



REDES COGNITIVAS COM OPORTUNIDADES DINÂMICAS DE ACESSO AO ESPECTRO

Marcel William Rocha da Silva

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro
Novembro de 2011

REDES COGNITIVAS COM OPORTUNIDADES DINÂMICAS DE ACESSO AO
ESPECTRO

Marcel William Rocha da Silva

TESE 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 DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, Dr.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

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

Prof. Paulo Cardieri, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
NOVEMBRO DE 2011

Silva, Marcel William Rocha da

Redes Cognitivas com Oportunidades Dinâmicas de Acesso ao Espectro/Marcel William Rocha da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XIII, 69 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 65 – 69.

1. Redes Sem Fio.
 2. Rádio Cognitivo.
 3. Roteamento.
- I. Rezende, José Ferreira de.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Aos meus pais, Marcos e Sonia.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, por me dar saúde física e mental para alcançar mais este objetivo.

Agradeço à minha esposa Gabriela pelo apoio, força e compreensão durante o doutorado. E, acima de tudo, por ter me dado o maior presente que eu poderia receber nesta vida, nossa pequena Moniquinha.

Gostaria de agradecer também aos meus pais, Marcos e Sonia. Sem seus conselhos e incentivo não teria chegado até aqui. Obrigado por tudo.

Obrigado ao Prof. Rezende, pela sua amizade e ajuda durante o mestrado e o doutorado, acreditando sempre no meu potencial até nos momentos mais difíceis.

Agradeço também a todos os meus familiares e amigos, que sempre me deram apoio e força na minha caminhada.

Obrigado também aos amigos do GTA, professores e alunos, pelas discussões sobre os assuntos acadêmicos e também pelos momentos de descontração.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, pela participação da banca com sugestões e críticas valiosas.

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

REDES COGNITIVAS COM OPORTUNIDADES DINÂMICAS DE ACESSO AO ESPECTRO

Marcel William Rocha da Silva

Novembro/2011

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

Os rádios cognitivos têm potencial para solucionar os problemas de escassez de espectro por serem capazes de utilizar de forma oportunista os canais livres do espectro licenciado durante os períodos em que os rádios licenciados estão inativos. Devido ao acesso não-prioritário ao espectro, os rádios cognitivos (secundários) são diretamente influenciados pela atividade dos rádios licenciados (primários). Quando os primários apresentam um padrão de atividade dinâmico, a comunicação entre rádios cognitivos pode sofrer frequentes interrupções. Estes problemas são especialmente prejudiciais quando os rádios cognitivos são utilizados em redes de múltiplos saltos, devido às mudanças de topologia causadas pelas frequentes quebras de enlace. Nesta tese, são apresentadas duas soluções para cenários distintos. A primeira proposta é de uma nova arquitetura de rede híbrida composta por rádios IEEE 802.11 e rádios cognitivos. Este novo tipo de rede híbrida pode ser formado a partir de redes 802.11 preexistentes, e alia as garantias de acesso ao espectro não-licenciado dos rádios 802.11 com as melhorias de desempenho pelo uso oportunista dos enlaces entre os rádios cognitivos. A segunda proposta é voltada para cenários formados unicamente por rádios cognitivos. Para estes cenários, é proposto um novo protocolo de roteamento, denominado RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade). Seu objetivo é determinar rotas com alta disponibilidade e capacidade. Além disso, o protocolo RoAD também é capaz de determinar caminhos alternativos, que são utilizados temporariamente enquanto o caminho principal encontra-se indisponível. Ambas as soluções são avaliadas através de simulações e comparadas com outras propostas da literatura.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

COGNITIVE RADIO NETWORKS WITH DYNAMIC SPECTRUM ACCESS OPPORTUNITIES

Marcel William Rocha da Silva

November/2011

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

Cognitive radios have the potential to solve the problems of spectrum scarcity by being able to opportunistically use the free channels of licensed spectrum during periods of licensed radios inactivity. Because of the non-priority access to the spectrum, cognitive radios (secondary) are directly influenced by the activity of licensed radios (primary). When the primary radios exhibit a dynamic activity pattern, communication between cognitive radios can suffer frequent interruptions. These problems are especially harmful when the cognitive radios are used in multi-hop networks due to changing topology caused by frequent link interruptions. This thesis presents two solutions for different scenarios. The first proposal is a new hybrid network architecture composed of IEEE 802.11 radios and cognitive radios. This new type of hybrid network can start from existing 802.11 networks, and combines the unlicensed spectrum access guarantees of the 802.11 radios with the performance improvements of the opportunistic use of the links between cognitive radios. The second proposal is focused on scenarios composed only by cognitive radios. For these scenarios, we propose a new routing protocol, named RoAD, which aims to determine routes with high availability and capacity. In addition, RoAD protocol also has the ability of finding alternative paths, which are used temporarily whenever the primary path becomes unavailable. Both solutions are evaluated through simulations and compared with other proposals in the literature.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Organização do Texto	4
2 Rádios Cognitivos e Oportunidades Dinâmicas de Acesso ao Espectro	5
2.1 Rádios Cognitivos	5
2.2 Roteamento em Redes Cognitivas	8
2.2.1 Redes Híbridas de Rádios 802.11 e Rádios Cognitivos	10
2.2.2 Redes Cognitivas Formadas Unicamente por Rádios Cognitivos	11
2.3 Considerações Assumidas na Tese	13
2.3.1 Rádios Primários e Canais Licenciados	14
2.3.2 Camada MAC dos Rádios Cognitivos	16
2.3.3 Detecção das Oportunidades de Acesso	18
3 Redes Híbridas com Rádios IEEE 802.11 e Rádios Cognitivos	19
3.1 Arquitetura de Rede Híbrida	19
3.2 Atalhos em Rotas	20
3.3 Mecanismo de Criação de Atalhos	24
3.3.1 Interação com o Protocolo de Roteamento 802.11	25
3.4 Descoberta Direta de Rotas Híbridas	26
3.5 Avaliação de Desempenho com Simulador Próprio	28
3.5.1 Implementação	28
3.5.2 Ambiente de Simulação e Metodologia	30
3.5.3 Resultados	30
3.6 Avaliação de Desempenho com o ns-2	34
3.6.1 Implementação	34
3.6.2 Ambiente de Simulação e Metodologia	37
3.6.3 Resultados sem Influência dos Primários	39

3.6.4	Resultados com Influência dos Primários	41
3.7	Conclusões do Capítulo	44
4	Redes Formadas Unicamente por Rádios Cognitivos	46
4.1	Roteamento em Redes Cognitivas com Oportunidades Dinâmicas . . .	46
4.2	RoAD: Roteamento de Alta Disponibilidade	48
4.3	Avaliação de Desempenho com o ns-2	52
4.3.1	Implementação	52
4.3.2	Ambiente de Simulação e Metodologia	54
4.3.3	Resultados	55
4.4	Conclusões do Capítulo	59
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	61
5.1	Trabalhos Futuros	63
	Referências Bibliográficas	65

Lista de Figuras

2.1	O ciclo cognitivo	6
2.2	Exemplo de oportunidades de acesso a faixa licenciada	9
2.3	Cadeia de Markov representando a utilização dos canais licenciados	14
2.4	Modelo de faixa licenciada utilizado no trabalho	15
2.5	Exemplo de funcionamento do protocolo CMAC	17
3.1	Exemplo de rede híbrida	22
3.2	Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E	23
3.3	Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E com atalho utilizando os nós B e D	23
3.4	Exemplo de cenário onde não é possível determinar caminhos de <i>backup</i> para todos os enlaces cognitivos da rota híbrida sem a formação de <i>loops</i> de roteamento	27
3.5	Número médio de saltos em função do percentual de nós cognitivos presentes no cenário	31
3.6	Distribuição do número de saltos das rotas para o cenário com 30% de nós cognitivos	32
3.7	Número médio de saltos em função do número de pares de primários em cada canal em cenários com 30% de nós cognitivos	33
3.8	Número médio de saltos em função do número canais em cenários com 30% de nós cognitivos	34
3.9	Número médio de saltos das rotas em função do percentual de nós cognitivos para diferentes valores de N	35
3.10	Número médio de saltos em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2	40
3.11	Vazão média em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2	40
3.12	Atraso médio em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2	41
3.13	Vazão e atraso médio em função do número de pares de primários por canal em cenários com 50% de nós cognitivos e 5 canais	42

3.14	Vazão e atraso médio em função do número de canais em cenários com 6 pares de primários por canal e 50% de nós cognitivos	43
3.15	Vazão e atraso médio em função do percentual de nós cognitivos em cenários com 6 pares de primários por canal e 5 canais	44
4.1	Exemplo de rede secundária sob a influência de primários	47
4.2	Valores de $Indisp_{ij}^k$ em função da estimativa $Disp_i^k \times Disp_j^k$	50
4.3	Exemplo de cenário de simulação com os quadrantes onde são posicionados os pares de rádios primários	55
4.4	Taxa de entrega de pacotes	56
4.5	Atraso médio fim-a-fim	57
4.6	Variação do atraso (<i>Jitter</i>)	58
4.7	Variação do parâmetro N do protocolo SAMER em cenários com 15 pares de primários por canal, $\mu_{on} = 1$ segundo e $\mu_{off} = 5$ segundos	60

Lista de Abreviaturas

ADC	<i>Analog to Digital Converters</i> , p. 5
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações, p. 1
AODV	<i>Ad hoc On-Demand Distance Vector</i> , p. 12
ASAR	<i>Ant-based Spectrum Aware Routing</i> , p. 13
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> , p. 38
CRAHN	<i>Cognitive Radio Ad Hoc Network</i> , p. 2
CRN	<i>Cognitive Radio Network</i> , p. 2
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance</i> , p. 16
CTS	<i>Clear To Send</i> , p. 16
DAC	<i>Digital to Analog Converters</i> , p. 5
DCA	<i>Descoberta de Caminhos Alternativos</i> , p. 50
DTN	<i>Disruption/Delay-Tolerant Network</i> , p. 10
DTS	<i>Data Transmission reReservation</i> , p. 16
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , p. 1
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , p. 1
IP	<i>Internet Protocol</i> , p. 2
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> , p. 11
MAC	<i>Medium Access Control</i> , p. 15
MPP	<i>Most Probable Path</i> , p. 11
NRC	<i>Número de Rádios Cognitivos</i> , p. 25

NoAH	<i>No Ad Hoc routing</i> , p. 36
OLSR	<i>Optimized Link State Routing</i> , p. 20
POP	<i>Percentual de Oportunidades livres</i> , p. 26
PST	<i>Path Stable Time</i> , p. 12
ROSA	<i>ROuting and dynamic Spectrum Allocation algorithm</i> , p. 13
RTS	<i>Request To Send</i> , p. 16
RoAD	<i>Roteamento de Alta Disponibilidade</i> , p. 3
SAMER	<i>Spectrum Aware Mesh Routing</i> , p. 11
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , p. 2
SPF	<i>Shortest Path First</i> , p. 25
TCL	<i>Tool Command Language</i> , p. 28
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , p. 2
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , p. 21

Capítulo 1

Introdução

Com o avanço das tecnologias que utilizam transmissões sem fio, o espectro de frequências vem se tornando um recurso escasso. Uma das razões que contribuem para a atual escassez são as políticas para o controle do acesso ao espectro que são adotadas pelas agências regulamentadoras, como por exemplo, o FCC (*Federal Communications Commission*) [1] nos Estados Unidos e a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) [2] no Brasil. Nos modelos adotados atualmente, o espectro de frequências pode ser classificado basicamente em dois tipos: o espectro licenciado e o espectro não-licenciado.

O espectro de frequências do tipo licenciado somente pode ser acessado por dispositivos de determinadas tecnologias e/ou que detém uma licença de operação para utilizar aquela faixa do espectro em uma dada região geográfica. Estas faixas do espectro, que na atualidade são a maioria do espectro de frequências, permanecem pouco utilizadas, ou até mesmo sem utilização, na maioria das regiões. Uma das causas deste problema são as diversas faixas licenciadas alocadas para dispositivos que utilizam tecnologias legadas, que são pouco eficientes na utilização do espectro ou até mesmo que já caíram em desuso na maioria das regiões. Já o espectro de frequências do tipo não-licenciado, que representa pequenas fatias do espectro de frequências, pode ser utilizado por qualquer dispositivo, desde que certos limites de potência de transmissão sejam respeitados. Este modelo simplificado atraiu o desenvolvimento de diversas tecnologias que atualmente possuem ampla utilização em diferentes aplicações, como por exemplo, as redes do padrão IEEE 802.11 [3]. Justamente por isso, as poucas faixas do espectro do tipo não-licenciado apresentam altos índices de utilização, limitantes para o desempenho dos dispositivos que acessam este tipo de espectro.

Portanto, é possível notar que na prática existe uma má utilização do espectro de frequências. As faixas do espectro do tipo licenciado permanecem pouco utilizadas por tecnologias legadas, que são ineficientes ou têm baixa utilização, enquanto as faixas não-licenciadas tornam-se muito utilizadas perante a crescente demanda por

este tipo de espectro [4–7]. A FCC estuda maneiras de minimizar este problema através da regulamentação do acesso dinâmico e oportunista ao espectro de frequências. Uma das novas tecnologias que viabilizará a adoção destes modelos diferenciados de acesso ao espectro, e que já se encontra em fase de estudo e regulamentação pela FCC [8], são os rádios cognitivos.

O desenvolvimento da tecnologia de rádios cognitivos foi possibilitado a partir dos avanços na área de rádios controlados por *software* (*Software Defined Radios* - SDRs). Esta classe de rádios permite que suas características de operação, tais como, frequência central, potência de transmissão, largura de banda e tipo de modulação, sejam ajustadas sem a necessidade de modificações de *hardware* [9, 10].

Os rádios cognitivos têm o potencial de solucionar o problema do uso ineficiente do espectro de frequências, pois são capazes de detectar a presença de rádios licenciados na região e determinar as faixas do espectro licenciado que estão livres. Utilizando suas funcionalidades de SDR, o rádio cognitivo pode configurar suas características de operação visando utilizar as faixas livres do espectro, também denominadas *oportunidades* de acesso ao espectro, sem causar interferência prejudicial ao funcionamento dos rádios licenciados presentes naquela região [4, 6, 7]. Desta forma, estes dispositivos utilizam dinamicamente e de maneira oportunista as faixas de espectro licenciado que estão livres, melhorando a eficiência na utilização do espectro.

Devido à sua característica oportunista e não-prioritária de acesso ao espectro licenciado, os rádios cognitivos são usualmente denominados dispositivos *secundários*. Já os rádios licenciados, que possuem prioridade no acesso ao espectro, são denominados dispositivos *primários*. Ao longo do texto, os termos secundários e primários serão utilizados respectivamente como sinônimos para rádios cognitivos e rádios licenciados.

Como descrito anteriormente, os rádios cognitivos devem possuir uma série de funcionalidades inovadoras e pouco triviais para este tipo de tecnologia. Por isso, esta é uma área de pesquisa que possui diversos desafios interessantes ainda em aberto que englobam praticamente todas as camadas da pilha de protocolos TCP/IP. Desde o estudo de novas funcionalidades de camada física, a qual precisa ser capaz de detectar e diferenciar os sinais gerados por dispositivos licenciados, até novas funcionalidades de camada de transporte, a qual deve ter meios de lidar com as mudanças de qualidade do serviço fornecido pelas camadas inferiores [6]. Além disso, grande parte destes desafios está relacionada à utilização destes dispositivos para a formação de redes *ad hoc* de múltiplos saltos, que em alguns trabalhos são denominadas redes *ad hoc* de rádios cognitivos (*Cognitive Radio Ad Hoc Networks* - CRAHNs) [11] ou redes de rádios cognitivos (*Cognitive Radio Networks* - CRNs). Neste trabalho, o termo *rede cognitiva* é utilizado como sinônimo de redes de múlti-

plos saltos formadas por rádios cognitivos.

Um problema interessante a ser estudado neste contexto é o impacto da falta de prioridade no acesso ao espectro licenciado no desempenho de redes cognitivas. Por serem dispositivos oportunistas, que realizam acesso não-prioritário ao espectro licenciado, os rádios cognitivos são diretamente dependentes da atividade dos dispositivos licenciados. Dependendo do conjunto de oportunidades de acesso ao espectro disponível para os rádios de uma rede cognitiva, podem existir períodos de tempo onde os enlaces entre rádios cognitivos tornam-se temporariamente indisponíveis. Este problema é especialmente prejudicial em cenários onde a disponibilidade de oportunidades de acesso é heterogênea e a atividade dos rádios primários é intensa e dinâmica [12]. Nestes casos, a topologia formada pelos enlaces entre rádios cognitivos também será dinâmica, dificultando a descoberta e a manutenção de rotas para a comunicação em múltiplos saltos.

Apesar da grande quantidade de trabalhos a respeito do roteamento em redes cognitivas existentes na literatura, apenas alguns deles se aplicam a cenários onde a disponibilidade das oportunidades de acesso ao espectro é dinâmica. Nesta tese, são apresentadas duas propostas para minimizar os problemas causados pela atividade dinâmica dos dispositivos primários no roteamento de pacotes [13–16]. Na primeira proposta, apresenta-se uma nova arquitetura de rede híbrida, composta por rádios cognitivos e rádios 802.11 [13, 14]. O principal objetivo da arquitetura é utilizar os rádios 802.11 como alternativa imediata para o encaminhamento de pacotes quando os enlaces entre rádios cognitivos estão indisponíveis. Pelo levantamento bibliográfico realizado, este é o primeiro trabalho a explorar esta ideia. Além disso, com base nesta arquitetura, foi proposto um novo mecanismo para a descoberta e seleção dos melhores enlaces entre rádios cognitivos a serem utilizados com o objetivo de melhorar o desempenho do roteamento de pacotes.

Na segunda proposta, apresenta-se um novo protocolo de roteamento para redes puramente cognitivas, ou seja, que são formadas unicamente por rádios cognitivos acessando a faixa licenciada. Os protocolos de roteamento existentes na literatura falham basicamente por não considerar que em cenários dinâmicos até mesmo o melhor caminho pode ficar indisponível, e também por criarem rotas com um limite de número de saltos não muito maior do que a rota mais curta. Neste sentido, propõe-se um novo protocolo de roteamento, denominado RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade) [15, 16], cujo objetivo é selecionar rotas estáveis, que são pouco prejudicadas pela atividade dos dispositivos licenciados. Para isto, o protocolo proposto utiliza uma nova métrica de roteamento que representa a capacidade e a disponibilidade dos enlaces. Além disso, o protocolo RoAD conta também com um mecanismo para a determinação de caminhos alternativos para serem utilizados quando enlaces da rota principal tornam-se indisponíveis.

As avaliações de desempenho das propostas foram realizadas através de simulações. No caso da rede híbrida, a primeira parte dos experimentos foi realizada com um simulador próprio, onde o funcionamento dos mecanismos foi implementado mais facilmente e com um alto nível de abstração. A segunda parte dos experimentos da rede híbrida, e todos os experimentos realizados para avaliar o protocolo RoAD, foram realizados com o simulador ns-2 [17], que é uma ferramenta amplamente utilizada pela comunidade científica. A grande vantagem destas simulações foi a possibilidade de avaliar as propostas com métricas de desempenho mais realistas, como por exemplo, vazão e atraso. Entretanto, para viabilizar estas simulações no ns-2, um grande esforço de implementação foi necessário para desenvolver novos módulos e integrar funcionalidades que representassem o funcionamento destes rádios.

1.1 Organização do Texto

O Capítulo 1 faz uma introdução ao tema, apresentando de maneira geral os problemas abordados e as propostas desta tese. No Capítulo 2, os principais conceitos sobre rádios cognitivos e roteamento em redes cognitivas são apresentados. Além disso, também são discutidas as considerações que foram assumidas a respeito das funcionalidades dos rádios cognitivos utilizados neste trabalho. Já nos Capítulos 3 e 4, serão apresentadas respectivamente, a proposta de uma nova arquitetura de rede híbrida, e a proposta de um novo protocolo de roteamento para redes formadas unicamente por rádios cognitivos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões finais, destacando as principais contribuições da tese e elencando possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Rádios Cognitivos e Oportunidades Dinâmicas de Acesso ao Espectro

Neste capítulo, serão apresentados conceitos básicos sobre rádios cognitivos, bem como o estado da arte e os problemas causados pela disponibilidade dinâmica de oportunidades de acesso ao espectro de frequências. Estes conceitos são importantes para a compreensão dos assuntos abordados nesta tese e também para motivar a necessidade de novas soluções para o problema do roteamento de pacotes em redes cognitivas com oportunidades dinâmicas. Além disso, no final do capítulo, serão apresentadas as considerações assumidas neste trabalho a respeito dos rádios primários, dos rádios cognitivos e de suas funcionalidades.

2.1 Rádios Cognitivos

Os avanços tecnológicos das últimas décadas permitiram o surgimento de uma nova classe de rádios configuráveis, denominados rádios definidos por *software* (*Software Defined Radios* - SDRs). Neste tipo de rádio, a maior parte do tratamento dos sinais transmitidos e/ou recebidos é realizada por *software* [9, 10]. De maneira geral, os sinais recebidos e transmitidos são convertidos, respectivamente, por conversores analógico/digital (*Analog to Digital Converters* - ADC) e digital/analógico (*Digital to Analog Converters* - DAC), o que permite que sejam processados digitalmente em microprocessadores genéricos. Assim, o uso de rádios definidos por software permite que diversas características de operação sejam modificadas sem a necessidade de modificação do *hardware* do rádio. Esta flexibilidade, aliada ao uso de antenas, interfaces de rádio, ADCs e DACs que operam em largas faixas de frequências, permitem que estes rádios transmitam e recebam sinais em diferentes faixas do espectro

e utilizem diferentes técnicas de tratamento dos sinais e diferentes modulações.

O rádio cognitivo por sua vez é uma tecnologia que alia inteligência computacional à flexibilidade fornecida pelos rádios definidos por *software*. Na definição original apresentada por Mitola III [9, 10], o rádio cognitivo é um arcabouço ou conjunto de funcionalidades que permitem que o rádio consiga de forma autônoma: observar o ambiente, inferir seu contexto, descobrir as ações possíveis, gerar planos, supervisionar os serviços fornecidos ao usuário, e aprender com a experiência. Estas funcionalidades foram organizadas na forma de um ciclo cognitivo (Figura 2.1), onde, basicamente, o rádio observa os estímulos do mundo exterior, planeja estratégias, toma decisões, e aprende com os resultados de suas ações.

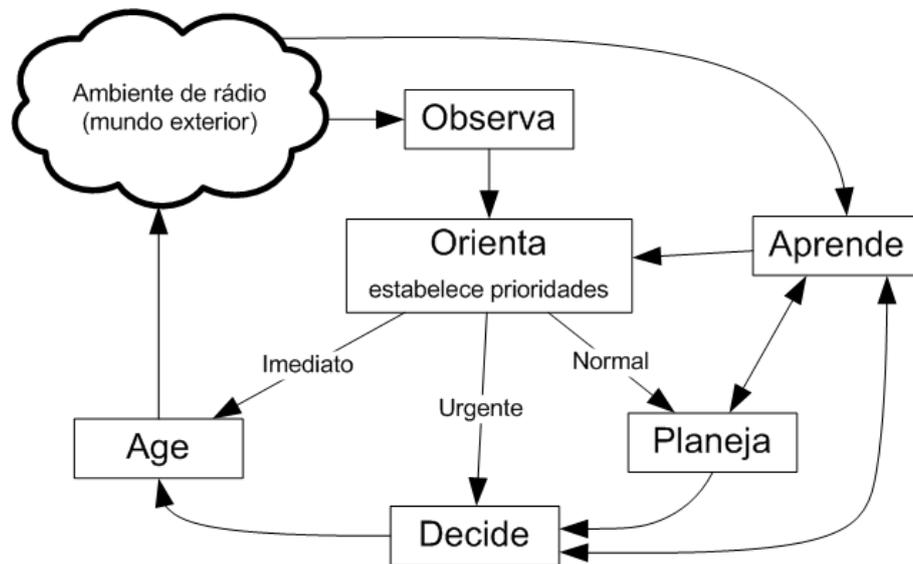


Figura 2.1: O ciclo cognitivo

Na ideia visionária de Mitola III, rádio cognitivo é um dispositivo inteligente, que é capaz de perceber as características do ambiente em que opera e adaptar seu modo de operação de forma autônoma visando atender as demandas do usuário. Uma das vantagens intrínsecas à esta nova tecnologia é o aprimoramento da utilização do espectro de frequências. Isto porque os rádios cognitivos podem, por exemplo, utilizar suas habilidades cognitivas e de reconfiguração para descobrir e utilizar faixas de frequências não-utilizadas, ou parcialmente utilizadas, por outros dispositivos de tecnologias legadas. Ou seja, os rádios cognitivos podem ser utilizados em aplicações de acesso dinâmico e oportunista ao espectro de frequências originalmente alocado para tecnologias legadas [6, 7]. De fato, como na atualidade as faixas disponíveis do espectro de frequências se tornaram um recurso escasso e a demanda por aplicações utilizando transmissões sem fio vem aumentando, o uso de rádios cognitivos é apontado como solução para o problema da escassez de espectro [4, 6, 7, 18].

