

# Redes de Rádios Cognitivos com Disponibilidade Dinâmica de Oportunidades\*

Marcel William Rocha da Silva<sup>1</sup> e José Ferreira de Rezende<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GTA - PEE - COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)  
Caixa Postal 68.504 – 21.945-970 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{marcel, rezende}@gta.ufrj.br

**Abstract.** *One major problem in cognitive radio networks is the dynamic availability of spectrum access opportunities. The cognitive radios access the licensed spectrum without priority with respect to the licensed radios. Thus, the routing protocols of the secondary network may suffer instabilities generated by frequent link disruptions. This work studies this problem and presents a new routing protocol, named RoAD. This protocol discovers routes with high availability in cognitive radio networks aiming at hindering the impact of frequent link disruptions. We evaluate the proposal through simulations and compare its' performance to other solutions.*

**Resumo.** *Um dos problemas das redes de rádios cognitivos é a disponibilidade dinâmica de oportunidades de acesso ao espectro licenciado. Quando a natureza não-prioritária dos rádios cognitivos (secundários) alia-se a rádios licenciados (primários) com característica dinâmica de operação, o roteamento de pacotes na rede secundária pode apresentar instabilidades causadas pelas frequentes “quebras” de enlace. Este trabalho avalia o problema e propõe um novo protocolo de roteamento denominado RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade). Este protocolo tem como objetivo aumentar a disponibilidade das rotas em redes dinâmicas de rádios cognitivos visando minimizar o impacto das constantes “quebras” de enlace. O desempenho da proposta é avaliado e comparado a outras soluções através de simulações.*

## 1. Introdução

Com o crescente avanço das aplicações utilizando tecnologias de rede sem-fio, o espectro de frequências se tornou um recurso escasso e, na maioria das vezes, mal utilizado. As faixas de espectro do tipo *não-licenciadas*, que não requerem licença de operação, apresentam altos índices de utilização principalmente nos grandes centros urbanos. Entretanto, as faixas do espectro do tipo *licenciadas*, que representam as maiores fatias do espectro, permanecem subutilizadas por tecnologias legadas na maioria das regiões.

Nos últimos anos, o órgão norte-americano FCC (*Federal Communications Commission*) [FCC 2009] vem estudando novas maneiras de aprimorar a utilização do espectro licenciado com a regulamentação de uma nova classe de dispositivos oportunistas: os rádios cognitivos. Estes rádios são dotados de capacidades de sensoriamento

---

\*Este trabalho recebeu recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP e RNP.

e de adaptação de suas características de operação por *software* durante seu funcionamento. Estas habilidades permitem que os rádios cognitivos acessem os canais ociosos do espectro de frequências licenciado de maneira oportunista, sem prejudicar o funcionamento dos rádios licenciados [Akyildiz et al. 2006, Akyildiz et al. 2009]. Desta forma, os rádios cognitivos têm potencial para minimizar o problema da má utilização do espectro de frequências e atender a crescente demanda por espectro das aplicações de rede sem-fio.

Um dos desafios para a utilização dos rádios cognitivos é a sua característica não-prioritária no acesso ao espectro licenciado. Por não possuírem prioridade no acesso à faixa licenciada, os rádios cognitivos (secundários) têm a obrigação de modificar as suas características de operação sempre que um rádio licenciado (primário) entra em operação na região. Apesar de viabilizar sua coexistência com os rádios licenciados, o acesso secundário ao espectro gera alguns problemas para o funcionamento dos rádios cognitivos. Principalmente quando estes rádios são utilizados para a formação de redes de múltiplos saltos [Akyildiz et al. 2009].

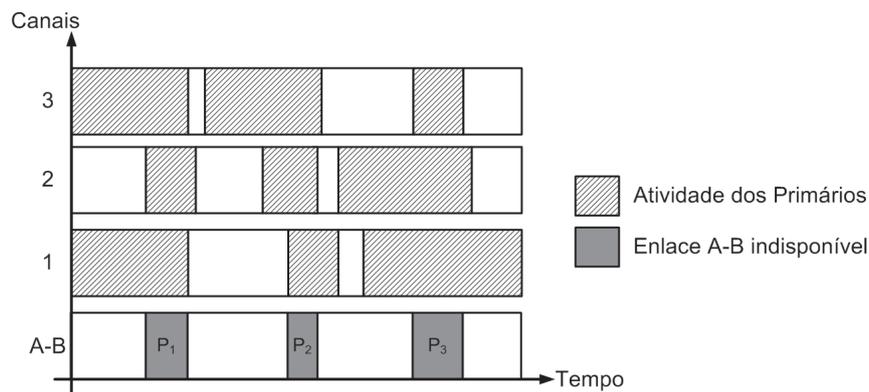
Um dos problemas ocasionados pelo acesso não-prioritário ao espectro é a potencial natureza dinâmica da influência dos rádios primários sobre os rádios secundários<sup>1</sup> [Salameh et al. 2009, Khalife et al. 2009, Cesana et al. 2011]. Este problema ocorre, pois a comunicação entre os rádios secundários pode se tornar temporariamente inviável quando estes rádios precisam adaptar suas características de operação a fim de evitar prejudicar o funcionamento dos rádios primários. Dependendo do padrão de atividade dos rádios primários, a adaptação dos parâmetros de operação por parte dos rádios secundários serão mais ou menos frequentes, causando impactos prejudiciais ao desempenho dos rádios cognitivos.

