



## COOPERAÇÃO EM REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS

Pedro Smith Coutinho

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

Orientadores: José Ferreira de Rezende  
Valmir Carneiro Barbosa

Rio de Janeiro  
Setembro de 2014

# COOPERAÇÃO EM REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS

Pedro Smith Coutinho

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

Examinada por:

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.

---

Prof. Rosa Maria Meri Leão, Dr.

---

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2014

Coutinho, Pedro Smith

Cooperação em Redes de Rádios Cognitivos/Pedro Smith Coutinho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIV, 75 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: José Ferreira de Rezende

Valmir Carneiro Barbosa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 70 – 75.

1. Redes de Rádios Cognitivos. 2. Comunicação Cooperativa. 3. Retransmissões Cooperativas. I. Rezende, José Ferreira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais Luiza  
e Antonio Carlos.  
Aos meus avós  
Coutinho (in Memoriam),  
Apparecida (in Memoriam),  
José Alexandre (in Memoriam)  
e Maria Zita.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Luiza e Antonio Carlos, pelo exemplo, pelo carinho e pela formação que me deram, além da ajuda em todos os projetos que realizei em minha vida.

À minha namorada, Julia, pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos meus orientadores, Rezende e Valmir, não só por esta dissertação, mas pela orientação que recebi de ambos durante a minha formação, que no caso do professor Rezende remonta ao início da minha graduação em engenharia.

Aos meus amigos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial: André, Carlos, Carlos Henrique, Carol, Celso, Geisa, Marcel e Raphael, pela amizade, pelos conselhos e pela ajuda com as dúvidas e os problemas que surgiram.

A todos os professores que tive e a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica.

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

## COOPERAÇÃO EM REDES DE RÁDIOS COGNITIVOS

Pedro Smith Coutinho

Setembro/2014

Orientadores: José Ferreira de Rezende  
Valmir Carneiro Barbosa

Programa: Engenharia Elétrica

O funcionamento das Redes de Rádios Cognitivos para o compartilhamento do espectro envolve o acesso oportunista do espectro licenciado a Usuários Primários (UPs) por parte de Usuários Secundários (USs). Tradicionalmente, esse acesso é realizado de forma que os UPs sofram o mínimo de interferência em seu acesso ao meio sem fio, buscando sempre tornar os USs tão invisíveis quanto possível aos UPs. No entanto, este trabalho apresenta uma proposta de comunicação cooperativa em que os USs, além de atuarem no acesso oportunista ao espectro, também atuam como retransmissores (*relays*) cognitivos para os UPs. Essas retransmissões ocorrem de forma transparente e apenas quando os *relays* avaliam que a comunicação segmentada será melhor do que a direta. Além disso, múltiplos nós secundários se coordenam para selecionar o *relay* que poderá oferecer as melhores condições à comunicação primária. A cooperação proposta, além de melhorar o desempenho da rede primária, é capaz de aumentar as oportunidades secundárias de utilização do espectro, beneficiando também o desempenho dos USs. A proposta elaborada, apesar de ser independente da tecnologia de redes sem fio utilizada, teve seu desempenho avaliado através de uma implementação no simulador de redes ns-3 baseada no padrão IEEE 802.11. Nas avaliações de desempenho, a proposta se mostrou capaz de apresentar melhoras nas vazões das comunicações primária e secundária, quando comparadas a cenários sem cooperação.

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

## COOPERATION IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Pedro Smith Coutinho

September/2014

Advisors: José Ferreira de Rezende  
Valmir Carneiro Barbosa

Department: Electrical Engineering

The operation of spectrum sharing Cognitive Radio Networks involves opportunistic access to the spectrum licensed to Primary Users (PUs) by Secondary Users (SUs). Traditionally, this access is performed in such a way that the PUs suffer minimal interference to their access to the wireless medium, trying to make the SUs as invisible as possible to the PUs. However, this study presents a cooperative communication proposal in which SUs, in addition to performing opportunistic spectrum access, also act as cognitive relays for the PUs. These retransmissions are performed in a transparent fashion and only when the relays assess that the segmented communication will achieve better throughput. In addition, multiple secondary nodes coordinate themselves to select the relay that can offer the best conditions for primary communication. The proposed cooperation, besides improving the performance of the primary network, is also able to increase secondary spectrum usage opportunities, increasing SU performance as well. The formulated proposal, despite being independent of the wireless network technology used, was implemented, based on the IEEE 802.11 standard, in the ns-3 network simulator for performance evaluation. The proposal was shown to provide improvements in the throughputs of primary and secondary networks when compared to scenarios without cooperation.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Redes de Rádios Cognitivos . . . . .	2
1.2 Comunicação Cooperativa . . . . .	3
1.3 Objetivo do Trabalho . . . . .	4
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>6</b>
2.1 Redes de Rádios Cognitivos . . . . .	6
2.1.1 Sensoriamento de Espectro . . . . .	8
2.1.2 Variações nas Propostas de Redes de Rádios Cognitivos . . . . .	10
2.2 Comunicação Cooperativa em Redes Convencionais . . . . .	11
2.3 Cooperação entre Usuários Primários e/ou Secundários . . . . .	14
2.3.1 Sensoriamento Cooperativo . . . . .	15
2.3.2 Aluguel de Espectro . . . . .	17
2.3.3 Comunicação Cooperativa . . . . .	19
2.4 Proposta deste Trabalho frente à Literatura . . . . .	22
<b>3 Cooperação em Redes de Rádios Cognitivos</b>	<b>24</b>
3.1 Modelagem do Sistema . . . . .	24
3.1.1 Modelo do Canal . . . . .	24
3.1.2 Modelo de Filas . . . . .	26
3.1.3 Acesso Primário e Secundário . . . . .	26
3.1.4 Vazão e Capacidade do Canal . . . . .	27
3.2 Proposta . . . . .	28
3.2.1 Comportamento do <i>Relay</i> . . . . .	29
3.2.2 Interação entre <i>Relays</i> . . . . .	31

3.2.3	Oportunidades Secundárias . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>35</b>
4.1	Simulador ns-3 . . . . .	35
4.2	Requisitos da Proposta . . . . .	36
4.2.1	Modulação e Codificação Adaptativa . . . . .	36
4.2.2	Priorização de tráfego . . . . .	37
4.2.3	<i>Spoofing</i> . . . . .	37
4.3	Implementação da Proposta . . . . .	38
4.3.1	Processo de Decisão Individual . . . . .	39
4.3.2	Seleção do Melhor <i>Relay</i> . . . . .	42
4.4	Simulações . . . . .	43
4.4.1	Cenários de Validação . . . . .	43
4.4.2	Cenário Geral . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>50</b>
5.1	Cenários de Validação . . . . .	50
5.1.1	Tráfego Primário . . . . .	50
5.1.2	Tráfegos Primário e Secundário . . . . .	51
5.1.3	Posicionamento do <i>Relay</i> . . . . .	56
5.2	Cenário Geral . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>67</b>
6.1	Generalidade da Proposta . . . . .	68
6.2	Avaliação de Desempenho . . . . .	68
6.3	Trabalhos Futuros . . . . .	68
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>70</b>

# Lista de Figuras

3.1	Fila com taxa de chegada $\lambda$ e taxa de saída $\mu$ . . . . .	26
3.2	Comunicação de um par de UPs: (a) de forma direta; (b) com atuação do retransmissor ( <i>relay</i> ) secundário. . . . .	30
3.3	Retransmissões utilizando múltiplos <i>relays</i> em série. . . . .	32
3.4	Retransmissões utilizando múltiplos <i>relays</i> diferentes. . . . .	32
4.1	Diferentes <i>backoffs</i> apresentam diferentes prioridades. Como o UP tem um período menor, realiza suas transmissões primeiro em uma disputa pelo meio com um US. . . . .	37
4.2	Processo de decisão secundário entre realizar ou não a retransmissão de um par de nós primários. . . . .	39
4.3	Passo a passo do funcionamento da rede quando a transmissão primária é bem-sucedida e o <i>relay</i> não atua na comunicação. . . . .	40
4.4	Passo a passo do funcionamento da rede quando há falha na transmissão primária e o <i>relay</i> atua na comunicação. . . . .	41
4.5	Distâncias primária e secundária usadas nas simulações dos cenários de validação com tráfegos primário e secundário. . . . .	45
4.6	Posicionamento do <i>relay</i> em relação ao centro de massa do par primário. . . . .	46
5.1	Vazão da comunicação primária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com apenas tráfego primário. . . . .	51
5.2	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 50m. . . . .	52
5.3	Total de transmissões e fração de erros pelo total de transmissões para a comunicação primária. . . . .	53
5.4	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 75m. . . . .	54

5.5	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 100m. . . . .	56
5.6	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do <i>relay</i> ao centro de massa primário, com distância primária de 100m. . . . .	58
5.7	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do <i>relay</i> ao centro de massa primário, com distância primária de 125m. . . . .	59
5.8	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do <i>relay</i> ao centro de massa primário, com distância primária de 150m. . . . .	60
5.9	Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do <i>relay</i> ao centro de massa primário, com distância primária de 175m. . . . .	61
5.10	Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 10 Usuários Secundários. . . . .	63
5.11	Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 20 Usuários Secundários. . . . .	64
5.12	Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 50 Usuários Secundários. . . . .	66

# Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros de simulação do cenário de validação apenas com tráfego primário. . . . .	44
4.2	Parâmetros de simulação do cenário de validação com tráfegos primário e secundário. . . . .	46
4.3	Parâmetros de simulação do cenário de validação do posicionamento do <i>relay</i> cognitivo. . . . .	47
4.4	Parâmetros de simulação do cenário geral. . . . .	49

# Lista de Abreviaturas

AIFS	<i>Arbitration Inter Frame Space</i> , p. 37
ARF	<i>Automatic Rate Fallback</i> , p. 36
AWGN	<i>additive white gaussian noise</i> , ruído branco gaussiano aditivo, p. 8
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações, p. 1
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> , p. 44
CTS	<i>clear to send</i> , p. 13
CW	<i>Contention Window</i> , p. 37
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , p. 1
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , p. 9
GFM	<i>Generalized Fading Memory</i> , p. 19
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i> , Sistema de Navegação Global por Satélite, p. 2
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamento Global, p. 2
HTS	<i>helper-ready to send</i> , p. 13
IFS	<i>Inter Frame Space</i> , p. 37
IP	<i>Internet Protocol</i> , p. 35
MIMO	<i>Multiple Input / Multiple Output</i> , p. 12
QoS	<i>quality of service</i> , qualidade de serviço, p. 35
RC	Rádio Cognitivo, p. 2

RIP	<i>Routing Information Protocol</i> , p. 43
RTS	<i>request to send</i> , p. 13
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , p. 7
SNR	<i>signal-noise ratio</i> , relação sinal-ruído, p. 9
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , p. 20
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> , p. 44
UP	Usuário Primário, p. 1
US	Usuário Secundário, p. 2

# Capítulo 1

## Introdução

O espectro de radiofrequência, meio de transmissão para as comunicações sem fio, é um recurso que tem sua utilização licenciada por órgãos reguladores de governos, como a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), no Brasil e a *Federal Communications Commission* (FCC), nos Estados Unidos. Atualmente, esse licenciamento ocorre de forma estática, de modo que faixas de frequência de regiões ou países inteiros são concedidas com exclusividade para determinados usos ou serviços. No entanto, com o emprego de comunicações sem fio para um número crescente de serviços, o espectro eletromagnético vem se tornando um recurso cada vez mais escasso, e há previsão que haja insuficiência do mesmo caso seu modelo e crescimento de utilização se mantenham [1].

A FCC, em 2002, organizou uma de uma força-tarefa para estudar o gerenciamento do espectro eletromagnético nos Estados Unidos, a *Spectrum Policy Task Force*. Em novembro desse mesmo ano, essa força-tarefa publicou um relatório que concluiu que o problema no acesso ao espectro eletromagnético está na baixa eficiência do seu uso e não propriamente na sua escassez física [2]. O licenciamento estático impede que usuários em potencial do meio utilizem faixas de espectro para as quais não possuem licença, mesmo que essas faixas não estejam sendo utilizadas. Medições da utilização do espectro em grandes cidades dos Estados Unidos chamaram atenção ao fato de que essa utilização varia muito nas dimensões do tempo e do espaço. Ou seja, muitas porções do espectro não são utilizadas em grande parte do tempo em certas áreas geográficas. Essa descoberta aponta para a existência de oportunidades de espectro, isto é, oportunidades de utilização do meio por usuários não licenciados, desde que o acesso ocorra de forma adaptativa e dinâmica e não prejudique os usuários licenciados.

O aproveitamento das oportunidades de espectro faz surgir uma nova forma de enxergar o acesso ao meio eletromagnético. Existem, então, duas classes de usuários: licenciados e não licenciados. Usuários licenciados, também chamados de Usuários Primários (UPs) possuem direitos de uso preferencial sobre as faixas do meio a eles

alocadas, além de possuírem direito à proteção com relação a interferências de rádio em sua operação. Os usuários não licenciados, ou Usuários Secundários (USs), por sua vez, têm permissão de acessar o meio de maneira não exclusiva e oportunista [3]. Em oposição aos direitos de utilização licenciados aos UPs, os USs não possuem nenhuma prioridade no acesso ao meio e, para realizarem sua comunicação, devem aproveitar-se unicamente das oportunidades de acesso que surgirem em faixas do meio licenciadas a outros usuários. Uma oportunidade secundária de espectro pode ser definida como “uma faixa de frequências que não está sendo utilizada por seus UPs num dado momento em uma determinada área geográfica” [4]. Esse novo modelo de acesso ao meio sem fio é viabilizado pelo surgimento de dispositivos capazes de identificar e acessar as oportunidades de espectro, respeitando os usuários licenciados, os Rádios Cognitivos, que serão explicados na seção a seguir.

## 1.1 Redes de Rádios Cognitivos

Inicialmente propostos por Joseph Mitola III [5], Rádios Cognitivos (RCs) são dispositivos de comunicação sem fio que possuem capacidade cognitiva de adaptar seus estados e parâmetros internos de comunicação de acordo com as condições apresentadas pelo ambiente ao seu redor. Essa capacidade permite que usuários desses dispositivos aproveitem melhor as oportunidades de transmissão que ocorrem no meio sem fio, além de possibilitar a integração de novos serviços personalizados [6]. O conceito vislumbrado por Mitola é chamado de Rádio Cognitivo Completo (*Full Cognitive Radio*), um dispositivo dotado de inteligência e capacidade de analisar todo o tipo de informação relevante ao seu funcionamento, desde a sua posição geográfica (obtida através de triangulação de antenas ou sistemas GPS ou GLONASS) até a interpretação da linguagem natural na comunicação dos usuários. Além disso, o Rádio Cognitivo Completo seria capaz de compartilhar dados sobre as informações analisadas com outros dispositivos das diferentes redes nas quais possa operar [7, 8].

O conceito de Rádio Cognitivo Completo é muito amplo e envolve muitas disciplinas. Devido à sua elevada complexidade e necessidade de muitos recursos computacionais, esse conceito ainda está muito distante de ser implementado na prática. Pesquisas na área de Redes de Rádios Cognitivos seguem na direção de viabilizar o compartilhamento do espectro de radiofrequência de acordo com o modelo não licenciado [8]. Segundo a FCC, uma definição de Rádio Cognitivo mais viável tecnicamente é: “um rádio ou sistema que sensoria o seu ambiente operacional eletromagnético e pode, dinamicamente e autonomamente, ajustar seus parâmetros de operação de rádio para modificar a operação do sistema, com o objetivo de maximizar a vazão de dados, mitigar a interferência, facilitar a interoperabilidade ou acessar mercados secundários.” [9].

De acordo com esse modelo de funcionamento, UPs teriam prioridade no acesso ao meio sem fio, ou seja, às faixas de frequências a eles licenciadas, formando a rede primária. USs, utilizando Rádios Cognitivos, formariam a rede secundária, aproveitando oportunidades de espectro proporcionadas pelos usuários da rede primária, sem prejudicar a comunicação da mesma. A princípio, Redes de Rádios Cognitivos podem operar como rede secundária sobre uma rede primária que não precise de nenhuma alteração em seus dispositivos, de forma completamente transparente, ou pode haver necessidade de adaptação nos dispositivos primários para que estes possam se comunicar no mesmo meio que os Rádios Cognitivos secundários.

Inicialmente, a proposta para as Redes de Rádios Cognitivos era de que esses dispositivos de comunicação sem fio dotados de capacidades cognitivas, com o intuito de aproveitar oportunidades de espectro, operassem de forma completamente transparente aos UPs, sem que estes sequer tivessem conhecimento da existência dos USs. Dessa forma, o objetivo original das Redes de Rádios Cognitivos é viabilizar a coexistência das duas redes: primária licenciada, utilizada pelos UPs, e secundária não licenciada, utilizada pelos USs, evitando ao máximo que a rede secundária cause interferência na comunicação da rede primária. No entanto, a interação e cooperação entre UPs e Secundários pode ser fundamental para se superar desafios e oferecer mais vantagens, tanto para UPs quanto para USs, do que o paradigma completamente transparente [10].

## 1.2 Comunicação Cooperativa

A comunicação cooperativa é um princípio que diz respeito à cooperação de nós de uma rede com relação à comunicação de seus vizinhos. A comunicação tradicionalmente ocorre partindo de um conjunto (possivelmente unitário) de fontes em direção a outro conjunto (também possivelmente unitário) de destinos. A introdução da cooperação na comunicação traz à tona um terceiro conjunto (que, mais uma vez, pode ser unitário), chamado de retransmissores (do inglês *relays*). A utilização dos retransmissores traz vantagens à comunicação fonte-destino, como ganho de potência, economia de energia e maior diversidade espacial [11], além do aumento da vazão de transmissão [10].

Técnicas de comunicação cooperativa fazem uso da natureza de difusão (*broadcast*) dos sinais sem fio, de forma que um sinal, ou um pacote ou quadro, transmitido a partir da fonte para um destino, pode ser recebido por nós próximos. A participação desses nós vizinhos traz o benefício de maior diversidade espacial à comunicação. Quando os mesmos estão localizados de modo a possuir melhores condições do meio de transmissão tanto para a fonte quanto para o destino, a comunicação fonte-*relay*-destino pode ser mais vantajosa, robusta e eficiente do que a

comunicação direta (fonte-destino) [12].

Existem diversas formas com as quais os *relays* podem atuar na comunicação cooperativa. Com relação à forma que a retransmissão é realizada, a cooperação do retransmissor pode ser classificada como: armazenar-e-encaminhar, ou *store-and-forward*, em que o pacote (ou quadro) recebido da fonte é armazenado pelo *relay* para ser retransmitido ao destino; decodificar-e-encaminhar, ou *decode-and-forward*, em que o sinal é decodificado e os *bits* detectados são novamente modulados e retransmitidos; amplificar-e-encaminhar, ou *amplify-and-forward*, quando o sinal recebido é amplificado e retransmitido sem que o mesmo seja ao menos decodificado pelo *relay*; ou ainda realizar alguma operação mais sofisticada do sinal retransmitido com a transmissão de sua própria comunicação, comprimindo-as e/ou combinando-as, de forma a favorecer a qualidade do sinal recebido pelo destino, de forma distribuída e independente [12, 13].

### 1.3 Objetivo do Trabalho

A principal função das Redes de Rádios Cognitivos é aproveitar as oportunidades de espectro proporcionadas pela rede primária licenciada, de uma maneira que seus USs utilizem o meio sem causar interferência aos UPs. Existem diversas propostas de implementação para essas redes, que em geral podem exigir dispositivos ou comportamentos especiais para os UPs, ou funcionar sobre redes legadas de dispositivos já existentes, o que facilitaria a adoção da tecnologia, porém traz uma quantidade maior de desafios para os Rádios Cognitivos.

A questão de se exigir, ou não, tecnologia de Rádios Cognitivos na rede primária, para permitir o uso do espectro pelos USs, ainda está em aberto, com propostas de implementações sendo desenvolvidas para ambas as opções. O requisito relativo à rede secundária não causar interferência na rede primária, em geral, não é muito discutido. Este trabalho, porém, tem como objetivo estudar a cooperação entre as redes secundária e primária, seus desafios e as vantagens que a mesma pode trazer tanto para UPs quanto para USs. A cooperação, nesse caso, pode ser vista como uma quebra do paradigma de não interferência, ocasionando o que se pode chamar de “interferência benéfica” entre USs e UPs.

A proposta apresentada neste trabalho é que os nós cognitivos da rede secundária atuem como retransmissores (*relays*) dos nós primários, sem quebrar a semântica fim-a-fim da comunicação, trazendo melhorias tanto no desempenho da rede primária quanto da rede secundária. Isso acontece pois, com auxílio dos nós secundários, os nós primários são capazes de escoar mais eficientemente o seu tráfego, liberando mais oportunidades de uso do meio para os nós secundários. Na proposta descrita, é feito uso dos mecanismos de priorização de tráfego, modulação e codificação adaptativa

(ou controle automático de taxa) e de *spoofing*, os quais estão presentes na maioria das tecnologias de rede sem fio, para tornar transparente a cooperação dos USs em relação aos UPs.

Com o intuito de demonstrar os ganhos obtidos pela proposta apresentada, ela foi implementada utilizando os recursos oferecidos pelo padrão IEEE 802.11e [14], os quais estão presentes no simulador ns-3 [15]. Pelo emprego correto dos mecanismos mencionados anteriormente e as suas respectivas parametrizações, obteve-se resultados que demonstram que a cooperação transparente dos USs pode fazer com que os UPs obtenham uma melhor vazão, ao mesmo tempo em que os próprios USs também o fazem em função de aumentarem as suas oportunidades de transmissão secundárias [10].

## 1.4 Organização do Trabalho

O restante dessa dissertação está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 descreve os principais trabalhos que tratam da cooperação em redes sem fio e Redes de Rádios Cognitivos. O Capítulo 3 apresenta a modelagem do sistema sob a qual foi desenvolvida a proposta deste trabalho e descreve o mecanismo de cooperação em Redes de Rádios Cognitivos proposto. Em seguida, o Capítulo 4 descreve o ambiente de simulação usado para a implementação desenvolvida e a avaliação de desempenho da solução proposta. O Capítulo 5 traz os resultados das simulações realizadas, assim como uma discussão a respeito dos mesmos. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão da dissertação, com considerações sobre a proposta e seu desempenho, suas limitações e os trabalhos futuros a serem realizados.

# Capítulo 2

## Trabalhos Relacionados

Neste capítulo, será apresentada uma análise da literatura relativa à proposta deste trabalho. Na Seção 2.1, há uma melhor descrição das Redes de Rádios Cognitivos, do sensoriamento de espectro e seus desafios. Na Seção 2.2, a comunicação cooperativa aplicada a redes convencionais é analisada. A Seção 2.3 apresenta a literatura sobre as diferentes formas de cooperação em Redes de Rádios Cognitivos: o sensoriamento cooperativo, apresentado na Seção 2.3.1, o Aluguel de Espectro, na Seção 2.3.2, e a comunicação cooperativa, foco da proposta deste trabalho, na Seção 2.3.3. Por fim, na Seção 2.4, é apresentada uma comparação da proposta feita neste trabalho frente aos trabalhos encontrados na literatura.

### 2.1 Redes de Rádios Cognitivos

Conforme apresentado no Capítulo 1, Rádios Cognitivos são dispositivos de comunicação sem fio dotados de inteligência e consciência do ambiente ao seu redor, capazes de adaptar seus estados internos e parâmetros de comunicação, com o objetivo de utilizar o espectro eletromagnético com mais eficiência e permitir a integração com novos serviços personalizados [6]. Originalmente proposto por Joseph Mitola III [5] e chamado atualmente de Rádio Cognitivo Completo (*Full Cognitive Radio*), esse dispositivo tem objetivos bastante ambiciosos, como analisar e compreender todo o tipo de informação do seu meio de operação, desde o uso do espectro, diferentes tecnologias sem fio (IEEE 802.11, Bluetooth, entre outras), dados de localização geográfica (por meio de triangulação de antenas ou GPS), ou até mesmo interpretar a linguagem da comunicação de seus usuários (por exemplo, alternar para um modo de mobilidade quando o usuário diz “vou entrar no carro”). Além disso, o Rádio Cognitivo Completo deve ser capaz de trocar essas informações observadas com os outros dispositivos das diferentes redes nas quais opera [7].

Embora tenha havido muitos avanços tecnológicos ultimamente que aproximam o Rádio Cognitivo Completo da realidade, esse conceito ainda se encontra distante de

uma implementação prática. Dessa forma, as pesquisas na área de Redes de Rádios Cognitivos, atualmente, têm como objetivo viabilizar o melhor aproveitamento de oportunidades no espectro eletromagnético, proporcionadas por usuários licenciados (primários), por usuários não licenciados (secundários). O espectro, embora aparentemente seja um recurso escasso devido ao seu modelo de licenciamento estático, em geral é pouco aproveitado nas dimensões do tempo e espaço, o que permite o surgimento das Redes de Rádios Cognitivos e seu acesso oportunista ao espectro [10]. Como visto no Capítulo 1, a definição de Rádio Cognitivo, segundo a FCC, é: “um rádio ou sistema que sensoria o seu ambiente operacional eletromagnético e pode dinamicamente e autonomamente ajustar seus parâmetros de operação de rádio para modificar a operação do sistema, com o objetivo de maximizar a vazão de dados, mitigar a interferência, facilitar a interoperabilidade ou acessar mercados secundários.” [9].

