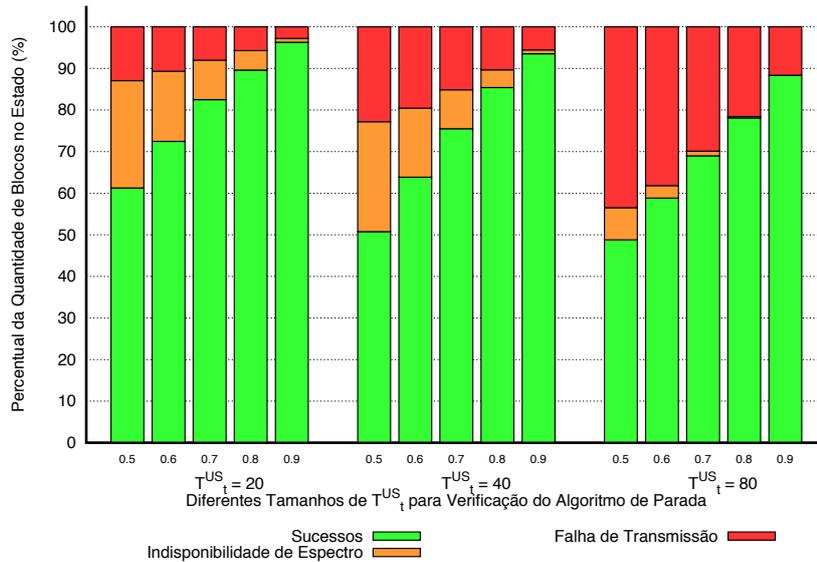


Figura 5.11: Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{UP} = 80$.

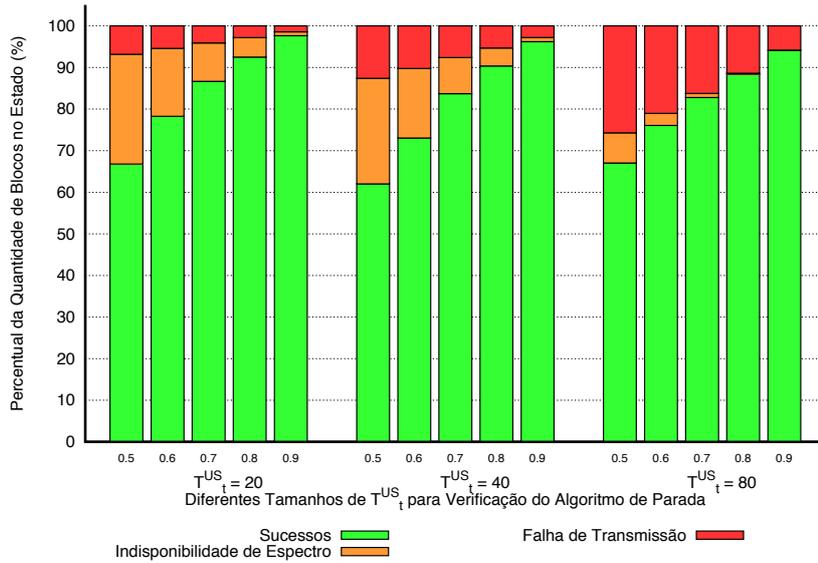


Figura 5.12: Variação do percentual de sucesso de transmissão para $T_t^{UP} = 160$.

5.4 Técnicas para Exploração do Espectro

O protocolo apresentado é bastante simples e busca representar de forma geral o modelo de rede especificado. Entretanto, ao longo do Capítulo 3, foi listada uma série de técnicas propostas especificamente com o objetivo de otimizar o acesso secundário em certos cenários. Estes trabalhos motivaram a definição de técnicas a serem incorporadas no protocolo proposto. Ao longo desta seção, cada uma das técnicas terá seu objetivo e modo de inclusão descrito e, ao final do capítulo, serão apresentados resultados avaliando seu impacto no acesso ao espectro e o impacto da variação dos parâmetros do espectro em seu funcionamento.

5.4.1 Estimação da Disponibilidade do Espectro

Para estudar a influência da flutuação da taxa de disponibilidade, o primeiro passo é a escolha de um mecanismo de percepção da adaptabilidade da disponibilidade do espectro. Este trabalho considera que as informações de disponibilidade do espectro são coletadas a cada ciclo de comunicação. Inicialmente, o estado de um canal é avaliado de acordo com o resultado do sensoriamento. Entretanto quando a comunicação sofre interferência durante sua transmissão, não é possível definir em qual canal ocorreu a falha. Assume-se, neste modelo, que a colisão em um dos λ canais não permita ao US identificar em qual canal ocorreu a interferência. Com base nas informações de disponibilidade do espectro compartilhadas pelos usuários, utiliza-se a média móvel para medir a disponibilidade de cada canal. A Equação (5.2) descreve o cálculo da média móvel empregada para medir a disponibilidade p_i^t de um canal c_i em um instante t com base na média no instante $t - 1$ e a disponibilidade instantânea do canal i no instante t , τ_i .

$$p_i^t = p_{i,t-1} \cdot (1 - \alpha) + \alpha \cdot \tau_i \quad (5.2)$$

Nesta equação, α define o peso da média instantânea τ_i em relação aos eventos passados e que τ_i é obtida com base na disponibilidade dos \mathcal{K} canais em t .

Conforme descrito no Capítulo 2, o tráfego primário pode apresentar autossimilaridade. Por este motivo é interessante implementar um modelo para medir o efeito de H na disponibilidade do espectro. Em [77], os autores introduzem um *framework* baseado no *Processo Envelope do Movimento Browniano Fractal* (FEP), utilizado para calcular a Banda Passante Equivalente (BE). Com base no valor de H , a BE superestima o uso do espectro por usuários primários. A expressão do estimador é definida pela Equação (5.3).

$$P_{BE} = 1 - ((1 - p_{it}) + K^{\frac{H-1}{H}} \cdot (\sqrt{-2 \cdot \ln(P_{loss})} \cdot \sigma)^{\frac{1}{H}} \cdot H \cdot (1 - H)^{\frac{1-H}{H}}) \quad (5.3)$$

onde $P_{i_{BE}}$ é a disponibilidade do canal c_i calculada com base na BE, p_{it} é a taxa média de uso de c_i calculada utilizando a Equação (5.2), σ é o desvio padrão de p_i , K é o tamanho do *buffer*, P_{loss} é a probabilidade de transbordo do *buffer* e H é o parâmetro de Hurst.