Para uma comunicação bem sucedida entre dois rádios cognitivos na faixa licenciada é necessário que ambos os rádios detectem ao menos uma *oportunidade* em comum de acesso a esta faixa. As oportunidades podem ser representadas de diferentes maneiras. O modelo mais comum, e adotado neste trabalho, é considerar que cada canal temporariamente não utilizado pelos primários da região é uma oportunidade de acesso. O exemplo da Figura 1 mostra a disponibilidade das oportunidades de acesso à faixa licenciada em função do tempo para o par de rádios secundários *A* e *B*. Neste exemplo é possível perceber que os canais disponíveis para o acesso secundário mudam de acordo com o tempo. Estas mudanças fazem com que ocorram períodos sem oportunidades de comunicação (períodos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ). 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 dispositivos secundários está fortemente relacionada ao comportamento dos dispositivos primários [Khalife et al. 2009]. Assim, a comunicação entre os nós de uma rede secundária pode sofrer mudanças repentinas de qualidade e frequentes indisponibilidades temporárias. Estas instabilidades nos enlaces podem ser especialmente prejudiciais na descoberta e manutenção de rotas no caso de redes de múltiplos saltos [Cesana et al. 2011]. Neste caso, as “quebras” de enlace, como são comumente denomi-

---

<sup>1</sup>Neste trabalho, os termos *secundário* e *primário* são utilizados respectivamente como sinônimos para rádio cognitivo e rádio licenciado.



**Figura 1. Exemplo de oportunidades de acesso a faixa licenciada.**

nadas as interrupções nas comunicações de um enlace, ocasionam frequentes mudanças na topologia da rede, reduzindo a disponibilidade das rotas. Os trabalhos recentes sobre roteamento em redes de rádios cognitivos observam a necessidade de se considerar o nível de disponibilidade das oportunidades de acesso à faixa licenciada no processo de escolha de rotas [Khalife et al. 2008, Pefkianakis et al. 2008a, Cesana et al. 2011].

Tendo em vista os problemas apresentados, este trabalho propõe um novo protocolo de roteamento, denominado **RoAD** (Roteamento de Alta Disponibilidade). Seu principal objetivo é selecionar rotas com alta disponibilidade em redes de rádios cognitivos com disponibilidade dinâmica de oportunidades, chamadas por conveniência neste trabalho de *Redes Dinâmicas de Rádios Cognitivos*. Inspirado nas observações de [Khalife et al. 2008, Pefkianakis et al. 2008a], a escolha de rotas no protocolo RoAD é realizada utilizando-se uma nova métrica de roteamento que visa estimar o percentual de tempo que cada enlace permanece disponível e a capacidade do enlace. Outra funcionalidade importante do protocolo RoAD é um algoritmo de determinação de caminhos alternativos, que utiliza apenas informações locais para determinar rotas alternativas quando um ou mais enlaces da rota original se “quebram”. A ideia é que podem existir caminhos alternativos que estejam disponíveis durante os períodos em que a rota original está indisponível. Isto ocorre devido à diversidade de disponibilidade de oportunidades para os nós da rede. O desempenho deste protocolo foi avaliado através de simulações no ns-2 [NS-2] e comparado com o protocolo proposto em [Pefkianakis et al. 2008a]. A avaliação mostra que o novo protocolo oferece ganhos expressivos em diversos casos.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira. Na próxima seção, serão apresentados outros trabalhos relacionados. A Seção 3 traz uma discussão a respeito dos problemas de roteamento em redes dinâmicas de rádios cognitivos. Na Seção 4 será apresentada a proposta deste trabalho: o protocolo RoAD. A Seção 5 apresenta as simulações realizadas e a discussão a respeito dos resultados obtidos. E por fim, a Seção 6 conclui o artigo e fala sobre trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos propõem soluções para o roteamento em redes de rádios cognitivos. Entretanto, apenas algumas das soluções estudadas e mencionadas nesta Seção se aplicam de fato a cenários onde a disponibilidade de oportunidades é dinâmica.