Segundo esse modelo de acesso ao espectro, Usuários Primários (UPs) utilizam as faixas de frequências a eles licenciadas, com acesso prioritário às mesmas. Simultaneamente, os Usuários Secundários (USs) realizam o acesso não licenciado, utilizando as oportunidades de espectro oferecidas pelos UPs. Para desempenhar o compartilhamento do espectro desse modelo de acesso, um Rádio Cognitivo precisa ter, como característica principal, a capacidade cognitiva, isto é, a habilidade de observar e sensoriar o ambiente no qual opera, além de possivelmente comunicar-se com outros dispositivos cognitivos sobre essas condições. Esse dispositivo deve ser capaz de capturar variações temporais e geográficas nas condições do espectro eletromagnético, para poder realizar o acesso secundário eficientemente nas oportunidades de espectro proporcionadas pelos UPs licenciados [8, 16].

Outra característica desejável para esses dispositivos é a reconfigurabilidade, isto é, a capacidade de alternar dinamicamente os parâmetros de sua configuração, podendo utilizar diferentes faixas de frequência ou esquemas de modulação para realizar suas transmissões e recepções. Essa capacidade é em grande parte apoiada no conceito de Rádio Definido por *Software* (*Software Defined Radio*, ou SDR), definido como um dispositivo de comunicação sem fio que possui parte de suas funções implementadas e realizadas por *software* em um computador, em vez de usar componentes fixos de *hardware* [8, 17]. SDRs são capazes de se reconfigurar dinamicamente, através da programação de seu *software*, para interoperar com dispositivos que utilizam diferentes tecnologias e parâmetros de comunicação sem fio.

Um Rádio Cognitivo que opera como US de uma faixa de espectro licenciada opera de acordo com o que é chamado de ciclo cognitivo [6], alternando entre transmissão e recepção (a comunicação) e sensoriamento e aprendizado (a cognição). As funcionalidades que um Rádio Cognitivo projetado para implementar o compartilhamento de espectro deve ser capaz de exercer são [3, 8]:

- Sensoriar o espectro de forma a detectar as oportunidades de utilização, bem como detectar a presença de UPs para evitar a interferência a eles (sensoriamento de espectro).
- Selecionar, dentre as oportunidades de espectro encontradas, o melhor canal de comunicação a ser utilizado (gerenciamento de espectro).
- Coordenar o acesso a esse canal com outros USs (compartilhamento de espectro).
- Liberar uma faixa de frequência alocada a um UP ao detectar sua presença, procurando manter a continuidade e a qualidade da comunicação realizada (mobilidade de espectro).

### 2.1.1 Sensoriamento de Espectro

Para realizar o compartilhamento do espectro, isto é, aproveitar as oportunidades de espectro oferecidas pelos UPs, os USs devem ser capazes de detectar as mesmas. Essa tarefa de detectar a presença ou ausência dos UPs em certas faixas de frequência é denominada sensoriamento de espectro (*spectrum sensing*) [18]. A utilização do espectro licenciado causando o mínimo de interferência possível aos UPs depende fundamentalmente do eficiente cumprimento dessa tarefa.

O sensoriamento de espectro envolve um compromisso na detecção de UPs: caso o sensoriamento seja muito conservador, a probabilidade de falhas na detecção será baixa, mas isso implicará em uma maior probabilidade de se perder uma oportunidade de espectro, o que reduz o aproveitamento não licenciado pelos USs. No caso oposto, o sensoriamento agressivo encontra um maior número de oportunidades a serem aproveitadas, porém aumenta a probabilidade e o risco de se falhar em detectar um UP no meio, causando interferência na comunicação do mesmo, o que deve ser evitado, segundo o modelo de acesso não licenciado ao espectro [8].

A melhor forma de se detectar a disponibilidade de uma determinada faixa de espectro seria detectar se há UPs recebendo transmissões dentro do alcance de algum US. No entanto, a detecção dessa maneira é dificultada consideravelmente pelas limitações dos dispositivos sem fio. Por essa razão, o sensoriamento do espectro é realizado pelos USs com o objetivo de detectar transmissões primárias e, dessa forma, reconhecer as oportunidades de espectro a serem aproveitadas [19].

Para se detectar o sinal  $X[n]$  transmitido pelo UP em um canal AWGN (*additive white gaussian noise* – ruído branco gaussiano aditivo), diferentes técnicas de detecção de sinal podem ser utilizadas, de acordo com o conhecimento *a priori* que os USs tenham desse sinal e das condições e limitações existentes nos dispositivos secundários [20]. Algumas dessas técnicas serão apresentadas a seguir.

## Detecção de Energia

A detecção de energia é o método de sensoriamento mais genérico, pois não é necessário nenhum conhecimento *a priori* a respeito do sinal  $X[n]$  sendo detectado [20]. Esse método funciona comparando a energia do sinal recebido  $Y[n]$  coletado em uma janela de observação com  $N$  amostras,  $\sum |Y[n]|^2$ , com um limiar  $\gamma$ , que em geral depende do ruído do canal [21, 22]. Caso a energia do sinal recebido seja maior que o limiar, considera-se que o sinal transmitido está presente. Caso contrário, assume-se que no canal há somente o ruído branco gaussiano.

Existem duas maneiras de se implementar a detecção de energia: no domínio do tempo, como visto no parágrafo anterior, e no domínio da frequência. No domínio da frequência, o detector utiliza a transformada de Fourier do sinal  $Y[n]$ , em geral sua implementação rápida conhecida como FFT (*Fast Fourier Transform*), e pode calcular a energia de determinadas frequências realizando a seleção de certas saídas da transformada, possibilitando a detecção em diferentes faixas do espectro simultaneamente [16].

A detecção de energia, por ser o método mais simples, possui muitas limitações. Essa técnica possui desempenho ruim quando a relação sinal-ruído (SNR, ou *signal-noise ratio*) é muito baixa. Isso ocorre por que a variância do ruído do canal não pode ser estimada corretamente nessas condições, tornando o sinal impossível de ser detectado apropriadamente [23]. Além disso, não é possível diferenciar se o sinal detectado é originado de um UP ou um US utilizando a detecção de energia. Isso é um problema, pois o comportamento do Rádio Cognitivo deve ser diferente ao detectar a presença de um UP (causar o mínimo de interferência possível) do que ao detectar um US (compartilhar o meio com igual prioridade) [24].

## Detecção por Filtros Casados

Quando o sinal  $X[n]$  sendo detectado é conhecido, a utilização de um filtro casado, ou o seu correlacionador equivalente, para a detecção é o método ótimo para realizar essa tarefa [25]. Esse método, em comparação com outras formas de detecção, necessita do menor número de amostras e, conseqüentemente, a menor janela de observação, para obter um determinado nível de desempenho na detecção. Também denominada detecção coerente, essa técnica compara o filtro casado do sinal recebido  $Y[n]$  e o sinal conhecido  $X[n]$  com um limiar  $\gamma$  para realizar a detecção [23].

Esse método de detecção requer que o Rádio Cognitivo efetivamente demodule todos os sinais recebidos, sendo necessário conhecimento *a priori* sobre o sinal detectado, como tipo de modulação, frequência de operação, largura de banda, sinais piloto, preâmbulos e códigos de espalhamento de espectro utilizadas pelos UPs. Essa quantidade extensa de informação pode ser armazenada na memória do Rádio Cog-

nitivo, mas para realizar esse tipo de detecção, o dispositivo secundário precisaria de um receptor dedicado para cada um dos diferentes tipos de sinais provenientes de diferentes classes de UPs [20]. Além disso, essa técnica requer um consumo elevado de energia para executar simultaneamente a recepção e demodulação para a detecção coerente das diferentes classes de UPs [18].

### **Detecção de Sinais Piloto**

Essa forma de detecção se assemelha à detecção por filtros casados. Formas de onda conhecidas são comumente utilizadas em sistemas de comunicação sem fio para fins de sincronização entre transmissor e receptor. Com o conhecimento desse sinal piloto  $X_p[n]$ , o Rádio Cognitivo pode realizar a detecção comparando o filtro casado do sinal recebido  $Y[n]$  e o complexo conjugado do sinal piloto  $X_p^*[n]$  com um limiar  $\gamma$ .

Esse método de detecção é um compromisso entre a elevada complexidade da detecção por filtros casados, com a generalidade da detecção de energia, por necessitar de menos conhecimento *a priori* sobre o sinal  $X[n]$ , embora algum conhecimento ainda seja necessário [16, 26].

### **Detecção de Cicloestacionariedade**

Sinais modulados são geralmente combinados com portadoras senoidais, trens de pulsos, sequências de espalhamento que se repetem ou outras características que resultam em sua periodicidade. Embora os dados devam ser considerados como parte de um processo aleatório, os sinais modulados podem ser caracterizados como cicloestacionários, já que suas estatísticas, como média e autocorrelação, apresentam periodicidade [20]. Como o ruído gaussiano é um processo estacionário no sentido amplo e sinais transmitidos pelos UPs possuem periodicidades que os tornam cicloestacionários, estes exibem uma correlação espectral que pode ser explorada para diferenciá-los do ruído, realizando a detecção [16, 27].

Como desvantagens, esse método apresenta complexidades de implementação e computacional elevadas, além de necessitar de conhecimento prévio, ou de capacidade de estimar características a respeito dos sinais detectados (suas frequências cíclicas).

## **2.1.2 Variações nas Propostas de Redes de Rádios Cognitivos**

A área de pesquisa sobre Redes de Rádios Cognitivos é muito ampla e há diversas maneiras de se abordar o problema do compartilhamento do espectro licenciado. Existem diferentes formas de implementar o compartilhamento do espectro utili-

zando Redes de Rádios Cognitivos. Em uma delas, USs utilizam Rádios Cognitivos para sua comunicação, enquanto UPs podem utilizar dispositivos de comunicação sem fio legados, sem alterações em seu funcionamento. Outra forma de funcionamento tem os UPs, além dos USs, fazendo parte da Rede de Rádios Cognitivos, possuindo capacidades cognitivas que facilitem a superação de desafios de se realizar o acesso não licenciado junto a dispositivos licenciados legados [28–32]. Além disso, nessa rede pode haver ou não interação entre os dispositivos primários e secundários, e essa interação pode tomar diferentes formas, como será visto na Seção 2.3.

## 2.2 Comunicação Cooperativa em Redes Convencionais

Comunicação cooperativa é um termo que se refere ao processamento e retransmissão colaborativos de informações recebidas por nós de uma rede que não são efetivamente o destino daquelas informações. Conforme visto no Capítulo 1, na comunicação tradicional, uma mensagem é enviada a partir de um conjunto (possivelmente unitário) de fontes a outro conjunto (também possivelmente unitário) de destinos. Com a cooperação, um terceiro conjunto (que, mais uma vez, pode ser unitário) entra em ação. Esse conjunto é chamado de retransmissores (do inglês *relays*). A cooperação pode trazer muitas vantagens em relação à comunicação tradicional, como ganho de potência, economia de energia e maior diversidade espacial [11, 33], além do aumento da vazão de transmissão [10].

Devido à natureza de difusão (*broadcast*) dos sinais sem fio, um sinal, ou um pacote ou quadro, transmitido de um emissor com destino a um receptor, pode ser detectado por todos os vizinhos próximos ao emissor. A natureza de difusão já foi estudada como um problema inerente às redes sem fio, pois com isso o meio se torna o gargalo da comunicação, uma vez que apenas um nó pode realizar transmissões de cada vez, caso contrário ocorre interferência. No entanto, essa mesma natureza é o que permite que a comunicação cooperativa recrute retransmissores para trazer benefícios ao par fonte-destino, quando os mesmos estão localizados de modo a possuir melhores condições do meio de transmissão tanto para a fonte quanto para o destino [12].

Como já mencionado no Capítulo 1, há diferentes formas que as retransmissões realizadas pelos *relays* podem ser feitas. As retransmissões podem ser classificadas de acordo com a camada de rede na qual são realizadas, ou de como a comunicação é recebida e retransmitida pelos *relays* [12, 13]:

- armazenar-e-encaminhar, ou *store-and-forward*: nesse modo de cooperação, que ocorre nas camadas superiores da rede (MAC ou mais acima), cada pacote

(ou quadro) recebido da fonte é armazenado pelo *relay* para ser retransmitido ao destino;

- decodificar-e-encaminhar, ou *decode-and-forward*: nesse modo, que ocorre na camada física da rede (PHY), o sinal recebido pelo *relay* é decodificado e os *bits* detectados são novamente modulados e retransmitidos ao destino;
- amplificar-e-encaminhar, ou *amplify-and-forward*: nesse modo, que também ocorre na camada PHY, o sinal recebido pelo *relay* é amplificado e retransmitido ao destino, sem que nem mesmo seja decodificado;
- operações no sinal: por último, e também na camada física, o *relay* pode ainda realizar alguma operação mais sofisticada no sinal retransmitido e na transmissão de sua própria comunicação, comprimindo-as e/ou combinando-as, com o objetivo de auxiliar a comunicação fonte-destino ao mesmo tempo em que transmite o seu próprio sinal a um outro destino de forma independente.

Quando ocorre na camada PHY, a comunicação cooperativa consiste em uma classe de técnicas que permitem que dispositivos móveis com apenas uma antena obtenham alguns dos benefícios de sistemas MIMO (*Multiple Input / Multiple Output*, ou múltiplas entradas / múltiplas saídas), técnica que necessita que os dispositivos possuam múltiplas antenas. A ideia básica é que dispositivos com uma única antena “compartilhem” suas antenas de uma forma que cria um sistema MIMO virtual, obtendo as vantagens dessa técnica sem infringir suas restrições de tamanho, mobilidade e portabilidade.

Embora seja altamente promissora, a cooperação na camada física ainda possui muitos desafios consideráveis que precisam ser superados para sua implementação bem-sucedida. Primeiramente, decodificação conjunta no receptor é viável somente se é possível manter a sincronização entre todos os nós envolvidos na comunicação. Além disso, esquemas que realizam operações para combinar o sinal retransmitido com o próprio sinal do *relay* são significativamente diferentes das implementações comercialmente disponíveis de transmissores e receptores sem fio. Para se implementar a comunicação cooperativa utilizando esses esquemas, é necessário projetar *hardwares* da camada física consideravelmente diferentes dos encontrados atualmente [33].

A cooperação nas camadas superiores se assemelha ao roteamento em uma rede de múltiplos saltos (*multihop*). Essa forma pode trazer menos benefícios à comunicação do que a cooperação na camada física, porém sua implementação é consideravelmente mais simples, sendo viável nos equipamentos de comunicação sem fio usados atualmente.

As retransmissões realizadas na comunicação cooperativa obviamente beneficiam os nós que são auxiliados pelos *relays*. Mas, além disso, quando a comunicação

cooperativa é utilizada, pode-se observar que a vazão agregada de toda a rede é aumentada. Ou seja, a comunicação cooperativa pode trazer benefícios até aos *relays* que auxiliam as transmissões de outros nós [33].

### Trabalhos sobre Comunicação Cooperativa em Redes Convencionais

NOSRATINIA *et al.* [13] descrevem, em um tutorial, a comunicação cooperativa na camada física da rede (PHY). Nesse trabalho, são discutidos os esquemas decodificar-e-encaminhar (*decode-and-forward*), amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) e cooperação por código (*coded cooperation*, que é a combinação do sinal retransmitido com o próprio tráfego do *relay*). Análises numéricas em um cenário com dois dispositivos se comunicando com uma estação base demonstram que a comunicação cooperativa é superior à não cooperação, em termos de obtenção de menor taxa de erros na comunicação.

LIU *et al.* [12] descrevem uma proposta *cross-layer* de comunicação cooperativa, utilizando elementos da camada física (PHY) e da camada de acesso ao meio (MAC). As retransmissões descritas utilizam o esquema RTS-CTS (*request to send – clear to send*), e as fontes utilizam os pacotes CTS para solicitar as retransmissões aos *relays*, que enviam um novo pacote, denominado *helper-ready to send* (HTS) para informar que farão a retransmissão do pacote. As retransmissões podem utilizar o esquema armazenar-e-encaminhar (*store-and-forward*) para retransmitir os pacotes inteiros, ou um esquema de combinação de código (*code combining*) para que fonte e *relay* realizem as transmissões simultaneamente, tendo melhores condições de recepção no destino. As propostas são comparadas entre si e com a não cooperação através de análises numéricas, que demonstram a superioridade da cooperação utilizando combinação de código, seguida pela cooperação *store-and-forward*, em relação ao cenário não cooperativo.

KORAKIS *et al.* [33] implementaram a proposta *cross-layer* de LIU *et al.* [12], que utiliza pacotes RTS-HTS-CTS, de duas formas distintas. A primeira adapta *drivers* de controladores de rede de código aberto (*open source*) do padrão IEEE 802.11b. A segunda utiliza rádios definidos por *software* (SDRs) para implementar a proposta de comunicação cooperativa. As implementações desenvolvidas são instaladas em um *testbed* e avaliadas, de acordo com suas limitações práticas, demonstrando que a vazão agregada da rede como um todo é beneficiada quando há cooperação. Essa conclusão é muito importante, pois demonstra que não só o nó que é beneficiado com retransmissões obtém vantagens com a cooperação, mas toda a rede de uma forma geral.

HUANG e ZHANG [34] avaliam o desempenho de redes que utilizam retransmissões no esquema amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) em diferentes topologias. O uso de retransmissões para formar um esquema MIMO virtual é com-

parado com cenários em que os nós possuem múltiplas antenas. Utilizando análises numéricas, o trabalho demonstra que redes cooperativas podem ter desempenho superior a redes não cooperativas com nós que possuem sistemas MIMO, porém o desempenho das redes cooperativas depende fortemente do posicionamento dos *relays* em relação aos nós fonte e destino da comunicação.

## 2.3 Cooperação entre Usuários Primários e/ou Secundários

Tradicionalmente, a pesquisa na área de Rádios Cognitivos tinha como objetivo o aproveitamento do espectro licenciado de forma que os USs causassem o mínimo possível de interferência na comunicação dos UPs, procurando ser até mesmo indetectáveis pelos mesmos. No entanto, muitos desafios podem ser superados e muitas vantagens podem ser obtidas caso se admita interação e cooperação entre os UPs e os USs nas Redes de Rádios Cognitivos.

Existem algumas direções que a pesquisa relacionada à cooperação entre os usuários das redes primária e secundária tem seguido. No sensoriamento cooperativo, a ser descrito na Seção 2.3.1, USs compartilham e combinam informações individuais a respeito do sensoriamento de espectro. Essa técnica tem o objetivo de utilizar a diversidade espacial de múltiplos usuários da rede secundária para que a rede como um todo tome as melhores decisões com relação ao aproveitamento de oportunidades de espectro proporcionadas pela rede primária, superando algumas das limitações do sensoriamento individual.

No Aluguel de Espectro, a ser descrito na Seção 2.3.2, a cooperação ocorre entre os usuários das duas redes, primária e secundária. Os UPs, licenciados para utilizar o meio, alugam o mesmo aos USs não licenciados, ou seja, negociam e oferecem explicitamente oportunidades de uso do espectro aos USs. Dessa forma, não existem mais desafios relativos às limitações do sensoriamento, já que as oportunidades de espectro são oferecidas diretamente pelos UPs. Porém, novas barreiras surgem nesse modelo, já que UPs e USs devem utilizar dispositivos cognitivos capazes de realizar essa negociação.

Por fim, a comunicação cooperativa, já descrita na Seção 2.2, terá sua aplicação às Redes de Rádios Cognitivos descrita na Seção 2.3.3. Foco principal da proposta apresentada neste trabalho, a comunicação cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos também utiliza a diversidade espacial proporcionada por múltiplos usuários, como no sensoriamento cooperativo, porém para melhorar a robustez e eficiência da comunicação dos mesmos. Além disso, essa técnica, como o Aluguel de Espectro, também quebra o paradigma de não interferência na rede primária, embora possa

continuar mantendo a transparência aos UPs.

### 2.3.1 Sensoriamento Cooperativo

O sensoriamento cooperativo, por si só, não é uma técnica de detecção de UPs, como as descritas na Seção 2.1.1. A cooperação na detecção de UPs se dá através do compartilhamento e a combinação das informações locais de sensoriamento de espectro obtidas por diversos dispositivos cognitivos. Utilizando a diversidade espacial proveniente de múltiplos USs espalhados na rede, o conjunto de USs consegue mitigar problemas de sensoriamento causados por sombreamento, atenuação dos sinais e incerteza na estimativa do ruído. O sensoriamento cooperativo, quando utilizado por uma Rede de Rádios Cognitivos, melhora as probabilidades de detecção de UPs e de alarmes falsos consideravelmente, além de diminuir o tempo necessário ao sensoriamento e mitigar o problema do terminal escondido [16, 20, 35].

O sensoriamento cooperativo se apoia na variabilidade da potência do sinal detectado em diferentes posições do espaço [35]. As informações locais de sensoriamento são enviadas a uma entidade central, que pode ser um US eleito para tal, e agregadas para a obtenção do resultado da cooperação no sensoriamento. Essa decisão agregada pode, então, ser difundida por iniciativa própria ou ser fornecida em resposta a consultas feitas por USs [16, 19].

A agregação e decisão do resultado do sensoriamento cooperativo é denominada fusão. Essa fusão pode ocorrer de duas maneiras distintas. Na primeira, chamada fusão de decisão, os usuários responsáveis pelo sensoriamento distribuído realizam a detecção e decidem, de acordo com seus critérios locais, se o espectro está livre ou ocupado. As decisões individuais são agregadas e a rede chega a uma decisão cooperativa com relação à presença de UPs. Na segunda forma, chamada de fusão de dados, os dados brutos dos sensoriamentos individuais são agregados, e a entidade responsável pela decisão faz uso deles para inferir a ocupação ou não do espectro [19].

Em vez de utilizar uma entidade centralizada ou um único usuário eleito para a decisão do sensoriamento cooperativo, a rede pode usar um esquema distribuído, em que cada US recebe as informações do sensoriamento dos outros para combiná-las com seu sensoriamento local [16]. Nesse esquema distribuído, os USs podem tanto realizar a fusão de decisão quanto a fusão de dados para combinar os resultados do seu próprio sensoriamento com os recebidos de seus pares.

O sensoriamento cooperativo traz desafios relativos à coordenação do sensoriamento e ao compartilhamento dos resultados locais obtidos e da decisão cooperativa. Para isso, há a necessidade de se manter um canal de controle para a cooperação dos dispositivos envolvidos [16]. Claramente, pode-se perceber que a fusão de dados coloca uma carga maior nesse canal de controle, em comparação à fusão de decisão,

devido ao volume de informações que deve ser agregado nesse caso. Porém, por utilizar a informação completa para o sensoriamento cooperativo, a fusão de dados tende a ser mais acurada.

### Trabalhos sobre Sensoriamento Cooperativo

LETAIEF e ZHANG [19] apresentam uma proposta de sensoriamento cooperativo utilizando fusão de decisão. Por meio de análise numérica, os autores comparam três diferentes regras de fusão da decisão do sensoriamento. Quando utilizam a regra “E” (“AND”), os nós decidem que o meio está ocupado por um UP apenas quando todos os USs o detectam no sensoriamento. Na regra “OU” (“OR”), por outro lado, se pelo menos um US detectou a presença de um UP no espectro, os nós o consideram ocupado. Na terceira regra, denominada “Maioria”, os USs consideram o meio como ocupado por UPs quando sua maioria simples o detecta em seu sensoriamento individual. Por meio de análise numérica, o trabalho compara as três regras em termos das probabilidade de erros de detecção e de alarmes falsos proporcionadas por sua utilização, elegendo a regra “OU” como superior às demais.

GHASEMI e SOUSA [36] apresentam cenários com um UP e múltiplos USs que realizam o sensoriamento. Os nós realizam detecção de energia individualmente, e a cooperação ocorre utilizando fusão de decisão. Através de análise numérica e simulações Monte Carlo, dois cenários são avaliados. No primeiro, múltiplos nós secundários são posicionados independentemente e a cooperação é avaliada com relação à variação do número de nós participantes. No segundo cenário avaliado, dois USs correlacionados espacialmente têm a distância entre eles variada. Como resultados encontrados, são constatadas melhoras significativas no desempenho do sensoriamento cooperativo, em comparação ao sensoriamento individual.

VISOTSKY *et al.* [37] avaliam o sensoriamento de múltiplos USs operando na presença de um transmissor de TV, que atua como UP. Os nós utilizam a detecção de energia no sensoriamento individual, e o sensoriamento cooperativo ocorre de maneira centralizada, com um nó “mestre” que coordena a cooperação. São descritas duas formas de combinação da informação: *hard information combining*, como os autores chamam a fusão de decisão, e *soft information combining*, a fusão de dados. As avaliações são realizadas através de análise numérica e simulações Monte Carlo e chegam à conclusão de que a fusão de dados, ou *soft information combining*, apresenta desempenho superior. Além disso, o trabalho também conclui que o sensoriamento cooperativo melhora desempenho da detecção do UP e relaxa os requisitos de sensibilidade de detecção (*hardware*) dos nós individuais.

