

Roteamento em Redes em Malha Híbridas de Rádios Cognitivos e IEEE 802.11*

Marcel William Rocha da Silva¹, José Ferreira de Rezende¹

¹GTA - 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. *Cognitive radios are devices that access the unused portions of licensed spectrum opportunistically. Therefore, depending on the licensed radios activity, the cognitive devices may suffer from constant communication disruptions or even lack of opportunities in the access of the spectrum. To solve this problem, we propose a new paradigm of interaction between 802.11 and cognitive radios to build hybrid mesh networks. In this proposed architecture every node has 802.11 interfaces, offering minimum spectrum access guarantees, and some special nodes possess additional cognitive radio interfaces, which have larger transmission range that may be opportunistically used to create cognitive shortcut links. Those shortcuts improve the hybrid network performance reducing the number of hops in routes and alleviating spectrum sharing in 802.11 channels. To enable those shortcuts, we propose a mechanism to discover and select the best shortcuts in the routes of hybrid networks. Simulation results show that this proposal performs well when compared to an optimal case.*

Resumo. *Os rádios cognitivos são dispositivos que acessam as faixas inutilizadas do espectro licenciado oportunisticamente. Portanto, dependendo da atividade dos dispositivos licenciados, os rádios cognitivos podem sofrer com constantes interrupções na sua comunicação ou com a falta de oportunidades de acesso ao espectro. Este trabalho propõe uma novo paradigma de integração entre rádios 802.11 e rádios cognitivos visando formar redes em malha híbridas. Nesta arquitetura todos os nós possuem interfaces 802.11, que oferecem garantias mínimas de comunicação, e alguns nós possuem interfaces de rádios cognitivo, que possuem maior alcance de transmissão e podem ser usadas para criar enlaces cognitivos de atalho. Estes atalhos têm o objetivo de reduzir o número de saltos e a contenção ao acesso no canal 802.11. Para a criação destes atalhos, propõe-se também um mecanismo para a descoberta e escolha dos melhores atalhos. As simulações comprovam que o mecanismo proposto apresenta bons desempenhos quando comparado ao caso ótimo.*

1. Introdução

O espectro de frequências vem se tornando um recurso cada vez mais escasso devido às políticas de gerenciamento do acesso. Visando solucionar este problema, o órgão norte-americano FCC (*Federal Communications Commission*) [FCC 2008a] trabalha no desenvolvimento de novas políticas de gerenciamento. Uma das medidas que será adotada em

*Este trabalho recebeu recursos da CAPES, CNPq, FAPERJ e FINEP.

fevereiro de 2009 é a liberação do acesso oportunista aos canais das bandas VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*) [FCC 2008b]. De acordo com esta nova regulamentação, os canais desta faixa do espectro sem atividade de sistemas licenciados podem ser utilizados por rádios oportunistas não-licenciados. No entanto, estes dispositivos oportunistas devem ser capazes de adaptar suas características de operação para evitar causar interferência nos rádios licenciados. Uma das tecnologias que viabilizam este novo tipo de política de acesso ao espectro são os rádios cognitivos.

Os rádios cognitivos são dispositivos capazes de detectar a presença de outros rádios, através de medições ou consultas a bancos de dados centralizados, e modificar suas características de operação para utilizar as oportunidades de acesso na faixa em questão [Akyildiz et al. 2006, Zhao and Sadler 2007]. Desta forma, estes rádios podem utilizar de maneira oportunista as faixas livres ou subutilizadas do espectro licenciado evitando causar interferência prejudicial ao funcionamento dos dispositivos licenciados da região. Isto minimiza o problema da ocupação ineficiente do espectro e atende as demandas por espectro das aplicações de redes sem fio. Entretanto, para viabilizar o funcionamento de redes sem fio de múltiplos saltos utilizando rádios cognitivos, usualmente chamadas de redes cognitivas, ainda existem alguns desafios que precisam ser superados [Akyildiz et al. 2006].

Um destes desafios é a falta de garantia de comunicação entre dispositivos cognitivos na faixa licenciada. Para que dois dispositivos cognitivos possam se comunicar na faixa licenciada, eles devem possuir uma oportunidade de acesso em comum, caso contrário a comunicação entre eles pode causar interferência nos rádios licenciados. Portanto, a comunicação entre estes rádios cognitivos será muito dependente da atividade dos rádios licenciados, usualmente denominados rádios primários. A atividade destes dispositivos primários pode causar constantes interrupções nas comunicações entre rádios cognitivos e, até mesmo, tornar inviável as comunicações entre eles. Logo, uma rede sem fio formada exclusivamente por rádios cognitivos acessando uma faixa licenciada pode ser inapropriada para diversos tipos de aplicações.