Em [Khalife et al. 2007, Khalife et al. 2008], os autores apresentam um protocolo de roteamento pela fonte que considera a interferência dos primários na descoberta de rotas na rede secundária. 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 que representa a probabilidade estimada de um enlace atender a uma determinada demanda de tráfego. Esta estimativa é baseada nos resultados apresentados em [Salameh et al. 2009], que mostram que o nível de influência dos primários sobre os nós da rede secundária segue uma distribuição *log-normal* quando os primários estão posicionados de acordo com uma distribuição de *Poisson*.

Um dos problemas do protocolo MPP é que o caminho com maior probabilidade de atender a demanda do fluxo pode se tornar temporariamente indisponível devido a atividade de algum primário interferente. 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 aos efeitos de propagação dos sinais e ao posicionamento dos rádios primários interferentes.

Em [Pefkianakis et al. 2008a, Pefkianakis et al. 2008b], 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.

Outros trabalho mais recentes [Ding et al. 2009, Ding et al. 2010] 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.

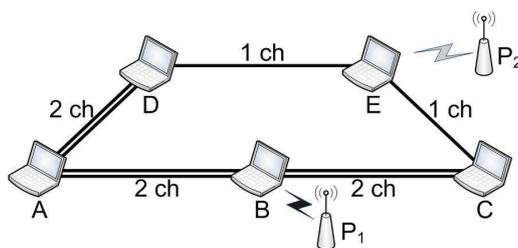
### 3. Roteamento em Redes Dinâmicas de Rádios Cognitivos

Em redes dinâmicas de rádios cognitivos, a influência dos primários na rede secundária gera efeitos prejudiciais ao roteamento. Normalmente, o objetivo do roteamento em redes sem-fio é escolher rotas que maximizem a capacidade disponível para o novo fluxo de dados. Entretanto, um fator importante em redes de rádios cognitivos, que deve ser levado em consideração pelo roteamento, é o nível de disponibilidade dos enlaces. Como já foi dito na Seção 1, a comunicação nos enlaces da rede de rádios cognitivos pode ser frequentemente interrompida pela atividade dos dispositivos primários. Estas interrupções fazem com que os enlaces fiquem temporariamente indisponíveis, inutilizando temporariamente as rotas e causando degradação de desempenho.

Devido a potencial dinamicidade destas quebras de enlace, é inviável que o protocolo de roteamento tente rastrear estas quebras de enlace de forma que elas se reflitam em mudanças diretas 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 estado atual. Uma maneira mais eficiente de lidar com o problema é tentar rastrear os padrões de comportamento dos rádios primários. A atividade dinâmica de um rádio primário é a responsável pelas frequentes quebras de enlace na rede de rádios cognitivos. Entretanto, é provável que os frequentes acessos realizados por um primário ao espectro licenciado sigam um padrão de comportamento.

A Figura 2 apresenta um exemplo de uma rede de rádios cognitivos onde os nós  $B$  e  $E$  sofrem a influência dos primários  $P_1$  e  $P_2$ , respectivamente. O primário  $P_1$  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  $P_2$  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, existem duas rotas possíveis no exemplo: a rota  $A - B - C$  com maior capacidade (2 canais) e que fica disponível apenas 10% do tempo, e a rota  $A - D - E - C$  com menor capacidade (1 canal) mas que está 80% do tempo disponível. Um protocolo de roteamento específico para redes dinâmicas de rádios cognitivos deve ser capaz de levar em consideração ambos os aspectos: a capacidade e a disponibilidade das rotas. Neste caso, poderia ser melhor utilizar a rota  $A - D - C - E$ , que apesar da menor capacidade e do maior número de saltos, está mais tempo disponível.

Outra característica interessante no exemplo da Figura 2, é que as duas rotas sofrem a influência de 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 quando uma rota está indisponível, a outra está operacional. 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 que a rota  $A - B - C$



**Figura 2. Exemplo de rede secundária sob influência de diferentes primários.**

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. Proposta: RoAD - Roteamento de Alta Disponibilidade

O protocolo de roteamento proposto neste trabalho (RoAD - Roteamento de Alta Disponibilidade) tem como objetivo determinar rotas com alta disponibilidade. Para isto, é proposta uma nova métrica de roteamento que visa representar a capacidade e o nível de disponibilidade dos enlaces da rede secundária. Entretanto, como até as rotas mais disponíveis podem sofrer a influência de dispositivos primários e períodos de indisponibilidade, o protocolo conta também com um algoritmo de determinação de caminhos alternativos. Estes caminhos alternativos permitem que os pacotes sejam encaminhados por rotas alternativas àquela de maior disponibilidade quando a mesma está temporariamente indisponível. Como discutido na seção anterior, caminhos diferentes podem sofrer influência de primários distintos, fazendo com que seus períodos de indisponibilidade sejam não coincidentes.