CABRIC *et al.* [20] apresentam uma descrição teórica do sensoriamento de espectro, explicando a detecção de energia, a detecção por filtros casados e a detecção por cicloestacionariedade. Em seguida, é descrita uma proposta de sensoriamento

cooperativo distribuído em que os nós secundários realizam sensoramento individual e consultam outros nós da rede. As avaliações são realizadas variando a fração de de 0 (sem cooperação) a 20% dos nós consultados, em um cenário com múltiplos USs operando no espectro de transmissor de TV, na faixa de 700MHz. O trabalho obtém resultados melhores quando o sensoramento cooperativo é utilizado e 20% dos nós são consultados em um ambiente de simulação.

### 2.3.2 Aluguel de Espectro

Como visto anteriormente, na proposta original do uso de Rádios Cognitivos, essa tecnologia deveria ser transparente, com USs invisíveis aos UPs realizando acesso oportunista ao espectro licenciado. Os UPs não possuem nenhum incentivo em participar do compartilhamento do espectro, pois não recebem nenhum benefício por permitirem que USs façam uso das suas faixas de frequência. Nesse modelo, a responsabilidade da coexistência recai unicamente sobre os USs, que não devem interferir na comunicação dos UPs.

No entanto, há trabalhos que exploram outra possibilidade: um novo modelo, chamado de Aluguel de Espectro (*Spectrum Leasing*). Nesse modelo, UPs, que possuem a licença sobre suas faixas de espectro, alugam essas faixas aos USs, isto é, permitem que os USs utilizem seu espectro em troca de uma compensação, que pode ser monetária ou não. Nessa abordagem, dispositivos cognitivos seriam usados tanto pelos UPs quanto pelos USs. Esses dispositivos teriam a capacidade de negociar o uso do espectro eletromagnético entre eles, de diversas maneiras.

Técnicas da Economia são importantes para estudar esse novo modelo de uso dos Rádios Cognitivos. A Microeconomia, ou Teoria de Preços, e a teoria de Estruturas de Mercados são importantes na análise da comercialização das oportunidades de uso do espectro eletromagnético. A Teoria de Jogos é usada para modelar e estudar as interações estratégicas dos UPs e Secundários, tanto entre os dois grupos quanto dentro dos mesmos [28, 29].

#### Teoria de Jogos

A Teoria de Jogos é o estudo do conflito e cooperação entre indivíduos ou grupos. Um jogo é formado por três componentes fundamentais: um conjunto de jogadores, um conjunto de estratégias que podem ser usadas pelos jogadores e um conjunto de recompensas para as ações que podem ser realizadas. A Teoria dos Jogos, em conjunto com princípios de Mercado e Teoria de Preços, fornece uma base sólida para a modelagem das atividades econômicas do Aluguel de Espectro nas Redes de Rádios Cognitivos [28], além de poder ser utilizada para modelagem em estudos de Rádios Cognitivos que não contemplem o Aluguel de Espectro [38].

Em geral, os jogos modelados são chamados não cooperativos, no sentido em que os jogadores são egoístas e tomam decisões de forma independente uns dos outros. Cada jogador possui interesses próprios, muitas vezes conflitantes, e eles participam do jogo de forma a maximizar suas próprias recompensas. Uma das soluções mais utilizadas para esse tipo de jogo é o Equilíbrio de Nash, uma situação em que nenhum jogador consegue uma recompensa maior ao tomar uma ação individualmente, dadas as ações realizadas pelos outros jogadores. Há também os jogos cooperativos, em que os jogadores supostamente são altruístas e atuam de forma a maximizar a recompensa de todo o grupo, mesmo que isso signifique fazer sacrifícios individuais. Diferentes modelos são utilizados nos diversos trabalhos que abordam o Aluguel de Espectro, como Jogos de Stackelberg [31], Jogos de Bertrand, Jogos de Cournot, Jogos de Coalizão e Jogos Repetidos, de acordo com as premissas de cada trabalho [28].

### **Teorias de Preços e Mercado**

A Teoria de Preços, ou Microeconomia, estuda como preços relativos são determinados e como as atividades econômicas são coordenadas através dos preços. Essa teoria é fundamental para o modelo de Aluguel de Espectro, já que faixas de frequência, que podem ser consideradas um bem ou serviço, serão comercializadas entre UPs e USs. Dentro da Teoria de Preços, as Teorias de Leilões e de Barganha são as mais populares para o estudo do comércio de recursos.

Conceitos da Teoria de Mercado, como a organização em monopólios, oligopólios e o equilíbrio de mercado, também se fazem muito importantes para o Aluguel de Espectro. Em um monopólio há um vendedor e múltiplos compradores, o que corresponde a um UP alugando seu espectro e múltiplos USs negociando, e possivelmente competindo entre si, pelas oportunidades. Em um oligopólio, há múltiplos vendedores e múltiplos compradores, o que acrescenta a competição entre diferentes UPs para alugar o espectro aos USs e obter lucros maiores [28, 29].

Embora essas teorias sejam utilizadas para modelar os preços e a estabilidade de mercado do Aluguel de Espectro, é necessário também estudar as interações estratégicas entre os usuários. Por esse motivo, em geral, a Teoria de Jogos é utilizada em conjunto com os conceitos de Microeconomia e Mercado nos trabalhos que estudam Redes de Rádios Cognitivos sob essa perspectiva [28].

### **Trabalhos sobre Aluguel de Espectro**

MAHARJAN *et al.* [28] elaboraram um *survey* sobre o uso abordagens da Economia em Redes de Rádios Cognitivos, que se aplicam principalmente ao Aluguel de Espectro, devido à sua natureza econômica. No trabalho realizado, há uma des-

crição das bases de Teoria de Preços, Princípios de Mercado e Teoria de Jogos, além da enumeração de diversos trabalhos que utilizam algumas ou todas essas técnicas aplicadas às Redes de Rádios Cognitivos.

NIYATO e HOSSAIN [29] também realizam uma fundamentação teórica das técnicas econômicas que podem ser utilizadas no Aluguel de Espectro, além de descrever e classificar os trabalhos relacionados, com relação à abordagem e modelagem utilizadas. É proposto um esquema que se baseia no conceito de equilíbrio de mercado, modelando as funções de oferta (pelos UPs) e demanda (pelos USs) do espectro eletromagnético e um algoritmo de aprendizado GFM (*Generalized Fading Memory*), em que os usuários possuem informação incompleta sobre a rede.

VAZQUEZ-VILAR *et al.* [30] formulam o Aluguel de Espectro como um Jogo de Stackelberg e mostra que tanto UPs quanto USs se beneficiam, em termos de suas funções de utilidade (recompensas), em relação a um cenário em que não há comercialização de oportunidades de uso do espectro eletromagnético.

ZHANG e ZHANG [31] também formulam o problema do Aluguel de Espectro como um Jogo de Stackelberg, em que o único UP transmissor é o líder e os USs, que são os seguidores, competem entre si para receber a permissão de utilizar o espectro. Esse trabalho se encaixa também na área de comunicação cooperativa, pois os USs, além de realizarem um pagamento ao UP pelo uso do espectro, realizam retransmissões de suas mensagens durante parte do tempo que lhes foi cedido, em troca das oportunidades de uso do espectro licenciado.

ZHENG *et al.* [32] descrevem um esquema de Aluguel de Espectro em que duas redes celulares cooperam entre si. A rede primária é formada por uma estação base e um nó cliente primários e a rede secundária é composta por uma estação base e um nó cliente secundários. No esquema proposto, a estação base secundária faz *relay* do sinal primário em troca da permissão de realizar a comunicação secundária. Por esse motivo, esse trabalho é melhor discutido na Seção 2.3.3, a seguir.

### 2.3.3 Comunicação Cooperativa

A comunicação cooperativa, já descrita na Seção 2.2, prevê a cooperação dos nós de uma determinada rede com o intuito de melhorar o desempenho da comunicação fim-a-fim de pares fonte-destino, através de retransmissões realizadas por *relays* próximos à fonte ou ao destino. Nesta seção, será discutida a comunicação cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos, que pode quebrar o paradigma da não interferência entre as redes primária e secundária, promovendo a interação entre UPs e USs, em algo que pode ser visto como uma “interferência benéfica”.

Existem propostas de utilização de comunicação cooperativa entre os próprios USs, com o objetivo de melhorar a qualidade da sua própria comunicação [11, 39].

Também há trabalhos [11, 40–42] que propõem o uso de retransmissores para a comunicação dos UPs.

Dentre os trabalhos encontrados na literatura, a comunicação cooperativa pode ocorrer na camada física (PHY), utilizando o modo amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) [39], ou nas camadas superiores (MAC ou mais acima), utilizando o modo armazenar-e-encaminhar (*store-and-forward*), em que os *relays* retransmitem pacotes enviados pelos UPs e/ou USs [11, 40–42]. Nos trabalhos que utilizam a retransmissão de pacotes (armazenar-e-encaminhar), utilizando-se da Teoria de Filas, é possível mostrar que os retransmissores da comunicação dos UPs fazem com que suas filas se esvaziem mais rapidamente, resultando em mais oportunidades de uso do espectro para os USs. Esses trabalhos utilizam a Teoria de Filas para analisar as taxas de chegada e de saída nas filas dos usuários.

### **Trabalhos sobre Comunicação Cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos**

O conceito de comunicação cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos já foi proposto em outros trabalhos [11, 19, 32, 39–44]. No entanto, a maior parte dos trabalhos da literatura realiza uma análise de alto nível, em geral utilizando Teoria de Filas, permanecendo um pouco distantes de situações mais práticas.

SIMEONE *et al.* [40] realizam a análise de um sistema com apenas quatro nós: um par fonte-destino de UPs e um par fonte-destino de USs. Esse trabalho propõe que o US fonte receba transmissões do UP fonte e mantenha uma fila de retransmissões, além de sua própria fila de envio de pacotes. Por meio de reconhecimentos positivos/negativos (ACKs/NACKs), o US, quando houver uma oportunidade de espectro, retransmite um pacote do UP fonte ao UP destino com probabilidade  $\epsilon$ , ou transmite um pacote próprio ao US destino com probabilidade  $1 - \epsilon$ . Quando existe a possibilidade de erros de sensoriamento, a potência com a qual o US fonte pode realizar transmissões deve ser controlada, e é realizada uma otimização desse parâmetro. Em topologias em que o canal entre o UP fonte e o UP destino é ruim, mas os canais entre UP fonte e US fonte e entre US fonte e UP destino são bons, conclui-se que, quando o US realiza a comunicação cooperativa, sua vazão estável máxima aumenta em relação ao caso não cooperativo.

KRIKIDIS *et al.* [41] utilizam a Teoria da Informação para encontrar taxas de transmissão dos UPs e USs de forma que não haja interferência nos UPs acima de um determinado limiar especificado, mesmo quando há transmissões simultâneas de ambas as partes, propondo um protocolo de acesso ao meio (MAC) com retransmissões. Esse trabalho realiza a comparação entre TDMA (*Time Division Multiple Access*) com e sem retransmissões e seu protocolo de transmissões simultâneas com e sem retransmissões, concluindo que sua proposta com comunicação cooperativa

apresenta os melhores resultados.

EL-SHERIF *et al.* [42] fazem uma análise da comunicação cooperativa em redes maiores. Sua proposta possui nós primários operando exclusivamente como retransmissores, e a rede analisada, na maioria dos resultados, consiste em 20 UPs, 10 USs e 10 retransmissores primários. Em sua modelagem, os UPs acessam sua rede num esquema TDMA, com fatias de tempo (*timeslots*) ociosas se não tiverem algo a transmitir. Os USs e retransmissores acessam esses *slots* ociosos com um protocolo *Slotted ALOHA*. É interessante notar que de seus resultados, conclui-se que oferecer prioridade aos retransmissores primários, isto é, quando os USs só acessam o espectro nos *slots* ociosos depois que os retransmissores esvaziarem suas filas, se obtém melhor desempenho não só para os UPs, mas também para os USs, em termos de vazão (taxa de saída das filas) obtida. A razão para isso é que há mais oportunidades de uso do espectro por parte dos USs quando as filas dos UPs e dos retransmissores são esvaziadas mais rapidamente.

WANG *et al.* [39] descrevem um esquema de cooperação que ocorre apenas entre os USs. A proposta de comunicação cooperativa apresentada utiliza o modo amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) na camada física (PHY). Além disso, o trabalho propõe o uso de sensoriamento cooperativo para a detecção da presença, ou chegada, de UPs no canal licenciado. Através de análises numéricas e simulações Monte-Carlo, é demonstrado que a probabilidade de interrupção (*outage probability*) e a duração média das transmissões dos USs são menores quando o esquema de comunicação cooperativa proposto é utilizado.

LETAIEF e ZHANG [19], já citados na Seção 2.3.1, além de tratar do sensoriamento cooperativo, também discutem a comunicação cooperativa, porém nesse assunto não apresentam análises numéricas e resultados. A comunicação cooperativa proposta ocorre entre os USs, em um cenário com um US fonte, um US destino, e  $K$  USs *relays* entre os mesmos. A cooperação pode utilizar o esquema amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) ou decodificar-e-encaminhar (*decode-and-forward*) para obter, como vantagens, a comunicação fonte-destino sem interrupções e menos interferência causada aos UPs.

FANOUS e EPHREMIDES [43] utilizam Teoria de Filas para avaliar a vazão estável de uma rede com apenas um par fonte-destino primário e um número  $N$  variável de nós secundários. O trabalho avalia cenários com sensoriamento perfeito, em que falhas de detecção ou alarmes falsos nunca ocorrem e cenários com sensoriamento imperfeito, em que tais eventos podem ocorrer. Além disso, os autores propõem que os USs realizem retransmissões cooperativas, mas apenas para o sensoriamento perfeito. Através de análise numérica, os autores concluem que, sem retransmissões, a presença dos USs prejudica os UPs, mas quando retransmissões são realizadas, essa presença pode melhorar a vazão dos UPs.

ZHENG *et al.* [32], já citados na Seção 2.3.2, descrevem uma Rede de Rádios Cognitivos de funcionamento celular, com uma estação base e um nó cliente primários e uma estação base e um nó cliente secundários. Sua proposta se baseia em um esquema de Aluguel de Espectro, em que a estação base secundária faz *relay* do sinal primário em troca da permissão de realizar a comunicação secundária, utilizando os modos amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*) ou decodificar-e-encaminhar (*decode-and-forward*). Originalmente, o tempo é dividido em três etapas: a primeira para a transmissão primária, a segunda para a retransmissão cooperativa e a terceira para a transmissão secundária. Utilizando sistemas MIMO, a estação base secundária pode retransmitir o sinal primário ao mesmo tempo em que transmite seu próprio sinal secundário. Além disso, os autores propõem que a estação base seja *full duplex*, ou utilize um esquema híbrido para alternar entre *half duplex* e *full duplex*, podendo também receber o sinal ao mesmo tempo em que realiza as outras duas atividades. Dessa forma, as atividades das três etapas podem ocorrer todas simultaneamente. Através de análise numérica, é demonstrado que o modo *full duplex* e o modo híbrido trazem benefícios ao desempenho da rede.

VERDE *et al.* [44] propõem um esquema de retransmissões cooperativas do sinal dos UPs, a serem realizadas pelos USs. No esquema proposto, baseado na Teoria da Informação, os USs, ao retransmitir o sinal dos UPs no modo amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*), comunicam-se entre si utilizando variações do ganho da retransmissão para representar os símbolos de sua comunicação. Através de análise numérica em um cenário com um par primário e um par secundário, os autores mostram que, dependendo da posição do transmissor secundário, que também atua como *relay*, sua proposta aumenta a capacidade do canal primário, além de permitir a comunicação secundária, embora obtenha taxas de transmissão baixas para a mesma.

## 2.4 Proposta deste Trabalho frente à Literatura

Os trabalhos encontrados na literatura relacionados à comunicação cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos são, em geral, fortemente teóricos e ainda se encontram muito distantes de tecnologias de redes sem fio existentes. A proposta que será apresentada neste trabalho aborda a comunicação cooperativa de uma forma independente da tecnologia de rede sem fio utilizada, mas se apresenta bem fundamentada e próxima de tecnologias de redes existentes [10].

Como visto nas Seções 2.2 e 2.3.3, a comunicação cooperativa traz benefícios não somente aos nós que tem suas transmissões auxiliadas. Na proposta deste trabalho, será mostrado que, ao auxiliar na comunicação dos UPs, os USs que atuam como *relays* aumentam o número de oportunidades de espectro disponíveis para seu uso,

melhorando as vazões de ambas as redes primária e secundária.

Além disso, um ponto que está ausente na maioria dos trabalhos encontrados no assunto é a questão da decisão sobre quando realizar ou não as retransmissões cooperativas, já que os benefícios trazidos por elas dependem das condições dos canais encontrados entre os nós da rede. A proposta deste trabalho realiza retransmissões cognitivas, em que os *relays* se coordenam e atuam somente quando as condições encontradas são favoráveis, mas permanecem fora da comunicação dos nós primários, caso contrário [10].

# Capítulo 3

## Cooperação em Redes de Rádios Cognitivos

Neste capítulo, a modelagem do sistema utilizada será descrita e a proposta de comunicação cooperativa em Redes de Rádios Cognitivos elaborada será apresentada. Na Seção 3.1, há uma descrição da modelagem do sistema utilizada neste trabalho, detalhando a modelagem usada para o canal sem fio, o modelo de Teoria de Filas usado para o tratamento dos pacotes de dados pelos nós e a priorização do acesso ao meio sem fio realizado pelos nós primários licenciados e secundários não licenciados. A Seção 3.2 descreve a proposta de comunicação cooperativa para Redes de Rádios Cognitivos desenvolvida neste trabalho, utilizando Usuários Primários (UPs) legados e Usuários Secundários (USs) que, além de acessar o meio segundo o modelo não licenciado, atuam como *relays* cognitivos, com o objetivo de beneficiar tanto a comunicação primária quanto a secundária.

### 3.1 Modelagem do Sistema

#### 3.1.1 Modelo do Canal

Nesta seção será descrita a modelagem utilizada neste trabalho para os canais sem fio dos nós, tanto da rede primária quanto da rede secundária.

O canal sem fio entre um nó transmissor e um nó receptor pode ser modelado como um canal com desvanecimento de Rayleigh (*Rayleigh fading*) [45]. Segundo esse modelo, o sinal recebido no nó  $j$ , transmitido pelo nó  $i$ , pode ser representado como:

$$y_{ij}^t = \sqrt{G_i \rho_{ij}^{-\gamma}} h_{ij}^t x_i^t + n_{ij}^t, \quad (3.1)$$

onde  $G_i$  é a potência de transmissão,  $\rho_{ij}$  é a distância entre dois nós,  $\gamma$  é o expoente

de perda de propagação,  $h_{ij}^t$  é o coeficiente de desvanecimento de canal entre os nós  $i$  e  $j$  no momento  $t$  e é modelado como um processo gaussiano complexo independente e identicamente distribuído, circularmente simétrico de média zero e variância unitária,  $x_i^t$  denota o pacote transmitido com potência média unitária e  $n_{ij}^t$  denota ruído branco aditivo gaussiano com média zero e variância  $N_0$ .

O sucesso ou fracasso na recepção de um pacote são caracterizados por eventos de interrupção (*outage*), que são associados a uma probabilidade de interrupção (*outage probability*) [46]. Uma interrupção é definida como o evento em que a relação sinal-ruído (SNR) cai abaixo de um limiar  $\beta$  necessário para que o sinal seja decodificado com sucesso, ou seja, que o pacote de dados seja recebido sem erro.

Para o modelo de canal com desvanecimento de Rayleigh da equação 3.1, temos a probabilidade de interrupção como segue:

$$\Pr(\text{SNR} < \beta) = 1 - \exp\left(-\frac{\beta N_0}{G_i \rho^\gamma}\right). \quad (3.2)$$

Para as simulações realizadas neste trabalho, a serem descritas no Capítulo 4, foi utilizado o modelo de propagação *log distance*. Esse modelo é mais simples de ser calculado e utiliza valores obtidos empiricamente para aproximar a perda de propagação entre transmissor e receptor, levando em consideração que a potência média do sinal recebida diminui logarithmicamente de acordo com a distância entre transmissor e receptor [45]. Segundo esse modelo, a perda de propagação  $L$ , em dB, é dada por:

$$L = L_0 + 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (3.3)$$

onde  $L_0$  é a perda de propagação, em dB, a uma distância de referência  $d_0$ ,  $\gamma$  é o expoente de perda de propagação e  $d$  é a distância entre transmissor e receptor.

De acordo com esse modelo, a potência recebida  $P_r$ , em dBm, é:

$$P_r = P_t - L_0 - 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (3.4)$$

onde  $P_t$  é a potência transmitida, em dBm,  $L_0$  é a perda de propagação, em dB, a uma distância de referência  $d_0$ ,  $\gamma$  é o expoente de perda de propagação e  $d$  é a distância entre transmissor e receptor.

A probabilidade de interrupção para um canal com desvanecimento *log distance*, então, pode ser vista de forma simplificada como:

$$\Pr(\text{SNR} < \beta) = \Pr(d > d^*). \quad (3.5)$$

Ou seja, a probabilidade de que a distância entre os nós seja maior do que uma

distância  $d^*$ .

É importante notar, a partir da modelagem de canal utilizada neste trabalho, que a qualidade do canal entre dois nós depende da distância entre os mesmos. A proposta deste trabalho, a ser apresentada na Seção 3.2, se baseia no fato de que a comunicação segmentada pelas retransmissões feitas por *relays* posicionados entre nós distantes pode ter qualidade dos canais superior à encontrada na comunicação direta fonte-destino.

### 3.1.2 Modelo de Filas

Esta seção contém a descrição da modelagem de Teoria de Filas utilizada para os *buffers* de pacotes dos nós primários e secundários da Rede de Rádios Cognitivos proposta.

Cada nó, primário ou secundário, possui um *buffer* para armazenar os pacotes que serão transmitidos. Esses *buffers* são modelados como filas que possuem taxa de chegada de pacotes  $\lambda$  e taxa de serviço (transmissão)  $\mu$ .

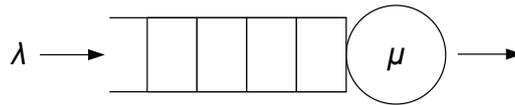


Figura 3.1: Fila com taxa de chegada  $\lambda$  e taxa de saída  $\mu$ .

O Teorema de Little relaciona o número de pacotes no sistema (aguardando na fila e sendo transmitidos), a taxa média de chegada de pacotes e o tempo médio que um pacote demora no sistema da seguinte forma [47]:

$$N = \lambda T, \quad (3.6)$$

onde  $N$  é o número de pacotes na fila,  $\lambda$  é sua taxa de chegada e  $T$  é o tempo gasto por cada pacote.

Considerando a não saturação do canal, temos que  $\mu \rightarrow \lambda$ . Ou seja, em média, os pacotes tendem a ser transmitidos na mesma taxa em que chegam à fila. A partir da equação 3.6, pode-se ver que quanto maior a vazão  $\lambda$ , menor o tempo para transmitir o mesmo número de pacotes. Isto é, para um mesmo  $N$ , temos que  $\uparrow \lambda \Rightarrow \downarrow T$ . A partir dessa constatação, percebe-se que os *buffers* dos nós serão esvaziados tão mais rapidamente quanto melhores forem as condições do canal no qual as transmissões são realizadas.

### 3.1.3 Acesso Primário e Secundário

Conforme descrito no Capítulo 2, Redes de Rádios Cognitivos são propostas para o compartilhamento do espectro, licenciado a UPs, por USs, não licenciados. UPs,

por serem licenciados para o acesso ao meio sem fio, possuem prioridade no mesmo para realizar suas transmissões primárias.

USs realizam suas transmissões secundárias com prioridade menor do que as transmissões primárias dos UPs, ou seja, aguardam por oportunidades secundárias  $op_s$  para transmitir. Essa modalidade de acesso ao meio pode ser implementada de diversas formas diferentes, a depender da tecnologia de rede sem fio utilizada tanto pelos nós primários quanto pelos secundários e se nós primários utilizarão dispositivos cognitivos ou dispositivos legados, conforme observado nos trabalhos relacionados a esse. No entanto, o acesso primário e secundário pode ser modelado como a priorização das transmissões e do tráfego primários sobre as transmissões e o tráfego secundários.

Essa priorização, apresentada na equação a seguir, garante o direito de utilização do espectro licenciado aos UPs, donos do mesmo, sobre os USs, que realizam o acesso oportunista:

$$P_{\text{tráf. prim.}} > P_{\text{tráf. sec.}} \quad (3.7)$$

onde  $P_{\text{tráf. prim.}}$  é a prioridade do tráfego primário e  $P_{\text{tráf. sec.}}$  é a prioridade do tráfego secundário.