Ao mesmo tempo em que se apresenta como uma tecnologia promissora, os rádios

cognitivos também impõem uma série de novos desafios para a sua realização prática. Com isso, o assunto se tornou objeto de estudo de diversos trabalhos científicos recentes. Dentre eles, [4, 6, 7, 18] destacam-se por serem os primeiros a abordar o assunto de maneira mais ampla, apresentando os desafios existentes na área e classificando os diversos trabalhos já publicados.

Especialmente em [6] e [18], apresenta-se uma classificação interessante para os desafios em aberto na pesquisa sobre rádios cognitivos, baseada nas funcionalidades básicas de um rádio cognitivo. Segue abaixo uma breve descrição de tais funcionalidades:

- **Sensoreamento de Espectro (*Spectrum Sensing*)** - habilidade que permite ao rádio cognitivo detectar as faixas do espectro de frequências que estão livres, ou seja, as oportunidades de acesso ao espectro que podem ser utilizadas de maneira oportunista.
- **Escolha e Gerenciamento de Espectro (*Spectrum Decision and Management*)** - escolha da oportunidade de acesso ao espectro que melhor atende às necessidades dos seus usuários.
- **Mobilidade de Espectro (*Spectrum Mobility*)** - capacidade de trocar a oportunidade de acesso ao espectro sempre que um rádio primário for detectado com o objetivo de evitar causar interferência prejudicial às comunicações dos dispositivos primários.
- **Compartilhamento de Espectro (*Spectrum Sharing*)** - permitir o compartilhamento justo da capacidade disponível nas oportunidades de acesso ao espectro entre os rádios cognitivos.

O compartilhamento espectral é um dos desafios da área de rádios cognitivos que foi abordado neste trabalho de pesquisa. Vários rádios ou redes cognitivas podem compartilhar o mesmo espectro e cada um deles pode realizar escolhas distintas de seus parâmetros de operação, buscando alcançar a capacidade que deseja [6]. Portanto, surgem dúvidas sobre o comportamento de um conjunto de rádios ou redes cognitivas compartilhando o acesso ao espectro sem qualquer tipo de controle, seja ele centralizado ou distribuído.

Como parte do trabalho de pesquisa desta tese, em [19] foi apresentado um estudo sobre o compartilhamento espectral entre rádios cognitivos utilizando teoria dos jogos, que é uma ferramenta interessante para estudar a interação entre indivíduos com interesses conflitantes. Os resultados obtidos mostram que ao modelar o problema do compartilhamento espectral meramente do ponto de vista técnico, utilizando dinâmicas populacionais simples, o jogo converge para equilíbrios ótimos

onde não existem maiores ganhos globais. Esta característica pode fornecer intuições para trabalhos futuros que pretendam desenvolver mecanismos para o controle do compartilhamento espectral entre dispositivos cognitivos.

Entretanto, apesar de o compartilhamento espectral ser um problema interessante, a área de interesse desta pesquisa de tese é a utilização de rádios cognitivos para a formação de redes sem fio de múltiplos saltos. Sobre este assunto, em [11] e [20] são apresentados os diversos desafios existentes para a formação de redes *ad hoc* de rádios cognitivos. Este tipo de cenário de rede cognitiva com múltiplos saltos gera desafios que afetam protocolos e mecanismos em todos os níveis da pilha de protocolos TCP/IP. Neste trabalho de tese, grande parte dos esforços foi empenhada em soluções para o problema do roteamento em redes cognitivas.

2.2 Roteamento em Redes Cognitivas

Um dos problemas que pode prejudicar a formação de redes cognitivas de múltiplos saltos é o acesso ao meio oportunista. Os rádios cognitivos possuem prioridade secundária no acesso ao meio, por isso, podem utilizar apenas as faixas do espectro deixadas livres pelos rádios primários, e têm a obrigação de modificar as suas características de operação sempre que um rádio licenciado entra em operação na região.

Apesar de viabilizar sua coexistência com os rádios licenciados, o acesso secundário ao espectro dificulta a comunicação entre os rádios cognitivos. Para uma comunicação bem sucedida entre dois rádios cognitivos na faixa licenciada, é necessário que ambos os rádios possuam ao menos uma oportunidade em comum de acesso a esta faixa. Estas oportunidades de acesso podem ser representadas de diferentes maneiras. O modelo mais comum, e que foi adotado neste trabalho, considera que cada canal temporariamente não utilizado pelos primários da região é uma oportunidade de acesso.

O exemplo da Figura 2.2 mostra a disponibilidade das oportunidades de acesso à faixa licenciada em função do tempo. Neste exemplo é possível perceber que os canais disponíveis para o acesso secundário mudam de acordo com o tempo. Estas mudanças fazem com que o rádio cognitivo tenha que reconfigurar frequentemente suas características de operação, as quais ainda assim podem não ser suficientes para evitar períodos sem oportunidades de comunicação (períodos P1, P2 e P3). Além disso, os nós da rede secundária possuem diferentes visões dos canais disponíveis, devido ao posicionamento geográfico e às características de propagação dos sinais. Desta forma, as interrupções nas comunicações podem ser frequentes devido à falta de oportunidades de acesso em comum.

De acordo com o exemplo anterior, fica evidente que a comunicação entre os

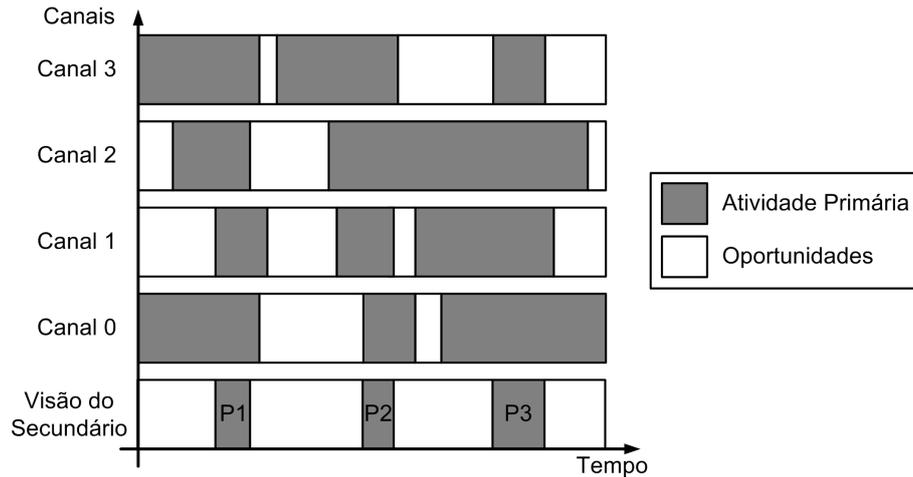


Figura 2.2: Exemplo de oportunidades de acesso a faixa licenciada

dispositivos secundários está fortemente relacionada ao comportamento dos dispositivos primários [12]. Assim, a comunicação entre os nós de uma rede secundária pode sofrer mudanças repentinas de qualidade e passar por frequentes períodos de indisponibilidade, os quais podem ser especialmente prejudiciais na descoberta e manutenção de rotas em redes cognitivas de múltiplos saltos [21]. Neste caso, as frequentes “quebras” de enlace ocasionam mudanças na topologia da rede, encurtando o tempo de vida médio das rotas descobertas pelo protocolo de roteamento.

Os problemas causados pelo acesso secundário ao espectro podem ser agravados devido à natureza potencialmente dinâmica da atividade dos rádios primários e, conseqüentemente, da influência dinâmica destes sobre os rádios secundários [12, 21, 22]. Em [12], os autores classificam os cenários de aplicação de redes cognitivas de acordo com o padrão de atividade dos rádios primários em três tipos: **estáticos**, **dinâmicos** e **oportunistas**.

Em cenários do tipo **estático**, os dispositivos primários permanecem por longos períodos de tempo ligados ou desligados. Desta forma, a disponibilidade das oportunidades permanece inalterada por períodos de tempo maiores do que a duração média de uma comunicação na rede cognitiva secundária [12]. Para os dispositivos secundários é como se os canais licenciados estivessem disponíveis ou indisponíveis por tempo indeterminado. Nestes cenários, os desafios para o roteamento de pacotes são similares àqueles enfrentados em redes sem fio de múltiplos canais e múltiplas interfaces.

Nos cenários do tipo **dinâmico**, os intervalos médios entre mudanças de estado dos dispositivos primários são menores que a duração média de uma comunicação na rede cognitiva secundária. Os dispositivos secundários têm liberdade para acessar a faixa licenciada apenas nos períodos de “silêncio” dos rádios primários, fazendo com que a disponibilidade de oportunidades para os dispositivos secundários apresente

um comportamento dinâmico. Para poder utilizar de maneira eficiente as oportunidades de acesso disponíveis, os rádios secundários devem ser capazes de adaptar suas características de operação dinamicamente. Nestes cenários, o roteamento de pacotes pode ser muito prejudicado pelas frequentes mudanças de topologia causadas pela disponibilidade dinâmica de oportunidades de acesso ao espectro.

Por fim, estão os cenários do tipo **oportunista**, que são um tipo de cenário mais desafiador onde os rádios primários possuem um padrão de atividade intenso e com alta dinamicidade. Isto faz com que a disponibilidade de oportunidades de acesso a faixa licenciada sejam escassas e de curta duração. Os longos períodos de falta de conectividade entre os nós da rede cognitiva tornam este tipo de cenário semelhante a uma DTN (*Disruption/Delay-Tolerant Network*), onde soluções do tipo *store-and-forward* seriam as mais indicadas [12].

O objetivo deste trabalho é buscar soluções para o problema do roteamento de pacotes em redes cognitivas com oportunidades dinâmicas. Duas soluções serão apresentadas para esta finalidade. A primeira, através de uma nova arquitetura de redes híbridas, composta por rádios cognitivos e rádios 802.11. A segunda, através de um novo protocolo de roteamento para redes formadas unicamente por rádios cognitivos. As próximas duas seções apresentam trabalhos relacionados a cada uma das duas abordagens utilizadas nesse trabalho.

2.2.1 Redes Híbridas de Rádios 802.11 e Rádios Cognitivos

Segundo o levantamento bibliográfico realizado, poucos foram os trabalhos que propuseram ideias similares para o uso de rádios 802.11 em conjunto com rádios cognitivos [23, 24]. Além disso, nenhum trabalho estudou ou propôs o uso de rádios 802.11 como solução para o problema da disponibilidade dinâmica dos enlaces em redes cognitivas de múltiplos saltos.

Em [23], os autores apresentam a ideia de que rádios cognitivos podem ser utilizados para a criação de enlaces de longa distância para promover a comunicação entre nós distantes em uma rede *ad hoc* ou para interconectar redes desconectadas. Entretanto, a ideia não foi explorada e as possibilidades provenientes dela não foram avaliadas nem quantificadas.

Outro trabalho que utiliza o conceito de rede de rádios cognitivos capazes de utilizar a faixa licenciada e a faixa não-licenciada é apresentado em [24]. Nesse trabalho, em uma arquitetura de redes em malha cognitiva estruturada em células, foram propostos mecanismos para que o ponto de acesso de cada célula determine se deve utilizar um canal da faixa licenciada ou da faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz com o objetivo de balancear o número de células em cada faixa. Desta forma, esta proposta é uma das primeiras a apresentar uma

arquitetura robusta à baixa disponibilidade de canais na faixa licenciada, pois as células podem sempre decidir utilizar um canal na faixa não-licenciada para obter garantias mínimas de comunicação. Vale destacar que isto não seria possível no caso de redes cognitivas que utilizam apenas a faixa licenciada.

2.2.2 Redes Cognitivas Formadas Unicamente por Rádios Cognitivos

Diversos trabalhos propõem soluções para o roteamento de pacotes em redes cognitivas. Entretanto, apenas algumas destas propostas se aplicam a cenários onde a disponibilidade de oportunidades é dinâmica [25–33].

Em [25, 26] é apresentado um protocolo de roteamento pela fonte que considera a interferência dos primários na descoberta de rotas na rede cognitiva. O objetivo do protocolo proposto é descobrir rotas com a maior probabilidade de atender a demanda de um fluxo (*Most Probable Path - MPP*). Para isto, os autores propõem uma nova métrica para atribuição de pesos aos enlaces. Esta métrica tem como base os resultados apresentados em [22], que mostram que o nível de interferência causada pelos primários sobre os nós da rede secundária segue uma distribuição *log-normal* quando os primários estão posicionados de acordo com uma distribuição de *poisson*. Através desta consideração, é possível determinar uma estimativa teórica da probabilidade de um enlace atender a uma determinada demanda e utilizá-la como métrica para os pesos dos enlaces.

Um dos problemas do protocolo MPP é que a escolha do caminho que mais provavelmente atende a demanda não garante que o caminho estará sempre disponível durante a duração do fluxo. Podem existir períodos de atividade intensa de algum primário interferente na rota tornando-a temporariamente indisponível. Nestes períodos, vários pacotes serão descartados e/ou terão sua entrega atrasada devido ao enfileiramento, degradando o desempenho. Além disso, outro problema é que a métrica de atribuição de pesos aos enlaces é baseada numa estimativa teórica da capacidade suportada pelos enlaces. Na prática, esta estimativa pode estar distante do valor real devido a efeitos de propagação dos sinais e ao posicionamento dos rádios primários interferentes.

Em [27, 28], os autores apresentam um protocolo de roteamento, denominado SAMER (*Spectrum Aware Mesh Routing*), baseado em decisões locais para o encaminhamento dos pacotes por enlaces com maior disponibilidade espectral. O protocolo SAMER utiliza uma métrica de roteamento que tem o objetivo de representar ao mesmo tempo, a disponibilidade do enlace, em termos do percentual de tempo de disponibilidade das oportunidades, e a qualidade do enlace, em termos da capacidade estimada de cada uma das oportunidades.

A decisão do próximo salto para o encaminhamento dos pacotes é realizada salto a salto, escolhendo o enlace com melhor métrica. Entretanto, os nós candidatos a próximo salto são escolhidos através da formação de uma malha de encaminhamento. Esta malha é criada de maneira distribuída. Cada nó determina múltiplas rotas com até H saltos para o destino. Os próximos saltos das rotas com melhores custos são escolhidos como candidatos a próximos saltos para aquele destino. Desta forma, o protocolo SAMER busca encaminhar pacotes pelos enlaces com melhor disponibilidade e qualidade sem se distanciar da rota com o menor número de saltos.

Um dos problemas deste protocolo é que os caminhos de até H saltos podem excluir as rotas que apresentam maior disponibilidade e qualidade. Além disso, apesar de utilizar uma malha de encaminhamento formada por rotas com até H saltos para o destino, a decisão sobre o próximo salto é local, de acordo com a métrica atual dos enlaces. Portanto, dependendo da conectividade da rede, os caminhos tomados pelos pacotes podem ter mais de H saltos.

Os trabalhos em [29] e [33] propõem novos protocolos de roteamento baseados em modificações do protocolo AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*). Ambas as propostas se baseiam em uma versão modificada do protocolo AODV que permite a descoberta de múltiplos caminhos. Em [29], propõe-se uma nova métrica de roteamento que busca estimar a estabilidade de um determinado caminho. Os autores assumem que existe um período máximo de tolerância T_m no qual o caminho pode ficar indisponível devido à atividade dos rádios primários. Com isso, a métrica proposta, chamada de PST (*Path Stable Time*), é calculada como o tempo médio entre quebras de enlaces que possuem duração superior à T_m segundos. Dentre as múltiplas rotas descobertas com o AODV modificado, o nó de destino seleciona uma rota principal, que é aquela com o melhor PST, e uma rota alternativa, que é o melhor caminho mais afastado da rota principal de acordo com uma segunda métrica derivada da métrica PST. A rota alternativa somente é utilizada caso a rota principal fique indisponível por mais de T_m segundos. Um problema desta métrica é que ela é fortemente dependente do parâmetro T_m . Em cenários onde o intervalo de tempo médio em que os usuários primários permanecem ativos for menor que T_m segundos, não há garantia de que o caminho mais disponível será utilizado a maior parte do tempo.

Em [33], os autores apresentam um novo protocolo de roteamento denominado *Gymkhana*. O trabalho utiliza um ferramental matemático previamente desenvolvido pelos autores, baseado em teoria dos grafos e matriz laplaciana, que é capaz de representar o nível de conectividade de grafos. De acordo com esta teoria matemática, o segundo autovalor da matriz laplaciana de um determinado grafo representa uma medida de sua conectividade, comumente chamada de conectividade algébrica. O protocolo *Gymkhana* utiliza esta medida para calcular o nível

de conectividade de múltiplos caminhos descobertos com uma versão modificada do AODV. O protocolo converte cada caminho em um grafo do tipo treliça composto por nós virtuais, onde os enlaces horizontais representam os enlaces físicos e os enlaces verticais representam as trocas de canal necessárias em um determinado nó. Pelo cálculo da conectividade algébrica deste grafo virtual, o protocolo seleciona um caminho com alta conectividade, que será o caminho considerado mais estável. Um problema do protocolo Gymkhana é que apenas o caminho mais conectado é selecionado para o uso, e em cenários de alta atividade dos rádios primários até mesmo este caminho pode ficar temporariamente indisponível.

Trabalhos mais recentes [31, 32] propõem um protocolo de roteamento, denominado ROSA (*ROuting and dynamic Spectrum Allocation algorithm*), com funcionamento semelhante ao SAMER. Este protocolo também encaminha pacotes salto a salto, montando uma tabela de candidatos a próximo salto em cada nó. Através da execução de um algoritmo, o nó escolhe o melhor próximo salto, a potência de transmissão, e o canal a ser utilizado, com o objetivo de aumentar a vazão dos fluxos. Um problema desta proposta é que os caminhos seguidos pelos pacotes, assim como no SAMER, tendem a ser próximos do caminho mais curto. Estes caminhos podem passar em uma região sobre a influência de diversos rádios primários, portanto podem não apresentar melhor desempenho fim-a-fim.

Outros trabalhos adotam novas abordagens para o problema do roteamento em redes cognitivas com disponibilidade dinâmica de oportunidades. Em [30], os autores utilizam uma abordagem bio-inspirada, baseada numa abstração de colônias de formigas e feromônios, para desenvolver um novo protocolo de roteamento denominado ASAR (*Ant-based Spectrum Aware Routing*). De fato, a descoberta de rotas é similar à versão modificada do protocolo AODV para múltiplos caminhos que é usada em [29] and [33]. O protocolo ASAR dissemina formigas para descobrir múltiplos caminhos para o destino, ou seja, ele envia em inundação mensagens chamadas *F-ant*. Para cada mensagem *F-ant* recebida, o destino envia de volta para a origem no caminho reverso uma mensagem em *unicast* chamada *B-ant*. A mensagem *B-ant* atualiza a concentração de feromônios nos nós em que atravessa. O encaminhamento das mensagens ocorre salto-a-salto, como em [27], e os nós encaminhadores selecionam os próximos saltos baseados nas suas concentrações de feromônios.

2.3 Considerações Assumidas na Tese

Como ainda não estão definidos padrões de rádio cognitivos aplicáveis em cenários de redes de múltiplos saltos, se torna importante definir as considerações a respeito das funcionalidades e características de operação dos rádios cognitivos que foram

assumidas neste trabalho. Nesta seção, são apresentadas as considerações importantes a respeito dos rádios primários e rádios secundários. Além disso, também são apresentadas as características a respeito do ambiente em que estes rádios operam.

2.3.1 Rádios Primários e Canais Licenciados

A primeira consideração importante diz respeito ao comportamento dos rádios primários. Diversos trabalhos na literatura modelam o comportamento dos usuários primários através de uma cadeia de Markov de tempo contínuo de dois estados, como na Figura 2.3. Neste modelo, os estados 1 e 0 representam, respectivamente, os períodos em que o rádio primário está ativo (canal ocupado) e inativo (canal livre). Por ser uma cadeia de Markov, o tempo de permanência nos estados é dado por variáveis aleatórias com distribuições exponenciais.

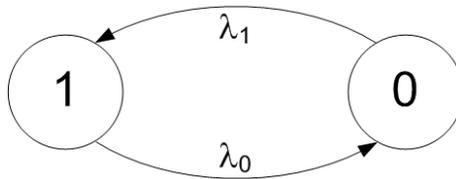


Figura 2.3: Cadeia de Markov representando a utilização dos canais licenciados

Apesar de ser um modelo amplamente adotado, alguns trabalhos específicos argumentam que este tipo de modelagem do comportamento dos usuários primários é inadequado em algumas situações [34–39]. Estes trabalhos utilizam dados coletados através de medições do espectro e buscam determinar modelos matemáticos que representem os padrões de utilização e, conseqüentemente, o padrão de atividade dos rádios primários. Eles indicam que o tempo médio de permanência nos estados ocupado e livre seria mais bem representado por variáveis aleatórias com outros tipos de distribuições. Com isso, o modelo de atividade dos primários passa a ser um modelo semi-markoviano de dois estados. Entretanto, todos estes trabalhos apresentam limitações no que diz respeito aos dados utilizados na análise. Alguns deles limitam-se a dados coletados na banda ISM, que é a faixa de frequências utilizada por redes do padrão IEEE 802.11 e Bluetooth [34–36]. Portanto, estes modelos não se aplicam às tecnologias licenciadas.

Em [37] e [38], os autores utilizam dados coletados em largas faixas do espectro, cobrindo diversas tecnologias licenciadas. Entretanto, para realizar medições de tal magnitude, o espectro é dividido em canais de banda estreita com tamanho fixo e é realizada uma medição em varredura. Para varrer uma faixa tão grande do espectro e obter resultados acurados, o intervalo entre medições torna-se consideravelmente grande devido ao tempo gasto na medição do nível de sinal em cada

canal. Em [37], o intervalo entre medições é da ordem de dezenas de segundos, logo os dados utilizados na modelagem podem não conseguir capturar o comportamento dinâmico das tecnologias avaliadas. Já em [38], o intervalo entre medições é menor, de aproximadamente 1 segundo. Neste caso, na maioria dos canais, o tempo de permanência nos estados ocupado e livre é bem modelado por uma distribuição exponencial. Apenas nos casos onde a utilização dos canais é muito baixa ou muito alta é que a distribuição exponencial torna-se ineficiente. Este resultado motiva o uso do modelo markoviano mais simples.

Em outro trabalho, voltado exclusivamente para redes celulares [39], utilizam-se *traces* com os instantes de início e término das chamadas de voz dos usuários que foram coletados diretamente com os provedores do serviço celular. Os autores argumentam que estes dados são mais representativos, pois representam os momentos em que, de fato, os usuários primários estão se comunicando. Entretanto, não se apresenta um modelo específico para representar os padrões de utilização dos canais ao longo do tempo. Os modelos apresentados visam representar o comportamento do sistema como um todo, modelando a dinâmica da chegada e saída de usuários. Logo, a adaptação destes modelos para cenários onde se deseja representar ocupação dos canais não é trivial.

Devido a estas limitações e especificidades dos modelos mais realistas presentes na literatura, este trabalho adota o modelo markoviano mais simples, onde os tempos médios de permanência do primário nos estados ligado e desligado são dados, respectivamente, por variáveis aleatórias com distribuição exponencial de médias iguais à μ_{on} e μ_{off} . Portanto, não é feita nenhuma consideração a respeito da tecnologia utilizada pelos rádios primários. Consideramos apenas que o rádio primário é um rádio genérico, que utiliza um dos canais de uma faixa licenciada de K canais seguindo um padrão dinâmico. Os canais da faixa licenciada são multiplexados em frequência, sendo representados por faixas de espectro de mesma largura de banda B , como na Figura 2.4. Este modelo foi capaz de cumprir o objetivo de gerar cenários onde a disponibilidade dos canais era dinâmica e também apresentou a vantagem de ser fácil de parametrizar. Além disso, como mencionado anteriormente, de acordo com os resultados em [38] ele é representativo em vários cenários.