Levando em consideração a necessidade do uso de rádios cognitivos e o problema mencionado anteriormente, este trabalho propõe um novo paradigma de aplicação destes rádios em redes em malha sem fio através de sua integração com rádios 802.11. Tomando como base uma rede em malha 802.11, que é um tipo de rede muito estudado e utilizado em diversos cenários, rádios cognitivos podem ser adicionados em alguns nós da rede visando melhorar seu desempenho. Assim, a rede em malha sem fio passaria a ser uma rede híbrida, formada por rádios 802.11 e rádios cognitivos. Uma característica atraente da arquitetura proposta é que a rede em malha 802.11 pode ser utilizada para fornecer garantias mínimas de comunicação entre os nós. Além disso, o maior alcance dos rádios cognitivos pode ser explorado pelo roteamento da rede híbrida para desviar o tráfego das rotas da rede 802.11 e reduzir o número de saltos.

Sempre que dois ou mais nós em uma rota da rede 802.11 de base, denominada neste trabalho *rota 802.11*, possuírem uma interface cognitiva adicional, será possível criar enlaces entre estes rádios cognitivos com o objetivo de desviar o tráfego da rota 802.11 original. Desta forma, dois nós que possuem interface cognitiva, denominados *nós cognitivos*, podem estabelecer um “enlace cognitivo de atalho” para desviar o tráfego de uma rota 802.11 eliminando alguns saltos. A formação destes enlaces cognitivos de

atalho tem a finalidade de reduzir o número de saltos das rotas e a disputa pelo acesso ao meio no canal 802.11. Desta forma, o desempenho das comunicações em múltiplos saltos na rede híbrida pode ser aprimorado. Além disso, sempre que um enlace de atalho se tornar indisponível, devido a mudanças na atividade dos dispositivos primários da região, os enlaces da rota 802.11 subjacente que estavam sendo desviados podem voltar a ser utilizados imediatamente para dar continuidade à comunicação.

Para viabilizar o uso dos enlaces cognitivos de atalho em redes híbridas, este trabalho apresenta um novo mecanismo de *criação de atalhos* que opera sobre as rotas da rede 802.11 subjacente. Este mecanismo é composto por um protocolo para a descoberta de atalhos nas rotas 802.11, e um algoritmo baseado em heurísticas para a seleção do conjunto de atalhos que minimiza o número de saltos das rotas. Neste trabalho será realizada a avaliação do algoritmo de seleção de atalhos comparando-se diferentes tipos de acoplamento da proposta com o protocolo de roteamento da rede 802.11 subjacente.

O restante do texto está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta alguns trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta a arquitetura de rede em malha híbrida ressaltando suas principais características e vantagens. A Seção 4 explica a idéia de utilizar os enlaces cognitivos como atalhos nas rotas 802.11. Na Seção 5 serão apresentados o mecanismo de criação de atalhos e uma discussão sobre as diferentes maneiras de acoplar a criação de atalhos com o protocolo de roteamento da rede 802.11. Em seguida, na Seção 6, serão descritas as simulações realizadas para avaliar o desempenho do mecanismo proposto. E, por fim, na Seção 7 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado, poucos foram os trabalhos que propuseram idéias similares para o uso de rádios 802.11 em conjunto com rádios cognitivos [Stine 2005, Chowdhury and Akyildiz 2008]. Além disso, nenhum trabalho estudou ou propôs mecanismos para explorar o maior alcance dos rádios cognitivos em cenários híbridos. Em [Stine 2005], os autores apresentam a idéia 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 idéia não foi explorada e as possibilidades provenientes dela não foram avaliadas nem quantificadas.

Outro trabalho mais recente que utiliza o conceito de rede de rádios cognitivos capazes de utilizar a faixa licenciada e a faixa não-licenciada é apresentado em [Chowdhury and Akyildiz 2008]. 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 ser utilizado um canal da faixa licenciada ou da faixa ISM de 2,4 GHz. O objetivo do algoritmo é realizar um balanceamento das células que utilizam as faixas licenciada e ISM. 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 garantia de comunicação. Vale destacar que isto não seria possível no caso de redes cognitivas que utilizam apenas a faixa licenciada.

Considerando a necessidade de garantia de comunicação entre os nós de uma rede

em malha sem fio, a próxima seção apresenta a arquitetura de rede híbrida proposta.

3. Redes Híbridas com Rádios IEEE 802.11 e Rádios Cognitivos

Com já foi mencionado na Seção 1, um dos fatores que podem prejudicar ou inviabilizar a aplicação de rádios cognitivos em redes em malha é a falta de garantia de comunicação entre os nós. Como os dispositivos cognitivos são usuários secundários da banda licenciada, eles devem acessar o espectro licenciado de maneira oportunista, utilizando apenas os canais não utilizados pelos rádios licenciados. Se um canal que estava livre passa a ser utilizado por um dispositivo licenciado, o rádio cognitivo deve parar de utilizar este canal para as suas comunicações evitando interferir na comunicação do dispositivo licenciado. Portanto, a disputa pelo acesso a faixa licenciada entre os dispositivos cognitivos e primários não é justa. Esta injustiça pode causar freqüentes interrupções nos enlaces cognitivos ou, até mesmo, tornar os enlaces cognitivos indisponíveis temporariamente.