### 3.1.4 Vazão e Capacidade do Canal

Técnicas de modulação e codificação adaptativa, presentes em diversas tecnologias de redes sem fio [48–52], procuram adaptar os diferentes esquemas de codificação ou modulação utilizados às condições do canal encontradas (ruído, interferência, distância entre transmissor e receptor). O objetivo dessas técnicas é alcançar a maior taxa de transmissão possível naquele canal, mantendo a probabilidade de interrupção (*outage probability*) em um nível aceitável.

Cada esquema de modulação/codificação está relacionado diretamente com a taxa de transmissão de dados obtida no canal, que pode ser vista como a vazão  $\lambda$  das filas dos *buffers* dos nós transmissores. Para cada esquema existe um limiar de interrupção  $\beta$  diferente. Quanto maior a taxa de transmissão do esquema  $k$  e, conseqüentemente, maior a vazão obtida  $\lambda_k$ , é necessário um limiar de SNR maior  $\beta_k$ . Isto é,  $\uparrow \lambda_k \Rightarrow \uparrow \beta_k$ .

Como mencionado anteriormente, na Seção 3.1.1, a qualidade do canal entre dois nós depende da distância entre os mesmos. Logo, pode-se investigar se *relays* localizados entre nós distantes, ao melhorar a qualidade dos canais na comunicação segmentada, podem oferecer vazões superiores às obtidas na comunicação direta fonte-destino. Isso ocorre devido às qualidades dos canais da comunicação segmentada permitirem, apesar da sobrecarga (*overhead*) adicionada, uma vazão fim-a-fim

resultante superior à da comunicação direta.

## 3.2 Proposta

Nesta seção, será apresentada a proposta de comunicação cooperativa para Redes de Rádios Cognitivos desenvolvida por este trabalho. Essencialmente, ela se trata de uma rede secundária de Rádios Cognitivos, operando no modo não licenciado sobre uma rede primária de dispositivos legados. Além de realizar o acesso oportunista ao meio licenciado aos UPs, os dispositivos dos USs atuam como *relays* cognitivos do tráfego primário, retransmitindo esse tráfego, porém apenas quando isso for vantajoso à comunicação dos UPs. Os USs, ao auxiliarem na comunicação dos UPs, fazem com que estes esvaziem mais rapidamente suas filas, aumentando o número de oportunidades secundárias de acesso ao meio. Desta forma, a proposta desenvolvida é capaz de melhorar ambas as vazões primária e secundária simultaneamente.

A proposta apresentada neste trabalho pode ser implementada como uma rede secundária que acessa oportunisticamente o meio de uma rede primária, que pode utilizar diversas tecnologias de comunicação. Para isso, basta que três premissas sejam suportadas por essa tecnologia:

- Modulação e codificação adaptativa (*adaptive modulation and coding*) ou algum mecanismo de controle de taxa de transmissão que adeque os parâmetros de transmissão às condições do canal sem fio sendo utilizado.
- Priorização de tráfego. Apenas os nós cognitivos (USs) precisam possuir essa capacidade. Qualquer tecnologia que já possua suporte à priorização de tráfego/qualidade de serviço (QoS), pode ter o mecanismo aproveitado para implementar a proposta nos nós secundários de forma compatível com os nós primários.
- *Spoofing*, isto é, permita que um nó possa se passar por outro. Para que a retransmissão seja transparente aos UPs, é necessário que o *relay* (US) possa se fazer passar pelos UPs cuja comunicação ele está auxiliando.

Praticamente todas as tecnologias de redes sem fio como IEEE 802.11, IEEE 802.16 (WiMAX), Bluetooth, UMTS (3G), LTE (4G), que utilizam diversas formas de acesso ao meio, como CSMA/CA, TDMA, OFDMA, possuem essas características e podem ser beneficiadas atuando como a rede primária para a proposta deste trabalho [48–52].

Com base na modelagem descrita na seção anterior, a proposta desenvolvida será apresentada utilizando retransmissões de acordo com a técnica armazenar-e-encaminhar (*store-and-forward*), em que os nós cognitivos armazenam e retrans-

mitem os pacotes, ou quadros, de dados primários. No entanto, as retransmissões cognitivas também podem funcionar com base em demais técnicas de comunicação cooperativa mencionadas no Capítulo 2, como, por exemplo, a técnica amplificar-e-encaminhar (*amplify-and-forward*), em que não é necessário nem mesmo decodificar a transmissão primária para retransmiti-la [34].

### 3.2.1 Comportamento do *Relay*

Considerando pacotes de mesmo tamanho, de acordo com as equações 3.6 e 3.5, limites de probabilidade de interrupção são maiores para capacidades maiores. Assim, temos que o tempo para se transmitir um pacote é tanto menor quanto maior for a vazão do canal, ditada pelas suas condições. No caso de espaços abertos, onde não há sombreamento (*shadowing*), o principal fator dessas condições é a distância entre transmissor e receptor, conforme visto na equação 3.5. A equação abaixo ilustra esse fenômeno, para uma determinada taxa de transmissão  $k$ :

$$\Pr(\text{SNR} < \beta_k) \propto \lambda_k \propto \frac{1}{T_k}. \quad (3.8)$$

A proposta apresentada neste trabalho vai contra o princípio de Redes de Rádios Cognitivos que diz que os USs não devem interferir na comunicação dos UPs. Ao contrário, como será visto mais à frente nos resultados deste trabalho, a serem mostrados no Capítulo 5, quando um US atua como retransmissor (*relay*) dos pacotes de um par de UPs, o mesmo causa uma interferência benéfica na comunicação primária, aumentando a vazão de transmissão dos UPs. Um US situado entre um par de UPs segmenta a comunicação deles quando pode trazer benefícios à vazão de tráfego da mesma, de acordo com a equação 3.8. Isso ocorre quando as taxas da comunicação segmentada são tais que a soma das durações das transmissões nesse caso é menor do que a duração da transmissão fim-a-fim, sem a atuação do *relay*. A Figura 3.2 e a equação 3.9, apresentadas a seguir, ilustram essa ideia.

Na Figura 3.2, observa-se que, sem a atuação do retransmissor secundário na comunicação do par de UPs, a transmissão de um pacote dura um tempo  $T_1$ . Já com retransmissão, esse pacote demora  $T_2 + T_3$  para chegar ao receptor primário. Assim, é vantajoso realizar a retransmissão de um pacote quando se obtém um tempo total menor do que sem a atuação do *relay* secundário, como pode ser visto na equação a seguir:

$$\begin{aligned} &\text{Se } T_1 \leq T_2 + T_3, \text{ não retransmite;} \\ &\text{se } T_1 > T_2 + T_3, \text{ retransmite.} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Essa atuação do retransmissor secundário no tráfego primário ocorre de maneira

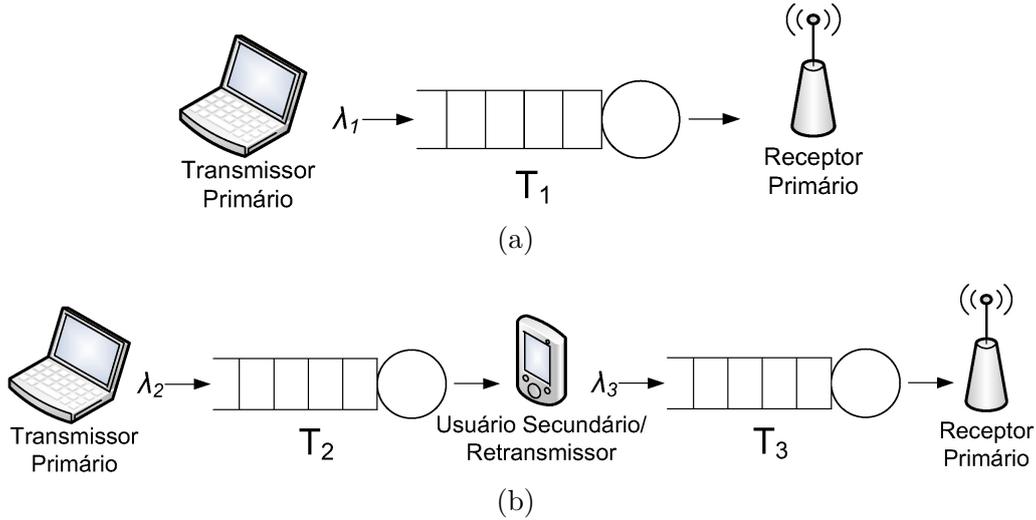


Figura 3.2: Comunicação de um par de UPs: (a) de forma direta; (b) com atuação do retransmissor (*relay*) secundário.

transparente, de forma que tanto transmissor quanto receptor primários acreditem estar se comunicando diretamente. Isso permite que uma rede sem fio convencional faça o papel da rede primária sem que seus nós precisem sofrer qualquer modificação. Para isso, tanto os pacotes de dados quanto os reconhecimentos (ACKs) enviados pelo retransmissor ao par de nós primários devem ser criados como se fossem dos próprios nós primários, técnica conhecida como *spoofing*. Os nós secundários desta rede devem possuir capacidades cognitivas para realizar a decisão entre retransmitir ou não um pacote primário detectado de acordo com a equação 3.9, além de serem capazes de realizar essa retransmissão de forma transparente aos UPs licenciados.

Para que a retransmissão cognitiva possa funcionar corretamente e trazer benefícios à comunicação primária, é necessário que os pacotes retransmitidos pelos USs possuam prioridade diferente dos pacotes gerados pelos mesmos. De fato, para evitar disputas entre o tráfego primário transmitido por UPs e retransmitido pelos *relays* secundários, é melhor que as retransmissões possuam prioridade maior do que o tráfego primário direto. Desta forma, a equação 3.7 é modificada, dando origem à equação 3.10:

$$P_{\text{tráf. relay}} > P_{\text{tráf. prim.}} > P_{\text{tráf. sec.}} \quad (3.10)$$

onde  $P_{\text{tráf. relay}}$  é a prioridade do tráfego primário retransmitido (*relay*),  $P_{\text{tráf. prim.}}$  é a prioridade do tráfego primário e  $P_{\text{tráf. sec.}}$  é a prioridade do tráfego secundário.

Na equação 3.10, o tráfego primário é transmitido pelos UPs e tanto o tráfego secundário quanto o tráfego *relay* são transmitidos pelos USs.

### 3.2.2 Interação entre *Relays*

A seção anterior mostrou o comportamento individual de *relays* atuando segundo a proposta deste trabalho. Em uma rede que possui múltiplos USs atuando tanto como retransmissores cognitivos, quanto como transmissores e receptores do seu próprio tráfego secundário, é necessário se prever as interações entre os diferentes USs.

Primeiramente, como as prioridades dos tráfegos primário e secundário devem satisfazer à equação 3.7, as retransmissões, que obtêm prioridade maior conforme a equação 3.10, devem ocorrer apenas para o tráfego primário. Caso essa regra não fosse aplicada, o tráfego secundário, retransmitido com maior prioridade, não respeitaria o modelo de acesso não licenciado, disputando ou até suplantando o tráfego primário. Para evitar que isso ocorra, é necessário que os *relays* sejam capazes de diferenciar pacotes advindos de nós primários e secundários. Essa diferenciação, para manter a rede primária legada inalterada, pode usar, nos pacotes dos nós secundários, um cabeçalho secundário encapsulado ou campos não utilizados de cabeçalhos legados da rede primária.

Além disso, é necessário avaliar o caso em que há mais do que um *relay* entre o par fonte-destino, como ilustrado na Figura 3.3. Considerando um caso geral, em que há  $n$  USs entre um par de UPs que está se comunicando, é preciso generalizar a equação 3.9 para realizar a decisão entre fazer ou não o *relay* cognitivo. Dessa forma, para comparar o tempo da transmissão direta entre fonte e destino, denominado  $T_d$ , com o somatório dos  $n + 1$  tempos  $T_i$  das retransmissões realizadas pelos  $n$  *relays*, obtém-se, então, a equação 3.11:

$$\begin{aligned} \text{Se } T_d &\leq \sum_{i=1}^{n+1} T_i, \text{ não retransmite;} \\ \text{se } T_d &> \sum_{i=1}^{n+1} T_i, \text{ retransmite.} \end{aligned} \tag{3.11}$$

Deve-se verificar também se a utilização de apenas alguns dos  $n$  *relays* é mais vantajosa à comunicação fonte-destino do que todos eles. Seria necessário realizar uma busca no espaço de todas as combinações possíveis de segmentação da comunicação utilizando subconjuntos dos  $n$  *relays*, algo custoso em um âmbito teórico em que todas as informações das durações estariam disponíveis, e ainda mais na prática, em que essas informações teriam que ser estimadas individualmente e difundidas através da rede.

No entanto, na prática, devido à sobrecarga (*overhead*) dos protocolos de comunicação, é extremamente raro que a comunicação cooperativa ocorra utilizando mais do que um *relay*. Para tanto, as condições do canal fonte-destino devem ser tais que a distância entre eles impossibilite sua comunicação direta. Embora retransmissores

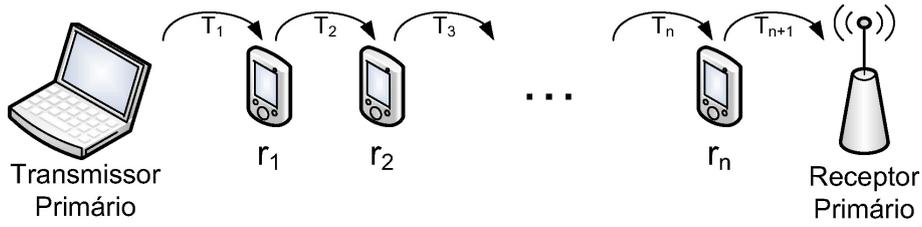


Figura 3.3: Retransmissões utilizando múltiplos *relays* em série.

possam permitir que nós que não são capazes de se comunicar diretamente façam contato, essa situação deixa de se encaixar nas técnicas de comunicação cooperativa para ser classificada como roteamento de múltiplos saltos (*multihop*), o que está fora do escopo deste trabalho.

Para evitar, então, que as retransmissões ocorram utilizando mais do que um *relay*, os nós cognitivos secundários devem ser capazes de diferenciar o tráfego primário que já foi retransmitido do que não o foi. Além da diferença de prioridade na transmissão, segundo a equação 3.10, é possível, mais uma vez, usar, nos pacotes dos nós secundários, um cabeçalho secundário encapsulado ou campos não utilizados de cabeçalhos legados da rede primária.

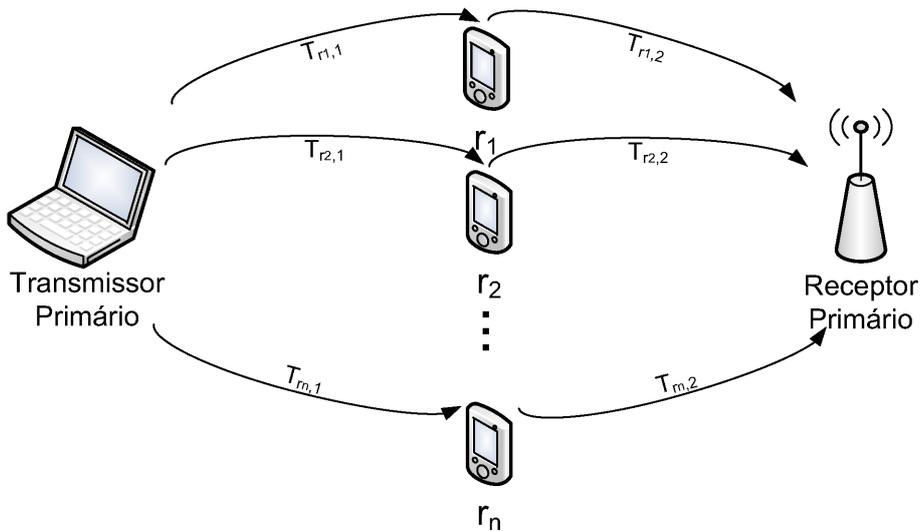


Figura 3.4: Retransmissões utilizando múltiplos *relays* diferentes.

Além disso, é necessário que as retransmissões cognitivas, que devem ocorrer utilizando apenas um *relay*, sejam realizadas pelo nó secundário  $i$  capaz de oferecer as melhores condições para a comunicação primária. A Figura 3.4 ilustra retransmissões entre fonte e destino que podem fazer uso de diferentes *relays*. Em outras palavras, para cada par primário fonte-destino se comunicando, o *relay*  $r$  que deverá auxiliar na sua comunicação será o que tiver o menor somatório das durações das transmissões fonte-*relay* e *relay*-destino  $T_{p,r,1} + T_{p,r,2}$ , desde que seja também menor do que a duração da comunicação direta  $T_p$ . O algoritmo 1 ilustra o funcionamento da seleção

do melhor *relay* para cada par primário.

**Entrada:** conjunto de pares primários  $P$ , conjunto de *relays*  $R$ , durações  $T_p, T_{p,r,1}, T_{p,r,2}$  para todo  $p \in P$  e todo  $r \in R$

**Saída:** vetor  $\text{relays}[\ ]$  contendo melhor *relay*  $r$  para cada par primário  $p$

```

1  $\text{relays}[\ ] \leftarrow \emptyset$ ;
2 para cada par fonte-destino primário  $p \in P$  faça
3    $\text{candidatos}[p] \leftarrow \emptyset$ ;
4   para cada relay  $r$  no alcance de  $p$  faça
5     se  $T_p > T_{p,r,1} + T_{p,r,2}$  então
6        $\text{candidatos}[p] \cup \{r\}$ ;
7     fim
8   fim
9    $\text{relays}[p] \leftarrow \text{relay } r \in \text{candidatos}[p]$  com menor valor  $T_{p,r,1} + T_{p,r,2}$ ;
10 fim

```

**Algoritmo 1:** Seleção do melhor *relay* para cada par fonte-destino.

O comportamento individual dos *relays* cognitivos, descrito na Seção 3.2.1, e a interação entre eles, descrita nesta seção, consideram o conhecimento pleno das informações necessárias à tomada das decisões apresentadas. Em uma implementação prática, como a que será descrita no Capítulo 4, a seguir, é necessário estimar e difundir essas informações, através de medições periódicas e um protocolo de controle. O capítulo seguinte apresentará um exemplo de implementação da proposta deste trabalho, considerando essas implicações práticas que, contudo, não precisam ser limitadas ao exemplo que foi desenvolvido.

### 3.2.3 Oportunidades Secundárias

Conforme as equações 3.6 e 3.8, temos que  $\lambda_k \propto \frac{1}{T_k}$ , isto é, quanto maior a taxa de transmissão obtida no canal, menor o tempo necessário para transmitir um mesmo número de pacotes. Semelhantemente, de acordo com a mesma equação,  $\lambda_k \propto N_k$ , para um mesmo período  $T$  fixo. Logo, quanto maior a vazão obtida, maior o número de pacotes primários transmitidos. Consequentemente, com isso se obtém um maior número de chances de ocorrer uma oportunidade de transmissão secundária, cuja probabilidade pode ser denominada  $\text{Pr}(\text{op}_s)$ . Desta forma, ao elevar o número de pacotes transmitidos pelos UPs  $N_p$ , os USs também elevam suas chances de obterem oportunidades de transmissão secundária, elevando o número de pacotes transmitidos por eles  $N_s$ , beneficiando a rede secundária ao ajudar a rede primária. Ou seja:

$$N_s \propto \text{Pr}(\text{op}_s) \propto N_p. \quad (3.12)$$

No Capítulo 4, a seguir, será descrita uma implementação da proposta utilizando

o simulador ns-3 e baseada no padrão de redes sem fio IEEE 802.11.

# Capítulo 4

## Metodologia

Este capítulo apresenta o ambiente de simulação utilizado para a implementação da proposta deste trabalho. A implementação elaborada para avaliar o desempenho da proposta foi desenvolvida no simulador de redes ns-3. A Seção 4.1 apresenta o simulador ns-3 e os motivos pelos quais ele foi escolhido para a implementação realizada. A Seção 4.2 discute a generalidade da proposta detalhada no Capítulo 3 e demonstra que a implementação realizada, que está descrita na Seção 4.3, atende aos requisitos necessários ao seu funcionamento. Por fim, na Seção 4.4, há a descrição das simulações desenvolvidas para avaliar o desempenho da implementação da proposta deste trabalho.

### 4.1 Simulador ns-3

O simulador de redes ns-3 é um simulador de eventos discretos voltado para pesquisa e uso educacional. O ns-3 é um *software* livre, distribuído sob a licença GNU GPLv2. Esse simulador conta com modelos bastante completos de redes IP e não IP, cabeadas ou sem fio, incluindo o padrão sem fio IEEE 802.11 (Wi-Fi), utilizado para a implementação desenvolvida neste trabalho [15].

Dentre as características do padrão IEEE 802.11 suportadas pelo simulador ns-3, estão qualidade de serviço (QoS, ou *quality of service*), mecanismos de controle automático de taxa de transmissão e modulação de sinal na camada física. Essas características são essenciais para uma avaliação de desempenho mais fiel da proposta apresentada [10, 15].

Mais adiante, será descrita a implementação desenvolvida para avaliação do desempenho da proposta deste trabalho, que utilizou dispositivos de rádio Wi-Fi seguindo o padrão IEEE 802.11g [48], com o suporte a qualidade de serviço (QoS) do padrão IEEE 802.11e.

## 4.2 Requisitos da Proposta

Como já mencionado anteriormente, a proposta apresentada no capítulo anterior independe da tecnologia de comunicação utilizada pelos dispositivos da rede primária e da rede secundária. Contudo, essa tecnologia deve suportar três características básicas.

A primeira característica é a modulação e codificação adaptativa, ou o controle automático de taxa de transmissão, que adapta os parâmetros de transmissão às condições do canal sendo utilizado, para que as retransmissões ofereçam ganhos à comunicação dos Usuários Primários (UPs).

A segunda característica necessária é a priorização de tráfego, para se implementar o compartilhamento do espectro licenciado aos UPs pelos Usuários Secundários (USs) não licenciados.

Por fim, a terceira característica necessária é permitir *spoofing*, isto é, que um nó da rede possa se passar por outro. Desta forma, um *relay* cognitivo pode atuar de forma transparente, auxiliando na comunicação de um par fonte-destino de UPs sem que esses notem sua presença.

Como já mencionado no Capítulo 3, praticamente todas as tecnologias de redes sem fio como IEEE 802.11, IEEE 802.16 (WiMAX), Bluetooth, UMTS (3G), LTE (4G) possuem essas características e podem ser beneficiadas atuando como a rede primária para a proposta deste trabalho [48–52].

### 4.2.1 Modulação e Codificação Adaptativa

Como já visto na Seção 3.1.4, de acordo com as condições do canal de comunicação (ruído, interferência, distância entre transmissor e receptor), diferentes modulações e codificações utilizadas oferecem diferentes taxas de transmissão  $\lambda$  e probabilidades de interrupção  $\Pr(\text{SNR} < \beta)$ . O objetivo das técnicas de modulação e codificação adaptativa e de controle automático de taxa de transmissão, presentes em diversas tecnologias de redes sem fio [48–52], é adaptar os esquemas de modulação utilizados às condições do canal encontradas, de forma a obter a melhor vazão de transmissão  $\lambda$ , mantendo a probabilidade de interrupção em um nível aceitável.

O padrão IEEE 802.11 prevê a utilização de algum mecanismo de controle automático de taxa, porém deixa em aberto qual o mecanismo a ser utilizado. Por essa razão, mecanismos diferentes foram desenvolvidos e são utilizados, tanto em pesquisa quanto em equipamentos reais [53]. O simulador ns-3 oferece suporte a diversos desses mecanismos [15] e a proposta deste trabalho pode utilizar qualquer esquema para fornecer os benefícios à comunicação dos UPs. Na implementação desenvolvida, o mecanismo de controle automático de taxas de transmissão utilizado foi o ARF (*Automatic Rate Fallback*), escolhido para facilitar a análise dos resultados,

devido à sua simplicidade.

## 4.2.2 Priorização de tráfego

Para que uma rede primária ofereça acesso não licenciado a USs utilizando dispositivos cognitivos, sem prejudicar os UPs licenciados, é necessário que UPs possuam prioridade no acesso ao meio em relação a USs. Mais uma vez, tanto para essa finalidade quanto para fins de qualidade de serviço, essa priorização está presente em diversas tecnologias sem fio [48–52].

O padrão IEEE 802.11e, suportado pelo simulador ns-3 [15], prevê QoS para redes IEEE 802.11. Como nas redes 802.11 os nós realizam acesso aleatório, a qualidade de serviço é implementada utilizando diferentes períodos entre quadros (IFS – *Inter Frame Spaces*) para os *backoffs* das transmissões de cada classe de tráfego. Esses períodos são denominados AIFS (*Arbitration Inter Frame Spaces*) [14] e são usados para priorizá-las.

Para se calcular o *backoff* que será utilizado para a transmissão de um quadro de uma determinada classe de tráfego, o valor do AIFS dessa classe é somado a um valor sorteado dentro da janela de contenção (CW – *Contention Window*), que aumenta a cada erro de transmissão e também é diferente para cada classe de tráfego.