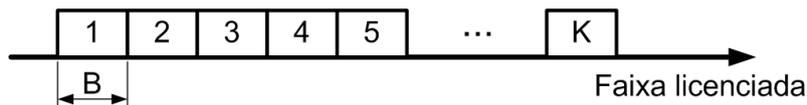


Figura 2.4: Modelo de faixa licenciada utilizado no trabalho

2.3.2 Camada MAC dos Rádios Cognitivos

Os rádios cognitivos têm a flexibilidade de acessar faixas do espectro licenciado que possuem vários canais. Logo, uma funcionalidade importante destes rádios é a escolha do canal utilizado nas suas transmissões. De maneira geral, existem dois tipos de solução na literatura no que diz respeito à escolha do canal: aquelas que tratam a escolha do canal dos enlaces em conjunto com a escolha das rotas, e aquelas que realizam a escolha da rota independentemente da escolha dos canais que serão usados nos enlaces.

Em cenários onde a disponibilidade dos canais é estática, a escolha cuidadosa do canal de transmissão utilizado em cada enlace das rotas permite reduzir a interferência e aperfeiçoar o desempenho. Entretanto, em cenários onde a disponibilidade dos enlaces é dinâmica, o fato de fixar o canal utilizado em cada enlace aumentar a frequência com que as rotas ficam temporariamente indisponíveis. Por isso, a abordagem mais adequada em cenários dinâmicos é que o protocolo de roteamento realize apenas a escolha das rotas, sem determinar os canais que serão utilizados nos enlaces. A escolha do canal de transmissão fica a cargo do protocolo de acesso ao meio na camada MAC, que pode mais facilmente levar em consideração a disponibilidade imediata dos canais em cada enlace para realizar o encaminhamento de pacotes.

Um protocolo de camada MAC que se enquadra neste perfil, e que foi adotado como camada MAC dos rádios cognitivos deste trabalho, é o protocolo CMAC, proposto em [40]. Este protocolo MAC tem funcionamento parecido com o CSMA/CA utilizando RTS (*Request To Send*) e CTS (*Clear To Send*), e se baseia na utilização de um canal dedicado para o envio de mensagens de controle. A escolha do canal de controle por si só, é um dos problemas em aberto na área de rádios cognitivos. Entretanto, no modelo utilizado neste trabalho considera-se que um canal de controle fora da banda licenciada, por exemplo, um canal na banda ISM, é utilizado pelos rádios secundários. Desta forma, o acesso ao canal de controle pelos rádios secundários não é prejudicado pelos problemas gerados pela falta de prioridade no acesso ao espectro.

No protocolo CMAC, enquanto não transmitem dados, todas as estações ficam sintonizadas no canal de controle à espera de mensagens. Para transmitir dados, o emissor realiza uma negociação com o receptor utilizando três mensagens de controle específicas: RTS, CTS e DTS (*Data Transmission reReservation*). O objetivo desta negociação é realizar a reserva de um ou mais canais por um determinado período de tempo. A Figura 2.5 mostra um exemplo de uma rede formada por quatro estações e o funcionamento do protocolo CMAC na linha do tempo.

De maneira resumida, a negociação segue os seguintes passos:

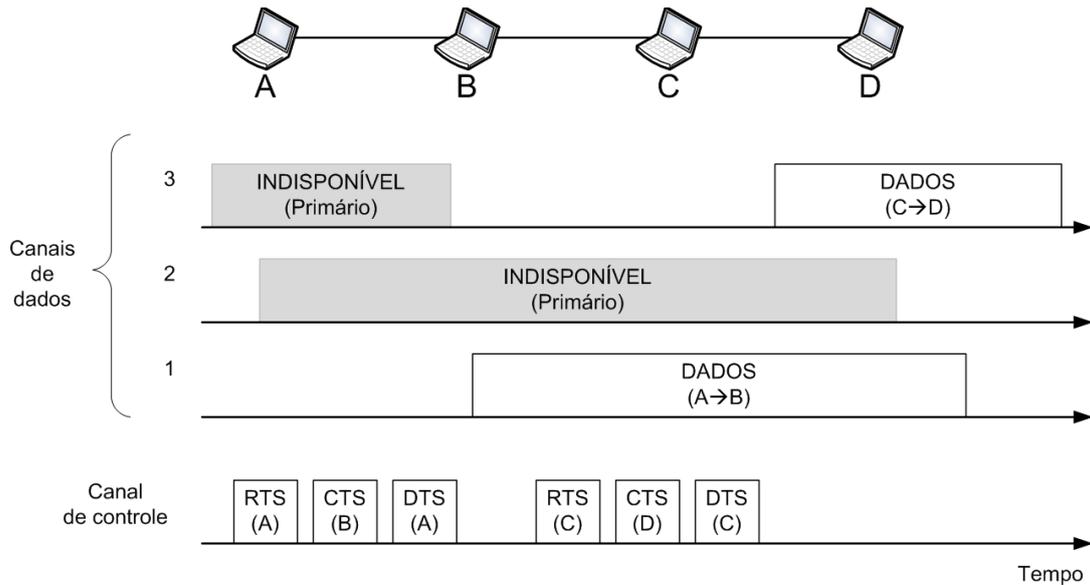


Figura 2.5: Exemplo de funcionamento do protocolo CMAC

1. O nó emissor envia um quadro RTS ao receptor através do canal de controle informando sua disponibilidade de canais, ou seja, quais os canais da faixa licenciada estão disponíveis naquele momento, e também a quantidade de dados enfileirados.
2. O nó receptor então faz o cruzamento da disponibilidade dos canais do emissor com a sua própria disponibilidade e seleciona um canal de dados comum a ambos, que é representado por sua frequência central e largura de banda, e pode ser um único canal da faixa licenciada ou vários canais concatenados. Neste momento, o receptor também determina a duração da reserva baseado na quantidade de dados enfileirados no emissor. O receptor então envia um quadro CTS ao emissor através do canal de controle informando o canal selecionado e a duração da reserva.
3. Por fim, o emissor envia uma terceira mensagem de controle, o quadro DTS, que possui a mesma estrutura e carrega as mesmas informações contidas no CTS que foi recebido: o canal selecionado e a duração da reserva.

Depois deste processo de troca de mensagens de controle, o emissor e receptor mudam para o canal escolhido e o envio do quadro de dados se inicia. Os nós vizinhos do emissor e do receptor ouvem os quadros CTS e DTS e atualizam seus mapas de disponibilidade dos canais. Nestes mapas, os nós armazenam os canais que foram reservados e a duração das reservas. Um dos problemas abordados em [40] é a escolha do melhor bloco tempo-espectro (*time-spectrum block*), ou seja, a escolha do melhor canal em comum e da duração da reserva. Dependendo do algoritmo

utilizado para a escolha dos blocos tempo-espectro é possível aprimorar a eficiência do protocolo e também garantir que haja justiça entre as estações no acesso aos canais licenciados. Neste trabalho, utilizamos uma solução mais simples para este problema, onde os rádios cognitivos reservam blocos tempo-espectro de tamanho fixo, com largura de banda igual a um canal e com duração para a transmissão de um quadro de dados e sua respectiva confirmação de recebimento.

2.3.3 Detecção das Oportunidades de Acesso

Outra funcionalidade importante de um rádio cognitivo é a descoberta das oportunidades de acesso ao meio. Os rádios cognitivos podem descobrir as oportunidades através de consultas a bases de dados de uso do espectro, baseadas nas suas localizações geográficas, ou através de técnicas de sensoreamento do espectro executadas localmente [41]. Em cenários onde a disponibilidade das oportunidades de acesso ao espectro varia dinamicamente é improvável que uma solução do tipo base de dados seja eficiente. Isso porque, quando a disponibilidade dos canais varia em curtas escalas de tempo, seria muito custoso construir e manter a base de dados atualizada. Nestes cenários dinâmicos, o uso de técnicas de sensoreamento seria o mais indicado para poder determinar as oportunidades disponíveis a cada instante. Entretanto, é notório que as técnicas de sensoreamento existentes atualmente apresentam limitações no que diz respeito à eficiência na detecção da presença de rádios primários, e, além disso, também impõem uma sobrecarga aos rádios secundários que precisam reservar parte do tempo para realizar medições dos canais licenciados.

Apesar de ser um problema interessante e muito estudado na literatura [41], a detecção eficiente dos primários e das oportunidades de acesso ao espectro é um problema que está fora do escopo desta tese por ser ortogonal aos problemas de roteamento aqui abordados. Portanto, assumimos que os rádios secundários conseguem obter informação sobre a disponibilidade momentânea dos canais em escalas de tempo uma ordem de grandeza menor que aquelas das durações médias dos períodos ocupados e livres dos canais. Na prática, seria como se o rádio cognitivo possuísse um receptor adicional dedicado ao sensoreamento, que ficasse constantemente realizando medições por varredura nos K canais da faixa licenciada. Desta forma, é possível ter uma visão mais realista da ocupação instantânea dos canais sem que a tarefa de sensoreamento represente uma sobrecarga para o funcionamento do rádio cognitivo.

Capítulo 3

Redes Híbridas com Rádios IEEE 802.11 e Rádios Cognitivos

Considerando a necessidade de minimizar os impactos causados pela disponibilidade dinâmica de oportunidades de acesso ao meio, este capítulo apresenta um novo paradigma de aplicação de rádios cognitivos em redes sem fio de múltiplos saltos através de sua integração com rádios 802.11. Tomando como base uma rede 802.11 em malha de múltiplos saltos, que é um tipo de rede muito estudado e utilizado em diversos cenários [42], rádios cognitivos podem ser adicionados em alguns nós da rede visando melhorar o desempenho da comunicação. Assim, a rede em malha sem fio passa a ser uma rede híbrida, formada por rádios 802.11 e rádios cognitivos [13, 14].

Neste capítulo, inicialmente serão apresentadas, a arquitetura de rede híbrida proposta, e as maneiras de melhorar o desempenho nestes cenários com o uso oportunista dos enlaces entre rádios cognitivos. Em seguida, apresenta-se um novo mecanismo para a descoberta e seleção dos melhores enlaces entre rádios cognitivos a serem utilizados. Para avaliar o desempenho das propostas foram realizadas simulações com um simulador próprio e também com o simulador ns-2 [17].

3.1 Arquitetura de Rede Híbrida

Uma ideia promissora para solucionar a falta de garantias de comunicação entre os rádios cognitivos é considerar o seu uso em conjunto com rádios 802.11. Os rádios 802.11 são dispositivos que se tornaram muito populares e muito acessíveis, tanto que grande parte dos dispositivos móveis atuais já é comercializada com interfaces deste padrão e a maioria dos trabalhos na área de redes em malha considera o seu uso. Além disso, estes dispositivos utilizam a banda não-licenciada ISM de 2,4 GHz, onde todos os dispositivos possuem o mesmo nível de prioridade no acesso

ao espectro. Portanto, nada mais natural do que considerar uma integração entre rádios cognitivos e rádios 802.11 em uma rede em malha.

A arquitetura de rede em malha híbrida proposta neste trabalho se assemelha com algumas das ideias apresentadas em [23] e tem como objetivo definir uma rede onde os nós podem se comunicar mesmo quando as oportunidades de acesso a faixa licenciada são intermitentes, escassas ou inexistentes. Para isto, todos os nós da rede híbrida possuem uma interface 802.11 operando na banda ISM de 2,4 GHz. Como os rádios têm o mesmo nível de prioridade no acesso ao espectro nesta faixa não-licenciada, a interface 802.11 permite que os nós se comuniquem mesmo quando os rádios cognitivos estão impossibilitados de se comunicar.

Na arquitetura da rede híbrida proposta, a topologia de base é formada pelas interfaces 802.11 dos nós, que são utilizadas para compor uma rede 802.11 de múltiplos saltos. Nesta rede de base, os nós podem se comunicar através da descoberta de rotas que é realizada por um protocolo de roteamento para redes sem fio, como por exemplo, o protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [43]. Para compor a rede híbrida, alguns nós especiais, denominados *nós cognitivos*, possuem uma interface de rádio cognitivo adicional que realiza transmissões em uma faixa licenciada do espectro.

Uma característica atraente da arquitetura de rede híbrida é a possibilidade de ser formada a partir de uma rede 802.11 de múltiplos saltos pré-existente. As interfaces de rádio cognitivo adicionais podem ser instaladas gradualmente nos nós formando novos enlaces entre os nós cognitivos, denominados nesta tese de *enlaces cognitivos*. Quanto maior o número de nós da rede com interface de rádio cognitivo adicional, maior será a oferta de enlaces cognitivos e a possibilidade de melhorias de desempenho dos fluxos de dados em múltiplos saltos.

3.2 Atalhos em Rotas

Sempre que dois ou mais nós em uma rota da rede 802.11 de base, denominada neste trabalho de *rota 802.11*, possuírem uma interface cognitiva adicional, será possível criar enlaces entre estes rádios cognitivos. Desta forma, dois nós cognitivos da rota 802.11 podem estabelecer um “enlace cognitivo de atalho” para desviar o tráfego da rota 802.11 original. A formação destes enlaces cognitivos de atalho pode fornecer melhorias de desempenho de diferentes maneiras.

Quando a faixa licenciada utilizada pelos rádios cognitivos está em frequências mais baixas do que a faixa ISM de 2,4 GHz, os enlaces entre os rádios cognitivos podem possuir maior alcance do que os enlaces 802.11. Por exemplo, a faixa UHF de 600 MHz é uma das faixas do espectro licenciado que estão sendo liberadas pela FCC para o acesso oportunista [44]. Assumindo um modelo de propagação em

espaço livre, o alcance de comunicação será inversamente proporcional à frequência de transmissão. Logo, considerando a mesma potência de transmissão e largura de banda, o alcance de comunicação na faixa UHF de 600 MHz será 4 vezes maior do que o alcance na banda ISM de 2,4 GHz. O maior alcance dos enlaces cognitivos permite a redução do número de saltos das rotas, o que melhora o desempenho das comunicações em múltiplos saltos na rede híbrida quando os pacotes das rotas 802.11 são desviados por estes enlaces.

Em outros casos, dependendo da faixa licenciada utilizada e das limitações dos parâmetros de operação dos rádios cognitivos, o alcance dos enlaces cognitivos pode não ser maior que o alcance dos enlaces 802.11. Entretanto, o uso dos enlaces cognitivos ainda pode representar benefícios de desempenho, pois estes enlaces podem possuir maior capacidade que os enlaces 802.11. Através de técnicas de agregação de canais livres e modulações mais complexas, os rádios cognitivos podem obter taxas de transmissão superiores às taxas obtidas pelos rádios 802.11. Nestes casos, os pacotes desviados por estes enlaces cognitivos serão transmitidos mais rapidamente e o fluxo de dados apresentará maior vazão e menor atraso fim-a-fim. Apesar disso, com a finalidade de simplificar o estudo, este trabalho tem como foco principal os ganhos oriundos do maior alcance dos enlaces cognitivos.

A Figura 3.1 apresenta um exemplo de uma rede em malha híbrida. Neste cenário, os nós A , C , D , G e I da rede 802.11 possuem interfaces cognitivas adicionais e podem formar novos enlaces cognitivos. Uma maneira de representar o cenário é na forma de uma rede sobreposta, onde a rede 802.11 serve de substrato para os rádios cognitivos. Se o nó A deseja se comunicar com o nó J , o caminho com o menor número de saltos na rede 802.11 é formado pelos nós A , C , E , G , H , I e J . Neste caso, o caminho possui seis saltos, ou seja, são necessárias seis transmissões para que um quadro gerado pelo nó A alcance seu destino, o nó J .

No entanto, neste cenário de rede híbrida, caminhos com menor número de saltos podem ser formados com o auxílio das interfaces cognitivas. Neste exemplo, estas interfaces permitem a composição de enlaces com maior alcance, como pode ser verificado pelos enlaces apresentados na rede cognitiva sobreposta da Figura 3.1. No exemplo do parágrafo anterior, uma rota alternativa poderia ser criada sobre a rota 802.11, passando pelos enlaces cognitivos formados pelos nós A , G e I , e em seguida utilizar o enlace da rede 802.11 formado pelos nós I e J . Assim, a comunicação entre A e J poderia ser realizada com um menor número de saltos através de uma *rota híbrida*, utilizando enlaces 802.11 e enlaces cognitivos. Com a redução do número de saltos é possível reduzir o atraso fim-a-fim, pela redução do tempo de retransmissões e espera em filas.

A criação de atalhos nas rotas da rede em malha híbrida também tem o efeito favorável de reduzir a quantidade de transmissões realizadas na banda não-licenciada.

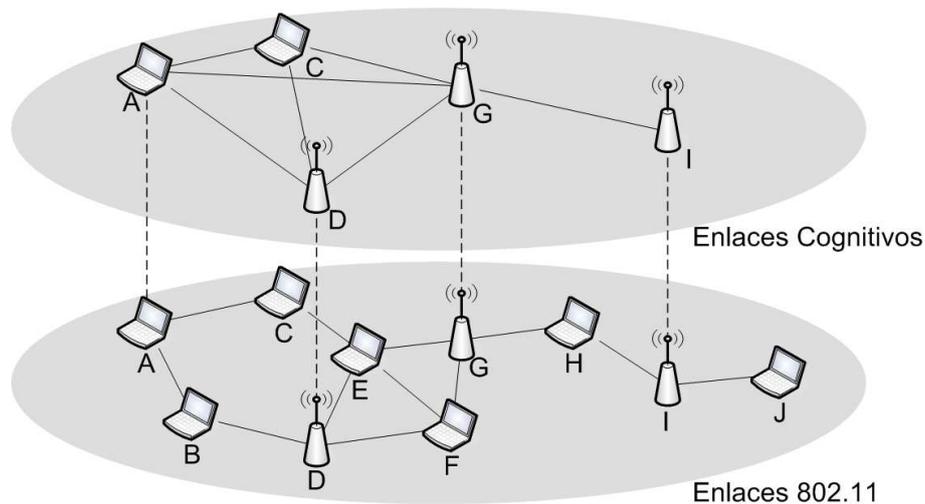


Figura 3.1: Exemplo de rede híbrida

Ainda no exemplo da Figura 3.1, ao utilizar os enlaces cognitivos entre A e G e entre G e I como enlaces de atalho para a rota entre A e J , cinco retransmissões são evitadas na rede 802.11. Assim, pode-se perceber que a criação e o uso dos atalhos também têm o efeito benéfico de reduzir a carga no canal 802.11, o que reduz a disputa no acesso ao meio e melhora o desempenho das comunicações de múltiplos saltos realizadas na rede.

Outro fator que afeta o desempenho das comunicações em rotas com grande número de saltos é a interferência intra-fluxo, que é a disputa pelo acesso ao meio entre pacotes de um mesmo fluxo. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de comunicação em quatro saltos entre o nó A e o nó E . Em cada janela de tempo estão representadas as transmissões de quadros que podem ser realizadas em paralelo. Neste exemplo, se considera que o alcance de detecção da portadora é o dobro do alcance de transmissão, quando o nó A encaminha um quadro para o nó B , as estações B , C e D não podem encaminhar outros quadros em paralelo. Isto ocorre, pois B não pode transmitir enquanto recebe o quadro de A , e C e D estão dentro do alcance de detecção da portadora de A e B . Desta forma, apenas um dos enlaces pode encaminhar quadros por vez, o que reduz a vazão fim-a-fim do fluxo entre A e E .

Considerando agora que as estações B e D possuem interfaces cognitivas adicionais e que seu alcance de transmissão é o dobro do alcance dos rádios 802.11, pode-se construir um enlace de atalho entre eles. A Figura 3.3 apresenta o novo diagrama utilizando o enlace de atalho. Neste novo exemplo, as estações A e B podem realizar transmissões em paralelo. O mesmo ocorre na janela de tempo seguinte com as estações B e D . Isto ocorre, pois as estações B e D possuem duas interfaces e podem utilizar a faixa licenciada através da transmissão ou recepção de quadros

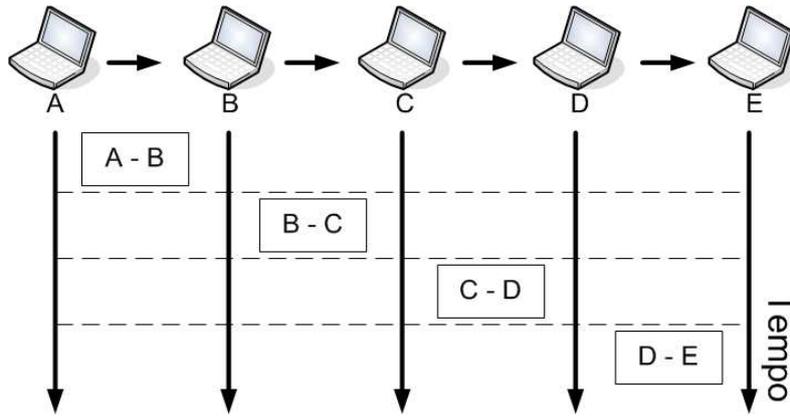


Figura 3.2: Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E

utilizando a interface cognitiva ao mesmo tempo em que transmitem ou recebem quadros utilizando a interface 802.11. Assim, ao utilizar o enlace de atalho entre B e D para desviar os quadros do fluxo entre A e E , a redução da contenção intra-fluxo aumenta a vazão e reduz o atraso fim-a-fim.

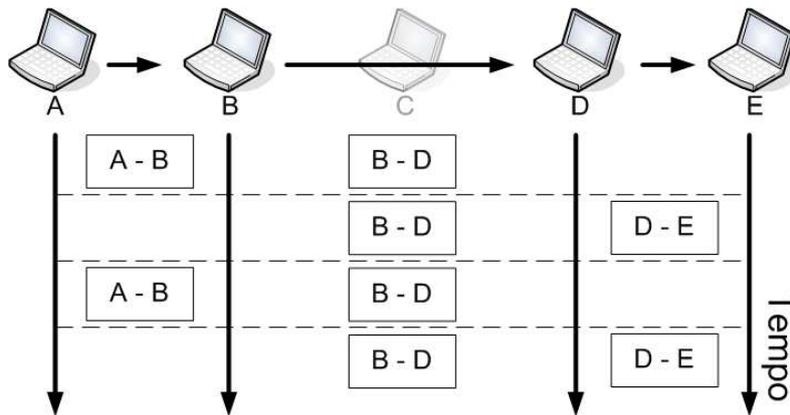


Figura 3.3: Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E com atalho utilizando os nós B e D

Além destas vantagens, a característica de rede sobreposta da arquitetura híbrida permite que os enlaces cognitivos de atalho possuam imunidade a possíveis instabilidades. Sempre que um enlace cognitivo da rota híbrida se tornar indisponível, devido à atividade dos dispositivos primários da região, os enlaces da rota 802.11 que estavam sendo desviados podem voltar a ser utilizados imediatamente para dar continuidade à comunicação. Voltando ao exemplo da Figura 3.1, se o enlace cognitivo entre G e I , por exemplo, se torna indisponível, os enlaces 802.11 entre G , H e I podem ser utilizados como alternativa imediata. Desta forma, a comunicação se torna menos prejudicada pelas possíveis interrupções nos enlaces cognitivos.

3.3 Mecanismo de Criação de Atalhos

De acordo com a seção anterior, pode-se concluir que o uso de enlaces cognitivos de atalho para desviar o tráfego das rotas 802.11 é uma maneira interessante de fornecer melhorias de desempenho. Portanto, devem existir maneiras de descobrir os enlaces cognitivos que podem ser formados entre os nós de uma rota 802.11, e também deve ser possível selecionar quais destes enlaces são os melhores para serem utilizados como enlaces de atalho para aquela rota. Neste intuito, foi desenvolvido neste trabalho um *mecanismo de criação de atalhos* que será apresentado nesta seção.

O mecanismo de criação de atalhos tem sua operação restrita às rotas 802.11 previamente criadas na rede de substrato. Portanto, a comunicação entre nós da rede híbrida se inicia na rede 802.11 subjacente, através de uma rota determinada pelo protocolo de roteamento da rede 802.11. Quando os nós cognitivos presentes na rota 802.11 detectam que participam do encaminhamento de um fluxo de dados, eles iniciam o envio de sondas endereçadas à origem e ao destino do fluxo. Estes pacotes de controle contêm o identificador do nó e as suas oportunidades disponíveis na faixa licenciada. Depois de receber todas as sondas, os nós cognitivos presentes na rota conhecem cada um dos outros nós e as oportunidades disponíveis em cada um deles. Utilizando esta informação em conjunto com um protocolo MAC especializado para rádios cognitivos, como os apresentados em [40, 45, 46], as interfaces cognitivas presentes na rota podem se coordenar através de varreduras e sondagens para determinar os possíveis enlaces de atalho que podem ser criados a partir deles.