O protocolo RoAD considera que a escolha do canal de transmissão é realizada pela camada MAC em curtas escalas de tempo. Em [Yuan et al. 2007], os autores propõem um protocolo MAC para rádios cognitivos nestes moldes, denominado CMAC (*Cognitive Radio MAC*). Este protocolo utiliza um canal de controle para a negociação e reserva do canal de dados na faixa licenciada. Neste tipo de protocolo MAC, um enlace entre dois rádios cognitivos é quebrado somente quando não existem mais canais em comum disponíveis na faixa licenciada. Logo, a frequência das quebras de enlace será reduzida quando comparada aos protocolos MAC onde o canal utilizado em cada enlace é fixo e previamente determinado.

No protocolo RoAD a escolha de rotas é realizada a partir do nó fonte. Para isto, todos os nós da rede realizam inundações periódicas no canal de controle informando sua vizinhança e sua visão do nível de disponibilidade de cada oportunidade de acesso à faixa licenciada. O nível de disponibilidade  $Disp_i^k$ , é dado pelo percentual de tempo que a oportunidade  $k$  está disponível para o nó  $i$ . Este percentual pode ser determinado, por exemplo, através de medições da atividade dos primários realizadas pelos nós secundários utilizando um rádio receptor adicional que realiza varreduras na faixa licenciada.

De posse das informações recebidas nas inundações, o nó fonte pode montar o grafo da rede e calcular os pesos de todos os enlaces, de acordo com a equação 1. A métrica proposta é dada pelo somatório de  $Indisp_{(i,j)}^k$ , que é um indicador do nível de indisponibilidade de cada oportunidade  $k$  para o enlace  $(i, j)$ . O cálculo de  $Indisp_{(i,j)}^k$  é realizado através da equação 2, 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 da equação 2 servem apenas para manter os resultados no intervalo entre  $[0,1]$ . Desta forma, a métrica proposta consegue representar estatisticamente o nível de indisponibilidade dos canais e a quantidade de canais disponíveis em cada enlace.

$$Peso_{(i,j)} = \sum_{k=1}^N (Indisp_{(i,j)}^k) \quad (1)$$

$$Indisp_{(i,j)}^k = -\log(Disp_i^k \times Disp_j^k \times 0.9 + 0.1) \quad (2)$$

Para determinar a melhor rota, o nó fonte, que possui conhecimento da topologia e dos pesos dos enlaces, executa um algoritmo SPF (*Shortest Path First*). A rota determinada por este algoritmo será o caminho principal e preferencial para o encaminhamento de pacotes. Neste caminho espera-se obter o melhor desempenho devido à maior disponibilidade e a maior quantidade de canais. Entretanto, como os nós da rota não estão totalmente livres da influência dos primários, ainda podem existir quebras temporárias 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 não tem mais oportunidades de acesso em comum com o seu antecessor na rota, o nó  $i$ , ele envia uma sinalização ao nó  $i$  informando a quebra do enlace  $(i, j)$  e passando a lista de enlaces de  $j$  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  $i$  e o conhecimento recebido através da sinalização 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 no 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 da rede ( $G(V, E)$ ) a fim de montar uma visão atualizada local da topologia ( $G'(V', E')$ ) contendo apenas aqueles enlaces que estão potencialmente disponíveis.

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). Os nós que participam do encaminhamento de pacotes de um fluxo conhecem todos os saltos da rota principal, pois esta informação está presente em todos os pacotes encaminhados (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 os próximos enlaces da rota principal até o nó  $j$  (linha 4). Já o conjunto  $I_x$ , recebido na mensagem de sinalização, é formado pelos conjuntos de enlaces de  $j$  que estão atualmente indisponíveis.

**Notação:**

$V$ = conjunto dos nós da rede; $E$ = conjunto dos enlaces da rede; $G(V, E)$ = grafo da rede; $I, I_1, I_2, I_3$ e $I_x$ = conjuntos de enlaces; $f$ = nó fonte; $d$ = nó destino;	$R_{fd}$ = rota de $f$ para $d$ ; $i$ = nó que foi sinalizado da quebra; $j$ = nó que sinaliza a quebra; $R_{id}$ = rota alternativa de $i$ para $d$ ; $i_{-1}$ = nó antecessor ao nó $i$ na rota $R_{fd}$ ;
--	--

**Entrada:**

$I_x$  = conjunto de enlaces de  $j$  indisponíveis;