Desta forma, para se implementar o modelo de acesso não licenciado de compartilhamento do espectro, diferencia-se o tráfego de cada classe de usuários (UPs e USs) de maneira distribuída, com prioridades de acordo com a Equação 3.7 [10]. A Figura 4.1 exemplifica esse funcionamento.

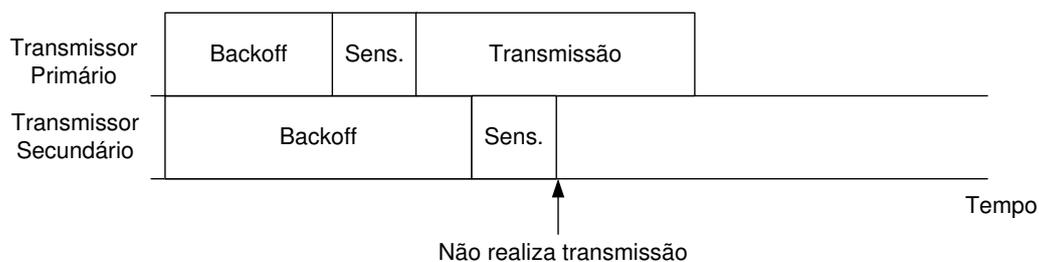


Figura 4.1: Diferentes *backoffs* apresentam diferentes prioridades. Como o UP tem um período menor, realiza suas transmissões primeiro em uma disputa pelo meio com um US.

## 4.2.3 Spoofing

Técnicas de *spoofing* permitem que um nó se passe por outro em uma rede. Também presente em diversas tecnologias de redes sem fio [48–52], a possibilidade de *spoofing*, em geral, é vista como um problema de segurança, pois permite que o tráfego entre

fonte-destino seja interceptado por um nó malicioso que pode utilizar as informações interceptadas indevidamente.

No entanto, o *spoofing* permite que o tráfego seja interceptado, e retransmitido, pelos *relays* cognitivos (USs) previstos pela proposta deste trabalho, auxiliando a comunicação dos UPs de forma transparente. Desta forma, enquanto o UP fonte acredita estar se comunicando com o UP destino e vice-versa, ambos na realidade se comunicam com o US *relay*, e a vazão de sua comunicação é aumentada por causa desse fato [10].

No padrão IEEE 802.11, os quadros são identificados, pelos nós transmissores, com seus endereços MAC. Para realizar o *spoofing*, os nós secundários simplesmente precisam utilizar os endereços dos nós fonte e destino para os quais estão fazendo as retransmissões cognitivas.

### 4.3 Implementação da Proposta

Como já descrito no Capítulo 3, além de acessar o meio segundo o modelo não licenciado, os USs realizam retransmissões do tráfego primário, atuando como *relays* cognitivos para os UPs.

Para avaliar o desempenho da proposta deste trabalho, tanto os nós primários quanto os nós secundários foram implementados como rádios Wi-Fi de acordo com o padrão IEEE 802.11g [48], com suporte à qualidade de serviço do padrão IEEE 802.11e, no simulador de redes ns-3 [15].

A camada MAC dos nós secundários foi modificada para realizar as retransmissões cognitivas dos pacotes e reconhecimentos (ACKs) dos UPs a partir da implementação do padrão IEEE 802.11e, utilizando as diferentes classes de tráfego, devidamente parametrizadas, para implementar a priorização necessária para o acesso não licenciado dos Rádios Cognitivos secundários.

Os nós primários utilizaram a camada MAC do padrão IEEE 802.11g sem modificação em seu código, apenas com seus parâmetros ajustados para a priorização dos diferentes tipos de tráfego da rede, de acordo com o acesso primário licenciado ao meio.

A Seção 4.3.1, a seguir, descreve a implementação do comportamento individual dos USs no auxílio da comunicação primária, conforme a Seção 3.2.1. Em seguida, na Seção 4.3.2 há a descrição a implementação da interação entre os nós cognitivos secundários, para seleção do melhor *relay* para cada par fonte-destino primário, de acordo com a Seção 3.2.2.

### 4.3.1 Processo de Decisão Individual

Cada US mantém, para cada par de transmissor (fonte) e receptor (destino) primários detectado por ele (isto é, em seu alcance), informações sobre as taxas de transmissão utilizadas tanto na comunicação direta como na comunicação segmentada ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$ ). Conseqüentemente, o nó secundário pode calcular as durações  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  da Equação 3.9. As informações sobre essas durações são mantidas, e atualizadas, em uma tabela em cada nó cognitivo.

De acordo com esses valores, o nó pode ter dois estados para cada par primário: retransmitindo ou não retransmitindo. Se a soma das durações  $T_2 + T_3$  for maior do que a duração  $T_1$ , a atuação de um *relay* é prejudicial à vazão da comunicação e o melhor a se fazer é não retransmitir. Da mesma forma, caso contrário, isto é, se a soma das durações  $T_2 + T_3$  for menor do que a duração  $T_1$ , o *relay* deve retransmitir pois beneficiará a comunicação primária.

Logo, periodicamente os nós secundários mudam de estado por um período curto para coletar informações sobre o estado complementar ao seu estado atual (seja esse retransmitindo ou não). A partir dessas informações, a decisão entre manter o estado atual ou mudar é tomada pelo nó secundário. A Figura 4.2 ilustra um exemplo desse mecanismo cognitivo em funcionamento.

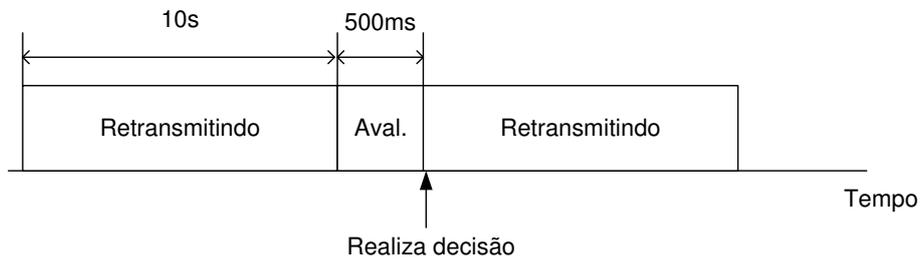


Figura 4.2: Processo de decisão secundário entre realizar ou não a retransmissão de um par de nós primários.

Quando um US recebe um quadro endereçado a um UP, ele armazena esse quadro em seu *buffer* de retransmissões e prepara um quadro ACK com *spoofing*, que será enviado ao transmissor primário. Caso o receptor primário receba o quadro com sucesso e envie um ACK, no momento que este é detectado pelo retransmissor, tanto o quadro de dados quanto de reconhecimento são descartados pelo US, como pode ser visto na Figura 4.3.

Caso contrário, os quadros são transmitidos e a atuação do *relay* se inicia na comunicação desse par de UPs, como ilustrado na Figura 4.4. Quando um retransmissor secundário começa a atuar na comunicação de um par de nós primários, os mecanismos de controle automático de taxa de transmissão do padrão IEEE 802.11 [54] fazem com que as taxas de transmissão usadas sejam cada vez maiores, aumentando a vazão de dados primários e, conseqüentemente, as oportunidades de

transmissão secundárias  $op_s$ .

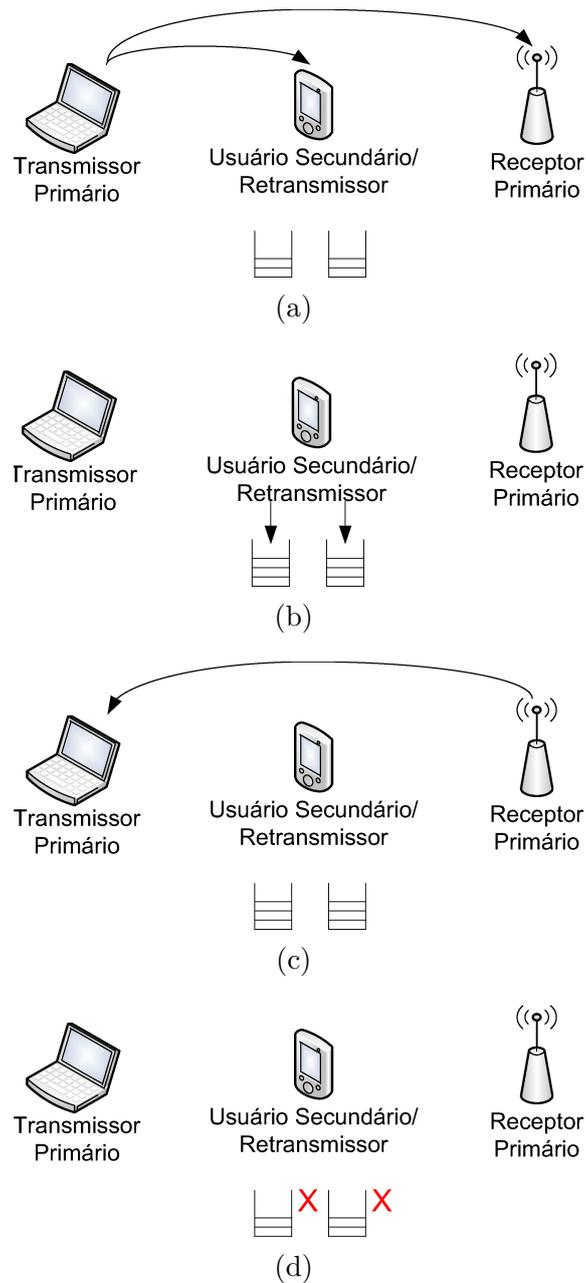


Figura 4.3: Passo a passo do funcionamento da rede quando a transmissão primária é bem-sucedida e o *relay* não atua na comunicação. (a) transmissor primário realiza a transmissão, que é recebida pelo *relay* e pelo receptor primário. (b) *relay* adiciona quadro de dados e ACK às suas respectivas filas. (c) receptor primário transmite ACK para sinalizar que a transmissão do quadro de dados foi bem-sucedida. (d) *relay* descarta quadro de dados e ACK de suas filas.

Como os quadros de reconhecimento (ACKs) formados pelos retransmissores cognitivos devem entrar em uma fila para serem transmitidos ou descartados (caso o quadro enviado diretamente pelo transmissor primário tenha sido recebido corretamente), esses quadros foram classificados em uma nova classe de tráfego, com

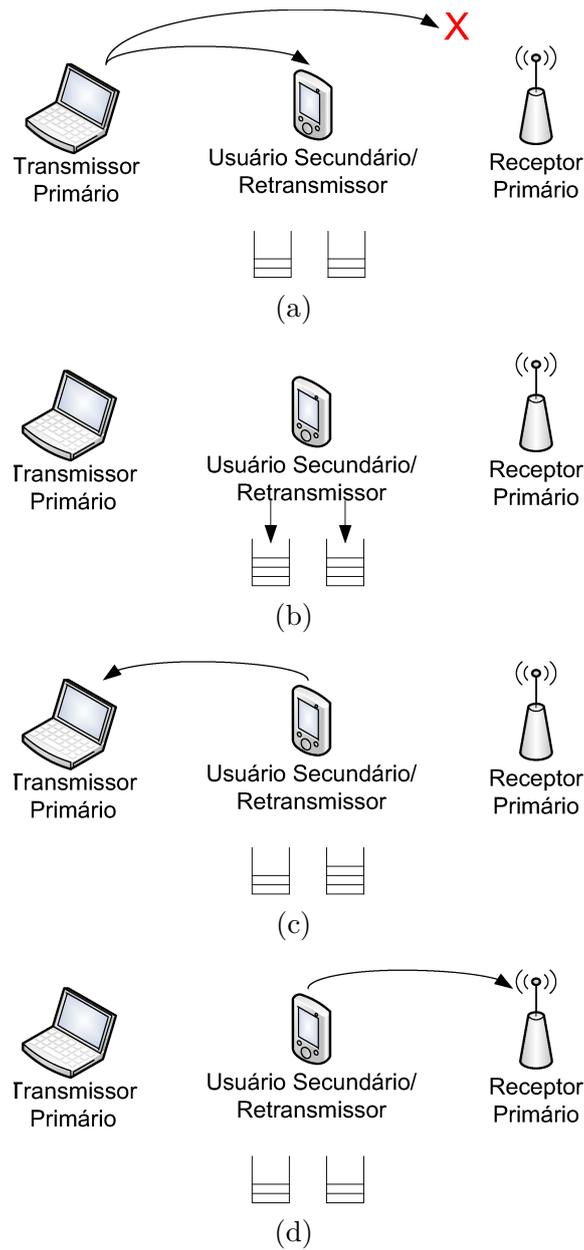


Figura 4.4: Passo a passo do funcionamento da rede quando há falha na transmissão primária e o *relay* atua na comunicação. (a) transmissor primário realiza a transmissão, que é recebida apenas pelo *relay*. (b) *relay* adiciona quadro de dados e ACK às suas respectivas filas. (c) *relay* transmite ACK com *spoofing* ao transmissor primário. (d) *relay* transmite quadro de dados com *spoofing* ao receptor primário.

prioridade maior do que os dados retransmitidos.

Cada classe de tráfego tem seus valores de AIFS e CW ajustados de forma que, à exceção de um erro de transmissão ou colisão que aumente o tamanho dos *backoffs*, as prioridades das classes são respeitadas de forma determinística. Desta forma, a Equação 3.10, para essa implementação, recebe um novo termo, como pode ser visto a seguir:

$$P_{\text{tráf. relay (ACK)}} > P_{\text{tráf. relay (dados)}} > P_{\text{tráf. prim.}} > P_{\text{tráf. sec.}} \quad (4.1)$$

onde  $P_{\text{tráf. relay (ACK)}}$  é a prioridade dos pacotes ACK enviados pelo *relay* com *spoofing*,  $P_{\text{tráf. relay (dados)}}$  é a prioridade do tráfego primário retransmitido (*relay*),  $P_{\text{tráf. prim.}}$  é a prioridade do tráfego primário e  $P_{\text{tráf. sec.}}$  é a prioridade do tráfego secundário.

As classes “tráfego *relay* (ACK)”, “tráfego *relay* (dados)” e “tráfego secundário” estão presentes em três filas diferentes na camada MAC dos nós cognitivos secundários, enquanto a classe “tráfego primário” está presente apenas nos nós primários da rede.

### 4.3.2 Seleção do Melhor *Relay*

Conforme visto na Seção 3.2.2, quando há múltiplos *relays* em condições de realizar a comunicação cooperativa para um determinado par fonte-destino de nós primários, apenas o retransmissor que pode oferecer as melhores condições à comunicação primária deve atuar. Para isso, cada US difunde periodicamente, para seus vizinhos imediatos (de um salto), as informações contidas em sua tabela de durações da transmissão direta e segmentada, mencionada na Seção 4.3.1.

Dessa forma, essa tabela de durações da transmissão direta e segmentada passa a possuir, além das próprias informações de cada US, as informações recebidas dos USs vizinhos. Assim, durante a avaliação da Equação 3.9, ilustrada na Figura 4.2, cada nó secundário compara as durações das transmissões diretas e segmentadas medidas por ele e por seus vizinhos. Caso mais de um US observe durações da transmissão cooperativa menores do que a transmissão direta, apenas aquele com o melhor tempo decide por atuar. Desse modo, os dispositivos cognitivos secundários implementam, de maneira distribuída, o algoritmo 1.

Caso as medições individuais ilustradas na Figura 4.2 ocorressem simultaneamente para todos os nós secundários, haveria sincronização dos períodos de avaliação do *relays* cognitivos, gerando disputa nas retransmissões e distorcendo as estimativas das durações da transmissão direta e segmentada. Em decorrência disso, caso vários *relays* decidissem por atuar, a comunicação primária seria prejudicada, em vez de ser beneficiada. Outro problema possível decorrente desse fato seria o caso de todos os *relays* sempre decidirem por não atuar, mesmo quando poderiam beneficiar a comunicação primária.

Para evitar esses problemas causados pela sincronização das avaliações dos *relays* cognitivos e da difusão periódica das mensagens de controle contendo informações da tabela de durações das transmissões, deve-se utilizar um intervalo aleatório sorteado por cada nó para realizar essas atividades. Deve-se tomar um cuidado especial no

intuito de evitar essa sincronização, pois FLOYD e JACOBSON [55], ao analisarem a difusão de mensagens periódicas do protocolo de roteamento RIP (*Routing Information Protocol*), demonstraram que mesmo com um intervalo aleatório utilizado para diferenciar o princípio da atividade de cada nó, após um certo tempo decorrido, os nós se tornam sincronizados. Logo, é necessário utilizar o valor aleatório para garantir a independência dos períodos de avaliação e da difusão das mensagens de controle em todos os temporizadores e não apenas no início das atividades dos nós cognitivos secundários.

## 4.4 Simulações

Nesta seção, as simulações desenvolvidas para a avaliação do desempenho da implementação da proposta deste trabalho serão descritas. A Seção 4.4.1 contém as descrições dos cenários, mais simples, projetados para validar a implementação e a proposta de *relays* cognitivos. Em seguida, a Seção 4.4.2 descreve as simulações do cenário geral que avaliou o desempenho da proposta de maneira mais próxima das situações encontradas na realidade.

### 4.4.1 Cenários de Validação

Inicialmente, para validar o comportamento da proposta e da implementação desenvolvida neste trabalho, foram elaboradas simulações de cenários mais simples, com o intuito de facilitar essa validação. Esses cenários simples, com apenas um par fonte-destino de nós primários, isolam fatores complicadores, como colisões de pacotes, e propiciam a compreensão mais detalhada dos benefícios oferecidos às comunicações primária e secundária pelas retransmissões transparentes feitas pelos *relays* cognitivos em ambientes mais controlados.

#### Tráfego Primário

O primeiro cenário de validação simulado envolve apenas o tráfego do par fonte-destino de UPs, que se comunicou com e sem a presença de um *relay* secundário. A distância entre os nós primários foi variada e o retransmissor secundário foi posicionado entre os mesmos, exatamente no que se pode chamar de centro de massa do par primário, isto é, na metade do caminho entre ambos. Três variações foram avaliadas nesse cenário: sem a presença de *relays*; com *relays* que sempre realizam retransmissões (*relays* não cognitivos, que obtêm resultados piores do que sem retransmissões em alguns casos) e a proposta deste trabalho: *relays* cognitivos que realizam retransmissões apenas quando é benéfico à comunicação primária.

A distância entre os nós primários foi variada de 5m a 175m, de 10m em 10m. Os nós cognitivos seguiram o padrão IEEE 802.11g [48] e o mecanismo de controle automático de taxas de transmissão utilizado foi o ARF (*Automatic Rate Fallback*) [54]. O modelo de propagação do meio utilizado foi o *log distance*. O tamanho dos pacotes gerados na camada de aplicação foi 2000 bytes e o tráfego gerado na camada de aplicação foi do tipo CBR (*Constant Bit Rate*) assintótico, usando o protocolo UDP. As avaliações cognitivas para decidir se os nós secundários deveriam ou não realizar as retransmissões (*relay*) tinham duração de 500ms e eram realizadas periodicamente a cada 10s. Foram realizadas 30 rodadas de 60s de duração e os resultados apresentados foram calculados com intervalos de confiança de 95%. A Tabela 4.1 apresenta os valores de parâmetros usados nas simulações desse cenário.

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação do cenário de validação apenas com tráfego primário.

Parâmetro	Valores
Distância entre os nós primários	5m a 175m
Tamanho do pacote na camada de aplicação	2000 bytes
Tipo de tráfego gerado pelos transmissores	CBR assintótico
Protocolo da camada de rede	UDP
Padrão de comunicação da rede sem fio	IEEE 802.11g
Mecanismo de controle automático de taxas	ARF
Modelo de propagação de sinal	<i>log distance</i>
Intervalo entre avaliações cognitivas	10s
Duração das avaliações cognitivas	500ms
Duração de cada rodada	60s
Número de rodadas para cada cenário	30
Intervalo de confiança	95%

### Tráfegos Primário e Secundário

Após a validação do comportamento dos *relays* cognitivos na presença exclusiva de tráfego primário, foram elaboradas simulações também com tráfego secundário. Esse cenário é semelhante ao anterior: a distância entre os nós primários foi variada e o retransmissor secundário foi posicionado no centro de massa do par primário. Mas o *relay* secundário, além de realizar as retransmissões cognitivas, também atuou como transmissor para um segundo nó secundário. Apenas duas variações desse cenário foram avaliadas: na primeira, os nós secundários apenas atuavam na comunicação secundária, sem realizar retransmissões para os nós primários; na segunda, os nós secundários estavam habilitados a realizar as retransmissões cognitivas, caso avaliassem que isso traria benefícios à comunicação primária. O objetivo desse cenário é

verificar que, além de melhorar o desempenho dos nós da rede primária, a atuação dos nós secundários como *relays* cognitivos também melhora o desempenho da sua própria comunicação.

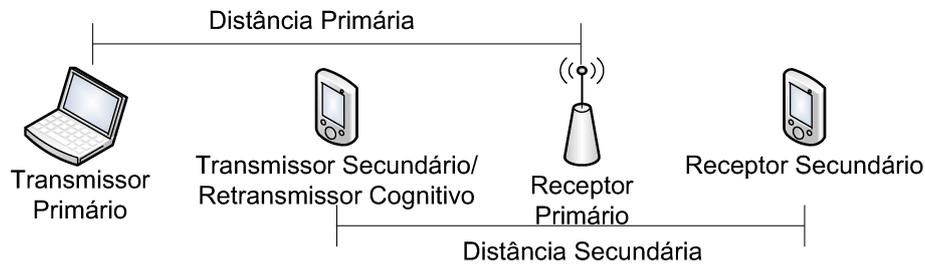


Figura 4.5: Distâncias primária e secundária usadas nas simulações dos cenários de validação com tráfegos primário e secundário.

Os parâmetros utilizados nesse cenário são os mesmos do cenário anterior. A distância entre os nós primários foi variada de 5m a 175m, de 10m em 10m. A distância entre os nós secundários variou de 50m a 100m, de 25m em 25m. A Figura 4.5 ilustra as distâncias primária e secundária das simulações. Os nós cognitivos seguiram o padrão IEEE 802.11g [48] e o mecanismo de controle automático de taxas de transmissão utilizado foi o ARF [54]. O modelo de propagação do meio utilizado foi o *log distance*. O tamanho dos pacotes gerados na camada de aplicação foi 2000 bytes e o tráfego gerado na camada de aplicação foi do tipo CBR assintótico, usando o protocolo UDP. As avaliações cognitivas para decidir se os nós secundários deveriam ou não realizar as retransmissões (*relay*) tinham duração de 500ms e eram realizadas periodicamente a cada 10s. Foram realizadas 30 rodadas de 60s de duração e os resultados apresentados foram calculados com intervalos de confiança de 95%. A Tabela 4.2 apresenta os valores de parâmetros usados nas simulações desse cenário.

### Posicionamento do *Relay*

Os cenários de validação descritos anteriormente consideraram o US que atua como *relay* do tráfego primário posicionado no centro de massa do par fonte-destino primário. Intuitivamente, observa-se que essa localização do *relay* é a mais favorável ao auxílio à comunicação primária, por estar equidistante a ambos nós primários e à menor distância possível deles. No entanto, deve-se considerar que esse posicionamento não é realista para todos os retransmissores em todas as situações possíveis. Por esse motivo, o último cenário de validação simulado tem o objetivo de avaliar os efeitos do posicionamento do *relay* secundário em relação a esse ponto ótimo, o centro de massa do par primário.

Para cada distância primária entre os UPs transmissor e receptor, foi variada também a distância da posição do nó cognitivo secundário em relação ao centro de

Tabela 4.2: Parâmetros de simulação do cenário de validação com tráfegos primário e secundário.

Parâmetro	Valores
Distância entre os nós primários	5m a 175m
Distância entre os nós secundários	50m a 100m
Tamanho do pacote na camada de aplicação	2000 bytes
Tipo de tráfego gerado pelos transmissores	CBR assintótico
Protocolo da camada de rede	UDP
Padrão de comunicação da rede sem fio	IEEE 802.11g
Mecanismo de controle automático de taxas	ARF
Modelo de propagação de sinal	$\log \text{ distance}$
Intervalo entre avaliações cognitivas	10s
Duração das avaliações cognitivas	500ms
Duração de cada rodada	60s
Número de rodadas para cada cenário	30
Intervalo de confiança	95%

massa primário. O posicionamento foi feito da seguinte forma: para cada parametrização de distância do *relay* ao ponto ótimo, o nó secundário foi localizado em uma posição sorteada na circunferência do círculo com raio igual àquela distância e centro no centro de massa primário. O segundo nó secundário era então sorteado, também em uma circunferência, a uma distância fixa do primeiro. Mais uma vez, foram comparados os efeitos das retransmissões cognitivas realizadas pelo *relay* secundário com o caso em que os USs apenas acessam o meio oportunisticamente, sem auxiliar a comunicação primária.

