

# Roteamento em Redes Cognitivas: Desafios e Taxonomia

Eduardo Pagani Julio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)  
ejulio@ic.uff.br

**Resumo.** *Com o aumento do uso de dispositivos móveis, o espectro de rádio frequência vem sendo cada vez mais requisitado. Mas a limitada disponibilidade e a ineficiência de sua utilização geram demandas por novos mecanismos e paradigmas de comunicação que explorem o espectro existente de maneira mais eficaz. As redes cognitivas representam uma tecnologia de rede que aumenta a eficiência da alocação espectral, por meio do acesso oportunista às faixas de frequência. Nessas redes, o roteamento necessita de maiores informações para gerar suas rotas, em função da disponibilidade do espectro. Este trabalho descreve os desafios e uma taxonomia das propostas atuais para o roteamento em redes cognitivas.*

## 1. Introdução

A limitada disponibilidade de espectro e a ineficiência de sua utilização geram demandas por novos mecanismos e paradigmas de comunicações que explorem o espectro existente de maneira mais eficaz [1,2]. As Redes Cognitivas, também denominadas Redes de Rádios Cognitivos ou Redes sem fio de Próxima Geração [5,6], representam uma tecnologia de rede que aumenta a eficiência da alocação espectral, por meio do acesso oportunista às faixas de frequência.

Em [2] é apresentada uma medição do uso do espectro no centro da cidade de Berkeley. A Ilustração 1 apresenta o gráfico da densidade espectral de potência obtida, que indica uma baixa utilização do espectro alocado, especialmente entre de 3 a 6 GHz.

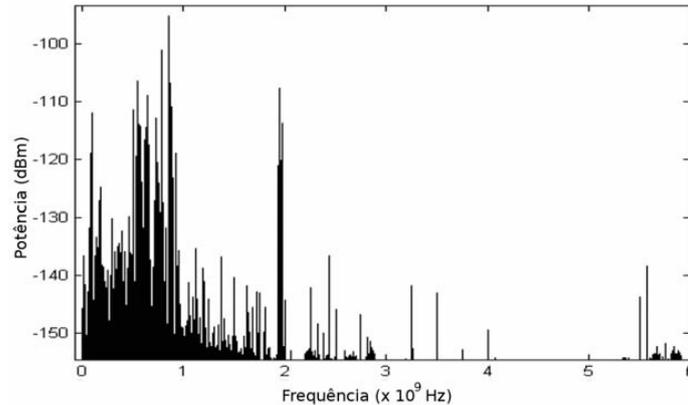
As redes cognitivas fornecem aos usuários móveis uma grande largura de banda por meio do uso de técnicas de acesso dinâmico ao espectro sobre arquiteturas heterogêneas de redes sem fio. Essa nova tecnologia permite uma utilização mais eficiente do espectro.

A principal tecnologia empregada no desenvolvimento da infra-estrutura de redes cognitivas são os Rádios Cognitivos (*Cognitive Radios*) [3,4], que também fornecem a capacidade de utilizar ou compartilhar o espectro de uma maneira oportunista. No entanto, enquanto os rádios cognitivos atuam apenas nas camadas física e de enlace do modelo de referência ISO/OSI, as redes cognitivas cobrem todas as

---

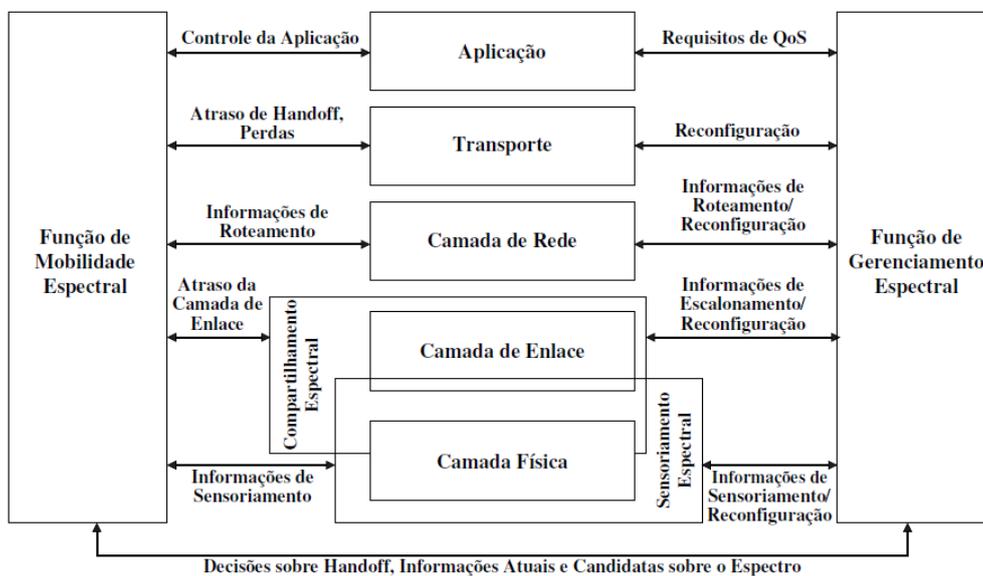
<sup>1</sup> Trabalho apresentado como parte da avaliação da disciplina Redes de Computadores do Programa de Pós-Graduação em Computação do IC/UFF