Uma idéia promissora para solucionar o problema da falta de garantia de comunicação é considerar o uso de rádios 802.11 em conjunto com os rádios cognitivos. 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 o acesso ao espectro de freqüências é compartilhado de maneira justa com outros dispositivos 802.11 através do protocolo de acesso ao meio CSMA/CA. 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 idéias apresentadas em [Stine 2005] e tem como objetivo definir uma rede com garantia de comunicação entre os nós, mesmo quando as oportunidades de comunicação utilizando a faixa licenciada são intermitentes, escassas ou inexistentes. Nesta arquitetura, todos os nós da rede híbrida possuem uma interface 802.11, operando na banda ISM de 2,4 GHz, e alguns nós especiais possuem uma interface cognitiva adicional, operando na banda UHF de 480 a 800 MHz. O uso da interface de rádio cognitivo tem o objetivo de aprimorar o desempenho da rede de maneira oportunista.

Para formar a topologia de base da rede híbrida, os nós utilizam a interface 802.11 para compor uma rede em malha 802.11 convencional. Os enlaces desta rede 802.11 são utilizados como alternativas imediatas sempre que uma oportunidade utilizada pelo rádio cognitivo se tornar indisponível, fornecendo garantias de comunicação entre os nós. Além disso, o maior alcance dos rádios cognitivos, que operam em freqüências menores que os rádios 802.11, pode ser explorado para a criação de enlaces cognitivos de atalho. Estes enlaces de atalho têm o objetivo de reduzir o número de saltos das rotas da rede 802.11 subjacente.

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma rede em malha híbrida. Neste cenário, os nós A, C, D, G e I da rede em malha 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

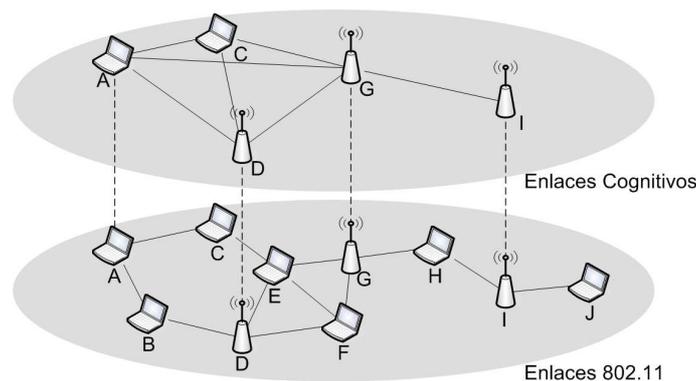


Figura 1. Exemplo de rede híbrida

saltos, ou seja, seriam 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. Estas interfaces permitem a composição de enlaces com maior alcance, como pode ser verificado pelos enlaces apresentados na rede cognitiva sobreposta da Figura 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 um caminho híbrido, utilizando enlaces 802.11 e enlaces cognitivos. Além disso, se um dos enlaces cognitivos se torna indisponível, os pacotes em trânsito podem ser imediatamente encaminhados pelos enlaces 802.11 da rota original. Por exemplo, se o enlace cognitivo entre G e I se torna indisponível, os enlaces 802.11 entre G, H e I podem ser utilizados como alternativa imediata. Desta forma, a comunicação se torna mais imune às possíveis frequentes interrupções nos enlaces cognitivos.

As próximas duas seções apresentam, respectivamente: as vantagens da proposta de criação de atalhos, e o mecanismo proposto para a descoberta e seleção de atalhos em rotas 802.11 de redes híbridas.

4. Atalhos em Rotas

Um dos fatores que afetam o desempenho das comunicações em uma rede em malha 802.11 é o número de saltos entre a origem e o destino. Este problema é causado pela interferência intra-fluxo, que é a disputa pelo acesso ao meio entre pacotes de um mesmo fluxo. Além disso, o grande número de encaminhamentos necessários para que um quadro alcance seu destino aumenta o atraso fim-a-fim e a disputa pelo acesso ao meio entre os nós.

A Figura 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. Considerando 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

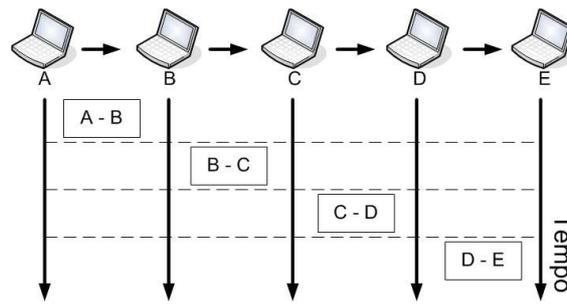


Figura 2. Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E

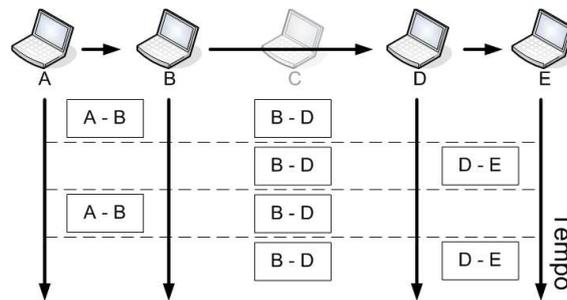


Figura 3. Transmissão em múltiplos saltos do nó A para o nó E com atalho utilizando os nós B e D

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 utilizando um canal da banda licenciada disponível para ambos. A Figura 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 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 comunicação pode ser realizada com um menor número de saltos, o que aumenta a vazão e reduz o atraso fim-a-fim.