Depois disso, uma nova fase de sondagens pode ser iniciada, onde os nós cognitivos passam a enviar periodicamente novas sondas na rota 802.11 endereçadas aos nós de origem e destino. Estas novas sondas carregam, além das informações da sondagem inicial, todos os possíveis atalhos a partir do nó que as gerou. Assim, os nós cognitivos da rota podem se coordenar e descobrir todos os possíveis enlaces de atalho. Outra informação importante que pode ser obtida com o envio das sondas periódicas é o conhecimento da rota 802.11 completa. Basta que as sondas armazenem uma lista com os identificadores dos nós por onde passam. Ao encaminhar uma sonda, o nó da rota 802.11 adiciona o seu identificador no final da lista. Os nós podem utilizar as listas com os identificadores para montar uma visão completa da rota 802.11 utilizada pelo fluxo. Vale ressaltar que estas fases de envio de sondas para a descoberta dos nós cognitivos, dos enlaces de atalho e da rota 802.11 completa podem ocorrer em conjunto com o envio dos pacotes de dados do fluxo.

De posse de todos os atalhos existentes na rota, e conhecendo a rota 802.11 completa, o nó mais próximo da fonte pode selecionar o melhor conjunto de atalhos a ser utilizado. Para isto, o nó cognitivo em questão monta um grafo parcial da rede,

contendo apenas os enlaces que fazem parte da rota 802.11 e os enlaces cognitivos de atalho previamente descobertos. Este grafo parcial é utilizado como entrada para um algoritmo *Shortest Path First* (SPF), como o algoritmo de *Dijkstra* [47], que selecionará então uma rota híbrida utilizando o melhor conjunto de enlaces cognitivos de atalho. Depois disso, a rota selecionada pelo nó cognitivo pode ser informada aos demais através de uma mensagem de controle específica.

Uma característica importante deste método de seleção do melhor conjunto de atalhos é que, dependendo dos pesos atribuídos aos enlaces no grafo parcial, é possível obter rotas híbridas que otimizam diferentes métricas de desempenho. Nas avaliações de desempenho realizadas neste trabalho os dois tipos de enlaces do grafo parcial, 802.11 e cognitivos, receberam pesos iguais. Desta forma, o algoritmo SPF seleciona uma rota híbrida que utiliza o conjunto de enlaces de atalho que minimiza o número de saltos. Entretanto, outras métricas que consideram capacidade, atraso e disponibilidade dos enlaces também poderiam ser utilizadas.

3.3.1 Interação com o Protocolo de Roteamento 802.11

O mecanismo de criação de atalhos é fortemente relacionado ao protocolo de roteamento da rede 802.11 subjacente, pois tem sua operação limitada aos nós de uma rota da rede 802.11. Como foi dito anteriormente, esta característica permite que as rotas híbridas que são criadas sejam sempre acopladas às rotas da rede 802.11, permitindo que as interrupções nos enlaces cognitivos de atalho possam ser sanadas imediatamente através dos enlaces 802.11. Entretanto, a probabilidade do mecanismo proposto descobrir enlaces de atalho nas rotas 802.11 depende do protocolo de roteamento da rede 802.11. Para avaliar a influência desta interação foram estudadas diferentes formas de se criar rotas na rede 802.11 de substrato, considerando-se a utilização de um protocolo de roteamento proativo, como por exemplo, o protocolo OLSR.

O protocolo OLSR utiliza um algoritmo SPF para descobrir rotas que minimizam a soma dos pesos dos enlaces da rede 802.11. Portanto, o processo de criação de rotas é guiado pelos pesos atribuídos aos enlaces da rede. Uma abordagem simples e usual seria atribuir pesos iguais a todos os enlaces da rede permitindo a descoberta das rotas mais curtas. Entretanto, no caso da rede híbrida, esta não é uma boa abordagem porque não se considera nenhuma informação a respeito dos nós que possuem interface cognitiva adicional. Os próximos itens apresentam duas métricas de atribuição de pesos aos enlaces 802.11 de redes híbridas, visando favorecer a existência de enlaces cognitivos de atalho nas rotas da rede 802.11 subjacente.

Métrica NRC (Número de Rádios Cognitivos)

Nesta métrica, apresentada na Equação 3.1, o peso do enlace 802.11 é determinado pela quantidade de nós cognitivos participando do enlace. As variáveis booleanas RC_i e RC_j assumem valor 1 quando o nó i ou j possuem interface de rádio cognitivo adicional, e valor 0 caso contrário. O objetivo desta métrica é formar rotas que preferencialmente possuam maior quantidade de rádios cognitivos, o que aumentaria a probabilidade de existirem enlaces cognitivos de atalho acoplados à rota 802.11. A constante N , presente na Equação 3.1, permite controlar o nível de influência do parâmetros RC_i e RC_j .

$$NRC_{ij} = \frac{1}{N \times (RC_i + RC_j) + 1} \quad (3.1)$$

Métrica POP (Percentual de Oportunidades livres)

Esta outra métrica, além de levar em conta se os nós que formam o enlace são cognitivos, também contabiliza o percentual de oportunidades livres da influência de primários na faixa licenciada. Este valor percentual é dado pela quantidade de canais onde não se detectam rádios primários dividida pela quantidade total de canais. Na Equação 3.2, este percentual para os nós i e j são representadas pelos parâmetros OP_i e OP_j , respectivamente. Além disso, como na Equação 3.1, a constante N também serve para controlar a influência dos parâmetros OP_i e OP_j . Desta forma, a métrica determina pesos maiores para enlaces 802.11 cujos vértices são nós cognitivos que possuem alto percentual de canais livres para o acesso à faixa licenciada.

$$POP_{ij} = \frac{1}{N \times (OP_i + OP_j) + 1} \quad (3.2)$$

3.4 Descoberta Direta de Rotas Híbridas

Outra maneira de criar rotas híbridas é modificar o próprio protocolo de roteamento da rede 802.11 de substrato para utilizar os enlaces cognitivos no processo de descoberta de rota. Para isto, o algoritmo SPF do protocolo de roteamento da rede híbrida deveria utilizar como entrada um grafo da rede completa, formado pelos enlaces 802.11 e pelos enlaces cognitivos todos com pesos iguais. Este protocolo de roteamento modificado é capaz de descobrir as rotas híbridas ótimas, que minimizam o custo total da rota.

Com esta abordagem direta é possível descobrir rotas híbridas ótimas que minimizam a soma dos pesos dos enlaces, sem a necessidade do mecanismo de criação de atalhos apresentado na Seção 3.3. Entretanto, os enlaces cognitivos das rotas

híbridas criadas não estão imediatamente acoplados a rotas alternativas na rede 802.11 de substrato. Em caso de interrupção de um dos enlaces cognitivos da rota híbrida, não seria possível realizar o encaminhamento imediato dos pacotes por uma rota alternativa na rede 802.11. Em cenários com oportunidades dinâmicas, onde a disponibilidade dos enlaces varia rapidamente, as rotas híbridas criadas por esta abordagem direta teriam baixa disponibilidade. Além disso, as frequentes mudanças de estado dos enlaces cognitivos do grafo da rede completa causariam um aumento excessivo do envio de mensagens de controle e a redução do tempo de vida das rotas híbridas. Todos estes problemas prejudicam o desempenho das comunicações, que sofrem com as frequentes interrupções.

Uma maneira de contornar o problema seria fazer o “processo inverso” do mecanismo de criação de atalhos. O grafo da rede híbrida completa deveria incluir todos os possíveis enlaces cognitivos, mesmo aqueles indisponíveis. Depois de criar uma rota híbrida neste grafo, seria possível realizar a descoberta de caminhos alternativos na rede 802.11 acoplados a cada um dos enlaces cognitivos presentes na rota híbrida. Estes caminhos serviriam como alternativas imediatas, ou seja, como caminhos de *backup*, para os enlaces cognitivos que estão temporariamente indisponíveis. Entretanto, esta outra solução não é trivial, pois em alguns cenários específicos não é possível determinar rotas alternativas sem a formação de *loops* de roteamento. Especialmente em casos onde a rota híbrida passa por nós cognitivos que possuem pouca conectividade na rede 802.11. Se tal nó cognitivo participa de dois enlaces cognitivos da rota híbrida, os caminhos alternativos na rede 802.11 para estes enlaces cognitivos podem ter como única alternativa os mesmos nós da rede 802.11 de substrato, formando um *loop* de roteamento.

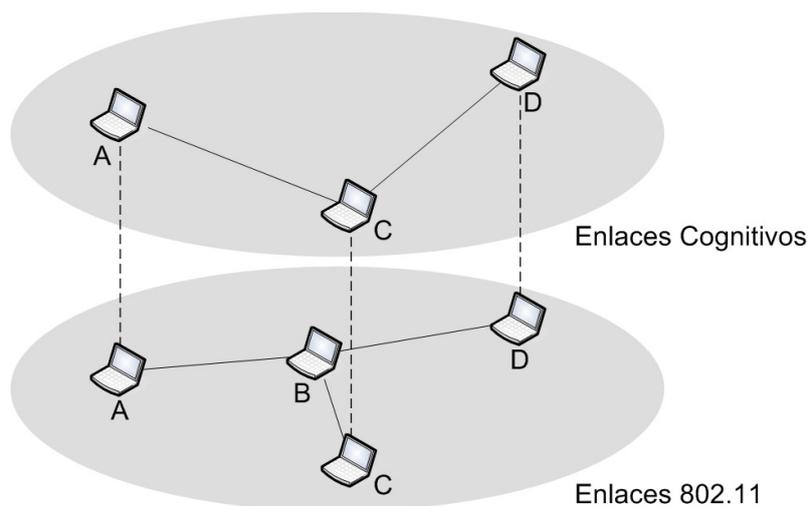


Figura 3.4: Exemplo de cenário onde não é possível determinar caminhos de *backup* para todos os enlaces cognitivos da rota híbrida sem a formação de *loops* de roteamento

O exemplo da Figura 3.4 demonstra este problema da determinação de caminhos de *backup* em um cenário simples. Um protocolo de roteamento modificado para determinar diretamente rotas híbridas ótimas poderia escolher a rota passando pelos nós *A*, *C* e *D* como a melhor rota de *A* para *D*. Esta rota utilizaria apenas os enlaces cognitivos, entre *A* e *C* e entre *C* e *D*. O caminho de *backup* na rede 802.11 para o enlace entre *A* e *C* passaria pelos nós *A*, *B* e *C*, e o caminho de *backup* na rede 802.11 para o enlace entre *C* e *D* passaria pelos nós *C*, *B* e *D*. Ambos os caminhos de *backup* compartilham o enlace 802.11 entre *B* e *C*. Neste cenário, é inevitável a formação de um *loop* de roteamento no enlace 802.11 entre *B* e *C* quando os enlaces cognitivos ficarem indisponíveis.

3.5 Avaliação de Desempenho com Simulador Próprio

Para avaliar o desempenho da proposta de rede híbrida e do mecanismo de criação de atalhos foi desenvolvido um simulador próprio que gera cenários de rede híbrida, como descrito na Seção 3.1. A próxima seção descreve os detalhes de sua implementação.

3.5.1 Implementação

O simulador desenvolvido para esta avaliação, que foi implementado em linguagem TCL, realiza cálculos de rotas sobre grafos que representam o mapa da rede. Ele consiste de uma série de rotinas que implementam as funcionalidades dos mecanismos que serão simulados.

Uma rotina inicial, que é executada em todos os experimentos, posiciona os nós aleatoriamente dentro da área de simulação. O posicionamento segue as restrições abaixo:

- A menos do primeiro nó, que é posicionado no centro da área de simulação, um novo nó deve estar sempre no alcance de algum outro nó já presente no cenário.
- O grau de vizinhança, ou seja, o número de vizinhos, de todos os nós não pode ultrapassar um limite máximo.
- A distância entre um novo nó e os nós posicionados anteriormente não pode ser menor que um limite mínimo.

Desta forma, garante-se a geração de redes onde todos os nós estão conectados e com poucas aglomerações, representando cenários de redes de múltiplos saltos co-

munitárias ou em um grande centro urbano. O posicionamento dos nós e a definição dos alcances máximos de comunicação dos rádios 802.11 e dos rádios cognitivos permitem gerar os mapas que serão utilizados nos cálculos de rotas.

Para determinar os enlaces entre rádios cognitivos existentes nos mapas de rede, leva-se em consideração a disponibilidade de oportunidades na faixa licenciada. No modelo de interferência adotado nestas simulações, pares de rádios primários são posicionados aleatoriamente na área de simulação, garantindo-se que o segundo esteja dentro do alcance de comunicação do primeiro. Cada par de primários utiliza um canal fixo da faixa licenciada, que é escolhido no início da simulação. A atividade destes pares de primários é estática, uma vez que não existe a dimensão “tempo” no simulador, e eles estão sempre ativos. Um enlace entre rádios cognitivos existe se existir pelo menos um canal em comum livre para os nós cognitivos que formam o enlace. E um canal é considerado livre para um rádio cognitivo, ou seja, uma oportunidade, se este rádio não estiver no alcance de transmissão de nenhum dos rádios licenciados que utilizam aquele canal.

A funcionalidade mais importante do simulador, que é utilizada para emular o funcionamento dos protocolos e mecanismos implementados, é a rotina que implementa o algoritmo SPF. Esta rotina recebe como entrada um mapa de rede e um par fonte-destino. Dependendo das entradas utilizadas, diferentes comportamentos podem ser emulados.

No caso do mecanismo de criação de atalhos, o algoritmo SPF é executado utilizando como entrada os enlaces 802.11, para simular o funcionamento de um protocolo de roteamento para redes sem fio. Três diferentes métricas de atribuição de pesos aos enlaces 802.11 podem ser utilizadas no simulador: pesos iguais em todos os enlaces 802.11 (nomeada EQUAL nos gráficos), ou com as métricas NRC e POP propostas na Seção 3.3.1. Depois disso, o mecanismo de criação de atalhos pode ser simulado, através da execução do algoritmo SPF utilizando como entrada um mapa da rede formado apenas pelos enlaces da rota 802.11 e os enlaces de atalho acoplados à esta rota, assim como é descrito na Seção 3.3.

No caso da descoberta direta de rotas híbridas, executou-se o algoritmo SPF utilizando como entrada um mapa completo da rede, contendo os enlaces 802.11 e os enlaces cognitivos. Para avaliar a possível solução discutida no final da Seção 3.4, de se criar rotas alternativas (*backups*) para cada um dos enlaces cognitivos presentes nas rotas híbridas, foi desenvolvido um algoritmo guloso simples. Este algoritmo utiliza o próprio algoritmo SPF para determinar rotas na rede 802.11 entre os vértices dos enlaces cognitivos. Para evitar a criação de *loops* de roteamento, antes de procurar uma nova rota 802.11 alternativa, todos os nós antecessores na rota híbrida e nas rotas alternativas previamente determinadas são retirados do grafo da rede. Por isso, é possível evitar a criação de *loops*. Entretanto, em alguns casos, como

aquele exemplificado no final da Seção 3.4, o algoritmo SPF não consegue determinar rotas alternativas para alguns dos enlaces de atalho presentes nas rotas híbridas.

3.5.2 Ambiente de Simulação e Metodologia

Para as simulações realizadas foram gerados 30 cenários com uma área quadrada de 1000 metros de lado, onde 200 nós foram posicionados. O grau máximo para o posicionamento foi fixado em 6 e a distância mínima em 20 metros, com o objetivo de evitar grandes aglomerações de nós.

Em cada cenário de simulação, todos os nós possuem uma interface 802.11 e alguns, escolhidos aleatoriamente, possuem uma interface de rádio cognitivo adicional. Este percentual de nós cognitivos foi variado entre 0% e 100%. O alcance de transmissão dos rádios 802.11 foi definido em 80 metros e o alcance dos rádios cognitivos foi definido em 320 metros, ou seja, 4 vezes maior que o alcance dos rádios 802.11. Assumindo um modelo de propagação em espaço livre e levando em consideração que os rádios 802.11 operam na banda ISM de 2,4 GHz, este alcance de 320 metros representa um rádio cognitivo operando na faixa UHF de 600 MHz, que é uma das faixas do espectro licenciado que estão sendo liberadas pela FCC para o acesso oportunista [44].

Para as simulações realizadas foi utilizada uma faixa licenciada composta por 9 canais, e em cada canal, dois pares de rádios primários foram posicionados considerando um alcance de transmissão de 320 metros entre eles. Todos os resultados apresentados nos gráficos são médias dos resultados obtidos nos 30 cenários, com barras de erro que representam intervalos de confiança de 95%.

3.5.3 Resultados

A Figura 3.5 apresenta o número médio de saltos das rotas entre todos os pares fonte-destino das redes híbridas simuladas em função do percentual de nós cognitivos presentes. Esta é uma métrica importante para a avaliação, pois o objetivo do mecanismo de criação de atalhos é reduzir o número de saltos das rotas 802.11. Cada curva no gráfico representa um resultado obtido utilizando as diferentes métricas de atribuição de pesos aos enlaces (EQUAL, NRC e POP), antes e depois da execução do mecanismo de criação de atalhos. Nestes experimentos, as métricas NRC e POP utilizam parâmetro $N = 2$. Além disso, também são apresentados resultados da descoberta direta de rotas híbridas (OPTIMAL), antes e depois da execução do algoritmo guloso de determinação de *backups*.

Como esperado, o número médio de saltos das rotas híbridas criadas a partir do mecanismo de criação de atalhos é inversamente proporcional ao percentual de nós cognitivos existente no cenário. Isto ocorre porque o maior alcance de comunicação

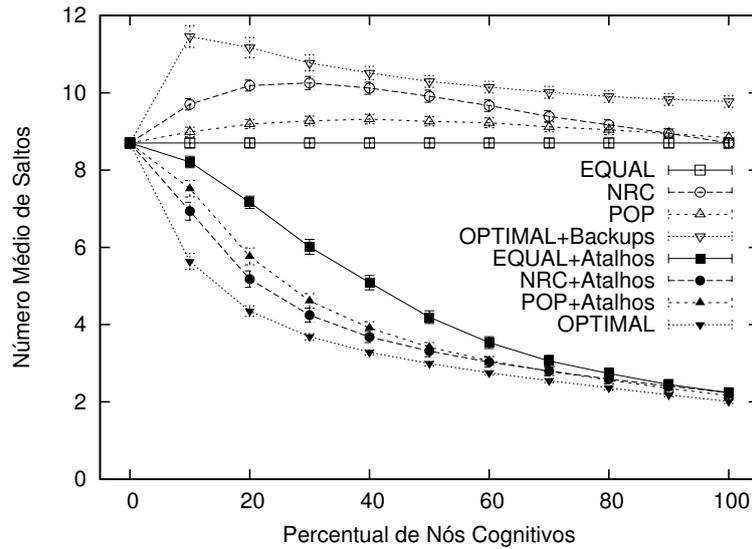


Figura 3.5: Número médio de saltos em função do percentual de nós cognitivos presentes no cenário

dos rádios cognitivos permite interconectar nós distantes com um menor número de saltos. Uma observação importante é que o mecanismo de criação de atalhos, utilizando as métricas NRC e POP, consegue criar rotas híbridas com um número de saltos, próximo ao obtido pela solução ótima. Estes resultados confirmam que o uso de informação a respeito dos nós cognitivos durante o processo de criação de rotas na rede 802.11 subjacente favorece a posterior criação de atalhos com o mecanismo proposto.

Comparando o desempenho das métricas NRC e POP, pode-se perceber que, nestes cenários, a métrica NRC fornece melhores oportunidades para o mecanismo de criação de atalhos que a métrica POP. Entretanto, os resultados apresentados também mostram que a métrica NRC aumenta bastante o número de saltos das rotas 802.11. Em cenários onde a disponibilidade dos enlaces cognitivos é variável, ou seja, onde os enlaces cognitivos sofrem frequentes interrupções, é possível que a métrica POP forneça melhor desempenho, uma vez que as rotas alternativas na rede 802.11 subjacente serão utilizadas com maior frequência. O mesmo problema ocorre no caso da descoberta direta de rotas híbridas (OPTIMAL). Neste caso, as rotas 802.11 de *backup* criadas pelo algoritmo guloso tornam o número de saltos da comunicação fim-a-fim maiores que os caminhos 802.11 criados pelo protocolo de roteamento convencional com qualquer uma das 3 métricas utilizadas. Portanto, além de ser incapaz de criar rotas alternativas de *backup* para todos os enlaces cognitivos, a criação direta de rotas híbridas também aumenta o número de saltos das rotas de *backup*, o que pode prejudicar o desempenho em cenários onde a disponibilidade dos enlaces cognitivos for baixa.

A Figura 3.6 apresenta a distribuição do número de saltos das rotas em cenários onde 30% dos nós possuem interface cognitiva adicional. Pode-se perceber que antes da execução do mecanismo de criação de atalhos quase 100% das rotas 802.11 criadas com a métrica NRC possuem até 22 saltos. Entretanto, ao utilizar o mecanismo de criação de atalhos o número de saltos destas rotas é reduzido para 10 saltos. Este resultado mostra que a redução do número médio de saltos é obtida sobre as rotas mais longas, que são aquelas que apresentam o pior desempenho.

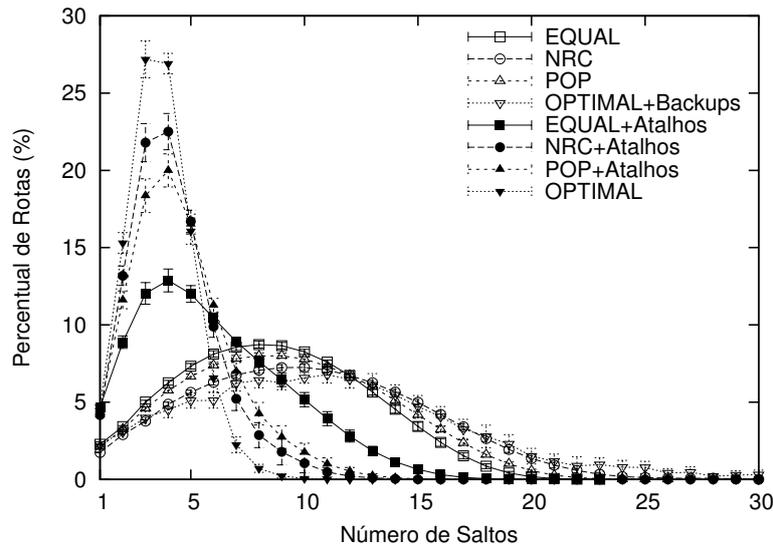


Figura 3.6: Distribuição do número de saltos das rotas para o cenário com 30% de nós cognitivos

A Figura 3.7 apresenta o número médio de saltos das rotas em função do número de pares de primários presentes em cada canal. O número de pares de primários influencia diretamente a disponibilidade de oportunidades para os rádios cognitivos do cenário. Em cenários com maior número de pares de primários, ou seja, onde a quantidade de oportunidades de acesso a faixa licenciada é menor, pode-se perceber que a métrica POP permite a criação de rotas 802.11 mais curtas que a métrica NRC. Este comportamento ocorre, pois, diferente da métrica NRC, a métrica POP somente favorece a criação de rotas 802.11 que passam por nós cognitivos que possuem grande número de canais disponíveis. Portanto, a métrica POP não aumenta desnecessariamente o número de saltos das rotas 802.11 ao evitar passar por nós cognitivos com poucas oportunidades de acesso a faixa licenciada que não favorecem a criação de enlaces cognitivos de atalho.

Outra observação importante a respeito dos resultados da Figura 3.7 é que com o aumento do número de primários, o desempenho do mecanismo de criação de atalhos é degradado em relação a descoberta direta de rotas híbridas. Entretanto, o melhor desempenho da abordagem direta é obtido a um alto custo, pois o número médio de

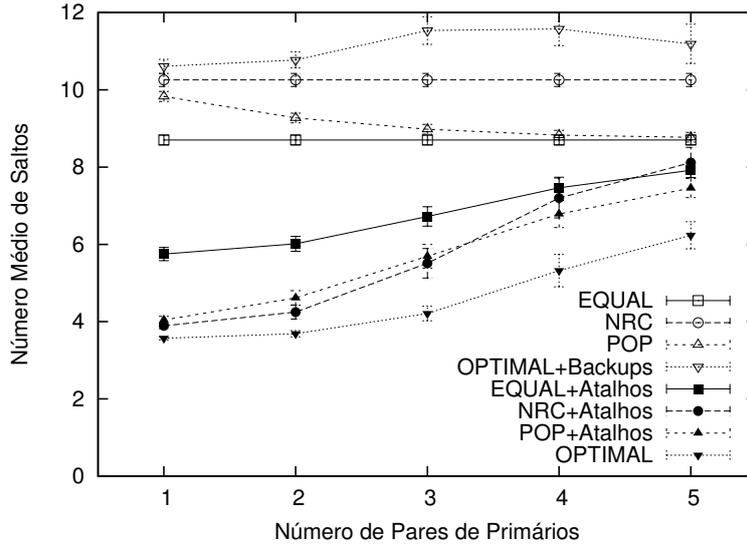


Figura 3.7: Número médio de saltos em função do número de pares de primários em cada canal em cenários com 30% de nós cognitivos

saltos das rotas de *backup* na rede 802.11 aumenta quase proporcionalmente ao ganho no número de saltos das rotas híbridas. Como já mencionado anteriormente, este comportamento pode ser bastante prejudicial em cenários onde a disponibilidade dos enlaces cognitivos é dinâmica e as rotas de *backup* são muito requisitadas.