camadas deste modelo, utilizando uma abordagem de relacionamento entre camadas em seu projeto (*cross-layer design*), para um desempenho ótimo [6].



**Ilustração 1: Baixa utilização do espectro entre 3 e 6 GHz em Berkley [2].**

Os componentes de comunicação de uma rede cognitiva e suas interações são apresentadas na Ilustração 2 [1]. As funções de sensoriamento e compartilhamento espectral interagem entre si para melhorar a eficiência da alocação de faixas do espectro, interagindo com as camadas física e de enlace. Por sua vez, as funções de gerenciamento e mobilidade espectral atuam sobre todas as camadas do modelo OSI, obtendo informações e mudando suas configurações de acordo com a natureza dinâmica do espectro.

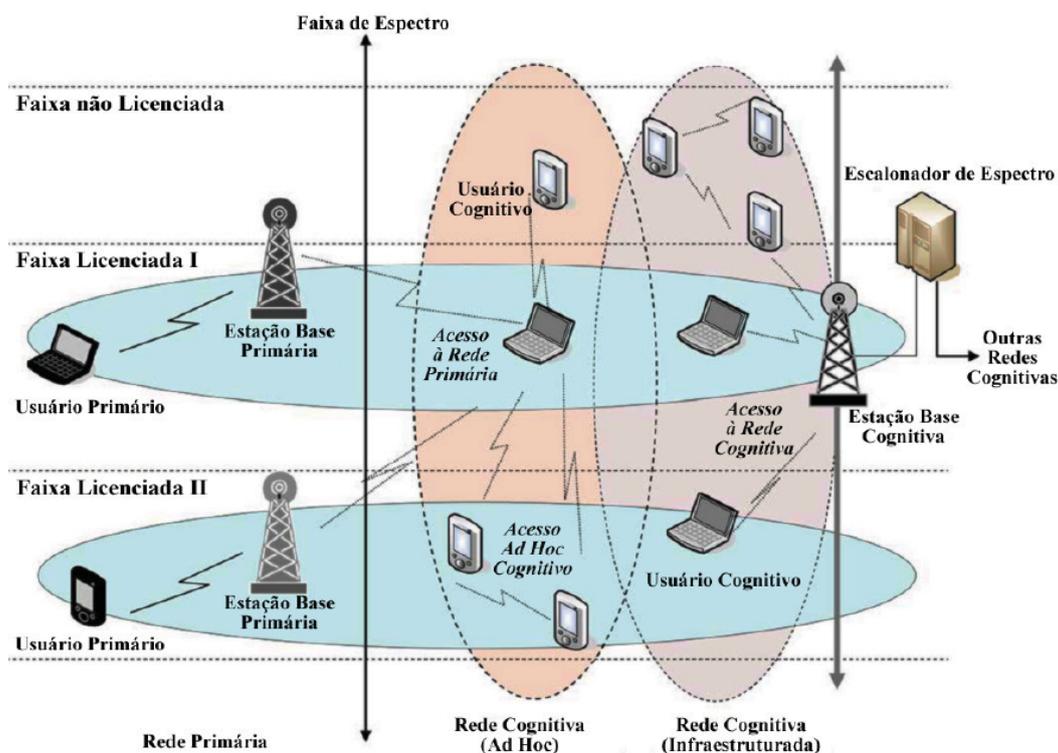


**Ilustração 2: Funcionalidades de comunicação de uma rede cognitiva [1].**

## 2. Arquitetura de Redes Cognitivas

A Ilustração 3 apresenta a arquitetura geral das redes cognitivas proposta em [2]. Em um ambiente de redes cognitivas, algumas porções do espectro estão licenciadas para diferentes propósitos, enquanto outras permanecem não licenciadas. Dessa forma, os

componentes da arquitetura geral de redes cognitivas podem ser classificados como primários ou licenciados e cognitivos ou não licenciados.