Além destas vantagens mencionadas, 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. Isto ocorre, pois cada transmissão realizada com as interfaces cognitivas na faixa licenciada representa uma transmissão a menos realizada no canal da faixa não licenciada de 2,4 GHz utilizado pelas interfaces 802.11. Assim, a criação e o uso dos atalhos também têm o efeito benéfico de reduzir a carga no canal 802.11, o que reduzirá a disputa no acesso ao meio, melhorando o desempenho das comunicações realizadas na rede.

5. Mecanismo de Criação de Atalhos

O mecanismo para a criação de atalhos em rotas 802.11 proposto neste trabalho possui dois componentes: um protocolo para a descoberta de atalhos nas rotas através do envio

de sondas, e um algoritmo baseado em heurísticas para selecionar os atalhos que devem ser utilizados.

Inicialmente, os nós da rede híbrida devem iniciar sua comunicação através da rede 802.11 subjacente. Quando os nós cognitivos presentes na rota 802.11 escolhida detectam que participam do encaminhamento de dados deste fluxo, 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 rádios 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 [Cordeiro and Challapali 2007, Kondareddy and Agrawal 2008], 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, um novo período de sondagem pode ser iniciado, onde os nós cognitivos passam a enviar periodicamente novas sondas pela 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 os possíveis atalhos.

De posse de todos os atalhos da rota, e considerando que o protocolo de roteamento 802.11 fornece conhecimento da rota 802.11 completa, um algoritmo de seleção de atalhos pode ser executado pelo nó cognitivo mais próximo da origem do fluxo para determinar qual a melhor combinação de atalhos. A solução ideal para o conjunto de atalhos que minimiza o tamanho da rota não é trivial. Uma maneira de determiná-la seria através de uma varredura extensiva, mas tal algoritmo seria muito custoso, com complexidade $O(A^A)$, onde A é o número total de atalhos na rota. Portanto, uma heurística simplificada foi desenvolvida como alternativa para o problema de seleção dos melhores atalhos.

A heurística proposta é apresentada em Algoritmo 1. A lista $atalhos(A)$ é ordenada pelos atalhos mais próximos da origem do fluxo. No final de sua execução, o algoritmo determina a lista de atalhos *selecionados* que combinados geram a rota híbrida com o menor número de saltos dentre as possíveis soluções testadas. Este algoritmo possui complexidade $O(A^2)$, que é bem menor que a complexidade do algoritmo de varredura por força bruta. Após o término do algoritmo, a decisão sobre os atalhos selecionados pode ser enviada diretamente para os nós que irão participar dos enlaces de atalho através de uma mensagem de controle específica.

Vale destacar que a execução do algoritmo de seleção não impede que os pacotes do fluxo sejam enviados através da rota 802.11 convencional que já está formada. Entretanto, quanto mais rápido e eficiente for o algoritmo na determinação dos atalhos, mais rapidamente os atalhos podem passar a ser utilizados, reduzindo o tempo em que o desempenho do fluxo fica limitado ao desempenho da rede 802.11 subjacente.

5.1. Acoplamento 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 opera sobre as rotas utilizadas na rede 802.11. Desta forma, as rotas híbridas ficam sempre acopladas a rotas da rede 802.11, permitindo que as interrupções nos enlaces cognitivos de atalho possam ser sanadas imediatamente através

Notação:

A = número total de atalhos; $atalhos(A)$ = lista ordenada de atalhos;
 $temp$, $selecionados$ = listas de atalhos (inicialmente vazias).

Algoritmo:

```
foreach atalho  $i$  em  $atalhos(A)$  do  
   $temp = \emptyset$ ;  
  for atalho  $j = i + 1$  em  $atalhos(A)$  to atalho  $j = A$  do  
    if atalho  $j$  pode compor uma rota com atalho  $i$  then  
      atalho  $j$  é adicionado em  $temp$ ;  
      atalho  $i =$  atalho  $j$ ;  
    end  
  end  
  if rota híbrida composta pelos atalhos em  $temp$  é menor que a rota  
  híbrida composta pelos atalhos em  $selecionados$  then  
     $selecionados = temp$ ;  
  end  
end
```

Algoritmo 1: Heurística para a seleção de atalhos

dos enlaces 802.11. Entretanto, dependendo da rota formada pelo protocolo de roteamento da rede 802.11, o mecanismo de descoberta e escolha de atalhos trabalha limitado apenas às oportunidades de atalho presentes naquela rota 802.11.

Para avaliar o impacto deste acoplamento apresentamos três diferentes abordagens para a criação de rotas híbridas. Nas duas primeiras, o mecanismo de criação de atalhos pode ser utilizado. Na terceira abordagem, apresentamos uma maneira de criar rotas híbridas utilizando um protocolo de roteamento 802.11 modificado, que descobre rotas híbridas ótimas. Entretanto, nesta abordagem as rotas híbridas não possuirão rotas alternativas acopladas apenas com enlaces 802.11, o que torna a abordagem vulnerável a problemas de freqüentes interrupções nos enlaces cognitivos.