Dos parâmetros utilizados pela Equação (5.3), a probabilidade de disponibilidade instantânea p_{it} e o desvio padrão da disponibilidade α são obtidos com base no histórico de disponibilidade e mudam a cada rodada de comunicação. O tamanho do *buffer* K e sua probabilidade de transbordo P_{loss} , no entanto, são definidos em função do meio em que a transmissão de dados ocorre. No caso da transmissão sem-fio, considera-se os parâmetros definidos por Drummond et al. [78], ou seja, $K = 10^3$ e $P_{loss} = 10^{-3}$.

Ambas a média móvel e banda equivalente são calculadas durante a coordenação do espectro e podem ser utilizadas por técnicas que considerem a disponibilidade do espectro como parâmetro em seu funcionamento.

5.4.2 Controle de Sensoriamento

Com base na disponibilidade calculada pela média móvel ou pela banda passante, avalia-se a aplicação da técnica de controle de sensoriamento implementada por Jia et al. [14]. O objetivo desta técnica é maximizar o uso do espectro com base no custo e benefício da continuidade do ciclo de sensoriamento em detrimento da limitação no número de canais utilizados. Esta técnica é aplicada individualmente por comunicação de forma que, durante o sensoriamento, após a avaliação de cada canal c_i , o par de transmissão compare a vazão resultante do uso dos i canais sensoriados até o momento, com a vazão ponderada caso o canal $i + 1$ seja sensoriado. Para isto, estima-se a vazão caso o sensoriamento prossiga e caso ele seja interrompido.

Em Jia et al. [14], o tempo de transmissão é constante independentemente do número de canais utilizados e, para adaptar esta técnica ao modelo de rede considerado neste trabalho, a equação para vazão da comunicação foi modificada. A Equação (5.4) define a vazão após o sensoriamento de N canais dos quais $L \leq N$ encontram-se disponíveis.

$$\mathcal{V}(N, L) = \frac{[(T_t^{US} + T_s \cdot N) - (T_s \cdot N)] \cdot L}{(T_t^{US} + T_s \cdot N)} \quad (5.4)$$

Com base na Equação (5.4), a Equação (5.5) apresenta a vazão estimada da comunicação após o sensoriamento do canal $N + 1$ cuja disponibilidade é definida por p_{N+1} :

$$\mathcal{V}_{est}(N, L) = (\mathcal{V}(N, L + 1) \cdot p_{N+1}) + (\mathcal{V}(N + 1, L) \cdot (1 - p_{N+1})) \quad (5.5)$$

O algoritmo de controle de sensoriamento é incorporado no Algoritmo 1 entre as linhas 13 e 14. Caso a vazão estimada seja inferior à vazão atual ($\mathcal{V}(N, L) \geq \mathcal{V}_{est}(N, L)$), o ciclo de sensoriamento é interrompido e a transmissão de dados é iniciada, utilizando somente os canais avaliados como disponíveis até o momento. A finalização prematura do ciclo de sensoriamento se dá pela interrupção do ciclo definido na linha 13.

5.4.3 Controle do Tamanho do Pacote

O controle do tamanho de pacotes de dados é uma técnica cujo objetivo é evitar que reduções na qualidade do meio impliquem um aumento no número de falhas de transmissão [79]. Para aplicar esta técnica no protocolo proposto, define-se um modelo dividido em três etapas: (i) partida lenta, (ii) recuperação de falhas e (iii) controle de crescimento. Na inicialização da rede, o tamanho do pacote de dados secundário é dado pelo limiar inferior l . A cada ciclo de comunicação, o resultado das transmissões secundárias é catalogado de acordo com os possíveis resultados listados na Seção 4.2. Caso nenhuma falha de transmissão tenha ocorrido durante o último ciclo de comunicação, o tamanho do pacote secundário é duplicado ($T_t^{US} = T_t^{US} \cdot 2$). Caso sucessos consecutivos ocorram, o tamanho do pacote de dados cresce até que atinja um limiar máximo \mathcal{M} . Caso ocorram falhas, o número de falhas é catalogado e o tamanho do pacote de dados é mantido constante. Após o número acumulado de falhas superar \mathcal{F} , o tamanho do pacote é reduzido à sua metade ($T_t^{US} = T_t^{US}/2$) e a contagem de falhas recomeça. O pacote de dados é reduzido até o limiar l , ($T_t^{US} \geq l$). O valor anterior de T_t^{US} é armazenado e utilizado para limitar o crescimento do tamanho do pacote de dados. A partir deste momento, a cada ciclo de comunicações, aumentos no valor de T_t^{US} dependem do valor armazenado para referência. Caso não sejam verificadas falhas e T_t^{US} seja inferior ao limite de crescimento, seu valor é duplicado. Caso contrário, o sistema entra em controle de crescimento e valor de T_t^{US} é acrescido do número de canais alocados a cada comunicação no último ciclo de transmissão ($T_t^{US} = T_t^{US} + \lambda$) até que o limiar máximo \mathcal{M} seja atingido. O processo de detecção de falhas é mantido ao longo do sistema e a cada \mathcal{F} falhas o sistema retoma o estado de recuperação de falhas, repetindo os passos necessários.

5.5 Avaliação das Técnicas para Exploração do Espectro

Nesta seção são apresentadas as avaliações das técnicas para melhoria do acesso ao espectro propostas neste capítulo. Similar à avaliação da parametrização do espectro, as simulações consideram os parâmetros listados na Tabela 5.1. A avaliação das técnicas incorporadas ao protocolo descritas neste capítulo será feita de forma individual. Entretanto, dado que mais de uma técnica pode ser aplicada em conjunção, foi definido um padrão para a nomenclatura. As avaliações utilizam as seguintes variações do protocolo considerado com base no modelo do Capítulo 4:

- **MB (Modelo base)**: Utiliza o protocolo de comunicação conforme definido pelo Algoritmo 1;
- **M1 (Modelo 1)**: Considera a aplicação da técnica para controle de parada do sensoriamento definida na Seção 5.4.2 no protocolo de comunicação;

- **M1.A**: Considera que a disponibilidade do espectro P é estática, sendo definida com base na média estipulada para simulação;
- **M1.B**: Considera que a disponibilidade do espectro P é definida utilizando a média móvel definida pela Equação (5.2);
- **M1.C**: Considera que a disponibilidade do espectro P é definida utilizando a banda passante definida pela Equação (5.3);
- **M2 (Modelo 2)**: Considera a aplicação da técnica para controle do tamanho dos pacotes de dados definida na Seção 5.4.3 no protocolo de comunicação.