**Ilustração 3: Arquitetura de redes cognitivas [2].**

Os elementos básicos das redes primárias e cognitivas são definidos a seguir [2]:

- Rede Primária – infra-estrutura de rede já existente e que tem direitos de acesso exclusivos a certa faixa do espectro (como redes de celulares e de televisão). Seus componentes são:
  - Usuário Primário: um usuário primário (ou licenciado) tem licença para operar em uma determinada faixa do espectro. Seu acesso não deve ser afetado por transmissões de usuários não licenciados. Esses usuários não necessitam modificar sua infra-estrutura para coexistir com estações rádio base e usuários cognitivos;
  - Estação Rádio base Primária: componente fixo da infra-estrutura de rede que tem licença de acesso ao espectro. A estação rádio base primária não apresenta capacidade cognitiva para o compartilhamento do espectro com usuários cognitivos;
- Rede Cognitiva ou Secundária – infra-estrutura de rede que não tem licença para operar em uma determinada faixa. Seu acesso ao espectro é realizado somente de maneira oportunista. As redes cognitivas podem operar em modo infra-estruturado ou *ad hoc*. Os componentes de uma rede cognitiva são:
  - Usuário Cognitivo, Secundário ou não Licenciado: usuário que não tem nenhuma licença de uso do espectro. Faz uso das funcionalidades de

compartilhamento de faixas licenciadas do espectro para realizar comunicações;

- Estação Rádio Base Cognitiva, Secundária ou não Licenciada: componente fixo da infra-estrutura da rede cognitiva. A estação rádio base cognitiva fornece mecanismos de conexão de salto único aos usuários cognitivos. Por meio das estações base, um usuário cognitivo pode ter acesso à rede fixa e a outras redes cognitivas;
- Escalonador de Espectro: os dispositivos de uma rede cognitiva capturam sua visão local da atividade espectral. Essa informação pode ser diretamente compartilhada entre eles ou agregada em uma base de dados central que provê informações sobre os emissores locais, as políticas de acesso e a área em que os sinais são transmitidos [21]. O escalonador de espectro é uma entidade central da rede responsável pelo armazenamento dessas informações, além de organizar o acesso aos recursos espectrais entre diferentes redes cognitivas. Ele é um gerenciador de informações de recursos espectrais, e permite a coexistência entre múltiplas redes cognitivas.

### **3. Desafios de Roteamento em Redes Cognitivas**

Enquanto os rádios cognitivos estabelecem com sucesso os enlaces para as transmissões sem fio oportunistas, a principal função das redes cognitivas se encontra no projeto da camada de rede, especialmente no roteamento. Isso se deve, primordialmente, ao fato de diversas outras questões de projeto, como controle de fluxo, gerenciamento de recursos de rádio e da mobilidade da rede serem baseadas nessa funcionalidade [1].

Neste cenário, o problema do roteamento em redes cognitivas busca a criação e a manutenção dos caminhos entre usuários secundários decidindo os nós que farão parte do caminho, e o espectro usado por cada enlace. Esse problema é semelhante aos das redes *ad hoc* e em malha, mas com um desafio adicional de ter que lidar com a transmissão simultânea do usuário primário, mudando dinamicamente em função das oportunidades de espectro.

Os principais desafios encontrados no roteamento em redes cognitivas são [8]:

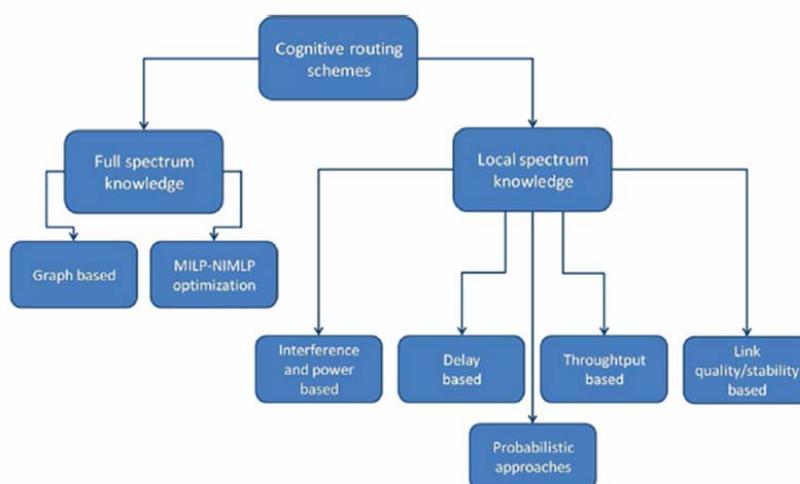
- Consciência do espectro – projetar soluções eficientes de roteamento em redes cognitivas envolve uma ligação forte entre o módulo de roteamento e as funcionalidades de gerenciamento espectral, de tal forma que o módulo de roteamento pode estar continuamente consciente do meio físico para tomar decisões mais precisas. Dentro deste campo, três cenários podem ser possíveis:
  - As informações sobre a ocupação do espectro são fornecidas para o mecanismo de roteamento por entidades externas (como um escalonador de espectro);
  - As informações sobre a ocupação do espectro devem ser recolhidas localmente por cada usuário secundário, através de mecanismos de detecção distribuídos;