5.1.1. Abordagem 1

Na primeira abordagem, o processo de descoberta de rotas na rede 802.11 de base não é influenciado pela existência dos nós cognitivos. Neste caso, a rede 802.11 realiza a descoberta de rotas através de um protocolo de roteamento convencional e estas rotas são utilizadas diretamente pelo mecanismo de criação de atalhos. Este tipo de abordagem tem a vantagem de ser simples e não demandar que nenhuma mudança no protocolo de roteamento da rede 802.11 subjacente. Entretanto, a quantidade de atalhos disponíveis nestas rotas pode ser baixa, limitando o desempenho do mecanismo de descoberta e seleção de atalhos para a criação das rotas híbridas.

5.1.2. Abordagem 2

Por não levar em conta a existência dos nós cognitivos, a primeira abordagem apresenta desvantagens. As rotas descobertas pelo protocolo de roteamento 802.11 podem apresen-

tar poucos nós cognitivos ou, até mesmo, os rádios cognitivos presentes na rota podem possuir poucas oportunidades de acesso à faixa licenciada. Portanto, a segunda abordagem considera que o protocolo de roteamento 802.11 leva em conta informações sobre os rádios cognitivos da rede híbrida. Com isso, a rede 802.11 formaria rotas que possivelmente teriam maior número de saltos, mas que permitiriam maior flexibilidade para o mecanismo de criação de atalhos.

Uma maneira de determinar rotas 802.11 com maior predisposição para a criação de atalhos é utilizar novas métricas para atribuir pesos aos enlaces de um protocolo de roteamento proativo, como por exemplo, o OLSR (*Optimized Link State Routing*) [Clausen et al. 2003]. Neste tipo de protocolo de roteamento são os pesos que determinam como as rotas serão criadas. Utilizando o envio de mensagens de inundação em *broadcast*, cada um dos nós da rede consegue obter uma visão global de todos os enlaces e de seus pesos. De posse desta informação, um algoritmo de determinação de caminhos com menor custo, como por exemplo, o algoritmo *Shortest Path First* [Huitema 1999], também conhecido como *Dijkstra*, pode ser utilizado para determinar qual a melhor rota com o menor custo para cada destino.

Seguindo esta abordagem, apresentamos três métricas para a atribuição dos pesos dos enlaces da rede 802.11. As duas primeiras métricas são baseadas apenas em informações dos vértices que formam o enlace e os pesos dos enlaces são simétricos. Na primeira, nomeada NUMCR, o peso do enlace 802.11 é determinado pela quantidade de nós cognitivos participando do enlace. Este número, representado pelo parâmetro CR na equação 1, pode ter valor 0, 1 ou 2, o que irá atribuir pesos aos enlaces de valor 1, $1/2$ ou $1/3$, respectivamente. O objetivo desta métrica é formar rotas que preferencialmente possuem maior quantidade de rádios cognitivos, o que aumentaria a probabilidade de existirem enlaces cognitivos de atalho na rota 802.11.

$$Peso_{NUMCR} = \frac{1}{CR + 1} \quad (1)$$

A segunda métrica, denominada PERCENTOP, além de levar em conta se os nós que formam o enlace são cognitivos, também contabiliza o percentual de oportunidades disponíveis na faixa licenciada para cada vértice. Este valor percentual é dado pela quantidade de oportunidades disponíveis dividida pela quantidade total de oportunidades. Na equação 2, a porcentagem de oportunidades para o nó i é representada pelo parâmetro OP_i . Desta forma, a métrica determina pesos maiores para enlaces 802.11 cujos vértices são nós cognitivos e que possuem maiores quantidades de oportunidades disponíveis para o acesso à faixa licenciada.

$$Peso_{PERCENTOP} = \frac{1}{OP_i + OP_j + 1} \quad (2)$$

Em uma terceira métrica, nomeada NHOP, considera-se que os nós cognitivos realizam inundações periódicas e controladas em N saltos na rede 802.11. Ao receber as mensagens de inundação por um enlace, um nó contabiliza quantas mensagens de nós diferentes foram recebidas e utiliza este valor para calcular o peso do enlace. O cálculo é realizado através da equação 3, onde $FLOOD(i, j)$ é o contador de quantas mensagens

de nós distintos e que não são vizinhos de i que foram recebidas pelo nó i através do nó j . Assim, o peso do enlace de i para j será determinado pela quantidade de rádios cognitivos distintos que podem ser alcançados através deste enlace em N saltos.

$$Pes_{NHOP}(i, j) = \frac{1}{FLOOD(i, j) + 1} \quad (3)$$

5.1.3. Abordagem 3

Outra maneira de criar rotas híbridas seria modificar o funcionamento do protocolo de roteamento da rede para obtê-las diretamente. Para isto, o protocolo de roteamento poderia utilizar todos os enlaces da rede híbrida como entrada para o algoritmo *Dijkstra*, incluindo enlaces 802.11 e enlaces cognitivos. Atribuindo peso unitário a todos os enlaces, o protocolo de roteamento 802.11 seria utilizado diretamente para descobrir as rotas com menor número de saltos da rede híbrida.