5.5.1 Controle de Sensoriamento

Para verificar a influência do algoritmo de controle de sensoriamento, o conjunto de simulações apresentado avalia **M1** e **M2**. A Figura 5.13 contém resultados de simulação relativos ao algoritmo de sensoriamento para $P = 50\%$, $T_t^{US} = 40$ e $\alpha = 0.01$. Os resultados apresentados são agrupados em colunas com base nos valores de T_t^{UP} simulados. Avaliando o gráfico, verifica-se que, de forma geral, a aplicação do algoritmo de parada do sensoriamento não traz grandes benefícios ao modelo proposto. Entretanto, a avaliação das diferenças apresentada na parte superior do gráfico denota que para alguns valores de T_t^{UP} percebe-se uma diferença nos resultados. Especificamente para o conjunto $T_t^{UP} = \{10, 20, 40, 80, 120\}$. Os valores deste conjunto representam os cenários onde a aplicação do algoritmo de sensoriamento promove uma melhoria no percentual de sucessos. A estimação da disponibilidade utilizando a média móvel **M1.B** permite um aumento de 1,36 vezes no percentual de sucessos. Este ganho, no entanto, ocorre para valores baixos da proporção $\frac{T_t^{UP}}{T_t^{US}}$, ou seja, cenários em que as oportunidades de acesso têm curta duração. No mesmo cenário, o uso de uma média estática **M1.A** ou banda passante equivalente **M1.C** não resulta em ganho no percentual de sucessos.

Uma redução do tamanho do pacote primário em relação ao pacote secundário aumenta a fragmentação das oportunidades de acesso. Neste caso, o aumento do número de canais utilizados para a transmissão reflete em uma redução na probabilidade de que todos os canais utilizados mantenham-se disponíveis ao longo da transmissão. Por este motivo, dos resultados gerados para $P = 90\%$, somente em $T_t^{UP} = \{5, 10\}$ o controle de sensoriamento promove ganhos.

Os resultados de simulação para $T_t^{US} = 80$ são similares aos obtidos para $T_t^{US} = 40$. Para $T_t^{US} = 80$, o conjunto de comunicações em que há um ganho é similar, resguardada a proporção dos valores de T_t^{US} , com o aumento no percentual de sucessos chegando a 2 vezes o valor quando o controle de sensoriamento não é aplicado. A melhoria nos resultados é consequência do aumento no número de canais alocados para a comunicação em função do aumento de T_t^{US} . O algoritmo de sensoriamento é aplicado até $N - 1$ vezes por comunicação, e um aumento no valor de λ implica uma maior meticulosidade do controle de sensoriamento. Conclui-se, então, que o algoritmo de sensoriamento é um mecanismo útil para valores onde a razão $\frac{T_t^{UP}}{T_t^{US}}$ encontra-se no intervalo $[0,25; 4]$. O aumento no percentual de sucessos em $T_t^{US} = 80$ é superior ao obtido em $T_t^{US} = 40$ e o número de canais alocados pela Equação (4.8) sugere que um aumento em λ resulta em um aumento no percentual de sucessos. Avaliações adicionais feitas para $T_t^{US} = 160$ comprovam este resultado.

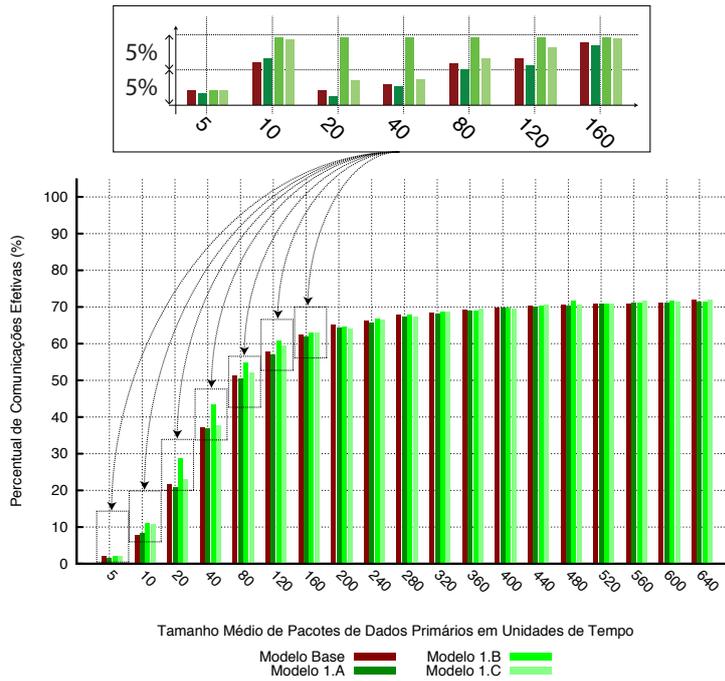


Figura 5.13: Análise da influência do algoritmo de controle de sensoriamento.

5.5.2 Controle do Tamanho do Pacote

A implementação de um modelo de controle do tamanho dos pacotes de dados enviados tem como objetivo evitar que ocorram falhas na transmissão de dados, adaptando o tamanho dos pacotes ao ambiente. Para isto os resultados listados são divididos em função do modelo de comunicação considerado, no caso **MB** e **M2**. As Figuras 5.14 e 5.15 listam as estatísticas de uso do espectro para os modelos **MB** e **M2**. Para **MB**, os resultados de simulação consideram $T_t^{US} = 80$, enquanto para **M2** foram considerados $\mathcal{F} = 3$, $l = 10$ e $\mathcal{M} = 640$. Na Figura 5.14 são traçados os percentuais de sucessos nas transmissões de dados. Similarmente ao ocorrido com o controle de sensoriamento, o algoritmo de controle do tamanho dos pacotes de dados promove um ganho para valores proporcionalmente pequenos de T_t^{UP} . De fato para $T_t^{UP} = 5$, a variação no tamanho dos pacotes de dados promove um aumento de 16 vezes no percentual de sucessos. Entretanto, a partir do momento em que o pacote de dados primário é superior ao secundário ($T_t^{UP} \geq T_t^{US}$), a aplicação do algoritmo resulta em piora no percentual de sucessos.

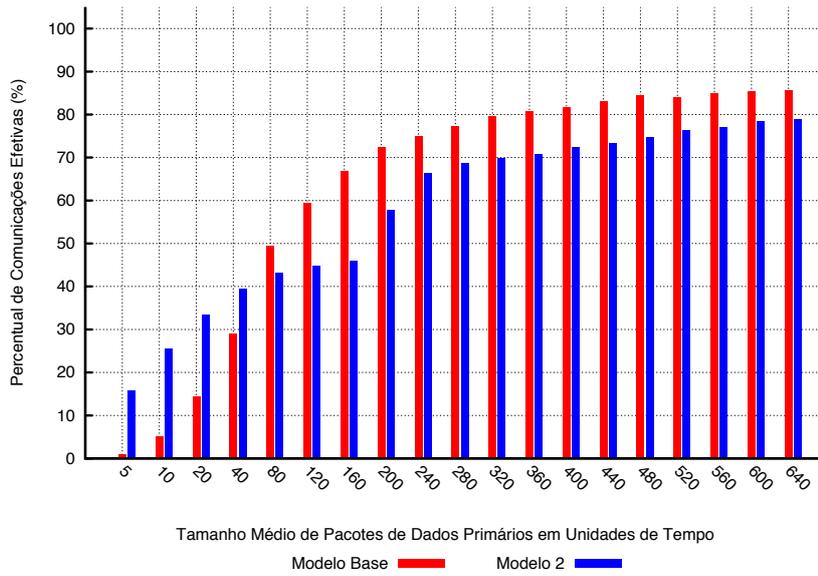


Figura 5.14: Análise da influência do algoritmo de controle do tamanho dos pacotes no percentual de sucessos para $P = 50\%$.