**Algoritmo:**

```

1: Em  $i$ , ao receber a sinalização de  $j$ :
2:    $I_1$  = determina_enlaces_antecessores( $R_{fd}$ );
3:    $I_2$  = determina_vizinhos_indisponiveis();
4:    $I_3$  = determina_proximos_enlaces_indisponiveis( $R_{fd}, j$ );
5:    $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3 \cup I_x$ ;
6:    $G'(V', E')$  = remove_enlaces( $G(V, E), I$ );
7:    $R_{id}$  = SPF( $G', i, d$ );
8:   se ( $R_{id} \neq \emptyset$ ) {
9:     enquanto (rota_indisponivel( $R_{fd}$ )) {
10:       encaminha_pacotes( $R_{id}$ ); }
11: } caso contrário {
12:   sinaliza_quebra( $i_{-1}, j, I_2 \cup I_x$ ); }

```

**Algoritmo 1:** Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA)

A eliminação dos enlaces presentes em  $I$  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,  $R_{id}$ , do nó  $i$  até o destino  $d$ . Vale lembrar que o grafo  $G'(V', E')$  também possui pesos nos enlaces dados pela métrica proposta. Assim,  $R_{id}$  será a rota alternativa com maior capacidade e disponibilidade naquele momento de acordo com a visão local do nó  $i$ .

Se existir rota  $R_{id}$ , os pacotes do fluxo são desviados para esta nova rota enquanto a rota principal não voltar a ficar disponível (linhas 9-10). Caso não exista rota alternativa no grafo  $G'(V', E')$ , o nó  $i$  sinaliza a quebra do enlace ao nó antecessor na rota, nomeado  $i_{-1}$ , como se o enlace  $(i_{-1}, i)$  tivesse se tornado indisponível (linha 12). No repasse da sinalização, o nó  $i$  atualiza o conjunto  $I_x$  fazendo a união com o seu conjunto de enlaces atualmente indisponíveis para os seus vizinhos,  $I_2$ . 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 coisa a fazer é esperar que o enlace quebrado volte a ficar disponível. Sempre que o nó  $i$  detecta que o enlace quebrado  $(i, j)$  voltou a ficar disponível, a rota principal pode voltar a ser utilizada para o encaminhamento de pacotes do fluxo.

**5. Simulações**

Para avaliar o desempenho da proposta foram realizados experimentos utilizando o simulador ns-2 [NS-2]. Diversas modificações foram necessárias para realizar os experimentos, uma vez que o ns-2 não possui no seu código original modelos de rádios cognitivos.

Para isto, o ns-2 foi estendido para permitir a utilização de múltiplos canais e a troca de canal de operação durante a simulação. Além disso, para camada MAC, foi implementado o protocolo CMAC proposto e descrito em [Yuan et al. 2007], tomando como base a implementação existente no ns-2 do protocolo IEEE 802.11.

Para transmitir pacotes utilizando o protocolo CMAC, o emissor realiza uma negociação com o receptor através de um canal de controle utilizando três mensagens de controle específicas: RTS (*Request To Send*), CTS (*Clear To Send*) e DTS (*Data Transmission reReservation*). No RTS são enviados os canais disponíveis no emissor. Ao receber o RTS, o receptor envia um CTS informando ao emissor o canal escolhido, a largura de faixa e a duração. Por fim o emissor envia um DTS com as mesmas informações recebidas no CTS, para que seus outros vizinhos fiquem cientes da reserva que foi realizada. Assim todos os nós, ao ouvirem CTSs e DTSs, podem montar um mapa com as reservas e realizar transmissões na faixa licenciada. A escolha do canal, da largura de faixa e da duração da reserva é o desafio no protocolo CMAC. Nesta avaliação, considerou-se que as reservas são sempre de um canal com largura de banda fixa e com duração necessária para a transmissão de um pacote de dados seguido do ACK. Desta forma, já foi possível simular o funcionamento de múltiplos rádios cognitivos acessando dinamicamente uma faixa licenciada com múltiplos canais.

Para simular os efeitos prejudiciais da influência dos rádios primários sobre os nós da rede de rádios cognitivos, foram instanciados pares de rádios primários virtuais. Cada par de primários virtuais possui um padrão de atividade do tipo ligado-desligado (ON-OFF). A duração dos períodos em que o par de primários ficava em ON e OFF era controlada por duas variáveis aleatórias independentes com distribuição exponencial. Este tipo de modelo já foi adotado em outros trabalhos presentes na literatura, como em [Wellens et al. 2009]. Desta forma, o padrão de atividade dos primários pode ser representado pela tupla  $\langle \mu_{on}; \mu_{off} \rangle$ , onde  $\mu_{on}$  e  $\mu_{off}$  são respectivamente os tempos médios em que o par de primários permanece nos estados ON e OFF.