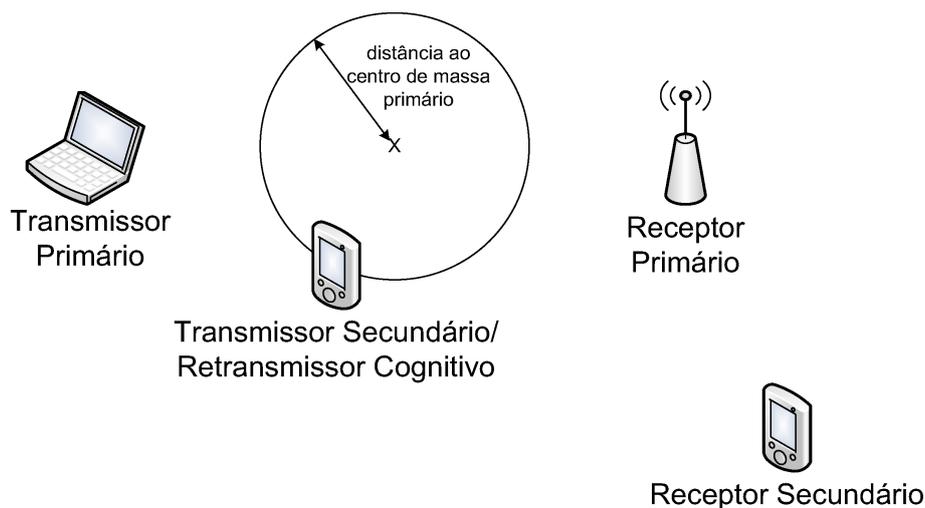


Figura 4.6: Posicionamento do *relay* em relação ao centro de massa do par primário.

Nesse cenário de validação, a distância entre os nós primários foi variada de 100m a 175m, de 25m em 25m. A distância do *relay* cognitivo secundário ao centro de

massa primário variou de 0m a 40m, de 10m em 10m. A distância entre os nós secundários foi fixada em 75m. A Figura 4.6 ilustra o posicionamento dos nós nas simulações. Os nós cognitivos seguiram o padrão IEEE 802.11g [48] e o mecanismo de controle automático de taxas de transmissão utilizado foi o ARF [54]. O modelo de propagação do meio utilizado foi o *log distance*. O tamanho dos pacotes gerados na camada de aplicação foi 2000 bytes e o tráfego gerado na camada de aplicação foi do tipo CBR assintótico, usando o protocolo UDP. As avaliações cognitivas para decidir se os nós secundários deveriam ou não realizar as retransmissões (*relay*) tinham duração de 1s, e eram realizadas periodicamente a cada 10s. Foram realizadas 30 rodadas de 60s de duração e os resultados apresentados foram calculados com intervalos de confiança de 95%. A Tabela 4.3 contém os valores de parâmetros usados nas simulações desse cenário.

Tabela 4.3: Parâmetros de simulação do cenário de validação do posicionamento do *relay* cognitivo.

Parâmetro	Valores
Distância entre os nós primários	100m a 175m
Distância entre o <i>relay</i> secundário e o centro de massa primário	0m a 40m
Distância entre os nós secundários	75m
Tamanho do pacote na camada de aplicação	2000 bytes
Tipo de tráfego gerado pelos transmissores	CBR assintótico
Protocolo da camada de rede	UDP
Padrão de comunicação da rede sem fio	IEEE 802.11g
Mecanismo de controle automático de taxas	ARF
Modelo de propagação de sinal	<i>log distance</i>
Intervalo entre avaliações cognitivas	10s
Duração das avaliações cognitivas	1s
Duração de cada rodada	60s
Número de rodadas para cada cenário	30
Intervalo de confiança	95%

#### 4.4.2 Cenário Geral

A proposta deste trabalho foi validada em cenários mais simples, com gradual elevação da complexidade. Após essa validação, foram desenvolvidas simulações em um cenário mais geral e realista. Nesse cenário, múltiplos nós, primários e secundários, foram dispostos em uma área, organizados em pares fonte-destino da comunicação que ocorreu de forma *ad hoc* em cada par. Os pares primários foram posicionados primeiro, livremente sobre a área. Em seguida, se deu o posiciona-

mento dos pares secundários, dividido da seguinte maneira: uma fração dos pares secundários foi posicionada de forma semelhante ao cenário de validação do posicionamento do *relay* da seção anterior, com um dos nós cognitivos posicionados a uma certa distância máxima do centro de massa de um determinado par primário. O posicionamento desses nós secundários foi denominado acoplado às posições dos pares primários. A fração restante dos pares secundários foi posicionada livremente na área, possuindo uma probabilidade muito pequena de que algum de seus nós estivesse em uma posição que permitisse beneficiar a comunicação primária com suas retransmissões cognitivas.

A fração de nós secundários posicionados com acoplamento aos centros de massas primários foi variada, com o objetivo de avaliar as condições necessárias, em um cenário geral mais próximo da realidade, para que a proposta desenvolvida neste trabalho ofereça benefícios tanto à comunicação primária quanto à secundária. Mais uma vez, foi realizada a comparação entre nós secundários atuando como *relays* cognitivos da comunicação primária, além de transmitir seu tráfego oportunisticamente, com quando estes mesmos nós secundários apenas realizam o acesso oportunista ao meio sem fio, sem realizar retransmissões.

No cenário geral das simulações, os pares primários e secundários foram dispostos em uma área de 1000m por 1000m de extensão. 20 nós primários, ou seja, 10 pares fonte-destino foram dispostos, com uma distância entre eles sorteada de 100m a 150m. Os números de nós secundários utilizados foram 10, 20 e 50, ou seja, 5, 10 e 25 pares secundários. A distância do *relay* cognitivo secundário ao centro de massa primário, quando sua posição era acoplada à posição do par primário, teve valores sorteados de 0m a 20m. A distância entre os nós dos pares fonte-destino secundários foi sorteada de 50m a 100m. Dos pares secundários, o número deles que foi posicionado de maneira acoplada aos pares primários foi 3, 5, 10 e 25, sempre que o número total de pares secundários fosse maior ou igual. Dessa forma, a fração de nós secundários posicionados de forma acoplada aos primários variou de valores pouco maiores que 0.0 a 1.0. Os nós cognitivos seguiram o padrão IEEE 802.11g [48] e o mecanismo de controle automático de taxas de transmissão utilizado foi o ARF [54]. O modelo de propagação do meio utilizado foi o *log distance*. O tamanho dos pacotes gerados na camada de aplicação foi 2000 bytes e o tráfego gerado na camada de aplicação foi do tipo CBR assintótico, usando o protocolo UDP. As avaliações cognitivas para decidir se os nós secundários deveriam ou não realizar as retransmissões (*relay*) tinham duração de 1s e eram realizadas periodicamente a cada 10s. Como esse cenário geral possui enorme variabilidade devido a muitos fatores, foram realizadas 300 rodadas de 120s de duração e os resultados apresentados foram calculados com intervalos de confiança de 95%. A Tabela 4.4 contém os valores de parâmetros usados nas simulações desse cenário.

Tabela 4.4: Parâmetros de simulação do cenário geral.

Parâmetro	Valores
Tamanho da área da simulação	1000m por 1000m
Número de nós primários	20
Distância entre os nós primários	100m a 150m
Número de nós secundários	10, 20 e 50
Distância entre os nós secundários	50m a 100m
Distância entre o <i>relay</i> secundário e o centro de massa primário	0m a 20m
Número de pares secundários acoplados às posições dos pares primários	3, 5, 10 e 25
Tamanho do pacote na camada de aplicação	2000 bytes
Tipo de tráfego gerado pelos transmissores	CBR assintótico
Protocolo da camada de rede	UDP
Padrão de comunicação da rede sem fio	IEEE 802.11g
Mecanismo de controle automático de taxas	ARF
Modelo de propagação de sinal	<i>log distance</i>
Intervalo entre avaliações cognitivas	10s
Duração das avaliações cognitivas	1s
Duração de cada rodada	120s
Número de rodadas para cada cenário	300
Intervalo de confiança	95%

A seguir, no Capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos através das simulações apresentadas.

# Capítulo 5

## Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das simulações descritas no Capítulo 4 para avaliar a proposta elaborada neste trabalho. Primeiramente, serão apresentados os resultados dos cenários de validação, na Seção 5.1 e, em seguida, os resultados obtidos nas simulações do cenário geral, na Seção 5.2.

### 5.1 Cenários de Validação

Os resultados das simulações dos cenários de validação descritos anteriormente serão apresentados e discutidos nesta seção.

#### 5.1.1 Tráfego Primário

A Figura 5.1 mostra a vazão da comunicação primária, nas simulações apenas com tráfego primário, de acordo com a distância entre os nós primários em três configurações diferentes: sem *relays*, com um *relay* não cognitivo que sempre realiza retransmissões (mesmo trazendo prejuízos à rede primária) e com um *relay* cognitivo, que avalia se deve ou não realizar as retransmissões dos pacotes primários, para somente beneficiá-los. Para cada distância primária, o nó secundário sempre está equidistante aos dois nós primários, na metade do caminho entre eles (o centro de massa primário).

Ao se analisar a figura, nota-se que até uma distância de 85m, o cenário sem retransmissões possui vazão maior, e em distâncias maiores do que esta, o cenário com retransmissões atinge maior vazão. Nota-se, também, que a proposta deste trabalho atinge vazões muito próximas ao melhor cenário em cada uma das duas situações. A proposta apresenta ótimos resultados para distâncias primárias maiores do que 85m, oferecendo uma melhora na vazão de 200% (de aprox. 2 Mbps para aprox. 6 Mbps) em relação à comunicação direta.

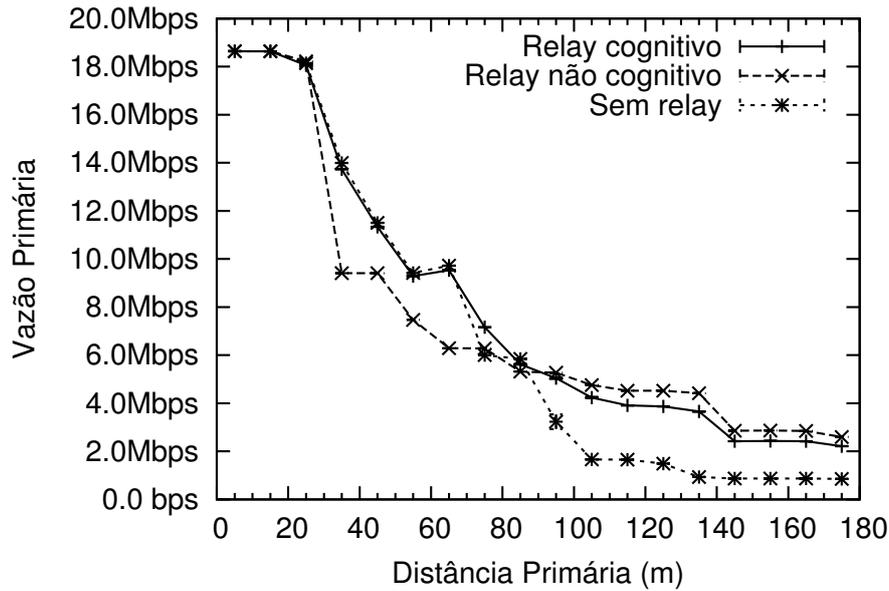


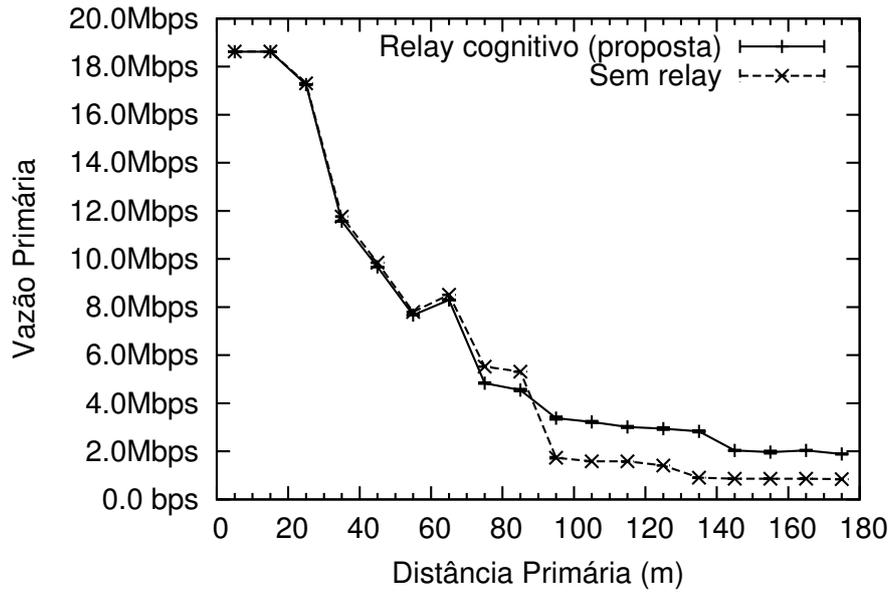
Figura 5.1: Vazão da comunicação primária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com apenas tráfego primário.

### 5.1.2 Tráfegos Primário e Secundário

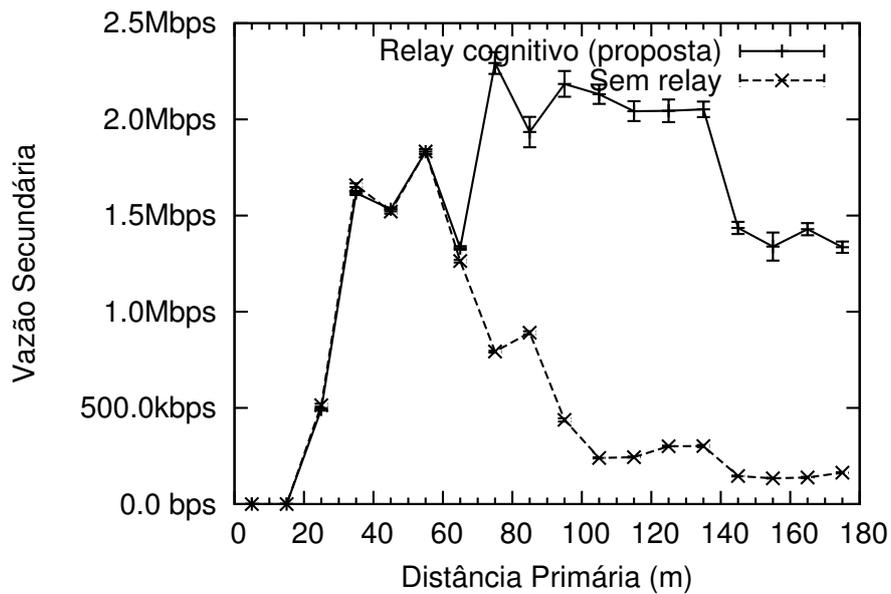
Nos experimentos com tráfego secundário, os ganhos proporcionados à comunicação primária pelas retransmissões cognitivas são menores do que quando só há tráfego primário. Além disso, eles dependem bastante da distância entre os nós secundários. As Figuras 5.2, 5.4 e 5.5 mostram as vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária, para distâncias secundárias de 50m, 75m e 100m, respectivamente.

Analisando a Figura 5.2, nota-se que a atuação dos *relays* cognitivos proporciona benefícios ao desempenho da comunicação primária para distâncias primárias a partir de 95m. A melhora pode chegar a quase 100% (de aprox. 2Mbps para quase 4Mbps). Há uma ligeira piora na vazão primária para distâncias primárias de 65m a 75m, o que pode ser atribuído à inexatidão das estimativas realizadas para decisão dos nós cognitivos em atuar ou não como *relays* da comunicação primária. Além disso, quando os nós secundários realizam as retransmissões cognitivamente, a vazão da comunicação secundária também aumenta. Esse aumento é bastante significativo, chegando a 300% (de menos de 500kbps para mais de 2Mbps). Serão explicadas, na Figura 5.3, as razões pelas quais isso ocorre.

A Figura 5.3(a) mostra o número de transmissões que ocorrem na comunicação primária em função da distância primária. Nota-se, nessa figura, que na faixa de distâncias primárias a partir de 75m, na qual as retransmissões apresentam melhora na vazão da comunicação secundária, há um número muito maior de transmissões



(a)



(b)

Figura 5.2: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 50m.

primárias quando os *relays* atuam. Como o aumento das transmissões primárias também aumenta as oportunidades de transmissão secundárias  $op_s$ , isso explica o aumento da vazão secundária. Como se pode observar na Figura 5.3(b), a fração de erros de transmissão pelo total de transmissões primárias é aproximadamente a mesma para ambos os casos, o que demonstra que a taxa de erros de quadro

permanece constante e não é influenciada pela proposta deste trabalho.

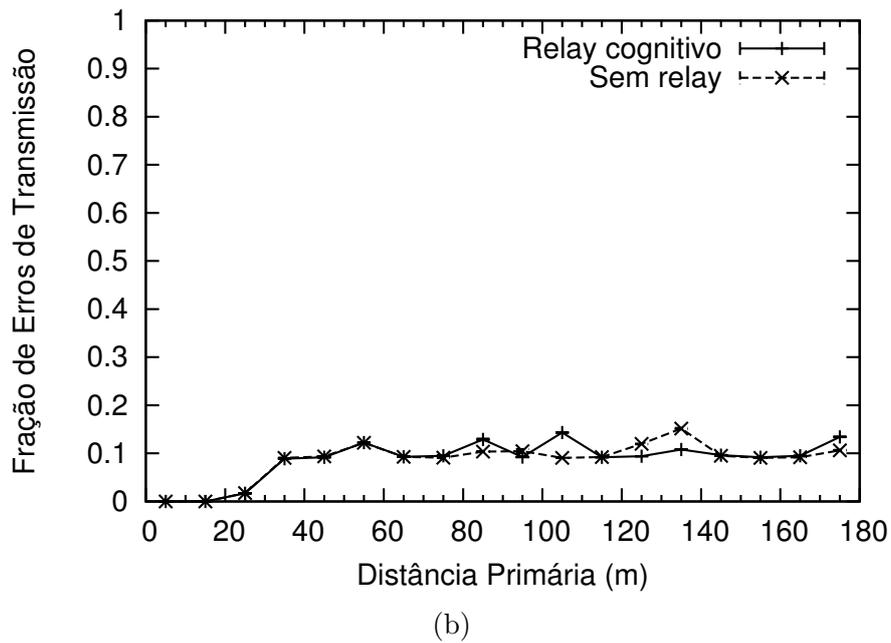
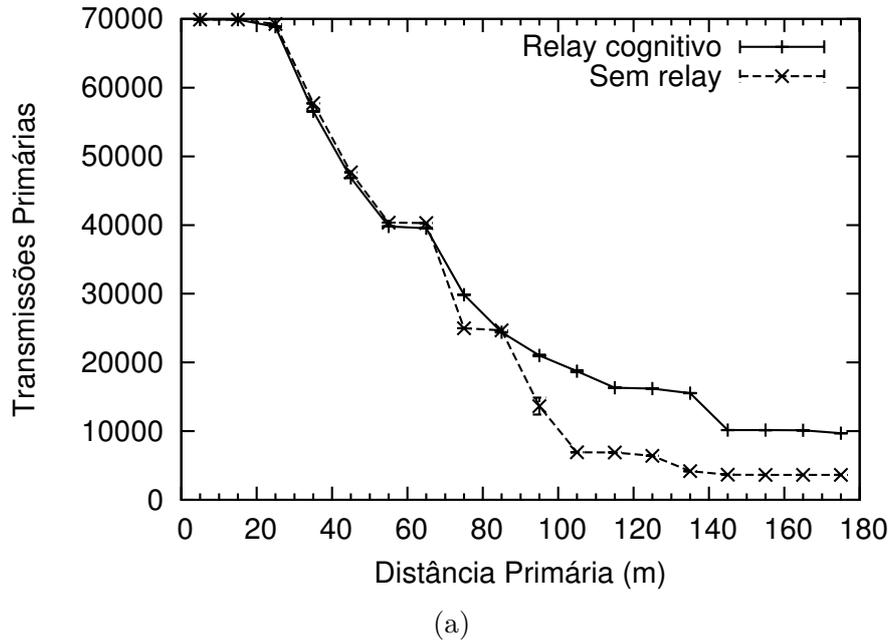
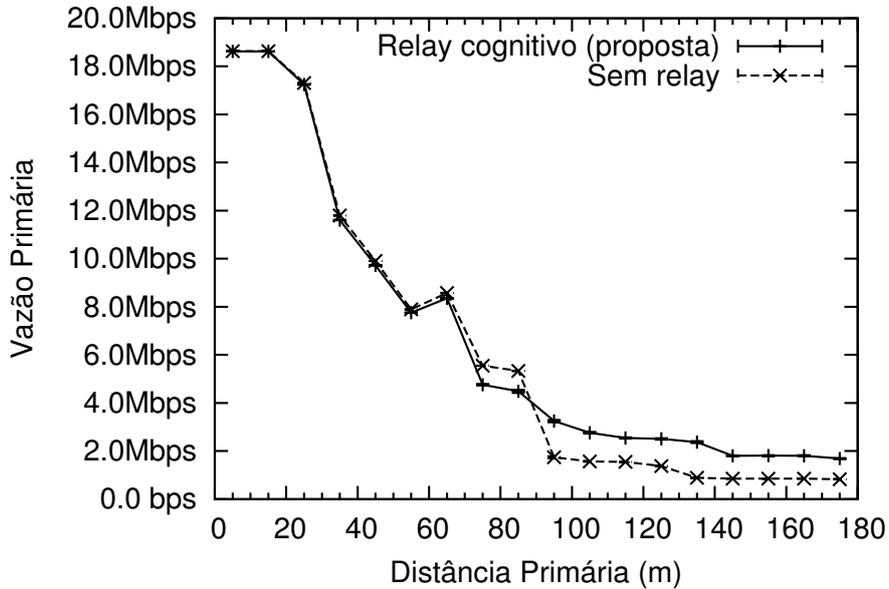


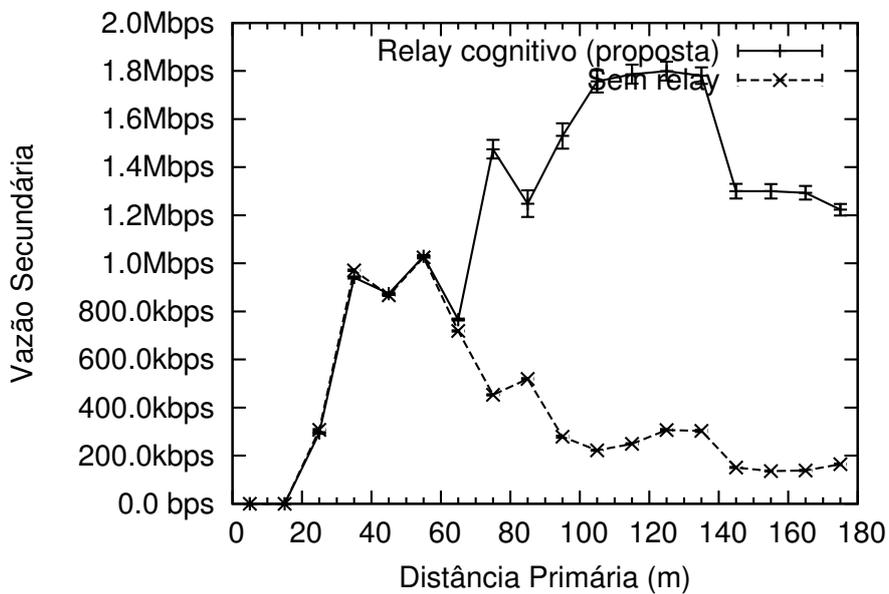
Figura 5.3: Total de transmissões e fração de erros pelo total de transmissões para a comunicação primária.

A Figura 5.4 apresenta as vazões das comunicações primária e secundária para a distância secundária de 75m. O comportamento das vazões nessa configuração é bastante semelhante à da distância secundária de 50m. Observa-se que a atuação dos relays cognitivos continua proporcionando benefícios ao desempenho da comunicação primária para distâncias primárias a partir de 95m. A melhora, nesse caso,

é menos significativa, podendo chegar a 50% (de aprox. 2Mbps para quase 3Mbps). A ligeira piora na vazão primária para distâncias primárias de 65m a 75m também continua ocorrendo, devido à inexatidão das estimativas realizadas para decisão dos nós cognitivos em atuar ou não como *relays*. Adicionalmente, as retransmissões cognitivas também continuam aumentando a vazão secundária de forma considerável.