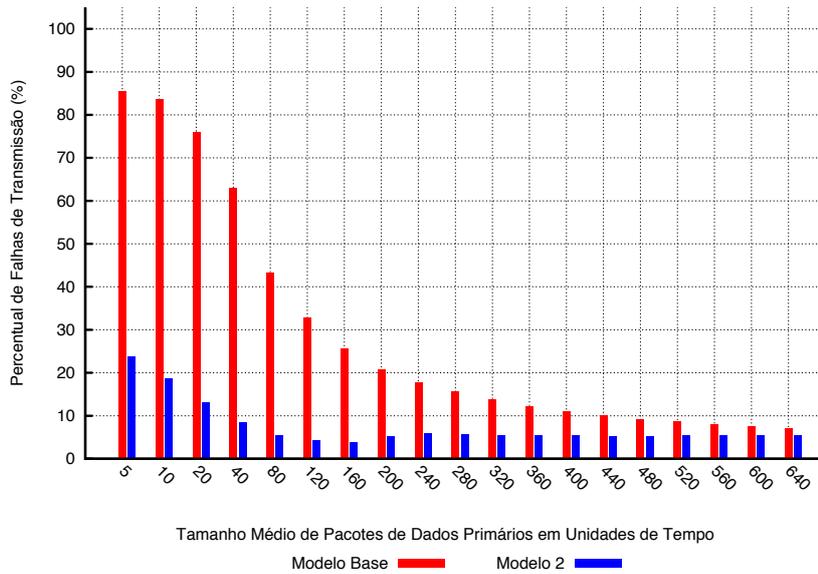


Figura 5.15: Análise da influência do algoritmo de controle do tamanho dos pacotes no percentual de falhas de transmissão para $P = 50\%$.

Observação da Figura 5.15 denota que a redução no percentual de sucessos não implica um aumento no percentual de falhas de transmissão. De fato, o percentual de falhas de transmissão é significativamente menor quando o controle de tamanho de pacotes é aplicado, em especial para os menores valores de T_t^{UP} estudados.

Embora o ajuste do tamanho de pacotes não resulte em ganhos no percentual de sucessos para todos os valores de T_t^{UP} , o percentual de falhas de transmissão é reduzido

significativamente quando o algoritmo é aplicado. Logo, considera-se que o ajuste do tamanho de pacotes minimiza o custo de retransmissão de pacotes.

5.6 Discussão

Neste trabalho, foi estudado o efeito da modelagem e parametrização da exploração do espectro. Esta parametrização considerou diversos aspectos e teve por objetivo analisar de forma mais complexa e realista o acesso secundário. A eficiência da rede foi avaliada por meio de simulação modelada com base nos parâmetros definidos ao longo do capítulo. Os resultados obtidos demonstram que os parâmetros de caracterização do espectro afetam significativamente a qualidade do acesso secundário. Tanto a disponibilidade do espectro P quanto o tamanho dos pacotes primários T_t^{UP} influenciam de forma relativamente independente a capacidade de exploração do espectro. Portanto, percebe-se como fundamental a capacidade de adaptação de USs ao ambiente em que se encontram para que utilizem as oportunidades do espectro de forma mais eficiente. Conforme apresentado na Seção 5.3.3, a maximização de P e T_t^{US} permite o aproveitamento de mais de 98% das oportunidades disponíveis. Em comparação, os resultados obtidos onde P e T_t^{US} são minimizados, o aumento no percentual de sucessos resultado da melhoria no espectro é de 75,8 vezes.

Adicionalmente, foram propostos e avaliados um conjunto de técnicas para melhoria do modelo de exploração do espectro. Estas técnicas proporcionaram ganhos nos cenários onde as características do espectro eram menos favoráveis à exploração. Conforme apresentado na Seção 5.5.2, o maior aumento resultante da aplicação das técnicas de acesso é de 16 vezes, obtido por **M2**.

Enquanto a aplicação das técnicas propostas resultou em um aumento no percentual de sucessos, o ganho promovido pela melhoria das condições do espectro é superior ao gerado pelas técnicas. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a disponibilidade do espectro P e o tamanho dos pacotes primários T_t^{US} têm maior impacto na exploração do espectro por USs. Estes resultados fundamentam a argumentação de que é necessário que trabalhos futuros modelem e avaliem o espectro mais detalhadamente e que considerem um conjunto mais variado de cenários em suas análises.

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação abordou o problema de acesso ao espectro no contexto de acesso dinâmico, feito pela modelagem da exploração do espectro e estudo da interferência dos parâmetros modelados em um protocolo de controle de acesso ao meio.

No Capítulo 1, foram apresentadas as principais motivações do trabalho, entre as quais destaca-se a escassez espectral. Diante do cenário de escassez espectral, estudos observaram que embora praticamente todo o espectro esteja alocado, grande parte do espectro é subutilizado. Neste contexto, o modelo de acesso dinâmico surgiu como uma alternativa para permitir que novas tecnologias sem fio sejam implementadas sem a necessidade de alocação de novas frequências. Adicionalmente, a implementação de modelos de acesso dinâmico aumentam a eficiência de porções consideradas previamente como subutilizadas.

O Capítulo 2 introduziu os conceitos relacionados ao acesso dinâmico ao espectro, dando ênfase às características fundamentais necessárias para que usuários secundários sejam capazes de explorar o espectro. Foram discutidas as abordagens para implementação dos modelos de sensoriamento, gerenciamento do espectro, compartilhamento do espectro e mobilidade espectral. Com base nos modelos de implementação de acesso dinâmico foi apresentada uma breve discussão sobre os desafios de pesquisa relacionados a cada um dos elementos fundamentais do acesso secundário.