Os efeitos da atividade dos primários sobre os nós da rede de rádios cognitivos foram simulados através da modificação dos canais disponíveis no mapa de reservas do protocolo CMAC. Quando um par de primários entra no estado ON, o seu canal é marcado como permanentemente reservado no mapa de reservas dos nós secundários que estão posicionados a uma distância menor que o *raio de interferência*  $R_I$  de um dos dois primários do par. Durante estes períodos, os nós secundários ficam impedidos de realizar transmissões naquele canal, garantindo que a comunicação dos primários não será interferida em nenhum momento. Desta forma, assume-se que os rádios cognitivos na simulação realizam um sensoriamento perfeito da faixa licenciada para determinar o padrão de atividade dos primários. Na prática, sabe-se que os mecanismos de detecção de primários podem apresentar erros de detecção. Este assunto representa toda uma grande área de pesquisa sobre rádios cognitivos [Yücek and Arslan 2009]. No caso do protocolo RoAD, o efeito de uma imprecisão na detecção dos rádios primários seria no cálculo do peso dos enlaces e na determinação imediata dos canais disponíveis. Ambos os casos podem aumentar o número de mudanças de rota devido à maior quantidade de quebras de enlace. Entretanto, a detecção imperfeita dos primários inserida pelos métodos de detecção é um problema que também afeta os outros protocolos de roteamento para redes de rádios cognitivos, e a sua solução está fora do escopo deste trabalho.

No simulador, implementou-se um protocolo de roteamento pela fonte (*Source Routing* - SR). Este protocolo utiliza o grafo da rede, com os respectivos pesos dos enlaces, como entrada para um algoritmo SPF que seleciona a rota de menor custo. Esta implementação serviu também de base para a posterior implementação do protocolo proposto RoAD, de acordo com o funcionamento descrito na Seção 4.

Além disso, também foi realizada a implementação do protocolo de roteamento SAMER. 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. Um dos problemas desta tarefa é a definição do parâmetro  $H$ . Valores altos de  $H$  permitem a formação de uma malha de encaminhamento densa e com muitas rotas. Entretanto, os custos computacionais associados a esta tarefa tornam-se muito elevados. Na versão do SAMER que foi implementada para esta avaliação, a malha de encaminhamento é formada por todas as rotas entre a fonte e o destino com número de saltos igual à rota mais curta. Todavia, de acordo com os resultados dos experimentos realizados, as malhas de encaminhamento criadas nesta versão do SAMER foram formadas na média por dezenas de rotas, que faziam os nós da malha de encaminhamento possuírem diversos próximos saltos candidatos.

### 5.1. Ambiente de Simulação e Metodologia

Para a avaliação foram gerados 50 cenários que consistiam no posicionamento aleatório de 30 nós cognitivos numa área quadrada de 1000 metros de lado. O posicionamento dos nós garantia a conectividade da rede, um grau máximo de 8, e uma distância mínima entre os nós que era a metade do seu alcance de comunicação. Os rádios cognitivos possuíam um alcance de 320 metros, e o protocolo CMAC utilizava canais de dados de 20 MHz na faixa licenciada e taxa de transmissão de 11 Mbps. Em todos os cenários foi simulado um fluxo de dados CBR com duração de 900 segundos, onde o nó fonte era o mais próximo da coordenada (0, 0) e o nó destino era aquele mais próximo da coordenada (1000, 1000). No início das simulações, antes de iniciar o fluxo de dados, foi adicionado um período de *warmup* de 50 segundos para permitir a convergência do cálculo dos pesos dos enlaces.

Os pares de nós primários 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, criaram-se duas regiões sob a influência de diferentes quantidades de primários que precisam ser atravessadas pelas rotas criadas. Estes cenários tornam muito pouco prováveis a existência de caminhos sem influência dos primários, sendo ideais para a avaliação do desempenho dos protocolos de roteamento para redes dinâmicas de rádios cognitivos. O raio de interferência dos rádios primários,  $R_I$ , foi configurado em 320 metros.

Em todos os gráficos são apresentadas curvas de desempenho para os protocolos **RoAD** e **SAMER**. Além disso, também foi simulada a escolha de rota utilizando-se a versão tradicional do protocolo de roteamento pela fonte (SR). Este protocolo foi simulado com duas métricas de roteamento distintas: métrica unitária (**SR-UNIT**), ou a métrica do protocolo RoAD que é proposta na Seção 4 (**SR-DISP**). Neste último caso, o SR-DISP será um subconjunto do protocolo RoAD, sem a funcionalidade de escolha de caminhos alternativos através da execução sob demanda do algoritmo DCA.