A Figura 3.8 apresenta o número de saltos médio em função do número de canais na faixa licenciada. De acordo com os resultados, pode-se perceber que com um número grande de canais na faixa licenciada, todas as soluções conseguem um melhor desempenho na redução do tamanho das rotas híbridas do que nos cenários com poucos canais. Isto ocorre porque com muitos canais é mais provável que exista um canal sem a presença de primários próximos. Logo, o número de enlaces cognitivos que podem ser formados entre os nós cognitivos aumenta.

Ainda nos resultados da Figura 3.8, pode-se perceber que o desempenho das rotas híbridas criadas com o mecanismo proposto utilizando a métrica NRC é degradado em cenários com um número pequeno de canais. Isto acontece, pois esta métrica não leva em consideração a disponibilidade dos canais nos nós cognitivos. Nos casos onde a faixa licenciada possui poucos canais, torna-se menos provável a existência de canais com oportunidades em comum.

Para avaliar a influência do parâmetro N das métricas NRC e POP, foram realizados experimentos cujos resultados são apresentados nas Figuras 3.9(a) e 3.9(b) com valores de N variando de 1 até 4. Pode-se perceber que, para ambas as métricas, o aumento do valor de N causa um aumento no tamanho das rotas 802.11. Este aumento se reflete na redução no número de saltos das respectivas rotas híbridas, que têm desempenho mais próximo do caso ótimo. Entretanto, para todos os valores

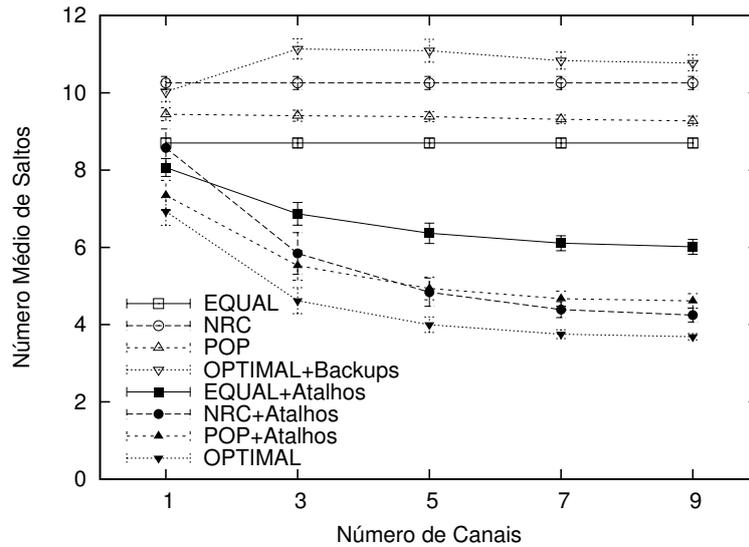


Figura 3.8: Número médio de saltos em função do número canais em cenários com 30% de nós cognitivos

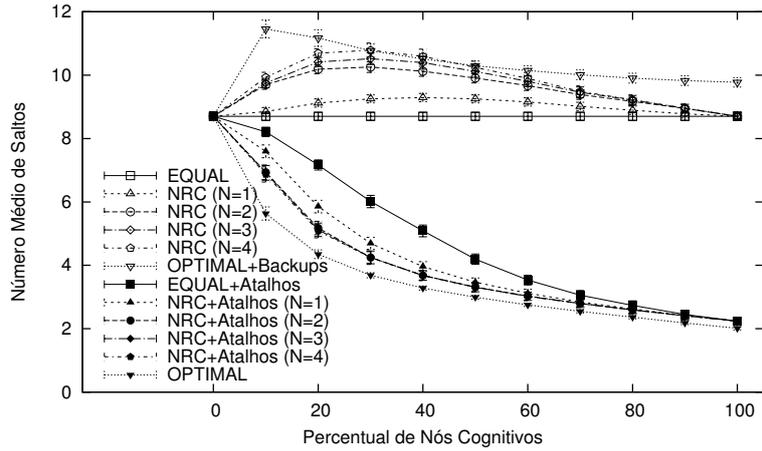
de N , as rotas 802.11 criadas com a métrica POP apresentam um menor número de saltos do que aquelas criadas com a métrica NRC. Além disso, as rotas híbridas em ambas as métricas apresentam número de saltos próximos. Este comportamento ocorre, pois a métrica POP permite a criação de rotas 802.11 com nós cognitivos que possuem maior quantidade de canais disponíveis para o acesso a faixa licenciada, o que favorece a criação de atalhos com o mecanismo proposto sem causar o aumento do número de saltos das rotas 802.11.

3.6 Avaliação de Desempenho com o ns-2

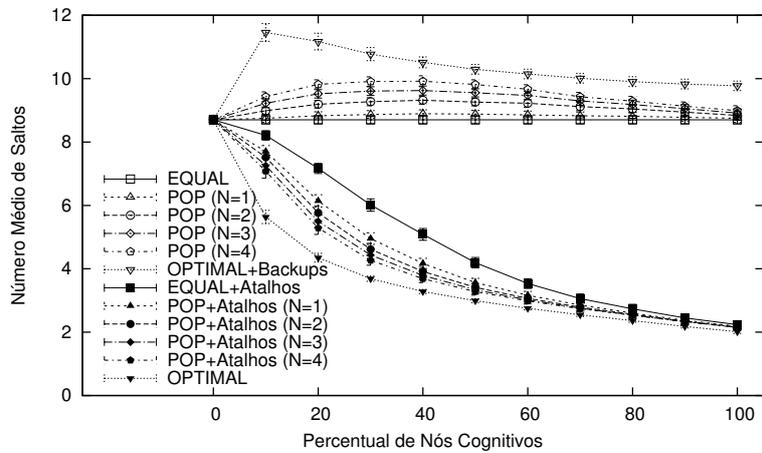
Com o objetivo de complementar a análise apresentada na seção anterior, utilizou-se o simulador ns-2 [17] para avaliar o desempenho das rotas híbridas com métricas de desempenho mais realistas, como vazão e atraso fim-a-fim. Além disso, as simulações com o ns-2 também permitiram avaliar os efeitos causados por primários com comportamento dinâmico, que geram a necessidade de uso dos caminhos de *backup* na rede 802.11 quando os enlaces cognitivos de atalho ficam indisponíveis.

3.6.1 Implementação

O ns-2 é um simulador de eventos discretos amplamente utilizado pela comunidade científica e implementado em parte em linguagem C++ (escalador de eventos e protocolos) e linguagem TCL (interface para os usuários com *scripts* de simulação). Este simulador permite realizar experimentos realistas com diversas combinações de



(a) NRC



(b) POP

Figura 3.9: Número médio de saltos das rotas em função do percentual de nós cognitivos para diferentes valores de N

protocolos de rede, incluindo redes formadas por rádios do padrão IEEE 802.11. Entretanto, por ser uma tecnologia relativamente nova e ainda sem padrões definidos, não existem módulos oficiais no código original do ns-2 que permitam realizar experimentos utilizando rádios cognitivos. Desta forma, a realização dos experimentos dos cenários de rede híbrida demandaram um grande esforço de implementação de módulos e *scripts* que representassem de forma realista o funcionamento de rádios cognitivos. Vale ressaltar que estes esforços também foram úteis para a avaliação de desempenho da segunda proposta desta tese, que será apresentada no Capítulo 4.

Para viabilizar as simulações dos rádios cognitivos em cenários de rede híbrida foi necessário implementar diversas funcionalidades não incluídas no ns-2 original. Uma primeira funcionalidade necessária para simular as comunicações entre rádios cognitivos é o protocolo de camada MAC. Para isto, foi desenvolvido um novo módulo de camada MAC, que implementa o protocolo CMAC, que foi descrito na Seção 2.3.2.

Como o funcionamento do protocolo CMAC é muito semelhante ao funcionamento da camada MAC do padrão 802.11, o novo módulo foi desenvolvido utilizando como base a implementação do 802.11 já existente no código do ns-2 original. Com isso, a implementação do protocolo CMAC consistiu nas modificações listadas abaixo.

- Criação de um novo módulo para o protocolo CMAC, que utilizou como base o protocolo MAC 802.11;
- Inserção de um novo tipo de mensagem de controle (o quadro DTS) e modificação da máquina de estados do 802.11 original para que ele seja utilizado;
- Modificação dos quadros de controle RTS e CTS originais para inserir os campos utilizados pelo protocolo CMAC;
- Criação de uma nova estrutura de dados para o armazenamento do mapa de reservas de blocos tempo-espectro;

Além disso, para dar suporte ao novo protocolo de camada MAC, também foram necessárias mudanças importantes em outros módulos do simulador. Uma funcionalidade não existente no código original do ns-2, e que precisou ser implementada, é a possibilidade de trocar o canal de operação de um nó durante a execução de um experimento. Esta mudança precisou ser implementada na interface física de rede sem fio (módulo *wireless_phy*) e permitiu que o protocolo CMAC escolhesse o canal utilizado para enviar cada pacote.

Ainda a respeito da implementação do protocolo CMAC, para o algoritmo de alocação dos blocos tempo-espectro foi utilizada uma abordagem simplificada, que alocava sempre blocos com as mesmas dimensões: largura de banda de 1 canal, e duração necessária para a transmissão de 1 pacote de dados e o seu pacote de confirmação (*Acknowledgment*). Com este esquema de alocação simples foi possível realizar experimentos com rádios cognitivos acessando vários canais na faixa licenciada.

Para o roteamento de pacotes, incluímos no ns-2 um módulo de roteamento denominado NoAH [48]. Este módulo permite que as tabelas de encaminhamento de pacotes dos nós sejam preenchidas manualmente, sem a necessidade de um protocolo de roteamento. Com isso, foi possível implementar os mecanismos e protocolos de roteamento diretamente nos *scripts* de simulação. As tabelas de encaminhamento dos nós são preenchidas pelo *script* para refletir as escolhas realizadas pelos mecanismos e protocolos.

Na arquitetura de rede híbrida proposta, os nós cognitivos possuem duas interfaces: uma 802.11 e uma de rádio cognitivo. Para dar suporte à realização de experimentos com nós que possuem múltiplas interfaces, foram realizadas diversas

mudanças no código do ns-2 seguindo as instruções do relatório técnico em [49]. As modificações necessárias para o uso de múltiplas interfaces demandam inclusive a modificação do módulo de roteamento, que deve estar ciente da existência de múltiplas interfaces e deve ser capaz de escolher por qual interface encaminhar cada pacote. Para isso, foi necessário modificar o módulo NoAH, incluindo uma coluna adicional na tabela de encaminhamento. Assim, além do próximo salto, a tabela indica também qual interface deve ser utilizada para encaminhar os pacotes para um determinado destino.

A influência dos rádios primários sobre os rádios cognitivos foi emulada através da configuração do mapa das reservas no protocolo CMAC. Para isto, assim como descrito na Seção 2.3.3, considerou-se que os rádios cognitivos são capazes de detectar perfeitamente a presença dos rádios primários. A atividade de cada rádio primário foi simulada com uma variável booleana de estado, que indicava se o primário estava ativo ou inativo naquele instante de tempo. Os eventos de troca de estados foram escalonados durante a simulação, de tal forma que o tempo médio de permanência nos estados ativo e inativo fosse sorteado de variáveis aleatórias exponencialmente distribuídas com médias μ_{on} μ_{off} respectivamente. Quando um rádio primário passava para o estado ativo, o seu canal de operação era marcado como permanentemente reservado nos mapas de reservas do protocolo CMAC de todos os rádios cognitivos que estavam à uma distância menor que o alcance de interferência do rádio primário. Desta forma, é como se os rádios cognitivos tivessem detectado através de sensoriamento o início da atividade do rádio primário, ficando impedidos de usar aquele canal para realizar transmissões.

Por fim, a implementação do mecanismo de criação de atalhos e do mecanismo de descoberta direta de rotas híbridas foi a mesma utilizada no simulador próprio. As rotas 802.11 e as rotas híbridas fornecidas pelo simulador próprio foram utilizadas para selecionar quais nós deviam ser instanciados no ns-2 e como suas tabelas de encaminhamento deveriam ser preenchidas. De acordo com a atividade dos rádios primários existentes na simulação, os enlaces cognitivos das rotas híbridas simuladas chaveavam entre o estado disponível e indisponível, e as rotas de *backup* 802.11 eram utilizadas quando necessário através da mudança das entradas nas tabelas de encaminhamento. Portanto, assim como no caso do simulador próprio, as fases de trocas de sondas do mecanismo de criação de atalhos não foram simuladas.

3.6.2 Ambiente de Simulação e Metodologia

Os cenários das simulações de redes híbridas com o ns-2 foram os mesmos utilizados no caso do simulador próprio. De cada um dos 30 cenários gerados para os experimentos com o simulador próprio, um fluxo foi escolhido para ser simulado no

ns-2. O par de nós escolhido como fonte e destino em cada cenário era formado pelos nós mais próximos das coordenadas (0,0) e (1000,1000), que são os dois nós diametralmente opostos na área de simulação. O fluxo de dados foi gerado por uma fonte CBR na saturação, ou seja, com uma taxa superior à vazão fim-a-fim máxima possível para aquela rota. Todas as simulações tiveram duração de 500 segundos, e os resultados apresentados representam a média dos 30 cenários com barras de erro representando intervalos de confiança de 95%.

Foram realizados dois conjuntos de simulações. No primeiro conjunto, as rotas 802.11 e híbrida foram simuladas sem a influência dos primários, apenas para avaliar o desempenho destas rotas nos casos em que todos os enlaces cognitivos estão disponíveis ou quando apenas os enlaces 802.11 estão disponíveis. Estas simulações permitiram avaliar o desempenho nos casos “extremos”, quando todos os enlaces cognitivos das rotas híbridas estão em pleno funcionamento, ou quando nenhum deles está disponível e apenas os caminhos de *backup* na rede 802.11 podem ser utilizados.

No segundo conjunto de experimentos, os efeitos da influência dos primários sobre os enlaces cognitivos foram simulados. Nestes experimentos, quando a atividade dos rádios primários fazia com que os rádios cognitivos não possuíssem mais canais em comum, o encaminhamento de pacotes era modificado e o caminho 802.11 de *backup* era utilizado. Neste segundo conjunto de simulações, os parâmetros μ_{on} e μ_{off} das variáveis exponenciais que determinam a duração dos períodos ativos e inativos dos rádios primários foram configurados, respectivamente, em 1 segundo e 5 segundos.

Devido às modificações em sua máquina de estados com a inserção de uma mensagem adicional, e devido ao fato de utilizar múltiplos canais de dados, o desempenho do CMAC é diferente do desempenho do 802.11. Visando tornar a comparação justa e facilitar o entendimento dos resultados, o protocolo CMAC foi parametrizado para que o desempenho nas comunicações de um único enlace ficasse equivalente ao desempenho do protocolo 802.11. Esta parametrização do CMAC consistiu no ajuste empírico das taxas de transmissão nominais no canal de controle. Com isso, o *overhead* da negociação do bloco tempo-espectro do CMAC ficou equivalente ao *overhead* do RTS/CTS no 802.11.

Além do número médio de saltos das rotas simuladas, as métricas de desempenho avaliadas serão a vazão e o atraso fim-a-fim. A vazão média é dada pela quantidade de *bytes* recebidos no destino dividido pelo tempo de simulação, logo, fornece um indicativo da capacidade fim-a-fim da rota seguida pelo fluxo. Já o atraso médio é dado pelo tempo total decorrido desde a geração do pacote no nó fonte e a sua recepção pela aplicação no nó de destino, e com isso, fornece um indicativo do tempo gasto pela rede no encaminhamento dos pacotes através das rotas simuladas. Ambas as métricas de desempenho permitem avaliar de forma mais realista o desempenho

dos mecanismos avaliados, por serem métricas que influenciam diretamente o desempenho das aplicações dos usuários.

Foram realizadas simulações das rotas híbridas criadas pela abordagem do mecanismo de criação de atalhos com as métricas EQUAL e NRC, e pela abordagem de criação direta de rotas híbridas (OPTIMAL). Nestas simulações com ns-2, não foram realizados experimentos com a métrica POP devido à sua limitação em representar a disponibilidade dos canais. Esta métrica considera apenas se existe ou não a influência de algum primário nos canais para atribuir pesos aos enlaces da rede 802.11. Em cenários onde a atividade dos primários é dinâmica, basta que o enlace esteja sob a influência de algum primário para que seu peso seja aumentado. Uma possível solução para o problema seria considerar, ao invés de uma informação binária, que OP_i é dado pelo somatório do percentual de tempo que cada canal fica disponível para o nó i dividido pelo número de canais. Entretanto, como o objetivo destas simulações era avaliar os efeitos da influência dos primários com atividade dinâmica sobre as rotas híbridas criadas pelas duas possíveis abordagens, as métricas EQUAL e NRC já permitiram obter as conclusões desejadas. O desenvolvimento de novas métricas fica a cargo de trabalhos futuros.

3.6.3 Resultados sem Influência dos Primários

O primeiro gráfico apresentado na Figura 3.10 mostra o número médio de saltos em função da quantidade de nós cognitivos presentes no cenário. Este primeiro resultado, ainda com a métrica número médio de saltos, tem como objetivo comprovar que na média dos 30 cenários o número médio de saltos das rotas simuladas apresenta o mesmo comportamento dos resultados anteriores. A diferença é que em cada cenário no ns-2 apenas uma rota entre os nós diametralmente opostos foi simulada. Nos resultados com o simulador próprio, os experimentos avaliaram o número médio de saltos de todas as rotas entre todas as possíveis combinações de pares fonte-destino em cada cenário. As mesmas considerações feitas na Seção 3.5.3 sobre os resultados da Figura 3.5 também se aplicam a este resultado.

As Figuras 3.11 e 3.12 apresentam os resultados para a vazão média e atraso médio em função do percentual de nós cognitivos nos cenários. De acordo com os resultados obtidos com estes experimentos, pode-se comprovar que a redução do número de saltos ocasionada pelo uso de rotas híbridas gera melhorias significativas de desempenho na vazão e atraso das comunicações em múltiplos saltos. Além disso, a perda de desempenho das rotas 802.11 usando a métrica NRC e das rotas de *backup* da abordagem direta em comparação às rotas 802.11 mais curtas é proporcional ao aumento do número de saltos indicado nos resultados da Figura 3.10. Estas são conclusões interessantes que mostram que a métrica número de saltos é um bom

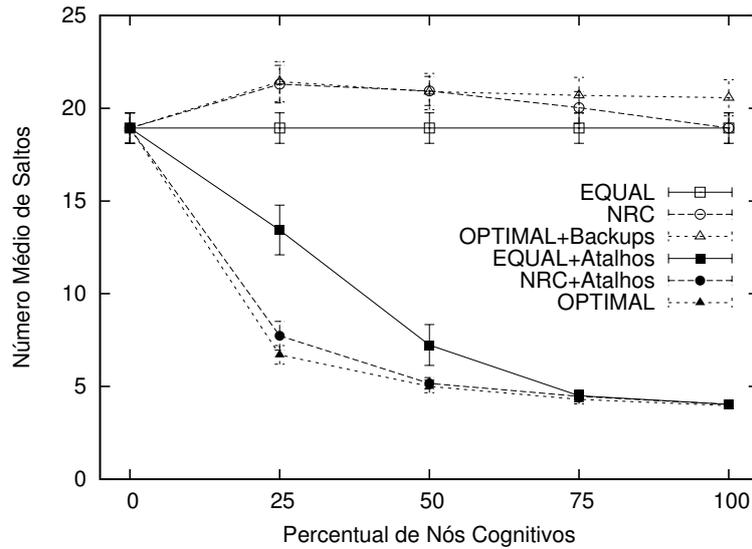


Figura 3.10: Número médio de saltos em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2

indicativo do desempenho das rotas. Além disso, também se pode concluir que, do ponto de vista prático, é vantajoso utilizar rotas híbridas neste tipo de cenário.

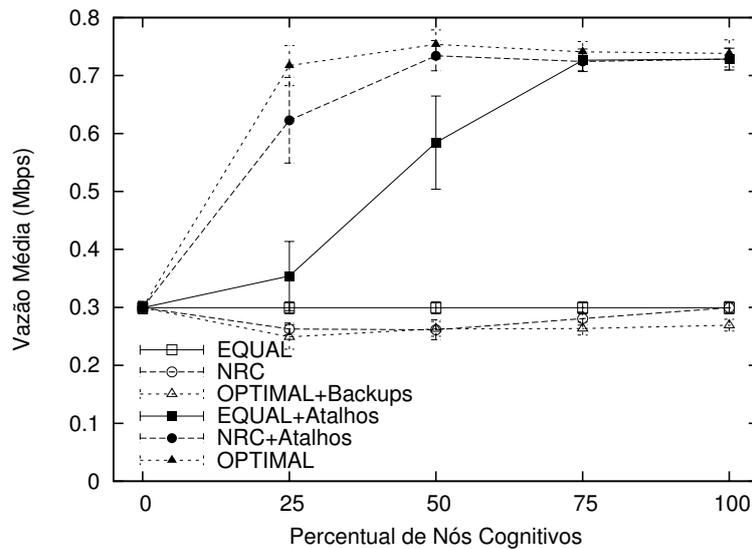


Figura 3.11: Vazão média em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2

Ao comparar os resultados de atraso e vazão das rotas híbridas das soluções simuladas, pode-se perceber que o mecanismo de criação de atalhos utilizando a métrica NRC fornece um desempenho muito próximo das rotas ótimas fornecidas pela descoberta direta de rotas híbridas. Além disso, o uso da métrica NRC no mecanismo de criação de atalhos forneceu melhores resultados que o uso de pesos iguais nos enlaces. Estes resultados servem para reafirmar a constatação feita na

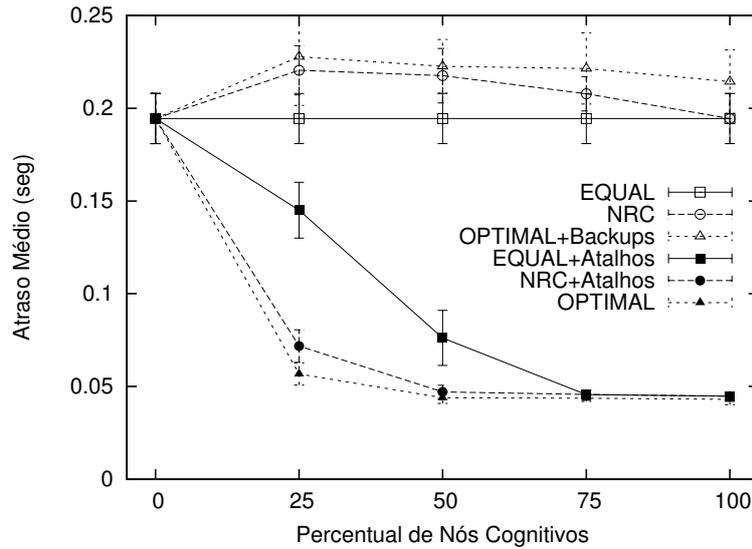


Figura 3.12: Atraso médio em função do percentual de nós cognitivos nas rotas simuladas no ns-2

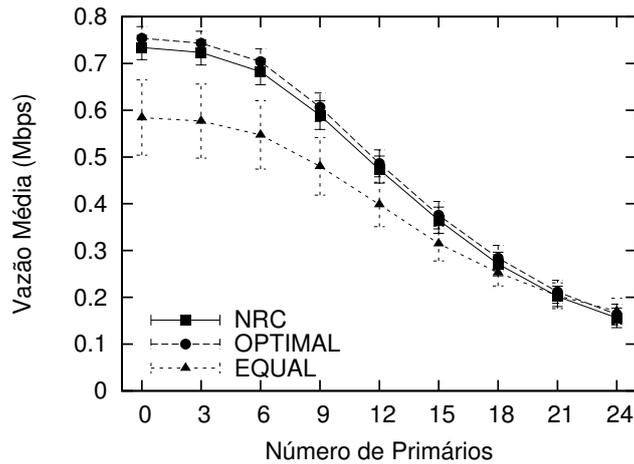
Seção 3.5.3 de que o uso de métricas especializadas para atribuir pesos nos enlaces 802.11 é importante para o desempenho das rotas híbridas criadas com o mecanismo de criação de atalhos.