Fica evidente que esta terceira abordagem é a mais eficiente na tarefa de descobrir rotas híbridas com o menor número de saltos. Entretanto, esta abordagem apresenta a desvantagem de que as rotas híbridas criadas não possuem rotas alternativas formadas exclusivamente por enlaces 802.11. Desta forma, no caso de interrupções nos enlaces cognitivos, não seria possível contar com a existência imediata de uma rota alternativa na rede 802.11 subjacente para encaminhar os pacotes. Se a disponibilidade dos enlaces cognitivos varia muito devido à atividade dos rádios primários, as rotas híbridas criadas na terceira abordagem teriam um curto tempo de vida. Além disso, como não existe um próximo salto alternativo imediato na rede 802.11, será necessário que o protocolo de roteamento realize uma nova descoberta de rota. Este problema reduz a qualidade das comunicações na rede híbrida e pode aumentar a sobrecarga no protocolo de roteamento, devido às constantes “quebras” de rota. Portanto, esta solução de roteamento é inadequada para a rede híbrida proposta, pois inviabiliza sua principal vantagem que é a maior garantia de comunicação ininterrupta entre os nós.

6. Simulações

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da heurística de seleção de atalhos. Para isto, foi desenvolvido um simulador que gera cenários de rede híbrida, como descrito na Seção 3. Este simulador gera um grafo para representar a topologia completa da rede, composta por enlaces 802.11 e enlaces cognitivos. Os enlaces 802.11 do grafo servem de entrada para a execução do algoritmo de *Dijkstra*, simulando o funcionamento de um protocolo de roteamento proativo na parte 802.11 da rede híbrida. Além disso, o simulador também é capaz de executar a heurística de seleção de atalhos sobre as rotas 802.11 criadas usando como entrada os enlaces cognitivos do grafo existentes naquela rota, como descrito na Seção 5.

Para a avaliação foram implementadas as três abordagens descritas na Seção 5.1. Para as duas primeiras abordagens as diferentes métricas para a atribuição de pesos aos enlaces foram utilizadas nos enlaces 802.11: peso unitário, NUMCR, PERCENTOP e NHOP. Para a terceira abordagem, utilizamos o grafo completo da rede híbrida como entrada para o algoritmo de *Dijkstra*. Apesar de ser uma solução que inviabiliza a principal

funcionalidade da arquitetura de redes híbridas proposta, esta abordagem servirá de meta de desempenho para o algoritmo de seleção de atalhos proposto.

6.1. Ambiente de Simulação e Metodologia

Para as simulações realizadas foram gerados 30 cenários com uma área quadrada de 500 metros de lado, onde 100 nós foram posicionados aleatoriamente garantindo-se as seguintes restrições: que os nós estivessem sempre no alcance de algum outro nó já presente no cenário, que o grau de vizinhança de todos os nós não ultrapassasse um limite máximo, e que uma distância mínima entre os nós fosse respeitada. Desta forma, foram gerados 30 cenários totalmente conexos onde os nós ficavam espaçados e com poucas aglomerações, representando cenários de rede em malha de uma grande empresa, de um bairro residencial ou de um centro urbano, onde os nós estão posicionados dentro de escritórios ou residências. Para todas as simulações, o alcance do rádio 802.11 foi definido em 80 metros, o grau máximo definido em 6 e a distância mínima entre os nós em 20 metros. Além disso, todos os resultados apresentados são as médias das simulações utilizando os 30 cenários, com intervalos de confiança de 95%.

Em cada cenário de simulação, dentre os 100 nós existentes, alguns são escolhidos como nós especiais que possuem uma interface cognitiva adicional. Este percentual de nós cognitivos foi variado entre zero e 100, que seriam, respectivamente, os casos extremos onde nenhum, ou todos, os 100 nós possuem interface cognitiva adicional. O alcance de transmissão do rádio cognitivo na faixa licenciada é definido em função do alcance do rádio 802.11. Para isto, o alcance dos rádios cognitivos é determinado por um parâmetro que indica quantas vezes este alcance é maior que o alcance do rádio 802.11, denominado **fatorCR**. Foram executadas simulações com **fatorCR** 3 e 5, que para um modelo de propagação em espaço livre seria o correspondente à considerar o uso de frequências de operação variando de 480 MHz até 800 MHz. Estas frequências representam, aproximadamente, os limites de uma das faixas UHF que serão liberadas ao acesso oportunista pelo FCC.

Outro parâmetro importante no cenário é a disponibilidade de oportunidades na faixa licenciada. Para cada nó cognitivo foram disponibilizados 10 canais na faixa licenciada. Para representar a atividade de outros dispositivos licenciados na região, a disponibilidade de cada canal para um nó cognitivo foi determinada através do sorteio de uma variável aleatória uniforme entre zero e um que era comparada com um limiar predefinido. Este limiar representa a probabilidade do canal estar disponível para o nó cognitivo. Em todas as simulações que serão apresentadas a probabilidade utilizada foi de 50%.