Na sequência, foram apresentadas no Capítulo 3 as principais técnicas de acesso secundário presentes na literatura. As abordagens listadas foram descritas em função de suas contribuições em relação ao mecanismo de sensoriamento, controle de acesso e adaptabilidade. Foram realizadas análises das propostas apresentadas, ressaltando suas vantagens e limitações. As técnicas discutidas que fazem parte de protocolos de acesso foram agrupadas e utilizadas na argumentação feita no final do capítulo. Esta discussão denotou algumas limitações percebidas de forma geral na literatura existente como a fragmentação das topologias básicas consideradas e conseqüente dificuldade de comparação de diferentes trabalhos. Adicionalmente, foi observado que não foram verificadas propostas em que usuários secundários utilizavam a coordenação como mecanismo para implementação de uma rede onde há agregação de canais para a transmissão de dados.

As observações feitas durante avaliação do estado da arte motivaram a definição de um modelo de comunicação, descrito no Capítulo 4. Este modelo foi definido em função de uma série de parâmetros que caracterizam o espectro de forma a permitir uma análise da influência destes parâmetros. O tempo total de comunicação e vazão da rede estão entre as métricas avaliadas ao longo do texto. Com base na análise das métricas definidas

chegou-se à conclusão que, enquanto não é possível maximizar as métricas propostas simultaneamente, a maximização da razão entre a vazão da rede e o tempo de transmissão garante um rendimento eficiente da rede.

Com base na modelagem e parametrização do modelo de acesso definido, o Capítulo 5 apresentou um protocolo de acesso ao meio colaborativo, proposto com dois objetivos: *(i)* permitir uma avaliação aprofundada da influência dos parâmetros de acesso ao espectro em um protocolo de controle de acesso ao meio e *(ii)* preencher a lacuna no estado da arte no que se refere a protocolos de controle de acesso ao meio. Com o objetivo de aprimorar o processo de identificação e exploração de oportunidades três técnicas foram propostas neste trabalho:

1. Estimativa da disponibilidade do espectro por média móvel e banda passante;
2. Interrupção do processo de sensoriamento;
3. Controle do tamanho dos pacotes de dados.

O protocolo foi utilizado para avaliar por meio de simulação os parâmetros de caracterização do espectro definidos anteriormente. Este estudo demonstrou a relevância da adequação do modelo de acesso ao ambiente em que o protocolo é aplicado. As métricas de caracterização do espectro apresentaram um impacto positivo na exploração do espectro e a aplicação das técnicas propostas em conjunção com a melhoria das condições do espectro permitiram aumentar a taxa de sucesso das transmissões secundárias.

O trabalho desenvolvido demonstrou a necessidade de avaliação e adequação do estado da arte a mudanças no espectro. Para isto, considera-se como perspectivas para trabalhos futuros uma série de tarefas incluindo a proposição de técnicas adicionais para melhoria do protocolo apresentado, adaptação do simulador para avaliação de diferentes protocolos de controle de acesso, comparação do protocolo proposto com outras propostas, inclusão de parâmetros adicionais de caracterização do espectro e a produção de textos científicos com base nos resultados não publicados.

Referências

- [1] U.S. frequency allocation chart, August 2011. (Páginas: vii e 6)
- [2] ANATEL. Quadro de atribuição de faixas de frequências no brasil, Outubro 2006. (Páginas: vii e 7)
- [3] D. Čabrić, S. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen, and A. Wolisz. A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum. In *Proceedings of 14th IST Mobile Wireless Communications Summit 2005*, pages 411–415, June 2005. (Páginas: vii, 1, 8, e 15)
- [4] M. McHenry, P. Tenhula, D. McCloskey, D. Roberson, and C. Hood. Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal. In *Proceedings of the First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS)*. ACM, August 2006. (Páginas: vii, 8, 9, e 15)
- [5] D. Willkomm, S. Machiraju, J. Bolot, and A. Wolisz. Primary user activity modeling using first-difference filter clustering and correlation in cognitive radio networks. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 1–11. October 2008. (Páginas: vii, 15, 17, e 23)
- [6] B. Fette. *Cognitive Radio Technology*. Communications Engineering Series. Newnes, 2006. (Páginas: 1, 5, 9, 10, e 12)
- [7] SSC. General survey of radio frequency bands – 30 MHz to 3 GHz. Technical report, Shared Spectrum Company, September 2010. (Página: 1)
- [8] T. M. Taher, R. B. Bacchus, K. Z. Zdunek, and D. A. Roberson. Long-term spectral occupancy findings in chicago. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 100–107, May 2011. (Páginas: 1, 8, e 15)
- [9] H. Arslan. *Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems*. Springer, 2007. (Páginas: 1, 5, 8, 10, e 12)
- [10] Q. Zhao and B. Sadler. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24:79 – 89, May 2007. (Páginas: 1, 8, 9, 10, 12, 14, 15, e 26)
- [11] B. Canberk, I. Akyildiz, and S. Oktug. Primary user activity modeling using first-difference filter clustering and correlation in cognitive radio networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 19(1):170–183, February 2011. (Página: 1)

- [12] T. Yücek and H. Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1):116–130, March 2009. (Páginas: 1, 8, 11, 14, 20, 23, e 26)
- [13] M. Höyhty, S. Pollin, and A. Mammela. Performance improvement with predictive channel selection for cognitive radios. In *International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART)*, pages 1–5, February 2008. (Página: 2)
- [14] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen. HC-MAC: A hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1):106–117, January 2008. (Páginas: 2, 3, 12, 13, 20, 22, 23, 24, 26, 27, e 48)
- [15] T. Jiang, D. Grace, and Y. Liu. Cognitive radio spectrum sharing schemes with reduced spectrum sensing requirements. In *IET Seminar on Cognitive Radio and Software Defined Radios: Technologies and Techniques*, pages 1–5, September 2008. (Página: 2)
- [16] L. Tan and L. Le. Channel assignment with access contention resolution for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 99:2808–2823, July 2012. (Páginas: 2, 23, 24, e 27)
- [17] O. Takyu, T. Saiwai, T. Fujii, and Y. Umeda. Performance for mac level channel capacity in cognitive radio with carrier sense multiple access and transmitting power control. *IEEE Vehicular Technology Conference*, pages 1–5, September 2011. (Página: 2)
- [18] P. Wang, Limin Xiao, Shidong Zhou, and Jing Wang. Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 111–115, March 2007. (Páginas: 2 e 19)
- [19] H. Cheng and W. Zhuang. Simple channel sensing order in cognitive radio networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(4):676–688, April 2011. (Páginas: 2 e 12)
- [20] H. Jiang, L. Lai, R. Fan, and H. Poor. Optimal selection of channel sensing order in cognitive radio. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 08(1):297–307, January 2009. (Páginas: 2, 13, 20, e 23)
- [21] H. Kim and K. Shin. Fast discovery of spectrum opportunities in cognitive radio networks. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 1–12, October 2008. (Páginas: 2 e 12)
- [22] F. Modesto, J. Bordim, and A. Drummond. Improving channel usage in networks employing dynamic spectrum access. In *The First International Symposium on Computing and Networking - Across Practical Development and Theoretical Research*, pages 180–186, December 2013. (Página: 3)
- [23] F. Modesto, M. Caetano, and J. Bordim. A dynamic spectrum access MAC protocol based on spectrum analysis and spectrum sharing. In *XXXVIII Conferencia Latinoamericana En Informatica (CLEI)*, pages 1–8, October 2012. (Página: 3)