- Um modelo híbrido, onde é possível ter uma entidade externa fornecendo informações sobre a ocupação do espectro, além das trocas de informações entre os usuários secundários, já que possíveis áreas de sombra podem ser detectadas localmente, mas dificilmente conhecidas por uma entidade externa;
- Redefinição do conceito de "qualidade de rota" – em função da presença dos usuários primários, a topologia real da rede cognitiva é muito variável. As métricas de roteamento clássicas (largura de banda nominal, *throughput*, atraso, economia de energia, entre outras) devem ser acopladas com novas medidas de estabilidade de rota, como a disponibilidade de espectro e a presença do usuário primário;
- Manutenção/reparação de rotas – o surgimento repentino de um usuário primário em um local pode tornar um determinado canal inútil em uma área, resultando em falhas de rotas imprevisíveis, e que podem exigir recriação de rotas freqüentes, quer em termos de nós ou de canais usados. Neste cenário, procedimentos eficazes de sinalização são necessários para restaurar a rota quebrada com efeito mínimo sobre a qualidade percebida.

#### 4. Taxonomia de Protocolos de Roteamento em Redes Cognitivas

Diversos projetos relacionados à inserção de processos cognitivos em esquemas de roteamento têm sido propostos, principalmente a utilização de algoritmos de aprendizagem para técnicas de roteamento em redes cognitivas [7].

Uma taxonomia dos protocolos de roteamento para redes cognitivas é proposta em [8], onde estes são divididos em duas classes principais: roteamento baseado em conhecimento total do espectro (*full spectrum knowledge*) e roteamento baseado em conhecimento local do espectro (*local spectrum knowledge*), conforme visto na Ilustração 4.



**Ilustração 3: Taxonomia de Protocolos de Roteamento para Redes Cognitivas.**

No primeiro caso, tem-se um mapa de ocupação do espectro disponível para os nós da rede, ou a uma entidade de controle central (escalador de espectro), que pode ser representada como uma base central mantendo dados do espectro, como recentemente promovido pela FCC (*Federal Communications Commission*) para indicar ao longo do tempo e do espaço as disponibilidades de canal no espectro abaixo de 900 MHz e em cerca de 3 GHz.

#### **4.1 Abordagens de Roteamento com Conhecimento Total do Espectro**

As abordagens de roteamento com base neste pressuposto usam ferramentas teóricas para projetar rotas eficientes, diferenciando-se no tipo de ferramenta teórica é utilizada para orientar a concepção das rotas. A primeira sub-classe abrange todas as soluções com base em uma abstração gráfica da rede de rádio cognitivo, ou seja, abordagens baseadas em teoria dos grafos (*graph based*). A segunda sub-classe emprega ferramentas de programação matemática (*MILP-NIMLP optimization*) para modelar e projetar fluxos ao longo da rede cognitiva. Embora essas abordagens muitas vezes sejam baseadas em um cálculo centralizado dos caminhos de roteamento, a sua relevância está no fato de que fornecem limites superiores e valores de referência para o desempenho de roteamento.

Na sub-classe de soluções baseados em grafos, encontram-se 4 propostas. Em [9,10], é proposto um modelo para atribuição de canais e roteamento em conjunto em redes de múltiplos saltos semi-estáticos. Nessa proposta, o sinal do usuário primário é considerado baixo, permitindo que a atribuição dos canais e o roteamento entre os usuários secundários possa ser criado estaticamente. O modelo proposto baseia-se na criação de um grafo em camadas que possui uma série de camadas iguais ao número de canais disponíveis. Os dispositivos do usuário secundário são representados no grafo em camadas com um nó, e sub-nós adicionais, um para cada canal disponível.

Em outra abordagem [11], grafos coloridos representam a topologia da rede. A estrutura do grafo colorido é  $G_c = (N_c, V_c)$ , onde  $N_c$  é o conjunto de vértices, sendo um vértice para cada dispositivo da rede e  $V_c$  o conjunto de arestas. Dois vértices podem ser ligados por um número de arestas até  $M$ , onde  $M$  é o número de canais (cores) com disponibilidade para transmissão no enlace específico.