3.6.4 Resultados com Influência dos Primários

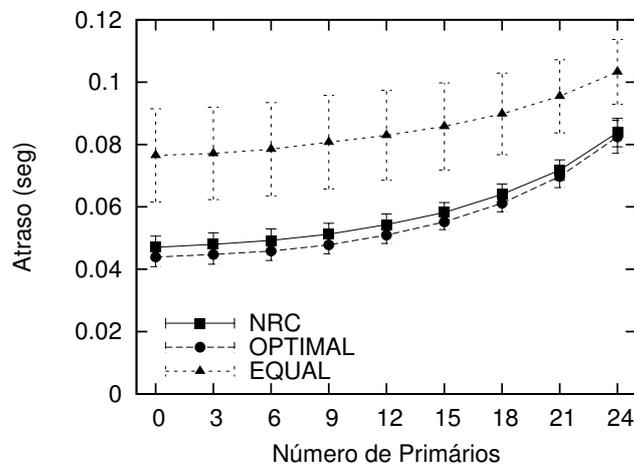
No primeiro conjunto de resultados com a influência dinâmica dos rádios primários, a Figura 3.13 mostra a vazão e o atraso médio em função da quantidade de pares de primários em cada canal da faixa licenciada. De acordo com os resultados, pode-se perceber que o aumento da quantidade de pares de primários causa uma degradação na vazão e no atraso. Este era um resultado esperado, pois com mais primários em cada canal, os enlaces cognitivos de atalho passam por períodos de indisponibilidade mais longos. A menor disponibilidade dos enlaces cognitivos faz com que as rotas de *backup* 802.11, que possuem um maior número de saltos, sejam mais utilizadas.

Ainda nos resultados da Figura 3.13, pode-se perceber que as rotas híbridas do mecanismo de criação de atalhos utilizando a métrica NRC apresentaram desempenho mais próximo das rotas híbridas ótimas criadas com a abordagem direta. Este é um resultado interessante, que mostra que as rotas híbridas do mecanismo de criação de atalhos podem apresentar um desempenho próximo do ótimo em cenários sob a influência de rádios primários com atividade dinâmica. Além disso, o resultado é importante, porque serve para reafirmar a necessidade do uso de métricas nos enlaces da rede 802.11 de subtrato que levem em consideração a existência dos nós cognitivos.

A Figura 3.14 apresenta resultados de vazão e atraso médios em função da vari-



(a) Vazão Média

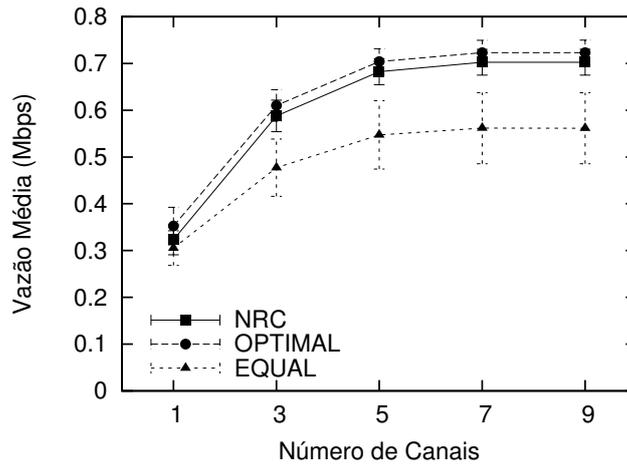


(b) Atraso Médio

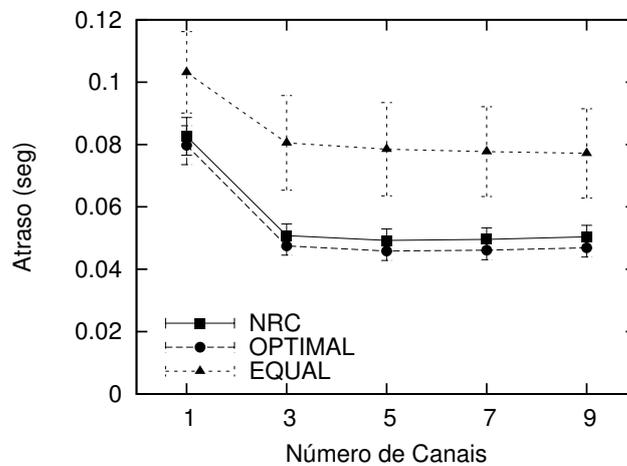
Figura 3.13: Vazão e atraso médio em função do número de pares de primários por canal em cenários com 50% de nós cognitivos e 5 canais

ação do número de canais. Nestes cenários, a quantidade de pares de primários utilizando cada canal foi fixada em 6, e o percentual de nós com interface de rádio cognitivo adicional foi fixado em 50%. Como esperado, o aumento do número de canais representa uma melhora na vazão e atraso das rotas híbridas. Isto ocorre porque, com o aumento do número de canais, aumentam-se as chances de que um enlace cognitivo possua um canal em comum disponível para o uso. Além disso, assim como nos resultados da Figura 3.13, o desempenho das rotas híbridas do mecanismo de criação de atalhos utilizando a métrica NRC ficou próximo do desempenho das rotas ótimas e superior ao uso da métrica EQUAL. Neste caso, a mesma constatação feita anteriormente a respeito da importância de métricas especializadas, como a NRC, se aplica.

Nos gráficos da Figura 3.15 apresentam-se resultados de vazão e atraso médios em função do percentual de nós cognitivos. Estes resultados se referem à cenários



(a) Vazão Média

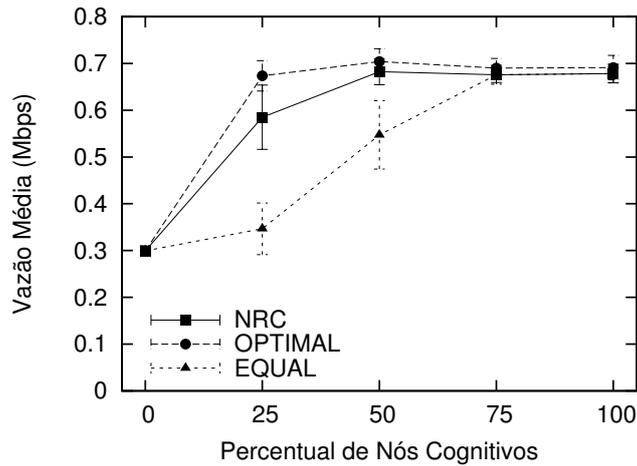


(b) Atraso Médio

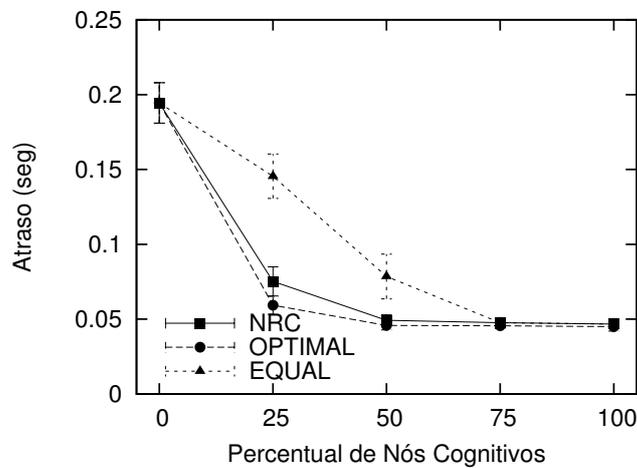
Figura 3.14: Vazão e atraso médio em função do número de canais em cenários com 6 pares de primários por canal e 50% de nós cognitivos

com 5 canais e 6 pares de primários por canal. Nestes resultados, pode-se perceber desempenhos das rotas híbridas apenas ligeiramente piores aos apresentados nas Figuras 3.11 e 3.11, onde não existia a influência de rádios primários. Isto mostra que, nos cenários simulados, mesmo sob a influência de primários com atividade dinâmica, o desempenho relativo entre as rotas híbridas apresentou o mesmo comportamento.

Uma observação importante a respeito dos resultados desta seção é que as rotas híbridas ótimas criadas pela abordagem direta não apresentaram perda de desempenho devido ao problema da impossibilidade de determinar caminhos de *backup* para todos os enlaces cognitivos. Ao estudar o problema, foi verificado que eram raros os casos onde o algoritmo guloso implementado não conseguiu determinar caminhos de *backup* para todos os enlaces cognitivos devido a possibilidade de formar *loops*. Isto se justifica pelo fato das redes geradas aleatoriamente para as simulações



(a) Vazão Média



(b) Atraso Médio

Figura 3.15: Vazão e atraso médio em função do percentual de nós cognitivos em cenários com 6 pares de primários por canal e 5 canais

possuírem uma conectividade grande o suficiente para evitar o surgimento de *loops* durante a determinação dos caminhos de *backup*. Com uma conectividade grande o suficiente, sempre será possível encontrar um caminho de *backup* passando por nós que ainda não fazem parte da rota.

3.7 Conclusões do Capítulo

Visando minimizar os impactos causados pela comunicação oportunista dos rádios cognitivos, foi proposta uma nova arquitetura de rede híbrida formada por rádios cognitivos e rádios 802.11. O uso da rede 802.11 permite a comunicação entre os nós, independente da atividade dos rádios licenciados. Além disso, o maior alcance e capacidade dos rádios cognitivos podem ser explorados para aprimorar o desempenho das rotas da rede 802.11 através da criação de atalhos. Com isto, podem

ser formadas rotas híbridas, que utilizam enlaces 802.11 e enlaces cognitivos, que reduzem o problema da interferência intra-fluxo e a disputa no acesso ao meio no canal 802.11.

Para viabilizar a utilização dos enlaces cognitivos como atalhos nas rotas 802.11 da rede híbrida, outra contribuição deste estudo é um mecanismo para a descoberta e seleção dos melhores atalhos nas rotas 802.11. Este mecanismo tem sua operação restrita a uma rota da rede 802.11 e permite que enlaces cognitivos de atalho sejam descobertos e selecionados para a utilização de maneira oportunista, sem que a garantia de comunicação através da rede 802.11 seja perdida. Através de simulações em um simulador próprio e no ns-2, o mecanismo de criação de atalhos proposto foi avaliado e comparado com o caso ótimo. Além disso, a influência do protocolo de roteamento da rede 802.11 no mecanismo proposto foi avaliada através do estudo de diferentes métricas que levam em consideração informações importantes sobre a rede híbrida. De acordo com os resultados obtidos, o algoritmo proposto se mostrou eficiente na maioria dos cenários e obteve um desempenho próximo ao ótimo, especialmente quando utilizou métricas especializadas para a atribuição de pesos aos enlaces da rede 802.11.

Capítulo 4

Redes Formadas Unicamente por Rádios Cognitivos

Apesar de a arquitetura híbrida ser uma alternativa interessante para minimizar os problemas causados pelo acesso secundário ao espectro, podem existir cenários onde redes sem fio de múltiplos saltos serão formadas unicamente por rádios cognitivos.

Visando estes cenários mais desafiadores, neste capítulo será apresentado um novo protocolo de roteamento, denominado **RoAD** (Roteamento de Alta Disponibilidade) [15, 16]. Este protocolo utiliza uma nova métrica de roteamento que tem como objetivo permitir a escolha de rotas com alta capacidade e disponibilidade de oportunidades. Além disso, o protocolo proposto é dotado de um algoritmo para a determinação de caminhos alternativos, que utiliza informações locais para determinar uma rota alternativa quando enlaces da rota original se quebram. O desempenho do protocolo proposto foi avaliado através de simulações no ns-2, que mostram que este novo protocolo oferece ganhos em diferentes cenários.

4.1 Roteamento em Redes Cognitivas com Oportunidades Dinâmicas

Em redes cognitivas com oportunidades dinâmicas, a atividade dos primários gera efeitos prejudiciais no roteamento de mensagens na rede secundária. Normalmente, o objetivo do roteamento em redes sem fio é escolher rotas que maximizem a capacidade disponível para os novos fluxos de dados. Entretanto, um fator importante em redes cognitivas dinâmicas, que deve ser levado em consideração pelo roteamento, é o nível de disponibilidade dos enlaces. Como já foi dito no Capítulo 2, a comunicação nos enlaces da rede cognitiva pode ser frequentemente interrompida pela atividade dos dispositivos primários. Estas interrupções fazem com que os enlaces fiquem temporariamente indisponíveis, inutilizando as rotas descobertas e causando

degradação de desempenho.

Devido a potencial dinamicidade nas quebras e recuperações dos enlaces, é inviável que o protocolo de roteamento tente “rastrear” esta dinâmica de forma que eles se reflitam em mudanças na topologia da rede. A propagação das informações sobre as quebras de enlaces geraria uma sobrecarga de informação de controle. Além disso, as informações de mudanças na topologia perderiam a validade rapidamente, e os nós da rede teriam sempre uma visão ultrapassada do seu atual estado. Uma maneira melhor de lidar com o problema é tentar rastrear os padrões de comportamento dos rádios primários, uma vez que eles são os responsáveis pelas frequentes quebras e recuperações dos enlaces na rede cognitiva. Entretanto, é provável que os frequentes acessos realizados por um primário ao espectro licenciado sigam um padrão de comportamento.

A Figura 4.1 apresenta um exemplo de uma rede cognitiva onde os nós B e E são influenciados por dois primários $P1$ e $P2$, respectivamente. O primário $P1$ tem um padrão de atividade intenso, deixando o nó B apenas 10% do tempo livre para se comunicar nos canais da faixa licenciada. Em contrapartida, o primário $P2$ tem atividade mais branda, e permite o nó E se comunicar 80% do tempo. Considerando o nó A como fonte e o nó C como destino, um protocolo de roteamento não consciente da disponibilidade dos enlaces, escolheria a rota $A - B - C$, por esta possuir maior capacidade (2 canais) e um menor número de saltos. O problema é que a rota escolhida está sob a influência do dispositivo primário $P1$, que tem atividade intensa e deixa a rota apenas 10% do tempo disponível. Logo, a rota $A - B - C$ terá um desempenho desfavorável.

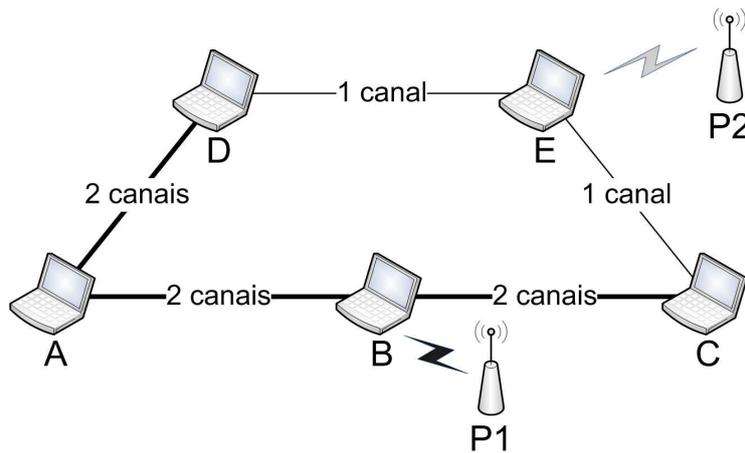


Figura 4.1: Exemplo de rede secundária sob a influência de primários

Um protocolo de roteamento específico para redes cognitivas dinâmicas deve ser capaz de capturar a disponibilidade dos enlaces. Desta forma, a rota escolhida seria $A - D - E - C$, que apesar de ser mais longa e ter menor capacidade, fica 80% do

tempo disponível.

Outra característica interessante no exemplo da Figura 4.1, é que as duas rotas são influenciadas por primários diferentes, que podem ter comportamento independente e não correlacionado. Logo, os períodos de indisponibilidade das rotas podem não ser coincidentes, de tal maneira que uma rota está disponível, quando a outra não está. Voltando ao exemplo anterior, existe uma probabilidade de que os períodos correspondentes aos 20% do tempo em que a rota $A - D - E - C$ permanece indisponível sejam coincidentes com os períodos correspondentes aos 10% do tempo em que a rota $A - B - C$ está disponível. Portanto, um protocolo de roteamento capaz de aproveitar estas oportunidades para o encaminhamento de pacotes pode obter ganhos de desempenho.

De acordo com a discussão a respeito do exemplo anterior, pode-se perceber a necessidade de se considerar, além da capacidade, o nível de disponibilidade dos enlaces na escolha de rotas. Além disso, seria interessante que o roteamento pudesse contornar o problema das rotas temporariamente indisponíveis.

4.2 RoAD: Roteamento de Alta Disponibilidade

O protocolo de roteamento proposto, RoAD, tem como objetivo principal determinar rotas com alta disponibilidade. Para isto, é proposta uma nova métrica de roteamento que visa representar os níveis de capacidade e de disponibilidade dos enlaces da rede secundária.

Assim como foi descrito na Seção 2.3, o modelo de rádio cognitivo adotado neste trabalho considera a existência de uma interface receptora dedicada para a realização do sensoriamento dos canais da faixa licenciada, que é usada para determinar a disponibilidade de cada canal através de medições constantes. O rádio cognitivo pode então estimar o nível de disponibilidade de cada canal, representado pela variável $Disp_i^k$, que é dado pelo percentual de tempo que o canal k foi medido como disponível pelo rádio cognitivo i . O valor de $Disp_i^k$ é recalculado ao final de janelas de tempo de tamanho T_M , e é armazenado como uma média móvel exponencial, representada pela variável \overline{Disp}_i^k e calculada pela Equação 4.1.

$$\overline{Disp}_i^k(t) = \alpha \times \overline{Disp}_i^k(t-1) + (1 - \alpha) \times Disp_i^k(t) \quad (4.1)$$

O protocolo RoAD utiliza um esquema de roteamento pela fonte, onde o nó fonte é capaz de determinar rotas para qualquer destino, e onde as rotas completas são explicitamente indicadas em cada pacote enviado. A descoberta de rotas é realizada pela montagem de um grafo representando o mapa da rede e a posterior execução de um algoritmo SPF para a descoberta da rota de menor custo. Assim como em outros

protocolos de roteamento para redes cognitivas com oportunidades dinâmicas que usam mapas das redes, no protocolo RoAD, o mapa da rede contém todos enlaces que podem existir entre os rádios cognitivos, independente da disponibilidade imediata destes enlaces. Desta forma, as frequentes mudanças de estado dos enlaces cognitivos não modificam o mapa da rede, e os pesos dos enlaces podem ser dados por métricas que representam suas disponibilidades.

Para permitir a montagem deste mapa da rede, todos os nós enviam periodicamente através do canal de controle mensagens de inundação contendo os identificadores dos nós vizinhos e o nível de disponibilidade \overline{Disp}_i^k de cada canal k da faixa licenciada. Uma boa estratégia para determinar o intervalo de tempo entre o envio das mensagens de inundação é enviá-las logo após o recálculo de \overline{Disp}_i^k , a cada T_M segundos. Desta forma, o intervalo T_M pode ser grande o suficiente para garantir a acurácia da estimativa \overline{Disp}_i^k , e para evitar a sobrecarga de mensagens de controle.

De posse das informações recebidas nas inundações, o nó fonte pode montar o grafo que representa o mapa da rede, e calcular os pesos dos enlaces deste grafo de acordo com a métrica apresentada na Equação 4.2. A métrica proposta é dada pelo somatório de $Indisp_{ij}^k$, que é um indicador do nível de indisponibilidade de cada oportunidade k para o enlace (i, j) . O cálculo de $Indisp_{ij}^k$ é realizado através da Equação 4.3, que é uma inversão logarítmica de uma estimativa do percentual de tempo que a oportunidade k permanece disponível para o enlace (i, j) , dada pela multiplicação de $Disp_i^k$ e $Disp_j^k$. As constantes 0,9 e 0,1 na Equação 4.3 têm o objetivo de manter seus resultados dentro do intervalo $[0, 1]$. Desta forma, o peso do enlace (i, j) calculado com a métrica apresentada na Equação 4.2 representará simultaneamente: o nível de disponibilidade dos N canais pelo uso do estimador $Indisp_{ij}^k$, e a capacidade agregada do enlace pelo somatório de $Indisp_{ij}^k$.

$$Peso_{ij} = \sum_{k=1}^N (Indisp_{ij}^k) \quad (4.2)$$

$$Indisp_{ij}^k = -\log(Disp_i^k \times Disp_j^k \times 0,9 + 0,1) \quad (4.3)$$

A Figura 4.2 mostra os valores que podem ser assumidos por $Indisp_{ij}^k$ em função da estimativa do tempo que o canal fica disponível $Disp_i^k \times Disp_j^k$. Vale destacar, que se $Disp_i^k$ e $Disp_j^k$ são independentes, a multiplicação $Disp_i^k \times Disp_j^k$ representa a probabilidade do canal k estar disponível para enlace (i, j) .

Utilizando o mapa da rede com os pesos nos enlaces dados pela métrica da Equação 4.2, o nó fonte pode determinar a melhor rota para um destino através da execução de um algoritmo SPF. Esta rota será o caminho principal e preferencial para o encaminhamento de pacotes. Neste caminho, espera-se obter o melhor desempenho devido à maior capacidade e disponibilidade. Entretanto, como os nós da

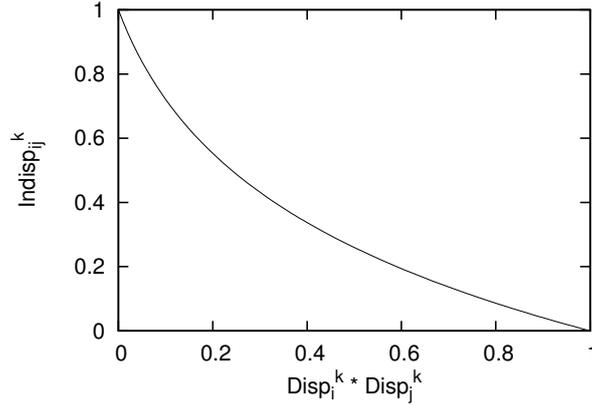


Figura 4.2: Valores de $Indisp_{ij}^k$ em função da estimativa $Disp_i^k \times Disp_j^k$

rota não estão totalmente livres da interferência dos primários, ainda podem existir quebras de enlaces, que tornam a rota temporariamente indisponível. Portanto, no protocolo proposto, para cada enlace (i, j) da rota principal, sempre que o nó j detecta que o enlace (i, j) ficou indisponível, ele envia uma mensagem de sinalização ao nó i , pelo canal de controle, indicando a quebra do enlace (i, j) e informando a lista de enlaces com origem no nó j que também estão indisponíveis naquele momento (I_x). Desta forma, o nó i pode executar o algoritmo de Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA) para tentar encontrar uma rota alternativa para aquele destino.

A ideia principal do algoritmo DCA (Algoritmo 1) é utilizar o conhecimento local disponível no nó i para modificar o grafo da rede de maneira apropriada. Desta forma, é possível utilizar o algoritmo SPF para escolher uma rota alternativa que não utilize enlaces que estão indisponíveis naquele momento. Para tal, inicialmente o algoritmo determina o conjunto de enlaces I (linhas 2-5). Este conjunto irá receber os enlaces que deverão ser retirados do grafo do mapa da rede $G(V, E)$.

O conjunto I é a união dos conjuntos I_1 , I_2 , I_3 e I_x . I_1 é o conjunto formado pelos enlaces antecessores na rota principal, que devem ser retirados do grafo da rede a fim de evitar que a rota alternativa forme *loops* (linha 2). Esta informação está presente nos pacotes do fluxo, pois o RoAD utiliza roteamento pela fonte. O conjunto I_2 recebe os enlaces de i para os seus vizinhos que estão atualmente indisponíveis (linha 3). O conjunto I_3 contém todos os enlaces formados pelos próximos saltos da rota principal que foram sinalizados como indisponíveis (linha 4). Já o conjunto I_x , que foi recebido na mensagem de sinalização de j , contém todos os enlaces a partir do nó j que estão temporariamente indisponíveis.