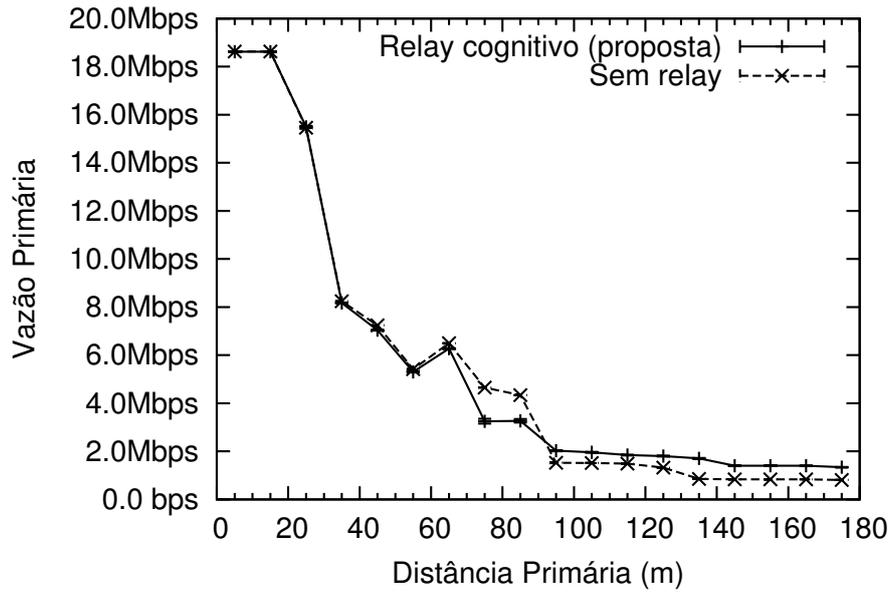
(a)



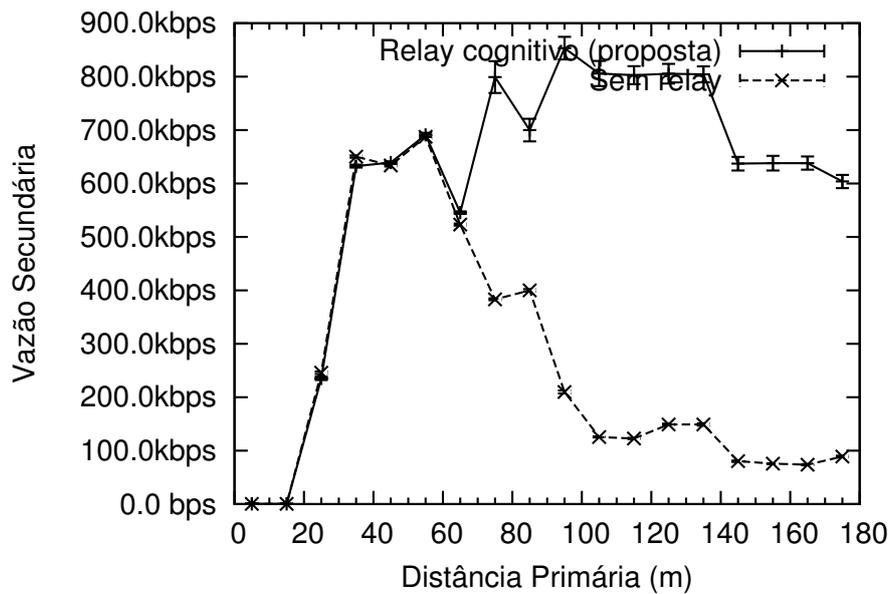
(b)

Figura 5.4: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 75m.

Na Figura 5.5, são apresentadas as vazões das comunicações primária e secundária para a distância secundária de 100m. Para essa distância secundária, o desempenho da proposta é consideravelmente pior, apesar de continuar vantajoso às comunicações primária e secundária. Para a comunicação primária, contudo, nota-se que a atuação dos *relays* cognitivos melhora a vazão apenas de forma muito sutil. Além disso, a piora na vazão primária para distâncias primárias de 65m a 75m, causada pela inexatidão das estimativas realizadas para decisão dos nós cognitivos em atuar ou não como *relays*, é mais expressiva. No entanto, as retransmissões cognitivas continuam aumentando a vazão secundária de forma bastante significativa.



(a)



(b)

Figura 5.5: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância primária para o cenário de validação com tráfegos primário e secundário, com distância secundária de 100m.

### 5.1.3 Posicionamento do *Relay*

Nos cenários anteriores, o *relay* cognitivo sempre está posicionado no centro de massa do par primário, que aparenta ser, intuitivamente, a posição ótima para a localização do retransmissor. As simulações desse cenário investigaram a influência do posicionamento do *relay* secundário em relação ao centro de massa primário.

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam as vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do *relay* ao centro de massa primário, para distâncias primárias de 100m, 125m, 150m e 175m, respectivamente.

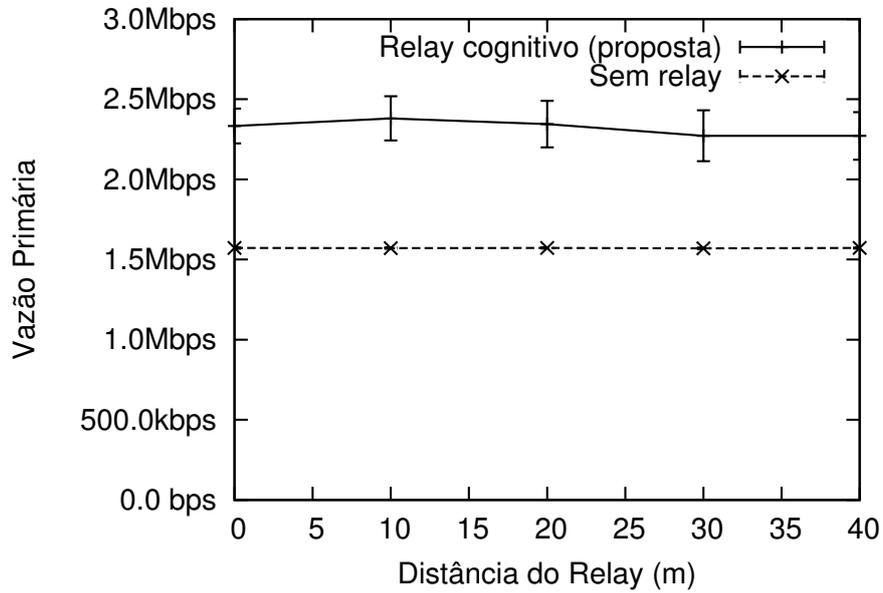
De acordo com essas figuras, observa-se que, de fato, o centro de massa do par fonte-destino primário é o ponto ótimo para o posicionamento do *relay* secundário, pois é onde se obtém os maiores ganhos para as comunicações primária e secundária com as retransmissões cognitivas, em relação ao caso em que o US não retransmite o tráfego. Além disso, dependendo da distância primária, os benefícios das retransmissões podem se manter para distâncias do *relay* ao centro de massa maiores ou menores.

Na Figura 5.6, observa-se que, para a comunicação primária, os benefícios do *relay* cognitivo se mantiveram até para a maior distância do retransmissor ao centro de massa primário, 40m. No entanto, a distância é relevante para os benefícios trazidos à comunicação secundária, com uma diminuição considerável a partir de 30m do centro de massa. Esse fato demonstra que a distância do *relay* ao centro de massa primário, mesmo quando não influencia a vazão primária, pode ter influência nas oportunidades secundárias, refletindo na vazão da comunicação secundária.

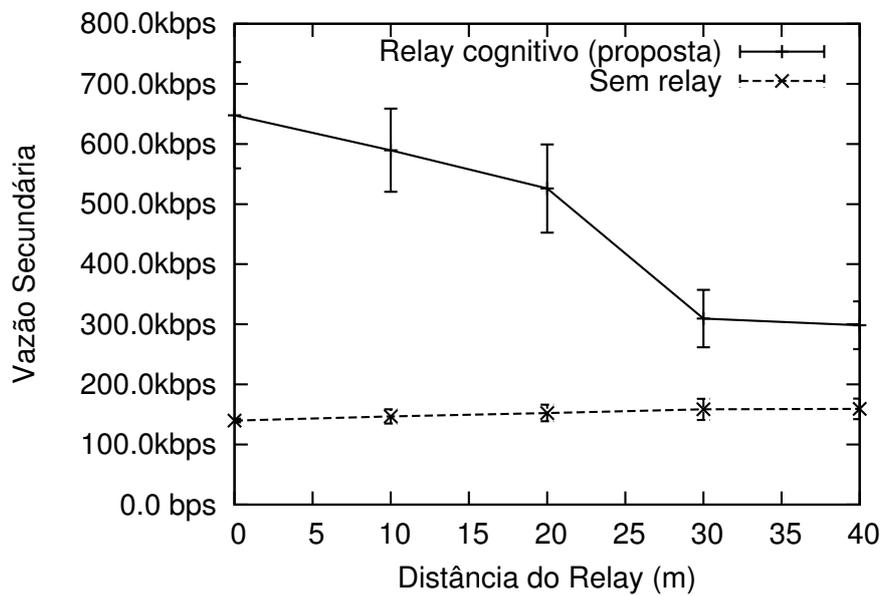
A Figura 5.7 mostra que um aumento da distância primária torna a distância do *relay* mais relevante para as comunicações primária e secundária. Observa-se uma diminuição considerável, tanto para o tráfego primário quanto para o secundário, logo a partir de uma distância do *relay* ao centro de massa de 10m. A uma distância de 40m, as retransmissões não auxiliam o tráfego dos UPs, mas ainda há ganhos, ainda que menores, para os USs.

Na Figura 5.8, para a distância primária de 150m, uma distância do *relay* de 10m obtém resultados praticamente iguais, considerando os intervalos de confiança, aos de quando o *relay* está exatamente no centro de massa. Nota-se, também, que os benefícios às comunicações se mantêm, no mínimo, razoáveis até uma distância máxima de 30m do centro de massa, mas a uma distância de 40m, assim como para a distância primária de 125m, as retransmissões cognitivas deixam de beneficiar o tráfego primário, embora ainda melhorem, de maneira sutil, o tráfego secundário.

Analisando a Figura 5.9, nota-se que, para a distância entre os nós primários de 175m, apenas com o *relay* localizado no ponto ótimo para as retransmissões, isto é, no centro de massa do par primário, há benefícios significativos para a comunicação primária. Além disso, o ganho para a vazão secundária também diminui de forma abrupta quando o *relay* não está posicionado no centro de massa primário. Distâncias do *relay* maiores que 0m trazem apenas benefícios pequenos e somente para o par secundário.

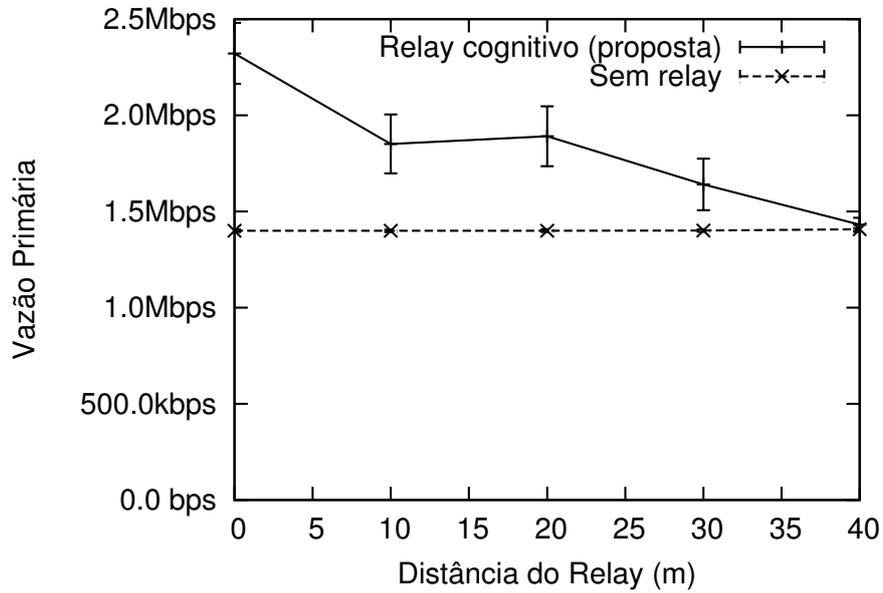


(a)

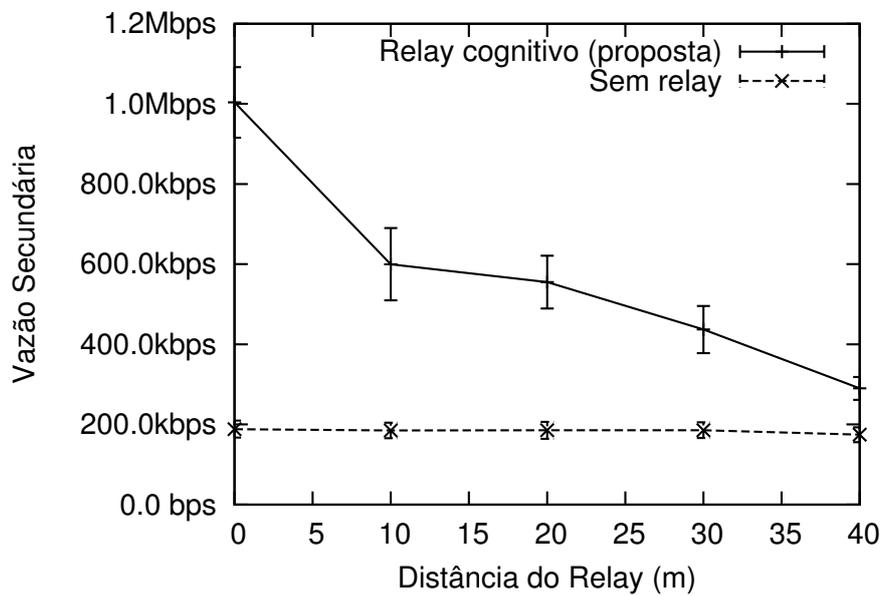


(b)

Figura 5.6: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do *relay* ao centro de massa primário, com distância primária de 100m.

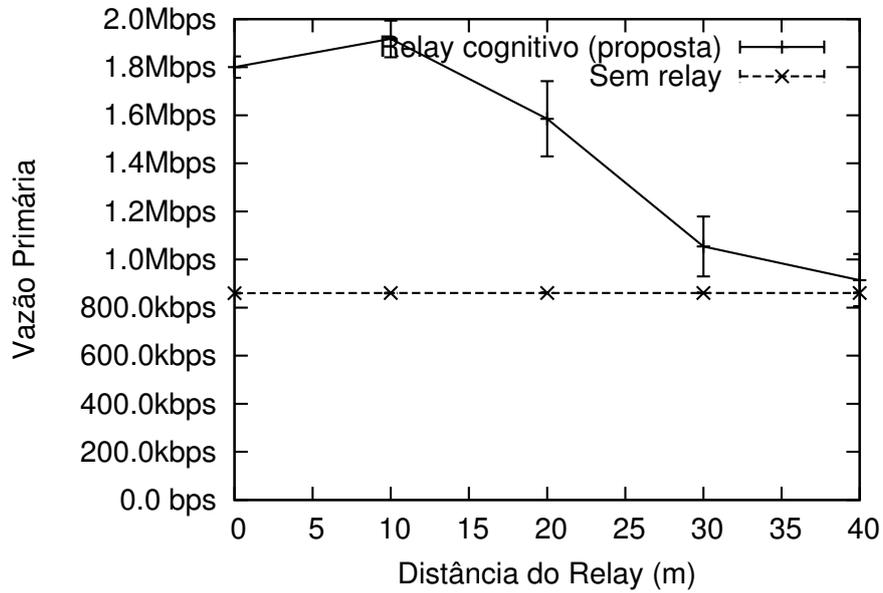


(a)

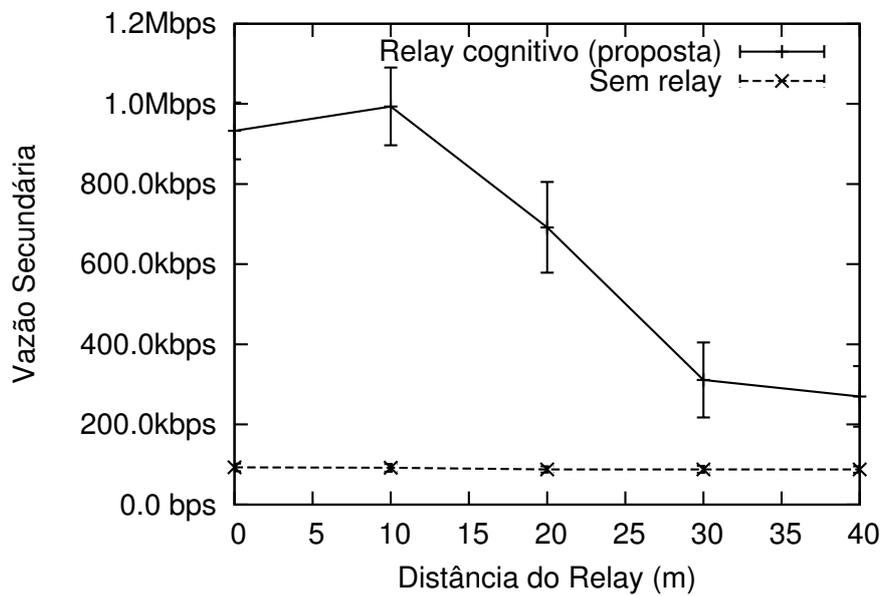


(b)

Figura 5.7: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do *relay* ao centro de massa primário, com distância primária de 125m.

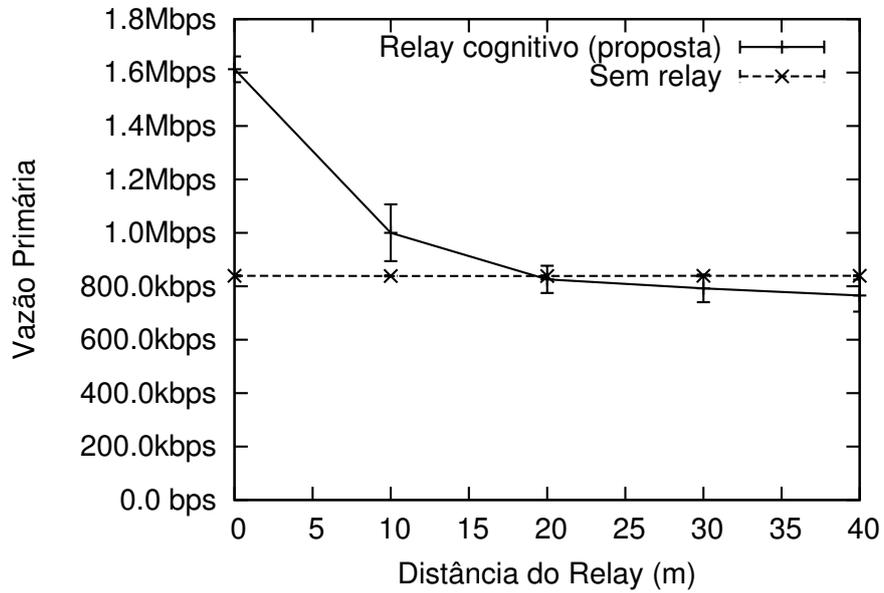


(a)

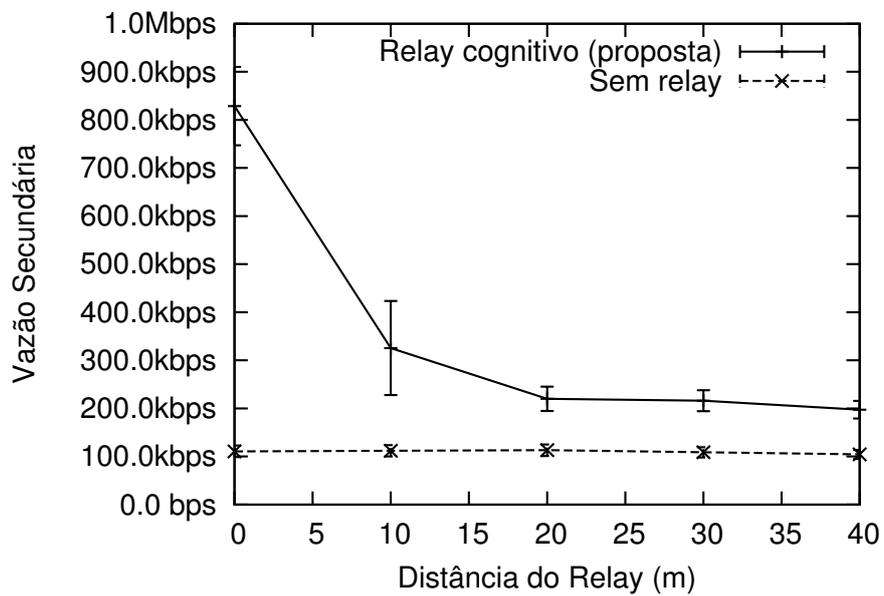


(b)

Figura 5.8: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do *relay* ao centro de massa primário, com distância primária de 150m.



(a)



(b)

Figura 5.9: Vazões das comunicações primária e secundária de acordo com a distância do *relay* ao centro de massa primário, com distância primária de 175m.

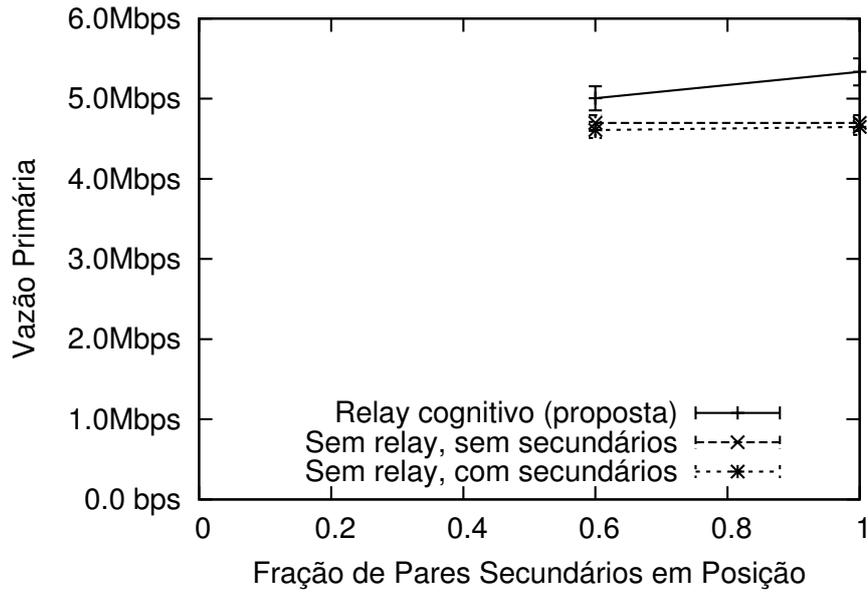
## 5.2 Cenário Geral

Após validar a implementação da proposta deste trabalho em cenários simplificados, foram realizados testes de desempenho em um cenário geral e mais realista. Nesse cenário, descrito em detalhes na Seção 4.4.2, múltiplos nós, primários e secundários, foram dispostos em uma área de 1000m por 1000m. Os UPs foram os primeiros a serem posicionados, em pares fonte-destino que se comunicavam diretamente através do meio sem fio de forma *ad hoc*. O posicionamento dos USs foi dividido: uma fração dos pares foi posicionada com um de seus nós a uma distância máxima ao centro de massa de algum par primário, estando em condições boas para realizar as retransmissões cognitivas, enquanto o restante dos pares foi posicionado livremente na área da simulação. Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações desse cenário, com o objetivo de observar quais as condições necessárias, em um cenário geral mais próximo da realidade, para que a proposta desenvolvida apresente benefícios às vazões das comunicações primária e/ou secundária.

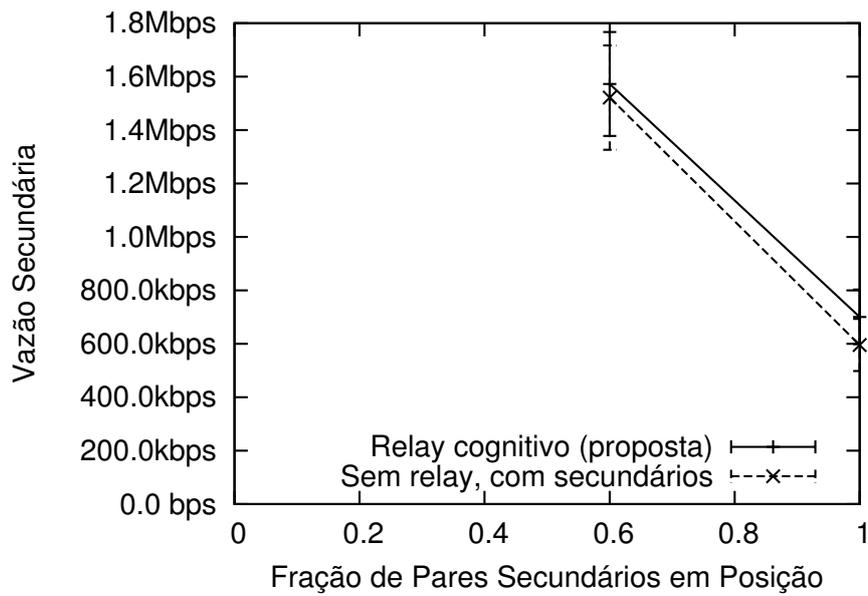
As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam as vazões das comunicações primária e secundária para as simulações avaliadas, com 10, 20 e 50 nós secundários, respectivamente (ou 5, 10 e 25 pares secundários). Em todas elas, havia 20 nós primários, ou seja, 10 pares primários. Foram comparadas as vazões primárias em três configurações diferentes: só com tráfego primário, isto é, apenas com os pares primários ativos; com tráfego primário licenciado e secundário não licenciado, sem que os USs realizassem retransmissões; e, mais uma vez, tráfego de ambas as classes, porém com USs atuando como *relays* cognitivos, ou seja, a proposta deste trabalho. Já para o tráfego secundário, foram comparados apenas os casos em que os USs atuavam ou não como *relays* cognitivos. Os cenários foram avaliados de acordo com a variação da fração de pares secundários que possuíam um de seus nós posicionado de acordo com o centro de massa de um par primário, estando em condições de auxiliar a vazão do mesmo com a proposta de comunicação cooperativa deste trabalho.