Diferentemente das outras abordagens, a proposta em [12] tem como objetivo separar o canal de roteamento. Todos os caminhos disponíveis entre os pares de origem e destino são numerados e são definidos padrões de atribuição para cada caminho de todos os canais disponíveis. O roteamento é obtido através da utilização de um algoritmo centralizado representado por um grafo de conflitos, ou seja, cada enlace na rede é ligado com um vértice no grafo de conflitos. Uma aresta é definida entre dois vértices se o enlace correspondente não estiver ativo ao mesmo tempo. O principal objetivo do grafo de conflitos é obter um canal livre de conflitos, através da utilização de uma heurística.

Em [13-15], são introduzidas formulações de *Mixed Integer Non Linear Programming* (MINLP), cujo objetivo é maximizar o fator de reuso do espectro em toda a rede ou equivalentemente, minimizar o uso de banda total em toda a rede. A formulação proposta capta todos os principais aspectos multi-saltos de redes sem fio, como a capacidade do enlace, a interferência e o roteamento.

## 4.1 Abordagens de Roteamento com Conhecimento Parcial do Espectro

Por outro lado, os esquemas de roteamento baseado no conhecimento local do espectro incluem todas as soluções em que a informação sobre a disponibilidade de espectro é localmente construída em cada usuário secundário, através de protocolos distribuídos. Assim, o módulo de roteamento está intimamente ligado às funcionalidades de gerenciamento espectral. Como consequência, além do cálculo dos caminhos de roteamento, o módulo de roteamento deve ser capaz de adquirir informações sobre o estado da rede, como as frequências disponíveis atualmente para comunicação, além de outros dados disponíveis localmente, e trocá-los com os outros nós da rede. Enquanto o estado da rede nas redes *ad hoc* tradicionais é primariamente uma função da mobilidade do nó e tráfego transportado na rede, nas redes cognitivas também é influenciada pela atividade do usuário primário. Como esta atividade é e quais são os modelos adequados para representá-la são elementos essenciais para o projeto de roteamento.

A classificação das propostas na família de protocolos com conhecimento local do espectro pode basear-se na medida específica da “qualidade da rota” utilizada para estabelecer rotas de qualidade. Quatro sub-classes podem ser descritas: o roteamento com o objetivo de controlar a interferência e a potência (*interference and power based*); baseado no atraso (*delay based*); baseado na vazão (*throughput based*) (onde o módulo de roteamento busca a minimização do atraso fim-a-fim e na maximização possível do *throughput*, respectivamente); e soluções onde a qualidade do caminho é estritamente ligada a sua disponibilidade ao longo do tempo e a sua estabilidade (*link quality/stability based*).

Na primeira sub-classe, controle de interferência e potência, a proposta descrita em [16] tem como objetivo descobrir caminhos de peso mínimo em redes cognitivas sem fio *ad hoc*. Uma visão do sistema é apresentada em que o sistema de comunicação é dividido em sistema operacional e de comunicação. O sistema operacional é responsável por selecionar a interface de comunicação sem fio para ser usada em um determinado momento. Interfaces diferentes são usadas para acessar vários sistemas sem fio, tais como celulares (por exemplo, CDMA, TDMA, FDMA) ou WLAN (ou seja, IEEE 802.11 b/g). Cada uma das interfaces está associada com diferentes alcances de comunicação. O uso de um Canal de Controle Comum (CCC) desempenha um papel central no trabalho. A interface dedicada, conhecida como *Common Link Control Rádio* (CLCR) é usada para comunicação entre os nós de rádio cognitivo. As duas principais funções usando a interface CLCR são a descoberta de vizinhos e descoberta e estabelecimento do caminho. Para descobrir uma vizinhança grande, CLCR utiliza uma potência de alta transmissão para alcançar todos os vizinhos em potencial. Nós compartilham com cada outro sua conectividade através de interfaces de rádio diferentes enquanto trocam mensagens via CLCR. A sinalização para estabelecer caminhos entre dois pontos finais também acontece vi CLCR.

O algoritmo distribuído apresentado em [17] aborda o escalonamento, o controle de potência e problemas de encaminhamento. O módulo de roteamento é baseado na noção do Produto Banda Rastro (*Bandwidth Footprint Product - BPF*). O rastro refere-se à área de interferência de um nó para uma potência de transmissão determinada. Como cada nó na rede usa uma série de bandas de transmissão e cada banda tem um

rastrado correspondente à sua potência de transmissão, o objetivo é minimizar BFP em toda a rede, que é a soma de BPFs para todos os nós da rede.