A eliminação dos enlaces presentes em I do mapa da rede $G(V, E)$ dá origem a um grafo da rede atualizado $G'(V', E')$ (linha 6). Este novo grafo servirá de entrada para o algoritmo SPF, que será executado para determinar a rota alternativa do

Notação:

V = conjunto dos nós da rede (vértices);
 E = conjunto dos enlaces da rede;
 $G(V, E)$ = grafo do mapa da rede;
 I, I_1, I_2, I_3 e I_x = conjuntos genéricos de enlaces;
 f = nó fonte;
 d = nó destino;
 R_{fd} = rota de f para d ;
 (i, j) = enlace que se tornou indisponível;
 j = nó que detectou a falha (próximo salto de i em R_{fd});
 i = nó que recebeu a sinalização de j ;
 R_{id} = rota alternativa de i para d ;
 i_{-1} = nó antecessor ao nó i na rota R_{fd} ;

Entrada:

U_x = conjunto de enlaces partindo de j indisponíveis;

Algoritmo:

```

1: Em  $i$ , ao receber a sinalização de  $j$ :
2:    $I_1 = \text{determina\_enlaces\_antecessores}(R_{fd})$ ;
3:    $I_2 = \text{determina\_vizinhos\_indisponiveis}()$ ;
4:    $I_3 = \text{determina\_proximos\_enlaces\_indisponiveis}(R_{fd}, j)$ ;
5:    $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3 \cup I_x$ ;
6:    $G'(V', E') = \text{remove\_enlaces}(G(V, E), I)$ ;
7:    $R_{id} = \text{SPF}(G', i, d)$ ;
8:   se ( $R_{id} \neq \emptyset$ ) {
9:     enquanto ( $\text{rota\_indisponivel}(R_{fd})$ ) {
10:       $\text{encaminha\_pacotes}(R_{id})$ ;
11:    }
12:  } caso contrário {
13:     $\text{sinaliza\_quebra}(i_{-1}, j, I_2 \cup I_x)$ ;
14:  }

```

Algoritmo 1: Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA)

nó i até o destino d (R_{id}). Repare que o grafo $G'(V', E')$ também possui pesos nos enlaces dados pela métrica proposta. Assim, R_{id} será a melhor rota alternativa naquele momento de acordo com a visão local do nó i .

Se existir rota R_{id} , os pacotes do fluxo são encaminhados nesta nova rota enquanto a rota principal não voltar a ficar disponível (linhas 9-11). Para realizar o encaminhamento nesta nova rota, antes de encaminhar os pacotes para aquele destino, o nó i sobrescreve a rota contida no cabeçalho dos pacotes com a nova rota R_{id} . Além disso, o cabeçalho que contém a rota do pacote também deve conter uma *flag* que, quando está marcada em 1, indica que aquela é uma rota alternativa. Desta forma, quando a rota de um pacote é sobrescrita, a *flag* também deve ser marcada.

Caso não exista rota alternativa no grafo $G'(V', E')$, o nó i sinaliza uma quebra

de enlace ao nó antecessor na rota, nomeado i_{-1} , como se o enlace (i_{-1}, i) tivesse se tornado indisponível (linha 13). Antes de encaminhar a mensagem, o nó i atualiza o conjunto I_x fazendo a união deste conjunto com o conjunto dos enlaces para os vizinhos de i que estão indisponíveis, I_2 . Este processo pode se repetir até que a sinalização chegue ao nó fonte. Neste caso, se o nó fonte também não for capaz de encontrar uma rota alternativa, a única opção é esperar que o enlace quebrado volte a ficar disponível.

Quando o enlace (i, j) volta a ficar disponível, o nó j envia uma mensagem de controle específica para o seu antecessor na rota R_{fd} , o nó i , informando que os pacotes do fluxo podem novamente ser encaminhados por aquele enlace da rota principal. Vale ressaltar que apenas os nós da rota principal podem executar o algoritmo DCA. Se enlaces dos caminhos alternativos falham, os pacotes são simplesmente armazenados em *buffer* ou descartados. Esta diferenciação pode ser realizada através da checagem da *flag* que indica que aquele caminho representa um caminho alternativo. Esta estratégia foi adotada a fim de evitar execuções excessivas do algoritmo, que poderia utilizar informações potencialmente imprecisas a respeito da disponibilidade dos enlaces.

4.3 Avaliação de Desempenho com o ns-2

Para avaliar o desempenho do protocolo RoAD foram realizados experimentos utilizando o simulador ns-2. A próxima seção apresenta as modificações necessárias para realizar estas simulações com redes formadas unicamente por rádios cognitivos.

4.3.1 Implementação

As diversas modificações e adições ao código original do simulador, que já foram apresentadas na Seção 3.6.1, também se aplicam a estes experimentos. A única modificação desnecessária neste caso foi o suporte a utilização de múltiplas interfaces, pois aqui apenas uma única interface dói utilizada. Por motivo de clareza na apresentação, segue abaixo um resumo das modificações importantes no código do ns-2 que foram descritas na Seção 3.6.1.

- Novo módulo de camada MAC implementando o protocolo CMAC específico para rádios cognitivos.
- Suporte à troca do canal de operação durante a execução de experimentos.
- Integração do módulo de roteamento NoAH, que encaminha pacotes baseado em tabelas construídas manualmente.

- Simulação da influência de pares de rádios primários com padrão de atividade seguindo modelo markoviano de dois estados.

Esta versão do ns-2 com suporte à realização de experimentos com rádios cognitivos serviu de base para a implementação de diferentes protocolos de roteamento. A implementação destes protocolos foi realizada em *scripts* de simulação em linguagem TCL. As execuções dos protocolos eram agendadas em instantes de tempo específicos, e as decisões tomadas a respeito das rotas eram mapeadas em entradas nas tabelas de encaminhamento do módulo NoAH. Desta forma, foi possível emular o comportamento de diferentes protocolos sem a necessidade de implementar novos módulos de roteamento.

Seguindo esta abordagem, implementou-se um primeiro protocolo de roteamento pela fonte, denominado SR (*Source Routing*). Este protocolo foi implementado como uma rotina que é agendada periodicamente, com intervalo entre execuções igual a T_M . A rotina utiliza como entrada o grafo do mapa da rede, com os respectivos pesos dos enlaces, e implementa um algoritmo SPF para selecionar a rota de menor custo. Esta implementação serviu de base para a posterior implementação do protocolo proposto RoAD. Neste caso, o protocolo SR descobre a rota principal, utilizando como entrada o grafo do mapa da rede com os pesos dos enlaces dados pela métrica de disponibilidade apresentada na Seção 4.2. Estes pesos são calculados e atualizados de acordo com a influência dos rádios primários, simulando o efeito do recebimento das mensagens de inundação com o estado dos enlaces. Além disso, quando algum enlace da rota principal se torna indisponível devido à atividade dos rádios primários a execução do algoritmo DCA é disparada. Este algoritmo foi implementado seguindo a descrição em pseudo-código apresentada na Seção 4.2.

Além disso, também foi realizada a implementação do protocolo de roteamento SAMER [27], descrito na Seção 2.2.2. Na sua implementação, inicialmente executava-se uma rotina que determina a malha de encaminhamento. Na sua versão original, o SAMER requer que todos os nós realizem a descoberta de todas as rotas com até H saltos para o destino. Entretanto, o problema desta tarefa é a definição do parâmetro H . Se escolhido muito baixo, pode resultar na escolha de nenhuma rota. Por isso, utilizou-se na implementação uma versão do algoritmo SPF modificada para determinar todos os caminhos com até N saltos a mais do que a rota mais curta. Desta forma, troca-se o parâmetro H pelo parâmetro N , e elimina-se o problema da escolha muito baixa do parâmetro H .

Para o encaminhamento dos pacotes, foi implementada a métrica utilizada pelo protocolo SAMER, que, assim como a métrica do protocolo RoAD, também se baseia na inundação de estados de enlace. Apesar do encaminhamento dos pacotes ser salto-a-salto, a escolha dos próximos saltos é baseada no enlace com maior métrica. Logo, a rota utilizada muda somente quando os pesos dos enlaces são atualizados. Assim,

na implementação do SAMER, apenas nos instantes de atualização dos pesos dos enlaces, as tabelas de encaminhamento dos nós da malha de encaminhamento eram atualizadas de acordo.

4.3.2 Ambiente de Simulação e Metodologia

Para a avaliação, foram gerados 50 cenários que consistem no posicionamento aleatório de 30 nós cognitivos, com alcance de comunicação de 320 metros, numa área quadrada de 1000 metros de lado. Assim como nas topologias geradas para as simulações da rede híbrida, o posicionamento dos nós garante a conectividade da rede e um grau máximo de 8. A distância mínima entre os nós é a metade do seu alcance de comunicação. Na camada MAC, o protocolo CMAC utiliza taxa de transmissão de pacotes de dados de 11 Mbps, e possui um *buffer* de 5 pacotes. Em todos os cenários foi simulado um fluxo de dados CBR com duração de 900 segundos, onde o nó fonte é aquele mais próximo da coordenada (0,0) e o nó destino é aquele mais próximo da coordenada (1000,1000). No início de cada simulação, antes do início do fluxo de dados, foi adicionado um período de “aquecimento” (*warmup*) de 50 segundos, visando garantir a convergência dos pesos dos enlaces.

Os pares de nós primários possuem um raio de interferência definido em 320 metros, e foram posicionados aleatoriamente dentro de dois quadrantes: o superior esquerdo, e o inferior direito. No quadrante superior esquerdo foram posicionados 1/3 dos pares, e no outro quadrante 2/3. Desta forma, criam-se cenários onde a disponibilidade das oportunidades é heterogênea, ou seja, com duas regiões sob a influência de diferentes quantidades de primários que precisam ser atravessadas pelas rotas criadas. A Figura 4.3 mostra um exemplo deste tipo de cenário¹. Neste exemplo, os círculos representam os nós cognitivos, e os círculos *F* e *D*, representam respectivamente o nó fonte e o nó de destino. As regiões em cinza claro e em cinza escuro representam, respectivamente, as áreas onde são posicionados 1/3 e 2/3 dos pares de rádios primários. Estes cenários tornam muito pouco prováveis a existência de caminhos livres de interferência, sendo ideais para a avaliação do desempenho dos protocolos de roteamento para redes cognitivas dinâmicas. Vale ressaltar que mesmo em outros cenários, onde os pares de primários são distribuídos de forma homogênea, a disponibilidade das oportunidades para os rádios cognitivos pode ser heterogênea. Isto porque, os padrões de atividade destes pares de primários podem ser diferentes. Este tipo de posicionamento utilizando quadrantes e quantidades diferentes de primários foi adotado para simplificar a geração de cenários heterogêneos.

Serão apresentados resultados para quatro protocolos de roteamento diferentes: SR-EQUAL, SR-DISP, SAMER e RoAD. Os resultados dos protocolos SR-EQUAL

¹Este exemplo é meramente ilustrativo. Nele, a quantidade de nós é diferente daquela utilizada nas simulações e os enlaces entre os nós foram manualmente inseridos.

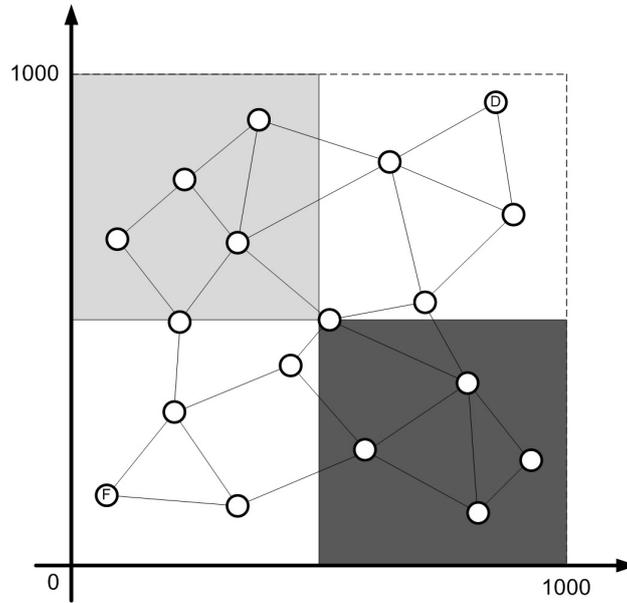


Figura 4.3: Exemplo de cenário de simulação com os quadrantes onde são posicionados os pares de rádios primários

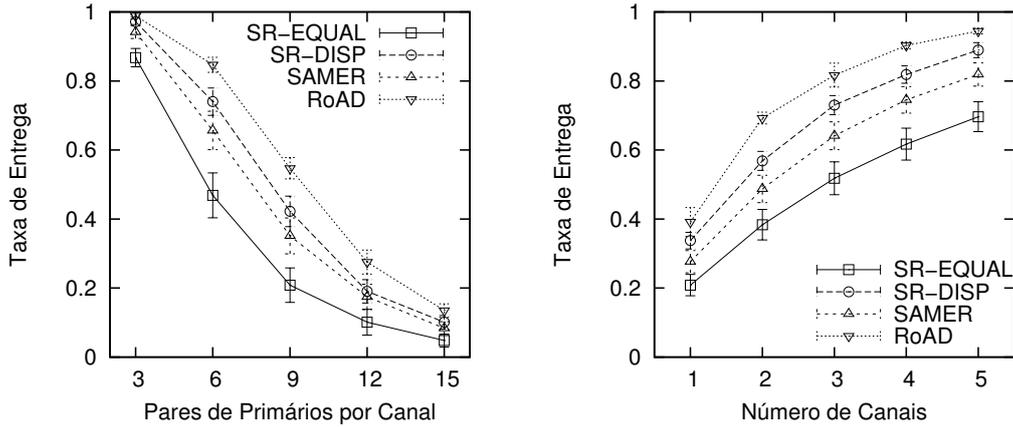
e SR-DISP foram obtidos respectivamente com a execução do protocolo SR com pesos iguais em todos os enlaces, ou com pesos dados pela métrica de disponibilidade utilizada no protocolo RoAD. Desta forma, os resultados obtidos com o SR-DISP representam o desempenho do protocolo RoAD sem a capacidade de determinação de caminhos alternativos do algoritmo DCA. Para o protocolo SAMER, o parâmetro N foi definido em 0 saltos. Assim, as malhas de encaminhamento criadas por este protocolo eram formadas por todas as rotas de tamanho igual à rota mais curta. No final da próxima seção são apresentados resultados de um estudo do impacto do parâmetro N nos resultados do SAMER.

As seguintes métricas de desempenho foram avaliadas nas simulações: taxa de entrega, atraso fim-a-fim, e variação do atraso (*jitter*). Os resultados são apresentados em função do número de canais da faixa licenciada, do número de pares de rádios primários em cada canal, e do padrão de atividade dos rádios primários (μ_{on} e μ_{off}). Os gráficos apresentam as médias dos resultados nos 50 cenários, com barras de erro que representam intervalos de confiança de 95%.

4.3.3 Resultados

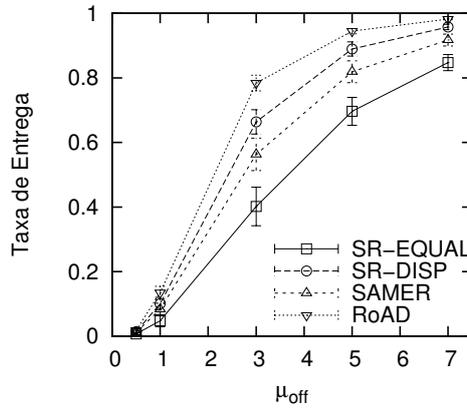
A Figura 4.4 mostra os resultados de taxa de entrega, que é dada pelo número de pacotes entregues dividido pelo número de pacotes gerados no nó fonte. Esta métrica é um indicativo do nível de aproveitamento das oportunidades disponíveis para o encaminhamento de pacotes.

Comparando-se o desempenho das diferentes soluções de roteamento na



(a) 5 canais; $\mu_{on} = 1s$; $\mu_{off} = 1s$.

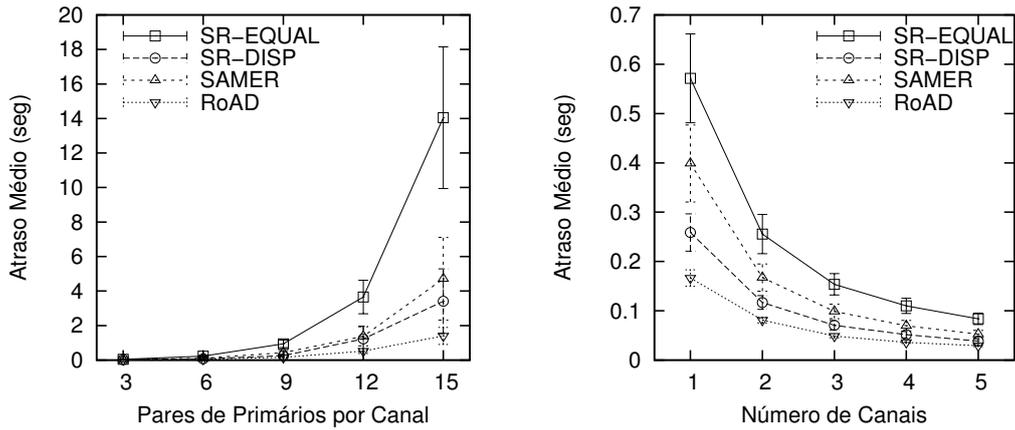
(b) 15 primários; $\mu_{on} = 1s$; $\mu_{off} = 5s$.



(c) 5 canais; 15 primários; $\mu_{on} = 1s$.

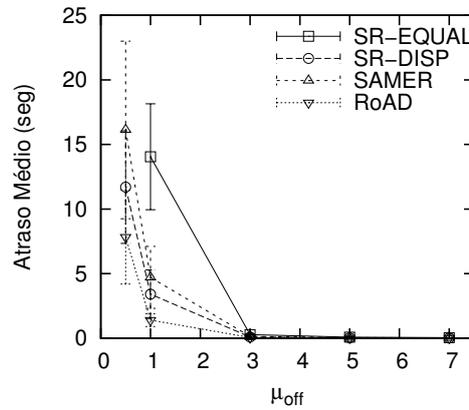
Figura 4.4: Taxa de entrega de pacotes

Figura 4.4, percebe-se uma nítida vantagem do protocolo RoAD sobre os demais. O fraco desempenho do SR-EQUAL é fruto do uso da rota com menor numero de saltos, que pode sofrer influência de diversos primários, o que diminui a quantidade de tempo que a rota permanece disponível. Pelo mesmo motivo, justifica-se o desempenho do SAMER. Apesar de escolher próximos saltos usando uma métrica que considera a disponibilidade dos enlaces, esta escolha é restrita aos caminhos de uma malha de encaminhamento formada por rotas que tem o objetivo de não se distanciar da rota mais curta [27]. O protocolo RoAD foi o que obteve melhor desempenho, seguido pelo protocolo SR-DISP, justamente porque estas soluções utilizam a rota com maior disponibilidade para o encaminhamento dos pacotes. Em cenários onde a influência dos primários é heterogênea, independente do número de saltos, a melhor rota é aquela mais disponível, ou seja, que não passa por regiões com muitos primários. Também por isso, pode-se explicar os ganhos de desempenho do RoAD. A rota principal utilizada por este protocolo já é a mesma rota utilizada no caso do SR-DISP. Além disso, é interessante notar que os ganhos de desempenho na taxa



(a) 5 canais; $\mu_{on} = 1s$; $\mu_{off} = 1s$.

(b) 15 primários; $\mu_{on} = 1s$; $\mu_{off} = 5s$.



(c) 5 canais; 15 primários; $\mu_{on} = 1s$.

Figura 4.5: Atraso médio fim-a-fim

de entrega deste protocolo sobre o SR-DISP são oriundos do algoritmo DCA. Este resultado comprova que é vantajoso escolher caminhos alternativos quando a rota principal fica temporariamente indisponível. Como a rota alternativa pode passar por regiões sobre a influência de outros primários, de maneira geral, o nível de disponibilidade entre a fonte e o destino será superior e fornecerá melhor taxa de entrega.

Ainda na Figura 4.4, pode-se perceber que em cenários com muitos primários, com poucos canais ou com atividade intensa dos primários, a taxa de entrega sofre uma redução significativa. Isto era o esperado, pois nestes cenários existe uma redução na quantidade e na duração das oportunidades de acesso à faixa licenciada. Também nestes casos, existe maior mudança na topologia da rede, o que para o protocolo RoAD representa uma maior quantidade de mudanças de rota e execuções do algoritmo DCA. Entretanto, até mesmo estes cenários mais desafiadores não tornam a taxa de entrega do protocolo RoAD pior que o desempenho dos demais mecanismos avaliados.

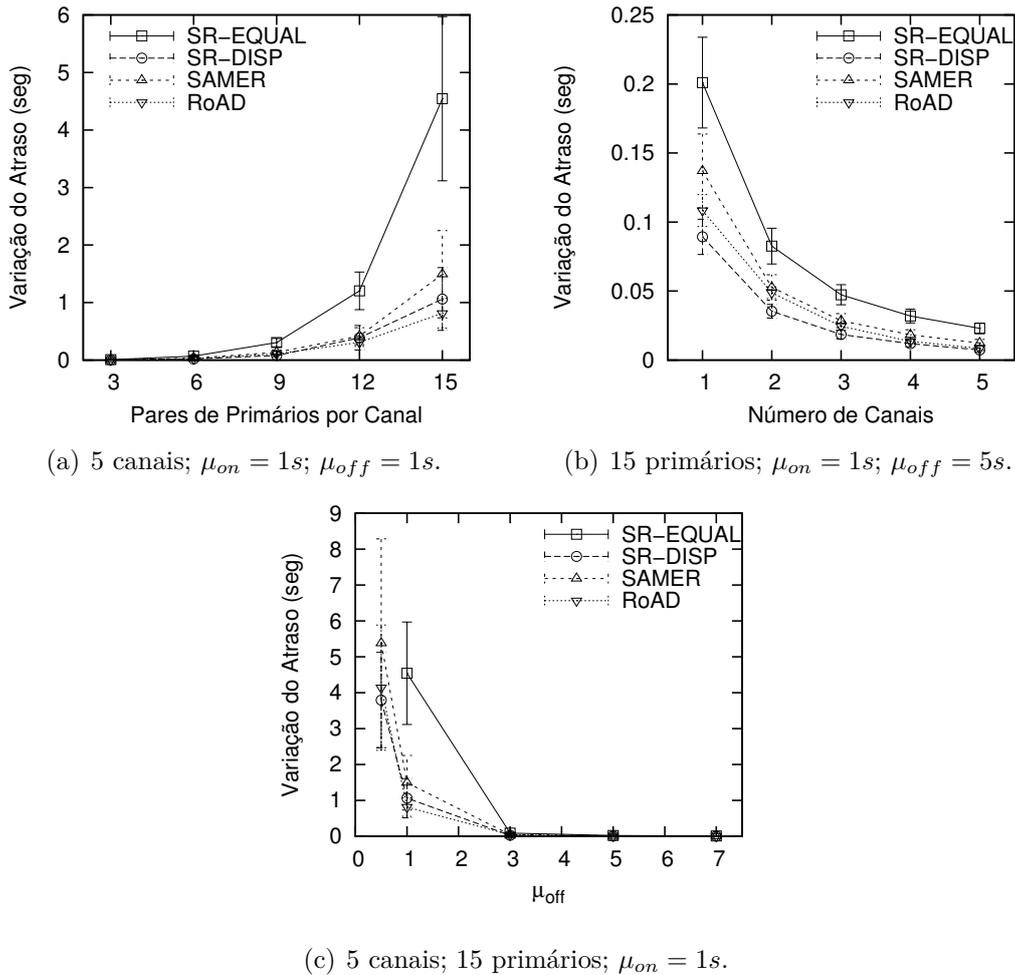


Figura 4.6: Variação do atraso (*Jitter*)

A Figura 4.5 mostra os resultados para o atraso médio na entrega dos pacotes. O atraso na entrega de pacotes é o tempo total transcorrido da geração do pacote até o seu recebimento na aplicação do nó de destino. O aumento do atraso indica o uso de caminhos longos ou esperas em filas devido a contenção no encaminhamento. Para os resultados desta métrica, percebe-se novamente que o RoAD é o protocolo que fornece melhor desempenho. Este é um resultado interessante que mostra que o RoAD consegue atingir maiores taxas de entrega sem comprometer o atraso. Ou seja, nos cenários avaliados, as frequentes mudanças de rota devido à indisponibilidade da rota principal e à escolha de caminhos alternativos, não causam um impacto determinante no atraso dos pacotes. Isto apenas reforça a ideia de que a escolha de rotas alternativas aumenta a disponibilidade do caminho, caso contrário, o atraso seria afetado pelo enfileiramento de pacotes em caminhos alternativos menos disponíveis.