Os resultados obtidos são apresentados em função da quantidade de canais na faixa licenciada, da quantidade de pares de primários por canal existente no cenário, e

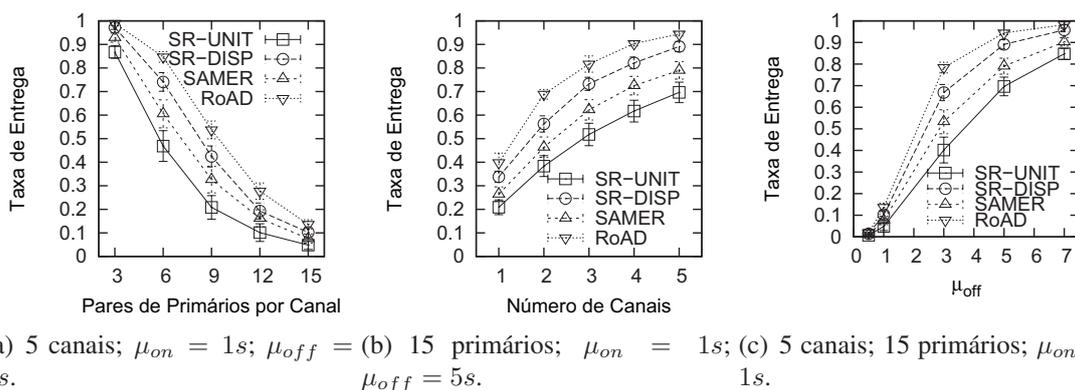


Figura 3. Taxa de entrega de pacotes.

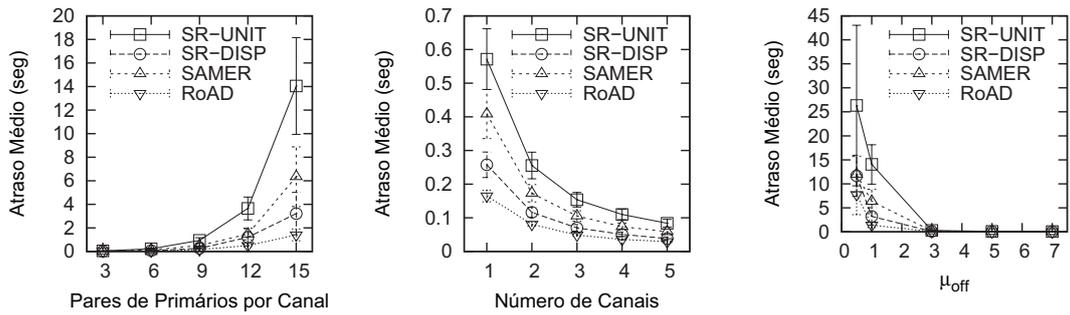
do padrão de atividade destes primários, através da escolha dos valores de  $\mu_{on}$  e  $\mu_{off}$ . As métricas de desempenho avaliadas foram taxa de entrega de pacotes, atraso médio e variação do atraso (*jitter*). Os gráficos apresentam as médias dos resultados nos 50 cenários, com intervalos de confiança de 95%.

## 5.2. Resultados

A Figura 3 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.

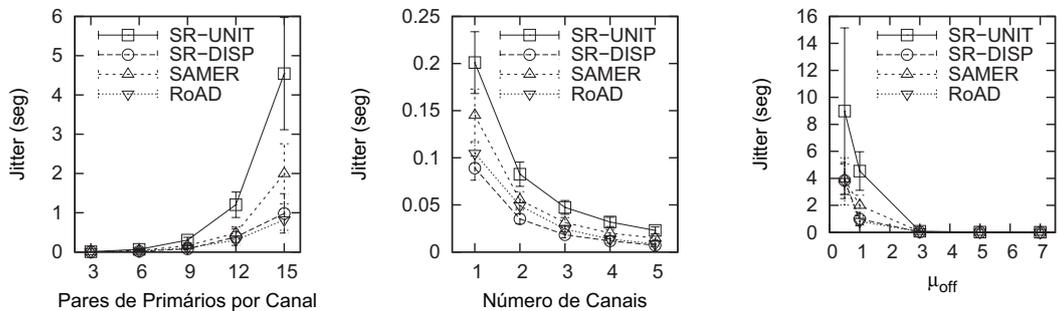
Comparando-se o desempenho das diferentes soluções de roteamento na Figura 3, percebe-se uma nítida vantagem do protocolo proposto RoAD sobre os demais. O fraco desempenho do SR-UNIT é fruto do uso da rota com menor número de saltos, que pode sofrer influência de diversos primários, o que diminui a quantidade 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 indica 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 [Pefkianakis et al. 2008a]. O protocolo SR-DISP foi o que mais se aproximou do desempenho do RoAD, justamente por utilizar a rota com maior disponibilidade para o encaminhamento dos pacotes. Em cenários onde a influência dos primários é heterogênea, a melhor rota é aquela mais disponível e 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 de entrega deste protocolo sobre o SR-DISP comprovam as vantagens de se 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 3, pode-se perceber que tanto a redução no número de canais, ou o aumento no número de primários, ou aumento da atividade dos primários, causam redução significativa na taxa de entrega. Isto era o esperado, pois nestes cenários existe uma redução na quantidade e na duração das oportunidades de acesso a faixa licenciada.