6.2. Resultados

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados para o tamanho médio das rotas em função do percentual de nós cognitivos, em cenários com **fatorCR** 3 e 5, respectivamente. O tamanho médio das rotas é dado pela média do número de saltos de todas as rotas entre todos os pares origem-destino do cenário avaliado. Como o objetivo do mecanismo de criação de atalhos é reduzir o número de saltos das rotas, esta é uma métrica importante para a avaliação. As curvas do gráfico representam os resultados para cada uma das abordagens descritas na Seção 5.1, para rotas somente com enlaces 802.11 e depois da execução do algoritmo proposto para a seleção de atalhos. Vale destacar que, para o caso da segunda abordagem, são apresentados resultados para as três métricas de roteamento

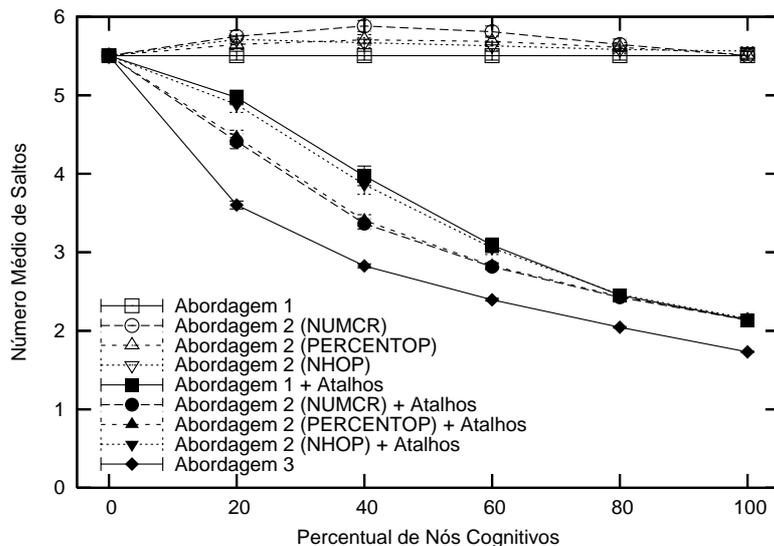


Figura 4. Tamanho médio das rotas em função do percentual de nós cognitivos com fatorCR 3

apresentadas na Seção 5.1.2. E, além disso, para a terceira abordagem é apresentada apenas uma curva, pois o algoritmo de seleção de atalhos não é utilizado neste caso.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5, pode-se perceber que em todos os casos o aumento da quantidade de rádios com interface cognitiva causou uma redução do número de saltos médio das rotas que utilizam os enlaces cognitivos. Este comportamento era o esperado, uma vez que o maior alcance do rádio cognitivo permite criar enlaces mais longos e reduzir o número de saltos entre os nós. Uma observação interessante é que o uso do algoritmo de seleção de atalhos apresenta uma tendência que acompanha o resultado obtido com o mecanismo ótimo da terceira abordagem, principalmente no caso da abordagem 2 utilizando as métricas NUMCR ou PERCENTOP. Este comportamento é importante porque indica que o algoritmo de seleção de atalhos proposto consegue se equiparar à abordagem 3. Para o cenário onde 40 dos 100 nós possuem interface cognitiva, e com **fatorCR 5**, a segunda abordagem utilizando a métrica NUMCR ou PERCENTOP diminui de pouco mais de 5 e meio saltos para pouco menos de 3 saltos o tamanho médio das rotas depois da execução do algoritmo de criação de atalhos. Neste caso, o desempenho do algoritmo de seleção apresenta uma diferença de, apenas, meio salto na média acima do resultado obtido com a abordagem 3.

Dentre os resultados obtidos com as abordagens 1 e 2, percebe-se que a segunda abordagem consegue uma melhoria de desempenho significativa na redução do número de saltos médio utilizando as métricas NUMCR e PERCENTOP. Este comportamento comprova que o uso de informação a respeito dos rádios cognitivos durante o processo de formação das rotas fornece ganhos de desempenho. No caso da métrica NHOP, que apresenta um desempenho baixo e próximo da primeira abordagem, foi considerado que a inundação utilizada para calcular os pesos dos enlaces era feita em dois saltos ($N = 2$). Também foram realizadas simulações com outros valores de N , mas os resultados foram sempre piores que os apresentados. Isto mostra que o fato de um maior número de rádios cognitivos serem alcançados através de um enlace não indica que as rotas formadas