A Figura 4.6 apresenta os resultados para o *jitter* médio. O *jitter* é a diferença de atraso entre os pacotes consecutivos, que indica possíveis instabilidades no en-

caminhamento dos pacotes. Nesta métrica, o RoAD não apresentou os melhores resultados. Este desempenho se justifica, pois o RoAD sempre tenta encaminhar pacotes por caminhos alternativos potencialmente disponíveis, o que faz os pacotes seguirem por diferentes caminhos, ocasionando diferentes atrasos na chegada de pacotes consecutivos. Entretanto, o desempenho do RoAD fica apenas um pouco pior que o desempenho do SR-DISP. Isto ocorre, pois o caminho utilizado pelo SR-DISP quase não muda durante toda a simulação.

Outra observação a respeito dos resultados são os grandes intervalos de confiança do atraso e do *jitter* em cenários com poucos canais, muitos primários, ou padrão de atividade intensa (Figuras 4.5 e 4.6). A explicação para a alta variação de resultados nestes cenários está na baixa taxa de entrega (vide Figura 4.4). Apenas poucos pacotes chegam ao destino devido à alta indisponibilidade das rotas escolhidas. Estas baixas quantidades de amostras aliadas à grande diferença nos seus atrasos fazem com que os valores médios de atraso e *jitter* sejam muito diferentes de um cenário para o outro, gerando os grandes intervalos de confiança. Em alguns casos, como os cenários com $\mu_{off} = 0.5$ segundos na Figura 4.6(c), a quantidade de pacotes entregues foi tão baixa, menos de 30, que seu resultado foi omitido nos gráficos devido à baixa representatividade.

Para avaliar o impacto da escolha do parâmetro N no desempenho do protocolo SAMER, foram repetidas algumas simulações já apresentadas deste protocolo utilizando valores de N igual à 1 e 2 (SAMER1 e SAMER2 nos gráficos). A Figura 4.7 apresenta os resultados de taxa de entrega, atraso médio e *jitter* em função do número de canais, em cenários com 15 pares de primários por canal, $\mu_{on} = 1$ segundo e $\mu_{off} = 5$ segundos. De acordo com estes resultados, pode-se perceber que o aumento do parâmetro N melhora o desempenho do protocolo, mas, pelo menos nos resultados de taxa de entrega e atraso médio, o protocolo RoAD continua apresentando um desempenho superior. Além disso, o custo computacional do algoritmo SPF modificado para calcular as múltiplas rotas da malha de encaminhamento do SAMER que foi implementado no simulador cresce quase que exponencialmente com o aumento do parâmetro N . Isto torna inviável a realização de experimentos com valores de N muito altos.

4.4 Conclusões do Capítulo

Nesta seção, apresentou-se o protocolo de roteamento RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade), que tem como foco as redes cognitivas com oportunidades dinâmicas. Este protocolo utiliza uma métrica de roteamento que visa representar, além da capacidade, o nível de disponibilidade dos enlaces, permitindo a escolha da rota mais disponível. Entretanto, como até na rota mais disponível podem ocorrer inter-

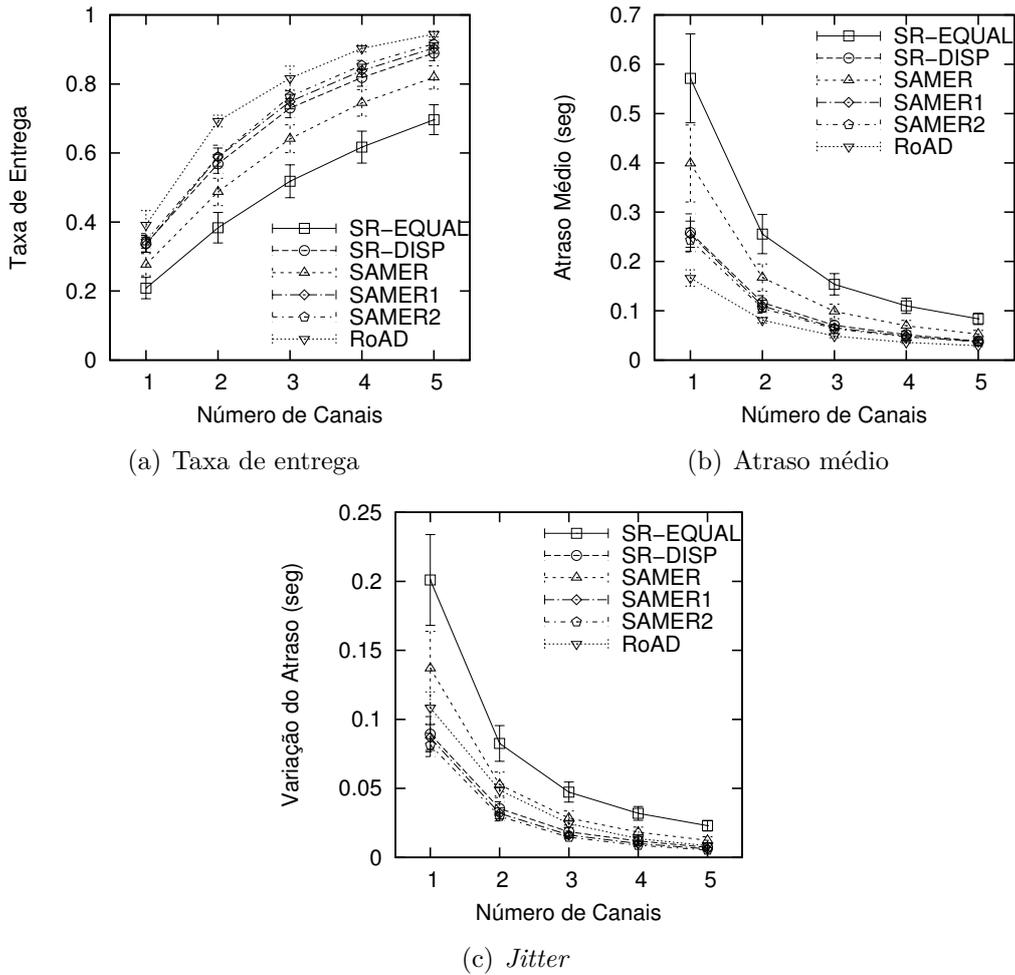


Figura 4.7: Variação do parâmetro N do protocolo SAMER em cenários com 15 pares de primários por canal, $\mu_{on} = 1$ segundo e $\mu_{off} = 5$ segundos

rupções temporárias nas comunicações, o protocolo RoAD também conta com um algoritmo de Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA). Este algoritmo utiliza informações locais para determinar caminhos alternativos com potencial de estarem disponíveis. Desta forma, o RoAD consegue descobrir rotas alternativas disponíveis durante os períodos em que a rota principal está indisponível. De acordo com a avaliação de desempenho realizada, pode-se perceber que o RoAD tem um desempenho superior às demais soluções. Isto se deve, principalmente, ao uso eficiente da disponibilidade dinâmica de oportunidades para o encaminhamento de pacotes. Ao utilizar caminhos alternativos, criados com o algoritmo DCA, o RoAD consegue tirar proveito da disponibilidade heterogênea de oportunidades, que faz com que existam caminhos alternativos disponíveis durante os períodos de indisponibilidade da rota principal.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Os rádios cognitivos têm potencial para solucionar o atual problema de escassez de espectro, que representa um limitante para a evolução das tecnologias baseadas em transmissões sem fio. Através do acesso oportunista às faixas licenciadas do espectro, os rádios cognitivos podem aumentar a eficiência na utilização deste recurso. Entretanto, apesar de ser uma das características atraentes nos rádios cognitivos, o acesso oportunista ao espectro afeta o desempenho das comunicações entre estes rádios.

Neste sentido, a primeira contribuição desta tese foi o estudo dos problemas causados pelo acesso oportunista ao espectro. Este estudo mostrou que a comunicação entre dois rádios cognitivos pode passar por períodos de interrupção devido à falta de oportunidades em comum para estes rádios. Isto está diretamente relacionado à atividade dos rádios primários, pois os rádios cognitivos não podem utilizar um canal que possui primários em atividade. Desta forma, quando a atividade dos rádios primários é dinâmica, os enlaces entre rádios cognitivos podem sofrer frequentes interrupções. E estes problemas podem ser especialmente nocivos quando os rádios cognitivos são usados para a formação de redes de múltiplos saltos.

Nestes cenários de múltiplos saltos, o encaminhamento de pacotes e os protocolos de roteamento das redes cognitivas são os mais afetados. As frequentes interrupções nos enlaces entre rádios cognitivos fazem com que a topologia da rede seja dinâmica. Do ponto de vista do protocolo de roteamento, as mudanças frequentes nos estados dos enlaces podem gerar uma sobrecarga de mensagens de controle no caso do protocolo tentar difundir estas mudanças por toda a rede. Além disso, as rotas descobertas podem apresentar um curto tempo de vida, pois a qualquer momento um de seus enlaces pode se tornar indisponível.

Com o objetivo de minimizar estes impactos do acesso não-prioritário ao espectro no roteamento em redes cognitivas, este trabalho contribui com duas novas propostas: uma nova arquitetura híbrida utilizando rádios cognitivos e rádios 802.11 [13, 14], e um novo protocolo de roteamento para redes formadas unicamente por

rádios cognitivos [15, 16].

A nova arquitetura híbrida proposta utiliza como base uma rede 802.11, onde alguns nós recebem uma interface de rádio cognitivo adicional. Neste cenário, os enlaces entre os rádios cognitivos, que possuem alcance e capacidade potencialmente maiores, podem ser utilizados de forma oportunista como enlaces de atalho para desviar o tráfego das rotas da rede 802.11. Desta forma, aprimora-se o desempenho das comunicações em múltiplos saltos e, sempre que um enlace cognitivo torna-se indisponível, as rotas da rede 802.11 podem servir de alternativa imediata. Segundo o levantamento bibliográfico realizado este é o primeiro trabalho a propor o uso de uma arquitetura híbrida com rádios cognitivos e 802.11 como solução para o problema da disponibilidade dinâmica dos enlaces cognitivos.

Para viabilizar o uso e a escolha dos enlaces cognitivos de atalho, este trabalho também propôs um mecanismo de criação de atalhos. Este mecanismo seleciona dentre os enlaces cognitivos acoplados à uma rota na rede 802.11, o melhor conjunto de enlaces a ser utilizado. A avaliação de desempenho deste mecanismo mostrou que ele consegue atingir resultados próximos do ótimo em grande parte dos cenários. Outra conclusão obtida com os experimentos é que o uso de rotas na rede 802.11 passando por uma maior quantidade de nós cognitivos favorece o desempenho deste mecanismo, pois provê uma maior quantidade de enlaces cognitivos acoplados às rotas na rede 802.11. Logo, é importante que o protocolo de roteamento da rede 802.11 seja consciente da existência das interfaces de rádio cognitivo adicionais que foram incluídas para a formação da arquitetura híbrida.

Nos cenários de redes formadas unicamente por rádios cognitivos, não é possível utilizar os enlaces 802.11 como alternativa para os períodos de indisponibilidade dos enlaces cognitivos. Para estes casos, foi proposto um novo protocolo de roteamento, denominado RoAD, que visa escolher rotas com alta disponibilidade e capacidade utilizando uma nova métrica de roteamento. Além disso, como até mesmo a rota mais disponível pode passar por períodos de indisponibilidade, o protocolo RoAD conta também com a possibilidade de descobrir caminhos alternativos para serem utilizados durante os períodos em que a melhor rota está indisponível. Para isto, a proposta utiliza um algoritmo de determinação de caminhos alternativos (DCA), que é executado utilizando apenas informações locais sobre a disponibilidade imediata dos enlaces. A avaliação de desempenho realizada mostra que o protocolo RoAD tem desempenho superior em comparação com as outras soluções avaliadas. Vale ainda ressaltar que os experimentos comprovam que uma parte significativa dos ganhos de desempenho do protocolo RoAD se devem ao algoritmo DCA. Isto comprova que é vantajoso escolher caminhos alternativos para aumentar a disponibilidade fim-a-fim.

Por fim, outras contribuições importantes deste trabalho foram: o desenvolvimento de um simulador específico para a avaliação de redes híbridas, e a implemen-

tação de módulos e modificações no simulador ns-2 para viabilizar a realização de experimentos com rádios cognitivos. O simulador de redes híbridas foi desenvolvido em linguagem TCL usando um alto nível de abstração, o que facilitou a implementação e avaliação de forma rápida da arquitetura e dos mecanismos para a criação de rotas híbridas. Entretanto, uma limitação deste simulador era permitir apenas a avaliação do desempenho em termos do número de saltos das rotas. Em contrapartida, as modificações realizadas no ns-2 permitiram avaliar outras métricas de desempenho nos experimentos das redes híbridas, e além disso, também permitiram realizar experimentos para avaliar o protocolo de roteamento RoAD em redes cognitivas. A adaptação do simulador ns-2 demandou um grande esforço de implementação e integração de novos módulos e funcionalidades não existentes no código original do simulador. Destas modificações, destacam-se como mais importantes: a implementação do protocolo CMAC, a integração do módulo NoAH, e o uso de múltiplas interfaces.

5.1 Trabalhos Futuros

Existem diferentes possibilidades de continuidade do trabalho apresentado nesta tese em trabalhos futuros. No caso da arquitetura de rede híbrida, novas métricas de atribuição de pesos aos enlaces da rede 802.11 podem ser propostas visando a escolha de rotas que sejam mais propícias à existência de enlaces cognitivos de atalho. Estas métricas poderiam levar em consideração outras características, como por exemplo, o percentual de tempo que os canais estão disponíveis para os nós cognitivos. Com isso, o desempenho do mecanismo de criação de atalhos poderia ser aprimorado.

Outra característica do mecanismo de criação de atalhos que poderia ser avaliada é a utilização de novas métricas para a escolha do conjunto de enlaces cognitivos que são usados para compor a rota híbrida. No caso deste trabalho de tese, foi avaliada apenas a possibilidade de reduzir o número de saltos das rotas, mas outras métricas podem ser otimizadas pela atribuição de pesos aos enlaces do grafo parcial que é utilizado pelo mecanismo de criação de atalhos.

Ainda nos cenários de redes híbridas, um aspecto que não foi estudado são os critérios de escolha dos nós que irão receber a interface de rádio cognitivo adicional. Uma escolha inteligente poderia permitir a criação de rotas híbridas ótimas com um número mínimo de rádios cognitivos necessários.

No caso do protocolo proposto RoAD, como trabalhos futuros novas avaliações de desempenho podem ser realizadas. Uma característica interessante que poderia ser avaliada em novos experimentos são os impactos causados por possíveis imprecisões na detecção dos canais disponíveis. Este estudo poderia mostrar qual o limite de acurácia necessário para que o protocolo RoAD não tenha seu funcionamento

impactado pela detecção imperfeita das oportunidades.

Referências Bibliográficas

- [1] FCC. “Home | FCC.gov”. 2011. <http://www.fcc.gov> - último acesso em 3/11/2011.
- [2] ANATEL. “Portal Anatel”. 2011. <http://www.anatel.gov.br> - último acesso em 3/11/2011.
- [3] 802.11. “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, IEEE Standard, 1999.
- [4] HAYKIN, S. “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”. In: *Journal on Selected Areas in Communications*, fev. 2005.
- [5] WALKO, J. “Cognitive Radio”, *IEE Review*, v. 51, n. 5, pp. 34–37, maio 2005. ISSN: 0953-5683.
- [6] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., VURAN, M. C., et al. “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey”, *Computer Networks*, v. 50, n. 13, pp. 2127–2159, 2006. ISSN: 1389-1286. doi: 10.1016/j.comnet.2006.05.001.
- [7] ZHAO, Q., SADLER, B. M. “A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy”, *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 79–89, maio 2007.
- [8] FCC. “Notice of Proposed Rule Making and Order in the Matter of Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies”. 2003. FCC 03-322.
- [9] MITOLA, J. “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications”. In: *MoMuC '99: IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, pp. 3–10, nov. 1999.
- [10] MITOLA, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Tese de Doutorado, Royal Institute of Technology, maio 2000.

- [11] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., CHOWDHURY, K. R. “CRAHNs: Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, *Ad Hoc Networks*, v. 7, n. 5, pp. 810–836, 2009. doi: 10.1016/j.adhoc.2009.01.001.
- [12] KHALIFE, H., MALOUCH, N., FDIDA, S. “Multihop Cognitive Radio Networks: To Route or Not to Route”, *IEEE Network*, v. 23, n. 4, pp. 20–25, jul. 2009.
- [13] DA SILVA, M. W. R., DE REZENDE, J. F. “Roteamento em Redes em Malha Híbridas de Rádios Cognitivos e IEEE 802.11”. In: *SBRC '09: XXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, maio 2009.
- [14] DA SILVA, M. W. R., DE REZENDE, J. F. “Routing in Hybrid Mesh Networks of Cognitive and IEEE 802.11 Radios”. In: *GLOBECOM '10: IEEE Global Communications Conference 2010*, dez. 2010.
- [15] DA SILVA, M. W. R., DE REZENDE, J. F. “Redes de Rádios Cognitivos com Disponibilidade Dinâmica de Oportunidades”. In: *SBRC '11: XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, maio 2011.
- [16] DA SILVA, M. W. R., DE REZENDE, J. F. “RoAD: A New Routing Protocol for Cognitive Radio Networks with Dynamic Spectrum Opportunities”, Submetido à revista *Ad Hoc Networks* (Elsevier), out. 2011.
- [17] NS-2. “The Network Simulator - ns-2”. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> - último acesso em 27/10/2011.
- [18] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., VURAN, M. C., et al. “A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 46, n. 4, pp. 40–48, april 2008. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2008.4481339.
- [19] DA SILVA, M. W. R., CARDOSO, K. V., MOURA, D. F. C., et al. “Avaliação do Compartilhamento Espectral em Redes Cognitivas utilizando Jogos Evolucionários”. In: *SBrT '08: XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, set. 2008.
- [20] AKYILDIZ, I. F., LEE, W.-Y., CHOWDHURY, K. R. “Spectrum Management in Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, *IEEE Network*, v. 23, n. 4, pp. 6–12, july-august 2009. ISSN: 0890-8044. doi: 10.1109/MNET.2009.5191140.

- [21] CESANA, M., CUOMO, F., EKICI, E. “Routing in Cognitive Radio Networks: Challenges and Solutions”, *Ad Hoc Networks*, v. 9, n. 3, pp. 228–248, 2011. ISSN: 1570-8705.
- [22] SALAMEH, H. A. B., KRUNZ, M. M., YOUNIS, O. “MAC Protocol for Opportunistic Cognitive Radio Networks with Soft Guarantees”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 8, n. 10, pp. 1339–1352, out. 2009.
- [23] STINE, J. A. “Spectrum Management: The Killer Application of Ad Hoc and Mesh Networking”, *DySPAN '05: IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 184–193, nov. 2005. doi: 10.1109/DYSPAN.2005.1542634.
- [24] CHOWDHURY, K. R., AKYILDIZ, I. F. “Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 26, n. 1, pp. 168–181, jan. 2008. ISSN: 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2008.080115.
- [25] KHALIFE, H., AHUJA, S., MALOUCH, N., et al. *Joint Routing and Spectrum Selection for Multihop Cognitive Radio Networks*. Relatório técnico, LIP6 - Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2007.
- [26] KHALIFE, H., AHUJA, S., MALOUCH, N., et al. “Probabilistic Path Selection in Opportunistic Cognitive Radio Networks”. In: *GLOBECOM '08: IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–5, dez. 2008.
- [27] PEFKIANAKIS, I., WONG, S. H., LU, S. “SAMER: Spectrum Aware Mesh Routing in Cognitive Radio Networks”. In: *DySPAN '08: IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 1–5, out. 2008.
- [28] PEFKIANAKIS, I., WONG, S. H., LU, S. *Spectrum Aware Mesh Routing in Cognitive Radio Mesh Networks*. Relatório Técnico TR 080024, Dept. of Computer Science - UCLA, 2008.
- [29] SONG, H., LIN, X. “Spectrum aware highly reliable routing in multihop cognitive radio networks”. In: *WCSP '09: International Conference on Wireless Communications Signal Processing*, pp. 1–5, nov. 2009.
- [30] LI, B., LI, D., HUI WU, Q., et al. “ASAR: Ant-based spectrum aware routing for cognitive radio networks”. In: *WCSP '09: International Conference on Wireless Communications Signal Processing*, pp. 1–5, nov. 2009.

- [31] DING, L., MELODIA, T., BATALAMA, S. N., et al. “ROSA: Distributed Joint Routing and Dynamic Spectrum Allocation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks”. In: *MSWiM '09: ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pp. 13–20, 2009. ISBN: 978-1-60558-616-8.
- [32] DING, L., MELODIA, T., BATALAMA, S. N., et al. “Cross-Layer Routing and Dynamic Spectrum Allocation in Cognitive Radio Ad Hoc Networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 59, n. 4, pp. 1969–1979, 2010.
- [33] ABBAGNALE, A., CUOMO, F. “Gymkhana: A Connectivity-Based Routing Scheme for Cognitive Radio Ad Hoc Networks”. In: *INFOCOM '10: IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, pp. 1–5, mar. 2010.
- [34] GEIRHOFER, S., TONG, L., SADLER, B. M. “A Measurement-Based Model for Dynamic Spectrum Access in WLAN Channels”. In: *MILCOM '06: IEEE Military Communications Conference*, pp. 1–7, out. 2006.
- [35] GEIRHOFER, S., TONG, L., SADLER, B. M. “COGNITIVE RADIOS FOR DYNAMIC SPECTRUM ACCESS - Dynamic Spectrum Access in the Time Domain: Modeling and Exploiting White Space”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 45, n. 5, pp. 66–72, may 2007. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2007.358851.
- [36] STABELLINI, L. “Quantifying and Modeling Spectrum Opportunities in a Real Wireless Environment”. In: *WCNC '10: IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–6, april 2010. doi: 10.1109/WCNC.2010.5506438.
- [37] CHEN, D., YIN, S., ZHANG, Q., et al. “Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study”. In: *MobiCom '09: International conference on Mobile computing and networking*, pp. 13–24, set. 2009.
- [38] WELLENS, M., RIIHIJÄRVI, J., MÄHÖNEN, P. “Empirical time and frequency domain models of spectrum use”, *Physical Communication*, v. 2, n. 1-2, pp. 10–32, 2009. ISSN: 1874-4907. doi: 10.1016/j.phycom.2009.03.001.
- [39] WILLKOMM, D., MACHIRAJU, S., BOLOT, J., et al. “Primary Users in Cellular Networks: A Large-Scale Measurement Study”. In: *DySPAN '08:*

IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 1–11, out. 2008. doi: 10.1109/DYSPAN.2008.48.

- [40] YUAN, Y., BAHL, P., CHANDRA, R., et al. “Allocating Dynamic Time-Spectrum Blocks in Cognitive Radio Networks”. In: *MobiHoc '07: 8th ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 130–139, 2007. ISBN: 978-1-59593-684-4. doi: 10.1145/1288107.1288125.
- [41] YÜCEK, T., ARSLAN, H. “A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 11, n. 1, pp. 116–130, 2009.
- [42] AKYILDIZ, I. F., WANG, X., WANG, W. “Wireless mesh networks: a survey”, *Computer Networks*, v. 47, n. 4, pp. 445–487, 2005. ISSN: 1389-1286. doi: 10.1016/j.comnet.2004.12.001.
- [43] CLAUSEN, T., JACQUET, P., ADJIH, C., et al. “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)”. RFC 3626, October 2003. Disponível em: <<http://ietf.org/rfc/rfc3626.txt>>. Network Working Group.
- [44] FCC. “Notice of Proposed Rule Making in the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band”. nov. 2008. FCC 04-113.
- [45] CORDEIRO, C., CHALLAPALI, K. “C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks”. In: *DySPAN '07: IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 147–157, abr. 2007. doi: 10.1109/DYSPAN.2007.27.
- [46] KONDAREDDY, Y. R., AGRAWAL, P. “Synchronized MAC Protocol For Multi-Hop Cognitive Radio Networks”. In: *ICC '08: IEEE International Conference on Communications*, pp. 3198–3202, maio 2008. doi: 10.1109/ICC.2008.602.
- [47] DIJKSTRA, E. W. “A note on two problems in connexion with graphs”, *Numerische Mathematik*, v. 1, pp. 269–271, 1959. ISSN: 0029-599X.
- [48] NOAH. “NO Ad Hoc Routing Agent (NOAH)”. 2005. <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/> - último acesso em 3/11/2011.
- [49] CALLVO, R. A., CAMPO, J. P. *Adding Multiple Interface Support in NS-2*. Relatório técnico, University of Cantabria, jan. 2007.