Restrições de interferência são a base do trabalho descrito em [18], onde os autores analisam a troca entre transmissões de único salto e multi-salto para o usuário cognitivo restringir o nível de interferência gerado, de modo que o usuário primário possa tolerar essa transmissão. Com base nos resultados destes autores, propõem dois métodos de roteamento denominados vizinho mais próximo (*Nearest-Neighbor Routing* - NNR) e vizinho mais distante (*Farthest-Neighbor Routing*). Embora os esquemas de roteamento propostos sejam baseados principalmente em uma visão geométrica estática da rede, sem considerar qualquer dinâmica na ocupação do espectro, os parâmetros de QoS são considerados relevantes para a qualidade da transmissão a nível físico.

Na segunda subclasse, baseada em atraso, a qualidade das soluções de roteamento também pode ser medida em termos dos atrasos em estabelecer e manter as rotas multi-salto e para enviar o tráfego sempre através das mesmas rotas. Além de "clássicos" componentes de atraso para a transmissão de informações em redes sem fios, novos componentes relacionados com a mobilidade do espectro (troca de canais e de enlaces) devem ser contabilizados. Métricas de roteamento baseadas em atraso são propostas em [19-22], que consideram componentes de atraso diferentes, incluindo: o atraso de comutação que ocorre quando um nó em um caminho muda de uma faixa de frequência para outro; o atraso baseado no acesso ao meio nos acessos MAC usada em uma dada faixa de frequência; e o atraso em fila com base na capacidade de transmissão de saída de um nó em uma dada faixa de frequência.

Na terceira subclasse, baseada em vazão, duas propostas são descritas em [24,25]. O SAMER (*Spectrum Aware Mesh Routing*), proposta em [24], é um protocolo de roteamento que contabiliza por um longo tempo e por um curto tempo a disponibilidade espectral. SAMER pretende utilizar blocos de espectro disponível através do encaminhamento dos dados de tráfego ao longo do percurso com maior disponibilidade de espectro, sem ignorar condições espectrais instantâneas. Os autores do SAMER definem uma métrica para estimar a disponibilidade do caminho em função do espectro. Já em [25], é proposto o protocolo ROSA, onde as oportunidades para transmitir são atribuídas com base no conceito de utilidade do espectro e as rotas são exploradas com base na presença de oportunidades de espectro com o objetivo de maximizar a utilidade do espectro.

Na quarta subclasse, o SPEAR (*SPEctrum-Aware Routing* [26]) mostra que o espectro disponível é dependente da localização e a introdução de usuários primários normalmente cria ilhas de disponibilidade de espectro diferentes. Como exemplo, em [26] foi apresentado que, usando topologias aleatórias, a probabilidade de encontrar um caminho entre dois nós, forçando os nós a utilizar um caminho com um único canal é significativamente menor em relação à probabilidade de encontrar uma rota saltando entre diferentes canais.

Em [30], a estabilidade do enlace está associada, de forma inovadora, a conectividade global do caminho através de um modelo matemático baseado em grafos de espectro Laplaciano. Os autores introduzem uma nova métrica para peso de rotas (caminhos) que é capaz de capturar a estabilidade do caminho e a disponibilidade ao longo do tempo. Assim, a idéia central é a de atribuir pesos às rotas e caminhos

proporcionalmente à conectividade algébrica da matriz Laplaciana do grafo de conectividade.

Em [31], o SEARCH é um protocolo de roteamento que é projetado para redes cognitivas móveis multi-salto com base nos princípios geográficos de encaminhamento. O protocolo proposto faz o roteamento e as decisões de seleção de canal, evitando as regiões com atividades de usuários primários. Além disso, considera uma série de casos de mobilidade dos nós utilizando uma filtragem preditiva. A ideia principal do SEARCH é descobrir vários caminhos da origem ao destino, que são então combinados no local de destino para formar caminhos com baixa quantidade de saltos.

Uma última família de protocolos que operam com conhecimento local do espectro utiliza abordagens probabilísticas de roteamento (*probabilistic approaches*), onde o usuário secundário oportunisticamente transmite em qualquer banda de espectro disponível durante o curto período da existência da disponibilidade. Essas abordagens são viáveis e úteis nos casos em que o usuário primário vizinho tem períodos curtos de repouso e, como consequência, a disponibilidade do espectro correspondente é limitada no tempo [11].