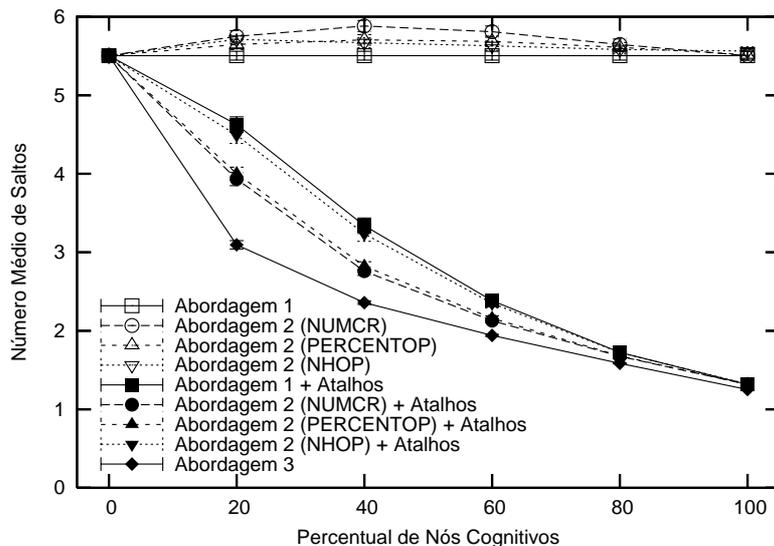


Figura 5. Tamanho médio das rotas em função do percentual de nós cognitivos com fatorCR 5

através dele serão boas para a criação de atalhos visando reduzir o número de saltos. Portanto, mais vale utilizar as métricas mais simples NUMCR e PERCENTOP, que possuem significado local ao enlace, do que outra que demanda o envio adicional de informação e não fornece ganhos da redução do número de saltos.

Comparando-se os resultados para **fatorCR 3** e **5**, pode-se perceber que o comportamento para todos os casos foi o mesmo, ocorrem mudanças apenas nos valores absolutos. O uso dos enlaces cognitivos com alcance 5 vezes maior que o rádio 802.11 permitiu a formação de novas rotas de menor tamanho que o caso onde a razão foi de 3. Isto ocorre porque com o aumento do alcance do rádio cognitivo, melhores atalhos podem ser criados, o que reduz ainda mais o tamanho das rotas.

7. Conclusões

O rádio cognitivo é a tecnologia que pode solucionar o problema de ineficiência de alocação do espectro de frequências promovendo o uso oportunista dos canais não utilizados pelos dispositivos licenciados. Entretanto, para o sucesso desta tecnologia, é necessário que os dispositivos possuam algum tipo de garantia de acesso ao meio, mesmo quando a atividade dos rádios licenciados impede o acesso à banda licenciada. Neste trabalho, foi proposta uma nova arquitetura de rede híbrida formada por rádios cognitivos e rádios 802.11. O uso da rede 802.11 fornece as garantias mínimas para o acesso ao espectro independente da atividade dos rádios licenciados. Além disso, o maior alcance dos rádios cognitivos presentes no cenário pode ser explorado para a redução do número de saltos das rotas da rede 802.11 através da criação de atalhos. Com isto, diminui-se o problema da interferência intra-fluxo e reduz-se a disputa no acesso ao meio no canal 802.11.

Considerando as vantagens de se criar atalhos nas rotas 802.11, outra contribuição deste trabalho, é um mecanismo para a descoberta e seleção dos atalhos com o objetivo de reduzir o número de saltos das rotas. Este mecanismo funciona sobre as rotas da rede

802.11 subjacente a rede híbrida e permite que enlaces cognitivos de atalho sejam criados e utilizados de maneira oportunista, sem que a garantia de comunicação através da rede 802.11 seja perdida. Através de simulações, o algoritmo de seleção de atalhos proposto foi comparado com outro tipo de abordagem para a criação de rotas híbridas, que inviabiliza algumas das vantagens da rede híbrida, mas que descobre rotas ótimas. De acordo com os resultados obtidos, o algoritmo proposto se mostrou eficiente na maioria dos cenários, conseguindo acompanhar a tendência do mecanismo ótimo.

Para dar continuidade ao trabalho, novas avaliações serão realizadas levando em conta outros objetivos diferentes da redução do número de saltos, como por exemplo, vazão agregada da rede ou atraso fim-a-fim. Além disso, também se pretende desenvolver novas métricas para a atribuição de pesos aos enlaces da rede 802.11 visando formar rotas com maior predisposição para a formação de atalhos.

Referências

- 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.
- Chowdhury, K. R. and Akyildiz, I. F. (2008). Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1):168–181.
- Clausen, T., Jacquet, P., Adjih, C., Laouiti, A., Minet, P., Muhlethaler, P., Qayyum, A., and L.Viennot (2003). Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626. Network Working Group.
- Cordeiro, C. and Challapali, K. (2007). 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*, pages 147–157.
- FCC (2008a). Federal Communication Commission (FCC) Home Page. <http://www.fcc.gov> - último acesso em 13/11/2008.
- FCC (2008b). Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band. http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-08-260A1.pdf - último acesso em 17/11/2008.
- Huitema, C. (1999). *Routing in the Internet*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Kondareddy, Y. R. and Agrawal, P. (2008). Synchronized MAC Protocol For Multi-Hop Cognitive Radio Networks. In *ICC '08: IEEE International Conference on Communications*, pages 3198–3202.
- Stine, J. A. (2005). Spectrum Management: The Killer Application of Ad Hoc and Mesh Networking. *DySPAN '05: IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pages 184–193.
- Zhao, Q. and Sadler, B. M. (2007). A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing, Networking, and Regulatory Policy. *IEEE Signal Processing Magazine*, pages 79–89.