Analisando a vazão primária na Figura 5.10, na qual há 5 pares secundários, nota-se que os UPs, ao compartilharem o seu espectro licenciado com USs comuns, têm as suas vazões um pouco prejudicadas. Porém, a utilização, para a rede secundária, de dispositivos que, além de realizar o acesso não licenciado, atuam como *relays* cognitivos, conforme a proposta deste trabalho, traz ganhos para a comunicação dos UPs. Percebe-se, também, que conforme a fração de pares secundários em posição de realizar retransmissões aumenta, o mesmo ocorre com a vazão primária. Nesse cenário geral, a proposta traz ganhos pequenos para a comunicação secundária, que devido ao seu modelo de acesso oportunista não licenciado, cai significativamente conforme a fração de pares secundários próximos aos primários aumenta.

A Figura 5.11 apresenta os resultados das simulações com 10 pares secundários.



(a)

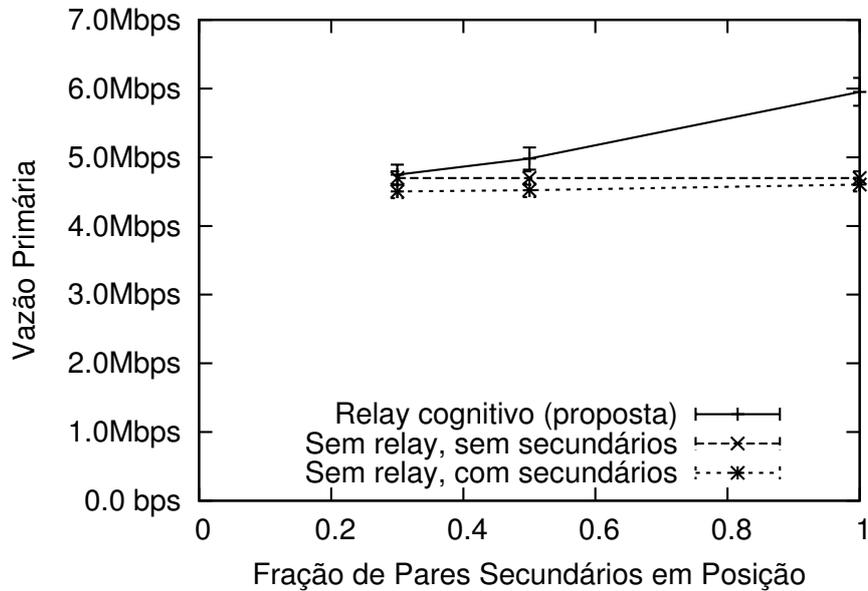


(b)

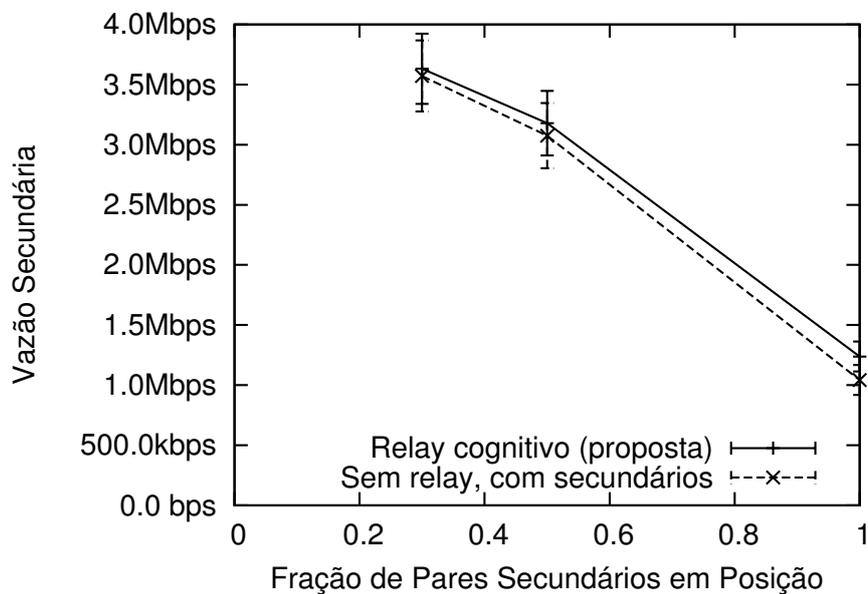
Figura 5.10: Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 10 Usuários Secundários.

Como anteriormente, pode-se observar que a proposta deste trabalho é melhor para a vazão dos UPs do que não permitir o acesso não licenciado ao meio pelos USs. Já quando o meio é acessado oportunisticamente por USs que não realizam retransmissões, há prejuízos para a vazão primária. Os benefícios trazidos para a comunicação primária, mais uma vez, aumentam conforme a fração de USs em condições de atuar como *relays* cognitivos aumenta. A vazão secundária, assim como nos

resultados para 5 pares secundários, diminui conforme a fração mencionada aumenta, tanto para USs que atuam como retransmissores cognitivos, quanto para USs comuns. Nota-se, porém, que a proposta apresenta uma melhora para a vazão secundária em relação a nós secundários que não realizam retransmissões, porém de forma muito menor do que para a vazão primária.



(a)



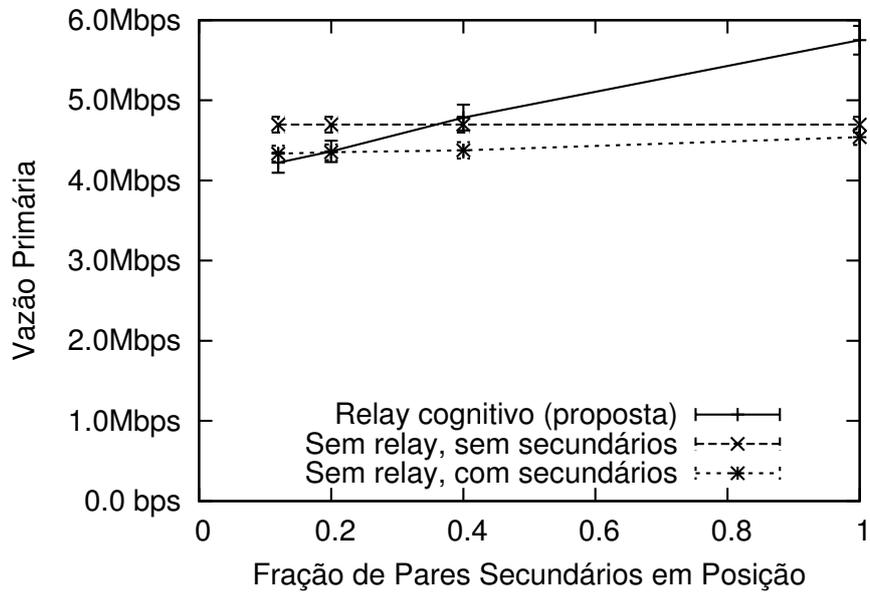
(b)

Figura 5.11: Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 20 Usuários Secundários.

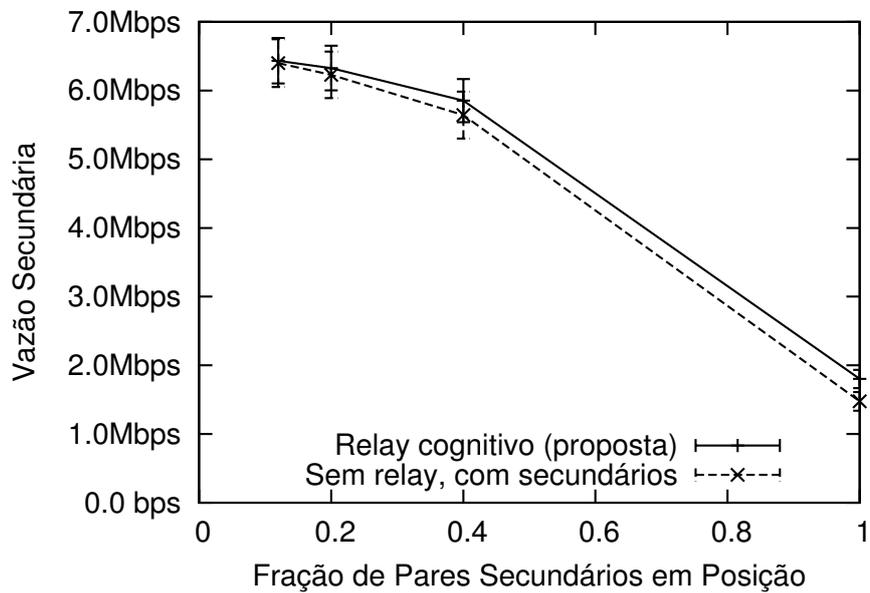
Os resultados das simulações com 25 pares secundários são apresentados na Fi-

gura 5.12. Nota-se que, nessa configuração, devido ao elevado número de nós na área da simulação, a vazão primária é prejudicada pela utilização oportunista do meio sem fio pelos USs. De fato esse problema é esperado, já que nesse caso há, na área da simulação, um total de 70 nós, sendo 20 primários e 50 secundários. Mesmo quando os nós secundários atuam como *relays* cognitivos, para frações pequenas de pares posicionados em condições boas para as retransmissões, a vazão primária é pior do que quando o meio é usado exclusivamente pelos UPs, ao contrário das configurações apresentadas anteriormente. Em relação à vazão secundária, a proposta deste trabalho também não oferece benefícios, a não ser para valores elevados da fração de nós em posições boas para atuar como *relays*. Além disso, observa-se que, mais uma vez, a vazão secundária diminui à medida que a fração de nós secundários próximos aos primários aumenta, como nas demais configurações avaliadas.

No Capítulo 6, a seguir, serão apresentadas as conclusões deste trabalho, expondo as considerações a respeito da proposta desenvolvida e os trabalhos futuros a serem realizados.



(a)



(b)

Figura 5.12: Vazões das comunicações primária e secundária no cenário geral, com 20 Usuários Primários e 50 Usuários Secundários.

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

O funcionamento tradicional de Redes de Rádios Cognitivos, com o objetivo de realizar o compartilhamento não licenciado do espectro eletromagnético, envolve o acesso oportunista do meio sem fio licenciado a Usuários Primários (UPs), por parte de Usuários Secundários (USs). Nesse modelo de acesso, os dispositivos cognitivos utilizados pelos USs devem causar o mínimo de interferência possível na comunicação dos UPs.

No entanto, este trabalho abordou o tema da cooperação em Redes de Rádios Cognitivos. A cooperação pode ocorrer entre os USs, ou entre UPs e USs, quebrando o paradigma de não interferência dos Rádios Cognitivos nos usuários licenciados. Este trabalho desenvolveu uma proposta de comunicação cooperativa, em que os USs atuam como retransmissores (*relays*) cognitivos dos UPs, auxiliando sua comunicação. Essa melhora proporcionada à comunicação dos UPs pelos USs pode ser considerada uma “interferência benéfica” [10].

Na proposta desenvolvida neste trabalho, os USs avaliam se suas retransmissões trazem benefícios à vazão da comunicação primária e só atuam caso isso ocorra. Além disso, quando múltiplos nós secundários podem atuar como retransmissores de um determinado par primário, eles se coordenam para que apenas o melhor *relay* para aquele par atue em sua comunicação. Dessa forma, os *relays* cognitivos são capazes de trazer benefícios tanto à comunicação primária quanto à secundária.

A proposta de cooperação entre UPs e USs deste trabalho possui, como característica principal, a transparência, já que as retransmissões são feitas de forma que os UPs acreditam se comunicar diretamente entre si. Além disso, a proposta também se apoia na cognição/inteligência dos dispositivos dos USs, pois os retransmissores secundários somente atuam como *relays* quando sua avaliação indica que haverá benefícios aos UPs, além de se coordenarem para que só o melhor *relay* para cada par primário atue.

## 6.1 Generalidade da Proposta

A proposta de comunicação cooperativa apresentada neste trabalho independe da tecnologia de comunicação utilizada, desde que a mesma seja capaz de atender aos requisitos apresentados no Capítulo 3: possuir algum mecanismo de priorização de tráfego; implementar alguma forma de modulação e codificação adaptativa ou controle automático de taxa; e permitir *spoofing*. Como visto no capítulo mencionado, essas características estão presentes em todas as principais tecnologias de redes sem fio utilizadas na atualidade.

## 6.2 Avaliação de Desempenho

Para avaliar o desempenho da proposta elaborada, a mesma foi implementada no simulador de redes ns-3, baseada em uma Rede de Rádios Cognitivos que tem como rede primária uma rede do padrão IEEE 802.11. A implementação foi validada em cenários simplificados, onde apresentou, além de uma melhora significativa na vazão primária, um outro efeito benéfico muito importante. Por aumentar o número de transmissões realizadas pelos UPs, ela aumenta as oportunidades de transmissão secundária, melhorando significativamente também a vazão secundária, sem aumentar a taxa de erros de transmissão primários [10].

A implementação desenvolvida, após ser validada nos cenários simplificados, teve seu desempenho avaliado em simulações com cenários mais próximos da realidade, com múltiplos pares de nós primários e secundários. A avaliação no cenário geral teve o objetivo de verificar se as vantagens obtidas nos cenários simplificados seriam mantidas e investigar as condições necessárias para a obtenção dos benefícios da proposta. Nesses cenários, a utilização da proposta pelos USs proporcionou aos UPs vazões melhores do que quando os mesmos realizaram o acesso exclusivo ao meio sem fio. Dessa forma, um importante desafio nas Redes de Rádios Cognitivos, a motivação para que os UPs, licenciados e detentores de direitos de utilização ao espectro eletromagnético, permitam que USs não licenciados realizem o acesso oportunista e não licenciado ao mesmo.

## 6.3 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros a esse, sugere-se o desenvolvimento de novas implementações da proposta de comunicação cooperativa apresentada, utilizando outros padrões e tecnologias de redes sem fio que sejam capazes de satisfazer os requisitos necessários ao funcionamento da mesma. O objetivo disso seria comprovar a generalidade da proposta elaborada e investigar os benefícios que ela é capaz de proporcionar frente

às particularidades de novas tecnologias.

Além disso, para avaliar a implementação desenvolvida no simulador ns-3, pode-se estudar a sua implementação em dispositivos reais, como realizado, para a comunicação cooperativa em redes convencionais, por KORAKIS *et al.* [33]. Pode-se estudar e adaptar as implementações realizadas para Redes de Rádios Cognitivos e para a proposta apresentada neste trabalho, utilizando adaptadores de redes sem fio IEEE 802.11 que possuam *drivers* de código aberto, ou dispositivos de rádio definido por *software* (*software defined radio* – SDR).

# Referências Bibliográficas

- [1] HAMD AOUI, B. “Adaptive spectrum assessment for opportunistic access in cognitive radio networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 8, n. 2, pp. 922–930, fev. 2009.
- [2] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION (FCC). *Spectrum Policy Task Force Report ET Docket No. 02-135*. Relatório técnico, 2002.
- [3] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., VURAN, M. C., et al. “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey”, *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, v. 50, pp. 2127–2159, set. 2006.
- [4] KOLODZY, P. “Next generation communications: Kickoff meeting”. In: *Proceedings of the Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*, 2001.
- [5] MITOLA, J., MAGUIRE, G. Q. “Cognitive radio: making software radios more personal”, *IEEE Personal Communications*, v. 6, n. 4, pp. 13–18, ago. 1999.
- [6] HAYKIN, S. “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 23, n. 2, pp. 201–220, fev. 2005.
- [7] MITOLA, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Tese de Doutorado, Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [8] COUTINHO, P. S., DE REZENDE, J. F. “Detecção de Energia para Rádios Cognitivos usando GNU Radio e USRP2”. In: *I Workshop on Broadband Access Networks - WRA 2011 - SBRC 2011*, jun. 2011.
- [9] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION (FCC). *Notice of proposed rulemaking and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and*

*reliable spectrum use employing cognitive radio technologies ET Docket No. 03-108*. Relatório técnico, 2005.

- [10] COUTINHO, P. S., DE REZENDE, J. F., BARBOSA, V. C. “Cooperação em Redes de Rádios Cognitivos”. In: *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - SBRC 2014*, maio 2014.
- [11] RASHID, R., ARIPIN, N., FISAL, N., et al. “Integration of Cooperative Sensing and Transmission”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 5, n. 3, pp. 46–53, set. 2010.
- [12] LIU, P., TAO, Z., LIN, Z., et al. “Cooperative wireless communications: a cross-layer approach”, *IEEE Wireless Communications*, v. 13, n. 4, pp. 84–92, ago. 2006.
- [13] NOSRATINIA, A., HUNTER, T., HEDAYAT, A. “Cooperative communication in wireless networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 10, pp. 74–80, out. 2004.
- [14] MANGOLD, S., CHOI, S., KLEIN, O., et al. “IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service”, *Proceedings of the European Wireless Conference*, v. 1, pp. 32–39, fev. 2002.
- [15] ns-3. “ns-3 Network Simulator”. 2014. Disponível em: <<http://www.nsnam.org/>>. Último acesso em 19-agosto-2014.
- [16] COUTINHO, P. S. *Detecção de Energia para Rádios Cognitivos usando GNU Radio e USRP2*. Projeto Final de Graduação em Engenharia de Computação e Informação, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2011.
- [17] MITOLA, J. “The software radio architecture”, *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 5, pp. 26–38, maio 1995.
- [18] YUCEK, T., ARSLAN, H. “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 11, n. 1, pp. 116–130, mar. 2009.
- [19] LETAIEF, K., ZHANG, W. “Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks”, *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 5, pp. 878–893, maio 2009.
- [20] CABRIC, D., MISHRA, S., BRODERSEN, R. “Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios”. In: *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, v. 1, pp. 772–776 Vol.1, nov. 2004.

- [21] URKOWITZ, H. “Energy detection of unknown deterministic signals”, *Proceedings of the IEEE*, v. 55, n. 4, pp. 523 – 531, abr. 1967.
- [22] QUAN, Z., CUI, S., POOR, H., et al. “Collaborative wideband sensing for cognitive radios”, *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 25, n. 6, pp. 60 –73, nov. 2008.
- [23] SAHAI, A., HOVEN, N., TANDRA, R. “Some Fundamental Limits on Cognitive Radio”. In: *in Forty-second Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, 2004.
- [24] SHANKAR, N., CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K. “Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures”. In: *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks - DySPAN 2005*, pp. 160 –169, mar. 2005.
- [25] HAYKIN, S. *Sistemas De Comunicação: Analógicos e Digitais (4a Edição)*. Bookman, 2004. ISBN: 8573079363.
- [26] CABRIC, D., TKACHENKO, A., BRODERSEN, R. W. “Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection”. In: *Proceedings of the 2006 IEEE conference on Military communications, MILCOM’06*, pp. 2342–2348. IEEE Press, 2006.
- [27] CABRIC, D., BRODERSEN, R. “Physical layer design issues unique to cognitive radio systems”. In: *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - PIMRC 2005*, v. 2, pp. 759 –763 Vol. 2, set. 2005.
- [28] MAHARJAN, S., ZHANG, Y., GJESSING, S. “Economic Approaches for Cognitive Radio Networks: A Survey”, *Wireless Personal Communications*, v. 57, pp. 33–51, 2011.
- [29] NIYATO, D., HOSSAIN, E. “Spectrum trading in cognitive radio networks: A market-equilibrium-based approach”, *IEEE Wireless Communications*, v. 15, n. 6, pp. 71 –80, dez. 2008.
- [30] VAZQUEZ-VILAR, G., MOSQUERA, C., JAYAWEERA, S. “Primary User Enters the Game: Performance of Dynamic Spectrum Leasing in Cognitive Radio Networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 9, n. 12, pp. 1 –5, dez. 2010.

- [31] ZHANG, J., ZHANG, Q. “Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks”. In: *Proceedings of the 10th ACM international Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '09*, pp. 23–32, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [32] ZHENG, G., KRIKIDIS, I., OTTERSTEN, B. “Full-Duplex Cooperative Cognitive Radio with Transmit Imperfections”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 12, n. 5, pp. 2498–2511, maio 2013.
- [33] KORAKIS, T., TAO, Z., SINGH, S., et al. “Implementation of a Cooperative MAC Protocol: Performance and Challenges in a Real Environment”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2009, n. 1, pp. 598140, 2009.
- [34] HUANG, C., ZHANG, X.-P. “Performances of Amplify-and-Forward Cooperative Relay Networks with Different Topologies”, *Wireless Personal Communications*, v. 69, n. 2, pp. 561–577, 2013.
- [35] LEU, A. E., MCHENRY, M., MARK, B. L. “Modeling and analysis of interference in listen-before-talk spectrum access schemes”, *International Journal of Network Management*, v. 16, pp. 131–147, mar. 2006.
- [36] GHASEMI, A., SOUSA, E. “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments”. In: *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks - DySPAN 2005*, pp. 131–136, nov. 2005.
- [37] VISOTSKY, E., KUFFNER, S., PETERSON, R. “On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing”. In: *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks - DySPAN 2005*, pp. 338–345, nov. 2005.
- [38] SAAD, W., HAN, Z., DEBBAH, M., et al. “Coalitional Games for Distributed Collaborative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks”. In: *IEEE INFOCOM 2009*, pp. 2114–2122, abr. 2009.
- [39] WANG, Q., YUE, D.-W., LAU, F. “Outage Performance and Cooperative Diversity Under Amplify and Forward Relaying in Cognitive Radio Networks”, *Wireless Personal Communications*, v. 69, n. 2, pp. 891–914, 2013.
- [40] SIMEONE, O., BAR-NESS, Y., SPAGNOLINI, U. “Stable Throughput of Cognitive Radios With and Without Relaying Capability”, *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 12, pp. 2351–2360, dez. 2007.

- [41] KRIKIDIS, I., DEVROYE, N., THOMPSON, J. “Stability analysis for cognitive radio with multi-access primary transmission”, *IEEE Trans. on Wireless Communications*, v. 9, n. 1, pp. 72–77, jan. 2010.
- [42] EL-SHERIF, A., SADEK, A., LIU, K. “Opportunistic Multiple Access for Cognitive Radio Networks”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 29, n. 4, pp. 704–715, abr. 2011.
- [43] FANOUS, A., EPHREMIDES, A. “Stable Throughput in a Cognitive Wireless Network”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 31, n. 3, pp. 523–533, mar. 2013.
- [44] VERDE, F., SCAGLIONE, A., DARSENA, D., et al. “An amplify-and-forward scheme for cognitive radios”. In: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP 2014*, pp. 2724–2728, maio 2014.
- [45] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice (2a Edição)*. Prentice Hall, jan. 2002. ISBN: 9780130422323.
- [46] BENVENUTO, N., PUPOLIN, S., GUIDOTTI, G. “Performance evaluation of multiple access spread spectrum systems in the presence of interference”, *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 37, n. 2, pp. 73–77, 1988.
- [47] COOPER, R. B. *Introduction to Queueing Theory (2a Edição)*. Elsevier North Holland, 1981. ISBN: 0444003797.
- [48] VASSIS, D., KORMENTZAS, G., ROUSKAS, A., et al. “The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs”, v. 19, pp. 21–26, maio 2005.
- [49] WiMAX. “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands”. IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 1-2005.
- [50] Bluetooth. “Specification of the Bluetooth System, Core Version 3.0 + HS. Relatório Técnico.” Bluetooth SIG.
- [51] UMTS. “3GPP specification: 25.05U; UMTS Radio Aspects; Multiplexing and multiple access. Relatório Técnico”. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Disponível em: <<http://www.3gpp.org/DynaReport/2505U.htm>>.

- [52] LTE. “3GPP specification: 36.201; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description. Relatório Técnico”. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Disponível em: <<http://www.3gpp.org/DynaReport/2505U.htm>>.
- [53] LACAGE, M., MANSHAEI, M. H., TURLETTI, T. “IEEE 802.11 rate adaptation: a practical approach”. In: *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 126–134. ACM, 2004.
- [54] KAMERMAN, A., MONTEBAN, L. “WaveLAN®-II: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band”, *Bell Labs Technical Journal*, v. 2, n. 3, pp. 118–133, 1997.
- [55] FLOYD, S., JACOBSON, V. “The synchronization of periodic routing messages”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 2, n. 2, pp. 122–136, abr. 1994.