Em [32] é definida uma abordagem de roteamento baseado em uma estimativa probabilística da capacidade disponível em cada enlace na rede cognitiva. Uma métrica baseada em probabilidade de roteamento é introduzida, onde a definição de métrica baseia-se na distribuição de probabilidade da interferência do usuário primário para o usuário secundário em um dado momento através de um canal determinado.

A Tabela 1 apresenta um sumário de propostas de protocolos de roteamento classificadas por essa taxonomia.

**Tabela 1: Sumário das Soluções de Roteamento Classificadas**

	Propostas Baseadas em	Protocolos	Seleção do Caminho Completo	Seleção do Próximo Salto	Consciência Dinâmica do Espectro	Reconfiguração em Função da Variação do Espectro	Suporte a Mobilidade
Conhecimento Total do Espectro	Grafos	9-12	✓	✗	✗	✗	✗
	Otimização	13-15	✓	✗	✗	✗	✗
Conhecimento Local do Espectro	Potência e Interferência	16-17	✓	✗	✗	✗	✗
		18	✗	✓	✗	✗	✗
	Atraso	19-22	✓	✗	✗	✗	✗
		23	✗	✓	✓	✗	✓
	Throughput	24	✓	✗	✓	✗	✗
		25	✗	✓	✓	✗	✗
	Qualidade/ estabilidade do enlace	26-29	✓	✗	✓	✓	✗
		30	✓	✗	✓	✗	✗
		31	✓	✗	✓	✓	✓
	Probabilidade	32-35	✓	✓	✓	✗	✗

## 5. Considerações Finais

Por ser ainda uma área de pesquisa muito recente, as redes cognitivas ainda apresentam diversos desafios em aberto, considerada em ascensão.

A necessidade de abordagens *cross-layer*, principalmente contemplando as camadas de enlace e de rede, torna a complexidade das soluções ainda maior. Diversas

propostas estão sendo estudadas na camada de rede, tanto em redes cognitivas infra-estruturadas quanto em redes cognitivas *ad-hoc*.

A taxonomia apresentada classifica as atuais propostas para roteamento em redes cognitivas e aponta para uma tendência de utilização cada vez maior de abordagens probabilísticas, visto que o estado exato da ocupação do espectro pode não estar disponível (ou não pode ser dinamicamente reconstruído através de sistemas distribuídos), as decisões de roteamento (e as métricas utilizadas) devem considerar uma visão mais míope da consciência do espectro, onde a probabilidade se torna uma ferramenta fundamental.

A falta de um ambiente real para testes se torna um fator complicador a mais para a validação das propostas já desenvolvidas, considerado essencial para refinar os modelos, algoritmos e sistemas.

## Referências

- [1] M. Sousa, R. Lopes, W. Lopes, M. Alencar. *Redes Cognitivas: Um Novo Paradigma para as Comunicações Sem Fio*. In Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2010, pp. 167-211, Gramado, RS, Brazil, May 2010.
- [2] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen. *Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios*. In Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2004.
- [3] J. Mitola. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Doctor of technology dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [4] J. Mitola and G. Q. Maguire. *Cognitive radio: Making software radios more personal*. IEEE Pers. Commun., 6:pp.13–18, Aug. 1999.
- [5] I. Akyildiz, Y. Altunbasak, F. Fekri, and R. Sivakumar. *Adaptnet: An adaptive protocol suite for the next-generation wireless internet*. IEEE Communication Magazine, 3(42):pp.128–138, 2004.
- [6] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty. *Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey*. Computer Networks, (50):pp.2127–2159, 2006.
- [7] I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, K.R. Chowdhury, *CRAHNs: cognitive radio ad hoc networks*, Ad Hoc Networks 7 (5) (2009) 810–836.
- [8] M. Cesana, F. Cuomo, E. Ekici, *Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions*, Ad Hoc Networks (Elsevier), in press (2010).
- [9] C. Xin, B. Xie, C.-C. Shen, *A novel layered graph model for topology formation and routing in dynamic spectrum access networks*, in: First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005, pp 308–317