(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. Atraso médio fim-a-fim.**



(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 5. Variação do atraso (Jitter).**

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.

A Figura 4 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 na entrega de pacotes indica o uso de caminhos longos ou esperas em filas devido a contenção no encaminhamento. Para os resultados de atraso, 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 5 apresenta os resultados para o *jitter* médio. O *jitter* é a diferença de atraso entre os pacotes consecutivos, que indica possíveis instabilidades no encaminhamento 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.

Outros gráficos apresentando diferentes combinações de número de canais, de número de pares de primário por canal e diferentes combinações de  $\mu_{on}$  e  $\mu_{off}$  também foram obtidos. Para o artigo, devido à falta de espaço, foram selecionados aqueles que melhor justificam as observações sobre o desempenho dos mecanismos avaliados. Entretanto, os resultados omitidos também confirmam as observações feitas nesta Seção.

## 6. Conclusão e Trabalhos Futuros

O roteamento em redes dinâmicas de rádios cognitivos apresenta novos desafios ainda pouco explorados na literatura. Dependendo do padrão de atividade dos primários, a rede secundária pode sofrer frequentes quebras de enlace que tornam as rotas indisponíveis prejudicando o desempenho na entrega de pacotes. Logo, o roteamento neste tipo de rede precisa ser consciente da capacidade e do nível de disponibilidade dos enlaces, para realizar a escolha de rotas com alta disponibilidade que fornecerão melhor desempenho ao encaminhamento de pacotes.

Neste trabalho foi proposto o protocolo de roteamento RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade), que tem como foco as redes dinâmicas de rádios cognitivos. Este protocolo utiliza uma métrica de roteamento, que visa representar o nível de disponibilidade dos enlaces, permitindo a escolha da rota mais disponível. Entretanto, como até na rota mais disponível podem ocorrer interrupções 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.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar a avaliação de desempenho já realizada, através da implementação de outros protocolos de roteamento presentes na literatura, de outros modelos de representação da atividade dos primários e da avaliação do nível de influência de erros de sensoriamento da atividade dos primários. Além disso, também serão almejadas possíveis melhorias para o protocolo RoAD com a proposta de novas funcionalidades e novas métricas.

## Referências

Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., and Chowdhury, K. R. (2009). CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 7(5):810–836.

- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., and Mohanty, S. (2006). NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey. *Computer Networks*, 50(13):2127 – 2159.
- Cesana, M., Cuomo, F., and Ekici, E. (2011). Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions. *Ad Hoc Networks*, 9(3):228 – 248.
- Ding, L., Melodia, T., Batalama, S. N., Matyjas, J. D., and Medley, M. J. (2010). Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4):1969–1979.
- Ding, L., Melodia, T., Batalama, S. N., and Medley, M. J. (2009). 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*, pages 13–20.
- FCC (2009). Federal Communication Commission (FCC) Home Page. <http://www.fcc.gov> - último acesso em 8/3/2010.
- Khalife, H., Ahuja, S., Malouch, N., and Krunz, M. (2007). Joint routing and spectrum selection for multihop cognitive radio networks. Technical report, LIP6 - Université Pierre et Marie Curie - Paris 6.
- Khalife, H., Ahuja, S., Malouch, N., and Krunz, M. (2008). Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks. In *GLOBECOM '08: IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–5.
- Khalife, H., Malouch, N., and Fdida, S. (2009). Multihop cognitive radio networks: To route or not to route. *IEEE Network*, 23(4):20–25.
- NS-2. The network simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> - último acesso em 10/10/2010.
- Pefkianakis, I., Wong, S. H., and Lu, S. (2008a). SAMER: Spectrum aware mesh routing in cognitive radio networks. In *DySPAN '08: IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 1–5.
- Pefkianakis, I., Wong, S. H., and Lu, S. (2008b). Spectrum aware mesh routing in cognitive radio mesh networks. Technical Report TR 080024, Dept. of Computer Science - UCLA.
- Salameh, H. A. B., Krunz, M. M., and Younis, O. (2009). MAC protocol for opportunistic cognitive radio networks with soft guarantees. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(10):1339–1352.
- Wellens, M., Riihijärvi, J., and Mähönen, P. (2009). Modelling primary system activity in dynamic spectrum access networks by aggregated on/off-processes. In *IEEE Workshop on Networking Technologies for SDR Networks*.
- Yuan, Y., Bahl, P., Chandra, R., Moscibroda, T., and Wu, Y. (2007). Allocating dynamic time-spectrum blocks in cognitive radio networks. In *MobiHoc '07: 8th ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pages 130–139.
- Yücek, T. and Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1):116–130.