- [24] F. Modesto, M. Caetano, and J. Bordim. An opportunistic MAC protocol based on statistical spectrum analysis. In *IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum*, pages 849–856, May 2012. (Página: 3)
- [25] Federal Communications Commission. Docket no 02-155. Report, FCC Spectrum Policy Task Force, November 2002. (Página: 5)
- [26] P. Kolodzy. Dynamic spectrum policies: Promises and challenges. *CommLaw Conspectus*, 2004. (Página: 8)
- [27] R. Castro and P. Godlewski. An overview of DSA via multi-channel MAC protocols. In *9th IFIP Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, pages 1–6, June 2010. (Página: 8)
- [28] C. Cormio and K. Chowdhury. A survey on MAC protocols for cognitive radio networks. *Ad Hoc Networks*, 7(7):1315–1329, September 2009. (Páginas: 8, 13, 14, 21, 22, e 23)
- [29] A. De Domenico, E. Strinati, and M.G. Di Benedetto. A survey on MAC strategies for cognitive radio networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(1):21–44, 2012. (Páginas: 8, 10, 11, e 14)
- [30] T. Krishna and A. Das. A survey on MAC protocols in OSA networks. *Computer Networks*, 53(9):1377–1394, June 2009. (Páginas: 8, 13, e 14)
- [31] J. Marinho and E. Monteiro. Cognitive radio: survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions. *Wireless Networks*, 18(2):147–164, February 2012. (Páginas: 8 e 14)
- [32] L. Tan and L. Le. Distributed mac protocol for cognitive radio networks: Design, analysis, and optimization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(8):3990–4003, October 2011. (Páginas: 8 e 14)
- [33] L. Le and E. Hossain. Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(12):5306–5315, December 2008. (Página: 10)
- [34] IEEE Computer Society. 802.11-2012 - IEEE standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—specific requirements part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. July 2011. (Páginas: 10 e 21)
- [35] T. Neves and J. Bordim. EEMC-MAC: An energy efficient protocol for multi-channel wireless networks. In *The Eighth International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC)*, pages 6–12, October 2013. (Página: 13)
- [36] W. Wang and X. Liu. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks. In *Proceedings of the IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC)*, volume 1, pages 690–694, September 2005. (Página: 13)

- [37] H. Zheng and C. Peng. Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, volume 5, pages 3122–3136, May 2005. (Página: 13)
- [38] J. Bae, E. Beigman, R. Berry, M. L. Honig, and R. Vohra. Incentives and resource sharing in spectrum commons. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 1–10, October 2008. (Página: 13)
- [39] J. So and N. Vaidya. Multi-channel MAC for ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. In *ACM MobiHoc*, volume 222–233, May 2004. (Páginas: 13, 21, e 24)
- [40] M. Buddihikot, P. Kolodzy, S. Miller, K. Ryan, and J. Evans. DIMSUMnet: New directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access. In *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pages 78–85, June 2005. (Página: 14)
- [41] C. Cordeiro, M. Ghosh, D. Cavalcanti, and K. Challapali. Spectrum sensing for dynamic spectrum access of TV bands. In *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)*, pages 225–233, August 2007. (Página: 14)
- [42] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and N. Shankar. IEEE 802.22: The first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 328–337, December 2005. (Página: 14)
- [43] J. Polson. Cognitive radio applications in software defined radio. *Software Defined Radio Forum Technical Conference and Product Exposition*, November 2004. (Página: 15)
- [44] M. Jiang, M. Nikolic, S. Hardy, and L. Trajkovic. Impact of self-similarity on wireless data network performance. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, volume 2, pages 447–481, June 2001. (Página: 16)
- [45] V. Paxson and S. Floyd. Wide area traffic: the failure of poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226 – 244, 1995. (Página: 16)
- [46] D. Strzałka and F. Grabowski. Long-range dependencies in algorithmic computing. *2008 Conference on Human System Interactions*, pages 564 – 569, May 2008. (Página: 16)
- [47] D. Cox. *Long-range dependence: A review*, pages 55 – 74. Iowa State University Press, 1984. (Página: 16)
- [48] G. Samorodnitsky. Long range dependence. *Foundations and Trends in Stochastic Systems*, 1(3):163–257, December 2006. (Página: 17)
- [49] C. Neto. Multiplexação e policiamento de tráfego auto-semelhante. Master’s thesis, Universidade Estadual de Campinas, December 1999. (Página: 17)

- [50] L. Ostrowsky. Modelos de tráfego para fluxos gerados pelo protocolo UDP. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, December 2005. (Página: 17)
- [51] M. Gospodinov and E. Gospodinova. The graphical methods for estimating hurst parameter of self-similar network traffic. In *Proceedings of the 2005 International Conference on Computer Systems and Technologies*, pages 1–6, June 2005. (Página: 17)
- [52] B. Mandelbrot and J. Ness. Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review*, 10(4):422–437, 1968. (Página: 17)
- [53] J. Beran. *Statistics for Long-Memory Processes*. Chapman and Hall, 1994. (Página: 17)
- [54] H. Qian. Fractional brownian motion and fractional gaussian noise. In *Processes with Long-Range Correlations*, volume 621 of *Lecture Notes in Physics*, pages 22–33. Springer Berlin Heidelberg, 2003. (Página: 19)
- [55] B. Rassouli and A. Olfat. Periodic spectrum sensing parameters optimization in cognitive radio networks. In *19th International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 1–5, April 2012. (Página: 19)
- [56] H. Han, J.Wang, Q. Wu, and Y. Huang. Optimal wideband spectrum sensing order based on decision-making tree in cognitive radio. In *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–5, October 2010. (Página: 20)
- [57] A. Mendes, C. Augusto, M. Silva, R. Guedes, and J. Rezende. Channel sensing order for cognitive radio networks using reinforcement learning. In *IEEE 36th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pages 546–553, October 2011. (Página: 20)
- [58] C. Stevenson, G. Chouinard, Z. Lei, W. Hu, S. Shellhammer, and W. Caldwell. IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard. *IEEE Stands in Communications and Networking*, pages 130 – 138, January 2009. (Páginas: 20 e 22)
- [59] B. Hamdaoui and K.G. Shin. OS-MAC: An efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(8):915–930, August 2008. (Páginas: 20, 21, 24, e 26)
- [60] H. Wang, H. Qin, and L. Zhu. A survey on mac protocols for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks. *Computer Science and Software Engineering, International Conference on*, 1(214–218), 3008. (Página: 20)
- [61] J. Zhang, G. Zhou, C. Huang, S. Son, and J. Stankovic. TMMAC: An energy efficient multi-channel MAC protocol for ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3554 – 3561, June 2007. (Páginas: 21 e 24)
- [62] C. Cordeiro and K. Challapali. C-MAC: A cognitive MAC protocol for multi-channel wireless networks. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 147–157, April 2007. (Página: 21)