- [10] C. Xin, L. Ma, C.-C. Shen, *A path-centric channel assignment framework for cognitive radio wireless networks*, *Mobile Networks and Applications* 13 (2008) 463–476.
- [11] X. Zhou, L. Lin, J. Wang, X. Zhang, *Cross-layer routing design in cognitive radio networks by colored multigraph model*, *Wireless Personal Communications* 49 (2009) 123–131.
- [12] Q. Wang, H. Zheng, *Route and spectrum selection in dynamic spectrum networks*, in: 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2006, vol. 1, 2006, pp. 625–629.
- [13] Y. Hou, Y. Shi, H. Sherali, *Optimal spectrum sharing for multi-hop software defined radio networks*, in: 26th IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM 2007, 2007, pp. 1–9.
- [14] Y. Hou, Y. Shi, H. Sherali, *Spectrum sharing for multi-hop networking with cognitive radios*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 26 (1) (2008) 146–155.
- [15] M. Ma, D. Tsang, *Joint spectrum sharing and fair routing in cognitive radio networks*, in: 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2008, 2008, pp. 978–982.
- [16] C.W. Pyo, M. Hasegawa, *Minimum weight routing based on a common link control radio for cognitive wireless ad hoc networks*, in: IWCMC '07: Proceedings of the 2007 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, pp. 399–404.
- [17] Y. Shi, Y. Hou, *A distributed optimization algorithm for multi-hop cognitive radio networks*, in: The 27th IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM 2008, 2008, pp. 1292–1300.
- [18] M. Xie, W. Zhang, K.-K. Wong, *A geometric approach to improve spectrum efficiency for cognitive relay networks*, *IEEE Transactions on Wireless Communications* 9 (2010) 268–281.
- [19] H. Ma, L. Zheng, X. Ma, Y. Luo, *Spectrum aware routing for multi-hop cognitive radio networks with a single transceiver*, in: 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008, 2008, pp. 1–6.
- [20] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, W. Cheng, *Spectrum aware on-demand routing in cognitive radio networks*, in: 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2007, 2007, pp. 571–574.
- [21] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, W. Cheng, *Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks*, in: IEEE International Conference on Communications, ICC '07, 2007, pp. 6499–6503.
- [22] Z. Yang, G. Cheng, W. Liu, W. Yuan, W. Cheng, *Local coordination based routing and spectrum assignment in multi-hop cognitive radio networks*, *Mobile Networks and Applications* 13 (2008) 67–81.

- [23] H.P. Shiang, M. van der Schaar, *Distributed resource management in multihop cognitive radio networks for delay-sensitive transmission*, IEEE Transactions on Vehicular Technology 58 (2009) 941–953.
- [24] I. Pefkianakis, S. Wong, S. Lu, *SAMER: spectrum aware mesh routing in cognitive radio networks*, in: 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2008, 2008, pp. 1–5.
- [25] L. Ding, T. Melodia, S. Batalama, M.J. Medley, *Rosa: distributed joint routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks*, in: MSWiM '09: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, 2009, pp. 13–20.
- [26] A. Sampath, L. Yang, L. Cao, H. Zheng, B.Y. Zhao, *High throughput spectrum-aware routing for cognitive radio based ad-hoc networks*, in: 3th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrwownCom 2008, 2008.
- [27] G.-M. Zhu, I. Akyildiz, G.-S. Kuo, *STOD-RP: a spectrum-tree based ondemand routing protocol for multi-hop cognitive radio networks*, in: IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2008, 2008, pp. 1–5.
- [28] W. Feng, J. Cao, C. Zhang, C. Liu, *Joint optimization of spectrum handoff scheduling and routing in multi-hop multi-radio cognitive networks*, in: ICDCS '09: Proceedings of the 2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, 2009, pp. 85–92.
- [29] I. Filippini, E. Ekici, M. Cesana, *Minimum maintenance cost routing in cognitive radio networks*, in: Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2009, MASS '09. IEEE 6th International Conference on, 2009, pp. 284–293.
- [30] A. Abbagnale, F. Cuomo, *Gymkhana: a connectivity-based routing scheme for cognitive radio ad hoc networks*, in: IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM 2010, pp. 1–5.
- [31] K. Chowdhury, M. Felice, *Search: a routing protocol for mobile cognitive radio ad-hoc networks*, Computer Communications 32 (18) (2009) 1983–1997.
- [32] H. Khalife, S. Ahuja, N. Malouch, M. Krunz, *Probabilistic path selection in opportunistic cognitive radio networks*, in: IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2008, 2008, pp. 1–5.
- [33] H. Khalife, N. Malouch, S. Fdida, *Multihop cognitive radio networks: to route or not to route*, IEEE Network Magazine 23 (4) (2009) 20–25.
- [34] Talay, A. C. and Altılar, D. T. 2009. *RACON: a routing protocol for mobile cognitive radio networks*. In Proceedings of the 2009 ACM Workshop on Cognitive Radio Networks 2009. CoRoNet '09.
- [35] Talay, A. C. and Altılar, D. T. *ROPCORN: Routing Protocol for Cognitive Radio Ad Hoc Networks*. In Proceedings of the Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09.