- [63] M. Thoppian, S. Venkatesan, and R. Prakash. MAC-layer scheduling in cognitive radio based multi-hop wireless networks. In *International Symposium on on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2006*, pages 192 – 202, July 2006. (Páginas: 21 e 24)
- [64] L. Ma, C. Shen, and B. Ryu. Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks. In *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pages 547–558, April 2007. (Páginas: 22 e 24)
- [65] A. Hsu., D. Wei, and C. Kuo. A cognitive MAC protocol using statistical channel allocation for wireless ad-hoc networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, pages 105–110, March 2007. (Páginas: 22, 24, 26, e 29)
- [66] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen. Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 25(3):589–600, April 2007. (Páginas: 22, 23, e 24)
- [67] X. Mu. A novel gaussian kernel function for minimax probability machine. *WRI Global Congress on Intelligent Systems*, 3:491 – 494, May 2009. (Página: 23)
- [68] Y. Shu, M. Yu, J. Liu, and H. Feng. Wireless traffic modeling and prediction using seasonal arima models. *IEEE International Conference on Communications*, 3:1675 – 1679, May 2003. (Página: 23)
- [69] W. Wu, Z. Xu, and Y. Wang. Robust prediction of network traffic using quantile regression models. *IEEE International Conference on Information Reuse and Integrations*, pages 200 – 225, September 2006. (Página: 23)
- [70] B. Zhou, D. He, Z. Sun, and W. Ng. Network traffic modeling and prediction with arima/garch. *International Working Conference: Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, 2005. (Página: 23)
- [71] IEEE Computer Society. 802.22-2011 - IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems wireless regional area networks (WRAN)–specific requirements part 22: Cognitive wireless RAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV bands. *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007)*, pages 1–2793, July 2011. (Página: 24)
- [72] Parallel Computing Laboratory at UCLA. Global mobile information system simulator (GloMoSim). (Página: 24)
- [73] Inc. OPNET Technologies. OPNET modeler suite. (Página: 24)
- [74] Network Simulator Team. The network simulator (NS2). (Página: 24)
- [75] Scalable Networks Technologies. QualNet - network simulator. (Página: 24)

- [76] J. Shi, E. Aryafar, T. Salonidis, and E. Knightly. Synchronized CSMA contention: Model, implementation and evaluation. In *IEEE INFOCOM*, pages 2052–2060, April 2009. (Página: 26)
- [77] N. Fonseca, G. Mayor, and C. Neto. On the equivalent bandwidth of self-similar sources. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 10(2):104–124, April 2000. (Página: 48)
- [78] A. Drummond, N. da Fonseca, and M. Devetsikiotis. Uma avaliação de estimadores de banda passante baseados em medições. In *WPERFORMANCE*, pages 2946–2963. XXV do Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, July 2005. (Página: 48)
- [79] Keith W. Ross James F. Kurose. *Redes de Computadores e a Internet*. Pearson - Addison Wesley, 3 edition, 2005. (Página: 49)
- [80] D. Veitch and P. Abry. A wavelet-based joint estimator of the parameters of long-range dependence. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45(3):878–897, April 1999. (Página: 64)

Apêndice A

Simulador

Este apêndice descreve detalhes adicionais sobre o simulador apresentado no Capítulo 5. São detalhados a arquitetura do simulador, e modelo de validação dos traços gerados e a estrutura da interface gráfica proposta. O simulador implementa uma série de funcionalidades e é capaz de produzir cenários de uso do espectro e replicar o funcionamento do protocolo de comunicação considerado neste trabalho.

A.1 Arquitetura do Simulador

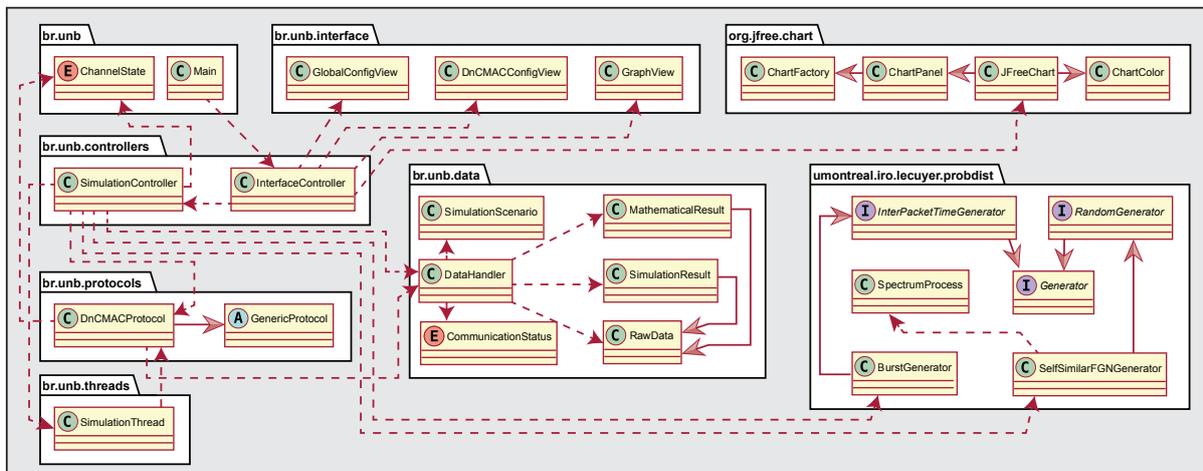
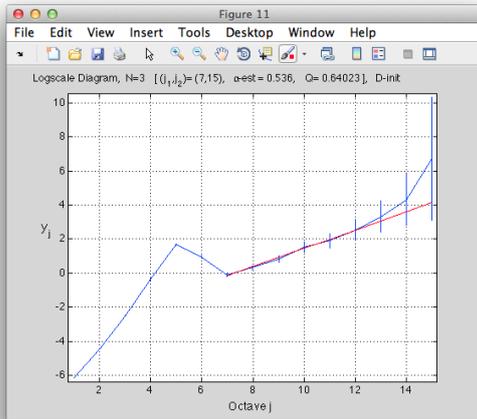
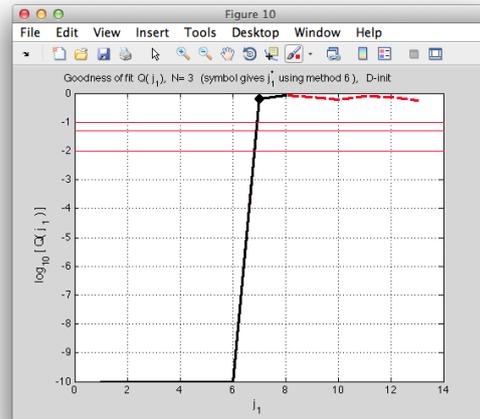


Figura A.1: Diagrama de classes do simulador.

A Figura A.1 apresenta um diagrama com as classes mais relevantes consideradas no trabalho. A Classe *SimulationController* é responsável por instanciar e gerenciar a execução dos cenários de simulação selecionados. Este sistema foi implementado de forma centralizada para que todos os cenários de simulação e seus resultados sejam controlados por uma única entidade. Para otimizar a execução das simulações bibliotecas de *threads*, gerência de memória e IO além de outras foram utilizadas. Desta forma, cada ambiente de simulação é individual e o número de instâncias em execução depende do número de processadores lógicos da máquina utilizada.



(a) Autossimilaridade do traço.



(b) *goodness of fit* obtido para o traço.

Figura A.2: Gráficos de análise de um traço gerado onde $H = 0,8$.

Os resultados obtidos dos ambientes de simulação são repassados para interpretados com auxílio de bibliotecas para cálculo matemático com objetivo da obtenção de médias, desvios e outras informações sobre os parâmetros estudados. Estes valores são, então, salvos utilizando uma biblioteca para escrita de arquivos CSV para que sejam plotados na forma de gráficos.

A.2 Validação dos Traços

O conjunto de classes utilizadas para geração das sequências pseudoaleatórias foram adaptadas e incorporadas ao projeto. Os valores obtidos tanto diretamente pelo uso destas classes quanto os os traços produzidos com seu uso foram avaliados utilizando um pacote para MatLab cujo objetivo é a estimação de segunda ordem do parâmetro de Hurst H de uma série, proposto e descrito em [80]. A Figura A.2 apresenta os resultados da análise de um traço gerado para $H = 0,8$. Neste exemplo, o valor de H obtido é adequado. Na Figura A.2(a), a inclinação da linha em vermelho representa o valor de H , de forma que para $H = 0,5$ a linha não possui inclinação e para valores $H \geq 0,5$ a linha possui inclinação proporcional ao parâmetro de Hurst observado. Este modelo garante que traço obtido ao fim de todo o processo é compatível com os parâmetros dados durante a entrada.

A.3 Interface Gráfica

A interface gráfica desenvolvida tem como objetivo principal auxiliar a visualização de resultados de simulação, inclusive durante a execução das mesmas, além de possibilitar maior capacidade de depuração do código.

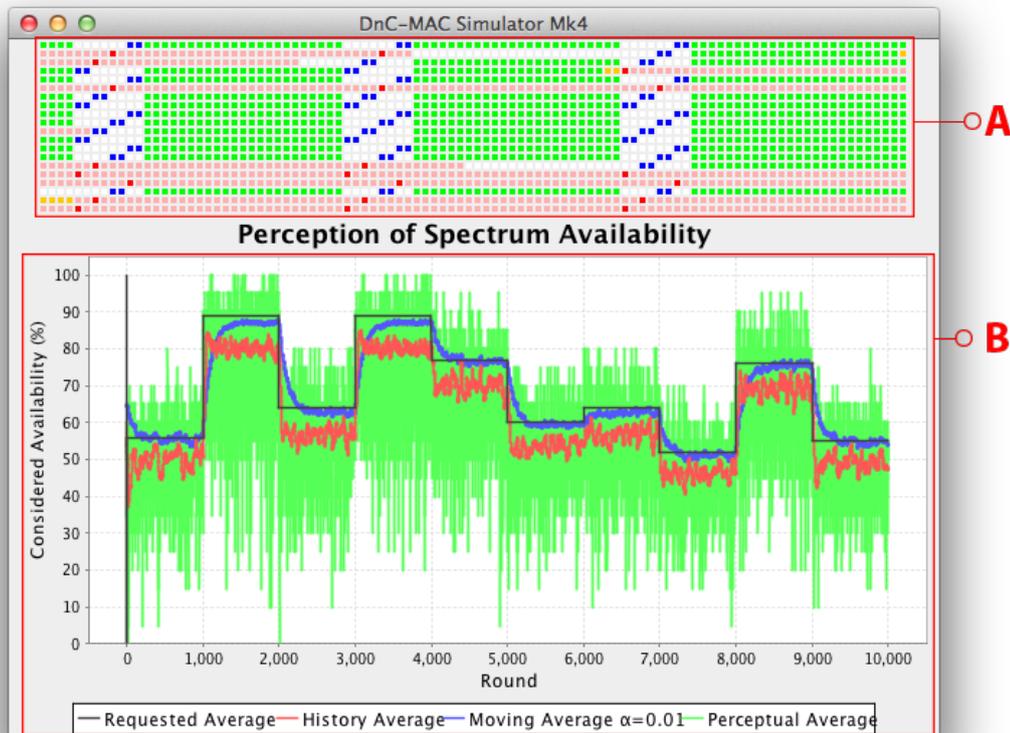


Figura A.3: Interface do simulador.

A interface gráfica possui três componentes básicos: (i) o menu de configuração, (ii) a matriz de estados e uso do espectro e (iii) gráfico de uso geral. O menu de configuração foi desenvolvido para fosse possível configurar o ambiente de simulação e é desativado sempre que simulações em bloco são executadas, visto múltiplos cenários são simulados durante uma mesma execução. A matriz de estado do espectro pode ser vista na Figura A.3, explicitada pelo elemento A. Na matriz de estados, os blocos representam unidades de tempo e as cores representam o estado do espectro, com vermelho representando blocos ocupados por usuários primários e o restante por estados da comunicação de usuários secundários. Esta interface é extremamente útil na avaliação do espectro e depuração da execução do sistema. O gráfico foi utilizado de diversas maneiras durante o trabalho e é representado pelo elemento B na Figura A.3. Neste exemplo, o gráfico apresenta as estatísticas da disponibilidade do espectro por diversos componentes do programa. Ambos o gráfico e a matriz de estados são atualizadas durante o tempo de execução.